Institut für Technische Produktentwicklung

# Design for X

## Beiträge zum 29 DfX-Symposium
## September 2018

Dieter Krause
Kristin Paetzold
Sandro Wartzack
(Hrsg.)

the Design Society

Institut für Technische Produktentwicklung

# Design for X

## Beiträge zum 29. DfX-Symposium September 2018

Dieter Krause
Kristin Paetzold
Sandro Wartzack
(Hrsg.)

DOI: 10.18726/2018_3

The Design Society is a charitable body,
registered in Scotland, number SC 031694

# Inhaltsverzeichnis


## 1 Session: Keynote

CFP-Modeling in industry – a reflection
*Torsten Erbe*..... 1

## 2 Session: Nutzerzentriertes Design

Denn sie wissen nicht, was sie wollen – Plädoyer für ein Nutzerpraxen-orientiertes Design
*Anne Wallisch, Kristin Paetzold*
*Universität der Bundeswehr München* ..... 13

User-Centered Product Design for Older Adults – Comparison and Applicability of Methods
*Olga Sankowski, Dieter Krause*
*Hamburg University of Technology*..... 25

A Deeper Understanding of Students‘ Method Acceptance through Focus Group Interviews
Selin Üreten, Dieter Krause
*Hamburg University of Technology*..... 37

Das Systemverständnis reflektieren – Kritisches Hinterfragen als Einflussgröße in der Analyse
Sven Matthiesen, Matthias Eisenmann, Markus Döllken
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* ..... 49

## 3 Session: Prozessunterstützung in der Produktentwicklung

Eignungsanalyse agiler Prinzipien für die Entwicklung physischer Produkte
*Julian Schrof, Tobias Sebastian Schmidt, Kristin Paetzold*
*Universität der Bundeswehr München*..... 61

Understanding the consequences of severe influences on ongoing product development projects: a tentative framework
*Fausto Guaragni, Kristin Paetzold*
*Universität der Bundeswehr München* ..... 73

## 4 Postersession

Characteristics of a metal additive manufacturing process for the production of spare parts
*A. Atzberger, J. Montero, T. S. Schmidt, M. Bleckmann, K. Paetzold*
*Universität der Bundeswehr München, Federal research institute of materials, fuels and lubricants (WiWeB)* ..... 83

Gestaltung agiler Produktentwicklungsprozesse
*Günther Schuh, Christian Dölle, Jan Kantelberg, Alexander Menges*
*RWTH Aachen* ..... 95

Integration von Versuchs- und Simulationsdatenmanagement in der Produktentwicklung
*Julian Schönwald, David Vahrenhorst, Andreas Chojnacki, Stefanie Zschako, Lukas Sundarp, Kristin Paetzold*
*Universität der Bundeswehr München* ..... 107

Durchgängiges Prototyping mechatronischer Systeme im MBSE Entwicklungsprozess
*Christian Buchholz, Maik Tiemann, Rainer Stark*
*Technische Universität Berlin* ..... 119

Design automation for additive manufacturing applied to branched fluid structures
*Manuel Biedermann, Manuel Schoen, Mirko Meboldt*
*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich)* ..... 131

## 5 Session: Additive Fertigung

Bewertungsmethodik zur Verbesserung der Testfallerstellung auf Basis von SysML

*Mohamad Chamas, Matthias Markthaler, Bernhard Rumpe, Kristin Paetzold*

*BMW Group, RWTH Aachen, Universität der Bundeswehr München* ..... 143

Entwicklung und Validierung von Gestaltungsvarianten geschlossener Pumpenlaufräder für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren

*Dirk Hofmann, Michael Süß, Christine Schöne, Ralph Stelzer, Andrea Kühl*

*Technische Universität Dresden, KSB SE & Co. KGaA* ..... 155

Analyse anlagenspezifischer Fertigungseinflüsse auf die Genauigkeit FDM-gedruckter Bauteile

*Martin Hallmann, David Kunz, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack*

*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg* ..... 167

## 6 Session: Prinzipien für die Entwicklung physischer Produkte Session Digitalisierung in der Produktentwicklung

Designers' Assistant – Using AI to support Technology Intelligence in production unit de-sign departments in large automotive OEMs

*Kate Kujawa, Kristin Paetzold*

*Daimler AG, Universität der Bundeswehr München* ..... 179

Modellbasierte Unterstützung der Entwicklung modularer Produktfamilien

*Michael Hanna, Dieter Krause*

*Hamburg University of Technology* ..... 191

Feedback to Design with Digital Lifecycle-Twins – literature review and concept presentation

*Theresa Riedelsheimer, Kai Lindow, Rainer Stark*

*Fraunhofer Gesellschaft* ..... 203

## 7 Postersession

Virtual Reality unterstützte Kreativitätstechnik: Vergleich mit klassischen Techniken
*Iris Gräßler, Patrick Taplick*
*Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut* ..... 215

Einsatz von Process-Mining zur Erweiterung der semantischen Produktbeschreibung
*Christopher Sauer, Fabian Dworschak, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack*
*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg* ..... 227

Analyse eines Produktentwicklungsprozesses mit Process Mining
*Gazmend Mavraj, Stephan Scheele, Frank Mantwill*
*Universität der Bundeswehr Hamburg* ..... 239

Geometrische Beschreibung fahrfremder Tätigkeiten
*Niko Seebach, Florian Fitzen, Frank Arlt, Beate Bender*
*BMW Group, Ruhr-Universität Bochum* ..... 251

Nutzerorientierte Charakterisierung fahrfremder Tätigkeiten in automatisierten Fahrzeugen
*Florian Fitzen, Niko Seebach, Maximilian Amereller, Kristin Paetzold*
*BMW Group, Universität der Bundeswehr München* ..... 263

Bewertbarkeit unscharfer Mengen am Beispiel der Eigenschaft Produkteinfachheit
*Fabian Pilz, Michael Schabacker, Sándor Vajna*
*Otto-von-Guericke Universität Magdeburg* ..... 271

## 8 Session: Prozessunterstüzung in der Produktentwicklung

Methodischer Ansatz zur Bewertung und Auswahl einer Validierungsumgebung
*Steven Yan, David Nickel, Matthias Behrendt, Albert Albers*
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT), AVL Deutschland GmbH* ..... 283

Testfallgenerierung - Vorgehen zur Lastkollekti-vermittlung durch Data Mining am Winkel-schleifer
*Sven Matthiesen, Matthias Dörr, Sebastian Zimprich*
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* ..... 295

Methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung
*Jonas Reinemann, Tobias Hirschter, Constantin Mandel, Jonas Heimicke, Albert Albers*
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* ..... 307

## 9 Session: Design for X

Einsatz eines Similaritätskriteriums bei der multikriteriellen Optimierung zur Variantenbildung
*Andreas Wilhelm Meyer, Sándor Vajna*
*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* ..... 321

Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen additiv gefertigter Produkte
*Iris Gräßler, Christian Oleff, Philipp Scholle*
*Universität Paderborn* ..... 333

# CPM-Modeling in industry– a reflection

Torsten Erbe

## 1 Abstract

The „Characteristics-Properties Modelling" for product-modelling and "Property-Driven-Development" for process-description - often combined and abbreviated to „CPM/PDD"-Approach presented by WEBER [1] in 2000 is gaining acceptance and dissemination in the scientific environment for the description of products and product development processes.

Confronted with the CPM/PDD-approach at the university, the author intends to give a reflection of the approach after some years of industrial activity. A subjective and therefore limited answer should be given to the question of whether and how the CPM/PDD is used in industry and what are the reasons for this. The "application" of the CPM/PDD-approach in industry will be illustrated by (generalized) examples. Their definition and use in relation to the characteristics and properties of the CPM-approach will be discussed. A subjective and therefore limited conclusion will be derived to the question of whether and how the CPM/PDD-approach is used in/by industry.

*Keywords: CPM/PDD*

## 2 Introduction and scope

The „Characteristics-Properties Modelling" for product modelling and "Property-Driven Development" for process description - often combined and abbreviated to „CPM/PDD-approach" presented by WEBER in 2000 is gaining acceptance and dissemination in the scientific environment for the description of products and product development processes [1]. There are various studies with different scopes and for different areas of application that make use of the approach ranging from - without claiming to be complete - CAX support [1], classification of DfX rules, definition of product maturity [2], design of product service systems [3], requirement-, change- or variant-management [4] as well as solution-(pattern-) catalogues or pattern-solutions [5], [6].

Confronted with the CPM/PDD-approach at the university, the author is grateful to the organizers of the DFX Symposium 2018 to be able to give a reflection of the approach after some years of industrial activity. A subjective and therefore limited answer should be given to the question of whether and how the CPM/PDD is used in industry and what are the reasons for this.

It need to be mentioned that this paper is not intended to – and certainly will not – contribute to the theoretical framework of the CPM/PDD-approach. Rather, the experiences made with the application of the CPM/PDD will be discussed from the authors own experience.

## 3 Product-development-processes in industry at a glance

Development processes in industry are often associated with stage-gate processes. As far as it concerns the experience of the author, this is the predominant case. Those stage-gate-processes are usually formalized and defined by milestones or decision-points which are separating the development phases and reflected in common PDM systems. The phases and milestones are often related to project management requirements, might differ slightly in type and number and the deliverables may contain very particular specifications depending on the business field (i. e. legal requirements by e. g. FDA, FAA, EASA, SEMI etc.), but are to a large extend comparable.

In each of the phases it is attempted to define the „product"[1] in more detail, i. e. to define characteristics and „verify" characteristic-property-relationships and to "validate" the properties by means of various models, tests, etc.. Different domains[2] usually work in parallel in the respective phases.

Although these phases are very similar to those of the known phase models e.g. [7], [8], the sequence of phases is linear. The reason for this can be seen in the fact that the orientation towards the project progress (in particular in time) allows (almost) no "step backwards" from a milestone to preceding.

The requirements for the representation of results within the project phases vary considerably - within the phases as well as for different companies, departments, etc.. The repetitive nature of some design tasks is usually proportional to the level of detail of representation and specifications in models and PDM systems (as well as e. g. company-standards, Supplier Instructions etc.). Together with company-internal technical terminology it becomes difficult to answer to the question whether the CPM/PDD approach is used in industry or not straight forward.

## 4 Brief view on CPM/PDD

The CPM/PDD-approach has been discussed in detail several times, so no further (detailed) description is given here and relevant publications of WEBER are referred hereto. In simple terms, CPM emphasizes the difference between characteristics and properties and PDD emphasizes the more and more elaborate description of characteristics and properties by iterations of analysis and synthesis steps (Fig. 1 shows the common illustration of CPM/PDD).

---

[1] The term „product" is used very generally and can therefore not be understood as an abstract sum e. g. of mechanical, electrical software etc. properties.

[2] These do not necessarily have to correspond to the classic definitions of „domains" of concurrent-engineering or mechatronics, but rather to all kinds of administrative units, departments, etc. in an industrial context.

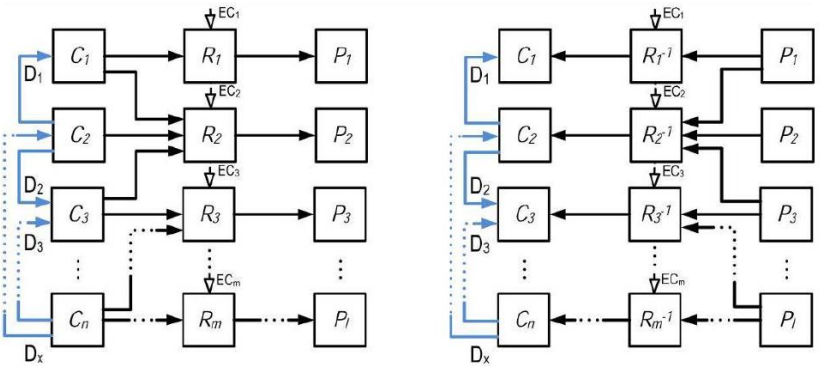



Fig. 1: Analysis and synthesis according to the CPM/PDD-approach (with relations R, characteristics C, properties P and environmental influences EC and dependencies between characteristics D). The implied reversibility of the relations need to be understood only symbolically, not mathematically. (based on [6])

## 4.1 Notes on use of the CPM/PDD-approach

From the authors perspective some aspects of the CPM/PDD-approach should be pointed out. Those aspects were - and often are - discussed in detail by WEBER, however the author has made the experience that it is helpful, especially with a background in "classical European schools" (e. g. [7], [8]), to keep the aspects in mind.

- The distinction between characteristics and properties has been discussed several times and alternative terms can be found for this (see Tab. 1). Nevertheless the terminology of the CPM/PDD-approach is very clear and well defined.

- Many terms (e. g. function, principle, structure) known from design process descriptions are (almost) meaningless in the CPM/PDD approach.

- Both characteristics and properties can be requirements for a technical product. Since both are always given incompletely, further characteristics and properties are worked out during development.

- Characteristics and properties, usually several of both, are connected by relations, whereby these relations are usually not linear, interlinked, continuous or reversible and can be applied only under certain environmental conditions.

- PDD is an approach to model design process, it is not a process model by its own. The approach considers analysis and synthesis to be carried out iteratively until the characteristics are defined sufficiently precisely.

The author considers all properties of a product, which can be directly determined by the designer (in simple terms: write to a drawing or in a program, set on a controller, etc.) as characteristics. The characteristics determine all properties of the product and each property is linked to at least one characteristic. Properties are therefore the effect of the characteristics of the technical product.

Tab. 1: Selection of different definitions for the terms "property" and "characteristic" with respect to the influence of the designer (simplified from [6])

| Reference | Can be | |
|---|---|---|
| | Directly influenced by the designer | Not directly influenced by the designer |
| WEBER [10] | Characteristics | properties |
| HUBKA [11], [12] | Elementary Designproperties | External properties |
| SUH [13] | *"Design parameters"* as well as - to some extend - the dependencies of the *"design matrix"* | *„functional requirements"* |
| EHRLENSPIEL/PONN/ LINDEMANN [14] | Direct properties<br>Consistence properties | Indirect properties<br>Relational characteristics<br>Functional characteristics |
| BIRKHOHER/WÄLDELE [15] | Independent properties | Dependent properties |

## 4.2 The reflection on the state of CPM/PDD-approach by WEBER

In 2012 WEBER described the state of the concept and took a critical review on what happened in the years since 2000 [9]. He noted, among others, that:

- „Testing" the approach with different questions in the scientific context, not always gained ground-breaking new findings, but a falsification example could also not be found

- It has not yet been possible to conclusively describe characteristic-property networks. Those are considered to be particularly important for describing/structuring development processes.

- He further noted that a comprehensive implementation and review of possible benefits in industrial practice is still pending and the CPM/PDD-approach has remained essentially limited to mechanical characteristics.

The last point serves as a starting point for the author. The assessment that the CPM approach is not used in industry is not shared by the author, his answer would rather be: It depends. The the question whether CPM/PDD is used in industry will be discussed from the authors' own experiences - subjectively and thus to a limited extent.

# 5 Applications of CPM/PDD in industry

Also at the risk of conveying a false basic impression at the very beginning, it must be noted that the CPM/PDD approach has never occurred to the author in his industrial practice. It is essentially unknown. Nevertheless, there are examples in industrial practice which are following a very similar approach or correspond to those explicitly described by WEBER.

A few of those examples are given below. It should be pointed out that the terms are borrowed from the industrial context and that the terms model, method and tool are not always clearly distinguished in the same context.

## 5.1 Examples

The estimation and evaluation of the influence of design decisions on the behaviour of a product is widespread in industrial practice. In the context of product development today it is common to "simulate" components, assemblies or entire products including a variety of use cases. For this you will find a whole zoo of different "models". Basically, these reduced representations always have the purpose of investigating (particular) properties that result from the (again: particular) characteristics.

### 5.1.1 FEM

The closest example for the designer are FEM[3] simulations. These not only consider mechanical but also thermal, magnetic and electrical properties, individually or altogether and under certain load cases. In all cases, a large set of „variable parameters" is compared with a large set of „parameters that are not variable" in a model which is representing external conditions and relations.

FE-models are often representing parameters from more than one domain and used for optimization of parameters (e.g. linking mass/topology-optimization with tolerance models). Often these models are used or only developed in order to optimize product behaviour specified by variable parameters and non-variable parameters. These parameters are subject to constant changes in quantity and quality during the development process. Therefore, their determination often takes a large part of the time for the modelling and therewith of the design process.

The above-mentioned "parameters" are not always the same as properties and characteristics of the CPM/PDD approach by definition. Though mechanical characteristics in the CPM sense are almost always varied and considered in relation to properties, however, different "use cases" are also considered (e. g. load cases in FEM). From a CPM-point of view those use cases often take different the environmental conditions into account.

### 5.1.2 FMEA

The use of models is not limited to the so-called "early phases". A very common example of this are "risk assessments" like DRFBM[4] or FMEA[5], which are basically concerned with assessing the effect of characteristics on properties under certain environmental conditions during different live cycles. Very reduced and simplified those approaches assessing the product or process trying to identify "malfunctions" or "undesired behaviour" and an attempt is made

[3] FEM …finite element model

[4] DRFBM …Design Review Based on Failure Mode

[5] FMEA …Failure mode and effects analysis

to change design parameters to ensure the "function" of the product or process etc. which can be understood as implementation of the PDD approach.

These considerations take often properties AND characteristics into account and may add further ones. A classic example of this is the robust design (e.g. poke yoke, changing of safety margins/factors or protective covers for sensible parts, which are not part of the product etc.) or even very granular things like the imprinting of article numbers on parts in order to minimize search and tracing cost. To some extend the environment could be adapted as well (e.g. restricting the handling loads or specifying certain or new jigs and tools) and can therefore be – generously interpreted - considered as a characteristic.

The FMEA was recognized by WEBER as an interesting application for the CPM/PDD approach as [16]. Interesting is the option to change of environmental conditions. Difficult is the term "failure mode" and "function" which is not always consistent during design and risk assessment and is hard to "translate" it into the CPM/PDD terminology.

### 5.1.3 From Cause-effect considerations to impact-models

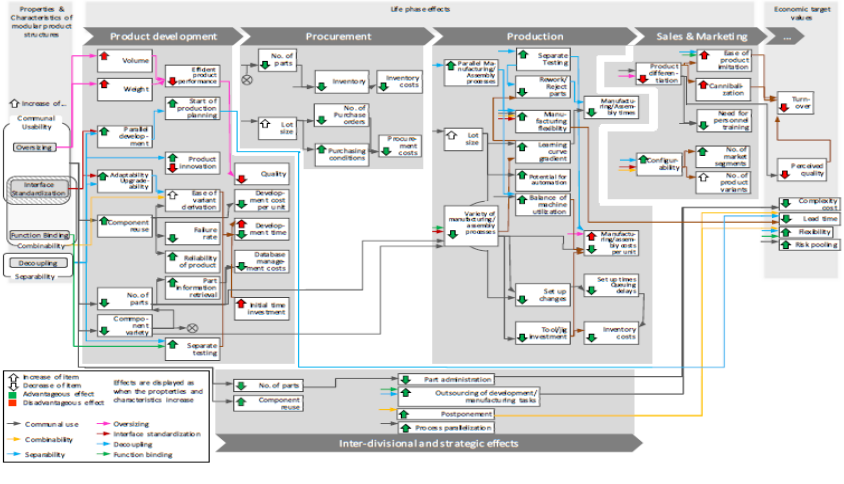
Another example for the application of the CPM/PDD approach are cause-effect-considerations which are - usually without realizing it- omnipresent in product development.

This procedure corresponds to the intuitive "if-then" logic (e.g. feature A becomes larger, property X becomes smaller) is very common but hardly formalized. In general, based on individual properties or characteristics, the latter are in most cases varied (usually individually) and " estimated" or roughly calculated which effects changes will have.

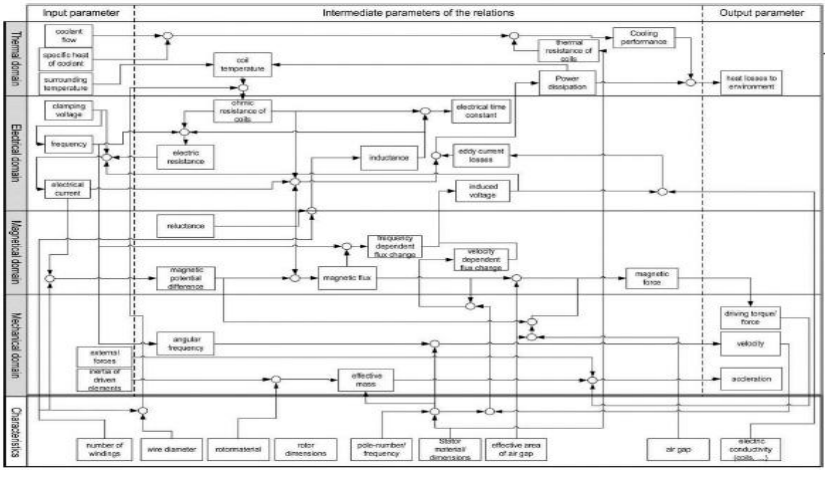
With increasing experience of the engineers, rules of thumb and implicit knowledge are used to roughly quantify terms such as "large" and "small" or at least to estimate the magnitude of change/impact. With the appropriate experience, diverse solution principles/patterns are quickly compared and "fundamental feasibility" is examined.

For complex/interlinked dependencies or at the edges of technical or physical experiences (where experience often does not exist) these characteristic-property-dependencies are represented graphically and impact-models or change-propagation-models [4], [6], [17] are created. They interlink certain properties and characteristics in order to map the effect of a characteristic change on the desired properties - and vice versa. In these considerations and

models, the focus is on the ability to influence the parameters and thus the differentiation between properties and characteristics as emphasized in the CPM/PDD.




a)




b)

Fig 2: Although similar in appearance, impact models differ according to purpose and application; a) structure-impact during different life phases, b) actuator principle representation. Common are indicators that indicate the effects of changes. In a) coloured arrows, in b) arrows with "+" and "-". Pictures from [4] and [6]

A particular advantage of impact-models is that often a transparent cause-effect relationship can be shown (i.e. to team members of other disciplines or

even non technicians) and it can usually be used in both directions. It is also possible to further detail individual relationships in the sense of PDD (e.g. the E-modulus of an adhesive depends on temperature, the latter becomes a "characteristic").

Especially when assessing feasibility, these models can be used to quickly generate answers and identify focal points for design changes. However, formalised, i.e. paper- or computer-based impact models have the disadvantage that they fix a specific solution pattern. This means that the properties and characteristics become fixed and a comparison between different solution patterns is difficult. A further disadvantage is that the development of impact models involves a great deal of effort, which - even though the models might be reusable - is often difficult to justify in project working environment.

Furthermore, the more detailed the impact models become, the more confusing and the less manageable they are in terms of the advantages mentioned above. Therefore, often only "extracts" of individual models are considered, which leads to the fact that often new (partial) models are generated and detailed independently causing inconsistencies between the models and property and characteristic sets.

## 6 Discussion

This contribution was intended to show that the distinction into parameters that can be directly influenced and only indirectly influenced underlying the CPM/PDD approach is applied in the industrial context. Due to the less strict terminology used in industry and the sometimes earmarked assignment of which parameters can be "directly influenced" an application of the CPM/PDD-approach cannot be pointed out.

Nevertheless, it can be assumed - in terms of an outlook - that a clear definition as proposed in the CPM/PDD-approach will play an increasing role due to the trend of interlinking of models in product development, e.g. in the context of model-based system engineering or to ensure the consistency of domain-specific models in parallel development processes/concurrent engineering.

## Acknowledgement

I thank the organizers of the DFX Symposium 2018 for the opportunity to share and discuss my experiences with the CPM/PDD approach.

## Literatur


[1] Weber, C.; Werner, H.: Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells. In: Proceedings of DfX 2000, pp. 126-142. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.

[2] Weber, C.: Looking at "DFX" and "Product Maturity" from the Perspective of a New Approach to Modelling Products and Product DevelopmentProcesses. In: Krause, F. -L. (ed.), Proceedings of the 17th CIRP DesignConference, The Future of Product Development, pp. 85-104. Springer, 2007.

[3] Weber, C.; Steinbach, M.; Botta, C.; Deubel, T.: Modelling of Product-Service Systems (PSS) Based on the PDD Approach. In: Marjanovic, D. (ed.), Proceedings of Design 2004, pp. 547-554. Faculty of MechanicalEngineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2004.

[4] Hackl, J.; Krause, D.: Towards an Impact Model of modular Product Structures, In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 2: Product, Services and Systems Design, Vancouver, Canada, 2017, pp. 151-160.

[5] Wanke, S.: Neue Konzepte zur Verwaltung und Bereitstellung von Lösungen im Produktentwicklungsprozess – CPM/PDD-Lösungsmuster als Grundlage eines verhaltensbeschreibenden Lösungskataloges. Dissertation Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2010. Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 48.

[6] Erbe, T.; Weber, C.; Paetzold, K.: Actuation Principle Selection – an Example for Trade-off Assessment by CPM-Approach. In: Culley, S. J.; Hicks, B. J.; McAloone, T. C.; Howard, T. J.; Lindemann, U. (eds.), Proceedings of ICED 11, Vol. 4, pp. 222-229. The Design Society, Glasgow, 2011.

[7] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI, Düsseldorf, 1986.

[8] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme/ Design Methodology for Mechatronic Systems. VDI, Düsseldorf, 2004.

[9] Weber, Chr.: „Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz",

In: Proceedings of the 22rd Symposium Design For X, Bamberg/Erlangen, 2012.

[10] Weber, C.: CPM/PDD – An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In: Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium, pp. 159-179. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 2005.

[11] Hubka V. Theorie der Maschinensysteme. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1972

[12] Hubka V. Theorie der technischer Systeme. 2nd Edition. Berlin-Heidelberg. Springer-Verlag, 1984

[13] Suh N. P. Axiomatic Design. Oxford University Press, 2001

[14] Ponn J. and Lindemann U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Berlin-Heidelberg. Springer 2008

[15] Birkhofer, H.; Wäldele, M: The Concept of Product Properties and ist Value for Research and Practice in Design Birkhofer. In: Norell, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (eds.), Proceedingsof ICED 09, Vol. 2, pp. 227-228. The Design Society, Glasgow, 2009.

[16] Conrad, J.; Deubel, T.; Koehler, Chr.; Wanke, S.; Weber, Chr.: change impact and risk analysis (CIRA) combining the CPM/PDD theory and FMEA methodology for an improved engineering change management. International conference on engineering design, ICED07 28-31 August 2007, CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE, PARIS, FRANCE

[17] Koehler, Chr.; Conrad, J.; Wanke, S.: Weber, C.: A matrix representation of the CPM/PDD approach as a means for change impact analysis. In: Proceedings of DESIGN 2008, Vol. 1, pp. 167-174, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2008.

# Denn sie wissen nicht, was sie wollen – Plädoyer für ein Nutzerpraxen-orientiertes Design

Anne Wallisch[1], Kristin Paetzold[1]

[1] *Institut für Technische Produktentwicklung*
*Universität der Bundeswehr München*

## Abstract

With regard to older people and the products to be designed for them, two approaches are often mentioned: Inclusive design and user-centered design. To overcome the weaknesses of both, the paper introduces a third one. During the user information gathering for a development of mobility assistence for older people it shows up that the requirements for the technical system can be recorded most appropriately if they are derived from concrete user practices. By analysing the specific life situation and practice of older people, functional, emotional and social requirements can not only be identified, but also understood in their contextual embedding. The system design is thus characterized by a particular high integrability of the solution in everyday senior citizen life.

*Keywords: user-centered design, user practices, older and diasbled people*

## 1 Einleitung

Technische Systeme sollen dabei helfen, die Herausforderungen der gesellschaftlichen Überalterung gut zu meistern. Damit stellt sich die Frage, wie diese gestaltet sein müssen, um reale Nutzerbedarfe, die weit über physische Leistungseinschränkungen hinausgehen, bedienen zu können. Während mit Metho-

den des nutzerzentrierten Designs der Nutzer ganz grundsätzlich zur Bezugsgröße in der Entwicklung gemacht werden soll, zielt der Ansatz des Inclusive Design darauf ab, die spezifischen Bedürfnisse bestimmter Nutzergruppen, wie etwa älteren Menschen, bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Beide Philosophien stoßen jedoch an ihre Grenzen, wenn sie die kontextuelle Einbettung konkreter Nutzerbedürfnisse zugunsten technologischer Machbarkeit vernachlässigen. Zwar berücksichtigt die Entwicklung zukunftsorientierter Produkte und Dienstleistungen zunehmend auch typische, über eine rein ergonomische Betrachtung hinausgehende, altersbedingte Leistungseinschränkungen physischer und psychischer Natur, der Fokus liegt dennoch hauptsächlich auf der Betrachtung der Produktfunktionalität, die es erlaubt, die Leistungsfähigkeit technischer Systeme auf Basis von eigenschaftsorientierten Modellierungsansätzen für alters-, sozial- und krankheitsbedingte Einflüsse auf den individuellen Nutzer anzupassen.

Dabei sollen die technischen Systeme zur Unterstützung älterer Menschen möglichst „unsichtbar" bleiben, um nicht sofort als Defizitausgleich erkannt zu werden. Stigmatisierung zu vermeiden ist zwar eine wichtige Voraussetzung für die nachhaltige Akzeptanz eines technischen Systems, doch lässt sich auch diese allein noch nicht mit einer tatsächlichen Produktnutzung gleichsetzen. Die Nutzung wird insbesondere dann sehr wahrscheinlich, wenn sie sich leicht in bereits bestehende Alltagsroutinen eingliedern lässt. Die vorliegende Arbeit plädiert daher dafür, nicht Nutzerbeschreibungen, sondern die Beschreibung der Nutzerpraxen in den Fokus der Anforderungsanalyse zu stellen.

Dazu werden in Kapitel 2 zunächst die Hauptcharakteristiken der traditionellen Design-Methodologien herausgearbeitet und gezeigt, auf welche Weise jeweils die Beschreibung der Nutzerbedürfnisse erfolgt. In Kapitel 3 werden spezifische Eigenschaften der überaus heterogenen Nutzergruppe zusammengetragen und herausgearbeitet, inwiefern die etablierten Ansätze diese erfassen können. Im Zuge dessen wird ein praxistheoretischer Zugang präsentiert, der helfen kann, bestehende Lücken zu schließen. Ziel des Beitrags ist es, den Mehrwert dieses Ansatzes gegenüber den konservativen Ansätzen der Nutzerbeschreibungen zu elaborieren. In Kapitel 4 wird das empirische Vorgehen vorgestellt, um dessen methodologische Einlösung zu prüfen. Als Anwendungsfall dient die Entwicklung eines technischen Systems zur Mobilitätsunterstützung für Ältere. Auf die kritische Würdigung der Ergebnisse in Kapitel 5 folgt schließlich eine kurze Zusammenfassung und Reflektion des gewählten Ansatzes.

## 2 Produkte für Ältere gestalten

Bezogen auf ältere Menschen und die für sie konzipierten Produkte gibt es in der Literatur zwei oft genannte methodische Ansätze, die sich nicht direkt widersprechen, aber gegenläufigen Grundgedanken folgen: Beim Inclusive Design werden Anforderungen und Probleme der Nutzer sowie konzeptionelle Lösungsideen auf Basis von sieben Richtlinien abgeleitet, die der Entwickler allein oder im Produktentwicklungsteam nacheinander befolgt, dem Ansatz der Nutzerzentrierung zufolge sollen Anforderungen und Lösungsvorschläge im Idealfall direkt von den Nutzern selbst stammen.

### 2.1 User-centered Design

User-centered oder human-centered Design erfasst das Konzept der Einbeziehung der Nutzer in den Designprozess interaktiver Produkte, indem es deren Bedürfnisse und verschiedene Kontexte versteht, um daraus die Designanforderungen abzuleiten [1]. Ziel ist es, ein Produkt zu entwerfen und zu entwickeln, das sich an den Bedürfnissen und Interessen seiner Nutzer orientiert, so dass sie es nützlich und nutzbar finden. Dies erfordert dies eine aktive Einbindung des Anwenders in den Konstruktionsprozess [2]. Gleichzeitig geht der Nutzwert weit über die reine Praxistauglichkeit hinaus und umfasst das gesamte Nutzungserlebnis des Produktes [3]. Die Erfahrungs- und Wissenslücken zwischen Designern und Anwendern sind jedoch groß, wenn Produkte für ältere Menschen entwickelt werden, die eine begrenzte Rolle im Design haben und im späten Designprozess oft auf Tester reduziert werden [4]. Daher wird kritisiert, dass die Bedürfnisse und Erwartungen älterer Menschen in der Designpraxis nicht richtig eingeschätzt werden [5]. Es fehlen spezifische Methoden, allein um die Heterogenität der älteren Nutzergruppe in einem repräsentativen Nutzer abbilden zu können [6].

### 2.2 Inclusive Design

Wird in der Produktgestalt auf eine spezifische Eigenschaft der Nutzergruppe fokussiert, kann diese den Nutzer als einem bestimmten Altersbild zugehörig stigmatisieren. Inclusive oder auch Universal Design bzw. Design for All zielt darauf ab, eine möglichst breite Nutzbarkeit eines Produkts für sehr verschiedene Anwender zu erschließen [7]. Hinter den synonym verwendeten Begriffen verbirgt sich der Anspruch, die Gestaltungsvorgaben für ein Produkt auf die Bedürfnisse älterer und/oder eingeschränkter Personenkreis zu erweitern [8]. Dabei gelten sieben Gestaltungsprinzipien bzw. Gütekriterien, die allerdings eher weichen Charakter haben und nicht als Modellbedingungen oder handlungsleitende Konstruktionsschritte ausformuliert sind: breite Nutzbarkeit,

Flexibilität in der Benutzung, einfach und intuitiv, sensorisch wahrnehmbare Informationen, Fehlertoleranz, geringer körperlicher Aufwand, Größe und Platz für Zugang und Benutzung [9]. Hierbei besteht die Gefahr, dass bei der Gestaltung des Prototyps ein traditioneller Designansatz verfolgt und dieser schließlich auf einige spezifische Anforderungen in der Bedienbarkeit angepasst wird.

## 2.3 Grenzen der traditionellen Ansätze

Selbst der direkte Austausch mit den Nutzern ist kein Garant, die benötigten Informationen für eine adäquate Anforderungsermittlung zu erhalten: Übersetzungsbarrieren in beide Richtungen machen es nicht immer einfach, die Informationen vom Anwender zu bekommen, die der Ingenieur benötigt. Wissen kann explizit, implizit und latent vorliegen, doch nicht auf jede Ebene kann der Wissensträger gleichermaßen zugreifen [10]. Explizites Wissen kann am Einfachsten im Gespräch geteilt werden. Darüber hinaus können Ideen und Gedanken auch durch Beobachtung identifiziert werden. Beobachtete Interaktionen sind nicht immer selbsterklärend, ihr Verständnis basiert auf einer impliziten Wissensbasis, die von der beobachtenden und der beobachteten Person geteilt werden muss. Auch zu latentem Wissen sind Beobachtungen der bessere Zugang. Wenn im Zuge der Produktentwicklung allerdings der Nutzer erst in der Interaktion mit einem bereits entwickelten Prototyp beobachtet wird, ist die Nutzerperspektive für die frühe Entwicklungsphase bereits verloren. Daher stellt sich die Frage nach alternativen Zugängen zu latentem Nutzerwissen.

# 3 Praxisorientierter Zugang

Ältere Nutzer haben andere Anforderungen an Produkte als jüngere. Aufgrund des zunehmenden Alters führen Veränderungen in der Umwelt zu Unsicherheit in bis dahin bekannten Situationen, und diese werden daraufhin oft gemieden [11]. Kognitive, sensorische und motorische Einschränkungen lassen einige Aktivitäten nicht mehr zu, was auch zu wachsenden Defiziten bei anderen Kompetenzen führt [12]. Insbesondere Routinen als Sicherheitsanker sind für die Älteren von enormer Bedeutung [13], weshalb sie neuer Technik oftmals ablehnend gegenüber zu treten scheinen. Zudem haben Ältere oft bereits individuelle Bewältigungsstrategien für bestimmte Problemlagen entwickelt [14]. Zum einen werden aber keine Lösungen gebraucht, wo keine Probleme wahrgenommen werden, zum anderen müssen technische Systeme selbst dann mit den bisher verfolgten Strategien in Konkurrenz treten. Am Wahrscheinlichsten scheint daher eine aktive Nutzung, wenn sich das zu entwickelnde technische System an den bereits existierenden Handlungspraxen der Nutzergruppe orientiert. Hierbei bestehen maßgeblich drei Herausforderungen [15]:

- diejenigen Nutzerpraxen zu identifizieren, in denen konkrete Unterstützungsbedarfe bestehen,
- die entsprechenden Praxen detailliert erfassen und Form und Umfang der benötigten Unterstützung in Anforderungen übersetzen
- die entwickelten Systeme auf den erreichten Grad an Praxistauglichkeit testen und weiterzuentwickeln, bis eine gelungene Integration in die alltägliche Lebensführung möglich ist.

Die ersten beiden Schritte dieser Heuristik zielen auf die Identifikation konkreter Bedürfnisse. Sie werden hier bei der Entwicklung eines technischen Systems zur Mobilitätsunterstützung für Ältere auf ihren Mehrwert gegenüber konservativen Ansätzen der Nutzerbeschreibung hin überprüft.

## 4 Aufbau der Untersuchung

Zentrale Merkmale des hier gewählten Vorgehens zur Analyse von Szenarien der alltäglichen Lebensführung [16] sind der partizipative Ansatz und der Einbezug von Elementen der Feldforschung. Bedürfnisse und Werte der Menschen sind meist Teil des latenten Wissens. Eine Möglichkeit, es zu rekonstruieren, besteht darin, den Denkprozess mit einem konkreten Ereignis oder einer konkreten Situation im Leben der Menschen zu verbinden. Dieser Ansatz wurde hier auf das Anwendungsfeld „Mobilität" übertragen. Der Zugang zum Feld erfolgte über ein Alten- und Service-Zentrum, dessen Leiter in der Funktion eines Gatekeepers [17] gebeten wurde, passende Forschungspartner/-innen direkt anzusprechen, da er bereits das Vertrauen seiner Klientel genießt. Es beteiligten sich acht Personen an der aus Einzelinterviews mit biographischen Anteilen und Praxisdemonstrationen, und zweimal jeweils fünf Personen an einer Fokusgruppendiskussion und qualitativen Prototypenevaluierung bestehenden Erhebung. Die Altersspanne der Teilnehmer beträgt 63 bis 88 Jahre bei einem ausgewogenen Geschlechterverhältnis. Während die Interviews insbesondere auf biographische Anteile und die Reflexion der alltäglichen Lebenssituation und Handlungspraxen abzielen, wurde der flexibel eingesetzte Leitfaden für die Fokusgruppendiskussion bereits problemzentriert gestaltet. Die Evaluierung dient der Validierung sowohl der mittels Literaturstudium erworbenen Kenntnisse zu den Mobilitätsproblemlagen und -praxen Älterer durch die Forschungspartner als auch der im Verlauf der Erhebung gesammelten Nutzerdaten selbst. Die Praxisdemonstrationen erfolgten anhand der von den Teilnehmenden mitgebrachten Mobilitätsunterstützungen. Die Älteren zeigten sehr bereitwillig ihre Handhabe von Rollatoren, Krücken, Fahrrädern. Während der Benutzung wurden sie gebeten, ihre Wahrnehmung der Handhabe zu verbalisieren.

Für die Auswertung wurden alle Gespräche mit Erlaubnis aufgezeichnet und für die Analysen transkribiert. Wenn es darum geht, individuelle Motive für Mobilitätshandeln zu erfassen ohne dabei am objektiven Sinn des pragmatischen sich fortbewegen Wollens zu verhaften, sind Verfahren der rekonstruktiven Sozialforschung angezeigt. Eine Interpretation von Handlungen anderer erfolgt stets vor dem Hintergrund eines nicht explizierten Kontextwissens, das von bestimmten Gesellschaftsmitgliedern geteilt wird. Vor diesem Hintergrund ist gerade das nicht geteilte Kontextwissen zwischen jungen Produktentwicklern und älteren Produktnutzern eine Herausforderung im Entwicklungsprozess. Die Dokumentarische Methode [18] schlägt hier eine Auswertung in zwei Schritten vor. Auf der Ebene der formulierenden Interpretation wird auf der Ebene des immanenten Sinngehalts verblieben, es wird reformuliert, *was* gesagt wurde, während die anschließende reflektierende Interpretation des Materials auf das *Wie* fokussiert und beschreibt, wie beispielsweise eine Person oder Gruppe ein spezifisches Thema oder Problem bearbeitet.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Eine zentrale Herausforderung bei der Produktentwicklung besteht darin, den Begriff der Funktionalität auf die Beschreibung des Menschen zu übertragen, um die Voraussetzungen zu schaffen, die Anwendungsszenarien für technische Systeme durch die Zusammenführung verschiedener Perspektiven zu differenzieren. Daraus folgt, dass die unmittelbare Lebenssituation älterer Menschen zum Ausgangspunkt für eine sinnvolle Produktentwicklung gemacht werden muss. Die Lebenssituation umfasst den praktischen Lebensstil, Ressourcen und Einschränkungen der Dimensionen der Lebenssituation und Motivationen für den Einsatz von Technik. Daraus ergeben sich Probleme in verschiedenen Tätigkeitsfeldern, die die Grundlage für die Entwicklung von technischen Unterstützungssystemen bilden sollten.

### 5.1 Mobilitätsbedürfnisse im Alter

Der Gesprächsstimulus wurde mit der Frage gesetzt, was Mobilität für die Interviewpartner bedeutet. Diese sehr offene Eingangsfrage sollte es den Älteren ermöglichen, selbst zu entscheiden über welche Aspekte zu sprechen ihnen besonders bedeutsam scheint. Diese Aspekte geben Aufschluss auf die jeweiligen individuellen Relevanzstrukturen und erlauben damit letztlich Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden Nutzerbedürfnisse. Die Teilnehmer thematisierten sowohl Bewegung als auch Beweglichkeit, wobei letztere als Bedingung für erstere beschrieben wurde. So wurden physische Einschränkungen als Hauptursache für Verkleinerungen des gesamten Bewegungsradius beschrieben, welche

wiederum zu veränderten Anforderungen an die (technischen) Mobilitätsunterstützungen führen. In welchem Umfang sich diese Verkleinerung vollzieht und wie diese bewertet wird, hängt stark von biographischen Aspekten ab. So zeigte sich, dass die Älteren, die bereits in frühen Jahren ein sehr aktives Leben geführt haben, verschiedene Strategien ergriffen, um ihre Aktivitäten zu erhalten: Einige zogen vom Land in die Stadt, um kürzere Wege und bessere ärztliche Betreuung zu haben, andere stiegen nach der Erfahrung konditioneller Grenzen auf Elektrofahrräder um, wieder andere verlegten ihren Aktionsradius weg vom Straßenverkehr ins Grüne und/oder nutzten Fahrdienste von Pflegeeinrichtungen. Die immer schon weniger Aktiven zogen sich vergleichsweise stärker zurück, ohne dies jedoch als Einschränkung ihres Bewegungsradius auszudeuten. Dabei spielt das soziale Umfeld eine erhebliche Rolle: In (Klein-)Gruppen trauen sich die Älteren mehr zu und unterstützen sich gegenseitig bei allgemeinen Aktivitäten. Auch sind sie selbst die wichtigste Informationsquelle was technische Produkte angeht. Ihren Freunden vertrauen sie, weil *„die ja meist ähnliche Tagesabläufe haben und man hilft sich dann gegenseitig*" (Forschungspartner). Gemeinsam probieren sie neue Dinge aus, die wiederum zu gemeinsamer Aktivität führen und mobil halten, während weniger vernetzte Personen dazu neigen, Neues zu scheuen, oft mit der Begründung, dies nicht zu „brauchen". Darin spiegelt sich, dass Mobilität im Alter über die Fähigkeit das eigene Leben weitgehend autonom zu meistern hinaus auch eine starke sozialintegrierende Funktion zukommt.

## 5.2 Nutzerwünsche und Nutzungspraxen

Einerseits sind viele Alltagshandlungen der Älteren durch etablierte Routinen vorstrukturiert und entziehen sich dem Bewusstsein. Dadurch entziehen sich auch zentrale handlungsleitende Motive dem Bewusstsein, so dass die Nutzer entsprechende Fragen nach ihren Bedürfnissen und Wünschen trotz bester Absichten nur schwer beantworten können. Andererseits fehlt es den Nutzern oft an ausreichend Vorstellungskraft und Ausdrucksfähigkeit, radikale Innovationen zu kommunizieren. Die Herausforderung liegt also nicht nur in der Übersetzung qualitativer Nutzerwünsche in quantifizierbare technische Spezifikationen, sondern insbesondere auch darin, diese Nutzerwünsche überhaupt erst adäquat zu erfassen. Direkt danach befragt, welche Funktionalität, Gerät, Unterstützung und dergleichen sie sich für ihre alltäglichen Mobilitätsanforderungen wünschen würden, reagierten die Forschungspartner insgesamt erstaunlich verhalten. Grundsätzlich befürworteten die Älteren Neuentwicklungen, hinsichtlich ihrer eigenen Lebenswirklichkeit jedoch schienen ihnen keine konkreten Anforderungen einzufallen. Eine Herausforderung besteht darin, die Älteren so gut in ihren Tagesabläufen zu kennen, dass überhaupt die „richtigen" Fragen gestellt werden können: Indem der Interviewführende die Rekonstruktion des

Alltagshandelns durch gezieltes Nachfragen anstoßen muss, rahmt er dieses im Sinne seiner eigenen Vorannahmen. Die Anbindung der Bedarfserhebung an konkrete Nutzerpraxen verspricht hier eine forschungspragmatische Auflösung, denn meist haben die Älteren selbst bereits Strategien zur Bewältigung ihrer Probleme entwickelt und interpretieren diese nicht mehr als Solche. Werden diese Problemlagen ausschließlich ingenieursseitig rekonstruiert, kommt es zu einer systematischen Verzerrung der Anforderungsermittlung, da die subjektive Ausdeutung einer Problemlage durch den Nutzer unberücksichtigt bleibt.

Tabelle 1: Wahrnehmung von Bedarfslagen

| **Wahrgenommene Problemlage** | **Demonstrierte Praxis** |
|---|---|
| „ich kann mit meinen Krücken gut gehen, da brauche ich noch keinen Rollator", „es hält gesund, jeden Tag noch selbst einen kleinen Spaziergang zu machen" | Können kaum eine Tüte mit sich tragen, kommen nur sehr umständlich auf Treppen voran, verschiedene Bodenbeläge sind herausfordernd, sind sehr langsam |
| „mit 82 bin ich dann von meinem Rennrad gefallen, da war dann Schluss", „und irgendwann habe ich dann gedacht, jetzt kannst du das Rad kaum noch halten", „ein Rad extra für Senioren finde ich gut. Ich wusste gar nicht, dass es so etwas gibt" | Umständliches Auf-und Absteigen auf ein Herrenrad, beim Beinheben kommt sehr viel Druck auf die Lenker, umständliche Handhaltung, instabil im Core, Hüftaufdrehung, Lenker kann wegrutschen, sehr wackelig im Gleichgewicht, langwierig |
| „mit dem Dreirad fährt auch meine Tochter zum Einkaufen. Das war sehr teuer, nur für mich alleine hätte sich das nicht gelohnt – man weiß ja gar nicht, wie lange ich das überhaupt noch nutzen kann" | genau eingeübte Bewegungsabfolge bei Auf-/Abstieg, schwierig am Fußweg zu schieben, Breite schwer einzuschätzen, schwer Pfützen ausweichen, Bordsteinkante als Hindernis, Ein-Ausladehöhe unbequem |
| „Ich komme gut zurecht, wenn ich zum Essen ins ASZ komme, nehme ich den Rollator. Weil der die drei Stufen nicht schafft, lasse ich ihn draußen stehen und rufe jemanden, mich zu stützen" | unsicherer Gang, Abhängigkeit von der Hilfe anderer, Treppengeländer wird als Stütze genutzt, aber erfordert instabilen seitlichen Gang, mehrfache Versuche beim Bedienen der Feststellbremse |

Die in Tabelle 1 aufgeführten Beispiele zeigen, dass entgegen der formulierten Verneinung konkreter Unterstützungsbedarfe die beobachteten Nutzerpraxen zum Teil mit erheblichen Einschränkungen im Sinne eines positiven Nutzungserlebnisses einhergehen und damit durchaus Potentiale und Anwendungsfelder für neue Produktkonzepte identifizieren können.

## 5.3 Technikakzeptanz und Nutzungsakzeptanz

Grundlage der qualitativen Evaluierung verschiedener Mobilitätsunterstützungen waren Ergebnisse einer Google-Bildrecherche der Schlagworte *Senioren* + *Mobilität* + *Produkt*. Die Älteren präferierten eindeutig all diejenigen Varianten, an deren Erscheinungsbild sie bereits mehr oder weniger gewöhnt waren. Die Funktionalität schienen sie insbesondere bei Produkten in Zweifel zu ziehen, die ihnen „z*u futuristisch*" schienen. Dabei zielen ja gerade veränderte Winkel, Rollen, Reifen oder Materialien auf eine bedarfsgerechtere Nutzung des technischen Systems. Die Begründung der Forschungspartner lag darin, dass ein verändertes Design auch eine andere Anwendung erfordert, was wiederum mit einem erhöhten Trainingsbedarf einhergeht, quer zu ihrem Sicherheitsbedürfnis liegt und wenig Anschlussfähigkeit zu bereits bestehenden Routinen aufweist. Unter diesem Aspekt lässt sich auch die Unterscheidung zwischen Einstellungs- und Handlungsebene nachvollziehen: So hat sich deutlich gezeigt, dass die Studienteilnehmer zwar zum einen das starke Bedürfnis nach Sicherheit betonen, andererseits jedoch kaum Vorkehrungen treffen, dieses zu erfüllen (vgl. Tabelle 2). Diese Divergenz konnte im Rahmen der Untersuchung nur durch die Beobachtung der tatsächlichen Nutzerpraxis erschlossen werden. Auch, wenn die Handlungsabfolge für den Beobachter langwierig und mühsam erschienen, fühlten sich die Älteren damit sicher, weil sie mit ihr vertraut waren.

Tabelle 2: Einstellungs- und Handlungseben der Akzeptanz

| **Verbalisierte Einstellung** | **Rekonstruiertes Verhalten** |
|---|---|
| „manchmal würde ich meinen Rollator gern zusammenfalten können" | Informieren sich nicht wirklich über verfügbare Angebote |
| „ja, was heutzutage alles möglich ist, das ist schon toll. Das hatten wir ja früher alles nicht" | Sehen kaum eigenen Handlungsbedarf, Neues auszuprobieren, das alltagserleichternd sein könnte |
| „die fahren ja heute auch alle so schnell und rücksichtslos" | Treffen kaum Vorkehrungen, Negativerfahrungen zu vermeiden |
| „das Hauptkriterium ist Sicherheit. Ich muss mich sicher damit fühlen" | Halten an ihren Gewohnheiten fest bis sie ängstlich werden |
| „ich bin so gerne Rad gefahren, es fehlt mir sehr" | Überbewerten (Scheuen) die Investition in ein „sicheres" Fahrrad |
| „die Farbe wirkt sehr frisch", „der Schwung ist schön modern" | Geringe eigene Nutzungsabsicht trotz hoher Akzeptanz |

Zum einen kann hier also bestätigt werden, dass Technikakzeptanz keinesfalls mit Nutzungsakzeptanz gleichgesetzt werden kann, und Einstellungsmessungen allein nicht zum Produkterfolg verhelfen. Zum anderen lässt sich die Bedeutung von Handlungsroutinen für die Bedarfsermittlung bestätigen. Die zu entwickelnden Produkte sind anschlussfähiger, wenn nicht das, was die Nutzer zu wollen äußern, zur Entwicklungsgrundlage gemacht wird, sondern das, was sie tatsächlich tun. Durch gezieltes Nachfragen, wie sie verschiedene Mobilitätslösungen bewerten, erschlossen sich erste Anforderungskriterien für technische Mobilitätsunterstützungen: Sicherheit, Komfort, Attraktivität und Handhabe. Durch die Untersuchung der Handlungspraxen konnten diese sehr weichen Anforderungen konkretisiert werden. Alle Daten zusammen verdichten die Anforderungen an die Systemgestaltung.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Beitrags war die empirische Überprüfung des Mehrwerts einer an Nutzerpraxen orientierten Heuristik zur Anforderungsermittlung für die Gestaltung technischer Unterstützungssysteme. Dabei wurden die ersten beiden Schritte der Heuristik, die Identifikation konkreter Nutzerbedarfe und die Übersetzung der benötigten Unterstützung in konkrete Anforderungen, mit traditionellen Entwicklungsansätzen verglichen. Handlungsfolgen, die bereits derart internalisiert und habitualisiert sind, dass sie unhinterfragt vollzogen werden, entziehen sich der Erhebung von Nutzerwünschen und Alltagsbeschreibungen. Erst durch Kommunikation mittels mündlicher oder schriftlicher Symbole werden diese Handlungen wieder externalisiert und aus der Sphäre des Subjektiven in den Bereich des Öffentlichen überführt: Die subjektiven Probleme werden objektiv verständlich bzw. nachvollziehbar und infolgedessen für jedermann zugänglich gemacht. Die aus den Praxisdemonstrationen gewonnenen Einsichten dienen hier der Identifikation von konkreten Unterstützungsbedarfen – einen Haken für die Einkaufstasche, Noppengriffe, damit die Hände nicht so schnell einschlafen. Die gewonnenen Ergebnisse legen nahe, die Fokussierung auf konkrete Nutzerpraxen zum Ausgangspunkt jeglicher Entwicklungsaktivität zu machen, indem die gewonnenen Daten in konkrete technische Anforderungsprofile überführt werden. Mit der detaillierten Beschreibung der Handlungspraxen spezifizieren sich auch die technischen Anforderungen. Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass der Methodeneinsatz stets auch von der Größe der gewählten Zielgruppe, Produktart sowie den bereits vorhandenen Kenntnissen des Entwicklers von den Lebensumständen der älteren Menschen abhängen sollte. Die praktische Ausgestaltung ihrer Lebenswirklichkeiten zum Anlass für technische Anwendungsfelder zu nehmen ist dabei ein vielversprechender Ansatz, um Nutzer-

und Entwicklerperspektiven zusammenzubringen. Inwiefern dieses Versprechen tatsächlich eingelöst werden kann, muss die Praxistauglichkeit der entwickelten Produktkonzepte im konkreten Nutzeralltag zeigen.

## Danksagung

Vielen Dank an alle Teilnehmer und das ASZ München für die Kontakte, den Raum und die vertrauensvolle Atmosphäre, ohne diese die Untersuchung so nicht möglich gewesen wäre.

## Literatur

[1] Nielsen, J. (1993): Usability Engineering. Academic Press, London.

[2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2011): Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems (ISO 9241-210:2010), Beuth Verlag GmbH.

[3] Hassenzahl, M., (2008): "User Experience (UX): Towards an experiential perspective on product quality", 20th Conference on l' Interaction Homme-Machine, Metz, France, September 02 - 05, 2008, ACM New York, pp. 11-15. doi: 10.1145/1512714.1512717

[4] Eisma, R. et al. (2004): "Early user involvement in the development of information technology-related products for older people", Universal Access in the Information Society, Vol. 3 No. 2, pp. 131-140. doi: 10.1007/s10209-004-0092-z

[5] Niemelä-Nyrhinen, J. (2007): "Baby boom consumers and technology: shooting down stereotypes", Journal of Consumer Marketing, Vol. 24 No. 5, pp. 305-312. doi: 10.1108/07363760710773120

[6] Newell, A. F. et al. (2011): User-Sensitive Inclusive Design, Univ. Access Inf Soc 10:235-243. doi: 10.1007/s10209-010-0203-y

[7] Clarkson, P.J., Coleman, R., Keates, S. and Lebbon, C. (2013), Inclusive design: Design for the whole population, Springer Science & Business Media.

[8] Barnes, C. (2011): Understanding disability and the importance of design for all. Journal of Accessibility and Design for All, [S.l.], 1(1), pp. 55-80. doi: 10.17411/jacces.v1i1.81.

[9] Connell, B. R. et al. (1997), The Principles of Universal Design, Version 2.0, Raleigh, Center for Universal Design, North Carolina State University.

[10] Sanders, E. and Stappers, P.J. (2012): Convivial Toolbox - Generative Research for the Front End of Design, BIS Publishers, Amsterdam.

[11] Backes, G. and Clemens, W. (1998): Lebensphase Alter – Eine Einführung in die sozialwissenschaftliche Altersforschung, Juventaverlag, Weinheim.

[12] Limbourg, M. and Matern, S. (2009): Erleben, Verhalten und Sicherheit älterer Menschen im Straßenverkehr, Mobilität und Alter. Band 04, Schriftenreihe der Eugen-Otto-Butz-Stiftung, Köln.

[13] Birken, T., Pelizäus-Hoffmeister, H., Schweiger, P., (2016): Judging the Desirability and Acceptance of Assistance Systems for the Elderly – Lessons Learned with a Fieldwork Approach. Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences HICSS.

[14] Paetzold, K., Walter, J., Pelizäus-Hoffmeister, H. (2016): An approach to include the life situation of elderly people in product development", Proceedings of the 14th International Design Conference, Dubrovnik.

[15] Birken, T., Pelizäus-Hoffmeister, H., Schweiger, P. and Sontheimer, R. (2018): Technik für ein selbstbestimmtes Leben im Alter – eine Forschungsstrategie zur kontextintegrierenden und praxiszentrierten Bedarfsanalyse. Forum Qualitative Sozialforschung, FQS 19(1), Art. 3.

[16] Voß, G. (2001): Der eigene und der fremde Alltag. Voß, G. & Weihrich, M. (Hrsg.): tagaus – tagein. Neue Beiträge zur Soziologie Alltäglicher Lebensführung, Rainer Hampp Verlag, München, S. 203 – 217.

[17] Kruse, J. (2014): Qualitative Sozialforschung. Ein integrativer Ansatz. Beltz, Weinheim.

[18] Bohnsack, R., Nentwig-Gesemann, I., Nohl, A.-M. (2013): Die dokumentarische Methode und ihre Forschungspraxis. Grundlagen qualitativer Sozialforschung. §. Aufl., Springer VS, Wiesbaden. Backes, G. & Clemens, W. (1998): Lebensphase Alter – Eine Einführung in die sozialwissenschaftliche Altersforschung, Juventaverlag, Weinheim

# User-Centered Product Design for Older Adults – Comparison and Applicability of Methods

Olga Sankowski, Dieter Krause

*Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design*
*Hamburg University of Technology*

## Abstract

Methods for user-centered product design are very powerful and can make the difference between a good and an excellent product. When it comes to designing for older adults, user-centered methods and herein especially user integration methods are most promising for the design of accepted, usable and thus successful products. However, not all methods here are equally efficient and also not equally suitable for each application. Existing method classifications focus more on comparing necessary resources than on comparing goals, advantages and disadvantages as well as risks and obstacles. In this paper the findings of five student projects with the goal to design elderly friendly products are summarized; the applied user-centered methods are compared and evaluated. This paper outlines a first step towards an effective selection of suitable methods for the design of user-centered products.

*Keywords: User-Centered Product Design, Older Adults, Method Comparison*

## 1 Older adults as target users of product design

In regard to the demographical shift different challenges and goals arise. From industrial point of view, productivity shall stay constant and absence times shall be kept at a minimum level despite of ageing workforce. From societal

point of view people shall stay fit and mobile and live independently as long as possible. Similarly to that, ageing people want to stay healthy, self-responsible and socially connected despite of diverse ageing processes or diseases. The product development´s goal is therefore to design products, systems and environments that support the ageing users in their private and working life and at the same time can be marketed and sold with profit.

The key to successful product design for older adults are the users themselves; i.e. their needs and requirements, their mental and physical capabilities, their social and physical environment. The challenge of the product design teams is to collect all these information, to understand it and to efficiently include it into the design process. Multiple methods and approaches exist intended to support design teams with this task; e.g. user-centered design, universal or inclusive design, and user integration methods - to name just a few.

The goal of this paper is to compare different methods for user centered product design (UCPD) and their applicability in the context of designing for older adults. For this, we will start with an introduction to UCPD and why it is important for the design for older adults, followed by a literature review of existing classifications and comparisons of user-centered methods. In the main part of the paper five student projects, their goals, results and methods will be described in short. From that, conclusions about the applicability of the methods will be drawn.

## 2 User-centered product development for older adults

User-centered design (UCD) can be both the philosophy of emphasizing the user and his requirements during design and a design paradigm itself. There is no commonly agreed understanding of it. To make a clear distinction between the 'UCD design approach' and our broader understanding on this topic, we will use 'user-centered product development (UCPD)' in the following (see also [1]), when referring to our view.

UCPD is not a design approach itself, but a summary of all methods, tools, and approaches that increase the focus on the user and his requirements during the design process. Besides the user integration methods, e.g. interviews and usability testing, there are further analytical and empathic methods, where designers try to understand and foresee human-system interaction through hierarchical clustering of tasks (task analysis) or through scenario analysis (scenario-based design). Since standards, guidelines and checklists, e.g. universal design principles and DIN 33402-2 (anthropometric measures of the human

body), are also able to provide user data and therefore increase user focus during the design process, they are also allocated here (see figure 1).

Strong focus on user → Weak focus on user

| I User integration | II Designer empathy | III Guidelines & standards |
|---|---|---|
| Main methods, e.g.:<br>A: *Participatory design*<br>B: *Usability test* | Main methods, e.g.:<br>A: *Scenario-based design*<br>B: *Task analysis* | Guidelines, e.g.:<br>A: *Universal design* |
| Auxiliary methods and tools, e.g.:<br>C: *Prototypes*<br>D: *Eye tracking glasses* | Auxiliary methods and tools, e.g.:<br>B: *Personas*<br>C: *Third age suit* | Standards, e.g.:<br>B: *DIN 33402-2* |

Figure 1: Three types of UCPD methods and tools [1]

In regard of older adults, UCPD approaches are stated to be indispensable for the design of an accepted, usable and thus successful product. The World Health Organization [2] finds that healthy ageing is the main goal of society in context of demographical change. On the other side it is stated that poor system and environmental design that does not fit the older users´ needs is a major obstacle to health, wellbeing and inclusion of older people.

Crews and Zavotka [3] say that enabling older people to perform activities of daily living independently and safely is a main goal for ageing society and therefore universal and inclusive design aspects, that consider all possible users, are important. According to Fisk and colleagues [4] UCD helps designers create a balance between demands imposed by products on users on one side and the mental and physical resources of the (older) users on the other side. Reinicke and Glende [5, 6] argue, in contrary, that classic market research methods alone are not sufficient to compete in today's buyers' market and that market failure rates are high due to not user-oriented product design. Especially in case of older adults, where user-orientation is even more crucial, user integration methods are most promising for designing usable and profitable products.

## 3 Selection of UCPD methods

The first step towards a user-centered design is to decide which methods and tools or subset of methods shall be used, since all of them are capable to increase the focus on the user, his needs, and requirements during the design process in one way or another.

One of the first method comparisons in the field of UCPD has been done by Kaulio [7]. He contrasted seven methods for customer involvement and arranged them into a chart according to their type of customer involvement and the phase of the design process. For customer involvement, he distinguished between 'design for', 'design with', and 'design by' users. Similar to that, Reichwald and colleagues [8] described a 3-dimensional matrix, the customer innovation cube (CIC), and clustered five user integration methods related to webbed customer innovation into it. Apart from the phase of the design process and the type of customer contribution (decision, information, and creation), they further included characteristics of the integrated customers. These are defined as those specific attributes that qualify customers as valuable contributors to design process.

On basis of the process-oriented method model (PoMM) by Birkhofer and colleagues [9], Reinicke [5] deduced a taxonomy for user integration methods. Listed classification criteria are, among others, necessary input (information, materials), expected output (decisions, ideas, requirements), number of users, necessary knowledge about the product or method, duration, preparation effort (low, medium, high), and costs (low, medium, high). Important aspect here, is the confrontation of necessary user attributes, e.g. mobility, creativity, and knowledge, imposed by the different methods and the expected user attributes of different age groups. Wherever necessary and expected user attributes do not fit together, method attributes have to be changed accordingly.

With 39 user integration methods in total, Glende´s [6] user integration matrix is the most exhaustive method classification in this literature review. Here methods are clustered into three main criteria, i.e. goal or type of method (creativity, analysis, evaluation, testing), phase of design process and general selection criteria. Apart from the selection criteria related to necessary resources and usability aspects of the method, that are similar to those of Reinicke [5], he also evaluates and compares reliability, validity and innovation level of method results.

Following Reinicke´s [5] work Fähling and colleagues [10] argued that despite using PoMM Reinicke´s classification lacks important information for the

actual integration of the methods into the design process. They therefore added internal & external actors, process integration aspects, e.g. post-processing effort, and further working aids (resources and hints) to the classification.

Instead of making a broad overview of several methods, Overik Olsen and Welo [11] performed a deep comparison of only a few user integration methods. Apart from advantages, disadvantages and resource demand, they also compared type and amount of customer information gained from the methods, i.e. their quantity and quality. They concluded that "the deeper the method delves, the more resources are needed to generate information, and less amount of information is produced" (p.187). However, at the same time these methods are most promising for providing requirements on higher level; i.e. more emotional and qualitative aspects, that are an important source for innovative designs.

Summarizing the literature review, we see the analysis and comparison of user involvement methods becoming more comprehensive and increasingly deeper in the course of years. However, they only look on UCPD methods, where users take an active part in design process (i.e. user integration (figure 1)); they do not include guidelines, standards, simulations, and designer empathy in their comparison.

As stated by other researchers (e.g. [12, 13]), UCPD methods come not for free and can be harmful to product design. If not done right, methods with and also without direct user integration can lead to bad designs that are not accepted by the majority of users and therefore fail on the market. However, some of the stated classifications do not consider at all any advantages and disadvantages of the methods. Also risks and obstacles of methods are almost completely excluded from their considerations.

Finally, we see a further gap in regard of users. These are usually clustered into those users that have a deep understanding of the product and an innovative thinking and are therefore valuable contributors to the product design, i.e. lead users [14], and those that are not, i.e. normal users. Here, the method selection is based on the users we need and not on those we have. On the other side, it is stated that UCPD approaches are essential when it comes to designing for special user groups, such as older adults (compare [4, 6]). Reinicke [5] gives, in this context, instructions on how to adapt and change methods to the mental and physical restrictions of older adults. However, there is no information which (type of) methods are most suitable for which user group.

Thus, when using the classifications above design teams get a good support on how and when to integrate a certain method into the design process, but they do not get information on which method would be the most beneficial to their design process and goals; they can only decide on basis of the resources they have (budget, time, number of users, etc.).

## 4 Applying UCPD methods for elderly friendly design

In the following five student project, their results, and applied methods are summarized. Within each of the projects one student had the task to come up with new and innovative ideas or concepts for an elderly friendly product using UCPD methods and tools. For this, the students had each four up to six months for preparation. The projects took place over the course of three years. Project no.3 and no.4 were conducted at the same time; students had the opportunity to exchange findings, but no obligation.

Students were further asked to evaluate their approach, the benefits and effort of each method, at the end of the projects. Each project was supported by one or two supervisors, who discussed problems and the project´s progress with the students. Since the focus was on application of methods, students´ design concepts were not corrected or improved by supervisors.

### 4.1 Elderly friendly workplace design

The first project took place within a logistics company. The goal was to come up with new ideas for an individual work station, were goods were handled manually. The new workstation design should be ergonomic and elderly friendly, supporting healthy ageing of the workers. The project was supported by the management and acquiring end-users for participation was no obstacle here. The student conducted *contextual inquiries* (supported by *thinking aloud* and *audiotaping*) and *braindrawing* with six end-users and further stakeholders (lower management). To raise his empathy (*taking the role of the user*) he also worked at the workstation for several hours. Additionally, quantitative data from the company and the federal statistical office were used together with ergonomic KPIs of the workstation to draw conclusions from imposed stress and strain and resulting health issues. The final concept for an elderly friendly workplace considered various smaller improvements to the current design. Also due to company restrictions, no real innovation has been made here.

## 4.2 Elderly friendly lightning concepts for nursing homes

To support older adults in their daily activities and ensure safe navigation regardless of lightning conditions, a lightning concept for private living space in nursing homes should be designed here. To understand the general requirements of older people on lightning, *statistical data* about visual impairments related to ageing process were analyzed. For specific requirements *interviews* (+ *audiotaping*) with seven end-users and one caregiver were conducted. The student also used *universal design* principles to come up with further requirements and ideas for the concept. For the final concept a common layout of private living space in a nursing home was used. The concept offered adaptive lightning situations for different use scenarios. Especially glare-free illumination of the path to the bathroom during night times and the bathroom illumination itself were of particular importance.

## 4.3 Innovative walking aid design (A)

In contrast to the first two projects, the goal of here was to develop an elderly friendly design without direct contact to end-users. Starting from an analysis of the physiological and pathological gait of older people (*quantitative data*), the student created a new concept for a walker on basis of *scenario-based design*. For this, he described four different scenarios, i.e. problem, activity, design, and interaction scenarios, for two different *personas* in 2-3 alternatives (in total 32 scenarios). The focus of the final concept of a new walker supporting the everyday competence of older adults was on adaptation to different use scenarios. It included some new aspects in comparison to products on the market; however, it lacked genuine innovation.

## 4.4 Innovative walking aid design (B)

Goal and approach of this project were similar to that above. Main difference was, that the student used *universal design* principles and *statistics* on ergonomic aspects for requirements gathering and ideation to come up with concepts. Again, the final concept could not be considered as highly innovative. However, here, other aspects, such as effortless and easy handling, were more important than adaptiveness.

## 4.5 Analyzing user requirements for an innovative walker design

In the last project innovation and creativity should be enhanced through user integration. The student, therefore, conducted three different methods for the elicitation of requirements, needs and wishes. These were, first, *expert*

*interviews* with three rollator users, one physiotherapist, and respectively one representative from a health insurance agency and a medical supply store, second, a *survey* with 25 participants and, third, *netnography* with in total 33 feedback comments analyzed from online shops. In comparison to the projects no.3 and no.4, here, the student gathered a few new problems with walkers and other relevant application scenarios. The resulting concept solved the problems reported by the users and other stakeholders, however, the concept represented only a mere incremental innovation in comparison to the state of the art.

## 5 Evaluation of methods

A visual overview of all methods performed in the five projects are shown in figure 2. The numbers relate to the projects.

| I | User integration | II | Designer empathy | III | Guidelines & standards |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | *Braindrawing* | 3 | *Scenario-based design* | 2 4 | *Universal Design* |
| 1 | *Contextual Inquiry* | 1 | *Taking the Role of the User* | 1 | *Ergonomic KPIs* |
| 1 | *Thinking Aloud* | 3 | *Personas* | 1 4 | *Anthropometric Measures* |
| 2 5 | *(Expert) Interview* | | | 1 2 | *Health and Illness Reports* |
| 5 | *Survey* | | | 2 3 4 | *Characteristics of Older Adults* |
| 5 | *Netnography research* | | | | |
| 1 2 5 | *Audiotaping* | | | | |

Figure 2: Summary of UCPD methods used in the projects

*Braindrawing*: Participants were chosen, as far as could be assessed, according to their creativity and innovative thinking. However, at the beginning of the workshop, all end-users had reservations towards drawing. Only after further encouragement, they started with the braindrawing method. Most of the comments and sketches of the end-users were related to problems rather than solutions. Concept ideas came mainly from the moderators, who also participated in the method.

*Contextual Inquiry*: Talking to users about their problems with the work station, while they actually work on it, worked well. It was easy for the participants to show and to explain exhausting tasks and also helpful for the interviewer to dug deeper on certain issues. However, we have to consider here that the participation in the contextual inquiry was financially supported in this project by the management.

*Thinking Aloud*: This method failed completely for us. In best case, participants tried to tell aloud, what they were doing and why, but failed, since they were unable to describe verbally the manual tasks they were doing automatically for years. In worst case, participants felt embarrassed and refused to participate.

*(Expert) Interviews*: In comparison to the other methods, interviews were the most expensive and time-consuming (acquiring of participants, conducting the interviews, transcribing, evaluating). However, they were also a good source of specific and individual requirements. Theoretically, they are also a source for innovative solutions. In both projects participants were therefore asked to share their ideas for a better lightning respectively rollator concept.

*Survey*: Conducting surveys is appropriate to receive quantitative data about living conditions of users or about preferences on product features. For the collection of requirements, however, it is not beneficial. Generally asking for requirements or problems encountered usually led to a negative answer; asking, on the other side, for every possible problem is also not expedient.

*Netnography*: Netnography has proved useful and efficient for collecting original feedback from users, provided that there are already plenty comments on products that can be used for evaluation. In case of older adults, we found that a substantial part of them don´t buy technical products on their own, but receive them from family members. One third of the online customer feedback regarding rollators came from family members, who bought the rollator for one of their parents.

*Audiotaping*: Audiotaping interviews is almost indispensable for later evaluation. However, in one case, nursing home directors declined recording interviews for all residents participating as interviewees.

*Scenario-based Design + Personas*: Using different scenarios for an innovative rollator design, worked only partially. The student was able to provide new design ideas, but lacked genuine innovation. On the other side, describing and analyzing over 30 scenarios was very time-consuming. The student argued

that the benefit of scenario-based design increases for interdisciplinary teams working of complex systems.

*Taking the Role of the User*: The purpose of this method is to gain a deeper understanding of the problems and to increase the empathy for the actual user. In case of the work station design, the student was not able to trace any requirement or insight back to his own experiences at the work station.

*Universal Design*: Using the seven principles of universal design for elderly friendly products worked better for the rollator design than for the lightning concept. The first one requires more interaction between user and product, therefore the ergonomics focus of universal design had more relevance here. In both cases, students criticized the lack of process guidelines and of social, cultural and individual aspects. They were also not able to deduce specific or individual requirements from the principles.

*Quantitative and Statistical Data of Users*: Four of five students used additionally quantitative and statistical data of the users in their project. All of them stated that the user data was helpful to understand the user group and general design task better. However, they were not able to derive more than general requirements and functions from this data.

## 6 Conclusions and further research

Summarizing our findings, we see that good designs for older adults (according to our measures) can result from any type of UCPD methods. Especially, if low level user requirements (ergonomics aspects instead of emotional and social aspects) shall be gathered. However, there is no guarantee to create innovative solutions, even if user integration methods and participatory design are used. One still have to ask the right questions to the right persons and to interpret them correctly. Success of UCPD methods therefore also depends on users and the designers gathering and interpreting the user data.

Furthermore, different methods serve different purposes; they are able to direct the designers´ focus towards special aspects. Apart from the strength of the user focus, they can lead the focus also on mental and physical ergonomics (universal design) or on different use scenarios (scenario-based design).

Regarding the purpose to design for older adults, we see the acquisition of end-users for user integration methods, especially if these are older people living in nursing homes, as a challenge. Several nursing homes didn´t want to bother and disturb their residents and therefore denied any contact to them.

This issue becomes even more challenging, when looking for lead-users. From our experience they are quite rare among this user group, i.e. older adults, and we failed to find at least one. Most end-users were able to tell problems with existing products or problems in general, none of them was able to propose promising ideas, some were not even aware of the problems they have and were also not able to tell any. These persons were already used to their situation and had not even thought to change anything about it.

It was therefore necessary and indispensable to use other stakeholders (e.g. medical supply store representative, lower management personnel) as source for end-user requirements. Here, actual lead users were found, but it is not advisable to use their ideas without questioning, since they are not the actual end-users.

Thus, selection of UCPD methods is more than matching available resources (time, money and number of participants) of the design team with the demands of the method. Selection process should not base on only on the question of 'what can we do?', but also on 'what shall we do?' However, the latter question cannot be answered without considering questions on goals and restrictions, i.e. 'what shall be designed and for whom?' Related to this question, a first examination of the relationship between UCPD methods and human-system interaction will be published in [1].

## References


[1] Sankowski, O., Krause, D.: "Using Multi-Channel Human-System Interaction for User-Centered Product Design" Proceedings of ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 9-15 November, 2018, NYP.

[2] World Health Organization: "World report on ageing and health", World Health Organization, Geneva, 2015.

[3] Crews, D. E., Zavotka, S.: „Aging, Disability, and Frailty: Implications for Universal Design", Journal of Physiological Anthropology, 25 (1), 2006, pp. 113–118.

[4] Fisk, A. D. et al.: "Designing for Older Adults. Principles and Creative Human Factors Approaches", 2nd ed. Taylor and Francis, Hoboken, 2012.

[5] Reinicke, T.: „Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung - Eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration", Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2004.

[6] Glende, S.: „Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung - mit Fokus auf die „Generation Plus"", Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2010.

[7] Kaulio, M. A.: "Customer, consumer and user involvement in product development: A framework and a review of selected methods", Total Quality Management, 9 (1), 1998, pp. 141-149.

[8] Reichwald, R., Seifert, S., Walcher, D.: "Customers as part of value webs: Towards a framework for webbed customer innovation tools", Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, Hawaii, 5-8 January, 2004, p. 10.

[9] Birkhofer, H. et al.: "Cleaning up Design Methods. Describing Methods Completely and Standardised", Proceedings of the 7th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 14-17, May, 2002, pp. 17–22.

[10] Fähling, J. et al.: "Enhancing the selection of methods for customer integration in innovation processes through a process-oriented description framework", Proceedings of the 3rd International Conference on Research into Design Engineering, Bangalore, India, 10-12 January, 2011, pp. 329–337.

[11] Olsen, T. O.; Welo, T.: „Maximizing Product Innovation through Adaptive Application of User-Centered Methods for Defining Customer Value", in: Journal of Technology Management & Innovation, 2011, 6; pp. 172–192.

[12] Enkel, E., Kausch, C., Gassmann, O.: "Managing the risk of customer integration", European Management Journal, 23 (2), 2005, pp. 203-213.

[13] Blythe, M. A., Monk, A. F., Doughty, K.: "Socially dependable design: The challenge of ageing populations for HCI", Interacting with Computers, 17 (6), 2005, pp. 672–689.

[14] Von Hippel, E.: "Lead users: a source of novel product concepts", Management science, 32 (7), 1986, pp. 791-805.

# A Deeper Understanding of Students‘ Method Acceptance through Focus Group Interviews

Selin Üreten[1], Dieter Krause[1]

[1] *Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design Hamburg University of Technology*

## Abstract

The objective of the study presented in this paper was to find out which factors contribute to an efficient learning process and thus application and improved acceptance of design methods. A specific case, a student team project, is examined through interviewing of the groups. The project is about using methods of product development to solve a given technical challenge from a company. The results show that closely following the course material provided by the lecturer and researchers give students confidence in what they are doing. Lessons learned on conducting focus group interviews in this case are also presented.

*Keywords: design method acceptance, focus group interviews, design education, product development*

## 1 Research Motivation and Background

Design method acceptance plays a crucial role in the transfer of methods from academia to industry. Different challenges and barriers as well as requirements for a successful method transfer with a focus on industrial context have

been identified, as presented in [1]. Bearing in mind that design students will become part of this industrial context at a certain time in their professional career, it is important to prepare them as future method transporters. Not only should they be equipped by academia with a set of methods and tools to use, but they should be supported in their learning process. Facilitation of their learning is important to their use of design methods, as their attitude towards and use of design methods is not only influenced by external but also by internal factors, such as their confidence to proceed using a design method in spite of barriers and their association as well as outcomes with the use of design methods.

Cases which served as an inspiration to develop concepts for an improved acceptance of methods result to a great extent from industrial application and experiences. In this paper, the focus lies on the academic side, especially on students as future designers and their specific needs. The aim is to find out based on a specific example of use in product development, which factors influence students' learning process, how students proceed in the solution finding process and how they evaluate and monitor their own results. The question on how we can use this identified set of parameters to improve the acceptance of design methods amongst students will also be answered. The underlying idea is that a proper understanding and smooth learning process for design methods is the basis to enable an efficient design method transfer and foster confidence in their use. Another issue addressed refers to the adaption of the focus group method to this case-specific use about revealing processes in design methodology.

## 2 Research Approach

The goal of this study was to understand students' use of design methods and deduce relevant acceptance criteria for the use of methods through analysis of their experiences during one specific engineering design project. The basic assumption is that the more confident the students feel about their solution and the underlying process, the more it is likely that the method is being accepted. Thus, it is important to understand which factors may contribute to students' efficient use of methods implying that they should face less challenges and are motivated more. In order to understand the process, students who have worked with design methods were suitable to ask for a feedback.

Focus group interviews were conducted with Bachelor students who attend the advanced engineering design methodology course, see section 3. Through the analysis of the results in this case-specific method application by students, the influences analysed in the focus groups were grouped into categories and

explained. During the focus group interviewing process not only content-relevant but also methodological insights could be gained through the practical implementation of the focus group method to this case. These insights will be outlined in the results section too. The results and insights gained from this study enable

- to gain a deeper contextual knowledge in design method acceptance among students
- to deduce a set of parameters which influence students' use and acceptance of design methods
- implications and recommendations for design method acceptance research and practice, and
- the formulation of methodical recommendations for focus group interviews in product development processes with student groups

## 2.1 Preparation

The preparations for the focus group interviews included the development of a semi-structured interview guideline with the questions that will be presented in the following, operationalised with regards to the study goals.

- How did you proceed?
- What worked out well? What was helpful during problem-solving?
- What were the challenges you experienced?
- What can be improved?
- How did you evaluate your solutions to the individual methodical steps? What made you feel confident about your solutions?
- How did you decide you were finished with the partial solutions to the task?
- Any other comments?

A creative room was organised for the interviews. A flipchart was prepared containing the steps of the design task to be accomplished and the methodical

steps were given numbers such that students can easier refer to them. It was taken care that though the room offered enough space, the students are sitting altogether with the researcher to enable a real discussion atmosphere. Students were provided with their project documentation on the table.

## 2.2 Data Collection and Analysis Approach

These focus group interviews were conducted considering theories and concepts about focus group interviewing as in [2]. The goal was to collect qualitative data. The interviews started with welcoming words and the personal presentation of the researcher. Students were thanked for taking time and contributing to research. The research topics of engineering design methodologies in the institute and the goals were explained. As research and teaching may benefit from their feedback, students were strongly encouraged to be honest and share their procedures the way they happened, their personal experiences and views. It was especially mentioned that students should not feel embarrassed if something during team work did not work out well, such as the method application, as those are the crucial incidents to analyse and learn from. The method of focus group interviewing was made clear and it was said that discussions in between the team are part of it and that different opinions may exist among team members. It was important to mention that there is no right or wrong answer and that this feedback session is not an exam and will therefore not influence their grading of the course module.

Information about how the data will be collected by taking notes was communicated to the students. Participation was voluntary and audio-taping started after informed consent. The anonymous use of data, the abstraction away from individuals, their storage and analysis were also explained to the students. The recording is especially helpful as it helped to better listen to students and writing down complementary data to the notes when listening to the audio-tapes. The introduction was followed with a short presentation of the steps on the flipchart to set the students into the context and was continued by a mix of questions as their procedure to solve the problem for each of the method steps and how they have evaluated their own process and what made them feel confident to carry on with their partial solutions, see section 2.1. One researcher interviewed the focus groups and took notes. Audio-recording for all interviews are available and were re-analysed from the same researcher to extend the notes taken during the interviews. Questions on how to improve the organisation and design of this project were also asked for course specific evaluation but are not subject to this study.

## 2.3 Search for Voluntary Groups for the Focus Group Interviews

Focus group interviews were conducted with students who participated in groups in the "Team Project Design Methodology". During the handing in of their documents, students of the team project were asked by the corresponding researcher if they would be willing to participate in a group feedback and evaluation session of the application of the method and the educational improvement. Teams were asked on a random basis. Each group who was asked out of more than 60 teams, was invited individually for a group discussion, hence groups were nor mixed during the invitation to participate neither in the interviews. The focus group interviewing was finished after eleven interviews as the inputs acquired did not result in new insights and saturation was reached.

It is important to note that focus groups of different years were interviewed for including variety. This means that students of cohorts in 2017 and 2018 participated in interviews. There was one difference in the teaching concept between 2017 and 2018, namely that in 2017 continuous reflections were demanded from the students in three written feedback forms distributed at the beginning of the project, approximately in the timely middle of the project and at the end. This reflection did not take place in 2018. This is important to realize as students have also commented on the reflections. Though the task to be accomplished every year differs, the difficulty and thus demanded competences are comparable each year. Ten interviews could be conducted with three to six members. In one group only one could participate in the expert interview. The number of people participating in the interviews differs from the actual group size due to various reasons such as time challenges during the examination period with group members of different courses or simply traffic issues.

# 3 The Study Case

The study has been conducted within the context of the advanced engineering design course with students who finished the "Team Project Design Methodology". As the students gain their first experiences with design methodologies in an intensive way in this course they are eligible to give insights about the experiences applying the methods and thus acceptance. This course is attended by mechanical engineers and other related courses of studies, such as general engineering science students who have specialised on mechanical engineering.

## 3.1 Contextual Settings

This project is part of a fourth semester Bachelor of Science degree course "Advanced Engineering Design" and consists of lectures and auditorium exercises. Various topics ranging from technical calculations of basic design elements to engineering design methodologies are presented in that course. The lectures on engineering design methodologies are followed by respective auditorium exercises and this team project. The content of these focus on engineering design methodologies, especially the approach according to VDI 2221 [3] and further literature on engineering design like of Pahl/Beitz [4]. The exercise presents the theories with the help of practical examples on how to go through a systematic approach for developing solution concepts and evaluating them.

## 3.2 Goal of the Project and Student Motivation

The goal of the task distributed in the "Team Project Design Methodology" is to give students the chance to train engineering design methodologies, reflect their use and the team work experienced, with the example of a relevant problem from industry. The successful completion of the project is required for the Bachelor of Science degree. Students attending this course are mainly from the mechanical engineering degree and similar degree students. The project has to be accomplished during the semester in teams with five to six students independent of their specific courses of study, which means that mechanical engineering students could work with general engineering students.

The task is designed in cooperation with a company, which provides not only a current technical issue or product challenge to be solved in industry but also awards the most successful team a prize. The team prize consists of a certificate and a financial reward. The winners of the previous year present their solution as a good example of how they solved their problem for the students in the current year. This happens during the award ceremony which also includes motivating words from the company representatives and insights into career perspectives of engineers. This does not only serve as an active external motivation to win the prize, but also helps students to learn through another example, explained by their peers, to understand the theories better.

## 3.3 Project Task and Learning Support

The task distributed to students is a real-world case and allows good demonstration of methods in engineering design. The task changes every year and could be for example about finding better technical solutions than there

are currently existing, focus on sustainability criteria or ask students to find solutions for a new concept for the device or machinery. In specific, students are given a list with numbered keywords to accomplish the task. The task requires to start with formulating a *requirements list* and deriving a *problem formulation* after that. The task further involves *function structures*, a *hierarchical* and a *flow-oriented* one. Though it is up to the students which *solution finding* methods they use, the step itself is necessary. The next step to be delivered by the students was the *morphological matrix* with solution alternatives. These alternatives were expected to be assessed during the *evaluation* and depict in the *strength diagramme* in order to visualise the solution alternatives with regards to their technical and economical evaluation. The documentation should also include the *depiction of the favoured concept* with sketches in 2D- and 3D-CAD drawings. The last step that was expected was a *reflection* about the team work and the method use. The type of output required is a printed document with thirty slides. These slides are evaluated according to pre-defined criteria such as correct method application, reasoning, functionality and quality of drawings. It is offered to students to get a feedback from researchers about their work after the assessment is completed.

Different types of support to assist the students in their learning process are provided. As the lecture and the auditorium exercises were video recorded, students were able to (re-)watch them. The online learning platform's forum can be used to ask questions and consultancy is given through the corresponding researcher. The researchers involved in this project were open for questions of the students. Students were provided with the slides of the respective presentations too (lecture and exercise slides). The task to solve and additional material to understand the context or specifying product details were provided. Certain templates, such as one for the requirements list were also uploaded. These inputs form the basis for enabling students to successfully accomplish the "Team Project Design Methodology".

## 4 Results

The gained results in this context can be split into two categories; content-based and subject related results, as well as methodological results with regards to the adaption of the focus group method for a case-specific use in product development. The findings presented result from a joint analysis of students' answers. Differences noticed between the groups will be presented too. In general, students said that the project is good and they made positive experiences. Differences in the teams have been crystallised in their team communication and the assignment of the tasks if tasks were divided. While some teams were working with members they knew prior to the project already,

some teams were mixed with known and unknown team members. While in some teams there was one selected to digitalise the outputs generated as a group, some groups preferred experts to digitalise their solutions. A team member with most experience in PowerPoint for example was responsible to note down everything in the slide master whereas someone else was chosen for different tasks with regards to his/her expertise. Especially the criteria to foster their confidence were common or comparable between the groups and will be presented in the following.

## 4.1 Students‘ Feedback

Several factors have been crystallised with regards to their own solution evaluation during the problem-solving. Students’ confidence in their results and their motivation to use the design methods are classified as follows. Tuned correctly, the cluster can be used as a set of criteria for influencing design method acceptance.

1. Provided material to the students within the course context

2. Additional, own research initiative of students

3. Team inspiration, decisions and organisational conditions

These mentioned aspects have been explained also with respect to strategies to cope with challenges and uncertainties and will be elaborated in the following. The first category describes the **provided material to the students within the course context.** Groups have mentioned to find it helpful to use the material provided to them via an online learning platform. In general, to become confident about their own solutions, students analysed the task sheet and the requirements list as well as other already developed documents (methodical sub-solutions for instance) by themselves as input for the next steps and to check their completeness.

The elements mentioned to be very helpful among all supplied data – and some even claimed that they are a necessity – were the slides of the auditorium exercise and the given templates. Attendance of these exercises made the students become self-confident in their knowledge and motivated them to share and discuss their views with other team members. These elements were said to give a structure on how to proceed and provided them with useful examples. Groups also mentioned that the video recordings of the lecture as well as the auditorium exercise were helpful, especially those of the exercises. It is important to note that in discussions and moments of uncertainty about a certain solution or methodical approach, the students who attended the auditorium

exercise were considered to be more knowledgeable within the group than the ones who didn't attend and thus agreeing on a solution was facilitated. Students felt more confident in their solution finding following the structure given in the auditorium exercise which was similar to the task to be accomplished. Iterative working was another lever to measure and adapt own solutions.

With regards to developing concepts and content-based aspects, students said to feel more confident about their own solution if they found inspiring analogies. If students imagined the product's use and related scenarios and this matched to what they documented, they were satisfied with their solutions.

Subjectiveness in some parts of the methodical approach and the lack of experience or knowledge in certain fields were said to be impeding the process. Quantitative data was said to be helpful in finding more objective solutions. In their absence, changing favoured ideas were said to be demanding.

Students mentioned to have checked not only the content correctness, but also the adequate method use and completeness of their results for the individual steps in the task. Additionally, logical checks, redundancy checks, wording and expressions, spelling and the layouting and visualisations were accomplished by the students. All these led to the fact that students felt an increased confidence about their solutions. Besides very structured checks, intuition and feelings about the results were mentioned by some groups to contribute to their satisfaction and confidence too.

Though similar in procedure and providing several examples mentioned to be helpful in students' eyes, students experienced difficulties in transferring that knowledge to their own problem in cases where their problem showed new challenges not explicitly addressed in the auditorium exercise, or the auditorium exercise offered more solutions to one issue or methodical step. Especially questions with regards to the precision and depth of the analysis were issues to discuss and created uncertainties. Comparison with the exercise slides and the available space on one slide served as orientation. Uncertainties increased among students whenever assumptions had to be made, in which experience from former design projects or other experience plays a role. Giving explanations helped them to feel more sure about their solutions. Students felt less confident when the methodical alternatives in proceeding were high, students could not directly see the benefit of the method used and did not adapt it to their needs. Following the auditorium exercise, in some instances some groups lost the idea and deeper sense of the method use and said that some methods appeared forced on their approach. Drifting away from solutions or the task itself were especially realized through exceeded discussion time and tackled

through re-analysing the task sheet. The reasoning why a method is used and if and how it can be adapted were other aspects for discussion in groups. Adding to that, if the solution they developed did not look visually similar to solutions of the auditorium exercise, like looking too less in comparison, students were not sure about their results and looked for further information and support in additional material and sources, as explained in the following section.

**Additional, own research initiative of students** has an impact on their solution finding and solution confidence. In many cases, students started additional researching if there were uncertainties. Sources used were information from the internet, recommended related books and experts like professors. Teams also mentioned that they consulted other teams for the problem-solving of the task. Besides contacting other teams, students stated to have asked project participants of the previous years on lessons learned and advice. It was also mentioned that daily inspiration like waiting at a bus stop and watching advertisements helped to fill the gap they encountered.

**Team inspiration, decisions and organisational conditions** affect students' solution perception. Most of the issues encountered were said to be solved through group discussions, either by argumentation or voting for one or the other proposal. It is important to note that students further developed working philosophies within the team. Though a prize was involved, some teams agreed on giving their best as possible and not focusing on perfection to receive a prize, which took pressure from them and the time they allocate to the task was considered to be more adequate by the students. Teams also mentioned that they accepted their current solutions if no further ideas came up, they thought they did work on all the necessary points, time was running out or simply being hungry after an exhausting day of group work, and came back later to work on them again if they realize during other steps of the problem solving that something is missing. Moral support within the group were said to provide evaluation of and confidence in their solution. Some groups interviewed in 2017 said that the continuous reflections motivated them to start and continue working ahead of time.

The use of a data exchange platform organised by the institute was said to be helpful during the team project. Students also remarked that creative rooms were helpful to solve the task. One group explicitly explained how they proceeded with post-its to depict functions and their use of moderation material.

## 4.2 Lessons Learned and Recommendations for Focus Group Interviewing

Findings about the focus groups methodology have shown that interviewing the student groups a short time after they have finished their project enables to collect reliable data as memories on the method application are still active. It proved helpful that a certain flexibility was there in agreeing on a feedback appointment due to students' different courses and respective schedules. It is useful to provide students with the individual steps that had to be accomplished and number them for ease of communication as in the task description and thus their chronological order (for example, number "1" for the "requirements list") and agree on terms used such as the meaning of "sub-solution" during the focus group interview. Students visually and verbally oriented on the list on flipchart. As the questions may not be familiar to students or they have not thought about it before, it is important to have backup questions or alternative formulations for the questions prepared. The same abstraction challenge is valid for the researchers analysing the data collected. As students talk about their very specific case and how they acted, attention is needed at all times to abstract the knowledge acquired and quickly react with asking more if necessary. The semi-structed guideline helped by providing that flexibility. With regards to this, it is recommended to practice and listen to the tapes as soon as possible and prepare for upcoming interviews. It is also recommended to listen to all recordings within a focused time frame to be in context.

Students used their own documentation which was on the table to remember and to explain to the researcher better which steps were taken. Students also showed additional materials available to them such as photos on their mobile phones to express themselves. Discussions during the interview within the group helped students to better remember the procedures and figure out still open questions. Some of the open questions were asked to the researcher. We have made good experiences in letting people know that any questions can be discussed after the interview or during a feedback session after the assessment of all projects. According to our view, this helps to support the students' flow in giving feedback during the focus group interviewing without getting external interruptions. The feedback of the researcher during the interview may have even influenced the way the students express what they have done and the entire picture may be distorted or incomplete in the worst case.

# 5 Discussion and Conclusion

The focus groups method applied to analyse confidence and potential acceptance criteria in this context was helpful to reach the study goals. Criteria to evaluate and better understand student's method use and acceptance are

related to the use of the provided material to solve the problem, the own initiative of the students to finding more sources and resources they put into the procedure and team aspects. The lessons learned here can help to improve the procedure in getting feedback from students after method use, such as in experiments to evaluate methods [5]. We believe that with regards to the procedure of the focus group interviews, students' benefits are that they have a better preparation for the upcoming related exam. That is due to the repetition of what they have done and critically reflecting upon their methodological steps. Another aspect is that it helps to detect uncertainties about the theories and concepts students applied but still have open questions to. Being in contact with the researchers in the communication sense and talking about possible projects or thesis is another beneficial aspect. The next steps would be to further increase the acceptance through fostering confidence in solutions and introduce concepts to decrease uncertainties for an improved method acceptance.

## Acknowledgements

We would like to thank the students for their time, their honesty and their valuable input. They contributed to a great deal to improve engineering design research and the teaching of design methods.

## Literature

[1] Beckmann, G.; Gebhardt, N.; Krause, D.: "Transfer of Methods For Developing Modular Product Families into Practice - An Interview Study". 13th International Design Conference - Design 2014, Dubrovnik, 2014, pp. 121 - 130.

[2] Robson, C.: "Real World Research. A Resource for Users of Social Rese-arch Methods in Applied Settings", third edition, Wiley, United Kingdom, 2011.

[3] VDI Richtlinie 2221: "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte", Beuth, Berlin, 1993.

[4] Pahl, G. et al.: "Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung", fifth edition, Springer, Berlin, 2003.

[5] Üreten, S.; Krause, D.: "Discursive vs. intuitive - An experimental study to facilitate the use of design catalogues", Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17), Vol.9: Design Education, Vancouver, Canada, 2017, pp. 99-108.

# Das Systemverständnis reflektieren – Kritisches Hinterfragen als Einflussgröße in der Analyse

Sven Matthiesen, Matthias Eisenmann, Markus Döllken

*IPEK – Institut für Produktentwicklung*
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

## Abstract

While developing products, design engineers have to face many situations in which they have to make decisions based on assumptions. False assumptions lead to iterations in the product development process, which possibly generate additional costs. To face this problem, it needs to be understood, how design engineers evaluate their assumptions while analysing technical systems. Thus, the presented study examines the influence of scrutinizing and prior knowledge on the understanding of functionality in the analysis. In the study, participants used think aloud while analysing technical systems. By expressing their train of thought, the analysis process was made visible. Results show that both scrutinizing and prior knowledge have an impact on the participants' understanding.

*Keywords: Human Behaviour in Design, Functional Analysis, Self-reflection, Case Study*

## 1 Einleitung

Im Entwicklungsprozess technischer Produkte trifft der Konstrukteur auf Situationen, in denen auf der Grundlage von Schätzungen oder Annahmen Entscheidungen getroffen werden. Erweisen sich diese Annahmen bei der späteren Validierung als falsch, ist eine Iteration die Folge. [1] Menschen überschätzen

oft ihr Verständnis von komplexen Sachverhalten und sind sich dieser Fehleinschätzung häufig nicht bewusst [2]. Bereits zu Beginn der Entwicklung eines neuen Produkts müssen Informationen gewonnen werden, indem Vorgänger- oder Referenzprodukte auf ihre konstruktive Umsetzung analysiert werden [3]. Wird ein Teilsystem eines solchen Produkts übernommen, ohne dass dessen konstruktive Umsetzung vollständig analysiert und verstanden wurde, werden Probleme erst bei der Integration in das Gesamtsystem bemerkbar. Das kann zu umfangreichen, teuren Iterationen führen.

In der Gestaltung wechseln sich die Analyse des bereits erdachten Systems und die Synthese einer optimierten Gestalt iterativ ab. Durch die Analyse gewinnt der Konstrukteur dabei ein Verständnis über die Zusammenhänge zwischen der Gestalt und der Funktion des Systems. [4] Um dieses Systemverständnis zu untersuchen, muss am Konstrukteur selbst angesetzt werden.

## 1.1 Der Konstrukteur in der Gestaltung

Nach Aussage von EHRLENSPIEL sind Konstrukteure „[…], die sich selbst, den Prozess und das dabei entstandene Ergebnis kritisch hinterfragen („Metabetrachtung"), bessere Problemlöser" [5] in Bezug auf die Produktentwicklung. HACKER führte Studien mit Laien durch, welche eine Konstruktionsaufgabe geringen Umfangs lösen sollten. Dabei stellte er einen signifikant positiven Effekt auf die Lösungsgüte fest, wenn die Probanden zur sprachlichen *Reflexion* der eigenen Konstruktion durch den Studienleiter aktiv angeregt wurden [6].

DYLLA [7] und FRICKE [8] untersuchten in explorativen Studien mit Konstrukteuren erfolgreiche Vorgehensweisen bei der Bearbeitung einer Konstruktionsaufgabe. DYLLA beobachtete in seinen Untersuchungen, dass oft nur unzureichend analysiert wurde und kommt zu dem Schluss, dass die Güte des Ergebnisses steigt, wenn Lösungen genauer *analysiert und beurteilt* werden [7]. Außerdem ergaben seine Untersuchungen, dass erfolgreiche Konstrukteure ihre Erfahrung nutzen, indem sie *Vorkenntnisse* zu den Systemen mit einbeziehen [7]. FRICKE kommt zum Ergebnis, dass bei Konstrukteuren ein *häufiges Beurteilen* der erarbeiteten Konstruktion zu einer besseren Lösung führt [8]. Beide Untersuchungen bezogen sich auf den gesamten Gestaltungsprozess und nutzten als Bewertungsgröße die Lösungs- oder Funktionsgüte, die nur mittelbar über den Konstrukteur beeinflusst werden kann. Eine Ermittlung, in welchen Situationen Fehler entstanden, fand nicht statt. Dies macht eine differenziertere Untersuchung der einzelnen Phasen nötig.

Explizit mit der Phase der Analyse beschäftigten sich BOOTH [9] und MATTHIESEN [10]. In einer explorativen Studie standen bei BOOTH übergeordnete

Analysestrategien wie „top-down" und „dem Energiefluss folgen" im Vordergrund. Inhalt war die Analyse von technischen Alltagsprodukten und die Erstellung von Funktionsbäumen durch Studierende des Maschinenbaus. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass keine der untersuchten Strategien signifikante Vorteile gegenüber den anderen aufweist [9]. MATTHIESEN ließ Probanden in seiner Studie ein technisches System auf seine Funktionsweise analysieren und identifizierte positive Einflüsse auf das Systemverständnis. Die Ergebnisse von MATTHIESEN zeigen, dass der Analyseerfolg signifikant positiv von der Häufigkeit der *Überprüfung von Vermutungen* beeinflusst wird [10].

## 1.2 Zielsetzung

Bei MATTHIESEN [10] wurde das Überprüfen von Vermutungen als erfolgreiche Strategie identifiziert. Um den Konstrukteur in der Analyse unterstützen zu können, müssen die Auslöser für dieses Vorgehen identifiziert werden. „Überprüfen" bei MATTHIESEN wird als das wiederholte Betrachten einzelner Systemteile zur Überprüfung einer Vermutung aufgefasst. Ein Auslöser dieser Betrachtung kann ein vom Proband durchgeführtes Hinterfragen seines bisherigen Verständnisses von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen sein.

Dieses *Hinterfragen* stellt einen aktiven Vorgang dar, welcher vom Probanden ausgeht und deshalb gezielt unterstützt werden kann. DYLLA, FRICKE, HACKER und EHRLENSPIEL verwenden unterschiedliche Begriffe wie „Reflexion", „analysieren und beurteilen" und „kritisches Hinterfragen", welche ebenfalls ein vom Proband initiiertes Hinterfragen beschreiben. Im Folgenden wird der Einfachheit halber deshalb der Begriff „*kritisches Hinterfragen*" synonym für diese Begriffe verwendet.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, die Mechanismen in der Analyse, welche zum Systemverständnis beitragen, besser zu verstehen, um in der folgenden Forschung eine Unterstützung für Konstrukteure in der Gestaltung zu erarbeiten. Da die Analyse den Ausgangspunkt für den Aufbau des Systemverständnisses bildet, sollen die Einflüsse des *kritischen Hinterfragens* (vgl. DYLLA, FRICKE, EHRLENSPIEL, MATTHIESEN) und der *Vorkenntnisse* (vgl. DYLLA) in der Analyse untersucht werden. Dafür werden im Folgenden diese Forschungsfragen untersucht:

> FF 1 Welchen Einfluss hat das *kritische Hinterfragen* auf das Systemverständnis in der Analyse technischer Systeme?
>
> FF 1.1 Welchen unmittelbaren *Effekt* hat kritisches Hinterfragen auf das Systemverständnis in der Analyse?

FF 1.2 Welchen Einfluss hat die *Häufigkeit* des kritischen Hinterfragens auf das Systemverständnis in der Analyse?

FF 2 Welchen Einfluss haben die *Vorkenntnisse* zum System auf das Systemverständnis in der Analyse technischer Systeme?

## 2 Methode

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde eine Laborstudie mit 12 Probanden aufgebaut. Diese Laborstudie sowie die Datenanalyse werden im folgenden Kapitel beschrieben.

### 2.1 Studienablauf

Bild 1 zeigt den schematischen Ablauf der durchgeführten Studie. Ausgehend von Beschreibungen von CHARNESS [11] handelt es sich dabei um einen Innersubjekt Versuchsaufbau. Die Probanden wurden in zwei Gruppen (A und B) aufgeteilt und bearbeiteten zwei Systeme mit einer analogen Aufgabenstellung. Im zweiten Durchlauf wurden die Systeme (1 und 2) zwischen den Gruppen ausgetauscht, die Aufgabenstellung blieb dabei unverändert. Die Studie ist angelehnt an das Studiendesign von BOOTH [9], um mit einer geringen Probandenzahl mehrere Systeme analysieren zu können. Die Probanden wurden den zwei Gruppen zufällig zugeteilt und während der Studie arbeiteten sie selbstständig in abgetrennten Kabinen.

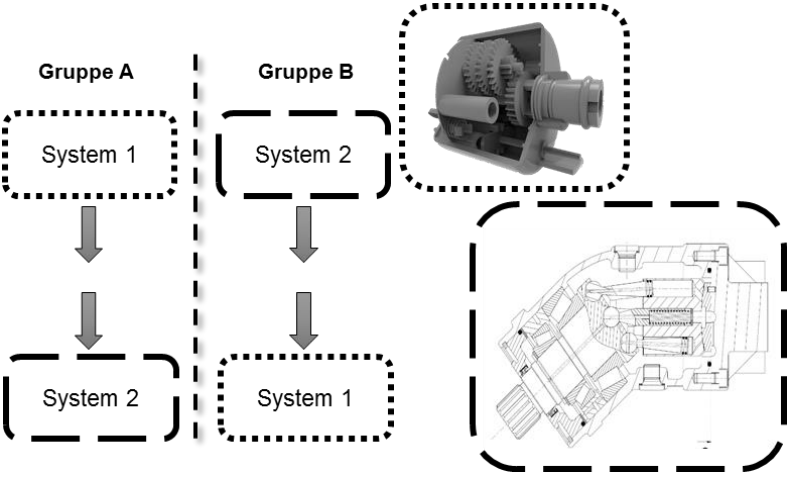



Bild 1: Schematischer Studienablauf und analysierte Systeme

In Form einer Präsentation wurden den Probanden die notwendigen Informationen zum Studienablauf bereitgestellt. Die Arbeitsmappe mit der Aufgabenstellung, einem Fragebogen zum Verständnis über den Gestalt-Funktion-Zusammenhang und einem Fragebogen zu Vorkenntnissen lag in den Kabinen aus. Abhängig vom System standen weitere Informationsmaterialien wie grafische Darstellungen oder ein Demonstrationsvideo zur Verfügung. Der Einfluss des Versuchsleiters wurde somit reduziert und eine standardisierte Durchführung der Versuche gewährleistet. Das Szenario der Aufgabe lautete ein Referenzprodukt (System 1 oder 2) zu analysieren, um mit der Entwicklung eines neuen Produkts zu beginnen. Die Probanden sollten dazu die konstruktive Umsetzung der Systeme nachvollziehen.

Folgende Daten wurden in dieser Studie erfasst: (1) Ton- und Videoaufnahmen wurden über eine Webcam aufgenommen und die Probanden wurden gebeten ihre Gedankengänge während der Analyse laut auszusprechen (Concurrent Think-Aloud), um ihre Vorgehensweise während der Analyse nachzuvollziehen. (2) Fragebogen zu Probandenmerkmalen wie Alter, Semesteranzahl sowie Vorkenntnisse zu den Systemen wurden erfasst.

Vor der Bearbeitung der Aufgabenstellung wurden die Probanden mit dem lauten Aussprechen ihrer Gedankengänge vertraut gemacht. Für die Analyse der Systeme hatten die Probanden eine Bearbeitungszeit von 20 Minuten, jedoch war das frühzeitige Beenden der Aufgabe möglich, sobald die Probanden dachten, die konstruktive Umsetzung verstanden zu haben. Bild 1 zeigt die zwei zu bearbeitenden Systeme: *System 1 – Rasensprenger:* Den Probanden wurden Informationsmaterialien über den Rasensprenger zur Verfügung gestellt wie grafische Darstellungen und ein Demonstrationsvideo. In dem Video wird das Gesamtsystem gezeigt und die Einbausituation des vorliegenden Teilsystems. *System 2 – Axialkolbenpumpe:* Dieses System wurde anhand von grafischen Darstellungen analysiert.

## 2.2 Studienteilnehmer

Die Probanden waren 12 Maschinenbaustudierende in ihrem Masterstudium (1 weiblich, 11 männlich). Die Daten eines Studierenden konnten nicht ausgewertet werden, da der Teilnehmer seine Gedanken während der Analyse der Systeme nicht laut aussprach.

## 2.3 Datenanalyse

Die Analyse der erfassten Daten wird im folgenden Abschnitt beschrieben. *Systemverständnis:* Die Tonaufzeichnungen der laut ausgesprochenen Gedanken wurden hinsichtlich dem Verständnis über den Gestalt-Funktion-Zusammenhang ausgewertet. Dafür wurden 9 Funktionen für das System 1 und 13 Funktionen für das System 2 festgelegt (Beispiele: *(1) Rasensprenger: „Das Medium Wasser treibt die Turbine an"; (2) Axialkolbenpumpe: „Die Feder im zentralen Kolben dient zur Lagerung und Dichtung des Revolverelementes*"). Ein hohes Systemverständnis wurde in diesem Zusammenhang als eine hohe Anzahl korrekt genannter Funktionen definiert.

*Kritisches Hinterfragen:* Die Auswertung der Daten bezüglich des kritischen Hinterfragens basierte auf den Tonaufzeichnungen. Es wurde ausgewertet, wie oft die Probanden sich selbst oder ihr Vorgehen kritisch hinterfragten. An dem folgenden Beispiel ist zu erkennen, dass der Teilnehmer sein Verständnis hinterfragt: *„Jetzt habe ich noch nicht ganz verstanden, wie der Teil funktioniert*." Die Häufigkeit des kritischen Hinterfragens wurde pro Teilnehmer erfasst.

Der *Effekt* des kritischen Hinterfragens wurde weitergehend untersucht. Unter Effekt wurde in diesem Zusammenhang eine Auswirkung auf die Anzahl an genannten Funktionen verstanden. Das kritische Hinterfragen konnte zu einer neuen Nennung (+), zu keiner Nennung (0), zu dem Revidieren einer genannten richtigen Aussage und zur Nennung eines falschen Gestalt-Funktion-Zusammenhangs (-) führen. Ein weiteres Beispiel stellt diesen Effekt dar: *„Irgendwie habe ich gerade den falschen Ansatz! Weil mir irgendwie fehlt wo der Schieberegler eingreift.* " In diesem Beispiel führte das kritische Hinterfragen zu keiner neuen Nennung (0) eines Gestalt-Funktion-Zusammenhangs. Der Proband hinterfragte kritisch sein Vorgehen und sein eigenes Wissen, jedoch führte diese Aktivität zu keinem positiven aber auch keinem negativen Effekt.

Die selbsteingeschätzten Vorkenntnisse bezüglich der Systeme wurden in einem Fragebogen auf einer fünfstufigen Skala zwischen „Keine", „Grundkenntnisse (schon davon gehört, gesehen, etc.)", „Fortgeschritten (Funktionsprinzip war mir bereits bekannt, etc.)", „Sehr gut (Funktionsprinzip war mir bereits bekannt, Erfahrung mit ähnlichen Geräten)" und „Experte (Funktionsprinzip bekannt und Erfahrung in der Entwicklung ähnlicher Geräte etc.)" abgefragt.

# 3 Ergebnisse

## 3.1 Kritisches Hinterfragen

Um Trainingseffekte innerhalb der Studie auszuschließen wurde der Einfluss des kritischen Hinterfragens zunächst für den *ersten Studiendurchgang* ermittelt.

### 3.1.1 Effekte kritischen Hinterfragens auf das Systemverständnis

Die ermittelten Effekte des kritischen Hinterfragens auf das Systemverständnis wurden für die jeweiligen Systeme über alle Probanden aufsummiert und sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Effekte des kritischen Hinterfragens auf das Systemverständnis

| | **Axialkolbenpumpe** | **Rasensprenger** | **GESAMT** |
|---|---|---|---|
| Verbesserung (+) | 9 | 14 | **23** |
| Keine Veränderung (0) | 3 | 4 | **7** |
| Verschlechterung (-) | 0 | 0 | **0** |
| Gesamt | 12 | 18 | **30** |

Es ist erkennbar, dass im ersten Durchgang der vorliegenden Studie das kritische Hinterfragen bei der Analyse beider Systeme in 23 von 30 Fällen zu einer Verbesserung des Systemverständnisses geführt hat, in sieben Fällen keine Veränderung eintrat und in keinem Fall eine Verschlechterung zu beobachten war (s. Tabelle 1). Für die einzelnen Systeme ist das Verhältnis von *Verbesserung* und *keiner Veränderung* ähnlich.

### 3.1.2 Einfluss der Häufigkeit des kritischen Hinterfragens

Probandenspezifisch wurde außerdem das *Systemverständnis* – also der Anteil korrekt genannter Funktionen – und die *Häufigkeit des kritischen Hinterfragens* ermittelt. In Bild 2 sind die Ergebnisse zum Systemverständnis über der Häufigkeit des Hinterfragens aufgetragen. Zusätzlich ist der Mittelwert des Systemverständnisses über die untersuchten Probanden als gepunktete Linie eingezeichnet.

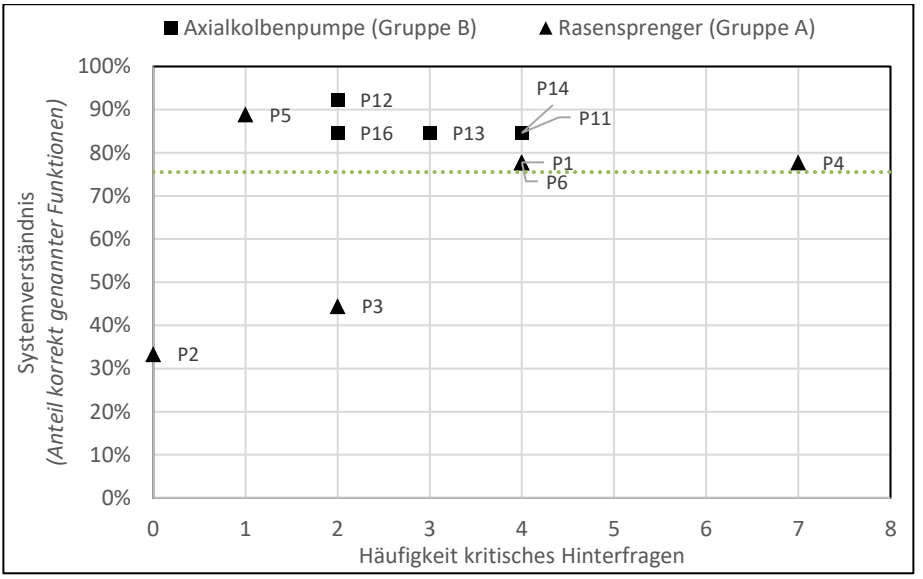



Bild 2: Einfluss der Häufigkeit kritischen Hinterfragens in der Analyse

Im Fall der Axialkolbenpumpe liegt das Systemverständnis für alle Probanden auf einem ähnlichen Wert. Für das System Rasensprenger lässt sich jedoch ein positiver Trend bei zunehmender Häufigkeit erkennen. Beim System Rasensprenger ergibt sich dadurch eine geringe bis mittlere Korrelation (r=0,51) zwischen Häufigkeit kritischen Hinterfragens und Systemverständnis. Eine Abweichung vom Trend stellt Proband P5 (s. Bild 2) dar, dessen Systemverständnis bei einmaligem Hinterfragen den Spitzenwert in Gruppe A erreicht. Auffällig ist zusätzlich Proband P4, der trotz der höchsten Häufigkeit kritischen Hinterfragens ein Systemverständnis nahe dem Mittelwert (s. Bild 2) von 75,5% erreicht.

## 3.2 Einfluss der Vorkenntnisse über das System

Die Daten aus den Fragebögen zu Probandenmerkmalen wurden genutzt, um den Einfluss der Vorkenntnisse zum jeweiligen System auf das Systemverständnis zu untersuchen. Über das System Rasensprenger waren bei allen Probanden nach eigenen Angaben *keine (=0)* oder *geringe (=1)* Vorkenntnisse vorhanden, weshalb diese hier nicht näher betrachtet werden. Beim System Axialkolbenpumpe gaben die Probanden unterschiedliche Vorkenntnisse bis hin zu *fortgeschritten (=2)* und *sehr gut (=3)* an. In Bild 3 ist das Systemverständnis der Probanden über ihren Vorkenntnissen zur Axialkolbenpumpe für beide Durchgänge der Studie aufgetragen.

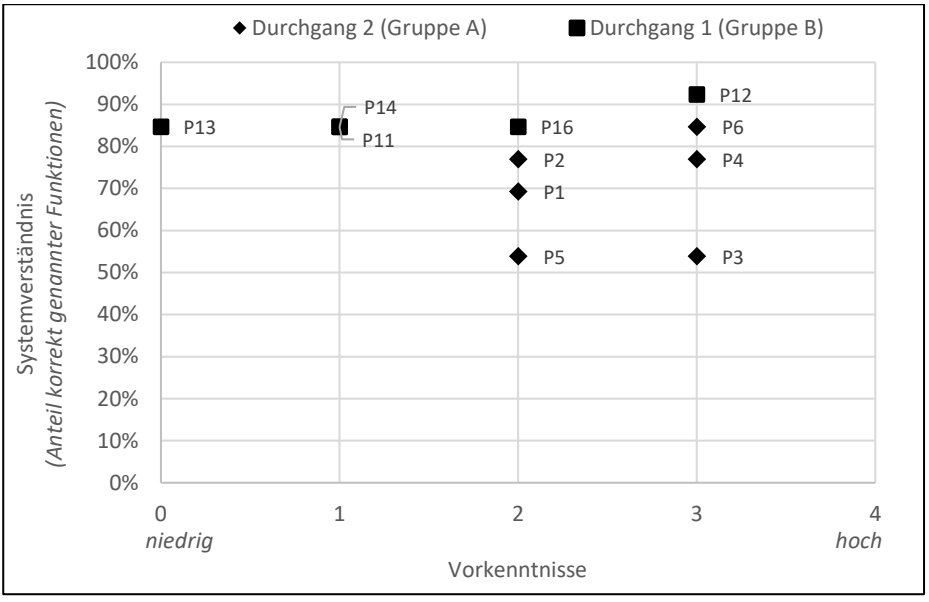



Bild 3: Einfluss der Vorkenntnisse bei Analyse der Axialkolbenpumpe

Die Verteilung lässt keinen Zusammenhang zwischen Vorkenntnissen und Systemverständnis erkennen. Für einen großen Anteil der Probanden wurde unabhängig von den Vorkenntnissen ein Systemverständnis über 70% ermittelt (s. Bild 3). Auffällig sind die Probanden P3 und P5, für die nach Angabe von fortgeschrittenen und sehr guten Vorkenntnissen in der Analyse das geringste Systemverständnis aller Probanden ermittelt wurde. Diese beiden Probanden brachen außerdem die Analyse in der Studie vor Ablauf der Zeit ab. Beide gaben als Grund an, das System vollständig analysiert und verstanden zu haben.

# 4 Diskussion

In diesem Abschnitt sollen die zuvor gestellten Forschungsfragen mit Hilfe der Ergebnisse aus Abschnitt 2 beantwortet werden. Außerdem werden Auffälligkeiten aus den Ergebnissen und der Studiendurchführung aufgegriffen und interpretiert.

## 4.1 Einfluss des kritischen Hinterfragens auf das Systemverständnis

Ausgehend von den häufig positiven und in wenigen Fällen neutralen Effekten des Hinterfragens (s. 3.1.1) kann *FF 1.1: Welchen unmittelbaren Effekt*

*hat kritisches Hinterfragen auf das Systemverständnis in der Analyse?* wie folgt beantwortet werden:

*Das kritische Hinterfragen in der Analyse technischer Systeme führt häufig zu einer Verbesserung des Systemverständnisses und in der Regel zu keiner Verschlechterung.*

Die Ergebnisse zur Häufigkeit des kritischen Hinterfragens fallen weniger eindeutig aus (s. 3.1.2). Im Hinblick darauf, dass für die unterschiedlichen Systeme keine eindeutigen Trends identifiziert werden konnten lässt sich *FF 1.2 Welchen Einfluss hat die Häufigkeit des kritischen Hinterfragens auf das Systemverständnis in der Analyse technischer Systeme?* nicht eindeutig beantworten. Insbesondere das große Systemverständnis von Proband P5 mit lediglich einmaligem Hinterfragen legt nahe, dass weitere Einflussgrößen wie beispielsweise Analysekompetenz und Unterschiede zwischen bewussten und unbewussten Vorgängen eine Rolle spielen. Fehlende Trends beim System Axialkolbenpumpe (s. Bild 2) sprechen ebenfalls für diese Annahme. Der leicht positive Trend beim System Rasensprenger und die Stagnation des Verständnisses bei Proband P4 trotz häufigem Hinterfragen (s. 3.1.2) deuten darauf hin, dass die Häufigkeit dennoch einen Einfluss auf das Systemverständnis haben kann. In Kombination mit den ermittelten geringen Vorkenntnissen der Probanden zu diesem System (s. 3.2) lässt sich die folgenden *Hypothese* ableiten:

*Bei geringen Vorkenntnissen zum untersuchten System wirkt sich das kritische Hinterfragen bis zu einer gewissen Häufigkeit positiv auf das Systemverständnis aus.*

## 4.2 Einfluss der Vorkenntnisse auf das Systemverständnis

Die ermittelten Daten deuten darauf hin, dass kein generell negativer oder positiver Einfluss der Vorkenntnisse auf das Systemverständnis besteht, es zeigen sich jedoch bei einzelnen Probanden Auffälligkeiten. Besonders hervorzuheben sind die Ergebnisse zu den Probanden P3 und P5 (s. Bild 3), die darauf hindeuten, dass diese Probanden ihre Kenntnisse zum System überschätzt haben. Trotz der Angabe mindestens fortgeschrittener Kenntnisse zum System Axialkolbenpumpe haben beide Probanden in der Analyse die geringsten Werte im Systemverständnis über beide Gruppen hinweg erzielt. Daraus ergibt sich die Folgerung zu *FF 2: Welchen Einfluss haben die Vorkenntnisse zum System auf das Systemverständnis in der Analyse technischer Systeme?*

*Eine Überschätzung der eigenen Vorkenntnisse kann dazu führen, dass die Analyse nicht detailliert genug durchgeführt und das Systemverständnis nicht evaluiert wird.*

Das Problem hierbei scheint zu sein, dass die Probanden sich ihrer Fehleinschätzung nicht bewusst sind (vgl. [2]) und für sie somit kein Handlungsbedarf in Form einer tiefergehenden Analyse besteht.

## 5 Einschränkungen und Ausblick

Aufgrund der geringen Probandenzahlen und dem explorativen Charakter der Studie lassen sich lediglich Indizien für die beschriebenen Zusammenhänge ableiten. Auch die Beschränkung der Untersuchung auf Studierende im Master Maschinenbau lässt nur Vermutungen über die Einflüsse auf die Gesamtheit der Konstrukteure zu. Es ist jedoch zu sagen, dass die ausgewählten Probanden bereits eine für die Aufgabenstellung ausreichende Expertise mitbrachten. Insbesondere Fehleinschätzungen zum eigenen Verständnis können auch bei Konstrukteuren in Industrieunternehmen auftreten. Ausgehend von den nicht eindeutigen Ergebnissen zur Häufigkeit kritischen Hinterfragens (s. 3.1.2) gilt es in zukünftigen Studien näher zu untersuchen, unter welchen Voraussetzungen kritisches Hinterfragen den Aufbau von Systemverständnis unterstützen kann.

Aus dem zweiten Durchgang der vorgestellten Studie kann ermittelt werden, welche Effekte das Hinterfragen bei den Probanden P3 und P5 auf das Systemverständnis hatte, um weitere Indizien zur Überschätzung des Verständnisses zu identifizieren. Der positive Einfluss des Hinterfragens soll durch eine Analyse der Daten von MATTHIESEN [10] weiter gefestigt und ein Übertrag auf Konstrukteure geschaffen werden. Durch die größere Probandenzahl kann dann genauer ermittelt werden, in welchen Situationen das kritische Hinterfragen einen positiven Effekt erzielt. Aufbauend auf den Ergebnissen wird eine zielgerichtete Entwicklung der methodischen Unterstützung möglich.

## 6 Danksagung

Die Autoren danken dem KD²-Lab, finanziert durch DFG INST 121384/11-1 FUGG, für die Bereitstellung der Infrastruktur bei Durchführung der Studie und den Probanden für die Teilnahme an der Studie.

## Literatur

[1] Meboldt, M., Matthiesen, S., Lohmeyer, Q.: „The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes", Proceedings of

the 2nd International Workshop on Modelling and Management Engineering Processes MMEP, Cambridge, UK, 2012, 127-139

[2] Rozenblit, L., Keil, F.: „The misunderstood limits of folk science: an illusion of explanatory depth", Cognitive Science 26, 2002, 521–562

[3] Albers, A., Bursac, N., Rapp, S.: „PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads", Forschung im Ingenieurwesen, Band 81, 2017, 13-31

[4] Matthiesen, S.: „Seven Years of Product Development in Industry – Experiences and Requirements for Supporting Engineering Design with ‚Thinking Tools'", Proceedings of ICED11, København, Denmark, 2011

[5] Ehrlenspiel, K., Meerkamm, H.: „Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.", Carl Hanser Verlag, München, 2013

[6] Hacker, W. (Hrsg.): „Denken in der Produktentwicklung. Psychologische Unterstützung der frühen Phasen.", vdf Hochschulverlag AG, Zürich, 2002

[7] Dylla, N.: „Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren", Carl Hanser Verlag, 1990

[8] Fricke, G.: „Konstruieren als flexibler Problemlöseprozeß. Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren.", VDI-Verlag, 1993

[9] Booth, J. W. et al.: „Comparing Functional Analysis Methods for Product Dissection Tasks", Journal of Mechanical Design 137, ASME, 2015

[10] Matthiesen, S., Nelius, T.: "Managing Assumptions during Analysis – Study on successful Approaches of Design Engineers", Proceedings of NordDesign 2018, Linköping

[11] Charness, G., Gneezy, U., Kuhn, M. A.: "Experimental methods: Between-subject and within-subject design", Journal of Economic Behavior & Organization 81, Elsevier, 2012

# Eignungsanalyse agiler Prinzipien für die Entwicklung physischer Produkte

Julian Schrof[1], Tobias Sebastian Schmidt[1], Kristin Paetzold[1]

[1] *Institut für Technische Produktentwicklung, Universität der Bundeswehr München, Deutschland*

## Abstract

Even though there is a hype about agile methods in hardware development, their application has proven less effective compared to agile software development. That is why this study analysed the influence of their principles on the constraints of physicality, to understand the effect on a more detailed level. Data was obtained from interviews with experienced experts in agile product development. Key findings are, the principles forming *Scrum*, *Kanban* and *Agile Modelling* have different effects on the individual constraints of physicality. They range from overall support to worsening single constraints. Based on this it can be deducted, that the structure of agile principles has to be reorganized and complemented to allow agile methods to effectively support hardware development.

*Keywords: Agile Principles, Constraints of Physicality, Agile Mechatronic Development, Development Methods*

## 1 Einleitung

Agile Methoden [1] werden zunehmend in der Produktentwicklung verwendet [2], da sie eine flexible und effektive Bearbeitung komplexer Themenbereiche ermöglichen [3]. Vor allem in der Software (SW) Entwicklung werden sie bereits sehr erfolgreich eingesetzt [4]. In ersten Berichten [5] wurde gezeigt, dass agile Arbeitsmodelle auch ein großes Potential in der Entwicklung mechatronischer Produkte haben. Die bestehenden agilen Methoden können jedoch nur schwer ohne Anpassungen der verwendeten Produktionstechnologien verwendet werden [6]. So wurden bereits agile Methoden an klar definierte Anwendungsbereiche in mechatronischen Entwicklungsumfeldern angepasst und haben dort einen deutlichen Mehrwert gegenüber klassischen Entwicklungsmethoden bewiesen [7], [8]. Diese adaptierten Methoden, können jedoch nicht in gleichem Maße generisch verwendet werden, wie die ursprünglichen Methoden in der SW Entwicklung.

Industrievertreter gestehen agilen Modellen in der Entwicklung mechatronischer Produkte einen signifikanten Mehrwert gegenüber klassischen Herangehensweisen ein, sehen aber bisher mit den bestehenden Methoden in der Breite nicht eine vergleichbare Wirkung wie in der SW Entwicklung [9]. Ovesen begründet dies mit Gesetzmäßigkeiten und Abhängigkeiten der physischen Produktentwicklung, s.g. Einschränkungen der Körperlichkeit (EdK), aufgrund derer gewisse Bestandteile agiler Produktentwicklung nicht oder nur erschwert umsetzbar sind und somit die Methoden nicht ihre vollständige Wirkung zeigen [10]. Motiviert von diesem bisher ungenutzten Potential versucht diese Untersuchung, einen Beitrag zur Nutzbarmachung agiler Ansätze in der Entwicklung physischer Produkte zu leisten.

Diese Untersuchung stellt daher die Frage, inwiefern die agilen Prinzipien, die den agilen Methoden zugrunde liegen, für die agile Entwicklung physischer Produkte geeignet sind. Dabei soll auf Scrum und Kanban als die meist genutzten [4] und Agile Modelling als einer der - aus der Autorensicht - vermeintlich geeignetsten Methoden fokussiert werden. Die Forschungsfrage lautet daher:

**Inwiefern helfen die individuellen Prinzipien von Scrum, Kanban und Agile Modelling, die Herausforderungen (EdKs) agiler Entwicklung physischer Produkte zu überwinden?**

Dieses Verständnis soll die Adaption agiler Methoden an die Rahmenbedingungen der Entwicklung mechatronischer Produkte unterstützen. Der gewählte Ansatz unterscheidet sich von bisherigen Arbeiten insofern, dass die

einzelnen Prinzipien losgelöst von deren Methode betrachtet werden. Die Methoden werden daher nicht pauschalisierend als Ganzes bewertet.

## 2 Stand der Forschung

Agilität ist die Fähigkeit eines Entwicklungsteams, auf Veränderungen schnell zu reagieren, wobei dem Versuch, sie zum Vorteil nutzbar zu machen, eine besondere Bedeutung zukommt [11]. Agile Entwicklung ist damit vor allem bei Entwicklungsaufgaben prädestiniert, in denen der Entwicklungsverlauf nicht vorhersehbar und komplexen Zusammenhängen unterliegt [12]. Daher strebt die agile Entwicklung danach, Unsicherheiten anhand von regelmäßigen Prototypen zu eruieren, um das Wissen über das Produkt sukzessive auszubauen und zu bestätigen. So verlangt beispielsweise Scrum, die bekannteste Methode in der agilen HW Entwicklung, (potentiell nutzbare) Prototypen in Iterationen von maximal vier Wochen [13].

Während die agile Entwicklung vor allem in der Softwareindustrie vorangetrieben und dort als etablierter Ansatz gilt, ist die Übertragbarkeit dieser bewährten Ansätze (z.B. Scrum) in die HW Entwicklung nicht trivial. Hardware wird deshalb als das Gegenteil von Software definiert und meint Produkte mit physischer Gestalt (z.B. mechatronische Produkte), in denen die Materialisierung unumgänglich ist. Nach Ovesen [10] begründet gerade diese Körperlichkeit viele Einschränkungen bei der Übertragbarkeit agiler Ansätze aus der SW in die HW Entwicklung.

Hergeleitet an einer umfassenden Längsschnittstudie strukturiert Ovesen die EdKs in vier Cluster: Erstens die Separierung des Produkts, insbesondere in geeignete Deliverables für jede Iteration, zweitens das Herunterbrechen der Entwicklungsaufgabe unter Berücksichtigung der meist hochspezialisierten Fachdomänen, drittens das Schätzen der Zeit und Verfügbarkeit der Ressourcen für die Entwicklungstätigkeiten, sowie viertens fehlende Flexibilität in Prozess und Produkt. Die Existenz dieser EdKs führt dazu, dass die agile Entwicklung in der HW entweder als nicht umsetzbar bewertet oder auf die Projektmanagementebene reduziert wird [9].

Nach dem Ebenenmodell [9] lassen sich die Artefakte agiler Entwicklung in die Ebenen Philosophie, Methode, Prinzipien und Praktiken aufgliedern. Das Manifest agiler Entwicklung [3] beschreibt damit die grundlegende Arbeitshaltung, die in diversen agilen Methoden interpretiert werden. Die Methoden stellen Entwicklern Leitfäden zur Verfügung, die anhand von Prinzipien und operativen Praktiken die Umsetzung der agilen Arbeitshaltung vereinfachen sollen. Die Prinzipien repräsentieren dabei die Wirkmechanismen, anhand

dessen die Methoden charakterisiert werden können. Nach Klein [14] weisen die hier untersuchten Methoden Scrum, Kanban und Agile Modelling die in Bild 1 dargestellten Prinzipien auf.

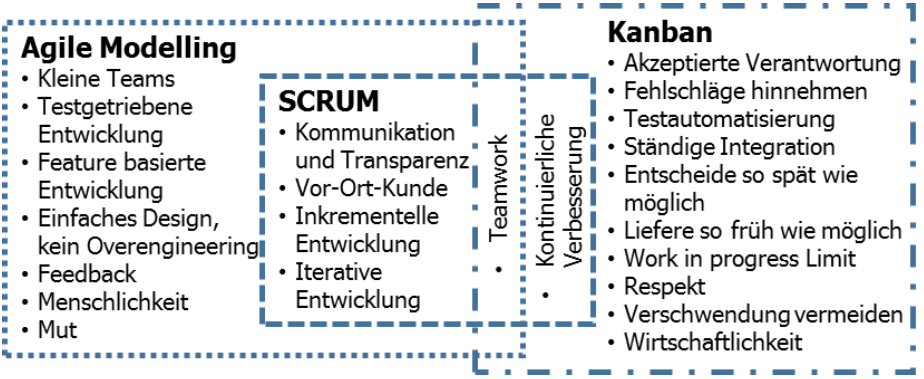



Bild 1: Aufteilung Prinzipien von Scrum, Kanban und Agile Modelling nach [14]

## 3 Methodik

Die Datenerhebung für diese Studie erfolgte durch strukturierte Interviews. Der Interviewleitfaden bestand aus einer Tabelle, auf der zeilenweise die agilen Prinzipien nach [14] und spaltenweise die EdKs nach [10] aufgeschlüsselt sind (siehe Bild 2). Befragt wurden Experten, die mit agilen Arbeitsweisen praxiserfahrene sind. Sie wurden gebeten, den Einfluss der Prinzipien auf die EdKs auf einer Skala von 0 (hilft nicht, dieses EdK zu umgehen) bis +10 (hilft deutlich, dieses EdK zu umgehen) quantitativ zu bewerten. Im Falle einer Verstärkung der EdK konnte zusätzlich der Wert -1 gewählt werden. Ergänzend wurden die Experten gebeten, ihre Einschätzung qualitativ zu begründen.

Die Interviews wurden teils am Telefon, teils persönlich durchgeführt. Den telefonisch interviewten Experten wurde bereits vor dem Interview eine Kopie des Interviewleitfragens zugeschickt, sodass sie sich mit der Struktur der Befragung vertraut machen konnten und während des Interviews eine visuelle Orientierung für die Befragung zur Verfügung hatten. Allen befragten Experten wurden zuerst die Struktur des Interviews, dann die verwendetet Prinzipien und schließlich die EdKs erläutert. Weiterhin wurden die Experten ermutigt, diejenigen Themenblöcke zu bearbeiten, die die größte Nähe zu ihrer eigenen Arbeit haben. Die Gespräche wurden aufgezeichnet, um nachträglich eine genaue Analyse der Befragung insbesondere bzgl. der qualitativen Begründungen durchführen zu können.

Die Interviews waren auf eine Stunde begrenzt und wurden zwischen Mai und Juni 2018 mit insgesamt zwölf Experten durchgeführt. Die Teilnehmer wurden nach ihrer Erfahrung mit agilen Arbeitsweisen in der Entwicklung physischer Produkte ausgewählt. Im Durchschnitt haben die Experten vier Jahre mit agilen Arbeitsweisen sowohl in SW Entwicklungsfeldern, als auch in der Entwicklung mechatronischer Produkte gearbeitet. Ein Großteil der Experten ist im Automobilbereich oder Unternehmensberatungen tätig. Da die Interviews von zwei der Autoren durchgeführt wurden, wurde eine einfache und unmissverständliche Befragungsstruktur gewählt, um die Einflussnahme durch den Fragenden zu reduzieren.

## 4 Ergebnisse

Bild 2 fasst die Ergebnisse der quantitativen Aussagen zusammen. Zeilenweise sind die agilen Prinzipien nach [14] angeordnet und in den vier Spalten rechts jeweils die Bewertung der einzelnen agilen Prinzipien pro EdK nach [10] aufgelistet. Die Prinzipien wurden anhand der durchschnittlichen Bewertung über alle vier EdKs hinweg der Größe nach aufgelistet. Jeder Punkt repräsentiert eine Bewertungsangabe der Experten. Zusätzlich ist der Mittelwert der einzelnen Bewertungen der agilen Prinzipien pro EDK als Linie hinzugefügt. Agile Prinzipien, für die bei mindestens einer EdK weniger als fünf Bewertungen abgegeben wurden, sind grau dargestellt.

Für die EdK *Separierung der Deliverables pro Iteration* wurden die Prinzipien „Einfaches Design / Kein Overengineering" (Mittelwert $\bar{x}$=8,1; Anzahl Wertungen n= 7; Standardabweichung σ=1,8), „Liefere so früh wie möglich" ($\bar{x}$=6,7; n=7; σ=3,1) und „Inkrementelle Entwicklung" ($\bar{x}$=6,6; n=9; σ= 2,8) als die am hilfreichsten agilen Prinzipien bewertet, um die EdK aufzuheben. Als am wenigsten hilfreich wurden die Prinzipien „Verschwendung vermeiden" ($\bar{x}$=0,83; n=6; σ= 1,34), „Wirtschaftlichkeit" ($\bar{x}$=0,8; n=5; σ= 1,2) und „Work in progress Limit" ($\bar{x}$=1,7; n=6; σ= 2,6) bewertet.

Für die EdK *Aufgabenzerteilung (Organisationssicht)* wurden die Prinzipien „Akzeptierte Verantwortung" ($\bar{x}$=7,3; n=8; σ= 2,7), „Kommunikation und Transparenz" ($\bar{x}$=7,2; n=10; σ= 1,8) und „Teamwork" ($\bar{x}$=6,1; n=10; σ= 1,8) als die am hilfreichsten Prinzipien bewertet, um das EdK zu umgehen. Als am wenigsten hilfreich kristallisieren sich die agilen Prinzipien „Entscheide so spät wie möglich" ($\bar{x}$=1,4; n=5; σ= 3,32), „Verschwendung vermeiden" ($\bar{x}$=2,6; n=5; σ= 1,62) und „Vor-Ort-Kunde" ($\bar{x}$=3,05; n=10; σ= 3,45) heraus.

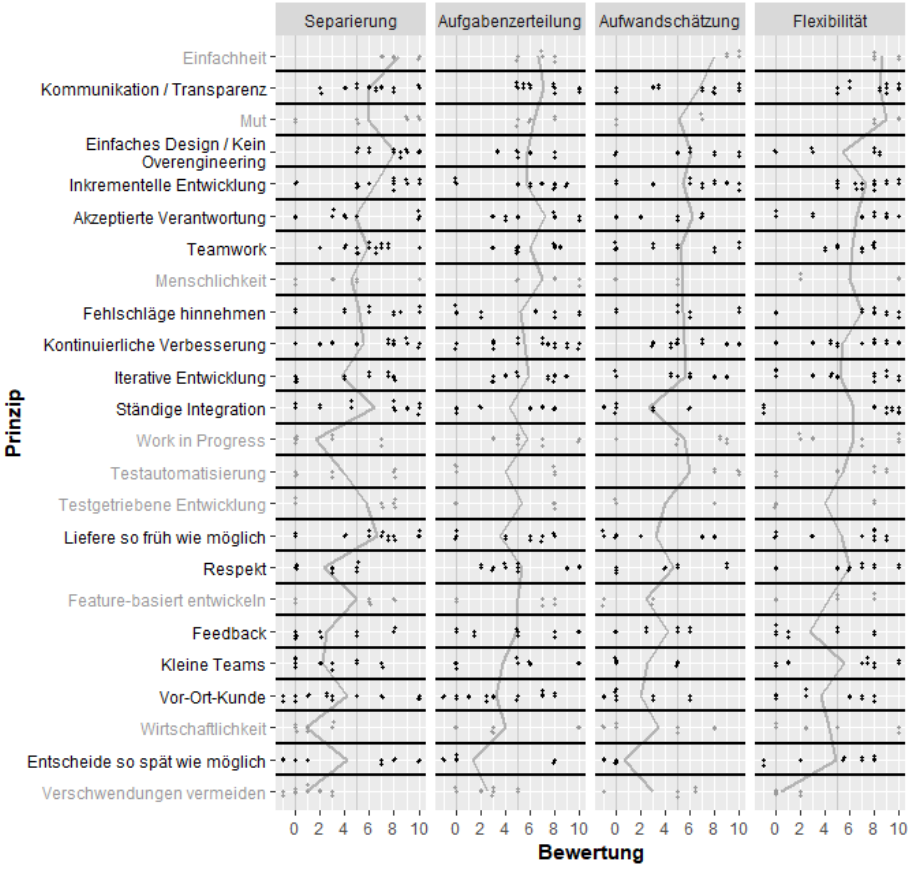



Bild 2: Interviewergebnisse: Einfluss der Prinzipien (zeilenweise) auf die Einschränkungen der Körperlichkeit (spaltenweise). Jeder Punkt entspricht einer Bewertung (Linie = Durchschnittswerte je Prinzip pro EdK).

Für die EdK *Aufwandschätzung* sind laut der Experten die Prinzipien „Einfaches Design / kein Overengineering" ($\bar{x}$=6,5; n=6; σ=3,45), „Kommunikation und Transparenz" ($\bar{x}$=,2; n=8; σ=3,4) und „Inkrementelle Entwicklung" ($\bar{x}$=5,8; n=9; σ=3,6) am hilfreichsten. Als am wenigsten hilfreich wurden die agilen Prinzipien „Ständige Integration" ($\bar{x}$=0,7; n=6; σ=3,4), „Vor-Ort-Kunde" ($\bar{x}$=1; n=7; σ=2,4) und „Kleine Teams" ($\bar{x}$=1,7; n=6; σ=2,4) bewertet.

Für die EdK *fehlende Flexibilität* haben die Prinzipien „Kommunikation und Transparenz" ($\bar{x}$=8,4; n=8; σ=1,8), „Inkrementelle Entwicklung" ($\bar{x}$=7,4;

n=10; σ=1,6) und „Fehlschläge hinnehmen" ($\bar{x}$=7; n=7; σ=) den größten Mehrwert. Weniger hilfreich sind laut der Experten die agilen Prinzipien „Feedback" ($\bar{x}$=2,8; n=5; σ=3,2), „Vor-Ort-Kunde" ($\bar{x}$=3,7; n=8; σ=3,2) und „Entscheide so spät wie möglich" ($\bar{x}$=4,9; n=6; σ=4,7).

Unter die agilen Prinzipien, die laut den Experten den größten Mehrwert zur Lösung der EdKs insgesamt aufweisen, fallen „Kommunikation und Transparenz", „Inkrementelle Entwicklung" sowie „Einfaches Design / kein Overengineering". Im Kontrast dazu steht „Vor-Ort-Kunde", das am wenigsten hilft, und sogar die Wirkung der EdKs verstärkt. Zu diesen Prinzipien werden in den nachfolgenden Absätzen die qualitativen Begründungen aufgeführt.

Hinsichtlich des Prinzips „Kommunikation und Transparenz" begründen die Experten ihre Bewertung damit, dass offene Themen, Veränderung und Fortschritt sichtbar gemacht werden und dadurch die Planung und Schätzung verbessert würde. Ergänzend wurde argumentiert, dass Ressourcen effektiver verteilt werden, dass sich ein agiles Mindset nur mit ausreichend Kommunikation entwickeln könnte und dass ein gemeinsames Verständnis entsteht, wer der Kunde ist, und welche Bedürfnisse er hat. Es wurde zudem erwähnt, dass die entscheidende 360° Perspektive auf das Produkt nur mit ausreichend Transparenz entstehen kann.

„Inkrementelle Entwicklung" ermöglicht laut den Experten eine frühe Testbarkeit des Produkts. Zudem ist fokussierte Arbeit an kleinen, transparenteren und besser schätz- und planbaren Inkrementen möglich. Außerdem wird die Flexibilität erhöht, da Änderungen weniger Kosten durch Abbruch der bestehenden Projektarbeit bedeutet. Weiterhin erlauben Inkremente ein frühes Feedback durch den Kunden und somit eine zeitnahe Realisierung von Optionen und Problemen.

Das agile Prinzip „Einfaches Design / kein Overengineering" wurde von den Experten folgendermaßen als sehr hilfreich bewertet. Das Weglassen von nicht kundenrelevanten Produkteigenschaften reduziert die Komplexität physikalischer Zusammenhänge und vereinfacht somit die Entwicklung. Zudem werden Unsicherheit, Unschärfe und Ablenkung bezüglich der Produkteigenschaften reduziert, und die Abschätzbarkeit und somit die Planbarkeit erhöht.

Das agile Prinzip „Vor-Ort-Kunde" wurde unter die drei am wenigsten hilfreichen Prinzipien, das teilweise EdKs sogar verstärkt gewählt. So wurden hoher Druck auf die Entwicklungsmannschaft und unüberlegte Eingeständnisse an Kunden beschrieben. Außerdem sei der Kunde in vielen Fällen zu weit von den Details der Produktentwicklung entfernt, um produktiv in der Ent-

wicklung mitzuarbeiten. Die Anwesenheit des Kunden erzeugt zudem Unruhe im Entwicklungsteam. Der Kunde versteht oft die langfristigen Entwicklungsprozesse nicht und ist daher nur schwer integrierbar. Positiv erwähnt wurde die einfachere Priorisierung der Produkteigenschaften, unter der Bedingung, dass nur ein einziger Kunde eingebunden werden muss.

## 5 Diskussion

Um die EdK1 bzgl. der Separierung von physischen Produkten in Einzelteile, die möglichst unabhängig entwickelbar sind, zu reduzieren, haben die Experten vor allem agile Prinzipien gewählt, die die Komplexität des zu entwickelnden Produktes reduzieren („Einfaches Design, kein Overengineering"), sowie übersichtliche Inkremente ermöglichen („Inkrementelle Entwicklung") und deren Gesamtfunktion möglichst früh durch Kundenfeedback bestätigen („Liefere so früh wie möglich"). Zu diesem Bild passen die als wenig hilfreich empfundenen agilen Prinzipien, die auf die ökonomischen Aspekte der Produktentwicklung abzielen („Wirtschaftlichkeit" und „Verschwendung vermeiden"). Diese Prinzipien bedeuten in diesem Rahmen eine Erhöhung der Komplexität durch zusätzliche wirtschaftliche Einschränkungen, und erschweren somit die Überwindung von EdK1.

Hinsichtlich der EdK2 „Aufgaben aus Organisationssicht für die Entwicklung der Produktinkremente zu differenzieren" wurden vor allem agile Prinzipien gewählt, die Leistungs- und Entscheidungsfähigkeit der Teams deutlich erhöhen. Gemeinsames arbeiten („Teamwork") mit ausreichend Fachwissen und Austausch („Kommunikation und Transparenz"), sowie Planbarkeit („akzeptierte Verantwortung") ermöglicht es Teams, kollaborativ Aufgaben aufzuteilen, die aus der eingeschränkten Perspektive einzelner Personen nicht möglich wären. Das agile Prinzip „Verschwendung vermeiden" wird dabei als wenig hilfreich angesehen, was gut zu der Ablehnung der frühen Integration des Kunden („Vor-Ort-Kunde") passt, da bei beiden Prinzipien ökonomische Eingrenzungen in einer konzeptionellen Phase der Produktentwicklung befürchtet werden.

Um die EdK3 bzgl. der „Schwierigkeit aus Prozesssicht, Zeit- und Ressourcenaufwand zu schätzen", anzugehen, wurden vergleichbare Prinzipien wie in den vorherigen beiden EdKs 1 und 2 gewählt. Die Ansätze ähneln sich insoweit, dass einerseits wie in EdK1 durch eine reduzierte Komplexität des Produktes und somit des Prozesses („Einfaches Design, kein Overengineering") die Schwierigkeit abnimmt das Produkt aufzuteilen und schrittweise umzusetzen („Inkrementelle Entwicklung") und somit die Schwierigkeit, Zeit und Ressourcenaufwand für den Entwicklungsschritt zu planen. Andererseits wird

auch hier der Ansatz aus EdK2 genannt, die Zusammenarbeit der Beteiligten zu verbessern („Kommunikation und Transparenz"), sodass diese gemeinsam in Teams in der Lage sind, Lösungen zu erarbeiten. Wichtig hierbei ist eine ausreichende Wissens- und Kompetenzbasis der Teams, weswegen zu kleine Teams („kleine Teams") als weniger hilfreich bewertet wurden. Wiederum wird die Anwesenheit des Kunden („Vor Ort Kunde") wie in EdK2 als nur wenig hilfreich gesehen, da auch in diesem Bereich der Produktentwicklung organisatorische Aspekte und nicht das Produkt im Vordergrund stehen.

Für die Schwierigkeit aus Prozess- und Produktsicht, flexibel genug zu entwickeln (EdK4), wurde das agile Prinzip „Fehlschläge hinnehmen" als am hilfreichsten gewählt. Hier zeigt sich, dass die bewusste Integration von Unsicherheit in den Prozess und das Produkt sehr wichtig ist. Bei Entwicklungstätigkeiten in komplexen Umfeldern kann keine vollständige Planbarkeit angenommen werden, weswegen Fehlschläge immer wieder passieren werden. Bei der Begründung wurde vermehrt darauf hingewiesen, dass Fehlschläge die Grundlage für Lernen sind und in der Praxis oft mehr Aufwand zur Vertuschung als zur Aufarbeitung der Fehlschläge betrieben wird. Eine andere Kultur erlaubt es, diesen Aufwand zu vermeiden und produktiv einzusetzen. Wie in EdK2 und EdK3 wird auch hier „Transparenz und Kommunikation" als sehr hilfreich eingeschätzt, um das gewonnene Wissen in der Organisation zu verteilen. „Inkrementelle Entwicklung" ermöglicht zudem, die Kosten der Flexibilität zu reduzieren, da bei Kursänderungen nur das letzte unvollständige Inkrement verloren geht. Dadurch ermöglicht man notwendige Kursänderungen, die ansonsten aufgrund bereits investierter Kosten nur sehr schwer durchsetzbar wären. Als weniger hilfreich wird - ähnlich wie bei den anderen EdKs - wiederum die Anwesenheit des Kunden angesehen („Vor-Ort-Kunde"). Im Vergleich zu den anderen EdKs wird dieses Prinzip jedoch deutlich positiver eingeschätzt. Insgesamt werden alle untersuchten Prinzipien im Durchschnitt bei EdK4 hilfreicher eingeschätzt.

Die Gruppe der über alle EdKs am hilfreichsten eingeschätzten Prinzipien beinhalt „Inkrementelle Entwicklung", „Kommunikation und Transparenz", sowie „Einfaches Design / kein Overengineering" und somit fundamentale Werte agilen Arbeitens. Das zeigt, dass die befragten Experten die EdKs durch eine Reduktion der Komplexität, bessere Zusammenarbeit und mehr Verantwortung in Teams, sowie schrittweiser, inkrementeller Produktentwicklung angehen. Gerade die Kombination aus inkrementeller Entwicklung und Transparenz wird über alle Bereiche als sehr hilfreich eingeschätzt, wodurch eine gegenseitige Verstärkung der Prinzipien sinnvoll erscheint. Durchschnittlich wenig hilfreich bei der Lösung der EdKs wurden ökonomische Prinzipien eingeschätzt. Die Experten schätzen das Vorhandensein von Spielraum und Ent-

wicklungsmöglichkeiten bei der Herangehensweise an die EdKs wichtiger ein als Kostenrahmen einzuhalten.

Widersprüchliche Aussagen fallen bei den agilen Prinzipien „Ständige Integration", „Progress Reporting" und „Entscheide so spät wie möglich" auf, deren Bewertungen von sehr positiv über neutral, bis zu verstärkend mit hoher Standardabweichung schwanken. Hierbei könnten unterschiedliche Erfahrungsräume, sowie Unkenntnis der Prinzipien in der Praxis zentrale Rollen spielen. Ähnlich scheinen „Testgetriebene Entwicklung", „Testautomatisierung", „Feature basierte Entwicklung" in der Entwicklung mechatronischer Produkte bisher aufgrund mangelnder Anwendbarkeit oder Unkenntnis der benötigten Technologien nicht verwendet zu werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die untersuchten agilen Prinzipien differenzierte Einflüsse auf die vier unterschiedlichen EdKs haben. Während einige agile Prinzipien das Überwinden der EdKs deutlich unterstützen, helfen andere Prinzipien nur zu einem geringen Maße. Einzelne Prinzipien verstärken die EdKs sogar. Obwohl für verschiedene EdKs teils widersprüchliche Aussagen bzgl. identischer Prinzipien getroffen wurden, konnte eine Gruppe an besonders hilfreichen Prinzipien für alle EdKs identifiziert werden. Dies zeigt, dass in der Grundstruktur der untersuchten agilen Methoden bereits Potential für die Lösung der EdKs besteht. Die bisherigen Kompositionen der agilen Prinzipien entsprechen jedoch nicht dem Optimum, um dieses Potential maximal zu entfalten. Weiterhin kann aus der Analyse nicht gefolgert werden, bis zu welchem Grad die untersuchten Prinzipien die EdKs lösen können.

Daraus lassen sich zwei Schlussfolgerungen ableiten. Einerseits muss die Zusammensetzung und Gewichtung der bestehenden Prinzipien an die Bedingungen der Entwicklung mechatronischer Produkte angepasst werden. Andererseits entsteht ein Bedürfnis, neue agile Prinzipien zu entwickeln, die speziell auf die Herausforderungen der agilen Entwicklung mechatronischer Produkte abgestimmt sind.

Die präsentierten Ergebnisse wurden unter den in der Methodik vorgestellten Möglichkeiten erarbeitet. Da nur zwölf Experten befragt wurden, besteht das Risiko, statistisch eine nicht repräsentative Stichprobe genommen zu haben, obwohl dieses Risiko durch die Ergänzung der quantitativen durch die qualitative Bewertung reduziert wurde. Außerdem werden in der Praxis unterschiedliche Methoden verwendet (*Scrum*, *XP*, *Design Thinking*, *Kanban*, *Feature Driven Development, Scrumban* etc.) und eine dadurch variierende gegenseitige Beeinflussung der Prinzipien kann aufgrund der gewählten Methodik nicht bewertet werden.

Vereinzelt wurden widersprüchliche Bewertungen erteilt. Da die statistische Datenmenge es nicht erlaubt Ausreißer zu isolieren, wurden daher nur Kategorien analysiert, die von fünf oder mehr Teilnehmern bewertet wurden. Weiterhin waren die Interviews auf eine Stunde begrenzt, wodurch keine vollständigen Bewertungen abgegeben werden konnten und einzelne Aspekte nicht im Detail erklärt werden konnten. Bei der Bewertung der agilen Prinzipien gibt es insofern Ungenauigkeiten, dass die Menge der Prinzipien nach [14] im Vergleich mit anderen Aufteilungen [3], [9] sowohl Werte, Praktiken und Prinzipien beinhaltet, die teilweise aufeinander aufbauen, was die Vergleichbarkeit erschwert.

# 6 Fazit

Die zentrale Fragestellung dieser Studie ist, inwiefern die Prinzipien agiler Methoden helfen, die EdKs, also die HW-spezifischen Herausforderungen in der agilen Entwicklung zu überwinden. Anhand der Einschätzung von Experten wurde gezeigt, dass ein Teil der untersuchten agilen Prinzipien die Überwindung der EdKs in der Entwicklung mechatronischer Produkte unterstützen. Über die EdKs hinweg haben sich „Inkrementelle Entwicklung", „Kommunikation und Transparenz", sowie „Einfaches Design / kein Overengineering" als die am hilfreichsten Prinzipien herausgestellt. Weiterhin wurde gezeigt, dass ein Teil der Prinzipien keinen Beitrag zur Lösung der EdKs leistet.

Die aktuellen Zusammensetzungen der Prinzipien in den untersuchten Methoden sind also nicht ideal für die Entwicklung mechatronischer Produkte. Daraus wird abgeleitet, dass für die agile Entwicklung mechatronischer Produkte eine Reorganisation und Umpriorisierung der bestehenden Prinzipien in den untersuchten Methoden notwendig ist. Darüber hinaus besteht das Potential, zusätzliche Prinzipien zu entwickeln, die konkret an die Rahmenbedingungen der Entwicklung mechatronischer Produkte angepasst sind.

Die Autoren sehen ergänzend in folgenden Fragestellungen weiteren Forschungsbedarf. Einerseits kann nicht eingeschätzt werden, bis zu welchem Grad die bestehenden agilen Prinzipien die EdKs auflösen können und welcher Beitrag durch zusätzliche, auf die Entwicklung mechatronischer Produkte abgestimmte Prinzipien erfolgen muss. Andererseits wurde nicht untersucht, welchen gegenseitigen Einfluss die individuellen agilen Prinzipien aufeinander haben.

## Quellen


[1] P. Abrahamsson, O. Salo, J. Ronkainen, and J. Warsta, "Agile software development methods: Review and analysis," *Espoo, Finl. Tech. Res. Cent. Finland, VTT Publ.*, p. 478, 2002.

[2] A. Komus, "Abschlussbericht: Status Quo Agile 2016/2017.," *3. Stud. über Erfolg und Anwendungensformen von Agil. Methoden*, 2017.

[3] K. Beck, "Agile Manifesto," 2001.

[4] VERSIONONE, "12 STATE OF AGILE REPORT," 2018.

[5] J. J. David Socha, Tyler C Folsom, "Applying Agile Software Principles and Practices for Fast Auomotive Development," 2012.

[6] T. S. Schmidt and K. Paetzold, "Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen," *Des. X Symp.*, no. October, pp. 255–267, 2016.

[7] J. Furuhjelm, J. Segertoft, J. Justice, and J. J. Suchterland, "Owning the Sky with agile: Building a Jet Fighter Faster, Cheaper, Better with Scrum," pp. 1–4, 2017.

[8] G. Schuh, T. Gartzen, F. Basse, and E. Schrey, "Enabling Radical Innovation through Highly Iterative Product Expedition in Ramp up and Demonstration Factories," *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 620–625, 2016.

[9] T. S. Schmidt, K. Paetzold, and S. Weiss, "Agile Development Of Physical Products -An empirical study about motivations, potentials and applicability," München, 2018.

[10] N. Ovesen, "The Challenges of Becoming Agile: Implementing and Conducting SCRUM in Integrated Product Development," p. 200, 2012.

[11] A. Böhmer, A. Beckmann, and U. Lindemann, "Open Innovation Ecosystem - Makerspaces within an Agile Innovation Process," *ISPIM Innov. Summit*, no. December, 2015.

[12] E. Stelzmann, "Contextualizing Agile Systems Engineering," no. May, pp. 17–22, 2012.

[13] K. Schwaber and J. Sutherland, "The Scrum Guide ™," 2017. [Online]. Available: http://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2017/2017-Scrum-Guide-US.pdf#zoom=100.

[14] T. P. Klein, "Agiles Engineering im Maschinen-und Anlagenbau," 2016.

# Understanding the consequences of severe influences on ongoing product development projects: a tentative framework

Fausto Guaragni[1], Kristin Paetzold[1]

[1] *Institute for Technical Product Development,*
*University of the German Federal Armed Forces Munich*

## Abstract

The initial planning of the development of complicated products usually requires time and efforts; however, even the most accurate plans are not able to foresee all the uncertainties that might arise during an ongoing project. When an important uncertainty becomes a reality, it might happen that its consequences render obsolete at least part of the initial plan and, consequently, a critical situation arises. Depending on the severity of such events, a disruption or a crisis arises. This contribution aims to describe what is present in the literature about the topic and to present a tentative framework that might improve the understanding of the cause-effect mechanics of such events.

*Keywords: Ongoing product development projects, Disruptions, Network analysis, Tentative framework.*

## 1 Introduction

It is not an easy task to recognize when an external influence might be able to affect the flow of an ongoing product development process and, at the same

time, it is not always possible to be sure that a process is robust enough and is able to withstand any kind of uncommon problems.

When dealing with disruptive events a team working on a product development process can hardly solve the issue by implementing minor adaptations to the initial plans. Most of the times, it necessary to interrupt the process in order to reassess what has to be changed in order to proceed once again with the development activities.

Many are the variables that might impact the unravelling of these scenarios: the robustness of a company and of the product development processes against external influences, the severity of the influences, the complexity of the product and of the organization developing it, the novelty of the technology employed in the development, the type of development process employed, the type of product.

The first important distinction is whether the development process is more plan-oriented or more value-oriented. In the first case, traditional development approaches (example: Waterfall) are more inclined to be used, while in the second one agile product development (example: Scrum) is more often employed.

Agile methodologies tend to adapt better and faster when the need to change the ongoing plan arises; however, they are more often applicable to non-physical product and hardly can be implemented on entire development projects in companies that present complicated structures and that develop complicated physical products (ex: automotive industry). Within these scenarios, traditional plan-oriented approaches appear to be the most common ones.

When the development of a product is based on a complicated plan, uncertainties can become influencing factors that might ultimately bear important effects on the plan itself and risk compromising the ongoing development efforts. When the risk carried by an uncertainty becomes a real influence, a critical situation might arise, especially if the original plan cannot accommodate easily the changes required by the situation. The more a situation is critical, the more it is possible for a development process to encounter a disruption or a crisis.

The literature presents some cases that describe such events and how company coped with them [1]; however, they are usually considered for purposes that might differ quite a lot from the purpose of this research and investigate these events with different perspectives.

For instance, in 1989, Intel had to face serious issues related to the development of the X-2 model [2]. After the entire product was designed and prepared for the production in series, "everything that could possibly go wrong did go wrong". The consequences of these events were so serious that the company had to take the project back to its planning phase in order to reconsider some relevant aspects of the product.

Many studies about these events have already been conducted, therefore the next paragraphs is going to describe how the literature relate one term to another and which field of studies have covered them.

## 2 Uncertainties

A research by Paté-Cornell (1996) recognize that in the development of a product there are two kinds of uncertainties [3]: aleatory and epistemic (basic lack of knowledge about fundamental phenomena).

Uncertainties are always source for potential risks, since the lack of information can undermine the robustness of a plan. Additionally uncertainty can be related not only to the nature of a potential influence but also to the magnitude of its effects. Consequently, uncertainty do not only lead to risks related to the lack of foresight on a potential event, but also on the capability of recognizing the full scope of the consequences; therefore, it might be possible that a product development team might recognize a threat but not the full extent of its effects.

A research conducted by O´Connor and Rice in 2013 [4] clearly stat that "uncertainty cannot be ordered or contained, but that it can, in fact, be handled within large established organizations much better than is currently happening."

The same research describes a framework that aims to distinguish which type of uncertainties exists. It identifies "…four categories (market, technical, resource and organizational categories of uncertainty) and three dimensions (uncertainty category, latency and criticality) … they offer scholars a framework within which to further theory development and managers a framework for recognizing the challenges of project management in the RI context and an approach for preparing project managers appropriately".

Among these dimensions, criticality appear to be the most important selecting factor for the purpose of this research.

As previously mentioned, in the field of product development, some events are able to simply interfere with the "Routine" of the ongoing development projects; in these situations, the original plan can with minor changes absorb an uncertainty when it appears.

However, serious problems arise when uncertainties are so relevant that the effects of their occurrence can interrupt the development efforts.

When a "Showstoppers" appears, the original plan becomes usually obsolete and a set of consequences begins to affect seriously the normal development processes. This scenario can be described as a critical situation and it deserves a separate set of considerations.

## 3 Critical Situations

The concept of critical situation is quite generic and refers to a huge variety of situations that are not to be considered common, which require new relevant choices since the previous organization, the normal processes or the already made decisions are either incapable to respond or simply obsolete.

However, "…any situation, in which an important decision has to be made, is considered critical. The outcome of this decision can be either positive or negative." [5].

In contrast with the concept of critical, it is possible to consider as common every situation in which it is not possible to recognize important variations from a predetermined plan or already defined organization.

While it is not mathematically possible to recognize always a priori the occurrence of a critical situation, it is true that the more uncertain a specific context is, the more it is possible that a critical situation will appear.

Within the context of this research, the term "critical situation" most of the times has a negative meaning since the consequences of such occurrences in the development of a product usually require an additional expenditure of economic resources (time, costs, etc…) or, in the worst case, it escalates in a scenario where it is not possible to proceed.

Nonetheless, not all these occurrences are the same, in fact a critical situation, for instance, always has the consequence of interrupting a process; without adaptations of the original development plan to the effects of an influencing

factor, it is not possible to proceed with the process and therefore this originate the need for new relevant decisions.

Additionally, not all these events have the same severity, since the importance of the consequences of critical events may vary greatly depending on what has occurred; therefore, it is possible to distinguish further between "disruption" and "crisis". The next paragraph defines better the difference between one term and the other one.

## 4 Disruptions and crisis

The literature tends to describe these two phenomena in a similar way and sometimes it appears that their meaning is completely overlapping.

Even if it is difficult to distinguish between one term from the other one, it is possible to define at least a couple of aspects that might be able to support the distinction between a disruption and a crisis. For instance, the main difference between these two occurrences is the severity of the consequences of these events

In particular, when referring to a product, it is possible to "… consider as a disruption every influencing factor that might strongly interfere with the development of the products or severely compromise their success on the market" [6].

However, when such influence is so severe that the premises of the development itself are compromised and the scale of the critical situation might reduce the priority of resuming the development process too much, than the situation escalates into a crisis, since the situation might have become so complex that the priority of the company could be survival itself.

For instance, many natural catastrophes create such severe consequences that not only the development of the product but the entire company might cease to exist. A strong financial crisis on an international scale might have the same effect.

For the purpose of this research, it appears to be more important to focus mainly on those situations where the company affected by a severe influence is still able to perform most of its other activities and, consequently, resuming the product development activities remains a priority.

It is important to consider that the field of disruption management is not tailored only to the product development field and it is possible to find other applications since, for instance, "The concept of disruption management refers to the real time dynamic revision of an operational plan when disruptions occur. This is especially important in situations where an operational plan has to be published in advance, and its execution is subject to severe random disruptions... providing guidance for revising a predetermined plan is at least as important as making the plan itself" [7].

In particular, there are a lot of application in the fields of supply chain management [7], business management [8] and in a limited way in innovation management [9].

The literature presents several descriptions and list of potential influences that might create disruptions (Gericke & alter, 2013 [10]; the research describes a framework that presents more than 200 factors that might lead to disruptions in product development, ) or crisis (Münzberger, 2017 [11]; the research identifies 16 indicators for emerging crises in product development).

However, it is not possible to find a classification based, for instance, on the behavior that a disruption might have.

## 5 Network analysis in the product development and tentative framework

Several applications of network analysis can be found in the context of product development. Among the different models, it is possible to recognize some that are more commonly used.

For instance, a typical tool for project managers is the Critical Path Analysis; one of the applications of this tool is to create algorithms whose objective is to schedule project activities in an optimized way.

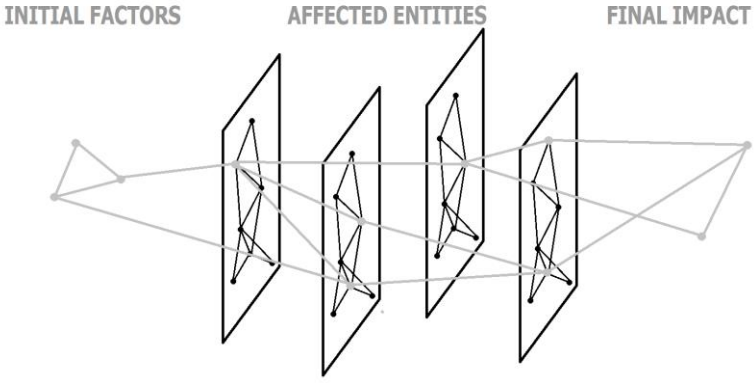
Petri-Nets, developed by [12], are another example of networks used to represent the flow of resources in the development process. There are several extensions of these type of networks, which have been developed in order to describe certain systems more accurately. However, this model would hardly be able to represent the causal networks that are the focus of this research.

For this reasons, it seems more appropriate to consider the CCM (Comparative Causal Mapping) as an appropriate representation that can describe the effects and the behavior of severe influences on ongoing projects.

In fact, the representation of a single event would potentially bring per se enough value. However, it is true that there might be other more effective ways to represent the effect of disruptions, in case who is performing comparisons with other cases is pursuing a single study and not reiterate the research on other events.

In this situation, the strength of the using the networks analysis is to use a powerful tool that not only represents the cause-effect relationships that occur during a disruption in a simple yet precise way, but also to foster the comparison of similar cases that happen in different companies or events that are different but affect the same company.

The tentative framework (Picture 1) presents a set of steps that lead to the creation of a network, which is the core of this research. Here is the following steps:




Picture 1: Tentative framework

- Recognizing the relevant initial factors that caused the disruption (ex: social environment, technology novelty). It is possible that only one factor might be able to generate all the consequences that lead to a disruption, but, on the other hand, there might be several.

- Identify the entities that were affected by the disruption (ex: supply chain, organization of a company) and which factors were influenced

- Describe the final impact of the disruption (ex: customers' interests): As for the initial relevant factors, there might be a single important impact or there might be more than one.

A specific process must be generated in order to recognize and create every single node and edge of the network. Every factor identified as relevant for the description is selected must be described with a specific taxonomy.

## 6 Conclusions

The aim of the framework presented in this contribution is to support the analysis of the cascading cause-effects relations that happen when a disruption occurs.

Understanding the effects of a disruption that is affecting the ongoing efforts of a company to develop a product might be used for a different set of purposes.

Severe influencing events have been classified mainly in terms of initial factors or final impacts and, consequently, there are very limited cases in which other distinctions are considered relevant. The model described in this contribution could support the understanding of the behaviors of disrupting events.

The analysis of the consequences of a disruption that has already happened might improve the capability of a company to respond to such events when they unfold.

Moreover, for instance, such analysis might reveal potential organizational weaknesses or vulnerabilities and consequently support the decision making process in future changes of an organization.

As mentioned by Browning & alter. [13], "activity network models have traditionally endeavored to forecast project duration and cost, primarily using the Project Evaluation and Review Technique and the Critical Path Method … these models do not capture the iterative nature of the PD process …. Without a proper comprehensive analysis, it would be hard for a company to learn from a previous disruption and only the employees that participated in solving the

problem would retain experience; nonetheless, even in this situation each employee would only be able to retain knowledge on a specific subset of activities and might miss the bigger picture."

Understanding the complex set of consequences that a disruption might generate on an ongoing development of a product does not necessarily support the process of foreseeing a new threat when it occurs. However, it can become an endeavor that might systematically reveal strengths and weaknesses that a product development team or an entire organization might have.

## Literature


[1] F. Guaragni, J. R. Ortt, and K. Paetzold, "Understanding the cause-effects relations of severe influences affecting ongoing product development projects," presented at the Proceedings of IEEE 24th International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE18), Stuttgart, Germany, 2018.

[2] K. B. Clark and S. C. Wheelwrite, *Managing New Product and Process Development*. The Free Press, 2010.

[3] M. E. Paté-Cornell, "Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment," *Reliability Engineering & System Safety,* vol. 54, no. 2-3, 1996.

[4] G. C. O'Connor and M. P. Rice, "A Comprehensive Model of Uncertainty Associated with Radical Innovation," *Journal of Product Innovation Management,* vol. 30, no. 51, 2013.

[5] P. Badke-Schaub and E. Frankenberger, *Management Kritischer Situationen*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[6] F. Guaragni, J. R. Ortt, and K. Paetzold, "Managing disruptions during the execution phase of product development projects: A secondary data analysis," presented at the Proceedings of IEEE 23rd International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE17), Madeira, Portugal, 2017.

[7] G. Yu and X. Qi, *Disruption Management*. World Scientific, 2004.

[8] S. Chanas and P. Zielinski, "Critical path analysis in the network with fuzzy activity times," *Fuzzy sets and systems,* 2001.

[9] A. H. Van de Ven, *The Innovation Journey*. Oxford University Press, 2008.

[10] K. Gericke, M. Meißner, and K. Paetzold, "Understanding the context of product development," *International Conference on Engineering Design,* 2013.

[11] C. Münzberger, V. Stingl, J. Oehmen, and J. Geraldi, "Identifying product development crises: The potential of adaptive heuristics," *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17),* 2017.

[12] C. A. Petri, *Kommunikation mit automaten*. 1962.

[13] T. R. Browning and V. R. Ranga, "A survey of activity network-based process models for managing product development projects," *Production and operations management,* 2007.

# Characteristics of a metal additive manufacturing process for the production of spare parts

A. Atzberger[1], J. Montero[12], T. S. Schmidt[1], M. Bleckmann[2], K. Paetzold[1]

[1] *Institute for Technical Product Development,*
*University of the German Federal Armed Forces Munich*

[2] *Federal research institute of materials fuels and lubricants (WiWeB)*

## Abstract

Although many difficulties still exist, metal additive manufacturing is on the rise – also in the military. The German Armed Forces are currently working on a process to re-engineer machine parts worn during deployment, generate a printable file and send it back to the area of operation where the troop prints the spare part locally. As the development team faces a lot of unknowns as well as crucial uncertainties at the project start, a suitable process and appropriate guidelines need to be established. By means of a case study, the paper investigates what the overall process for the production of an AM spare part looks like with all the necessary parties involved. By analyzing the weaknesses and strengths it is furthermore discussed how agile development approaches could improve the overall process.

*Keywords: metal additive manufacturing, reverse engineering, agile development of physical products, prototyping*

## 1 Motivation

During the last years, the interest in the application of additive manufacturing (AM) has grown significantly in many industries [1]. The use of technologies such as Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) or Direct Metal Deposition (DMD), raises the possibility of using materials such as titanium and aluminum. Due to the need of the armed forces to have spare parts for different equipment in locations where logistics can be difficult, this technology has begun to be applied in the on-demand production of spare parts [2]. A study on the processes, which carry out the design and production of spare parts through AM with metallic materials, has been published by Montero et al. [3].

Especially when such spare part production projects are remote from the area of operations, many uncertainties are involved. Usually, the development team does not exactly know the exact dimensions nor functional boundary conditions of the part in question. It is incumbent upon the team to collect lacking information to a sufficient level of confidence. A rather rigid, plan-driven approach such as the V-model [4] supported by Stage-Gate project management [5] turns out to be inappropriate. In contrast, agile development (AD) seems very promising as it considers expected and unexpected changes as opportunity (instead of a risk to be avoided) and value delivery through short learning circles [6].

The study was carried out at the federal research institute of materials fuels and lubricants (WiWeB) of the German Armed Forces since it is in charge of the advance development of new processes to be applied in the German Armed Forces. It receives spare part requests from the deployments in form of pictures and textual descriptions, re-engineers it, and sends the AM printed part directly back in deployment. In the next step, the printing file shall be sent to the area of deployment and printed on-site without having to consider the supply chain of the spare part. Such production of spare parts using AM is highly desired, but a relatively novel topic for both practice and science.

## 2 Current challenges and research goals

On the one hand, technical challenges arise since design for metallic AM printing is not a mature concept and thus not fully understood yet. On the other hand, spare part re-production is also not common and thus being rather close to the prototyping area. Furthermore, when combining AM and spare part production, new challenges arise. In terms of the metal AM printing especially the design is a critical stage, since not only the reverse engineering has to be taken into account but also the redesign for metal AM printing. Also, with metal AM

being not a mature process yet, it is updated in terms of the settings several times a year, which are also changing boundary conditions. In terms of the spare part production, the challenge to be faced is having to deal with uncertain boundary conditions such as insufficient data about the part itself (no load curves or exact dimensions or the actual position).

One major goal of this research is to improve the efficiency of the digital file development and its subsequent manufacturing. With the boundary conditions commonly not being stated clearly in the spare part request and the redesign being an iterative process due to the lack of sufficient knowledge, a second objective is to tackle these uncertainties. A feasible solution may be to make use of agile principles that are becoming more and more applicable for hardware development. Therefore, the following research question arise:

**Which development approach and therefore guidelines suit the novel topic of producing spare parts by AM?**

Since the boundary condition for the development tasks at WiWeB can be considered relatively uncertain, the focus is based on agile development in the context of physical products. Possible applications of agile principles and practices shall give an outlook how these could be turned into a strategic advantage for the process of the production spare parts by AM.

## 3 State of the art

The American society for testing and materials (ASTM), created in 2009 the committee F42 in additive manufacturing (AM) and defines AM as the process of joining materials to make objects from three-dimensional (3D) model data, usually layer by layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies [7]. Usually the term "3D printing" is used due to the fact that by means of this process physical objects are created starting from digital files, using a machine that instead of extracting material, material is added in layers. Currently, AM is widely used for rapid prototyping (RP) applications, since it is an effective tool to evaluate "how a product can look like". For such applications the functionality of the created objects is limited or zero, but with the latest advances in the improvement and understanding of properties and behavior of the used materials AM is gaining popularity in the productive sector [1]. At present, there are many AM processes, and they are classified according to the material and the technology used. Our focus is on the well-established market technologies as of 2017, such as FDM (fusion deposition modelling) for polymers and SLM (Selective Laser Melting) for Metals. We consider both of these technologies the most suitable ones for our particular case, which is the production of spare

parts, due to their robustness, relatively high surface quality and strength of the produced parts.

The process of digitally recreating existing physical components is called reverse engineering (RE) in the field of computer-aided design (CAD) [8]. The goal of RE is to replicate those existing features and geometric relations into an object starting from the acquired raw data from any 3D scanning technology. When it comes to redesigning, complications arise when the component has a high amount of features to recreate and the complete specification is not available. This is particularly the case of RE for AM, where the components are usually complex and thus have to be analyzed and redesigned taking into account the benefits and limitations of AM. A first approach on how to deal with the RE for AM in the production of spare parts has been carried out by Montero et al. (2018). Having clear directions on this topic is essential for the application in the armed forces, where the necessities of having a robust on-site spare parts manufacturing facility arises constantly. Germany, as well as some other NATO countries, has taken the lead on applying AM on the field with the recently 3D rapid manufacturing center deployed overseas [9].

Since the spare parts to be manufactured have to be redesigned and thus redeveloped, guidelines on how to accomplish this task are necessary. However, since each case has different boundary conditions and only limited information are available (non-availability of spare parts due to old age) at the beginning of the redesign, suitable guidelines are needed. The agile development approach assumes that the initial information base is subject to change, which is why a detailed plan is not necessary [10]. Agility is "the ability to quickly and cooperatively react to changes in unpredictable environments in order to meet demands efficiently and effectively" [6]. It is applied in so-called VUCA environments, the context being volatile, unclear, complex and ambiguous. Having initially been developed for software, agile hardware development is gaining more importance in today's industries due to changing conditions on the technological as well as the market side. However, agile hardware development is heavily challenged by the "constraints of physicality" [11], meaning the constant production of deliverable prototypes is hard to achieve. In order to cope with that issue, there are already several approaches such as the Fuzzy model by Oestereich and Weiss [12] or the Adapted Media Richness Theory [13] in order to tackle these. The basic idea of AD is to master uncertainties by the production of prototypes that are redeveloped in short iterations and thus generating the final product, which fits the requirements of the stakeholders best. In order to enhance the process performance of producing spare parts using AM, several agile principles and practices shall be introduced.

## 4 Research approach

This research is based on the work carried out at the Federal research institute WiWeB where the spare part re-engineering and production of the German Federal Armed Forces takes place. One of the authors is part of the design team at WiWeB and thus has deep and comprehensive insights into the work conducted at the facility. With this field of research being fairly new at the WiWeB, the insights until now have been obtained by action research. Processes have been established, tested, repeatedly discussed and based on the results modified over time in order to fit the needs of the overall process best.

A case study has been conducted displaying the as-is situation at the research institute. In the first step, the general process model for both the request as well as the AM spare part production itself is outlined. In the next step, an in-depth perspective on a specific, real development project is given. From this case study the current technical and process-related challenges are derived. Hence, the case insights and potential ways of improving the development process of AM spare part production by potential applications of agile development approaches are discussed.

## 5 Current approach for AM spare part production at WiWeB

### 5.1 General process model

Currently, when the German Federal Armed Forces face the need of having a spare part manufactured by AM, the work is carried out by WiWeB. If a part is not available and it is not possible to obtain it by the usual means, it is requested to be manufactured using AM (only if the mechanical performance expectations are not exigent). The process is outlined in Figure 1 with the consideration that ideally, when there is a lack of stock of the respective spare part in the warehouse, it is also sent to AM facility as a preventive act, if possible.

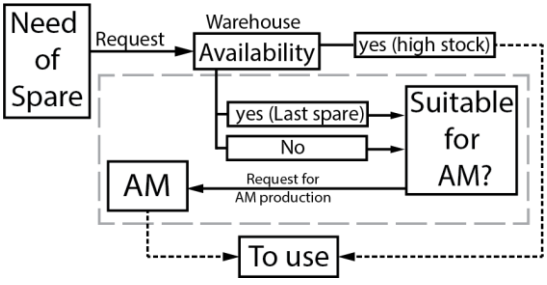


Figure 1: Request for spare part production

When the request for manufacturing a component arrives, the work is carried out by two well-differentiated teams. The design team is responsible for generating the digital files with the geometry to be made, and the manufacturing department is responsible for manufacturing the part, the support structure and the post-processing (either surface finish, removal of the support structure or thermal treatment). Following the guidelines of Montero et. al. (2018), Figure 2 gives an overview of the process for the reproduction of a spare part. The work is carried out jointly by the two teams with the addition of a third actor, the proofing department, which is in charge of dealing with the quality control and, in some cases, certifications, with the latter being commonly an issue that is associated with AM spare parts.

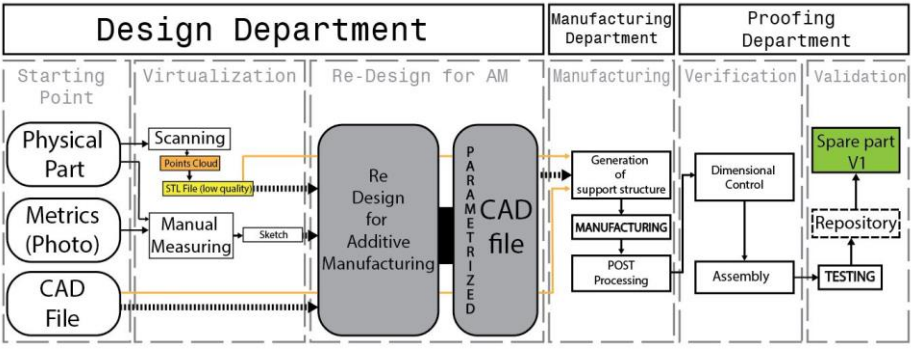



Figure 2: Overview of the process for spare part production at WiWeB

In the particular case of WiWeB, the design department, manufacturing department and eventually proofing department are working in different physical areas, i.e. those departments do not even share the same building inside the research facility.

## 5.2 Use Case „Valve cover"

In order to exemplify the process chain, a real request form the Armed Forces is described. The initial component, which is a worn valve cover of a diesel generator, is displayed in Figure 3 as it has been sent to the design department for redesigning. However, no documentation regarding the original dimensions, the material or other specifications was available. Due to the usage of the part, the requirements and the mechanical solicitation could be deducted in order to reproduce it. Given the complexity of the part as well as the typical

geometric characteristics, it was assumed that the part was originally casted. Material analysis showed that it consisted of a special aluminum alloy. Given the application of the component, its function is to be able to guide low density fluids at moderate pressures while sustaining in a high vibration environment. The material AlSi10 is able to handle these particular requirements in a satisfiable manner due to its acceptable mechanical properties, as has been demonstrated in [14].

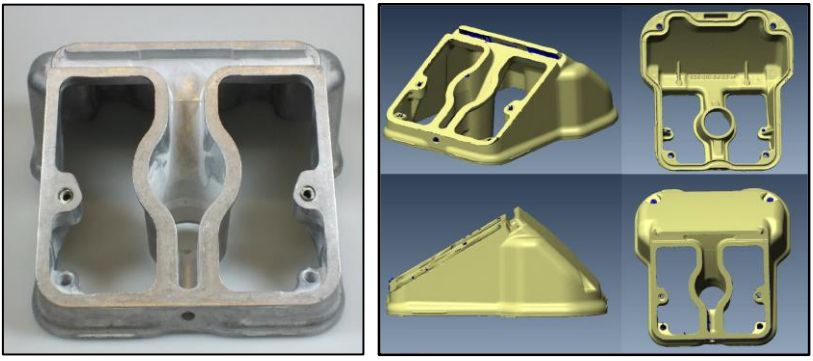


Figure 3: Original valve cover – worn part (left); re-engineered point cloud as the result of the scanning process (right)

In practice, such parts are commonly not considered to tend to wear, so they are not available in warehouse. Since the machinery using this component date from several decades ago the acquisition of such a spare part, especially after a long period of time after its production, is practically impossible. Given the complex shape as well as the non-availability of the spare part, this valve cover was predestined to be remanufactured using AM. In the first step, since the worn part was physically available, it was scanned using a 3D laser scanner. In order to reduce the reflectivity of the part, an anti-reflex-spray has been applied. The data acquisition was conducted using Polyworks Inspector with multiple scans being merged into a single file, as displayed in Figure 3. Nevertheless, manual post-processing was necessary to adjust the homogenous structures of the part due to the occurrence of holes. Challenges throughout the scanning process such as unwanted noise led to imprecise measurements, resulting in false point assignments. Such effects make it necessary to apply software-based corrections in order to homogenize the surface structure of the part. Coupled with signs of wear, the results of the scanning were not sufficient, and the part had to be redesigned manually in the reverse engineering process. During the redesign of the part in CAD software, the parametrization takes place as shown in Figure 4. This makes the process more complex due to the

necessity of having a designer with higher expertise recreating the features. With a point cloud file of acceptable quality, a translation of the data into the STL format would have been an efficient way compared to having to redesign the whole part. However, since the part is worn, the designer has to focus on the functions of each of the parametrized features since e.g. threaded holes might not be of the same shape as in the original spare part or contact areas for sealing not being flat anymore. When taking all those features into account, a final parametrized file of the spare part is generated, as displayed in Figure 4.

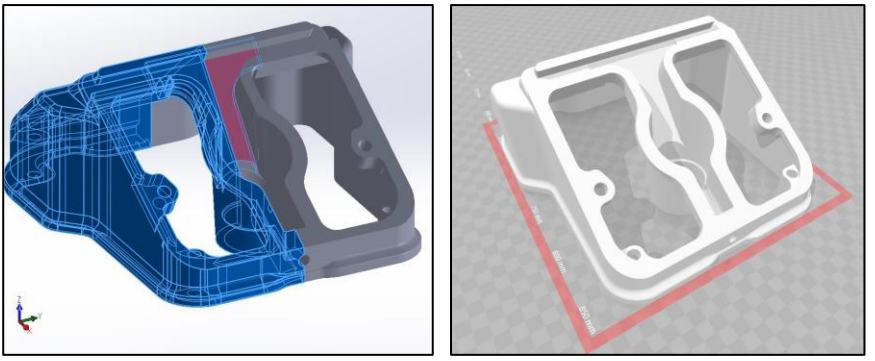


Figure 4: Symmetrical parametrized CAD model (left), STL file usable for AM manufacturing (right)

With the increasing expertise of the designer it is also possible to delete and modify features that are not enriching the functional aspects of the spare part or features linked to the original manufacturing method. It is necessary to discriminate between the features that are inherent to the original manufacturing process and those that are not. Although not all the analyzed components are produced by means of subtractive manufacturing methods, the vast majority are, and for this reason these non-additive manufacturing features are called subtractive features (SF). In the case of the valve cover, it was cast and then milled and therefore has a lot of SFs. A clear example are the draft angles on the side faces and the extraction supports for the casting mold. Once the SFs are identified, they can be eliminated during or after the redesign and the parametrization of the component. This phase is called Design for Additive Manufacturing and considers all the advantages that AM into the design stage.

In a next step, the parametrized CAD file has to be adapted for AM manufacturing due to the need of support structures. Therefore, the designer has to take into account how the part is going to be printed for the manufacturing to

be successful. After the CAD file has been translated into a STL file, as displayed in Figure 4, STL files are not parametric anymore, so modifications after this step are not possible. As a final step, the support structure is added, and the machine file is generated with the trajectories of the sliced component.

Figure 5: AM printed valve cover inside the processing chamber

The manufactured spare part on its substrate platform using SLM is displayed in Figure 5. The printing time was 37 hours with an additional two hours of heat treatment in order to reduce residual stresses, and an additional hour to grind off the support structure.

# 6 Discussion

## 6.1 Technical challenges

The ability of creating additive features and neglecting the SF is the most valued aptitude of the designer in the RE process for AM. Consequently, it is of high importance for the designer to gain the experience allowing him/her to have a proper prerequisite at the time of realizing the redesign for AM. This training is improving and redefining the redesign rules with every iteration and the only way to take profit of such experience is to increase the traceability of each redesign. Here is where a clear and ordered documentation of the component becomes of utmost importance, in that way the entire design department can benefit from the advances generated by a single member of the team.

Applying the repository tree model by Schmidt et. al., an agile development practice, is a suitable approach to store the data and thus information gained, displaying every way chosen and displaying whether or not it has been successful (if the branch is ending or not) [15]. Since the production of spare parts is sporadic and in low quantities, it becomes necessary to increase the synergy between the departments of design and manufacturing to reduce the non-productive time when it comes to realize the feedback. This is the main reason why the physical proximity between both facilities is of high relevance, even though the location of metal AM machines is eventually not possible close or even inside the design department due to their high need of infrastructure.

## 6.2 Strategies for process optimization

As displayed in the use case, there are several issues when developing a spare part. With the boundary conditions of the part to be produced being unclear at the beginning of the redesign phase, an agile approach might seem useful in the first step. Following the Fuzzy model of Oestereich and Weiss [12], a feasible approach is to work in short-term iterations and generate a prototype at the end of every iteration. By having come up with prototype, specific uncertainties can be tested and thus the designer has a steep learning curve regarding that specific part. In the case of the valve cover, one prototype could test the overall dimensions, while another one if the position of the holes is correct and if the flatness of the contact areas is sufficient. Considering the constraints of physicality, it is neither cost- nor time-efficient to come up with a metal printed part at the end of every iteration. Schmidt et. al have adapted the media richness theory [13], which explains what kind of prototype is sufficient for the uncertainty to be tested. It might be a reasonable approach to print a parametrized CAD file using FDM in order to reduce uncertainties. It is a cost-efficient way of prototyping and by doing so, printing a metal part containing any dimensional errors could be avoided. Nevertheless, some uncertainties regarding the stiffness or the ability to withstand the internal stresses can only be checked with a metal prototype.

Generating prototypes will enable the designers to develop an understanding and thus generate knowledge on what to take into consideration when designing a model for AM manufacturing. Another improvement in terms of the overall project organization is transparency. A feasible practice in order to achieve this can be a Kanban board. Linking this to the weekly meeting, every team member is informed about the current status of the spare part and the challenges that the different departments are facing at that time.

## 7 Outlook

It is important to emphasize that these processes for spare parts production, although driven by military scientific research, have applications in many other different industries, and their participation will be more important in the coming years with the massification of AM and the arrival of Industry 4.0. Also, metal AM is successively gaining importance due to the flexibility of the process itself and its potential applications, however guidelines for designing are necessary. Since having to deal with several uncertainties throughout different stages of the process, the adaption of certain principles of agile hardware development appears to be reasonable. By being able to cope with these uncertainties of such a complex process, an additional raison d'être for agile hardware development will be given.

## Literature


[1] T. Wohlers and R. Campbell, "Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry," Fort Collins, 2017.

[2] S. Guertzgen, "Military Applications For The Emerging Technology Of 3D Printing," *Additive Manufacturing*, 2017. [Online]. Available: https://www.digitalistmag.com/digital-supply-networks/2017/08/09/military-applications-for-emerging-technology-of-3d-printing-05281588.

[3] J. Montero, K. Paetzold, M. Bleckmann, and J. Holtmannspoetter, "Redesign and re-manufacturing of discontinued spare parts implement-ing additive manufacturing in the military field," 2018, pp. 1269–1278.

[4] VDI 2221, "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte." Düsseldorf, 1986.

[5] R. G. Cooper, *Winning at New Products: Creating Value Through Innovation*. New York: Basic Books, 2011.

[6] A. Böhmer, A. Beckmann, and U. Lindemann, "Open Innovation Ecosystem - Makerspaces within an Agile Innovation Process," in *Proceedings of the ISPIM Innovation Summit: Changing the Innovation Landscape*, 2015, pp. 1–11.

[7] ASTM F2792-12a, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015)," West Conshohocken, PA, 2012.

[8] T. Varady and R. Martin, "Reverse Engineering," in *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Elsevier, 2002, pp. 651–681.

[9] Army Recognition, "German army uses 3D printers to produce spare parts in operations," 2018. [Online]. Available: https://www.armyrecognition.com/weapons_defence_industry_military_technology_uk/ 3d_printers_at_the_rescue_in_operations.html.

[10] S. Nerur, R. Mahapatra, and G. Mangalaraj, "Challenges of migrating to agile methodologies," *Commun. ACM*, vol. 48, no. 5, pp. 72–78, May 2005.

[11] T. S. Schmidt and K. Paetzold, "Maturity Assessment of Teams Developing Physical Products in an Agile Manner," in *23th International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE'17)*, 2017, p. 27.-29. June.

[12] B. Oestereich and C. Weiss, *APM - Agiles Projektmanagement*. dpunkt.verlag, 2008.

[13] T. S. Schmidt, A. I. Böhmer, A. Wallisch, K. Paetzold, and U. Lindemann, "Media Richness Theory in Agile Development: Choosing Appropriate Kinds of Prototypes to Obtain Reliable Feedback," in *23th International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE'17)*, 2017, p. 27.-29. June.

[14] J. P. Kempen, K.; Thijs, L.; Van Humbeeck, J.; Kruth, "Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting," *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 439–446, 2012.

[15] T. S. Schmidt, G. Gerdzhikov, and K. Paetzold, "Set-based Design in Agile Development: Reinterpreting the Repository Tree," in *International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE'18)*, 2018, p. 18.-20.06.

# Gestaltung agiler Produktentwicklungsprozesse

Günther Schuh[1], Christian Dölle[1], Jan Kantelberg[1], Alexander Menges[1]*

*[1] Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen*

** Verantwortlicher Autor.*
*Telefon: +49 241 80-24989; E-Mail: A.Menges@wzl.rwth-aachen.de*

## Abstract

Manufacturing companies are facing the challenge to develop innovative products characterized by high complexity due to increased conjunction of hardware and software components and a high degree of individualization. Furthermore, customers expect the release of new products within even shorter cycles, which leads to an ever more reduction of Time-to-Market. Conventional development approaches are limited in the usage for highly frequent market conditions with fast changing requirements. Agile methods have shown their potentials in increasing the efficiency and effectiveness of product development processes. In this paper, an approach to use agile mechanisms in product development processes with a high degree of application is presented. Furthermore, a practical guideline is described, how agile product development can be implemented and applied.

*Keywords: Product Development, Agile Software Development, Agile product Development, Practical guideline*

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Zunehmend heterogene Kundenanforderungen, bedingt durch eine hohe Volatilität der Marktumfelder, zwingen produzierende Unternehmen zur stetigen Erweiterung des Produktprogramms durch neue Produktinnovationen in immer kürzeren Zyklen [1]. Während sich auf der einen Seite die Produktlebenszyklen entsprechend der hohen Marktdynamik immer weiter verringern [2], steigen auf der anderen Seite die Aufwände für die Produktentwicklung aufgrund zunehmender Funktionalität und Variantenvielfalt [3]. Insbesondere der Wunsch nach kundenindividueller Gestaltung der Produkte resultiert im Hinblick der voranschreitenden Integration von Hardware- und Softwarekomponenten in einem kontinuierlichen, sowohl produkt- als auch prozessseitigen Komplexitätsanstieg [4]. Darüber hinaus haben Kunden immer seltener eine klar definierte Vorstellung eines Produktes [5], was zu unvorhersehbaren Änderungen von Produktanforderungen führt, wodurch die langfristige Planbarkeit von Entwicklungsprojekten nur in eingeschränktem Maße möglich ist. Daher wird es zunehmend notwendiger, eine situationsgerechte Reaktionsfähigkeit im Rahmen eines Entwicklungsprojektes zu ermöglichen, um schnell und zielgerichtet die sich ändernden Anforderungen in Produktspezifikationen zu überführen [6]. Konventionelle Ansätze der Produktentwicklung bieten nur eingeschränkt die Möglichkeit, die beschriebenen Herausforderungen angemessen zu adressieren. Aus diesem Grund ist es notwendig, ein neuartiges Entwicklungsvorgehen zu gestalten, über das eine Steigerung der Effizienz und Effektivität in der Produktentwicklung erzielt wird.

Lösungsansätze, die die beschriebenen Herausforderungen adressieren, ergeben sich aus den agilen Methoden, die bereits in der Softwareindustrie Anwendung finden. Hierbei wird eine schrittweise Entwicklung in kurzzyklischen Iterationen angestrebt, wobei der Entwicklungsfortschritt kontinuierlich validiert wird. Dadurch wird es möglich, situativ und schnell auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren und diese in den Entwicklungsumfang aufzunehmen. Die Anwendung agiler Entwicklungsmethoden führt zu einer Reduktion der Entwicklungszeit und steigert parallel den kundenbezogenen Projekterfolg [7–9]. Das Erfolgspotenzial zur Nutzung dieser Methoden in der Produktentwicklung konnte zwar nachgewiesen werden [2], eine Einführung in der produzierenden Industrie ist bisher jedoch nur vereinzelt erfolgt [10]. Dies kann auf die unterschiedlichen Restriktionen bei der Einführung agiler Methoden in Entwicklungsprojekten der Software- und der produzierenden Industrie zurückgeführt werden [11]. Darüber hinaus mangelt es an einer theoretisch fundierten

Grundlage, die als praktische Leitlinie zur Implementierung agiler Entwicklungsprozesse in produzierenden Unternehmen angewandt werden kann. Ziel dieses Beitrags ist es daher, durch die zielgerichtete Übertragung agiler Methoden der Softwareentwicklung die Effizienz und Effektivität in der Produktentwicklung zu steigern. Hierfür wird das Vorgehen zur Implementierung eines agilen Produktentwicklungsprozesses beschrieben, wobei insbesondere die aufbauorganisatorische Prozessgestaltung fokussiert wird.

## 1.2 Stand der Forschung

In der wissenschaftlichen Literatur wurde die Verwendung agiler Methoden und Vorgehensweisen in der Produktentwicklung bereits weitreichend behandelt. Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Erkenntnissen bestehender wissenschaftlicher Ansätze zu Entwicklungsprozessen, die die Vereinigung agiler Methoden mit klassischen Produktentwicklungsprozessen fokussieren.

Die Integration agiler Methoden im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess wird von Feldhusen et al. vorgestellt. Ein agiles Vorgehen wird im Rahmen des Ansatzes implementiert, indem das Entwicklungsprojekt in Iterationen unterteilt wird, die auf den Kundennutzen fokussiert sind [12]. Innerhalb der Iterationen werden eine Auswahl priorisierter Anforderungen bearbeitet und zu einem (vornehmlich) digitalen Prototypen entwickelt. Diese werden in den nachfolgenden Iterationen entsprechend erweitert und bilden die Grundlage für eine im Anschluss an jede Iteration stattfindende Validierung. Dabei wird die Identifizierung des Optimums zwischen erhöhten Koordinationsaufwänden und der erzielbaren Risikominimierung durch die kontinuierliche Validierung als zentrale Herausforderung angesehen. Eine detaillierte Beschreibung von notwendigen Aktivitäten zum agilen Vorgehen in der Entwicklung und Konstruktion sowie eine Bestimmung des Einflusses agiler Elemente auf die Prozesse in der Produktentwicklung finden jedoch nicht statt. Mit einem kombinierten Entwicklungsvorgehen aus konventionellem Stage-Gate und agilem Prozess beschäftigen sich auch Ahmed-Kristensen et al [13]. Als Kritikpunkte an ausschließlich agilen Entwicklungsansätzen werden nachweisliche Prozessinstabilitäten, unklare Zielbilder sowie unscharfe Phasenseparationen angeführt, worüber die Motivation zur Anwendung eines kombinierten Ansatzes dargelegt wird. Die primäre Anwendung agiler Prozesselemente soll in denjenigen Entwicklungsbereichen erfolgen, in denen die höchste zielspezifische Unsicherheit herrscht und lediglich abstrakt festgelegte Anforderungen definiert sind. In ihrem Ansatz beschreiben Kristensen et al. jedoch kein ganzheitliches, hybrides Entwicklungsvorgehen, sondern formulieren lediglich Hypothesen, wie und an welcher

Stelle die hybride Prozesskombination ausgeführt werden sollte. Mit einer kombinierten Herangehensweise zur Produktentwicklung, bestehend aus der agilen Scrum-Methode und dem plangetriebenen Stage-Gate-Prozess, beschäftigen sich Sommer et al [14]. Hierfür werden zunächst verschiedene agile Prozesselemente herausgestellt, um die Potenziale des Scrum-Konzeptes im Hinblick auf eine Integration in den Stage-Gate-Prozess aufzuzeigen. Basierend auf Befragungen im industriellen Umfeld werden Schwächen von rein generischen Herangehensweisen bei der agilen Produktentwicklung identifiziert und analysiert, welche Anpassungen seitens der Unternehmen zur Praktikabilitätssteigerung durchgeführt wurden. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt die Konzeption eines Product Development Solution Frameworks, welcher auf übergelagerter Ebene einen Stage-Gate-Prozess und auf operativer Ebene eine agile Prozessstruktur basierend auf dem Scrum-Ansatz implementiert. Der Detaillierungsgrad des Prozessmodells von Sommer et al. ist in Bezug auf die agile Gestaltung einzelner Entwicklungsaktivitäten jedoch sehr generisch gehalten. So werden weder übergreifende agile Wirkungsweisen identifiziert noch konkrete Maßnahmen auf Ausführungsebene vorgestellt, wie eine agile Projektführung in den Entwicklungsschritten ausgestaltet werden kann. Einen prinzipiell ähnlichen Ansatz verfolgen Cooper und Sommer mit der Definition eines agilen Stage-Gate-Hybrid-Modells [15]. Hierbei wird über die Integration agiler Elemente der Scrum-Methode in den sequenziellen Stage-Gate-Prozess eine inkrementelle Entwicklung technischer Produkte angestrebt. Ein Inkrement stellt hierbei ein grobfertiges physisches Produkt dar, das noch keinen kundenfertigen Reifegrad aufweist, aber dennoch für eine wirksame Kundenbewertung verwendet werden kann. Den konzeptionellen Aufbau des Agile-Stage-Gate-Hybrid-Modells bildet übergeordnet ein fünfstufiger Stage-Gate-Prozess, welcher in jeder Entwicklungsstufe verschiedene vom Projektteam getragene agile Methoden inkludiert. Weiterhin definieren Cooper und Sommer Rollen und Werkzeuge, die den agilen Produktentwicklungsprozess durchführen bzw. dessen Durchführung unterstützen. Hierüber wird ein generisches Prozessmodell beschrieben, dessen praktische Anwendbarkeit anhand industrieller Case-Studies belegt wird. Der entwickelte hybride Prozessablauf verbleibt jedoch auf einem sehr übergeordneten Niveau. Die Untersuchung des Einflusses agiler Elemente auf Prozesselementebene wird dabei ebenso wenig betrachtet wie die Identifikation generischer Iterationstypen. Schuh et al. erkennen die Notwendigkeit der zielorientierten Übertragung agiler Methoden auf Prozesselemente konventioneller Entwicklungsprozesse [16]. Eine direkte Übertragung agiler Methoden ist aufgrund der disziplinspezifischen Unterschiede von Produkt- und Softwareindustrie nur eingeschränkt möglich. Deshalb entwickeln Schuh et al. ein Beschreibungsmodell, anhand dessen aus einer detaillierten Analyse bestehender agiler Entwicklungsansätze Praktiken im Sinne von Leitlinien zur Ausführung des Entwicklungsprozesses identifiziert und kategorisiert

werden. Hierüber werden agile Leitlinien, sogenannte agile Wirkungsweisen, abgeleitet und diese in einem nächsten Schritt dahingehend bewertet, inwieweit jeweils eine Agilisierung konventioneller Prozesselemente bewirkt wird. Das Ergebnis ist eine Hierarchisierung agiler Wirkungsweisen bzgl. der Leistungsfähigkeit zur Optimierung konventioneller Produktentwicklungsprozesse. Dies stellt ein neuartiges Vorgehen in der Ermittlung und Übertragung agiler Methoden dar, das im Rahmen dieses Beitrags Verwendung findet.

Insgesamt ist die Beschreibung eines umfassenden agilen Produktentwicklungsprozesses in der wissenschaftlichen Literatur weitreichend vertreten und erforscht. Es mangelt jedoch an einem Vorgehensmodell, anhand dessen über die Integration agiler Methoden in konventionelle Produktentwicklungsprozesse ein vollständiger Ansatz zur agilen Produktentwicklung anwendungsorientiert beschrieben wird.

## 2 Methodisches Vorgehen

Die Gestaltung agiler Produktentwicklungsprozesse erfolgt im Rahmen dieses Beitrags anhand einer einheitlichen Modellierung über die Definition und Beschreibung einer Abfolge charakteristischer Aktivitäten und prozessunterstützender Elemente. Die Gestaltung bildet den letzten Schritt eines insgesamt vierstufigen Vorgehens, in dem über eine Dekomposition und eine anschließende Komposition analog eines V-Modells eine vollumfängliche Entwicklung und Beschreibung agiler Produktentwicklungsprozesse erfolgt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 1 prinzipiell dargestellt und wird in Absatz 2.1 beschrieben. In Absatz 2.2 wird der letzte Schritt des Vorgehensmodells fokussiert, indem die Ergebnisse der Forschung dargestellt und erläutert werden.

### 2.1 Beschreibung des Vorgehensmodells

In einem ersten Schritt erfolgt eine umfassende Analyse und Beschreibung konventioneller Entwicklungsvorgehen. Beispielhaft sei hierfür der Stage-Gate Prozess nach Cooper genannt, in dem die Entwicklung zwischen unterschiedlichen Gates erfolgt und an diesen eine Bewertung des Entwicklungsfortschritts vollzogen wird [17]. Für einen solchen plangetriebenen Entwicklungsprozess ist es initial erforderlich, umfassend Anforderungen zu definieren und diese durch die Entwicklung eines Produktes zu erfüllen. Anpassungen durch sich ändernde Anforderungen oder Marktbedingungen lassen sich hierin nur unter hohem Aufwand realisieren [14,15]. Aufgrund der ausschließlichen Ausrichtung plangetriebener Ansätze auf die Entwicklung physischer Produkte ergeben sich aus der Analyse charakteristische Ausführungs- und Entscheidungsaktivitäten sowie

Ziele und Artefakte in Produktentwicklungsprozessen, die somit das Zielsystem der Übertragung agiler Methoden bilden.

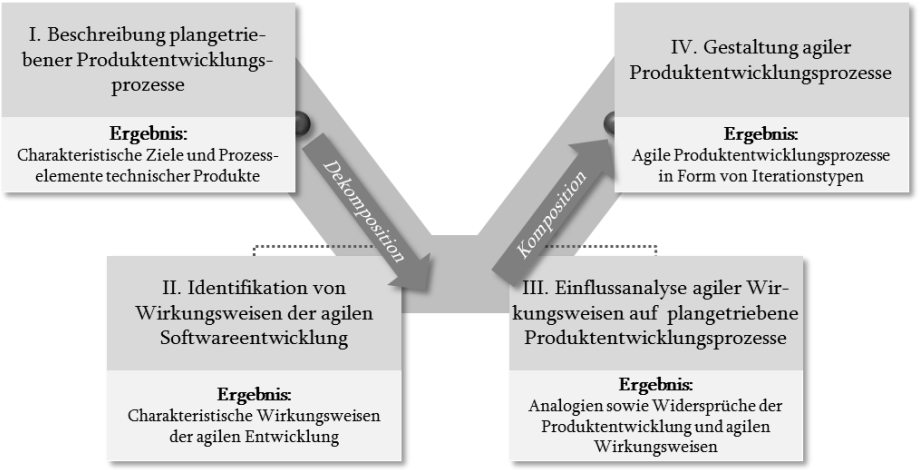



Abbildung 1: Prinzipielles Vorgehensmodell zur Entwicklung eines agilen Produktentwicklungsprozesses (in Anlehnung an [18])

In einem zweiten Schritt erfolgt die Analyse und einheitliche Beschreibung bestehender Ansätze der agilen Softwareentwicklung zur Identifikation agiler Wirkungsweisen. Agile Wirkungsweisen stellen dabei die vereinheitlichte Beschreibungsform agiler Methoden dar und bilden gemeinsam mit den im ersten Schritt identifizierten Gestaltungselementen plangetriebener Produktentwicklungsansätze die Basis zur Zusammenführung zu einem agilen Produktentwicklungsprozess. Da eine direkte Übertragung agiler Methoden aufgrund der disziplinspezifischen Unterschiede in der Produkt- und der Softwareentwicklung nur eingeschränkt möglich ist, erfolgt in einem dritten Schritt die Zusammenführung der disjunkten Systeme. Ziel ist die Analyse des Einflusses agiler Wirkungsweisen auf die Beschreibungselemente der Entwicklung technischer Produkte sowie die Bestimmung möglicher Hinderungsgründe für eine direkte und vollständige Übertragung. Beispielhaft für einen solchen Widerspruch ist die eingeschränkte Skalierbarkeit in der Erstellung physischer Inkremente im Sinne von validierbaren Prototypen. So lässt sich durch eine Fokussierung auf einen definierten Umfang an Anforderungen eine iterationsgerechte Skalierung der Entwicklungsaufwände erzielen. Dies impliziert allerdings nicht zwangsläufig eine Reduzierung der Durchlaufzeiten in der Fertigung und Beschaffung von Bauteilen. Diese und andere Limitationen gilt es bei der Prozessgestaltung zu

berücksichtigen und zu adressieren, sodass eine möglichst weitreichende Übertragung agiler Wirkungsweisen ermöglicht wird. Dieser finale Schritt der Gestaltung wird im folgenden Abschnitt fokussiert.

## 2.2 Vorstellung der Ergebnisse der Gestaltung eines agilen Produktentwicklungsprozesses

Auf Basis des beschriebenen Vorgehens und der Analysen im Hinblick auf Analogien und Limitationen zwischen der agilen Softwareentwicklung und plangetriebenen Entwicklungsprozessen erfolgt in diesem Abschnitt die Beschreibung der Gestaltung agiler Prozesse zur Entwicklung physischer Produkte. Die Gestaltung erfolgt auf einer übergreifenden Strategieebene sowie einer entwicklungsoperativen Iterationsebene. Ziel ist die vollständige Beschreibung eines Prozesses zur Entwicklung physischer Produkte, der einen größtmöglichen Anteil agiler Vorgehensweisen und prozessunterstützender Elemente enthält.

### 2.2.1 Strategieebene

In Abbildung 2 ist die prozessorganisatorische Ablaufstruktur auf der Strategieebene in Form von Prozessaktivitäten, prozessunterstützenden Elementen und Prozessergebnissen dargestellt. Die Strategieebene bildet hierbei den übergreifenden Prozessrahmen der einzelnen Entwicklungsiterationen, die in der Iterationsebene verortet sind, und ermöglicht die projektseitige Integration der Entwicklungsaktivitäten. Über die Strategieebene erfolgt darüber hinaus die initiale Definition des Entwicklungsumfangs, der Start eines konkreten Entwicklungsprojektes sowie die kontinuierliche Validierung des Entwicklungsfortschritts. Dies ist erforderlich, um Entscheidungen zum weiteren Projektverlauf zu treffen und die Freigabe von *Releases* zu veranlassen. Releases stellen hierbei vom Kunden validierbare physische Produktinkremente dar. Im Folgenden wird auf die Elemente der agilen Produktentwicklungsprozesse eingegangen, die diese von plangetrieben Ansätzen maßgeblich unterscheiden. Im Rahmen der *Projektinitiierung* erfolgt die Ableitung produktdefinierender Anforderungen. Während in plangetriebenen Entwicklungsprojekten initial eine vollständige Definition der Produktanforderungen erfolgt, die über den Zeitraum des Entwicklungsprojektes eine konstante Relevanz aufweisen, ist dieses Vorgehen im Sinne einer agilen Entwicklung nicht zielführend. Aus diesem Grund erfolgt die Aufnahme eines vergleichsweise verringerten Umfangs an Anforderungen in Form von *User Stories*. User Stories fokussieren hierbei primär und konsequent die Anforderungen aus Kundenperspektive und sind über den Projektfortschritt anhand der kontinuierlichen Validierung von Entwicklungsinkrementen dynamisch anpass- und erweiterbar. Nach der Projektinitiierung und der Ableitung von Projektzielen erfolgt hiervon ausgehend die *Konzipierung* des

Produktes. Dabei werden die aufgenommenen Anforderungen im sogenannten *Product Backlog* hinterlegt, über das somit die Gesamtheit der gestellten Anforderungen abgebildet wird und als dynamischer Anforderungsspeicher dient. Hierin kann eine kontinuierliche Priorisierung der Anforderungen erfolgen, was einen wesentlichen Unterschied zu den initial festgelegten Anforderungsdefinitionen in konventionellen Entwicklungsprozessen darstellt.

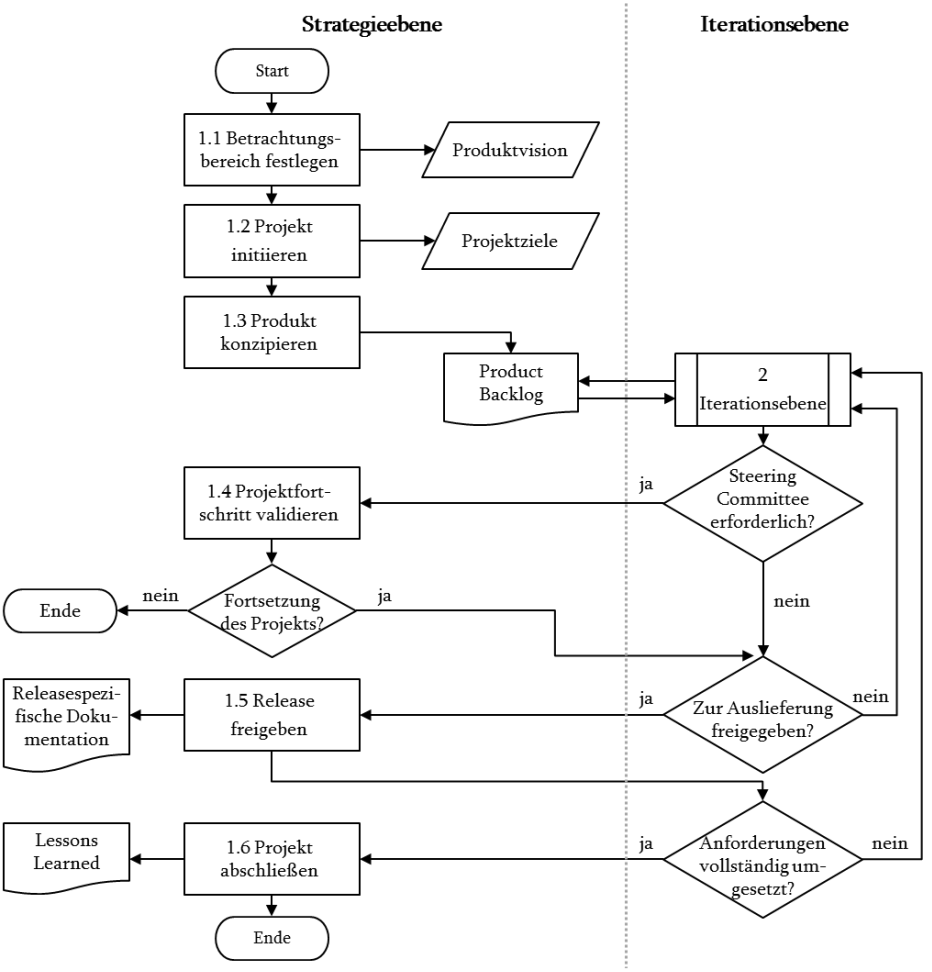



Abbildung 2: Prozessgestaltung auf der Strategieebene (in Anlehnung an [18])

Um dem Projektteam in agilen Entwicklungsprozessen eine hohe Autonomie einzuräumen, findet die Validierung des Projektfortschritts verglichen mit

plangetriebenen Entwicklungsprozessen in erhöhten Zeitabständen statt. In enger Anlehnung an die agile Softwareentwicklung sollte die Validierung nicht in einzelnen, unabhängigen Produktinkrementen, sondern integriert in einem zusammenhängenden, übergeordneten Produktkontext erfolgen. Hierüber wird ein möglichst realgetreuer Abgleich zwischen Soll- und Ist-Zustand ermöglicht, wobei zusätzlich ein geringeres Abstraktionsvermögen seitens der validierenden Personen erforderlich ist. Darüber hinaus kann durch eine Wirtschaftlichkeitsbewertung des Projektes über eine Terminierung, Fortführung oder Änderung der Projektzusammensetzung entschieden werden. Nach der *Freigabe* eines Entwicklungsstandes zum *Release* erfolgt in der Produktentwicklung die Produktion und die Auslieferung des Release an den Kunden. Die hierüber zu erzielende Beobachtung des Nutzerverhaltens kann statt über eine vollständige Markteinführung, die mit hohem Initialaufwand und Verbindlichkeiten einhergeht, durch eine exemplarische Anwendung ausgewählter Nutzer erfolgen. Im Gegensatz zum Vorgehen in der agilen Softwareentwicklung erfolgt die Auslieferung von Releases an Kunden bzw. an Nutzer in erhöhten Zeitabständen, die es bei der Integration eines systematischen Release-Managements zu berücksichtigen gilt. Die in der Freigabe eines Release zu erstellende *Dokumentation* stiftet geringen Wertbeitrag, kann aber bspw. für die Zulassung des Produktes notwendig sein. Aus diesem Grund hat eine Fokussierung auf den für nachgelagerte Entwicklungsaktivitäten relevanten Dokumentationsumfang zu erfolgen. Ergeben sich Mängel im Zuge der Absicherung oder Zertifizierung, können diese als Anforderungen erneut in das Product Backlog aufgenommen und in der nächsten Entwicklungsiteration berücksichtigt werden. Zum *Projektabschluss* erfolgt eine Bewertung der Vollständigkeit der definierten und umgesetzten Anforderungen sowie eine zentrale Validierung des Projektvorgehens. Hierüber werden Maßnahmen, die zu einer Steigerung der Effektivität und Effizienz geführt haben sowie Schwachpunkte und unproduktive Phasen identifiziert und für ein nachfolgendes Entwicklungsvorhaben dokumentiert, sodass insgesamt eine kontinuierliche Optimierung des Entwicklungsprozesses erzielt wird.

### 2.2.2 Iterationsebene

In Abbildung 3 ist ein generischer Iterationsablauf dargestellt, der in jeder Entwicklungsiteration durchgeführt wird. Dieses Vorgehen ist grundverschieden von plangetriebenen Modellen, da die Iterationen über die entsprechende Einordnung in der Strategieebene so häufig durchlaufen werden, bis ein releasespezifisches Ergebnis erzielt ist. Initial ist hierfür die Planung der Iteration erforderlich, die unter Anwesenheit des gesamten Projektteams erfolgt und insbesondere die Auswahl der iterationsrelevanten Anforderungen in Form von User Stories beinhaltet. Unter Berücksichtigung der Teamverfügbarkeit werden

dabei diejenigen User Stories ausgewählt, die aus Kundensicht am höchsten zu priorisieren sind. Die Iterationsplanung wird durch ein *Iteration Backlog* unterstützt, in dem alle in einem definierten Iterationszeittraum entwickelbaren Anforderungen und Entwicklungsaufgaben enthalten sind. Der Iterationszeitraum ist dabei in hohem Maße von der Branche und der Art des Produktes abhängig. Ist die Iterationsplanung abgeschlossen, erfolgt die *Entwicklung* der Produktinkremente, wobei diese in einer frühen Entwicklungsphase ausschließlich virtuell realisiert werden.

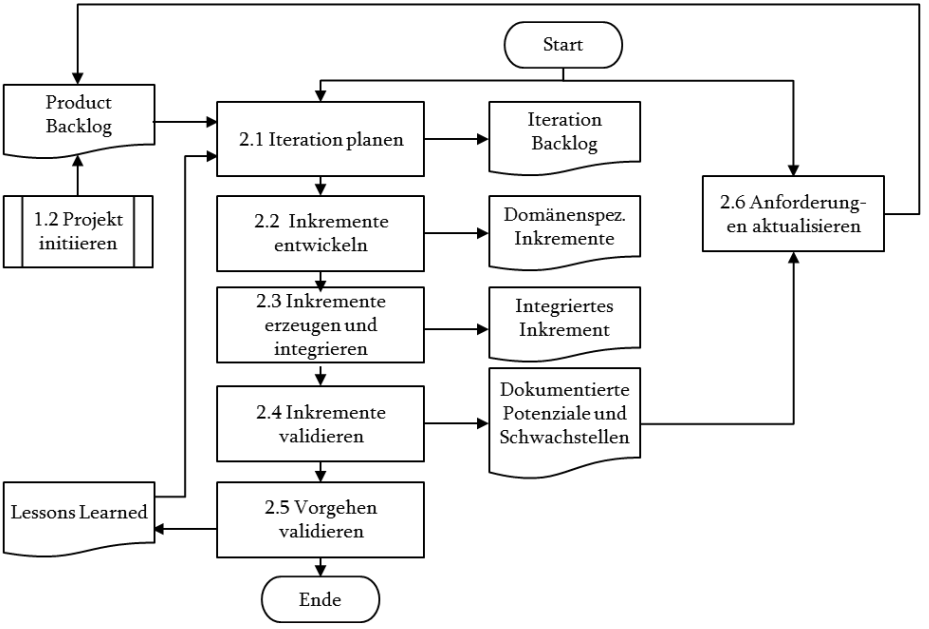



Abbildung 3: Prozessgestaltung auf der Iterationsebene (in Anlehnung an [18])

Die Entwicklung erfolgt dabei unter Berücksichtigung der terminlichen Kritikalität in der Beschaffung bzw. Produktion, welche zur physischen Validierung des Inkrements erforderlich werden. In enger Anlehnung an agile Vorgehensweisen der Softwareentwicklung hat eine tägliche *Synchronisation* der Entwicklungsteams aus den unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen zu erfolgen, um eine ständige Abstimmung im Projektvorgehen zu gewährleisten. Anschließend folgt die physische *Kreation* und *Integration* der entwickelten Inkremente, wobei die Inkrementbeschaffenheit von zentraler Bedeutung ist. Sind in einer Iteration bspw. physische Inkremente umzusetzen, bedarf es vor der Integration zunächst einer physischen Kreation in Form von Herstellung oder Beschaffung.

Ist ein Inkrement realisiert, erfolgt die *Inkrementvalidierung* durch eine exemplarische Nutzung oder Betrachtung durch den zu der entsprechenden User Story gehörenden Anwender oder Kunden. Ziel ist die Identifikation positiver Umsetzungspunkte sowie von Schwachstellen, über die eine Schärfung der Anforderungen zur Verbesserung des zukünftigen Produktes zu erfolgen hat. Analog zum Vorgehen auf der Strategieebene erfolgt nach jeder Iteration eine *Vorgehensvalidierung*, um effektivitäts- und effizienzsteigernde Maßnahmen zu identifizieren und in einer weiteren Iteration zu adaptieren. Ein zentrales Element des agilen Vorgehens stellt der nachgelagerte Schritt der *Aktualisierung der Anforderungen* dar. Da initial eine verglichen mit plangetriebenen Entwicklungsprozesses geringe Anzahl an Anforderungen fokussiert wurde, gilt es diese über den Entwicklungsprozess kontinuierlich zu validieren sowie neue Anforderungen zu adaptieren und zu ergänzen. Ziel ist eine permanente Vervollständigung und Verbesserung des Entwicklungsergebnisses.

## 3 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund zunehmend volatiler und heterogener Marktbedingungen ist es mit konventionellen, plangetriebenen Produktentwicklungsprozessen nur eingeschränkt möglich, auf die sich ändernden Anforderungen adäquat zu reagieren. Ansätze zur dynamischen Anpassung von Anforderungen sowie zur Steigerung von Effektivität und Effizienz in Produktentwicklungsprozessen bieten die aus der Softwareentwicklung stammenden agilen Entwicklungsmodelle. Im Rahmen dieses Beitrages wurde ein Vorgehen vorgestellt, anhand dessen eine Übertragung agiler Methoden auf Produktentwicklungsprozesse ermöglicht wird. Insbesondere wurden in diesem Beitrag ablauforganisatorische Strukturen auf übergreifender Strategie- sowie operativer Iterationsebene vorgestellt und erläutert. Hierüber wird ein umfassendes Vorgehen zur Entwicklung physischer Produkte unter Verwendung agiler Methoden definiert, das gleichermaßen einen Leitfaden zur praktischen Umsetzung darstellt. Während sich der vorliegende Beitrag vornehmlich mit Entwicklungsprozessen innerhalb eines definierten Entwicklungsbereichs beschäftigt, steht eine Erforschung der Potenziale agiler Vorgehensweisen in übergreifenden Entwicklungsnetzwerken aus. Hierüber könnte eine erweiterte Optimierung der Effektivität und Effizienz in der Entwicklung komplexer technischer Produkte realisiert werden.

## Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Gestaltung agiler Entwicklungsprozesse technischer Systeme" [GZ: SCHU 1495/127-1] entwickelt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

## Literaturverzeichnis


[1] Schuh, G.: "Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management", Springer Berlin Heidelberg, 2012.

[2] Schuh, G.: "Lean Innovation", Springer Vieweg; 2013.

[3] Schuh, G. et al.: "Application of Highly-Iterative Product Development in Automotive and Manufacturing Industry", Proceedings of ISPIM Innovation Forum, Boston MA, USA, 2016, pages 576-581.

[4] Schuh, G., Riesener, M.: "Produktkomplexität managen", Hanser, 2018.

[5] Smith, P.G.: "Flexible Product Development", Jossey-Bass, 2007.

[6] Cooper, R.G.: "Idea-to-Launch Gating Systems", Research-Technology Management, 2017; pages 48–52.

[7] Turk, D., France, R.B., Rumpe, B.: "Assumptions Underlying Agile Software Development Processes", Journal of Database Management, 2005, pages 62–87.

[8] Serrador, P., Pinto, J.K.: "Does Agile work?", International Journal of Project Management 2015; pages 1040–51.

[9] Komus, A.: "Status Quo Agile 2016/2017", Abschlussbericht, Universität Koblenz, 2017.

[10] Schuh, G.: "Agile Produktentwicklung", Internet of Production für agile Unternehmen, Apprimus Verlag, 2017, pages 29–51.

[11] Kaufmann, T.: "Industrie 4.0 – ein Überblick", Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, pages 1–10.

[12] Feldhusen., J, Löwer, M., Bungert, F.: "Agile Methods for Design to Customer", Proceedings of ICED 09, Volume DS 58-9, 2009, p. 451–60.

[13] Ahmed-Kristensen, S., Daalhuizen, J.: "Pioneering the combined use of Agile and Stage-Gate Models in new product development", Proceedings of IPDMC 2015, 2015, pages 1–13.

[14] Sommer, A.F. et al.: "Improved Product Development Performance through Agile/Stage-Gate Hybrids", Research-Technology Management, 2015.

[15] Cooper, R.G., Sommer, A.F.: "The Agile-Stage-Gate Hybrid Model", Journal of Product Innovation Management, 33, 2016; pages 513–26.

[16] Schuh, G. et al.: "Transmission of software-related agile mechanisms of action towards product development processes for technical products", Proceedings of the 24th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2017.

[17] Cooper, R.G.: "Stage-gate systems: A new tool for managing new products", Business Horizons, 1990, pages 44–54.

[18] Kantelberg, J.: "Gestaltung agiler Entwicklungsprozesse technischer Produkte", Dissertation in der Veröffentlichung

# Integration von Versuchs- und Simulationsdatenmanagement in der Produktentwicklung

Julian Schönwald[1], David Vahrenhorst[1], Andreas Chojnacki[1], Stefanie Zschako[1], Lukas Sundarp[1], Kristin Paetzold[1]

[1] *Institut für technische Produktentwicklung/ Universität der Bundeswehr München*

## Abstract

Mindsets, data types, data structures and data storage in testing and simulation departments in product development (PD) are often very different. Exchange of data and information is normally not automated and not supported by management systems. A literature study in combination with 12 expert interviews and the analysis of documents and data storage structures in a PD department of a motorcycle manufacturer were performed. Tests were classified, test documentation formats analyzed, standards in Measurement Data Management (MDM) and Simulation Data Management (SDM) compared. Options for integration of MDM and SDM could be specific ontologies, object-oriented interfaces, a higher-level intermediate application, use of a common standard or integration of one standard into another one.

*Keywords: product development process, data management, simulation, testing, cooperation*

## 1 Motivation

Die ersten produzierten Automobile wiesen viele Fehler und Schwächen auf. Aus diesem Grund wurde schon Anfang des 20. Jahrhunderts begonnen diese zu testen. Es wurden erste Versuchsmethoden – hauptsächlich im Bereich Werkstoff- und Bauteiluntersuchungen – entwickelt. Diese wurden im Verlauf der Zeit verfeinert und ergänzt. Die Aufgaben wurden vielfältiger (z. B. Eigenschaftsabsicherung, Kennwertermittlung, Unterstützung der Validierung). In den letzten Jahrzehnten kam eine neue Disziplin zur Absicherung im Automobilbereich hinzu: die Simulation. Diese ist – im Gegensatz zum klassischen Versuch – komplett IT-basiert. Diese wird zunehmend eingesetzt um zeitaufwändige Versuche und kostenintensive physische Prototypen zu ersetzen. Die enge Zusammenarbeit von Versuch und Simulation ist entscheidend für einen langfristigen Wettbewerbsvorteil. Denkweisen, Datentypen, Datenstrukturen und Datenablage sind aber meist sehr verschieden. [1]

## 2 Forschungsproblem und Forschungsziel

Über 100 Jahre hat sich die Disziplin des Versuchs eigenständig entwickelt. Mit zunehmenden technischen Möglichkeiten (Sensorik, Messtechnik, EDV, …), wachsenden Anforderungen und steigender Komplexität der Produkte, stieg die Anzahl, die Aufgabenvielfalt, sowie die Kompliziertheit der Versuche. Dies führt zu höheren Datenmengen und einer steigenden Anzahl unterschiedlicher Datentypen. Diese sind oft sehr speziell und können teilweise nur bedingt automatisiert ausgewertet und verarbeitet werden. Versuchsprozesse können sehr unterschiedlich sein und deren Reproduzierbarkeit (z.B. Umwelt- und Rahmenbedingungen bei realen Fahrversuchen) erfordern statistische Maßnahmen. Simulationen dagegen haben klare, nachvollziehbare Prozesse, fest definierte Umwelt- und Rahmenbedingungen und lassen sich vollständig reproduzieren. Datentypen sind eindeutig (wenn auch heterogen), Datenstrukturen und Datenablage durch IT-Unterstützung klar festgelegt. Um die Qualität einer Simulation zu bewerten und zu verbessern, muss ein Vergleich mit dem realen Versuch stattfinden.

In der industriellen Praxis zeigt sich jedoch oft, dass Versuch und Simulation – nicht nur räumlich – getrennt voneinander arbeiten, der Daten- und Informationsaustausch nicht automatisiert ist und somit viel Zeit und Information verloren geht. SPDM (Simulation Process and Data Management) Systeme sind in vielen Unternehmen etabliert, Versuchsdatenmanagementsysteme finden eher selten Anwendung. Eine industrielle Nutzung einer Kombination von beiden (in einem übergreifenden Bereich) ist dem Autor nicht bekannt. Es gilt daher zu prüfen:

Welche Arten von Daten und Informationen werden im Versuch und in der Simulation erzeugt und wie werden diese abgelegt bzw. für andere zur Verfügung gestellt? Wie lassen sich Versuchsdatenmanagement und Simulationsdatenmanagement kombinieren?

# 3 Stand der Wissenschaft und Technik

## 3.1 SPDM

Während Product Data Management Systeme (PDM) anfangs hauptsächlich Daten des Computer Aided Design (CAD) aufbewahrt haben, spricht man heute im Kontext des Product Lifecycle Management (PLM) davon alle zum Produkt gehörenden Daten über den gesamten Produktlebenszyklus in einer Datenbank zu organisieren und zur Verfügung zu stellen. Im Simulation Data Management (SDM) werden alle zur Simulation gehörigen Daten (z. B. Input-Decks, Ergebnisse, Auswertung, …) verwaltet. Measurement Data Management (MDM) Systeme verwalten Messdaten aus Versuchen.

Simulation Process and Data Management Systeme (SPDM) ermöglichen zusätzlich zur Datenspeicherung eine Betreuung des gesamten Simulationsprozesses. Diese Systeme verknüpfen die Eingänge und Ausgänge von Pre-Processing-, Solving- und Post-Processing-Programmen und können so den Prozess der Simulation verbessern, dokumentieren und automatisieren. Sie ermöglichen die Nachvollziehbarmachung der Prozesse, Rechteverwaltung, einfache Berechnung von Varianten und die Automatisierung von Simulationen bis zur Berichterstellung. [1]

## 3.2 ASAM-ODS

Die Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems (ASAM) ist eine von verschiedenen Herstellern und Dienstleistern der Industrie, sowie Forschungsorganisationen gebildete Interessengemeinschaft zur Standardisierung. Sie gibt verschiedene Standards für Testumgebungen oder Automatisierung von Testprozessen aus. Der Standard ODS (Open Data Services) ist ein Datenmodell für Testdaten, welches sicherstellt, dass diese konsistent gespeichert und verschoben werden können, ohne von der zugrundeliegenden Hardware abhängig zu sein. Das Datenmodel, die Schnittstellen, die physikalische Ablage und das Transport-Format sind festgelegt. Es existiert ein Basismodel in welchem jede Information (z. B. Komponente, Testequipment, Randbedingungen, Einheit, …) einen festen Platz hat. Diese wird jeweils in einem Applikationsmodell konkretisiert. Ausgabeformat ist ATFX (ASAM Transport Format). [2]

## 3.3 openMDM

openMDM baut auf dem ASAM-ODS Standard auf. Es handelt sich um ein generisches ASAM ODS Applikationsmodell, welches sich im Schwerpunkt auf die Automobilbrache konzentriert. Dieses bietet - durch eine erweiterte Programmierschnittstelle - eine Basis für Client-Programme. openMDM geht einen Schritt weiter als ASAM-ODS und betrachtet nicht nur Datenablage und Datenübertragung, sondern auch den Versuchsprozess selbst, sowie seine Vorbereitung. Die Versuchsplanung wird dadurch unterstützt. openMDM 4 nutzt ein CORBA-Protokoll, openMDM 5 soll zukünftig das http-Protokoll mit einer REST-Schnittstelle nutzen. Von verschiedenen Herstellern existieren unterschiedliche openMDM Clients zur Bedienung des Systems. Diese beinhalten meist einen Navigator und eine Suchfunktion, aber auch einfache Ausgabemethoden wie einen Chart-Viewer oder Exportfunktionen in andere Formate. Der vorgesehene openMDM Prozess ist in Bild 1 dargestellt. Lediglich die Testvorbereitung, Testdurchführung sowie Verarbeitung der Daten finden außerhalb des openMDM Systems statt. [3][4][5][6]

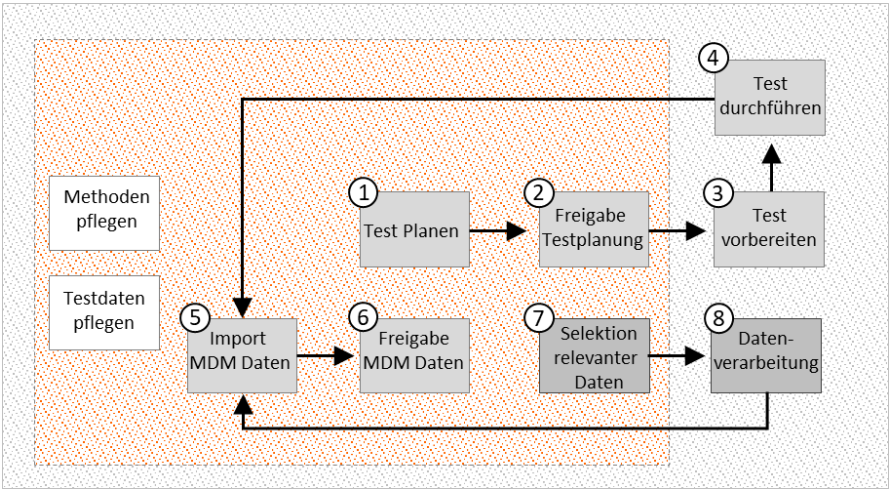



Bild 1: openMDM Prozess

## 3.4 ISO-MME

Der Standard ISO-MME (genauer: ISO TS 13499) wurde erstmals 1998 veröffentlicht und standardisiert die Daten die bei Frontalcrashtests mit Fahrzeugen entstehen und vereinfacht damit den Austausch dieser. Das Hauptformat

des Standards sind Textdokumente in ASCII (American Standard Code for Information Interchange), aber auch Bilder und Videos können übermittelt werden. Eine Datenstruktur und Grundlagen wie Einhaltung von SI-Einheiten oder Nullwerte werden damit festgelegt. Im Vergleich zu ASAM-ODS und openMDM handelt es sich um eine relativ einfache Struktur, die einen Ordnerbaum vorgibt, in dem einzelne Dateien und Ordner eine definierte Struktur haben. Erläuterungen, Diagramme und Zusatzinformationen machen einen Großteil dieser Struktur aus. Der Standard gibt im Prinzip zwar nur eine Struktur vor, wird dadurch aber von sehr vielen Programmen unterstützt und ist als Austauschformat heute noch relevant. [7]

## 3.5 STEP AP209e2

STEP (Standard for the exchange of product model data) gliedert sich in verschiedene Anwendungsprotokolle (APs). Alle APs werden federführend von dem ProSTEP iViP Verein in Deutschland und der PDES, Inc. in den USA betreut. Das Anwendungsprotokoll AP209e2 (auch als ISO 10303 bezeichnet) basiert auf dem Protokoll AP242, dessen Ziel es war Business Object Modell (BOM) zu standardisieren. Dieses führt Eigenschaften zusammen, die nicht geometrischer Natur sind, wie z. B. Projektstruktur, Dokumentstruktur, Metadaten oder Kinematiken. Das Ziel war es, die Bereiche SDM, PDM, CAE und CAD durch ein gemeinsames Austauschformat zu verbinden. Das – das Protokoll AP242 komplett einschließende – Modell ist so in der Lage nahezu alle Anwendungsfälle von Datenaustausch zwischen verschiedenen Simulationsprogrammen zu ermöglichen. [8][9][10]

## 3.6 SimPDM

SimPDM ist eine aus STEP AP209 weiter entwickelte Empfehlung für die Automobilindustrie, die vom Verband Der Automobilindustrie (VDA) als Standard VDA 4967 herausgegeben wurde. Sie enthält viele Grundideen des STEP AP209, ist aber inhaltlich verschieden. SimPDM legt dar, wie Datenstrukturen aufgebaut und behandelt werden müssen, um Simulationsdaten in PDM Systemen einbinden zu können. Auf dem Makrolevel des xDM-Systems ist ein Metadatenmodell gespeichert, über das ein Zugriff auf die im Mikrolevel abgelegten Daten möglich ist. Metadaten enthalten z. B. Autor, Tag der Erstellung, Freigabedatum, Pfad zur Datei und Produktionsstatus. Das Metadatenmodell beschreibt die Beziehungen zwischen den Metadaten der – von verschiedenen Systemen erzeugten – unterschiedlichen Dateien im Management System. [11][12]

## 4 Verwendete Methoden, Vorgehensweise

Um die genannten Forschungsfragen zu beantworten wurde zuerst eine Literaturrecherche zum Versuchs- und Simulationsdatenmanagement durchgeführt. Dazu wurden der Karlsruher Virtueller Katalog, Google (www.google.de), sowie die Datenbanken SCOPUS (www.Scopus.com), EMERALD (www.emerald-in-sight.com) und WEB OF SCIENCE (www.webofknowledge.com) verwendet.

Es wurde eine Übersicht über generische Versuchsarten erstellt und diese mit Klassifikatoren belegt. Diese Klassifikatoren haben den Zweck Testdaten im Versuchsdatenmanagement zu ordnen und so für spätere Tests leichter zugänglich zu machen.

Existierende IT-Systeme und etablierte Standards aus den Bereichen Versuchs- und Simulationsdatenmanagement wurden analysiert und verglichen. Um die Gültigkeit und Aktualität der Ergebnisse zu bewerten, wurden zwei semistrukturierte Experteninterviews mit Ingenieuren eines SPDM-System Herstellers geführt.

Um die Erkenntnisse und Ideen aus der Literaturrecherche an einem praktischen Beispiel zu vertiefen bzw. auf Umsetzbarkeit zu überprüfen, wurden anschließend 10 semistrukturierte Experteninterviews mit Versuchs- und Simulationsingenieuren in der Entwicklungsabteilung eines Motorradherstellers durchgeführt. Alle im Bereich Karosserie derzeit verwendeten Tests wurden analysiert und nach existierenden Klassifikatoren gruppiert. Die vorherrschende Datenablage, sowie die Arten und Größe der Daten- und Informationspakete, wurden ebenfalls detailliert untersucht. Dazu wurden interne Laufwerke durchsucht, vorhandene Übersichten und Listen erweitert und zusammengeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse aus den Experteninterviews mit den Erkenntnissen der Literaturrecherche verglichen und Vorschläge für eine Integration von Versuchs- und Simulationsdatenmanagement erarbeitet.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Klassifikatoren von generischen Versuchen

Testverfahren und Ansätze spiegeln häufig frühere Erfahrungen der Testingenieure wieder, anstatt sich an standardisierten Abläufen zu orientieren. Eine Klassifizierung bekannter Testmethoden ist in der Literatur nicht einheitlich vorhanden. Es wurde eine Übersicht über die 33 von Engel [13] generisch beschriebenen Versuchsarten erstellt und jede Einzelne mit folgenden 6 Klassifikatoren (Tabelle 1) beschrieben:

Tabelle 1: Klassifikatoren von Versuchen

| Klassifikator | Objekt der Beschreibung | Beispiele für mögliche Unterteilung |
|---|---|---|
| Testfall | Modell | Hardware-, Software-Testing |
| Testumfang | Testobjekt | System-, Bauteilprüfung |
| Testumgebung | Zielsetzung | Fehlersuche, Stabilitätsprüfung |
| Testinterpretation | Art der Betriebsprüfung | Verhaltensuntersuchung, Dauererprobung |
| Testzeitpunkt | Phase der Entwicklung | Labor-, Prototypenentwicklung, Systemsimulation, Feldtest |
| Testdatentyp | Ausgabeformat | digitale Daten, Sensordaten, Bedienerfeedback |

## 5.2 Standards im Versuchs- und Simulationsdatenmanagement

Aus den Bereichen Versuchs- bzw. Simulationsdatenmanagement wurden die Standards ASAM ODS, openMDM, ISO MME, STEP AP209e2 sowie SimPDM genauer betrachtet. Sie wurden anhand der Eignung für Testing bzw. Simulation, dem Gebiet für das sie anwendbar sind und der Art ihrer Konnektivität verglichen. Zur Bewertung wurde eine Dreierskala mit „gut", „teils-teils" und „schlecht" verwendet. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Bild 2 dargestellt.

| Name | ASAM-ODS | openMDM | ISO MME | STEP AP209e2 | SIMPDM |
|---|---|---|---|---|---|
| Testing | Umfangreiches Gesamtmodell | Modelle für viele Anwendungsfälle | Einfache Liste | Keine Unterstützung | Keine Unterstützung |
| Simulation | Keine Unterstützung | Keine Unterstützung | Keine Unterstützung | FEM, MKS, CFD, sowie generische | Prinzipiell alle unterstützt |
| Gebiet | Alle Versuche, bewusst offen | Automobilindustrie, erweiterbar | Automobilindustrie, Auch anders genutzt | Alle Simulationen | Simulationen und PDM-Systeme |
| Konnektivität | ATF, ATFX, | ATF, ATFX extern; CORBA intern | Keine integrierte, File Transfer | Keine integrierte, File Transfer | Integrierte Mechanismen |
| Herausgeber | ASAM | openMDM working group | ISO | ISO, ProSTEP iViP | VDA |

| |
|---|
| gut |
| teils-teils |
| schlecht |

Bild 2: Vergleich von Standards im Versuchs- und Simulationsdatenmanagement

## 5.3 Use-Case „Karosserieentwicklung eines Motorradherstellers"

In der Karosserieentwicklung eines Motorradherstellers werden ca. 300 verschiedene Versuche aus den Bereichen Umweltprüfung, Vibration, Zug-/ Druck- bzw. Kraftmessung, Dauerläufe, EGT (Erweiterter Gebrauchstest), Missbrauch und Sonderereignisse sowie ca. 60 dazugehörige Simulationen durchgeführt. Diese werden anhand der Kriterien Name, Fachgebiet, Teile Umfang, Eigenschaft, Art der Prüfung und Testumgebung klassifiziert.

### 5.3.1 Versuchsdatenmanagement

Die Versuchsplanung wird hauptsächlich mit Hilfe von Excel Listen und Word Dokumenten durchgeführt. Eine Teilautomatisierung zur Erstellung der Testprogramme wird derzeit mittels SharePoint aufgebaut. Die Datenspeicherung erfolgt auf internen Laufwerken. Strukturierung und Benennung der Dateien ist in den verschiedenen Abteilungen unterschiedlich, aber auch innerhalb der einzelnen Gruppen kommt es teilweise – abhängig von den einzelnen Sachbearbeitern oder bestimmten Projekten – zu Varianzen. Dies führt teilweise zu Mehrfachspeicherung oder leeren Ordnern. Bei Derivatentwicklungen wird in manchen Bereichen auf Ergebnisse aus Vorgängerprojekten zurückgegriffen – Verweise darauf fehlen aber meist. Es wird keine bereichsübergreifende Namenskonvention zur Datenablage genutzt.

Nicht alle Versuche werden intern durchgeführt, teilweise werden diese extern vergeben. Der Datenaustausch mit den externen Dienstleistern erfolgt im Bereich Versuch hauptsächlich über E-Mail. Je Fahrzeugprojekt entstehen mehrere tausend Dateien. Das Datenvolumen ist sehr unterschiedlich und variiert zwischen den Projekten zwischen 500 MB und 100 GB.

Versuchsergebnisse werden fast immer in Textform (z. B. *.docx, *.pdf) dargestellt und oft ergänzt durch Fotos (z. B.*. jpeg) und Videos (z. B. *.mov, *.avi). Seltener werden andere Formate (z. B. ASCII-Code) oder Diagramme für Kraftwerte oder Luftwiderstandsbeiwerte gespeichert (siehe Bild 3).

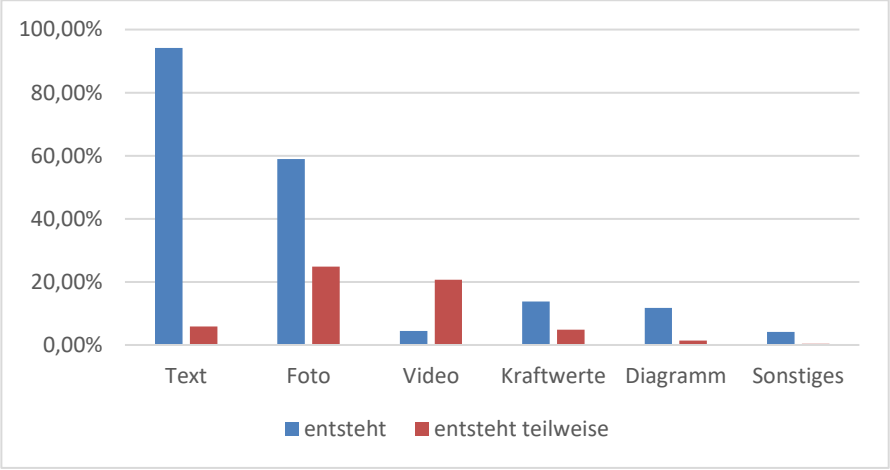



Bild 3: Häufigkeit der Versuchsdatenformate

### 5.3.2 Simulationsdatenmanagement

Simulationen werden hauptsächlich extern durchgeführt, die Simulationsplanung und der Datenaustausch erfolgt hier vorwiegend über ein SPDM-System bzw. über eine Cloud. Für jede Simulation existieren klar definierte Modellierungsrichtlinien und Berechnungsinformationsvorlagen, welche über eine SharePoint Lösung sowohl intern, als auch extern zugänglich sind. Die Speicherung der Berichte erfolgt zusätzlich zum SPDM-System auf einem internen Laufwerk.

## 6 Diskussion

In der Literatur ist eine Vielzahl verschiedenster Testmethoden beschrieben. Diese lassen sich anhand der 6 definierten Klassifikatoren gut einteilen und kategorisieren. In dem Use-Case wird die Mehrzahl dieser – teilweise unter einer etwas anderen Bezeichnung und einer höheren Detaillierung – ebenfalls verwendet. Die Erweiterung der Klassifikatoren um Testzeitpunkt und Testdatentyp wurde von den Versuchsingenieuren als sinnvoll erachtet und wird implementiert.

Die Strukturierung der Datenablage, Nutzung von standardisierten Vorlagen und Prozessen ist – nicht nur aufgrund der Verwendung einer SPDM-Anwendung – im Bereich Simulation deutlich besser als im Bereich Versuch. Die Versuchsdatenablage ist verbesserungswürdig. Die Kategorisierung und Teilautomatisierung der Versuchsplanung mittels SharePoint ist ein guter Ansatz, der

aber eine Datenablage aufgrund von mangelnder Speicherkapazität (derzeit 3 GB) nicht ermöglicht. Dieser sollte nur als ein Zwischenschritt zur Einführung eines Versuchsdatenmanagements gesehen werden.

Die betrachteten Standards unterstützen entweder Versuchsdatenmanagement oder Simulationsdatenmanagement. Alle Standards decken das Fachgebiet des betrachteten Use-Cases ab. Die Konnektivität der Standards ist nur teilweise als „gut" einzustufen. Um eine Integration des Versuchs- und Simulationsdatenmanagements zu unterstützen wären folgende 5 Optionen denkbar (siehe Bild 4):

Kopplung SDM-Anwendung und MDM-Anwendung mittels

- anwendungspaarspezifischer Ontologien
- zweier objektorientierter Schnittstellen
- einer übergeordneten, zwischengeschalteten Anwendung
- Verwendung eines gemeinsamen – ggf. neu geschaffenen - Standards
- Anpassung und Integration eines Standards in einen anderen Standard

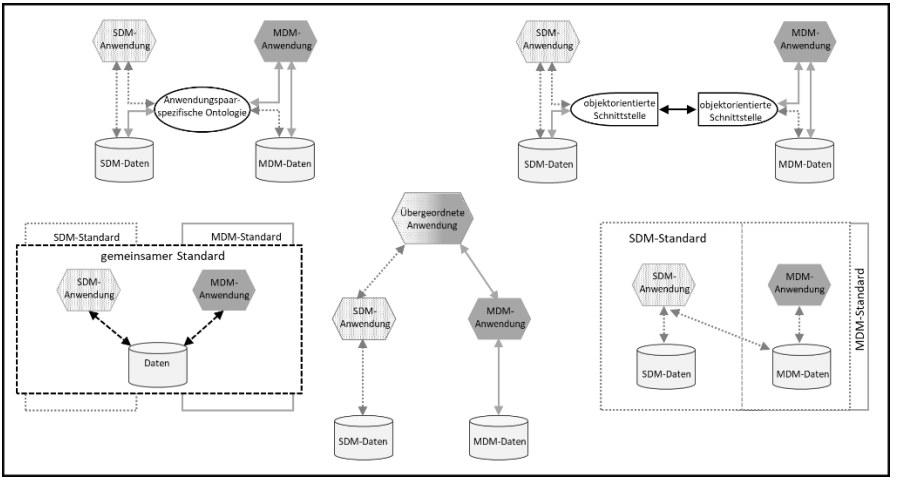



Bild 4: Ansätze zu Integration von Versuchs- und Simulationsdatenmanagement

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenarbeit und Automatisierung, sowie gemeinsame Daten- und Informationsablage in den Bereichen Versuch und Simulation, bergen deutliches Optimierungspotential. Im Simulationsdatenmanagement gibt es gute (auch kommerziell verfügbare) Lösungen, dies sind aber meist nur sehr bedingt mit dem Versuchsdatenmanagement kompatibel. Es wurden verschiedene Ansätze aufgezeigt, wie eine Integration von Versuch- und Simulationsdatenmanagement erfolgen kann. Es sollten aber nicht nur Fragestellungen technischer Art, sondern auch nicht-technischer Art betrachtet werden. Kommunikation, Kooperation und Kollaboration zwischen allen Beteiligten, sowie deren Einstellung, Probleme und Wünsche sollten genauer untersucht werden.

## Danksagung

Die Arbeiten zu diesem Paper sind Teil des Forschungsprojektes „Absicherungsmanagement in der Produktentwicklung" (AbsManPE) – eine Zusammenarbeit der Universität der Bundeswehr München mit BMW Motorrad, P+Z Engineering GmbH, QuEST Global Engineering Services GmbH, Atos IT Solutions and Services GmbH und MSC.Software GmbH. Dies wird von der Bayerischen Forschungsstiftung (BFS) gefördert. Der BFS sowie den beteiligten Industriepartnern wird herzlich für ihre Unterstützung gedankt.

## Literatur

[1] S. Pischinger and U. Seiffer, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2016.

[2] D. Rapf, "Standards im Datenmanagement ASAM ODS und openMDM," *ATZ extra*, Wiesbaden, pp. 32–39, May-2016.

[3] D. Rapf, "The openMDM roadmap The future of measured data management," in *Testing Expo Stuttgart 2017*, 2017, pp. 1–21.

[4] A. Wittek, "Setup Development Environment for the openMDM ( R ) Application Eclipse mdm," 2017.

[5] R. Materna, "openMDM - what ' s behind ?," 2010.

[6] D. Rapf and M. Schwarzbach, "openMDM ® – an Open Source Platform for Measured Data Management," in *Automotive Diagnostics Systems Summit 2016*, 2016, pp. 1–24.

[7] ISO, *ISO/TS 13499:2014 Road vehicles -- Multimedia data exchange format for impact tests*. 2014.

[8] ISO, *ISO 10303-209:2014-12 Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 209: Application protocol: Multidisciplinary analysis and design*. 2014.

[9] ProSTEPiViP, "STEP AP209 online." [Online]. Available: http://www.ap209.org. [Accessed: 23-Apr-2018].

[10] ProSTEPiViP, "STEP AP242 online." [Online]. Available: http://www.ap242.org. [Accessed: 23-Apr-2018].

[11] R. Anderl and J. Malzacher, "SimPDM – Simulationsdatenmanagement-Standard nach Maß," *CAD CAM*, no. 1–2, pp. 38–41, 2009.

[12] VDA Arbeitskreis PLM, "VDA 4967: Simulation Data Management - Integration of Simulation and Computation in a PDM- Environment (SimPDM)," Frankfurt, Version 2.0, 2008.

[13] A. Engel, *Verification, Validation, and Testing of Engineered Systems*, 73rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

# Durchgängiges Prototyping mechatronischer Systeme im MBSE Entwicklungsprozess

Christian Buchholz[1], Maik Tiemann[1], Rainer Stark[1]

[1] *Fachgebiet Industrielle Informationstechnik*
*Technische Universität Berlin*

## Abstract

A multitude of process models exists in order to describe and frame the product development lifecycle. The increasing virtual involvement in the development process is addressed by the Model Based Systems Engineering (MBSE) approach. The focus is to set on the system design itself and not the integration of prototyping to validate and verify the concepts that needs to get developed. This paper focuses on extending and evaluating these process models to include an approach for integration and test of digital and smart hybrid prototypes in various degrees of maturity. The extended process model is applied in form of a proof of concept including a presentation of the underlying technological platform.

*Keywords: Model Based Systems Engineering, Mechatronic System Development, Hybrid Prototyping, Virtual Prototyping*

## 1 Motivation und Problemstellung

Steigende Komplexität mechatronischer Systeme, die aus umfassenden Partialsystemen der Mechanik, Software und Elektrik/Elektronik aufgebaut und durch einen höheren Vernetzungsgrad gekennzeichnet sind, führen zu einem Bedarf an neuartigen, frühzeitigen Methoden der Absicherung [1–3]. Zum einen

rückt die Verifikation dieser Systeme – die Absicherung, dass das entwickelte System entsprechend der Anforderungen „richtig" entwickelt wurde – in den Mittelpunkt. Zum anderen bedarf es einer frühzeitigen Validierung – der Sicherstellung der bedarfsgerechten Erfüllung der expliziten und impliziten Anforderungen des Kunden. Beides muss in hoher Qualität erfolgen, damit Zuverlässigkeit und Sicherheit des Produktes jederzeit gewährleistet sind [3]. Dazu kommt das Bestreben, Entwicklungsprozesse weiter zu verkürzen und effizienter zu gestalten, um unter Anderem Entwicklungskosten zu reduzieren [2].

Der Ansatz des Modellbasierten Systems Engineering (MBSE) zielt auf die Lösung dieser Fragestellung ab. MBSE Prozessmodelle beschreiben eine Abfolge von Entwicklungsschritten auf Basis von (virtuellen) Modellen von der initialen Kundenanforderung bis hin zum finalen Produkt [1, 4]. Gegenüber der Nutzung physischer Entwicklungsprototypen bietet die modellbasierte Entwicklung verschiedene Vorteile. Virtuelle Modelle können in geringeren Reifegraden getestet werden [1]. So sind beispielsweise strukturmechanische Untersuchungen bereits an sehr groben Geometrie-Entwurfsmodellen möglich. Weiterhin ist die Erstellung der virtuellen Modelle zumeist mit geringerem Aufwand und in kürzerer Zeit möglich als es durch physische Fertigungsprozesse [1, 2] der Fall ist. Zuletzt ermöglicht die Nutzung von rechnerbasierten Prototypen die Parallelisierung von Entwicklungstätigkeiten auch an verschiedenen physischen Standorten sowie eine Datenintegration und -verknüpfung verschiedener Modelltypen und -tests [1]. Eine möglichst weitgehende Nutzung virtueller Modelle in Entwicklungsprozessen ist daher anzustreben.

## 2 MBSE Prozesse - Stand der Technik

Systems Engineering versteht sich als ein interdisziplinärer Ansatz mit dem Ziel, komplexe technische Systeme in ihrer Gesamtheit zu verstehen, deren Komplexität zu beherrschen und diese letztendlich in hoher Qualität umzusetzen [1, 3]. Der Systems Engineering Kernprozess wird mehrheitlich durch die verschiedenen Ausprägungen des V-Modells beschrieben [3]. Die bekannteste Ausprägung ist der in der VDI 2206 beschriebene Makrozyklus zur Beschreibung des generischen Vorgehens beim Entwurf mechatronischer Systeme [5], abgebildet in Bild 1.

Beginnend bei den Anforderungen wird ein domänenübergreifendes Lösungskonzept im Systementwurf festgelegt. Ein auf diesem basierender Domänenentwurf wird in die Teildomänen Maschinenbau/Mechanik, Elektrotechnik/Elektronik (E/E) und Informationstechnologie bzw. Software aufgegliedert und detailliert. Anschließend folgt die Systemintegration dieser Domänen-Prototypen zum Gesamtsystem bis hin zum Produkt. Der Entwurfsfortschritt wird

fortlaufend im Rahmen der Eigenschaftsabsicherung anhand des Lösungskonzeptes und der Anforderungen durch Tests überprüft. Je nach Entwurfsfortschritt, Art und Komplexität der Entwicklungsaufgabe muss der Makrozyklus gegebenenfalls mehrfach durchlaufen werden, um von einem ersten Grobentwurf zu einem serienreifen Produkt zu gelangen [5].

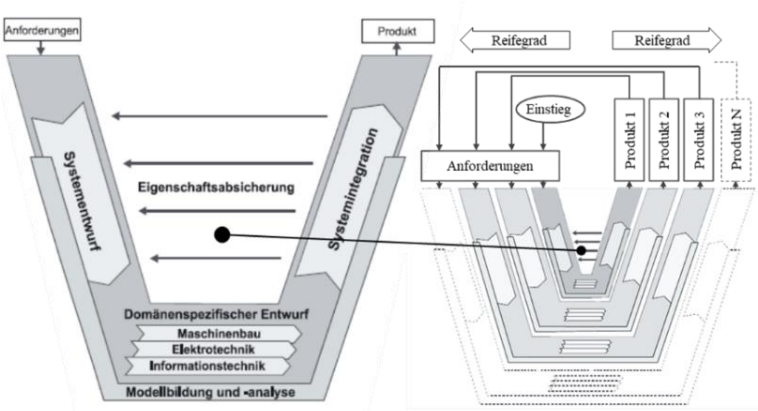



Bild 1: Makrozyklus zur Beschreibung des generischen Vorgehens beim Entwurf mechatronischer Systeme nach VDI 2206 [5]

Während klassische Ansätze des Systems Engineering Papier- oder Dokumentbasiert sind, nutzen die Ansätze des Modellbasierten Systems Engineering (MBSE) (virtuelle) Modelle, zur Beschreibung der verschiedenen Aspekte der Produktentwicklung [1, 5]. So erweitert das in Bild 2 dargestellte Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklungs-Modell (MVPE-Modell) das V-Modell der VDI 2206 um eine rechnerunterstützte, formale Modellbildung und Dokumentation entlang aller entwicklungsrelevanten Phasen des Produktlebenszyklus [1].

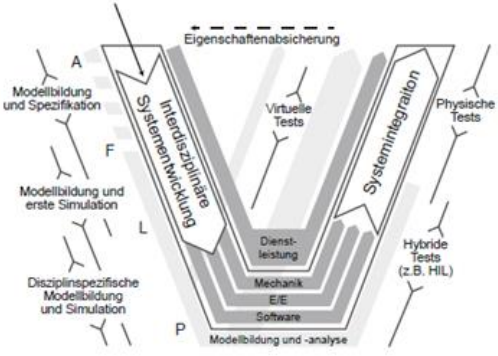



Bild 2: Modellbasiertes Virtuelles Produktentwicklungs-Modell [1]

Zu diesem Zweck sind im MVPE-Modell zusätzliche „Sichten" integriert, die der Modellbildung und Spezifikation, der ersten Simulation, der disziplinspezifische Modellbildung oder dem Virtuellen, Hybriden und Physischen Test dienen. Einen ähnlichen Ansatz wählt das W-Modell nach Anderl [6]. Dieses integriert die Partialmodelle der Domänenentwicklung zu interdisziplinären, domänenüberreifenden virtuellen Partialsystem-Modellen, um Sie so frühzeitig überprüfen und Fehler in einem nachfolgenden Domänen-Entwicklungsprozess beheben zu können [6].

Das in Bild 3 dargestellte MBSE Prozessmodell nach Fraunhofer IPK/TU Berlin [4] erweitert das V-Modell der VDI 2206 durch spezifische Prozessschritte des Systementwurfs der linken Seite des V, im Prozess als „Durchgängige Systemauslegung" bezeichnet. Der Entwurfsprozess beginnt mit der Übergabe der Anforderungsliste (1) an die Anforderungsanalyse und reicht bis hin zum Vorentwurf des Systemmodells sowie der logischen und dynamischen Verhaltenssimulation. Dabei wird eine durchgängige Kette an Entwurfsmodellen erstellt, beginnend mit dem Lastenheft (2), dem Funktions- und dem Systemmodell (3,4), über den Konzeptentwurf (5) bis hin zum logischen und dynamischen Verhaltensmodell (6). Die Besonderheit dieses Prozessmodells liegt darin, dass die drei Ebenen Produkt, System und Subsystem ausschlaggebend für Entwicklungsaktivitäten sind [4]. So wird ein iteratives Vorgehen beschrieben: Alle Prozessschritte werden zunächst für das Produkt durchlaufen. Anschließend wird das Produkt in (Teil-) Systeme, final dann in Sub-Systeme segregiert und die Modelle so iterativ verfeinert. Erst dann werden die spezifischen Lastenhefte, Funktions- und Systemmodelle (7), an die Domänenentwicklung übergeben und der domänenspezifische Entwurf der Sub-Systeme begonnen. Das verändert den Fokus der modellbasierten Systementwicklung: Die Beherrschung der Vernetzbarkeit und Verfolgbarkeit der unterschiedlichen Arten von Modellen bildet damit die neue Kernfähigkeit im Entwicklungsprozess [7].

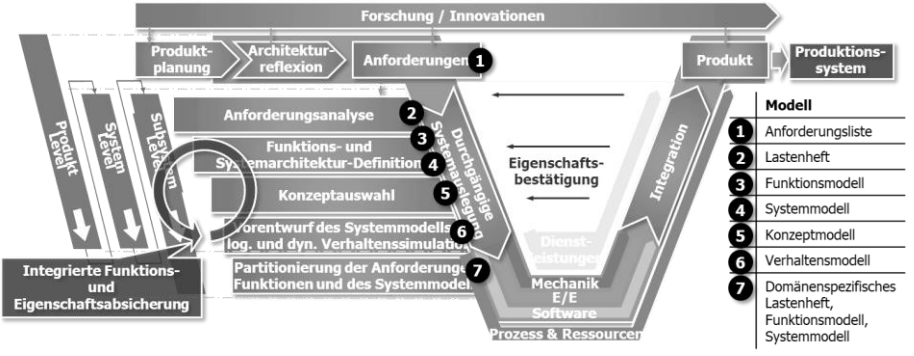



Bild 3: MBSE Prozessmodell des Fraunhofer IPK / TU Berlin [4]

## 3 Problemstellung

Die Gemeinsamkeit der beschriebenen Prozessmodelle ist der Fokus auf die Prozessschritte des Systementwurfs. Die Modelle und Prozessschritte der Systemintegration werden durch die Autoren vernachlässigt. Auch ist der Integrationsprozess vom Domänenmodell zum Produkt nicht oder nur oberflächlich beschrieben.

Die Praxis industrieller Entwicklungsprozesse zeigt, dass die Systemintegration gegenläufig zur Segregation des Entwurfsmodells stattfindet: So werden Produkte vom Subsystem über (Teil-) Systeme bis hin zum Produkt in iterativen Schleifen aggregiert [8]. Dazu werden aufeinander aufbauende Prototypen verwendet: So beschreiben beispielsweise Schäuffele & Zurawka für die Entwicklung elektronischer Systeme und Software die fortlaufende Integration der Software-Komponenten zum Software-System mit anschließenden Integrationstests [3]. Auf diesen Schritt folgt die Zusammenführung mit der Steuergeräte-Hardware sowie weiteren Komponenten wie Sensoren, Aktoren oder Sollwertgebern zum integrierten System. Auch die Entwicklung von Hardwarekomponenten folgt diesem iterativen Vorgehen: So beschreibt der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach VDI 2221 ein schrittweises Vorgehen von Modul zu Produkt, dessen Ergebnisse in einem kontinuierlichen Kontrollprozess mit den gestellten Anforderungen abgeglichen werden [2]. Neben dem iterativen Vorgehen werden in der Integration dementsprechend auch verschiedene Typen aus aufeinander aufbauenden virtuellen wie auch physischen Prototypen integriert und getestet.

Zur Integration der virtuellen, hybriden und physischen Prototypen schlägt Eigner eine Integration der Sichten des virtuellen, hybriden und physischen Tests entlang der Systemintegration vor [1]. Die Integration soll auf Basis zunehmend reiferer Prototypen durchgeführt werden: Zunächst der rein virtuelle Prototyp, beispielsweise der Software in-the-Loop Test, gefolgt von hybriden Tests wie Hardware-in-the-Loop, bei der neben Software bereits erste Elektronik-Hardware integriert getestet wird [1]. Als letzter Schritt erfolgt der physische Test.

Vorteil dieses Ansatzes ist die Möglichkeit, die aufeinander aufbauende „Prototypen-Kette" sowie die damit durchführbaren Testfälle auf der Integrationsseite des Prozessmodells zu kombinieren. So können neue technologische Ansätze, die eine frühere Kopplung von domänenspezifischen Modellen und damit die frühere Erstellung testbarer integrierter Modelle und Prototypen ermöglichen, in den Prozessmodellen berücksichtigt werden. Exemplarisch seien hier

der Ansatz des Functional Digital Mock Ups – der Kopplung geometrischer Produktmodelle der Mechanik mit funktionalen Verhaltensmodellen der Software zum funktionalen geometrischen Produktmodell [9] – genannt. Auch der Ansatz des Smart-Hybrid Prototyping – der Kopplung von prototypischer Elektronik-Hardware mit funktionalen Verhaltensmodellen der Software zum erlebbaren, funktionalen hybriden Prototypen – fällt in diese Kategorie [10].

Jedoch lassen sich verschiedene Arten an Prototypen durch einen solchen Ansatz nicht abbilden: Der reife, produktnahe Softwareprototyp, beispielsweise eine seriennahe Software, ist in dieser Darstellungsform nicht abbildbar, da Software weder physisch noch hybrid – im Sinne eines Mixes von physischen und virtuellen Elementen [10] – sein kann. Auch sind bestimmte physische Prototypen, wie beispielsweise der mit 3D Druckverfahren hergestellte physische „Rapid Prototyp" [2], durch diese Kategorisierung dem Produkt sehr nah zugeordnet. Es wird impliziert, dass die Reife des Prototyps entsprechend hoch ist. Dies ist jedoch bei Rapiden Prototypen, die oft mit hohem Abstraktionsgrad frühzeitig im Entwicklungsprozess zur Evaluation bestimmter Produkteigenschaften eingesetzt werden [2], nicht der Fall.

Zuletzt fehlt eine Beschreibung des iterativen Vorgehens der Integration und des Tests vom Subsystem über das System zum Produkt: So bilden die gezeigten Prozessmodelle den Integrationsprozess als Zwischenschritt zwischen Domänenentwicklung und Produkt analog zur VDI 2206 ab. In diesem Modell wird das iterative Vorgehen, welches durch das mehrfache Durchlaufen des Makrozyklus der VDI 2206 gegeben ist, vernachlässigt.

Es sind entsprechend Erweiterungen bestehender Prozessmodelle erforderlich, um die heutigen Möglichkeiten der Integration und des Tests von Prototypen in der Entwicklung mechatronischer Systeme abbilden zu können.

## 4 Erweitertes MBSE Prozessmodell für die Prototypen-gestützte, durchgängige Integration

Es soll ein Prozessmodell geschaffen werden, das die prototypen-gestützte, durchgängige Integration nach Eigner präzisiert und entsprechend der Anforderungen aus den identifizierten Lücken erweitert. Der Ansatz von Fraunhofer IPK/TU Berlin bietet gegenüber anderen MBSE Prozessmodellen den Vorteil, dass auf der Entwurfsseite bereits die einzelnen Prozessschritte definiert und mit Modellen hinterlegt sind. Zudem ist hier das iterative Vorgehen der Segregation vom Produkt zum Subsystem auf Entwurfsseite beschrieben. Auf diesen Faktoren basierend wird dieses Modell zur Erweiterung gewählt. Ziel ist es, ein

durchgehendes Prozessmodell für den modell- und prototypenbasierten Entwurf und Integration der Entwicklung mechatronischer Systeme zu schaffen.

Zu diesem Zweck werden die folgenden vier Lösungselemente integriert und das Prozessmodell zum „MBSE Prozessmodell des modellbasierten Entwurfs und der prototypenbasierten Integration und Test", dargestellt in Bild 4, erweitert:

1. Der neue Prozessschritt *„Domänenprototyping":* Die Herstellung und Tests von Domänen-Prototypen der Software, Elektrik/Elektronik (E/E) und Mechanik als Abschluss der Domänenentwicklung.

2. Der Prozess der *„Prototypenbasierten Integration"* der Domänen-Prototypen. Dieser beinhaltet die Prozessschritte *„virtuell", „hybrid"* und *„produktnah"* zur Beschreibung der jeweiligen prototypenbasierten Integrationsstufe in steigender Produktnähe.

3. Die *fortlaufende Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Domänenprototypen* bis zur Erreichung der Produktreife auf Basis der Erkenntnisse, die im Rahmen der Eigenschaftsbestätigung gefunden werden.

4. Die *Aggregation der Prototypen* vom Subsystem über das System zum Produkt.

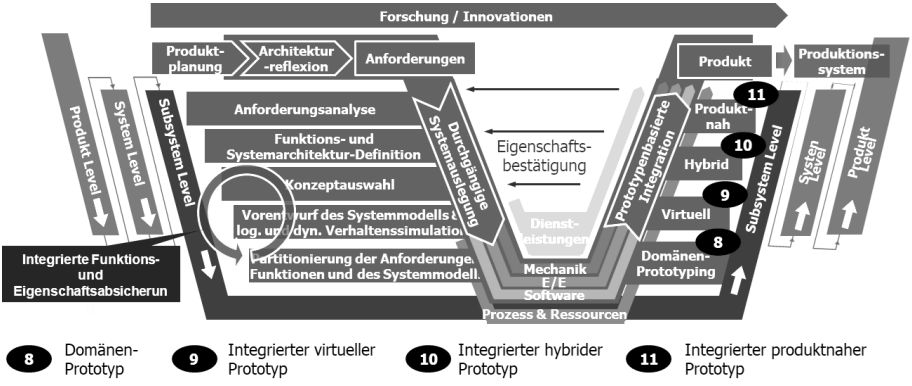



Bild 4: MBSE Prozessmodell des modellbasierten Entwurfs und der prototypenbasierten Integration und Test

Der Terminus „Produktnaher Prototyp" orientiert sich am Terminus „Virtueller Prototyp", der ein „Rechnermodell eines in der Entwicklung befindlichen Objekt" bezeichnet [5]. Es wird also ein „Objekt, das in einem dem finalen

Produkt nahen Zustand der Entwicklung ist" bezeichnet, je nach Entwicklungsdomäne beispielsweise ein seriennahes mechanisches Bauteil, eine seriennahe elektronische Steuerungsplatine oder eine seriennahe Software.

Der Prozessschritt der *„Prototypenbasierten Integration (virtuell)"* beschreibt damit eine Kopplung mehrerer virtueller Modelle, beispielsweise die Kopplung von CAD-Modell und Verhaltensmodell des Functional Digital Mock Up. Der Prozessschritt der *„Prototypenbasierten Integration (Produktnah)"* beschreibt dagegen beispielsweise einen Hardware-in-the-Loop Prototypen, der ein seriennahes Steuergerät mit implementierter Software koppelt.

Dazwischen sind verschiedenste Prozessschritte der *„Prototypenbasierten Integration (Hybrid)"* möglich: Beispielsweise die Implementierung von Software auf Rapid Prototyping Elektronik-Hardware, der Zusammenbau mittels Rapid Prototyping Verfahren hergestellten Prototypen zu einem mechanischen System oder die Kopplung von Verhaltensmodellen mit Rapid Prototyping Elektronik-Hardware zum „Smart Hybriden Prototypen" des mechatronischen Systems. Der Terminus „Hybrider Prototyp" ist gegenüber der durch Eigner beschriebenen Sicht erweitert: Er bezeichnet den nicht nur aus physischen und virtuellen, sondern aus produktnahen und virtuellen Domänenprototypen integrierten Prototypen.

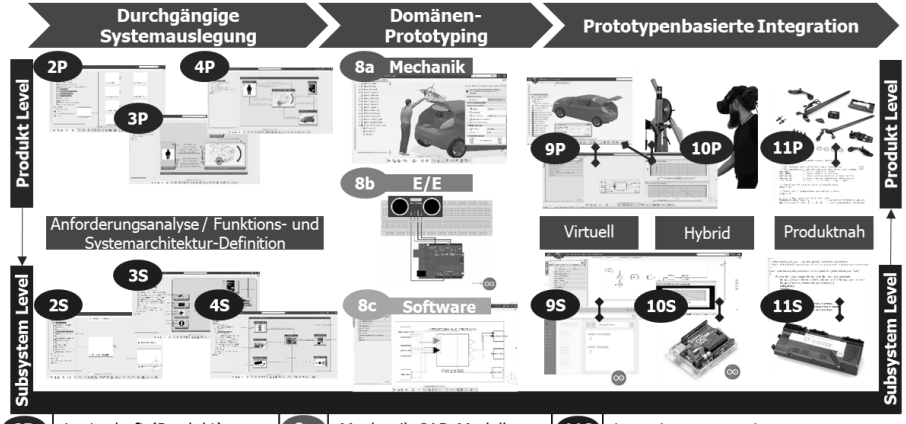
Ziel der Eigenschaftsbestätigung ist die Gewinnung von Erkenntnissen über den Testgegenstand, den Prototypen. Die Erkenntnisse werden verwendet, um den Prototypen anzupassen und diesen dann erneut gegen die Entwurfsmodelle zu testen. Dieses iterative Vorgehen, unter dem Akronym *TOTE* (*T*est-*O*perate-*T*est-*E*xit) beispielsweise durch Ehrlenspiel [11] beschrieben, wird so lange durchfahren, bis der durch die Entwurfsmodelle spezifizierte Zielzustand erreicht ist. Entsprechend werden die dem integrierten Prototypen zugrunde liegenden *Domänenprototypen* entlang des Integrationsprozesses *iterativ weiter entwickelt und integriert*, bis der jeweilige Zielzustand erreicht ist.

Dem iterativen Vorgehen des Entwurfsprozesses folgend findet dieser Prozess vom *Subsystem* über das *System* hin zum *Produkt* statt: Nach der iterativen Integration und den Tests der Prototypen auf Subsystem-Ebene werden die Prozessschritte wiederum für die Integration und Tests der Subsysteme zum System-Prototypen und anschließend der Systeme zum Produkt-Prototypen durchlaufen. Der Integrationsprozess schließt mit dem Prozessschritt „Produkt", der die vollständige Erreichung des spezifizierten Zielzustandes und damit das Ende der Phase der prototypenbasierten Integration beschreibt.

## 5 Proof of Concept: Entwicklung eines Heckklappen-Öffnungssystems

In einem Proof of Concept wird das erweiterte MBSE Prozessmodell im Anwendungsfall der Entwicklung eines mechatronischen Heckklappen-Öffnungssystems evaluiert und auf seine Anwendbarkeit getestet. Das System ist als Nachrüstsatz für PKW ohne automatische Heckklappe konzipiert und beinhaltet elektromechanische Aktuatoren zur Bewegung der Heckklappe, Bedienelemente zum Öffnen und Schließen sowie ein Steuergerät.

Für die Erstellung und den Test der virtuellen Modelle und Prototypen wird die 3DExperience Plattform der Firma Dassault Systèmes eingesetzt. Diese stellt verschiedene Modellierungs- und Simulationswerkzeuge bereit und integriert diese in eine durchgängige PLM Plattform [12]. Für den Bau von E/E-Prototypen wird die Open-Source Lösung Arduino, Hardware (HW) und Software (SW), für das Prototyping von interaktiven Systemen eingesetzt [13]. Das nachstehende Bild 5 zeigt die erstellten Entwurfsmodelle, Domänenprototypen und die integrierten Prototypen für das Produkt (P) sowie ein ausgewähltes Subsystem (S). Die Iterationsstufen auf Systemebene werden wegen mangelnder Komplexität des Produktes ausgelassen.




| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2P | Lastenheft (Produkt) | 8a | Mechanik CAD-Modell | 11S | kompilierter C-Code + Steuergerät |
| 3P | Funktionsmodell (Produkt) | 8b | E/E Schaltplan (Arduino) | 9P | FDMU: CAD-Modell + Verhaltensmodell SW |
| 4P | Systemmodell (Produkt) | 8c | Verhaltensmodell SW | 10P | SHP: 9P + Arduino E/E HW + Bedienhardware an SHP Device |
| 2S | Lastenheft (Subsystem) | 9S | Verhaltensmodell SW + Arduino E/E SW | 11P | kompilierter C-Code + Steuergerät + Aktuatoren + Bedienhardware |
| 3S | Funktionsmodell (Subsys.) | | | | |
| 4S | Systemmodell (Subsys.) | 10S | 9S + Arduino E/E HW | | |

Bild 5: Entwurfsmodelle, Domänenprototypen und integrierte Prototypen im Use Case „mechatronisches Heckklappen-Öffnungssystem"

Durch die Erstellung dieser Modelle und Prototypen sowie die Durchführung der jeweiligen Tests im Anwendungsfall kann das entwickelte Prozessmodell evaluiert werden. In diesem Zuge zeigen sich die folgenden Aspekte:

Der Prozess der prototypenbasierten Integration erlaubt die Untersuchung des Zusammenspiels der Domänen-Prototypen und damit die Identifikation von Schnittstellenproblemen. Die Nutzung der virtuellen und hybriden Prototypen ermöglicht einen schnellen Aufbau und eine schnelle Änderbarkeit dieser Prototypen, insbesondere beim Einsatz der „Rapiden Prototyping"-Möglichkeiten, die die Arduino Hard- und Software für den Bau von E/E-Prototypen bietet.

Die Einbindung der innovativen Prototypen „FDMU" sowie „ Smart Hybrider Prototyp", deren Aufbau in Bild 6 separat dargestellt sind, ermöglichen zusätzlich die frühe Einbindung des Nutzers in den Entwicklungsprozess. So können Parameter des Verhaltensmodells erlebt werden, indem ein Nutzer die Bewegung des 3D Modells des FDMU visuell erfassen und beurteilen kann. Durch zusätzliche Implementierung prototypischer Bedienelemente sowie die Integration der Prototypen mit dem SHP Device, das an der TU Berlin als Proof of Concept der Smart Hybrid Prototyping Technologie entwickelt wurde [10], kann der komplette Bedienvorgang haptisch und visuell erlebbar abgebildet werden.

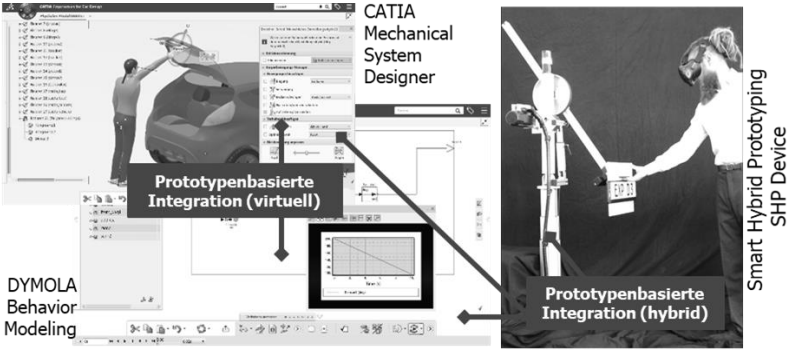



Bild 6: Integrierter Prototyp (virtuell) und (hybrid) für den Test des Produkt Levels des Heckklappen-Öffnungssystems in der 3DExperience Plattform

Darüber hinaus wird gezeigt, dass es möglich ist die Modelle und Prototypen innerhalb einer Entwicklungsumgebung von der Anforderung bis zum hybriden Prototypen des Systems abzubilden. Diese Verknüpfung ermöglicht die konsequente Prüfung von Konsistenz und Nachverfolgbarkeit von Fehlern. Dazu können die Modelle und Prototypen verbunden werden: So ist es beispielsweise möglich, Anforderungen des Nutzers mit Parametern des Verhaltensmodells wie beispielsweise der „Schließgeschwindigkeit des Systems" zu verbinden und

diese nutzerzentriert zu evaluieren. Die Erkenntnisse werden direkt in den Entwicklungsumgebungen der Mechanik, Software und E/E umgesetzt – das Nutzererlebnis wird also iterativ in den Entwicklungsprozess integriert. Produktnahe Prototypen, wie beispielsweise „kompilierte Software" oder „produktnahe E/E-Hardware", können bisher jedoch nicht in die 3DExperience Plattform integriert werden.

Durch die Kopplung der integrierten Plattform und des iterativen Vorgehens im Prozess ergibt sich ein hohes Maß an Modularität und Agilität, das die frühzeitige Kopplung und Integration auch unvollständig umgesetzter Prototypen und damit deren frühen Test ermöglicht. Die Aggregation von Subsystem zu System erlaubt zudem die Parallelisierung verschiedener Entwicklungsprozesse, Änderungen in Subsystemen können frühzeitig vollzogen werden.

## 6 Fazit und Ausblick

Es wird ein Prozessmodell für das modellbasierte System Engineering erweitert, das es ermöglicht moderne Ansätze der prototypenbasierten Integration und Test zu realisieren. Darüber hinaus wird im Rahmen eines Proof of Concept die Entwicklung eines komplexen mechatronischen Systems evaluiert. Dabei zeigt sich, dass die konzipierte Prozessfolge der prototypenbasierten Integration gegenüber bestehenden Prozessmodellen Vorteile bietet. Die prototypenbasierte, iterative Aggregation von Subsystem über das System zum Produkt ermöglicht die Parallelisierung von Entwicklungstätigkeiten sowie frühzeitige Änderungen in der Produktentwicklung. Die durchgeführte Erweiterung des MBSE Prozessmodells ermöglicht eine iterative Herangehensweise für zukünftige Entwicklungsprozesse, denn insbesondere die Abbildung von Trends wie zunehmender Produktindividualisierung und zunehmender mechatronische Komplexität wird unterstützt. Im Unterschied zu bisherigen Prozessmodellen kann auf diese Weise eine verbesserte Produktqualität erzielt und Anforderungs- und Kundengerechter entwickelt werden.

Um die Anwendbarkeit und Robustheit des Prozessmodells in realen, multidisziplinären und verteilten Use Cases der Entwicklung zu zeigen, ist eine zukünftige Evaluation in komplexeren industriellen Anwendungsfällen angedacht. Auch soll die Nutzbarkeit in der Entwicklung neuartiger Systeme, beispielsweise integrierter Produkt-Service Systeme oder vernetzter IoT-Systeme, untersucht werden. Zudem zeigen sich in der Nutzung der durchgängigen Plattform Potentiale, wie beispielsweise die weitergehende Verknüpfung aller Modelle und Prototypen bis hin zum produktnahen Prototypen. Eine Integration einer solchen Technologieplattform in das Prozessmodell verschafft weitreichende Potentiale für die zukünftige integrierte Produktentwicklung.

## Literatur


[1] Eigner M. et al: „Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung", Springer Vieweg, Berlin 2014

[2] Feldhusen J. et al: „Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung", Springer Berlin Heidelberg 2014

[3] Schäuffele J. et al: „Automotive Software Engineering", Springer, Wiesbaden 2013

[4] Sünnetcioglu A. et al: „Information Retrieval Techniken zum Automatisierten Erstellen von Tracelinks im MBSE", Magdeburg 2014

[5] VDI Richtlinie 2206: „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme", Beuth Verlag, Berlin, 2004

[6] Anderl, R. et al: „Das W-Modell - Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme" www.plmportal.org, 2012, Zugegriffen: 09. Juli 2018

[7] Stark, R. et al: „Cross-domain dependency modelling-how to achieve consistent system models with tool support". INCOSE, Stockholm, 2010

[8] Weber J.: „Automotive Development Processes", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

[9] Enge-Rosenblatt O.: „Functional Digital Mock-up", ASIM Workshop, Ulm, 2010

[10] Auricht M. et al: „Early Multimodal Validation of Virtual Prototypes", Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Nr. 107, Hanser, Berlin, 2012

[11] Ehrlenspiel K. et al: „Integrierte Produktentwicklung". Hanser, München 2012

[13] Dassault Systèmes: „3DEXPERIENCE Plattform für durchgängiges Product Lifecycle Management", www.3ds.com, 2018, Zugriff: 19.07.2018

[14] D'Ausilio, A.: „Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment", Behavior Research Methods, Springer US, 2011

# Design automation for additive manufacturing applied to branched fluid structures

Manuel Biedermann, Manuel Schoen, Mirko Meboldt

*Product Development Group Zurich (pd|z)*
*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich)*

## Abstract

Additive manufacturing (AM) offers a large design freedom but requires a deep understanding of design, process and material characteristics. Design automation for AM aims to capture the required know-how and implement design rules for recurring design tasks to increase the accessibility for valuable AM applications. This work presents a method for automating the generation of branched flow structures used for fluid distribution between a source and multiple points. The approach first constructs the topology of a branched network applying a heuristic rule. Its shape is then optimized utilizing optimality criteria for branching angles and pipe diameters. A simplified example serves as basis to discuss opportunities and limitations of the method together with possible directions of research.

*Keywords: Design for additive manufacturing, design automation, branched fluid structures*

## 1 Introduction

Through a layer-wise joining of material additive manufacturing (AM) processes provide unique design capabilities and enable parts with a high level of complexity regarding shape, material, and functionality [1 - 3]. As a sub-area of design for X (DFX), design for AM (DFAM) methods aim to optimize the functional performance of an AM part while taking into account other aspects of the product lifecycle such as part selection, manufacturability, reliability, and costs under the limitations and capabilities of AM [2, 4]. These considerations are similar to design for manufacturing (DFM) methods. However, DFAM methods apply DFM in the view of the novel capabilities of AM and focus on the question how AM can restructure conventional parts, assemblies and process-chains, and enable new design and manufacturing solutions [2].

A number of DFAM methods, which optimize the functional performance of an AM part, employ a simulation-driven design approach. Numerical design tools are used to generate a design concept, simulate its functional behavior and optimize it with respect to various objective functions and constraints [4, 5]. Many DfAM methods focus on lightweight designs and the use of a topology optimization. This technique derives an optimized material layout based on a defined problem setup (e.g. loading and boundary conditions) and given design space. A structural topology optimization is frequently applied to create complex lightweight structures on different scales e.g. design of parts on macro scale or lattice structures on meso scale [4, 5]. Constraints such as predetermined build direction and maximum overhang angle can be utilized to ensure the manufacturability of the design of an AM part [6].

## 2 Motivation and research objective

Applying design tools such as topology optimization offers several benefits for the design of AM parts. It is possible to exploit the design freedom of AM in an automated manner and create functionally optimized parts. AM expert knowledge and design principles, which are needed for solving recurring tasks, can be captured and implemented in software tools. By letting a user specify inputs on a function-driven level, novice AM users are enabled to create complex designs, whereas the process is accelerated for experienced users.

As outlined in the introduction, many DFAM methods employ automated design tools such as structural topology optimization to create lightweight designs for AM [4, 5]. However, AM processes may be used to fabricate parts that fulfill many other criteria besides structural requirements. For example, fluid and heat transfer applications represent areas, in which AM processes

make it possible to fabricate parts with large functional performance. Developing automated design tools for these and other areas seems promising due to reasons similar as mentioned before.

In the area of fluid transfer, branched fluid flow structures can be identified as a recurring functional element for the design of AM parts. For example, Fig. 1 shows a lightweight gear wheel that integrates a branched network of fluid channels [7]. These internal channels are used to distribute oil from the shaft through the gear body to the meshing zone. The fluid enters at the shaft and exits at the toothing both cooling as well as lubricating the teeth. The fluid flow is caused by an external pump and the gear rotation. The gear wheel in Fig. 1 was successfully built using selective laser melting following design rules of AM [1, 7]. Other examples for AM parts, which integrate a branched fluid flow structure, include heat exchangers, mixers and burner structures [8 - 10].

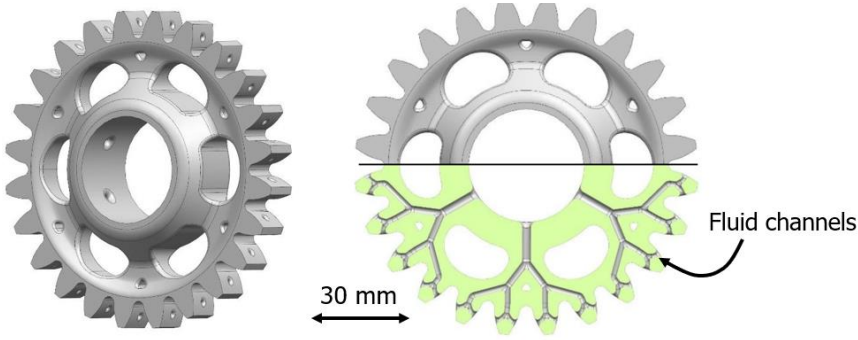



Figure 1: Lightweight gear with internal fluid channels for cooling and lubrication as an example for an AM part with branched fluid structure [7]

The design generation of such branched fluid flow structures may usually be done in a manual and time-consuming process. To accelerate and simplify the creation of such geometrically complex structures, this research work proposes a method for automating the design of optimized, branched fluid flow networks. For this purpose, the work is organized as follows. Section 3 provides an introduction on branched fluid flows and describes underlying design principles or so-called optimality criteria. Section 4 presents a method to automate the design generation of branched fluid flow structures. Section 5 demonstrates its application with an example. Section 6 concludes with a discussion and outlook.

## 3 Optimality conditions for branched fluid flow structures

Branched or treelike structures occur in natural as well as man-made, systems. Examples of natural systems include tree branches and leaves of plants, vascular systems such as the bronchial tree, or circulatory systems of blood vessels. Over the past decades, a lot of research has been conducted to study branched structures with their efficient transport properties and apply underlying design principles for the optimization of technical systems [11 - 13].

In order to highlight the efficiency of branched flow structures in case of fluid distribution, Fig. 2 visualizes the widely studied problem of a point-to-circle configuration [14, 15]. In this setup, the task is to design a network of pipes that distributes a mass flow rate $\dot{m}_S$ from a source S on a circle center to N end-points $P_j$ with index j lying on the circle with equal distances. A common objective is to minimize the pump power W required to distribute the mass flow from the source equally to the end-points $P_j$ with mass flow rate $\dot{m}_{Pj} = \dot{m}_S/N$. Other possible objectives are to minimize the pressure loss or total length of the structure [12]. As a constraint the volume V of the distribution network is set constant. This constraint is necessary because comparing networks with different volumes may not be meaningful as an increase of volume (cross-section area) for a given topology always reduces the pump power or pressure loss. Furthermore, a fixed (maximum) volume accounts for the finite size of part, in which a fluid distribution network it is embedded.

The chart in Fig. 1 shows the advantage of using a branched network of fluid pipes. Three different pipe networks with equal volume V are depicted for N = 24 end-points. A simple solution is to use N radial pipes with diameter D without any branching (bifurcation level B = 0) to connect source and end-points. This design requires the pump power $W_{radial}$, which is used in the following as a reference value for comparison. As illustrated in Fig. 1 the pump power W can be reduced by about 50 % with a branched flow network consisting of a series of pipes that are connected with Y-branches (bifurcation level B = 2 or B = 3). In comparison to the design with radial channels (B = 0), a branched structure bundles the fluid flow in pipes with larger diameter thereby achieving a reduction in pump power. The topology of such a branched fluid network is described by the connectivity between the source point S, end-points $P_j$ and utilized branching points $B_i$ with index i. The shape of a network can be defined through the angles ($\gamma_i$, $\psi_i$, $\phi_i$) at every branching and the diameter of $D_e$ of each pipe segment with index e.

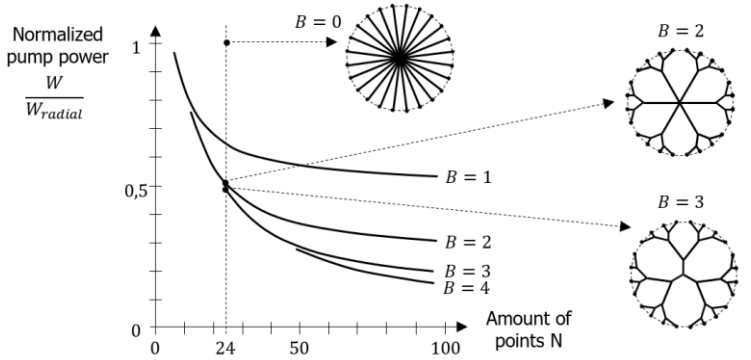



Figure 2: Comparison of pump power W for network with radial pipes (branching level B= 0) and branched flow networks (B = 2, B = 3) [14]

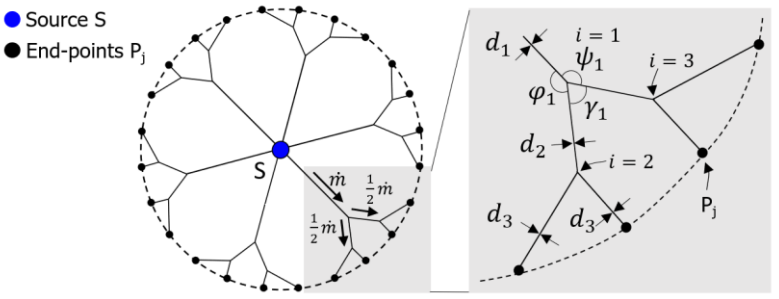



Figure 3: Definition of design parameters (branching angles $\gamma_i$, $\psi_i$, $\phi_i$ and pipe diameters $D_e$) used to describe the shape of a branched flow network

Analytical formula can be derived to construct optimized, branched flow networks with Y-branches such as in Fig. 2 and 3. Gosselin and Bejan provide a set of optimality criteria for the objective of minimized pump power under a fixed volume constraint using the method of Lagrange multipliers [14, 15]. The optimality criteria are derived for Y-branches and applicable for arbitrary positionings of source S and end-points Pj. In case of laminar flow, the relation between the optimized pipe diameter $D_e$ and the mass flow rate $\dot{m}_e$ through pipe e follows $D_e \sim \dot{m}_e^{1/3}$. If the flow splits equally at a branch, the relation between the diameter $D_1$ of the dividing branch with flow rate $\dot{m}_1$ and the diameter $D_2$ of the two resulting sub-branches with flow rate $\dot{m}_2 = ½\, \dot{m}_1$ is thus $D_1/D_2 = 2^{1/3}$. For turbulent flow in rough pipes the corresponding expressions are $D_e \sim \dot{m}^{3/7}$ and $D_1/D_2 = 2^{3/7}$. Regarding the angles at each bifurcation, it is shown that $\gamma_{i,opt} \sim 75°$ and $\psi_{i,opt} \sim \phi_{i,opt} \sim 142.5°$ require minimal pump power for laminar flow, whereas $\gamma_{i,opt} \sim 50°$ and $\psi_{i,opt} \sim \phi_{i,opt} \sim 155°$ represent optimized angles for turbulent flow in rough pipes [14, 15].

## 4 Method for automated design of branched fluid flow structures

Branched flow structures can be used to efficiently distribute a fluid from a source to multiple points. The following procedure aims to automate the design generation to simplify and accelerate the creation of such structures. Fig. 4 depicts an overview over the suggested method.

Step (1) defines input requirements such as position of source S and end-points $P_j$. Other specifications include an objective function and constraints as well as fluid properties (e.g. mass flow rate $\dot{m}_S$, pipe diameter at source or end-points, laminar or turbulent flow, wall roughness of pipes). Fig. 2 visualizes a simple setup with a single source S and five end-points $P_j$.

Step (2) creates an initial topology of the branched flow network defined by source S, end-points $P_j$ and branching points $B_i$. In general, many different variants are possible for a network topology. In this procedure, an initial layout is created using a heuristic rule that constructs a layout with Y-branches. One possible heuristic rule starts with the end-point $P_1$ furthest away from source S, identifies its closest neighbor point $P_2$ and sets a branching point $B_1$ in the direction of source S to form a Y-branch. This procedure is repeated for the remaining set of points $P_j$ including branching point $B_1$ but excluding points $P_1$ and $P_2$. Fig. 2 shows an initial layout consisting of four Y-branches and three branching points.

Step (3) aims to reduce the required pump power of the initial layout through shape optimization. Given the initial shape from step (2), the basic idea is to adapt the shape towards a local optimal solution by employing the optimality criteria for Y-branches [14] from section 3. These conditions are applied by adjusting the angles at each Y-branch in an iterative manner. For this purpose, the network is modeled as a particle mass-spring system. The position of source S and end-points $P_j$ are fixed, whereas the branching points $B_i$ with coordinates $\underline{b}_i$ represent movable particles with mass $m_i$. Each branching point $B_i$ is subjected to forces $\underline{F}_i$, which enforce the desired branching angles ($\gamma_{opt}$, $\psi_{opt}$, $\phi_{opt}$) from the optimality criteria at each Y-branch. To prescribe an angle such as $\gamma_{opt}$, the force vector $\underline{F}_{i,\gamma}$

$$\underline{F}_{i,\gamma} = c * \mathrm{abs}(\gamma_{opt} - \gamma_i) \cdot \underline{e}_{i,\gamma}$$

evaluates the absolute difference to the actual angle $\gamma_i$ and applies this magnitude with a stiffness factor c in the direction of a unit vector $\underline{e}_{i,\gamma}$ orientated along the angle bisector of $\gamma_i$. The two other angles $\psi_i$ and $\phi_i$ are adjusted in a similar manner using forces $\underline{F}_{i,\psi}$ and $\underline{F}_{i,\phi}$.

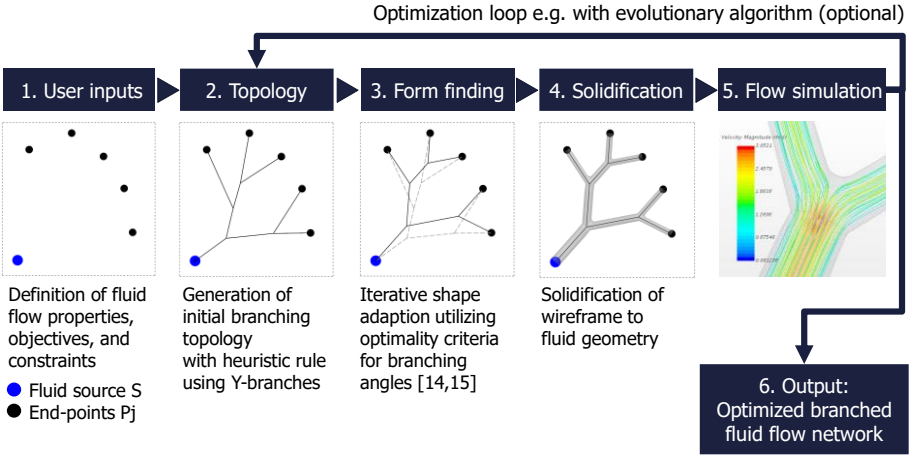



Figure 4: Method for automated design of branched fluid structures

Additional damping forces $\underline{F}_{i,D} = c_D * d\,\underline{b}_i/dt$ with damping coefficient $c_D$ are introduced to each branching point to avoid oscillatory motion and achieve a smooth and stable convergence. In summary, the differential equation of linear momentum for each branching point $B_i$ is as follows:

$$m * d^2\underline{b}_i/dt^2 = \underline{F}_{i,\gamma} + \underline{F}_{i,\psi} + \underline{F}_{i,\phi} + \underline{F}_{i,D}$$

The overall system of differential equations for all branching points can be solved employing various iterative methods such as the class of Runga-Kutta schemes. For each time step t, the forces are evaluated based on the branching angles and applied to each branching point $B_i$ leading to updated positions $\underline{b}_i$ Over time, the shape of the branched fluid network adapts to meet the prescribed angles of the optimality criteria. Once the shape optimized network is defined, diameters $D_e$ are assigned to each pipe e according to the diameter relationships described by the optimality criteria from section 3.

Step (4) creates a three-dimensional representation of the fluid network. The basis for this step is the shape optimized layout of pipes together with the assignment of pipe diameters. The Y-branches, which form transitions between simple pipes, are constructed using a set of NURBS (Non-uniform rational B-Splines) to shape each branching element.

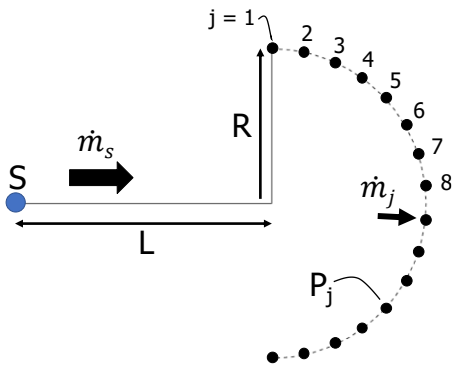
Step (5) applies a computational fluid dynamics (CFD) analysis to further examine the performance of the fluid network. Interesting aspects may include

the local flow behavior at branches, effects due to turbulent flow and the distribution of the mass flow rate from the source to the end-points.

As outlined in step (2), the initial network topology can be defined in different ways e.g. using other heuristic rules resulting in a varied connectivity between source, end-points, and branching points. Therefore, an additional outer optimization loop may be performed, for instance, with an evolutionary algorithm to compare different topologies but is optional. The outcome leads to an optimized fluid distribution network.

## 5 Application of method to simplified example

This section applies the presented method to a simplified, academic example. The examined problem setup is depicted in Fig. 5. The task is to distribute a fluid flow from a source S to N = 16 end-points $P_j$ that are equally placed on a half circle with radius R at distance L. For this study, oil is chosen as the fluid medium. The corresponding fluid properties at 40 °C are given in Fig. 5 together with the specification of the mass flow rate $\dot{m}_S$ at the source. In a similar manner to the gear wheel example from section 2, the structure may be fabricated using selective laser melting of metal. Therefore, the pipes are modeled with a surface roughness and the flow fluid is assumed as turbulent. The corresponding optimality criteria (relations for diameter and angles at Y-branches) from section are set accordingly.




| Data | Value |
|---|---|
| **Geometric measures** | |
| L: Distance [mm] | 50 |
| R: Radius [mm] | 30 |
| N: Number of end-points Pj [-] | 16 |
| $D_{min}$: Diameter at end-points Pj [mm] | 1.5 |
| | |
| **Properties of oil** | |
| T: Temperature [°C] | 40 |
| ρ: Density [kg/m$^3$] | 828 |
| μ: Dynamic viscosity [Pa s] | 0.172 |
| $V_S$: Volume flow rate at source [l/min] | 2 |
| $\dot{m}_S$: Mass flow rate at source [kg/s] | 0.028 |
| | |
| **Selective Laser Melting** | |
| $R_a$: Surface roughness of pipes [um] | 15 |

Figure 5: Description of test setup and data on boundary conditions

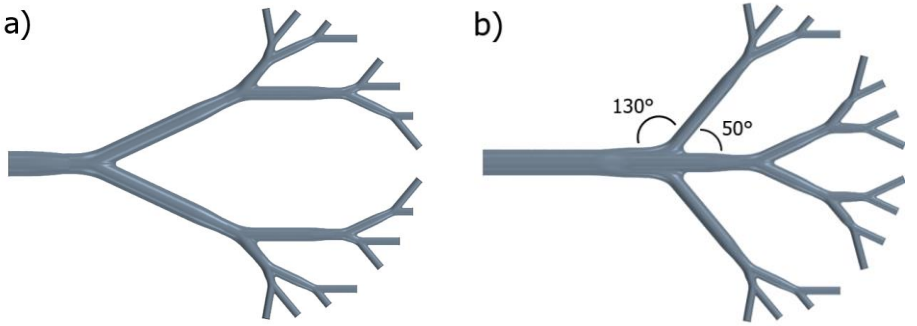



Figure 6: Two examined fluid distribution networks; a) layout 1 generated using presented method with Y-branches; b) layout 2 created with method and manually defined ψ-branch (representing two merged Y-branches)

Table 1: CFD data of pressure drop and normalized mass flow rates at outlets

| Layout | Volume [mm$^3$] | Pressure drop [bar] | Normalized mass flow rate [-]: $\dot{m}_j/(\dot{m}_S * N)$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ | $P_7$ | $P_8$ |
| Layout 1 | 1500 | 0.98 | 1.33 | 1.14 | 1.31 | 0.64 | 1.11 | 0.92 | 1.07 | 0.48 |
| Layout 2 | 1500 | 0.92 | 1.28 | 1.10 | 1.25 | 0.61 | 0.85 | 1.07 | 1.01 | 0.83 |

Using the method from section 4 leads to the branched network in Fig. 6 a). To study the distribution within the network, a computational fluid dynamics (CFD) analysis is performed with STAR-CCM+. Oil is modeled as a steady flow with constant density and the k-omega turbulence model. Table 1 lists the total volume of the network, the measured pressure drop, and the normalized mass flow rates at the outlet of the upper eight end-points ($P_j$ with j = 1 - 8) of the one-sided symmetric structure. The normalized mass flow rate at each outlet indicates the difference to a mass flow rate of $\dot{m}_S/N$, which would represent a uniform distribution of the fluid across the end-points. As listed in table 1, for layout 1 certain end-points such as $P_1$ and $P_3$ are oversupplied, whereas $P_4$ and $P_8$ are undersupplied with oil.

To further examine the uniformity of the fluid distribution, a second layout is created and shown in Fig. 6 b). In comparison to layout 1, layout 2 includes a manually set ψ-branch. The angles of the ψ-branch are defined according to Fig. 6 b). The shape of the remaining network is derived through the method from section 4. Compared to layout 1, layout 2 leads to a similar pressure drop. Regarding the normalized mass flow rates in table 1, layout 2 improves the supply to certain end-points such as $P_8$. However, the uniformity of the mass flow rates at the end-points can be further improved similar to layout 1.

## 6 Discussion and outlook

As outlined in section 3 branched flow structures have the advantage that they allow distributing a fluid from a source to multiple end-points. As shown in Fig. 2 the reduction in pump power or pressure drop may be significant compared to a fluid distribution network with radial pipes. Analytical derived optimality criteria on pipe diameters and branching angles can be used as design principles to construct branched fluid networks.

The proposed method implements such design rules to generate complex, branched fluid structures in an automated manner. The iterative procedure is not limited to a plane layout of source end-points and can also be applied to three-dimensional configurations. Starting from an initial layout, the method has the advantage that prior knowledge regarding the design solution is used and an optimized shape can be identified through a fast and efficient scheme.

However, the resulting layout may only represent a local optimum and depend strongly on the initial topology as well as the utilized heuristic rule. The application of an evolutionary optimization offers the possibility to examine and compare different topologies (local optima). However, such an optimization may lead to an increased computational effort, especially for a larger number of end-points. Furthermore, the results of the simplified example from section 5 indicate that although the utilized optimality criteria reduce the required pressure drop or pump power compared to a radial configuration (see Fig. 2), a branched network may not lead to a perfectly uniform distribution of the fluid to all end-points. Furthermore, the direction of the flow at the outlet may be important in certain applications. As such the utilized optimality criteria may be adapted for different objectives besides reduced pump power or pressure drop. In addition, the use of ψ-branches needs to be considered.

AM processes such as selective laser sintering allow fabricating complex, branched flow structures without the need for support structures. For processes such as selective laser melting of metals the shape of the pipes may be adjusted to elliptical or droplet-shaped cross sections to avoid support structures inside the pipes. These considerations depend on the occurring pipe diameters and the chosen build direction. Specific AM manufacturability constraints are yet to be incorporated into the method. Therefore, the current procedure approaches AM only in an opportunistic manner and should be extended to take into account also various design restrictions depending on the chosen AM process. Furthermore, the method needs to be validated with more complex applications to study the discussed considerations and improve the method accordingly.

## References


[1] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: "Additive manufacturing technologies", Springer US, Boston, 2010.

[2] Rosen, D. W.: "Research supporting principles for design for additive manufacturing", Virtual and Physical Prototyping, 9, 2014, p. 225-232.

[3] Klahn, C. et. al: "Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung", Vogel Business Media, Würzburg, 2018.

[4] Tang, Y.; Zhao, Y. F.: "A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance", Rapid Prototyping Journal, 22, 2016, p. 569-590.

[5] Rosen, D. W.: "A review of synthesis methods for additive manufacturing", Virtual and Physical Prototyping, 2016, p. 1-13.

[6] Gaynor, A.; Guest, J.: "Topology optimization for additive manufacturing: Considering maximum overhang constraint", AIAA AVIATION 2014 - 15th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2014, p. 1-9.

[7] Kamps, T. et al.: "Design approach for additive manufacturing employing Constructal Theory for point-to-circle flows", Additive Manufacturing, 20, 2018, p. 111-118.

[8] Wang, G. et al.: "Experimental and numerical investigation of fractal-tree-like heat exchanger manufactured by 3D printing", Chemical Engineering Science, 2018.

[9] Femmer, T.; Flack, I.; Wessling, M.: "Additive manufacturing in fluid process engineering", Chemie Ingenieur Technik, 88, 2016, p. 535-552.

[10] Biedermann, M.; Kamps, T.; Kiener, C.: "Redesign of a burner tip with multiple integrated flow distributors", Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC), 2018, p. 1-7.

[11] Fleury, V.; Gouyet, J.-F.; Léonetti, M.: "Branching in nature", Springer-Verlag, Berlin, 2001.

[12] Xu, P. et al.: "Transport phenomena and properties in tree-like networks", Applied Mechanics Reviews, 68 (4), 2016. p. 1-17.

[13] Bejan, A.: "Constructal theory of generation of configuration in nature and engineering", J. Appl. Phys., 100 (041301), 2006, p. 1-27.

[14] Gosselin, L.; Bejan, A.: "Tree networks for minimal pumping power", International Journal of Thermal Sciences, 44, 2005, p. 53-63.

[15] Gosselin, L.; Bejan, A.: "Emergence of asymmetry in constructal tree flow networks", J. Appl. Phys., 98, 2005, p. 9-16.

[16] Strano, G.: "Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting", Journal of Materials Processing Technology, 4, 2013, p. 589-597.

# Bewertungsmethodik zur Verbesserung der Testfallerstellung auf Basis von SysML

Mohamad Chamas[1], Matthias Markthaler[1,2], Bernhard Rumpe[2], Kristin Paetzold[3]

[1] *Antriebsentwicklung/ BMW Group*

[2] *Software Engineering/ RWTH Aachen*

[3] *Technische Produktentwicklung/ Universität der Bundeswehr München*

## Abstract

Methodolgies from model-based systems engineering (MBSE) are used to control the complexity of systems along the life cycle. One graphical modeling language of MBSE is the widely used Systems Modeling Language (SysML). As a result of the increasing complexity of the system, it has an influence on modeling behavior. SysML does not provide any evaluation methods that enable measurability of model complexity. Despite the increasing complexity of system behavior, we found an absence of methods and modeling guidelines to tackle this complexity. This paper presents an evaluation method that identifies model complexity by means of key figures. The key figures support the user analyzing complexity drivers and searching for concept alternatives. The implementation of the evaluation method is presented with a focus on test case derivation from a SysML diagram.

*Keywords: evaluation methodology, key figure, SysML, test case*

## 1 Einleitung

Die stark zunehmende Anzahl an Kundenfunktionen und deren hoher Vernetzungsgrad in Automobilen erfordern neue Spezifikationsmethoden in der Entwicklung. Um komplexe und funktionale Zusammenhänge abzubilden, werden vermehrt Modelle angewendet. In der Literatur wird primär über die Vorteile der modellbasierten Systementwicklung [1, 2, 3] und der modellbasierten Testfallentwicklung [4] diskutiert. Eine Möglichkeit für die Modellierung der Funktionen ist die Verwendung der *Systems Modeling Language* (SysML) [5]. Die Spezifikation der SysML gibt keine konkreten Vorgaben für eine Modellierung bestimmter Sachverhalte wie zum Beispiel synchrone und asynchrone Prozesse vor. Diese Freiheit ermöglicht den Domänenexperten die jeweiligen Sachverhalte trotz Modellierungsrichtlinien auf unterschiedliche und geeignete Weise zu beschreiben. Häufig sind jedoch die Anwender stark von ihrem Domänenwissen geprägt. Die Folge ist ein divergierender Modellierungsstil und Interpretationen von Modellkonzepten. Insbesondere bei Funktionen mit hohen Vernetzungsgraden erhöht dies die Modellkomplexität [6]. Die Modellkomplexität resultiert aus der Anzahl und Vielfalt der Elemente einschließlich ihrer statischen Verbindungen [7]. Die Modellierungsfreiheit für Anwender führt unter anderem zu mehrdeutigen Spezifikationen. Da die Spezifikationsmodelle mit ihren Anforderungen als Grundlage zur Ausleitung von funktionalen Testfällen dienen, kann diese Mehrdeutigkeit zu einem erheblichen Mehraufwand für Testingenieure führen. Bei automatisierten Verfahren der Testfallerstellung können dadurch Testfälle ohne funktionale Relevanz für die Absicherung generiert werden. Diese Testfälle müssen durch den Testingenieur wiederum konsolidiert werden.

Es braucht eine Bewertungsmethodik zur Vermeidung einer komplizierten Modellierung in Bezug auf die Testfallgenerierung, die schon während des Modellierungsprozesses eingreift. Das vorgestellte Forschungsvorhaben implementiert ein Instrument zur Messbarkeit und Identifikation von komplexitätsverursachenden Entwicklungsartefakten in den Funktionskonzepten (Modelle), um eine adäquate Testfallquote (gültige Testfälle zu theoretisch möglichen Testfällen) zu erreichen und somit den Konsolidierungsprozess eines Testingenieurs effizienter zu gestalten.

## 2 Modellierung komplexer Funktionen

Die Modellierung mit SysML ist schnell anwendbar, erfordert jedoch Grundkenntnisse aus der graphischen Modellierung. Angesichts der großen Vielfalt an Diagrammen und Modellelementen ist es schwierig eine konsistente Modellgrundlage zu schaffen. Eine Bewertungsmethodik kann hierfür Abhilfe leisten

und die zu verwendenden Entwicklungsartefakte definieren. Auf Basis der Methode kann eine Testfallausleitung erfolgreich umgesetzt werden.

## 2.1 Modellierung mit SysML

Die Luft- und Raumfahrtindustrie gilt als Vorbild für die praktische Anwendung modellbasierter Systementwicklungsansätze [8]. Aufgrund der vielen Chancen schließt sich die Automobilindustrie diesem Wandlungsprozess an. Um disziplinübergreifende Wirkzusammenhänge beschreiben zu können, wurde eine von der *Unified Modeling Language* abgewandelte Sprache, die SysML eingeführt [5]. In [9] wird eine Methode beschrieben, mit der Funktionskonzepte in der frühen Phase der Antriebsentwicklung mithilfe der SysML modelliert werden können. Dabei wird zur Beschreibung von logischen Wirkzusammenhängen und dem daraus resultierenden Systemverhalten das Aktivitätsdiagramm (AD) verwendet. Die wesentlichen Entwicklungsartefakte dieses Diagrammtyps sind Aktionen, die einzelne Schritte der Funktion darstellen. Die Verbindungen können in Kontroll- und Objektflüsse unterschieden werden. Kontrollflüsse sind kausale logische Relationen, während Objektflüsse Daten- oder Objekthaltige Verbindungen darstellen können. Außerdem ermöglichen Aktivitätsdiagramme den Einsatz von Operatoren wie Fallunterscheidungen mittels Entscheidungsknoten oder parallele Prozesse mittels Verzweigungen.

## 2.2 Modellbasierte Testfallerstellung aus den Funktionskonzepten

Die hier vorgestellte Methodik unterstützt die manuelle und die automatisierte Testfallerstellung. Beide Verfahren analysieren das vorhandene Funktionskonzept und leiten Testfälle ab. Bei der manuellen Methode erstellt ein Testingenieur sequenzielle Testfälle, auf der Grundlage der Modelle. Die automatisierte Methode analysiert die möglichen Pfade durch das AD und erstellt auf Basis der Ein- und Ausgänge, und der durchlaufenen Aktionen sowie den Bedingungen, einen sequenziellen Testfall [10]. Die SysML ermöglicht das Modellieren von parallelen Aktionen mittels parallelen Verzweigungen [5]. Aufgrund des sequenziellen Testfallcharakters werden unabhängige parallele Aktionen bei der Testfallerstellung sequenziell angeordnet [10]. Die Unabhängigkeit der parallelen Aktionen muss im Voraus sichergestellt sein.

## 2.3 Ausgewählte Metriken aus der Graphentheorie

Trotz der großen Potentiale für die Spezifikation von Anforderungen, Design und Test mangelt es der SysML an Möglichkeiten zur Bewertung von Funktionskonzepten. Im Bereich der Softwareentwicklung werden Kennzahlen wie Kohäsion und Modularität verwendet, um die Komplexität von Modellen messen

zu können. In [11] werden Metriken aus der Graphentheorie verwendet, um die strukturelle Komplexität in Entwicklungsprozessen aufzudecken. Der vorliegende Kontext bezieht sich auf die Beschreibung technischer Systeme. Die Betrachtung der Kennzahlen aus der Graphentheorie wird in die Kategorien lokal und global unterschieden. Globale Kennzahlen sind Durchschnittswerte der lokalen Kennzahlen oder dienen zur Beschreibung eines ganzheitlichen Graphens und geben einen groben Überblick. Der *Knotengrad* (engl. *Degree*) fasst die Summe aus den Eingangs- und Ausgangskanten eines Knotens zusammen. Der *Fitness Value* ist ein Maß, wie gut ein kleinerer Graph in einen größeren Graphen integriert werden kann. Dieser Wert besteht aus den Kennzahlen *Closeness* und *Attainability*. Die Closeness beschreibt die Entfernung zwischen zwei Knoten. Ist der Wert der Closeness hoch, so hat der Knoten einen großen Einfluss auf viele weitere Knoten. Die Attainability definiert die Erreichbarkeit der Knoten, also ob der Knoten andere Knoten erreichen oder von anderen Knoten erreicht werden kann. Der *Impact Expectancy Value* eines Knotens berechnet sich aus der *Impact Probability* (wie wahrscheinlich ist der Knoten von einer Änderung betroffen) und der Anzahl der Eingänge und wird zur Berechnung der *Strukturrobustheit* verwendet. Die Strukturrobustheit gibt an, wie stark ein Element von einer Änderung betroffen ist, als auch wie hoch die resultierenden Auswirkungen ausfallen. Eine Struktur ist nach dieser Definition umso robuster, je geringer die Summe der *Impact Expectancy Values* über alle Knoten ausfällt. Der *Cluster Coefficient* (CC) misst die lokale Vernetzung, d. h. wie gut ein Knoten Nachbarknoten direkt oder indirekt erreichen kann. Die *Centrality* gibt an, wie häufig ein Knoten auf dem kürzesten Weg zwischen zwei anderen Knoten liegt. Dadurch lassen sich im Graphen zentrale Durchgangsknoten mit hoher Bedeutung identifizieren. Die globale Kennzahl *Graph Energy* misst die strukturelle Komplexität des Graphens insgesamt und hängt von der Heterogenität und der Anzahl verschiedener Elemente und deren Verbindungen ab. Bild 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Kennzahlen innerhalb der Kategorien global und lokal wieder. Die Berechnungen der einzelnen Kennzahlen kann in [11] entnommen werden.

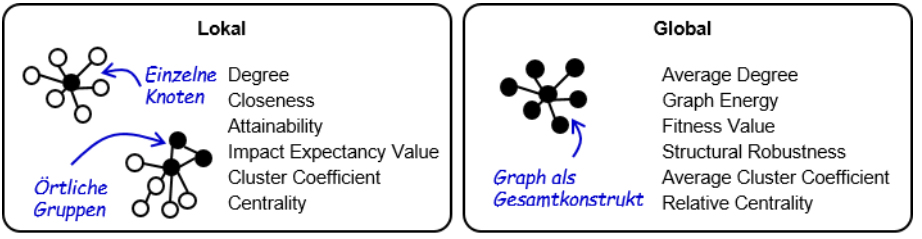



Bild 1: Zuordnung der ausgewählten Kennzahlen in die Kategorien Global und Lokal.

# 3 Methodik zur Bewertung der Funktionskonzepte

Nach dem IEEE Standard 1061 ist eine Metrik im Bereich des Software Engineerings „… eine Funktion, die eine Software-Einheit in einem Zahlenwert abbildet, welcher als Erfüllungsgrad einer Qualitätseigenschaft der Software-Einheit interpretierbar ist [12].“ Um den Herausforderungen in der Testfallgenerierung zu begegnen, müssen die Kennzahlen auf die Erwartungshaltung der Testingenieure interpretiert werden. Gemäß der Testfallausleitungskriterien spiegelt eine ideale Struktur einen sequenziellen Aufbau der Aktionen mit wenigen Verzweigungen wieder. Verzweigungen im AD haben oft das Problem, dass die Eindeutigkeit in der Spezifikation mitunter leidet. Deswegen gilt es bei der Verwendung der Entscheidungsknoten zu beachten, dass die Bedingungen (engl. Guard-Conditions) eindeutig definiert sind und keine Mehrdeutigkeiten aufzeigen. Eindeutig wäre die Bedingung `[rot==aktiv && blau==inaktiv]`, mehrdeutig dagegen wäre die Bedingung `[sonst]`. Ebenso ist bei dem Gebrauch der Verzweigungen zu berücksichtigen, dass die Reihenfolge der Aktionen klar definiert ist, sodass keine überflüssigen Permutationen in der Reihenfolge möglich sind. Umso höher die Eindeutigkeit in dem AD abgebildet ist, desto besser ist die Testfallquote. Angesichts diesen Anforderungen an ein AD lassen sich folgenden Kennzahlausprägungen festhalten:

- *Average CC:* Mit dem Ziel eines sequenziellen Ablaufs ist eine geringe lokale Vernetzung zwischen den Knoten wünschenswert.

- *Average Degree:* Die Verbindungen zwischen den Knoten erhöhen die Modellkomplexität und sollten daher reduziert werden.

- *Strukturrobustheit:* Ebenfalls eine geringe Ausprägung, da sonst eine hohe Parallelisierung der Pfade erforderlich wäre.

- *Relative Centrality:* Die Zentralität kann durch eine hohe Ausprägung einen sequenziellen Aufbau unterstützen.

- *Fitness Value:* Ähnlich zur Relative Centrality wird ein hoher Fitness Value aufgrund einer höheren Erreichbarkeit und zusammenhängenden Struktur angestrebt.

- *Graph Energy:* Als direkter Indikator für die strukturelle Komplexität ist ein geringer Wert bevorzugt.

In einem AD wird jede Aktion durchlaufen und die lokalen Kennzahlen berechnet. Dabei werden alle Aktionen und Operatoren als Knoten behandelt. Entscheidungsknoten allerdings sind für die Testfallerstellung aufgrund ihrer Verhaltensbeschreibung bei Fallunterscheidungen notwendig und erwünscht. Daher werden diese in der Berechnung nicht berücksichtigt, um die Werte der Kennzahlen nicht zu verzerren. Die Kontroll- und Objektflüsse werden als Kanten übersetzt und gleichbehandelt. Das Prinzip hinter der Berechnung der Kennzahlen liegt in der Graphtransformation und kann in [13] entnommen werden. Im Anschluss werden aus den lokalen die globalen Kennzahlen gebildet. Die globalen Kennzahlen dienen als Schnellindikator, um auf den ersten Blick die Handlungsfelder zur Verbesserung der Eindeutigkeit zu ermitteln. Die genauen Knoten lassen sich über die lokalen Kennzahlen auffinden. Dabei liegt der Fokus auf den Ausreißern, womit die kritischen Stellen im AD identifiziert werden. Über diese Identifikation lassen sich die Modelle korrigieren. Die Änderungen können durchgehend mithilfe der Kennzahlen überprüft werden.

## 4 Anwendungsbeispiel der Bewertungsmethodik

Die Validierung wird anhand realer Daten aus dem Entwicklungsprozess in der Automobilbranche aufgezeigt. Aufgrund der strengen Vertraulichkeit der Funktionskonzepte wurde die Struktur anonymisiert. Die generierten Modellvarianten wurden mit den Experten abgestimmt, sodass die Funktionalität in jeder Änderung weiterhin gegeben ist.

### 4.1 Beispiel

Als Anwendungsbeispiel wurde ein Funktionskonzept aus dem Bereich Hochvolt-Laden als Modell gewählt (siehe Bild 2). Im nächsten Schritt werden die lokalen Kennzahlen bestimmt und betroffene Elemente markiert (Notizen in Bild 2). Anhand der Kennzahlen wurde AD1 auf seine Modifizierbarkeit analysiert. Die Kennzahlen Strukturrobustheit und Fitness Value gaben keine ausschlaggebenden Werte für die Modifikation des Modells. Aktion 3 besitzt einen hohen CC und einen hohen Degree-Wert [11]. Allerdings handelt es sich bei dem Pfad von Aktion 3 um eine funktional nicht veränderbare Konstellation. Dies gilt ebenfalls für die Zusammenführung direkt vor dem finalen Knoten. Um den Kennzahlen Average Degree und Relative Centrality zu begegnen, wird für die Modifikation das Modell in zwei strukturelle Blöcke unterteilt. Block 1 beinhaltet die Verzweigung nach Aktion 2 mit erhöhtem Degree-Wert und Aktion 7 mit erhöhtem Centrality-Wert. Block 2 umfasst die Vereinigung nach Aktion 10 und Aktion 12 mit jeweils erhöhtem Degree Wert. Bild 3 stellt das mittels Kennzahlen korrigierte AD (AD2) von Block 1 und Block 2 dar. Für Block 1 ist die Verzweigung nach Aktion 2 gelöscht. Dies ist möglich, da die Aktionen

4, 5 und folgende nur relevant sind, falls Bedingung 3 erfüllt ist. Aufgrund der Modifikationen sind die Verzweigungen nach Aktion 4 und Aktion 6, wie auch der Vereinigung nach Aktion 7 überflüssig und deshalb gelöscht. Im Zuge der Modifikation von Block 2 fließt Aktion 12 in Reihe mit Aktion 13 und nachfolgenden Aktionen. Die Verzweigung vor Aktion 12 und die Zusammenführung nach Aktion 12 sind deshalb überflüssig und gelöscht.

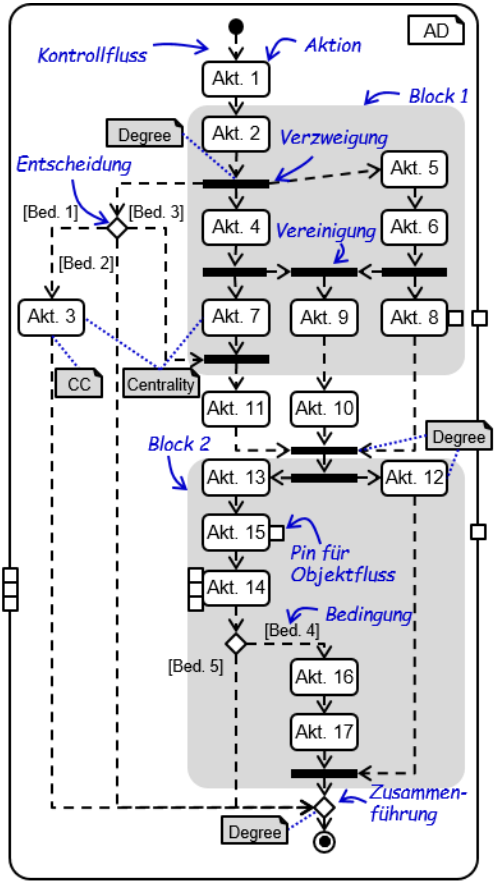



Bild 2: Aktivitätsdiagramm im Ausgangszustand (AD1). Die Nummerierung ist nicht relevant für die Reihenfolge der Aktionen. Objektflüsse sind aus Darstellungsgründen nur mittels Pins angedeutet.

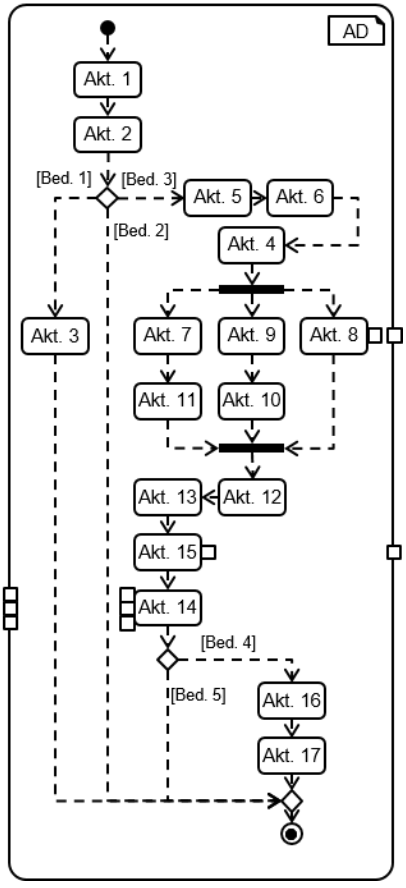



Bild 3: Mittels Kennzahlen korrigiertes Aktivitätsdiagramm (AD2). Nummerierung und Objektflüsse wie in Bild 2 behandelt.

Für die Gewährleistung der Funktionalität sind alle vorgenommen Modifikationen von einem Testexperten validiert. Für die Auswirkung auf die Testfallausleitung werden aus den Diagrammen die Anzahl der Testfälle kalkuliert. In Tabelle 1 sind die möglichen Kombinationen für die jeweiligen gruppierten Aktionen (Permutationsgruppen) abgebildet. Bei der Berechnung der Kombinationsmöglichkeiten wird davon ausgegangen, dass parallel verlaufenden Aktionen unabhängig sind (z.B. Aktion 4 und 5). Bei in Folge verlaufende Aktionen wie zum Beispiel Aktion 5 und 6 muss die Reihenfolge berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten für Testfälle in Bezug zu den Permutationsgruppen aus den Aktionen

| ID | Permutationsgruppen aus Aktionen | Kombinationsmöglichkeiten AD1 | Kombinationsmöglichkeiten AD2 |
|---|---|---|---|
| a | 4, 5, 6 | 3 | 1 |
| b | 7, 8, 9, 10, 11 | 30 | 30 |
| c | 12, 13, 14, 15 | 4 | 1 |
| d | ($12_{\text{Nur für AD1}}$), 16, 17 | 3 | 1 |

Alle möglichen Kombinationen ergeben sich aus den Kombinationsmöglichkeiten der Permutationsgruppen und den Zweigen der Entscheidungen. Die Berechnung der resultierenden Testfälle wird in Formel 1 umgesetzt:

$$f_{AD1} = \underbrace{1}_{\substack{Akt.\\1,2}} * a * b * c * \underbrace{2}_{\substack{Bed.4\\Bed.5}} * \underbrace{(d-1)}_{\substack{1\times in\ c\\enthalten}} + \underbrace{2}_{\substack{Bed.1\\Bed.2}} = 1 * 3 * 30 * 4 * 2 * (3-1) + 2 = \mathbf{1.442}$$

$$f_{AD2} = 1 * a * b * c * 2 * d + 2 = 1 * 1 * 30 * 1 * 2 * 1 + 2 = \mathbf{62}$$

Formel 1: Gesamte Anzahl an möglichen Testfällen für AD1 und AD2 mit den Werten der Permutationsgruppen a, b, c, d aus Tabelle 1 und Berücksichtigung der Entscheidungen (Bed. 1 bis Bed. 5).

Insgesamt gibt es 5 relevante Testfälle. Aus AD2 ist abzuleiten, dass jede Entscheidung mit einer Bedingung ein relevanter Testfall ist. Die Kombinationsmöglichkeiten der Permutationsgruppe b aus Tabelle 1 führt nur zu unterschiedlichen Ausprägungen relevanter Testfälle.

## 4.2 Ergebnisse

Die Methodik wurde erfolgreich an dem AD1 angewendet. Aus dem Ausgangsmodell (AD1) wurden insgesamt drei Varianten erzeugt. Die Variante 3 inkludiert die Änderungen von Variante 1 und 2 zusammen und weist die beste Kennzahlenentwicklung auf. Das AD von Variante 3 ist in Bild 3 veranschaulicht dargestellt (AD2). In Bild 4 werden die Ergebnisse der Kennzahlenentwicklung über den Verlauf der Variantenerzeugung gezeigt. Die Änderungen in der Variante 1 weisen in den Kennzahlen Average Degree, Centrality und Graph Energy die größten Hübe auf. Die Variante 2 dagegen verbessert den Fitness Value. In der Variante 3 werden beide Korrekturen gleichzeitig umgesetzt. Hier verstärken sich die einzelnen Änderungen nochmal beträchtlich. So ist die Centrality um $51{,}1\%$ verbessert, die Average Degree um $10\%$ reduziert und der Fitness Value um $2{,}1\%$ erhöht. Auch die Strukturrobustheit konnte minimal verbessert werden. Damit deuten die Ausprägungen auf eine stark verbesserte sequenzielle Struktur hin. Außerdem hat sich die strukturelle Komplexität um knapp $4\%$ reduziert. Im Gegensatz zu den aufgezeigten Kennzahlen hat sich der Average CC gegen den Trend der Verbesserung entwickelt und ist um $19{,}4\%$ zum Ausgangsmodell gestiegen. Zusätzlich zu einer Verbesserung der Eindeutigkeit und Verständlichkeit des Modells ist die Testfallquote von $5/1442 = 0{,}35\%$ auf $5/61 = 8{,}06\%$ verbessert worden.

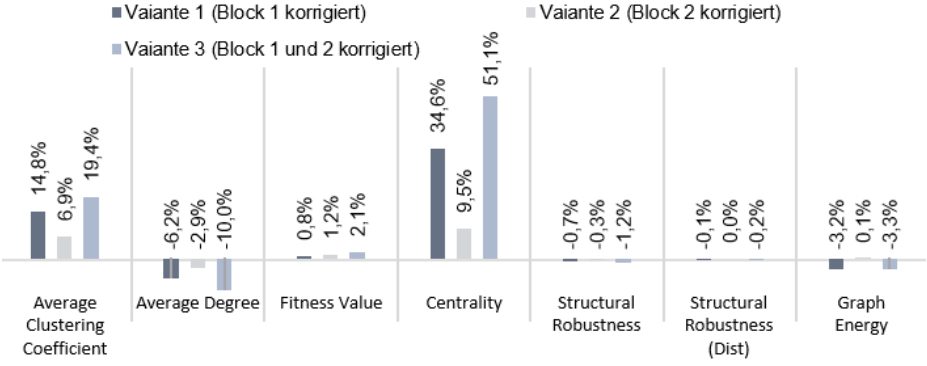



Bild 4: Relativer Vergleich der erzeugten Modellvarianten und ihren Kennzahlen zu dem Ausgangsmodell.

# 5 Diskussion

Die Einführung einer Bewertungsmethodik bietet den Anwendern eine Hilfe bei der Lösungsfindung. Angesichts der großen Modellierungsfreiheit wird der Anwender durch Metriken aufgefordert, alternative Konzepte zu erarbeiten.

Zudem lassen sich über diesen Ansatz SysML-Modelle quantitativ bewerten. Der Vorteil dabei ist die Bewertung eines Funktionskonzeptes hinsichtlich einer Objektivität und Zuverlässigkeit durch reproduzierbare Ergebnisse. Außerdem lassen sich durch die Metriken Konzepte und deren Varianten untereinander vergleichen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Ableitung neuer Kennzahlen aus den bisher verwendeten. So können beispielsweise aufgrund der Komplexitätsreduktion Rückschlüsse auf *Number of possible Test Cases* für den Integrations- und Absicherungszweig geschlossen werden.

Die Kennzahlen Fitness Value und Strukturrobustheit wurden im AD nicht angegangen, haben sich jedoch aufgrund der aktiven Anpassung anderer Kennzahlen ebenso verbessert. Das deutet auf eine direkte Abhängigkeit zwischen den Kennzahlen hin. Der Average CC hat sich im neuen Modell allerdings stark verschlechtert. Der Wert wurde im Rahmen der Modelloptimierung nicht korrigiert, da die Aktion 3 mit der höchsten Ausprägung zwar ein potentieller Kandidat wäre, aber einen bedeutenden funktionalen Beitrag leistet. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Durchschnittswerte als Schnellindikator zwar hilfreich, allerdings nicht als holistische Aussage interpretiert werden können, denn das Konzept hat sich trotz der CC-Verschlechterung verbessert. Die Verbesserung der Graph Energy ist auf die deutliche verringerte Anzahl an Elementen zurückzuführen. Diese Erkenntnis wird auf den ersten Blick in Bild 3 deutlich, dass sichtlich weniger kompliziert und verständlicher modelliert ist. Aufgrund der Ergebnisse beim Hochvolt-Laden wird angenommen, dass sich die Kennzahlen ebenfalls für andere Funktionen eignen. Dies wurde allerdings nicht validiert. Weiter ist zu erwähnen, dass das verwendete Funktionskonzept keine Fehlerbehandlungsroutinen (Reaktion der Funktion im Fehlerfall) beinhaltet. Sind diese Fehlerbehandlungsroutinen in einem AD integriert, muss die Erwartungshaltung der Experten hinsichtlich der Kennzahlen erneut ausgelegt werden.

Im Zusammenhang mit der Testfallquote sind nur AD-Pfade von Startknoten bis Endknoten betrachtet. Mögliche sequenzielle Testfälle aus AD1, wie zum Beispiel die Aktions-Sequenz „Start-1-2-5-4-6-9-7-3-Ende", die aufgrund eines nicht eindeutigen Funktionskonzeptes ableitbar wäre, würde die Testfallquote von AD1 um ein vielfaches verringern. Ungeachtet dessen steigert die Verbesserung der Testfallquote von $0{,}35\%$ auf $8{,}06\%$ die effiziente Ableitung der Testfälle. Algorithmen zur Testfallgenerierung können einfacher gehalten werden und Testexperten können neue Funktionskonzepte besser absichern. Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der prozentualen Verbesserung um $800\%$ der Testfallquote deuten auf weitere Potenziale hin.

## 6 Zusammenfassung

Die industrielle Notwendigkeit nach Bewertungskriterien für den Einsatz von MBSE und ihrer Werkzeuge wird hier im Bereich der Testfallerstellung aufgezeigt. Das Ziel des vorgestellten Ansatzes ist es, anhand der berechneten Kennzahlen die Eindeutigkeit von Modellen zu stabilisieren, sodass die Verständlichkeit und die Testfallquote verbessert werden. Des Weiteren sollen vor den weiteren Testauswahlverfahren die Modellanpassungen zu einer verbesserten Testfallquote führen. Die Einsparpotentiale bei der Konsolidierung der Testfälle durch den Testingenieur fallen dabei erheblich aus. Allerdings darf von diesen Einsparpotentialen nicht auf die jeweilige Testfallqualität geschlossen, da diese auch von dem Modellinhalt und nicht ausschließlich von der Modellkomplexität und Struktur abhängt. In weiteren Betrachtungen kann die Bewertungsmethodik auf weitere Anwendungsfälle wie die Erhöhung der Zuverlässigkeit als Zielgröße oder die Erweiterung auf andere Diagrammtypen der SysML übertragen werden.

## Literatur


[1] Weilkiens, T.: „Systems Engineering mit SysML/UML – Anforderungen, Analyse, Architektur", dpunkt.verlag, 2014.

[2] INCOSE: Systems Engineering Vision 2025; Specification: Available online: http://www.incose.org/docs/default-source/aboutse/se-vision-2025.pdf, (accessed on 04.07.2018).

[3] Alt, O.: „Modellbasierte System-Entwicklung mit SysML", Carl Hanser Verlag, München, 2012.

[4] Arilo, C. et al.: A survey on model-based testing approaches, In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Empirical assessment of software engineering languages and technologies held in conjunction with the 22nd IEEEACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE) 2007, Eileen Kraemer and Jonathan I. Maletic, ACM, New York, USA, 2007, 31–36.

[5] Object Management Group: OMG Systems Modeling Language (OMG SysML); Version 1.5; Specification: Available online: http://www.omg.org/spec/SysML/1.5/ (accessed on 14.04.2018).

[6] Linhares, M.; Silva, A.; Oliveira, R.: "Empirical Evaluation of SysML through the Modeling of an Industrial Automation Unit" In: 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Prague, 2006, pp 145-152.

[7] Haberfellner, R. et al.: „Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung", Orell Füssli, Zürich, 2012.

[8] Eine Studie zum Branchenvergleich vom Heinz-Nixdorf Institut, Fraunhofer IPT und Unity AG: "Systems Engineering in der industriellen Praxis", Paderborn, 2013.

[9] Chamas, M.; Paetzold, K.: "Modeling of Requirement-Based Effect Chains of Mechatronic Systems in Conceptual Stage" In: International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, Vol. 7, No.3, ISSN: 2319-2518, July, 2018, pp 127-134.

[10] Kriebel, S. et al.: "Improving Model-Based Testing in Automotive Software Engineering", Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice, ACM Gothenburg, Sweden, 2018, pp 172-180.

[11] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: „Structural Complexity Management – An Approach for the Field of Product Design", Springer-Verlag, Berlin, 2009.

[12] Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Standard 1061-1998. IEEE Standard for a Software Quality Metrics Methodology. IEEE, New York, 1998.

[13] Ehrig, H. et al.: "Graph and Model Transformation – General Framework and Application", Springer-Verlag, Berlin, 2015.

# Entwicklung und Validierung von Gestaltungsvarianten geschlossener Pumpenlaufräder für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren

Dirk Hofmann[1], Michael Süß[1], Christine Schöne[1], Ralph Stelzer[1], Andrea Kühl[2]

[1] *Professur Konstruktionstechnik/CAD*
*Technische Universität Dresden*

[2] *KSB SE & Co. KGaA*

## Abstract

The content of this article consists of developing a design for the production by means of powder bed-based additive manufacturing processes. This takes place by using the example of a pump impeller produced by casting to date. Taking into account, a simulation-assisted design modification will carried out by using the known design guidelines. The aim is to avoid support structures on internal geometries. This should make it possible to increase application performance. The guidelines have been validated and evaluated in the form of application-specific test samples. Finally, two orientation-dependent design variants were developed.

*Keywords: design for additive manufacturing, powder bed fusion, laser beam melting, electron beam melting*

## 1 Motivation

Die additiven Fertigungsverfahren (AM) erlauben durch die hohe Gestaltungsfreiheit völlig neue Wege in der Konstruktion mit Leichtbaustrukturen oder integrierten Funktionalitäten im Gegensatz zu den konventionellen Verfahren zu beschreiten. Die industrielle Praxis zeigt jedoch, dass bestehende Konstruktionen nicht einfach übertragen werden können. Neben unterschiedlichen Fertigungsprinzipien, deren Einflussgrößen teilweise maschinenabhängig sind, bestimmt das Zusammenwirken zahlreicher material- und prozessseitiger Parameter die Funktionsfähigkeit und die finale Qualität der Bauteile. Dabei muss sich der Produktentwickler neuen Herausforderungen stellen. Es gilt alle Einflussgrößen des gesamten Herstellungsprozesses (Pre-, In-, Postprozess) zu betrachten und in die zu entwickelnden Gestaltungsentwürfen zweckdienlich einfließen zu lassen.

Am Beispiel eines bisher im Gießverfahren hergestellten Laufrades einer Normpumpe aus dem Industriebereich soll diese Weiterentwicklung für die Additive Fertigung verdeutlicht werden. Dabei besteht eine Herausforderung darin, bestehende Konstruktionsrichtlinien auf ihre Anwendung bei dieser Art Bauteil und damit allgemein bei rotationssymmetrischen Geometrien zu prüfen. Vielmehr soll die Anwendung der entstehenden Konstruktionen bei unterschiedlichen pulverbettbasierten Verfahren, genauer dem Laserstrahlschmelzen (LBM) und dem Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und somit deren verfahrensübergreifende Anwendung überprüft werden. Basierend auf den dabei erzielten Kenntnissen sollen weitere notwendige bzw. resultierende Empfehlungen abgeleitet werden.

## 2 Ausgangsituation

Geschlossene Pumpenlaufräder sind in ihrer Form für den Gussprozess gestaltet und über viele Jahre soweit angepasst und überarbeitet worden, um das Zusammenspiel aus Funktionsfähigkeit, Herstellbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren (Bild 1). Dabei sind die Empfehlungen für gegossene Bauteile wie u.a. eine Vermeidung von möglichen Materialanhäufungen, keine scharfen Wandstärkenübergänge oder kontrollierte Querschnittsabstufungen Begrenzungen, welche weitere Verbesserungen limitieren. Im Vergleich dazu hat die additive Fertigung andere Restriktionen, wie z.B. die Anwendung von Stützstrukturen, welche bei bestimmten Geometrien wie Überhängen oder zum Zwecke der besseren Wärmeableitung aus dem Bauteil notwendig sind.

Aufgrund von Hinterschneidungen innerhalb des Laufrades werden Stützstrukturen verwendet, um die Deckscheibe ohne Baufehler zu fertigen. Da sich

diese nachträglich nicht oder nur mit Rückständen entfernen lassen, ist eines der Primärziele der Neukonstruktion Stützstrukturen innerhalb des Laufrades gänzlich zu vermeiden. An den von außen erreichbaren Oberflächen und dem Teil der inneren Geometrien, welche bis zu einer bestimmten Tiefe erreichbar sind, können Stützstrukturen genutzt werden, da deren Entfernung rückstandslos möglich ist. Für die Änderungskonstruktion sollen grundlegend die Vorteile, welche mit der generativen Fertigung im Vergleich zur gussgerechten möglich sind, ausgenutzt und möglichst funktionsorientiert umgesetzt werden. Im Vergleich zum Gussdesign dazu können das u.a. folgende Punkte sein:

- geringere Wandstärken bzw. auch geometrisch variierende zu erstellen
- Reduzieren von bestimmten Durchmessern, die für eine Entformbarkeit von Modell und Gussform notwendig sind
- höhere Gestaltungsfreiheit bei den Schaufeln

Hinzu kommt bei der Anwendung von additiven Verfahren, dass unterschiedliche Prozesseinflüsse, wie z.B. die Bauteilausrichtung im Bauraum oder die auftretenden thermischen Spannungen während des Fertigungsprozesses, gestaltbeeinflussende Effekte mit sich führen. Diese können letztlich zu einem Ausschuss der Bauteile führen [1]. Im Zuge des Konstruktionsprozesses müssen diese Effekte ebenso mit betrachtet und bestenfalls in Form von Gestaltungsregeln verarbeitet werden.

Um die Herausforderungen, welche zwischen einer gussgerechten und einer additiven Fertigung bestehen, aufzuzeigen, wurde die bisherige Konstruktion verwendet um ein Laufrad additiv mittels LBM zu fertigen. Bild 1 zeigt die Ergebnisse beider Fertigungsprozesse.

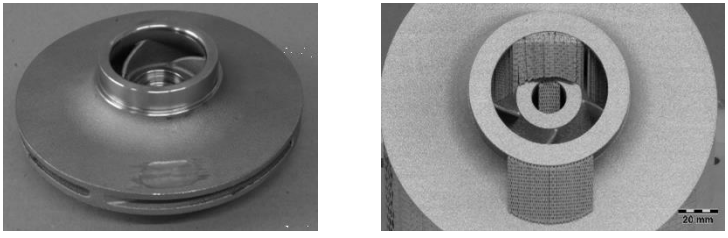



Bild 1: gleiche Konstruktionsbasis: aus Guss hergestelltes (links) und mittels LBM gefertigtes Laufrad (rechts)

Grundsätzlich konnte ein erstes unverändertes Laufrad gefertigt werden, jedoch zeigten sich bei genauer Betrachtung einige Defizite die einen potenziellen Einsatz beschränken:

- schwierige bis keine Möglichkeit bei der Entfernung von Stützstrukturen, vor allem je weiter innen diese sind
- aufwendige Pulverentfernung aufgrund der Stützstrukturen im Inneren
- Schlechte innere Oberflächengüte an unzureichend gestützten sowie mit Support verbundenen Oberflächen

Das Ziel sollte es deshalb sein ein Laufrad-Design zu entwickeln, welches die geometrisch funktionellen Anforderungen in Bezug auf das bisher gefertigte erfüllt, jedoch mit einem additiven Fertigungsverfahren herstellbar ist.

## 3 Forschungsproblem und Forschungsziel

Um dieser Zielstellung vollständig zu begegnen, müssen konkrete Problemstellungen systematisch untersucht werden. Dabei gilt es verschiedene Schwerpunkte zu betrachten, die innerhalb dieses Beitrages in u.a. folgenden Forschungsfragen geklärt werden sollen:

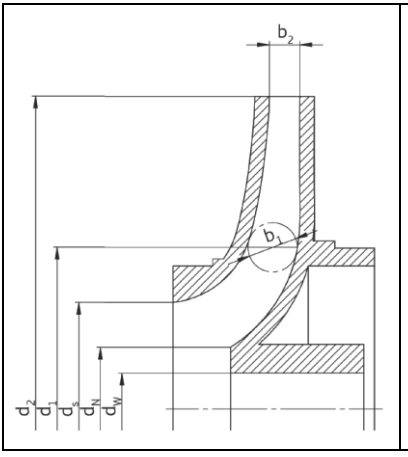
1. Inwieweit können bestehende Konstruktionsrichtlinien für additive Fertigungsverfahren auf die vorliegende Problemstellung angewendet werden?
2. Welche Potenziale ergeben sich im Zuge der Gestaltungsfreiheit für die Auslegung und Gestaltung von Laufrädern bzw. generell bei rotationssymmetrischen Bauteilen?

## 4 Konstruktive Grenzen

Im wissenschaftlichen Umfeld gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Konstruktions- und Gestaltungsempfehlungen für additive Fertigungsverfahren. Jedoch sind diese in der Regel an ein bestimmtes additives Fertigungsverfahren gebunden. Zudem decken diese auch nicht alle geometrischen Freiheiten ab [2, 3]. Grundsätzlich können die Möglichkeiten in funktionsbedingt und fertigungsbedingt unterschieden werden [4].

## 4.1 funktionsbedingte Grenzen

Die Radform von Kreiselpumpen ist im Wesentlichen von der spezifischen Drehzahl abhängig. Diese stellt den Zusammenhang zwischen Realdrehzahl, Volumenstrom und Förderhöhe dar und bestimmt die Bauform der Pumpe und des Laufrades. Aufbauend darauf wird der Meridianschnitt festgelegt, welcher den Längsschnitt durch die Pumpendrehachse beschreibt und in Bild 2 dargestellt ist [5]. Das additiv herzustellende Laufrad soll in der gegebenen Pumpenbaugruppe eingesetzt werden, wodurch die Grundform und der Meridianschnitt identisch zur Gussvariante festgelegt sind. Zusätzlich dazu sind äußere Maße und Positionen von Flächen beizubehalten, um Einbaubedingungen und Spaltmaße zum Gehäuse abzubilden.




$b_1$...Saugkantenbreite

$b_2$...Druckkantenbreite

$d_1$...Saugkantendurchmesser

$d_2$...Druckkantendurchmesser

$d_N$...Nabendurchmesser

$d_S$...Saugmunddurchmesser

$d_W$...Wellendurchmesser

Bild 2: Meridianschnitt eines Radialrades mit dessen Merkmalen [5]

Neben der Grundform des Rades sind der Verlauf, die Anzahl und die Form der Schaufeln abhängig von der Anwendung. Die Anzahl an Schaufeln pro Rad erfolgt anhand des Einsatzgebietes und der dabei vorliegenden Bedingungen. Generell führen weniger Schaufeln zu weniger Reibflächen und geringer Querschnittsverengung, bilden allerdings ein ungünstigeres Strömungsprofil aus. Mehr Schaufeln hingegen führen zu mehr Reibung und Kavitationsneigung, wohingegen die Strömung verbessert wird [6]. Zudem kann eine große Schaufelanzahl bei entsprechender Schaufeldicke zu Strömungsabrissen und damit zu Verlusten führen. Diese Dicke ist somit möglichst gering auszuführen. Verjüngungen an den Eintrittskanten der Schaufeln können die Kavitätsneigung verringern.

Funktionsflächen für Spalt-, Lager- und Dichtflächen sind in Bezug auf die Montagefähigkeit der Baugruppe beizubehalten. Diese werden wie bisher bei der Gussvariante für das AM Laufrad nachträglich mechanisch bearbeitet, wofür ein Aufmaß vorzusehen ist. Bezüglich der Rauheit sind bei der Herstellung mittels LBM ca. $R_z$ = 100 – 140 µm erreichbar [7]. Abtragende Schleifverfahren wie Gleitschleifen, Schleppschleifen oder Schleppfinishing sind für die nachträgliche Verringerung der Rauheit bei Laufrädern denkbar.

## 4.2 Fertigungsbedingte Grenzen

Bei gießgerechten Laufrädern sind bereits fertigungsbedingte Grenzen einzuhalten wie z.B. eine minimale Wandstärke der Schaufeln. Diese ändern sich hinsichtlich der Fertigung mit additiven Verfahren. Zudem kann durch Änderung der Wandstärken das Gewicht bei z.B. Änderung der Schaufelanzahl an die Gussvariante angeglichen werden. Für die Laufradgeometrie sind vorrangig die innenliegenden Konturen relevant, da von deren Verlauf die Notwendigkeit von Stützstrukturen bestimmt wird.

Grundsätzlich ergeben sich Unterschiede zwischen LBM und EBM. Tabelle 1 stellt die jeweiligen konstruktiven Grenzen beider Verfahren gegenüber. Diese sind als Richtwerte zu interpretieren, da die Werte vom jeweils zugrundeliegenden Werkstoff-Anlagen-Prozessparameter-System abhängen. Da die resultierenden Räder untereinander vergleichbar sein sollen, ist ein einheitliches Design für beide Verfahren zu erarbeiten.

Tabelle 1: Relevante konstruktive Grenzen der AM Verfahren

| **Geometrieelement** | **LBM** | **EBM** |
|---|---|---|
| Kritischer Überhangwinkel | 45° [8, 9] | 50° [3] |
| Durchmesser liegender Bohrungen, die ohne Support fertigbar sind | d < 8 mm [10] | d < 8 mm [3] |
| Länge von freitragenden Überhangbrücken (ohne signifikanten Verzug) | L < 3 mm [8, 10] | $L_{einseitig}$ ≤ 3 mm [3] |
| Minimale Wandstärke | 0,4 mm [8] | 0,6 mm [3] |

Die Baurichtung des Laufrades gibt vor, in welchen Bereichen die zuvor beschriebenen geometrischen Grenzen zu kontrollieren sind. Die Definition von Überhängen wird dadurch festgelegt. Um die daraus resultierenden kritischen Bereiche des Laufrades zu identifizieren, wurde dieses innerhalb des Entwicklungsprozesses auf kritische Überhangbereiche bei verschiedenen Winkeln zur Bauplattform untersucht. Zusätzlich zur Überhangproblematik ist die Bauhöhe ein weiteres Kriterium um Baurichtungen zu charakterisieren. Die Bauhöhe sollte möglichst niedrig gehalten werden, um Fertigungszeiten und -kosten zu minimieren [9]. Aus beiden typischerweise gegenläufigen Kriterien ergeben sich zwei mögliche Aufbaurichtungen entsprechend Bild 3. Um jeweils die Stützstrukturen im Inneren zu vermeiden, erfolgt eine Anpassungs- und Änderungskonstruktion des Laufrades auf Basis dieser Orientierungen.

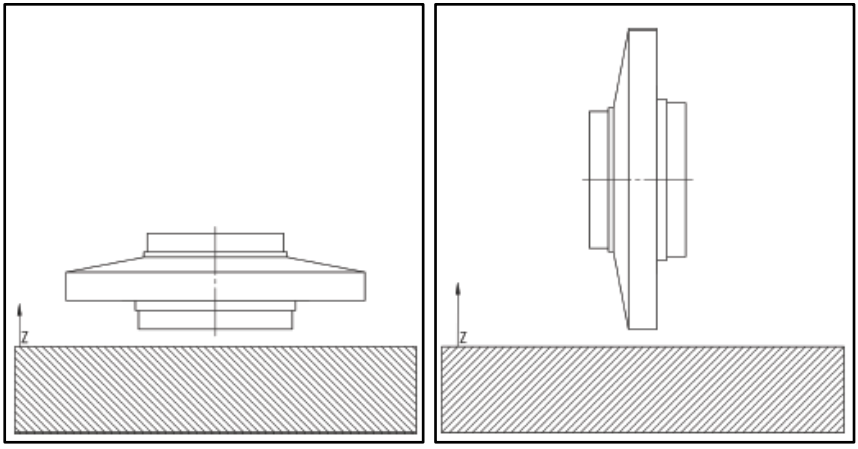



Bild 3: liegende (links) und stehende (rechts) Aufbaurichtung

## 4.3 Entwicklung und Validierung von Gestaltungskonzepten

Um zunächst die Zusammenhänge zwischen Auslegungskriterien und Gestaltungsfreiheit zu erfassen, wurde auf Basis der mittels Guss hergestellten Variante eine Strömungssimulation (CFD) aufgebaut. Dabei sollte es das Ziel sein, funktionsbestimmende Parameter gezielt zu nutzen, um fertigungsbeeinflussende Auslegungskriterien anpassen zu können. Der Aufbau dieser Simulation erfolgte mittels SolidWorks Flow Simulation (Bild 4). Die Grundlage dieser Untersuchung bildeten acht Arbeitspunkte mit verschiedenen Wirkungsgraden. Die Zielgrößen werden durch die funktionsbestimmenden Grenzen definiert wie dem Volumenstrom, der Förderhöhe und die erforderliche Leistung. Dabei erfolgt sowohl eine direkte wie auch indirekte Bestimmung der Größen. Aufgrund der Nutzung dieser Simulation als konstruktionsbegleitende Konzeptvalidierung

sowie auch bedingt durch die Begrenzung von Variationsparametern in der Simulationsumgebung wurden teilweise vereinfachte Annahmen u.a. hinsichtlich des Einflusses von Kavitation getroffen.

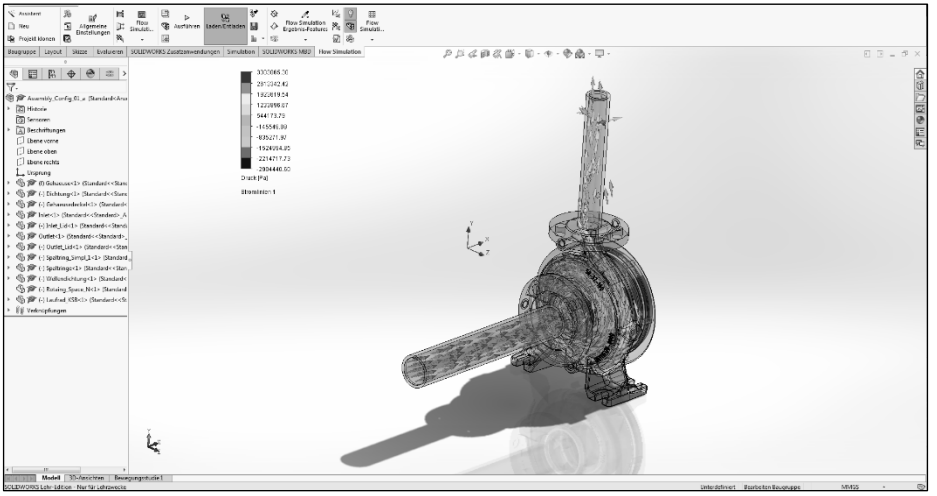


Bild 4: CFD-Simulationsaufbau mittels SolidWorks Flow Simulation, Gesamtbaugruppe der Pumpe sowie einer ausreichenden Länge der Ein- und Ausläufe für einen störungs- und drallfreien Volumenstrom

Unter Beachtung der bereits beschriebenen funktionsbestimmenden Elemente sind zwei geometrisch unterschiedliche Konstruktionsvarianten je nach Orientierung im Bauraum der Maschine erstellt worden. Bei der Gestaltung wurde dabei versucht diese Vorgaben zu nutzen sowie fertigungsseitige Restriktionen mit einzubinden. Dabei sind u.a. für die Vermeidung der Stützstruktur zusätzliche Schaufeln eingebracht und zudem die Anzahl soweit verändert worden, dass keine Stützstruktur notwendig war.

Weitere gestaltungsbeeinflussende Elemente, die aus den Möglichkeiten der additiven Fertigung resultieren, waren die Integration von adaptiven Druckentlastungen für den Axialschubausgleich. Diese konnten entsprechend der Strömungsrichtung so ausgelegt werden, dass die in den jeweiligen Belastungsstufen (z.B. Anfahrphase, Volllastbetrieb) auftretenden Kräfte und Momente während der Nutzung entsprechend berücksichtigt werden konnten. Zudem ist die Wandstärke reduziert worden, was Einfluss auf die Gestaltung der Druckentlastungen hatte. Außerdem konnten die Radien der Schaufeln an Saug-

und Druckseite so angepasst werden, dass diese zu einem besseren Strömungsverhalten führen und gleichzeitig kritische Stellen wie Überhänge mit abfangen.

In der Simulation zeigten beide Konstruktionsvarianten durchschnittliche Abweichungen im Bereich von +/-10%, vereinzelt bis zu 20% auf die Zielgrößen, was für den Entwicklungsprozess zunächst ein zufriedenstellendes Ergebnis war.

Um neben den funktionsbedingten Grenzen die fertigungsseitig getroffenen Entscheidungen validieren zu können bzw. auch um einzelne Größenvariationen experimentell zu untersuchen, wurden aus beiden Varianten Geometriedemonstratoren abgeleitet (Bild 5). Ziel dieser ist die Untersuchung der Grenzbereiche der Konstruktionsempfehlungen an kritischen Geometrien auf das gegebene Material-Anlagen-System ohne komplette Räder fertigen zu müssen. Zudem können auch die Oberflächenqualität und mögliche Nacharbeitsschritte analysiert und bewertet werden. Die Fertigung erfolgte mittels EBM und LBM.

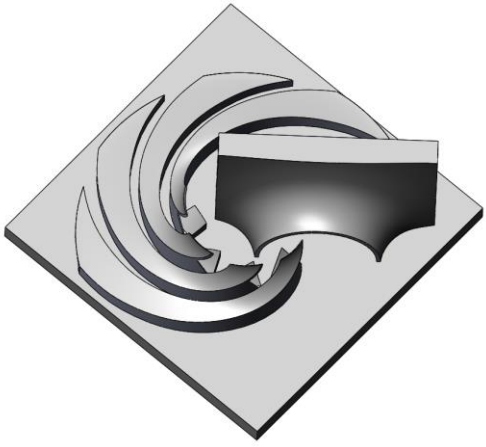


Bild 5: Anordnung der Geometriedemonstratoren auf der Bauplattform zur Untersuchung von vier Schaufelsegmenten mit unterschiedlichen Geometrien der liegenden und ein Ausschnitt der stehenden Bauraumorientierung

Die Ergebnisse dieser Serien sind jeweils optisch und mittels Computertomographie (CT) vermessen und analysiert wurden. Grundsätzlich zeigten die Bauteile hinsichtlich Fertigbarkeit und Geometrietreue sehr gute Ergebnisse. Die Geometrieabweichungen zum Sollbauteil lagen im Mittel bei +/-0,2 mm, vorwiegend an den freigeformten Bereichen (Saugmund). Jedoch sind einige

geometrische Defizite aufgetreten, die in Verbindung mit deren Ursache folglich diskutiert sind.

- An nahezu allen Schaufel-Geometrien gibt es bei den Randbereichen nach innen einfallende Wände und eine ausgeprägte Kante an der Außenseite. Die Ursache dafür sind schnelle Änderungen der Schmelzflächengeometrie aufgrund der Innenradien (Bild 6 links). Dies ist der Testmustergestaltung geschuldet und ist mit ausreichend Wandstärke am kompletten Laufrad vermeidbar.

- An der Druckkante sind im Bereich der Deckscheibe Verformungen zu verzeichnen, die auf den Wärmestau an dieser Stelle zurückgeführt werden können.

- Rückstände sind an der Innenseite (Saugmund) aufgrund der Entfernung der Stützstruktur zu beobachten. Diese Flächen sind jedoch zur maschinellen Nacharbeit erreichbar.

- Prozessbedingt gibt es teilweise Pulverrückstände und Poren. Poren haben aufgrund der vergleichsweise geringen Festigkeitsanforderungen wenig Einfluss und Einschlüsse – ausschließlich beim EBM – sind mit ausreichend Säuberung vermeidbar (Bild 6 rechts)

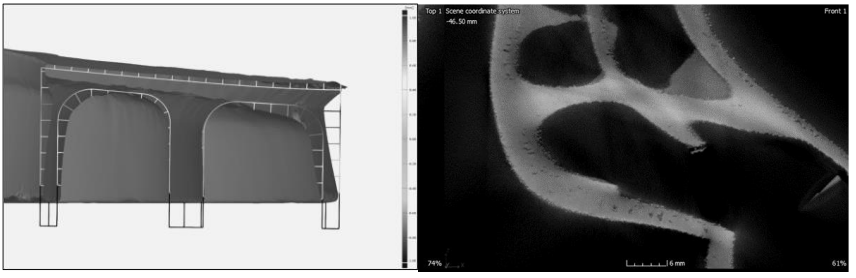



Bild 6: Vermessung der Geometriedemonstratoren, links: optisch – Schnittdarstellung eines Soll-Ist-Vergleiches an den Ausläufen, rechts: CT-Aufnahme

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden folgende Anpassungen an die finalen Konstruktionen durchgeführt.

- Variierende Radien bei den Einläufen werden mit R4 und R5 festgelegt.

- Beide Varianten werden in deren Außendurchmesser jeweils konturfolgend größer gestaltet. Dadurch lassen sich die entstandenen Bereiche zur Wärmeabfuhr mittels Support abstützen. Bei der Nachbearbeitung wird dieser Teil maschinell entfernt und es resultieren konturtreue Verläufe und scharfe Kanten an der Druckkante.

- Die Anbindung der Schaufel-Einläufe wird in Richtung der Saugseite verlängert und verstärkt, um Stützstruktur bei der Fertigung zu vermeiden und somit Fehler bei der Entfernung vorzubeugen.

## 5 Ergebnisse und Diskussionen

Der beschriebene Entwicklungsprozess bestätigt die Herausforderungen, welche in der Forschung wie auch in der Praxis noch bestehen, um additive Bauteile fehlerfrei zu fertigen. Dabei mussten die funktionellen Anforderungen an das Laufrad bzw. dessen Geometrie beachtet werden. Zudem sind die unterschiedlichen Grenzen der beiden pulverbettbasierten Verfahren maßgebend.

Letztlich konnten für das ursprünglich gussgefertigte Laufrad zwei Gestaltungs- und Fertigungsvarianten konstruiert, deren Performance simuliert und die Fertigbarkeit verifiziert werden. Einzelne funktionsbestimmende Geometrieelemente sind in fertigungsseitige Anforderungen überführt worden. Die bestehenden Konstruktionsempfehlungen sind für das gegebene System anwendbar, wenngleich deren explizite Grenzen wie z.B. ein 45° Winkel für EBM anpassbar waren. Zudem wurden weitere Potenziale eruiert wie u.a. im Post-Prozess bei der Nacharbeit, die zu einer Erhöhung der Oberflächengüte sowie auch weiterführend zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit führen.

Dadurch, dass beide Konstruktionen mittels LBM und EBM gefertigt wurden, konnte eine Übertragbarkeit einer jeweils orientierungsbedingten Konstruktion für beide Verfahren nachgewiesen werden.

## Danksagung

Die Ergebnisse der Arbeit sind Teil des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Teilprojektes „RessFAST – Steigerung der Materialeffizienz durch ressourceneffiziente Fertigung für Bauteile aus Aluminium, Stahl, Titan" (FKZ:03XP0049) innerhalb der Förderinitiative Mat-Ressource. Zudem danken die Autoren allen beteiligten Projektpartnern.

## Literatur


[1] Sembdner, P.; Nögel, M.; Hofmann, D.; Schöne, C.; Stelzer, R.: Analyse und Bewertung von Simulationswerkzeugen für generativ gefertigte Bauteile, 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017, Duisburg.

[2] Adam, G.A.O.; Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing – Element transitions and aggregated structures, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 (2014) P20-28, http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.10.001.

[3] VDI 3405, Blatt 3.5: Additive Fertigungsverfahren – Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Elektronen-Strahlschmelzen, April 2017.

[4] Klahn, C., Leutenecker, B. u. Meboldt, M.: Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing. Procedia CIRP 36 (2015), S. 230–235

[5] Klein, Schanzlin & Becker Aktiengesellschaft: Auslegung von Kreiselpumpen. Frankenthal: KSB 2005

[6] Sigloch, H.: Strömungsmaschinen. Grundlagen und Anwendungen. München: Hanser 2013

[7] VDI 3405-2.2; August 2013. Additive Fertigungsverfahren Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung

[8] Thomas, D.: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting, University of Wales Dissertation. Wales 2009

[9] VDI 3405-3; Februar 2015. Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen

[10] Di Wang, Wu, S., Bai, Y., Lin, H., Yang, Y. u. Song, C.: Characteristics of typical geometrical features shaped by selective laser melting. Journal of Laser Applications 29 (2017) 2, S. 22007

# Analyse anlagenspezifischer Fertigungseinflüsse auf die Genauigkeit FDM-gedruckter Bauteile

Martin Hallmann[1], David Kunz[1], Benjamin Schleich[1], Sandro Wartzack[1]

*[1] Lehrstuhl für Konstruktionstechnik*
*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

## Abstract

Since the first successful integrations of additive manufacturing processes into industrial production, the achievable component qualities, such as geometric accuracy and surface quality, have improved significantly. Hence, such processes are often used for the manufacturing of directly usable components. Nevertheless, the deviations caused by the generative production principles are inevitably and strongly dependent on the respective machine. To address these aspects in the tolerance-driven design of additively manufactured components, a procedure for the acquisition of machine-specific component deviations is presented and applied to a revolute joint as an example.

*Keywords: Fused Deposition Modeling, Geometric Accuracy; Influences of production; Design of Experiment*

## 1 Motivation

Additive Fertigungsverfahren konnten sich in den letzten Jahren u. a. durch ihre losgrößenunabhängigen Fertigungskosten sowie ihrer Gestaltungsfreiheit nach und nach in der modernen Fertigungslandschaft etablieren, sodass diese heute nicht mehr nur zum Rapid Prototyping, sondern vermehrt zur Fertigung

endkonturnaher Produkte eingesetzt werden [1, 2]. Beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren, wie dem Fused Deposition Modeling (FDM), ergeben sich jedoch stets fertigungsbedingte, geometrische Abweichungen von der Nenngestalt, welche die Funktion und Ästhetik eines Produkts beeinträchtigen [3, 4]. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen ist ein Rückschluss auf die Ursachen nicht ohne weiteres möglich. Zudem zeigt sich, dass der eingesetzte Anlagentyp wesentlichen Einfluss auf die Bauteilgenauigkeit hat [4]. Demnach ist es zielführend, die Haupteinflussgrößen auf eine vorab definierte Zielgröße unter Berücksichtigung der eingesetzten Maschine zu identifizieren, zu quantifizieren und die Zusammenhänge durch geeignete Ersatzmodelle unter Zuhilfenahme der verschiedenen Methoden des Data-Minings [5] zu beschreiben. Ziel ist es dabei, diese dem Konstrukteur für eine sowohl fertigungs- als auch anlagenspezifische, toleranzgerechte Auslegung FDM-gefertigter Bauteile zur Verfügung zu stellen.

## 2 Stand der Technik und Forschung

Während zu Beginn die additive Fertigung lediglich als wirtschaftlich nicht interessantes, jedoch technisch begeisterndes "Spielzeug […] für die […] Produktentwicklung" [6] angesehen wurde, stellt diese derzeit eine der zukunftsträchtigen Schlüsseltechnologien dar und hat längst ihre Eignung für Serienanwendungen bewiesen [1, 2, 7]. Durch Weiter- und Neuentwicklungen sowie Ausweitung der generativen Verfahren auf verschiedenste Materialien wird das Anwendungsgebiet stetig erweitert, sodass derzeit bereits ca. ein Drittel aller additiv gefertigten Teile als Funktionsbauteile im industriellen Umfeld zum Einsatz kommen [1, 7]. Hierbei umfasst die Gruppe der additiven Fertigungsverfahren mittlerweile eine Vielzahl an verschiedenen Prozessvarianten [7]. Je nach Anforderung an Material, Einsatzgebiet etc. werden diese Verfahren aufgabenspezifisch im industriellen Umfeld eingesetzt und ergänzen so sukzessive die traditionellen Fertigungsprozesse (siehe Bild 1) [7].

Für die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahren ist neben Kriterien wie z. B. der Optik, Haptik oder Festigkeit vor allem die geometrische Genauigkeit zur Gewährleistung der Funktionserfüllung von Relevanz [3]. Wenn auch beim Einsatz von FDM-Verfahren geringere Bauteilgenauigkeiten als bei der Nutzung anderer additiver Fertigungsverfahren, wie z. B. der Stereolithographie, erzielt werden, wird dieses Verfahren erfolgreich zur Fertigung von funktionsfähigen Bauteilen genutzt (siehe Bild 1) [2, 9]. Die vergleichsweise deutlich geringeren Anlagenkosten und die steigende Zahl der auf dem Markt vertretenen Anbieter für FDM-Anlagen seit Auslaufens des Patents für FDM [8] führen dazu, dass FDM sowohl im Privatbereich als auch in der Industrie eines der am häufigsten eingesetzten Fertigungsverfahren darstellt [2]. Um diese

neuen Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu untersuchen, werden meist Regelgeometrien, wie z. B. Quader, Zylinder und Kugeln, additiv gefertigt und deren Bauteilgenauigkeit hinsichtlich Maß-, Form- und Lage experimentell ermittelt [10, 11]. Dabei zeigt sich, dass die erreichbaren Genauigkeiten stark von der betrachteten Maschine abhängig sind [4]. Je nach Aufbau, Prinzip und Ausführung wirkt sich neben prozessspezifischen Einstellungen, wie z. B. der Schichthöhe, Füllgrad oder Bauteilorientierung, die Maschine mehr oder minder auf die Bauteilgenauigkeit aus [4, 10, 12, 13, 14].

Trotz der zahlreichen Bemühungen aus Forschung und Industrie ist die Verfügbarkeit der ermittelten Informationen meist noch stark eingeschränkt und das ermittelte Wissen liegt meist nur textbasiert, z. B. in Form von einzelnen Richtwerten, Tabellen oder Gestaltungsrichtlinien vor, wodurch eine Weiternutzung der Daten stark eingeschränkt ist. Obwohl die Vorteile wissensbasierter Methoden in der Produktentwicklung bekannt sind [14] und diese auch im Bereich der additiven Fertigung [15] bereits genutzt werden, wird dessen Potential bisher noch nicht ausgeschöpft. Dabei sind die Daten zumeist als Folge der zunehmenden Digitalisierung der Produktentwicklung bereits verfügbar und können unter Einsatz der verschiedenen Methoden und Werkzeuge des Data-Minings in geeignete Prognosemodelle überführt und in den einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses gewinnbringend genutzt werden. [3, 16] Dabei ist es jedoch Voraussetzung, dass die Daten zielgrößenorientiert unter Berücksichtigung der Einflüsse aus Fertigung und Anlage an geeigneten Prüfkörpern mit Hilfe statistischer Versuchspläne und auf die Messaufgabe abgestimmter Messtechnik erfasst werden, sodass eine ausreichend große Datenmenge hinreichender Genauigkeit vorliegt.

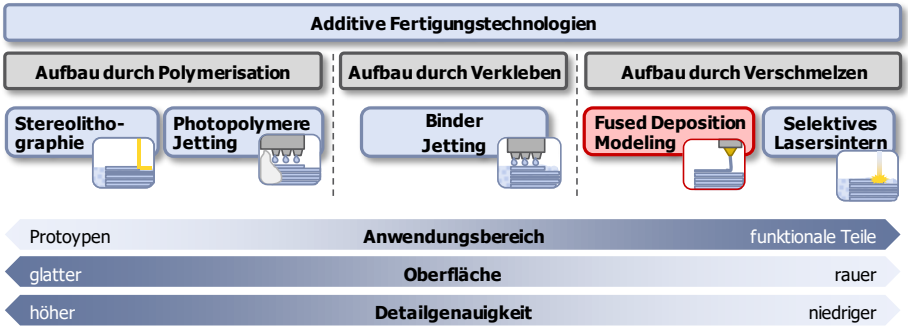



Bild 1: Ausgewählte additive Fertigungsverfahren für Kunststoffe nach [9].

## 3 Methode zur Untersuchung anlagenspezifischer Einflüsse auf die Genauigkeit additiv gefertigter Bauteile

Um die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Fertigungseinflüssen und einer betrachteten Zielgröße herstellen und durch geeignete Modelle beschreiben zu können, ist eine systematische Vorgehensweise erforderlich, die in Bild 2 dargestellt ist und im Folgenden dargelegt wird. In Kapitel 4 wird diese schließlich auf das Beispiel eines additiv gefertigten Drehgelenkglieds übertragen.

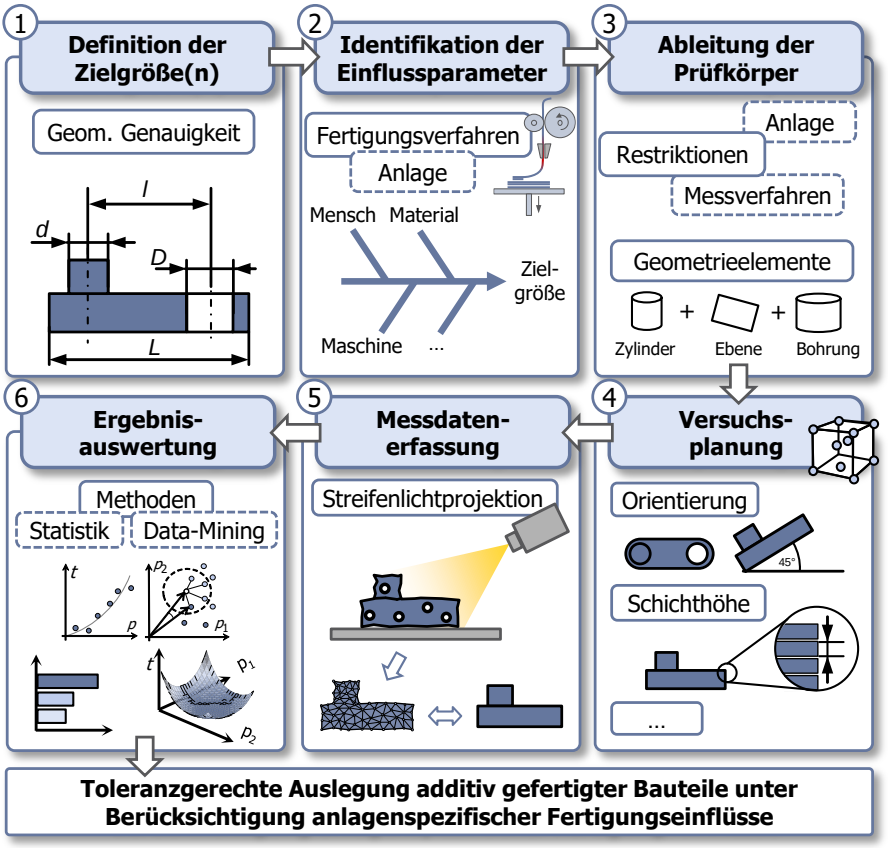



Bild 2: Vorgehensweise zur zielorientierten Analyse anlagenspezifischer Einflussparameter auf die Genauigkeit additiv gefertigter Bauteile am Beispiel eines Gelenkglieds.

**Schritt 1: Definition der Zielgröß(en)**

Primäres Ziel der Datenerfassung und -auswertung ist es, aufzuzeigen, welche Einflussgrößen sich wie und in welchem Umfang auf eine bestimmte Zielgröße auswirken. Daher steht die Zielgröße stets im Fokus und muss in allen erforderlichen Schritten berücksichtigt werden. Im ersten Schritt muss diese daher zunächst festgelegt und spezifiziert werden (siehe Bild 2). Neben mechanischen, optischen oder haptischen Eigenschaften steht die geometrische Genauigkeit additiv gefertigter Bauteile oftmals im Vordergrund. Weicht ein Bauteil zu stark von seiner Nenngestalt ab, so kann dies erhebliche Auswirkungen auf die Funktion des technischen Systems haben [3]. Daher ist es zur Gewährleistung der Funktionserfüllung unerlässlich, diejenigen Fertigungseinflüsse zu untersuchen, welche Abweichungen der geometrischen Istgestalt von der in CAD-Modellen und technischen Zeichnungen festgelegten Nenngestalt bewirken. In diesem Zusammenhang ist je nach Bauteilgestalt und Funktion die Einhaltung von Maß-, Form- und Lagetoleranzen zu prüfen. Hierzu werden die Abweichungen sowohl zwischen realen (z. B. Abstand zweier Baueilkanten als Distanz zwischen zwei realen Elementen) als auch abgeleiteten Geometrieelementen (z. B. Abstand zwischen zwei zylindrischen Elementen über deren abgeleitete Achsen) ermittelt.

**Schritt 2: Identifikation der relevanten Einflussparameter**

Ist die Zielgröße definiert, sind im zweiten Schritt die wichtigsten Einflussfaktoren zu identifizieren. Da jedoch die Anzahl möglicher Einflüsse auf die Bauteilqualität sehr groß und auf den ersten Blick undurchsichtig sein kann, ist es zielführend, zunächst alle relevanten Einflussgrößen unter Rückgriff auf internes und externes Wissen u. a. aus Literatur und Austausch mit Experten zu sammeln und strukturiert zusammenzufassen (siehe Bild 2). Hierbei hat sich das Werkzeug des Ursachen-Wirkungs-Diagramms bewährt, welches z. B. in seiner Ursprungsform die Ursachen anhand der Kriterien Mensch, Maschine, Material, Mitwelt und Methode gruppiert. Je nach Technologie, Bauweise und Ausstattung der Anlage wirken sich hierbei die prozessspezifischen Einflussgrößen mehr oder minder auf die Zielgröße aus, weshalb stets das eingesetzte Verfahren sowie die Anlage berücksichtigt werden müssen. So kommen bei einer Anlage ohne geschlossene Bauplattform äußere Einflüsse wie z. B. Temperaturschwankungen deutlich stärker zum Tragen. Ein detaillierteres Ursachen-Wirkungs-Diagramm für FDM wird in Kapitel 4 vorgestellt.

**Schritt 3: Ableitung geeigneter Prüfkörper**

Um die Auswirkungen der in den vorherigen Schritten identifizierten Ursachen zu untersuchen, muss ein auf die jeweilige Zielgröße angepasster Prüfkörper entworfen werden, welcher alle relevanten Geometrieelemente enthält (siehe Bild 2). Aus der Literatur und Praxis sind eine Vielzahl an Testobjekte für die additive Fertigung zur Ableitung von Konstruktionsregeln, zur Untersuchung prozessspezifischer Bauteildefekte, wie Verzug oder Fadenzug, oder für den Benchmark verschiedener Anlagen bekannt. Jedoch können diese oftmals nicht ohne Anpassung auf die funktionalen Anforderungen übernommen werden, da stets die Zugänglichkeit der einzelnen Geometrieelemente und die Eignung für das eingesetzte Messverfahren berücksichtigt werden müssen. Vielmehr sind zumeist neue Prüfkörper unter Berücksichtigung des jeweiligen Anwendungsfalls zu entwickeln und auf mess- und fertigungstechnische Restriktionen abzustimmen.

**Schritt 4: Versuchsplanung und -durchführung**

Nach Festlegung des Prüfkörpers kann anschließend ein geeigneter Versuchsplan aufgestellt und durchgeführt werden (siehe Bild 2). Hierbei sind neben den in Schritt 2 festgelegten Größen auch geometrische Parameter als Variationen der Geometrie geeignet festzulegen, um den Einfluss auf unterschiedliche Abmessungen zu untersuchen. Trotz Vorauswahl der Einflussparameter in Schritt 2 beeinträchtigen große Stichprobenumfänge vollfaktorieller Versuchspläne unter Berücksichtigung von Wiederholversuchen zur statistischen Absicherung eine Durchführbarkeit aller realen Versuche. Somit sind vorab Methoden des Screenings anzuwenden, um die Anzahl der Designparameter und somit den Fertigungs- und Messaufwand zu reduzieren. Darüber hinaus können Versuchspläne mit deutlich geringeren Stichprobenumfängen, wie teilfaktorielle Versuchspläne oder Stichprobenverfahren genutzt werden, um ausreichend Messdaten für die nachfolgenden Auswertungen erfassen zu können.

**Schritt 5: Messdatenerfassung**

Zur Erfassung sind je nach Zielgröße fähige Messverfahren zu wählen (siehe Bild 2). Hierzu kommen zur Messung additiv gefertigter Bauteilgeometrien u. a. taktile und optische Verfahren zum Einsatz [7]. Da eine Vielzahl an Probekörpern zur Erstellung der Ersatzmodelle notwendig ist, ist neben einer ausreichenden (Wiederhol-) Genauigkeit der Zeitaufwand zur Durchführung und Auswertung der Messungen entscheidend. Zwar ist die Computertomographie ein beliebtes Messverfahren, um Features und Strukturen im Bauteilinneren zu untersuchen und das Bauteil ganzheitlich zu erfassen, allerdings hat sie verhältnismäßig lange Messzeiten zur Folge [7]. Ein zeitsparenderes Verfahren stellt das Streifenlichtprojektionsverfahren [17] dar, welches häufig zur Erfassung

der Bauteiloberfläche additiv gefertigter Bauteile genutzt wird. Im Allgemeinen ist stets auf eine ausreichende Genauigkeit des Messverfahrens und -geräts gemäß der goldenen Regel der Messtechnik sowie auf eine möglichst lückenlose Erkennung der Bauteiloberfläche zu achten. Andernfalls wird die Aussagekraft der Ergebnisse und somit der Ersatzmodelle zu stark beeinflusst, sodass diese keine validen Prognosen liefern können. Als Ergebnis optischer Verfahren wird die aufgenommene Oberfläche als Punktewolke erfasst und anschließend ein trianguliertes Oberflächennetz erzeugt, welches mit der Nenngestalt abgeglichen wird.

**Schritt 6: Ergebnisauswertung**

Als Zwischenergebnis liegt nach der Durchführung und Auswertung aller Messdaten ein Datensatz vor, den es im nächsten Schritt zu analysieren gilt (siehe Bild 2). Hierzu werden u. a. Sensitivitätsanalysen eingesetzt, um die Beiträge der einzelnen Inputparameter auf die Zielgröße zu ermitteln. Neben diesen klassischen Verfahren können mit Hilfe der verschiedenen Werkzeuge des Data-Minings und Machine Learnings Ersatzmodelle, auch Metamodelle genannt, aufgestellt und validiert werden. So werden z. B. Regressionsanalysen oder neuronale Netze genutzt, um zuverlässige Modelle zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Einflüsse und Zielgröße aufzustellen.

Somit steht dem Produktentwickler am Ende ein auf Richtigkeit geprüftes und auf die eingesetzte Anlage abgestimmtes Ersatzmodell zur Verfügung, welches eine Prognose für die Ausprägung der Zielgröße bei Wahl bestimmter Prozess- und Designparameter liefert und so den Produktentwickler bei der toleranzgerechten Auslegung additiv gefertigter Bauteile unterstützt (siehe Bild 2). Die ermittelten Modelle können z. B. in die statistische Toleranzanalyse integriert werden und dabei helfen, prozessorientiert und anlagenspezifisch die zu erwartenden, geometrischen Abweichungen abzubilden und somit die Funktionserfüllung virtuell absichern zu können.

# 4 Untersuchung der geometrischen Genauigkeit am Beispiel eines Drehgelenkglieds

Die in Kapitel 3 entwickelte Methode wird nun im Folgenden exemplarisch auf die Untersuchung der geometrischen Genauigkeit eines mittels FDM gefertigten Drehgelenkglieds angewandt. Hierzu werden alle für die Versuchsvorbereitung erforderlichen Schritte, i. e. Schritt 1-4 aus Bild 2, auf das Fallbeispiel übertragen. Die Versuchsdurchführung sowie Ergebnisauswertung (Schritt 5 & Schritt 6) sind aufgrund des Umfangs nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung.

Treten geometrische Abweichungen an den Funktionsflächen des Drehgelenks auf, so hat dies Auswirkungen auf die Bewegungsgenauigkeit des Gelenks. So entstehen Abweichungen der idealen Bewegungsbahnen und überlagern sich in Koppelgetrieben mit mehreren Drehgelenken, sodass die Bewegungstreue der einzelnen Koppelkurven beeinträchtigt wird. Um die Fertigungseinflüsse aus dem FDM-Verfahren zu untersuchen, werden alle relevanten Einflussgrößen, die mit Hilfe einer umfassenden Literaturrecherche ermittelt wurden, in einem Ursachen-Wirkungs-Diagramm zusammengefasst. Dieses ist in Bild 3 lediglich in Auszügen dargestellt und erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

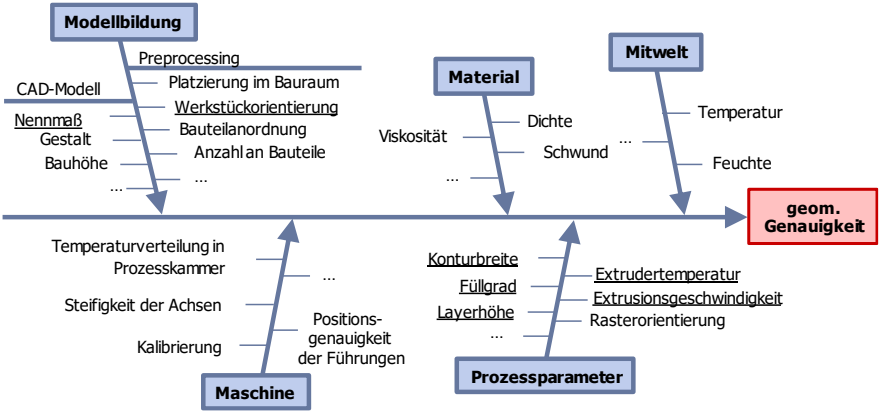



Bild 3: Ursache-Wirkungs-Diagramm mit ausgewählten Einflussparametern auf die geometrische Genauigkeit mittels FDM gefertigter Bauteile.

Die Auswahl der relevanten Einflussgrößen ist dabei stets auf die eingesetzte Maschine abzustimmen. So gelten zwar die Temperatur und die Extrusionsgeschwindigkeit als wichtige Einflussgrößen auf die Genauigkeit additiv gefertigter Bauteile, werden jedoch beim Einsatz des FDM-Druckers Stratasys F370 softwareintern stets auf Material und Bauobjekt angepasst und müssen bzw. können vom Benutzer nicht variiert werden. Als bedeutendste

Einflussgrößen auf die geometrische Genauigkeit wurden daher die Orientierung des Bauteils im Bauraum, die Schichthöhe, die Konturbreite, Anzahl der Konturen und der Füllgrad des Drehgelenks identifiziert.

Um die im vorherigen Schritt festgelegten Größen experimentell untersuchen zu können, müssen alle für die Funktion bedeutenden Geometrieelemente in einem Prüfköper vereint werden (siehe Bild 4). Im ersten Schritt, der Analyse, werden hier die zylindrische Buchse und Zapfen sowie die ebenen Auflageflächen der Gelenkglieder als funktionsrelevant festgelegt. Diese gilt es im anschließenden Syntheseschritt in einen gemeinsamen Prüfkörper zu integrieren. Dabei hat neben der verwendeten Maschine vor allem das eingesetzte Messverfahren einen sehr großen Einfluss auf die Gestaltung des Prüfkörpers. Neben zu berücksichtigenden Gestaltungsrichtlinien für FDM, wie etwa Mindestdurchmesser oder maximale Überhänge, ist vor allem auf die Zugänglichkeit der Geometrieelemente für das Messverfahren zu achten. So ist zu berücksichtigen, dass die Messbarkeit nicht durch gegenseitigen Schattenwurf beeinträchtigt wird. Um alle relevanten Elemente in einer einzigen Aufspannung ermitteln zu können, werden die Elemente auf das Messvolumen angepasst angeordnet und zudem die Höhe bzw. Tiefe und Durchmesser der Zylinder geeignet gewählt. Andernfalls erfordert dies zusätzliche Aufnahmen für weitere Bauteilorientierungen, wodurch die Prüfkörper mit Referenzmarken versehen werden müssen. Daher wirkt die Gestalt des über die Synthese der einzelnen Geometrieelemente konzipierten Prüfkörpers in Bild 4 auf den ersten Blick sehr einfach, ist jedoch bewusst auf die verschiedenen Restriktionen der FDM-Anlage und des Messverfahrens angepasst.

Zudem hat die Farbwahl der Prüfkörper wesentlichen Einfluss auf die Güte der Ergebnisse aus dem Streifenlichtprojektionsverfahren, denn lediglich matte, helle Farben ermöglichen eine möglichst lückenlose Erfassung der Bauteiloberfläche. Hierbei wurde vorab eine Studie mit über zehn verschiedenen Farben durchgeführt und hinsichtlich deren resultierenden Fehlstellen in den Oberflächennetzen bewertet. Hierbei konnte bei der Verwendung von ASA als Baumaterial weiße und graue Bauteilfarben die besten Ergebnisse erzielen. Zudem muss die Belichtungszeit so abgestimmt werden, dass die Qualität der Oberflächennetze eine Auswertung aller relevanten Größen ermöglicht. Nachdem der Prüfkörper konzipiert ist, muss ein geeigneter Versuchsplan aufgestellt werden. Mit fünf Einflussgrößen und mehreren Variationsparametern, wie für den Durchmesser der Buchse, des Zapfens und den Abstand der beiden Geometrieelemente, ergäbe sich für einen vollfaktoriellen Versuchsplan je nach Wahl der Stufenanzahl eine große bis sehr große Anzahl an Versuchspunkten, welche nicht mehr ohne Weiteres fertigbar, messbar und auswertbar ist. Um diesen Aufwand vorab zu reduzieren, wird zunächst ein Screening durchgeführt. So

bewirkt beispielsweise eine bewusste Vernachlässigung eines Prozessparameters in einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit zwei Stufen eine Halbierung der Versuchspunkte. Somit können die Erkenntnisse aus Vorversuchen in weiterführenden Arbeiten genutzt werden, um die Einflüsse der obig ausgewählten Einflussparameter auf die Genauigkeit additiv gefertigter Drehgelenke zu untersuchen. Hierbei steht vor allem die Auswertung der Versuchspläne sowie die Überführung in geeignete Metamodelle im Vordergrund, die in weiteren Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen detailliert betrachtet werden.

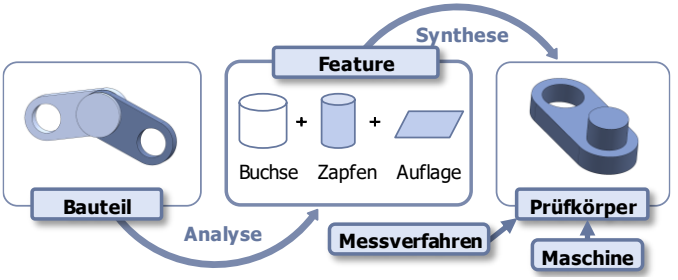



Bild 4: Identifikation relevanter Geometrieelemente und Integration in einem Prüfkörper am Beispiel eines Drehgelenks

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Additive Fertigungsverfahren zeichnen sich u a. durch ihre große Gestaltungsfreiheit und losgrößenunabhängigen Fertigungskosten aus, haben jedoch den Nachteil, dass im Vergleich zu traditionellen Verfahren geringere Bauteilgenauigkeiten erzielt werden können. An dieser Stelle fehlen verlässliche und umfassende Fertigungsinformationen und deren Bereitstellung durch geeignete Modelle, um den Produktentwickler bei der toleranzgerechten Auslegung additiv gefertigter Bauteile zu unterstützen. Um diese Lücke zu schließen, müssen die fertigungs- und anlagenspezifischen Abweichungen von der Idealgestalt zielgrößenorientiert an geeigneten Prüfkörpern erfasst, ausgewertet und verarbeitet werden. Hierzu ist eine systematische Vorgehensweise erforderlich, welche im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt und beispielhaft auf ein mittels FDM gefertigtes Drehgelenkglied übertragen worden ist.

In einem nächsten Schritt sind Versuchsreihen unter Berücksichtigung statistischer Absicherung durchzuführen, um u. a. den Einfluss der Schichtdicke, Orientierung sowie der Bindenaht auf die geometrische Genauigkeit von Drehgelenken zu untersuchen. Diese Ergebnisse dienen als Datenbasis zur Erstellung valider Prognosemodelle unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Data-Mining-Verfahren, welche den Produktentwickler bei der prozessorientierten, toleranzgerechten Auslegung additiv gefertigter Bauteile unterstützen soll.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens „Statistische Toleranzanalyse additiv gefertigter Gelenkgetriebe unter der Berücksichtigung anlagenspezifischer Fertigungseinflüsse" (WA 2913/27-1). Des Weiteren gilt unser Dank Prof. Dr.-Ing. habil. T. Hausotte und seinem Team des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik FMT der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) für die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen.

## Literatur

[1] Klemp, E.; Pottebaum, J.: "Additive Fertigungsverfahren im Kontext von Industrie 4.0", Handbuch Industrie 4.0: Produktion, Automatisierung und Logistik, Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M., Springer-Verlag, Berlin, 2016, pp. 311–331.

[2] Wohlers, T. T et al.: "Wohlers Report 2017: "3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report", Wohlers Associates, Fort Collins, 2017.

[3] Wartzack, S. et al.: "Lebenszyklusorientierte Toleranzsimulation zur funktionalen und ästhetischen Produktabsicherung", Konstruktion, Nr. 6, 2011, pp. 63-67+74.

[4] Minetola, P.; Iuliano, L.; Marchiandi, G.: "Benchmarking of FDM Machines through Part Quality Using IT Grades", Procedia CIRP, Vol. 41, 2015, pp. 1027-1032.

[5] Breitsprecher, T.; et al.: "Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozesse", ZWF, Nr. 11, Vol. 110, 2015, pp. 744–750.

[6] Gebhardt, A.: "Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping-Tooling-Produktion", Carl Hanser Verlag, München, 2016.

[7] Klahn, C.; Meboldt, M.: "Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten", Vogel Business Media, Würzburg, 2018.

[8] Crump, S. S.: "Apparatus and method for creating three-dimensional objects". Patent, USA, US5121329 A, 09.05.1992.

[9] Additively AG: "Übersicht über 3D-Druck-Technologien", URL.: https://www.additively.com/de/lernen/3d-printing-technologies, abgerufen am: 13.07.2018.

[10] Lieneke, T. et al.: " Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling", Procedia CIRP, Vol. 43, 2016, pp. 286-291.

[11] Mahmood, S. et al.: "Fast Deviation Simulation for 'Fused Deposition Modeling' process", Procedia CIRP, Vol. 43, 2016, pp. 327-332.

[12] Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L.: "Optimization of fused deposition modeling process parameters. A review of current research and future prospects", Advances in Manufacturing, Nr. 1, Vol. 3, 2015, pp. 42-53.

[13] Sahu, R. K.; Mahapatra, S. S.; Sood, A. K.: "A Study on Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed Parts using Fuzzy Logic", Journal for Manufacturing Science & Production, Nr. 3, Vol. 13, 2013, pp. 183-197.

[14] Wartzack, S.; Sauer, C.; Küstner, C.: "What does Design for Production mean? – From Design Guidelines to Self-learning Engineering Workbenches", Proceedings of the 11th International Workshop on Integrated Design Engineering, Meyer, A.; Schirmeyer, R.; Vajna, S., Universität Magdeburg Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Magdeburg, 2017, pp. 93-102.

[15] Zhu, Z. et al.: "Machine Learning in Additive Manufacturing", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 67, 2018, pp. 157-160.

[16] Schleich, B. et al.: Shaping the digital twin for design and production engineering, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol 66, 2017, pp. 141-144.

[17] Weckenmann, A.; Hartmann, W.; Weickmann, J.: "Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors", Optical fabrication, testing and metrology III. Proceedings of SPIE Vol. 7102, Duparré, A.; Geyl, R., Glasgow, 2008, pp. 71020N-1-71020N-12.

# Designers' Assistant – Using AI to support Technology Intelligence in production unit design departments in large automotive OEMs

Kate Kujawa[1], Kristin Paetzold[2]

[1] *Process Development and Materials Department, Daimler AG*

[2] *Institute for Technical Product Development, Universität der Bundeswehr München*

## Abstract

This paper proposes an innovative tool to support production unit design departments in large automotive companies. Staying ahead of technological advancements is a necessity, however, employees are currently overwhelmed by a massive array of information required for doing so. It is becoming increasingly difficult to identify the important, critical information when challenged with too much information, and too little time. Given the current advancements in artificial intelligence (AI), potential for the application of AI in technology intelligence is increasing. This paper focuses on establishing a current state analysis on information flows and technology intelligence systems, the results serve to define the industry's requirements for an AI technology intelligence assistant.

*Keywords: Technology Intelligence, Artificial Intelligence, Information Overload, Current State Analysis*

## 1 Introduction

The automotive industry is facing a number of challenges, including increases in product variation, customization, competition, and market volatility. The pace of technological advancements is also accelerating, and further challenging the industry. These trends in the automotive industry can be seen in Figure 1 [5]. To remain competitive, companies must be able to adapt responsively and always be looking one step ahead [1]. Competitive advantage is largely determined by the adoption of innovative technologies - early identification of these technologies is therefore critical [2]. Methods to systematically examine new and emerging technologies exist to aid companies in adapting to changes and reducing uncertainty about the future [3]. These methods are part of a company's technology intelligence strategy, technology intelligence, describes a company's ability to find and communicate technological information [4].

Figure 1: Tendencies, based on [1]

According to some, one of the greatest challenges is getting the appropriate information to the correct people [6, 7]. The sheer volume of information available to those actively searching can be overwhelming, and it has been stated that some technology scouting attempts fail due to this information overload [8]. This paper proposes the use of artificial intelligence (AI) to assist in performing technology scouting tasks. To begin the development of such an assisting tool, the problem and requirements must be more specifically defined.

In this paper, a current state analysis is performed, and the information flows in an automotive production-unit engineering department are examined. The paper aims to identify the information being used and the associated

sources of the information. The data will be collected through employee interviews, and the results will serve as requirements and inputs for developing the assisting AI tool.

## 2 Previous Work

A sizeable amount of literature exists in the area of technology intelligence and methods are being used in industry today [2, 3, 10]. The majority of literature explains the importance of obtaining useful information early in the process, so decision makers in a company can be informed. A popular method of Technology Scouting is proposed by Rohrbeck [2007]. The method describes four phases: identification, selection, assessment and dissemination. First, information is searched for and identified through scouts. Information is then selected through a screening process, after which it is assessed based on given criteria. Once the relevant and novelty technologies have been assessed, the dissemination phase completes the communication of the technologies in the form of a Radar Screen visualisation. [9]

It is generally accepted that a structured scouting approach is necessary and helpful for companies [1-4, 9-11]. Therefore, it is important to understand how to implement a structured intelligence program in a company. A group from the University of Cambridge have proposed a very detailed conceptual model for technology intelligence, as well as a toolbox to provide companies with the correct elements for implementing a technology intelligence system. A three tier model is explained, the uppermost being the Framework, under which is the System, and lastly the Process. Each is broken down into significant detail. [4, 10]

The framework, shown in Figure 2, describes the interactions between the intelligence consumers (those needing information) and brokers (those providing intelligence). The framework maps requirements, needs and gaps in knowledge.

- The Decision-making layer represents the intelligence consumers;
- The Intelligence Needs layer defines the requirements of the decision-makers;
- The Actions layer links the consumers to the searchers, and describes the focus of the technology searching;
- The Activities refers to what kind of information is searched for (while this paper focuses on technology intelligence, marketing and competitive intelligence are also large areas for a company's intelligence).

- Finally, Sources refers to where the information comes from, and describes how the information was obtained, e.g. first-hand or through a secondary source, whether it is internally or externally sourced, and if it is explicit or tacit knowledge. [4]

The colours White, Grey and Black, refer to whether the intelligence is publically available, not formally available, or information obtained through unethical means.

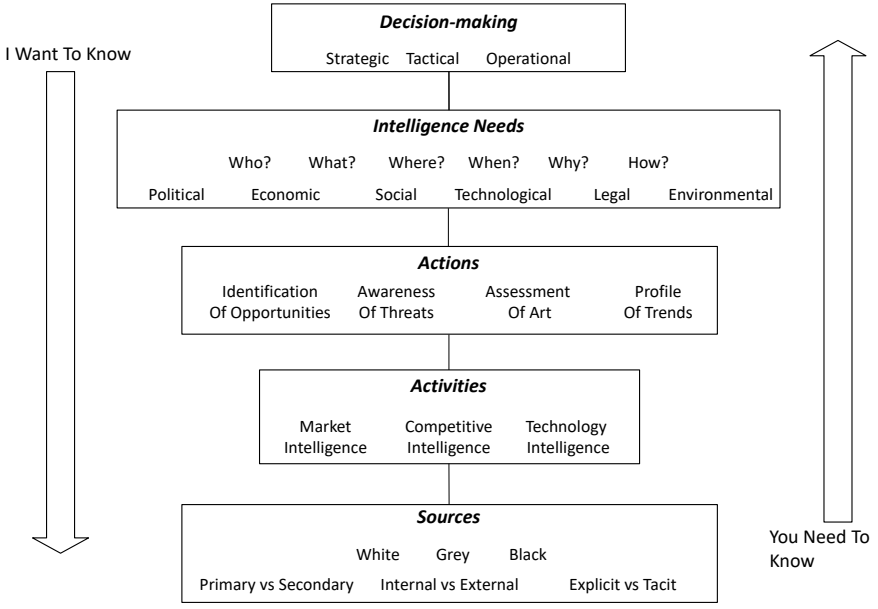



Figure 2: Intelligence Framework [4]

Under the framework, is the Systems level, in which the operational functions of the intelligence system are described. The four system modes are shown in Figure 3. The vertical axis represents the level of awareness of the intelligence needs. The horizontal axis represents intelligence provision, and refers to whether the required information is already in-house or needs to be searched. These groupings are then expanded to include people in specific roles, infrastructure and processes acting as enablers for the various modes.

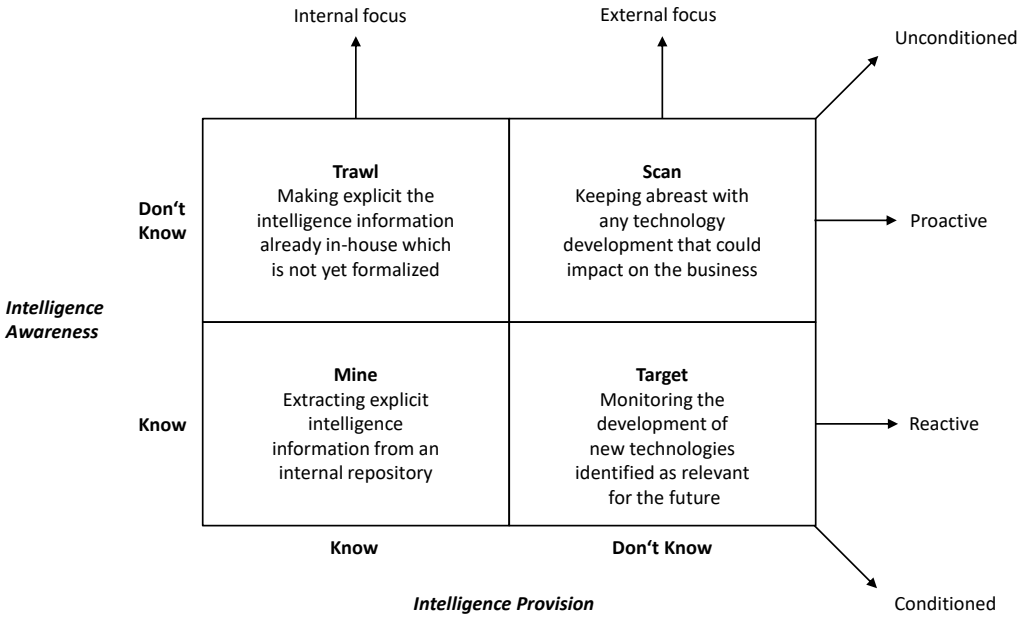



Figure 3: The System Modes [4]

The four modes for searching are broken down further by Montara *et al.,* who have categorised four functions. The identified functions are:

- **Storing the information** refers to where the information is, for example, whether it is gathered from publications (e.g. books, articles, newspapers, journals) or verbal communications (e.g. conferences, workshops, meetings).
- **Connecting to information**, where connections between the information and the searchers is described. For example, a journal subscription may connect a company to a journal database.
- **Searching the repositories** is the third and refers to the act of finding significant information in repositories.
- **Coordination of the intelligence activities** is the final function and refers to general coordination. [10]

Intelligence methods have the potential to bring a large amount of useful new information into companies. However, it has been argued that information systems have sometimes failed, due to providing too much information [8]. It has also been stated that engineers prefer to source information from colleagues than from scientific sources. Allen [1994] states that the sources of information most used are not necessarily those with the highest quality, but those which are the easiest to access. In general it is often found that there is a lack of methodological implementation in industry [11].

Strother *et al*. [2012] explain that the openness of Web communication makes it overwhelming to find valuable information. Not only is the searching of information overloading, but today much information is also fed to the searchers through various mediums, including email. Consequences of the masses of information include wasted time, a reduction in creative thinking, and missed opportunities due to avoiding certain information avenues. There are currently minimal resources for managing information and Strother *et al.* make a strong call for research on the topic. [7]

Artificial intelligence, or computational intelligence, refers to a system which acts appropriately to achieve its goal under changing environments. These systems can learn from experience and make choices [12]. With the advances in natural language processing, AI has the ability to read and understand millions of articles and identify important information. AI tools can perform keyword searches, and from natural text, contextual synonyms and hypernyms can be extracted. Thus, AI has potential to be an effective tool with application in the area of technology intelligence.

There are currently a few artificial intelligence assistants on the market. Igor, from the company Findest, is promoted as a research and development technology scout, using artificial intelligence (AI) to perform technology scouting services. According to Findest, Igor can find relevant technologies faster, avoid missing opportunities and thereby allow more time for development. Another existing tool is Iris, which is able to read an input text, for example an abstract, and provide a precise reading list. Iris boasts time reductions of up to ninety-percent, as well as providing an increase in interdisciplinary inspiration. Iris aims to help solve the information overload problem by assisting with the review of the massive volume of scientific literature being published. [12, 13]

The proposed solution is a custom AI tool for the innovative production design department. The true novelty of the tool is customizing AI for the specific application for use by production unit designers in OEMs. To achieve this,

a full understanding of the specific information needs of the designers is required. Once all important information sources are identified, they can be used as inputs for the AI assistant. To develop such an assistant, requirements, or in this case the current intelligence system must be understood.

## 3 Proposed Approach

This paper proposes a current state analysis of the technology intelligence system being applied in an innovative assembly unit design department. The current state analysis results serve to act as the required tasks an AI assistant could support. The goal is to discover which elements of the technology intelligence toolbox are currently being used, and identify the common sources of information. Further, areas with potential for artificial intelligence support will be identified. A clear examination of the state can help clarify existing problems and provide requirements for any tool to be effectively implemented.

The development of the AI assistant will follow the Association of German Engineers VDI-standard 2221 for developing technical systems and products. The first step is to precisely define the task and clarify the requirements [15]. The task is initially defined as development of a supporting tool for technology scouting activities in the department. The goal of this paper is to clarify what these activities are. The requirements should be defined by the end users in industry, therefore they will be identified through a current state analysis. A current state analysis proposes to detail what systems are already in place, and allow for the identification of weaknesses and opportunities for AI support. The final requirements can be framed around supporting the process defined by the current state analysis.

To align with the research on this topic and ensure the final technology intelligence system is scientifically based, the current state is compared to the toolbox of elements for a complete technology intelligence system. This ensures that the current state of the art is compared to the state of science. To collect the data for analysis, qualitative interviews are conducted with a sample of employees. Results provide comprehensive data as to the various information sources and connectors being used in the department. Additionally, the interviews are structured to collect information on the various searches being used and how often they are used.

## 4 Interviews

The interviews are qualitative and open to allow a broad range of answers. To examine how often different sources are searched, employees are asked to

verify whether they used the sources identified by other interviewees. The four interview questions are:

Question 1: Where do you gather information from?

Question 2: How do you connect to this information?

Question 3: What internal repositories do you search?

Question 4: How often do you use the listed repositories?

Twelve interviews were carried out with different employees. The results are organised and presented in Figure 4 and Table 1. In Figure 4, the results of Information Sources are organised into the four System Modes, Mine, Trawl, Target, and Scan, presented earlier in Figure 3.

Starting with the bottom left quadrant, **Mine**; this box represents internal sources of information where the intelligence awareness and provision are known. These sources have been further separated into two columns, one for internally open-access documents and one for restricted access. Even for internal documents, departments have different accessibility protocols, making mining for information more difficult. Employees connect to these sources through computer access, and commonly email communication for restricted-access files.

The **Trawl** mode, is communicating internal information which is not yet formalised. It was found that there are many promotional events, technology fairs and social programs to facilitate communication about new projects and technologies being developed internally. This is particularly important for large OEMs where it is not feasible to communicate directly with all the individuals involved.

Now examining the external activities, the **Target** mode focuses on monitoring the development of new technologies. Based on the interviews, much technology development and monitoring is done through partnerships with universities and start-ups. To ensure development is going in the right direction, many different internal departments, outside of the production-unit design, are continuously in contact to gather requirements for new technology development. From the small number of interviews conducted, thirteen different departments are identified, all providing requirements and directional input for ongoing technology development. The connections for this mode are through regular verbal communication, meetings, and workshops.

Finally, the fourth mode, **Scan**, describes the act of externally scanning for new technologies and developments which could impact the business. For this mode, many different sources were identified, however, the regularity of usage is highly variable. For this reason, the sources of the Scan mode were examined in closer detail.

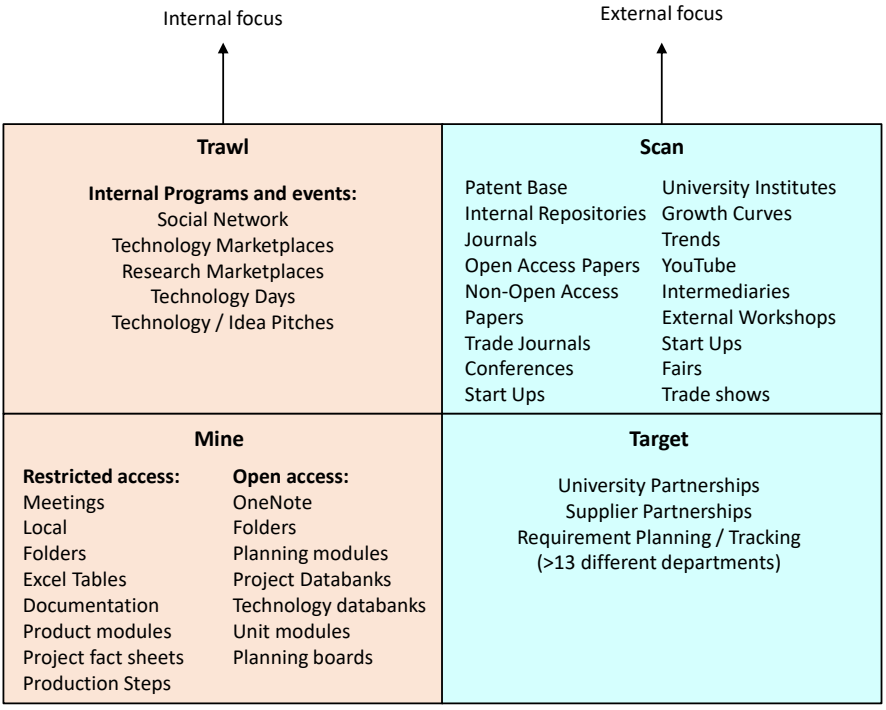



Figure 4: Information sources organised into the four Modes

The results of the Scan mode are shown in Table 1. The sources are categorized into columns to represent the first three element functions defined by the technology intelligence method by Mortana *et al.* described in Section 2 Previous Work. The Sources column refers to the function **storing the information.** The Connection column represents **connecting to information**, and the third column, Search, captures how often the different repositories are used, describing how often **searching the repositories** takes place. The sources have been sorted according to frequency of use. For example, how often a patent base search is performed, or how often trade shows are visited.

Table 1: Current State of Information Intelligence

| Source | Connection | Search (Often, Occasionally, Seldom) |
|---|---|---|
| Patent Base | Patent Search | Seldom |
| Journals | Subscriptions | Seldom |
| Open Access Papers | Bibliometric Analysis | Seldom |
| Restricted Access Papers | Bibliometric Analysis | Seldom |
| Trade Journals | Subscriptions | Seldom |
| Conferences | Participation | Seldom |
| Start Ups | Web Search | Seldom |
| University Institutes | Visitations | Occasionally |
| Growth Curves | External Analysis - Presentation | Occasionally |
| Trends | External Analysis - Presentation | Occasionally |
| YouTube | Video searches | Occasionally |
| Intermediaries | Hired consulting | Occasionally |
| External Workshops | Verbal communication | Occasionally |
| Start Ups | Pitches and events | Often |
| Fairs | Subscriptions and Visitations | Often |
| Trade shows | Participation and visitation | Often |

## 5 Results and Discussion

As expected, interviews identified a wide variety of types of information and multiple sources. It can be seen in Table 1 that the sources used the least are those originating from academia (for example, journal papers and patents). All repositories that require more extensive searching or reading are used less often, than repositories where information is more readily communicated, either verbally or through presentations. These results correspond with the literature that suggests communication with experts is used more often than academic and science-based sources, confirming that the sources most frequently used are those most easily accessed. This identifies the **connecting to information** function as a very influential factor in the intelligence system. Therefore, potential improvements could be made by making scientific information more easily accessible.

Requirements for an AI assistant can now be extrapolated from the results. The sources in Table 1 which are searched for "seldom" require more support.

The connection to the information from these sources needs to be made easier in order for them to be used more often. A useful AI should therefore be able to read patents, journals, papers, trade journals, and conference proceedings. Not only must they be read, but sorted through based on the information requirements of the department. With a small sample size of only twelve interviews, the results cannot be taken as conclusive evidence. Additionally, while the results might suggest the problem of information overload as the cause for the lack of extensive searching, it cannot be concluded without further investigation, using either a larger sample size or additional questions.

## 6 Conclusion and Outlook

This paper examined the department's internal technology intelligence system and revealed findings consistent with the literature on the subject. The information sources being least used correspond with those requiring the most reading or searching effort. This indicates information overload as a likely cause for the lack of use of these academic sources. The least used information sources can benefit through support by AI. The current analysis provides user-oriented requirements, assuring a practical assistant that is industry applicable.

Further work should include an evaluation of existing AI with regard to the support requirements identified in this paper. With an AI assistant performing more information scanning and therefore reducing scanning time, there is an opportunity for new sources of information to be examined. Research is required to determine what additional information, tools, or methods could optimally support the intelligence system. Additionally, the approach must be verified and validated.

## Literature


[1] Tschirky, H., "Konzept und Aufgaben des Integrierten Technologie-Management". In: *Technologiemanagement: Idee und Praxis.* Verlag Industrielle Organisation, Zurich, 1998.

[2] Halicka, K., "Main Concepts of Technology Analysis in the Light of the Literature on the Subject", *Procedia Engineering,* Vol. 182, pp. 291-298, 2017

[3] Thom, N., "Methods and tools of corporate technology foresight". *Problemy Eksploatacji* - Maintenance Problems, Vol. 3, ITeE - PIB, Radom, pp. 57-68, 2010

[4] Kerr, C.I.V., Mortara, L., Phaal, R., Probert, D.R., "A conceptual model for technology intelligence", Int. J. Technology Intelligence and Planning, Vol. 2, No. 1, pp. 73-93, 2006.

[5] Pahl, G. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung", Springer-Verlag, Berlin, 2013.

[6] Eckert, C. M., Clarkson, J.P., Stacery, M.K. "Information flow in engineering companies: Problems and their causes", ICED 01, Glasgow, 2001.

[7] Strother, J.B., Ulijn, J.M, Fazal, Z. Information Overload: An International Challenge for Professional Engineers and Technical Communicators, IEEE, pp.1-12, 2012.

[8] Simon, H.A., *The Sciences of the Artificial*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

[9] Rohrbeck, R., "Technology Scouting – a case study on the Deutsche Telekom Laboratories", ISPIM-Asia, New Delhi, 2007.

[10] Mortara, L., Kerr, C.I.V., Phaal, R., Probert, D.R.. „A toolbox of elements to build technology intelligence systems". International Journal of Technology Management 47, pp. 322-345, 2009.

[11] Allen, T.J., *Managing the Flow of Technology*, MIT Press, Cambridge, 1994.

[12] Poole, D., Mackworth, A., Goebel, R., *Computational Intelligence: A Logical Approach.* Oxford University Press, New York pp. 1-22, 1998.

[13] Lomas, N., Iris is an AI to help science R&D. Tech Crunch, December 5, 2016. Retrieved from https://techcrunch.com

[14] Findest, Technology Scouting, 2018. Accessed February 8, 2018. Retrieved from www.findest.eu

[15] Richtlinie VDI 2221 : Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf : VDI, 1993.

# Modellbasierte Unterstützung der Entwicklung modularer Produktfamilien

Michael Hanna[1], Dieter Krause[1]

[1] *Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik; TU Hamburg*

## Abstract

The product development of modular product families is often document-based, which can lead to inconsistencies. This paper describes a model-based approach to consistently implement the document-based development process of modular product families. For this purpose, Model Based Systems Engineering is compared with the development of modular product families. Based on this, a data model for the Design for Variety and Life Phases Modularization of the Integrated PKT-Approach will be presented, in which all the elements used are displayed and linked in a consistent and traceable manner. This model is then modeled using the modeling language Cameo Systems modeler so that the tools can be used consistently to develop modular product families.

*Keywords: Model based Systems Engineering, Design for variety, Modularisation, Consistency*

## 1 Einleitung und Motivation

In der Industrie verläuft die Produktentwicklung basierend auf einzelnen Dokumenten, die nicht miteinander verknüpft sind. Dadurch ist keine Durchgängigkeit gewährleistet und es kann zu redundanten Informationsquellen kommen. Vorhandene Modelle, wie CAD oder FEM, sind dadurch nicht konsis-

tent und führen dazu, dass Änderungen aufwändig und fehleranfällig sind [1]. In der Methodenentwicklung werden die benötigten Informationen ebenfalls nur in Dokumenten abgelegt und vorhandene Modelle einzelner Methodenschritte sind, sofern vorhanden, nicht miteinander verknüpft.

Besonders bei Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien tritt dieses Problem der Inkonsistenz häufig auf, da dort zahlreiche Daten verwendet werden, die aber nicht konsistent miteinander verknüpft werden. Modulare Produktfamilien werden verwendet um einerseits eine hohe externe Vielfalt anbieten zu können und gleichzeitig die interne Vielfalt zu reduzieren [2]. Der Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien beinhaltet als die beiden wesentliche Methodenbausteine die variantengerechte Produktgestaltung, um die Produktstruktur näher an das Idealbild variantengerechter Produktstruktur zu bringen und die Lebensphasenmodularisierung, um eine auf alle Lebensphasen harmonisierte Modularisierung zu erreichen. Dazu sind zahlreiche Visualisierungswerkzeuge vorhanden, welche nicht konsistent miteinander verknüpft sind und häufig papierbasiert oder PowerPoint-basiert erstellt und bearbeitet werden [2]. So führt die Änderung eines Elementes in einem Werkzeug nicht automatisch zu einer Änderung eines Elements in einem anderen Werkzeug. Eine Versionierung, um unterschiedliche Entwicklungsstände zu erstellen und zu dokumentieren, ist somit ebenfalls nicht gegeben. Darüber hinaus sind die beiden Methodenbausteine weder miteinander, noch mit den im Unternehmen vorliegenden Informationen verknüpft. So könnten die Daten aus der Konstruktion wie beispielsweise CAD-Modelle oder Stückzahlen, aber auch Kosteninformationen oder Stakeholderanforderungen nicht direkt übertragen werden. Dadurch können Inkonsistenzen auftreten und vernetzte Informationen nicht nachvollziehbar sein, was den Entwicklungsprozess modularer Produktfamilien erschwert. Mit dem Model Based Systems Engineering (MBSE) können die Elemente modelliert und die Informationen verknüpft werden, so dass Informationen in einem vernetzten Modell gespeichert und genutzt werden können. [3]

In diesem Paper wird dem Problem der Dateninkonsistenz bei der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien mit einem modellbasierten Vorgehen begegnet, in dem die Daten in einem durchgängigen Datenmodell modelliert werden. Ziel der in diesem Paper präsentieren Forschung ist die Verknüpfung von Modularisierungsmethoden und MBSE, um basierend auf dem konsistenten Datenmodell eine durchgängige und nachverfolgbare Entwicklung modularer Produktfamilien zu ermöglichen. Zur Umsetzung wird hierbei als MBSE-Tool Cameo System Modeler verwendet, welcher auf der Modellierungssprache SysML beruht. Dabei soll insbesondere der Frage nachgegangen werden, inwiefern modulare Produktfamilien modellbasiert

entwickelt werden können und ein Methodenanwender dabei unterstützt werden kann.

Im folgenden zweiten Kapitel wird der Stand der Wissenschaft zur Entwicklung modularer Produktfamilien und zum MBSE, sowie die verwendeten Begriffe und Methoden erläutert. Im dritten Kapitel wird das MBSE der modularen Produktstrukturierung gegenübergestellt, um im anschließenden vierten Kapitel das entwickelte Datenmodell zu beschreiben. Im fünften und letzten Kapitel wird aufgezeigt, wie das Grundmodell für die Entwicklung modularer Produktfamilie in MBSE mit Cameo modelliert werden kann und ein Ausblick für weitere Forschung in diesem Bereich aufgezeigt.

## 2 Stand der Wissenschaft

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für die Entwicklung modularer Produktfamilien sowie zum MBSE beschrieben.

### 2.1 Grundlagen der Entwicklung modularer Produktfamilien

Um eine hohe externe Varianz effektiv mit einer geringen internen Varianz anbieten zu können, wird häufig eine modulare Produktstrukturierung empfohlen [2]. Modularisierung kann dabei nach Salvador als eine graduelle Eigenschaft verstanden werden, welche charakterisiert wird durch die Eigenschaften kommunale Verwendung von Komponenten, Kombinierbarkeit von Komponenten, Schnittstellenstandardisierung und Entkopplung [4]. Komponenten können hierbei als kleinste zu betrachtende Einheit angesehen werden und können sich aus Bauteilen und Baugruppen ergeben [2].

Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien lassen sich in produktstrategische und technisch-funktionale Modularisierungen einteilen. Modularisierung auf Ebene der Technik kann mit der Integration Analysis Methodology auf Basis einer Design Structure Matrix nach Steward [5] durchgeführt werden. Dabei werden die einzelnen Komponenten nach räumlichen, energetischen, Material und Informationsfluss-Kopplungen gegeneinander bewertet und basierend darauf Module gebildet [6]. Dabei kann mit der Software Microsoft Excel gearbeitet werden. Bei den Heuristiken nach Stone werden die drei Heuristiken Dominanter Fluss, Verzweigter Fluss und Wandlung und Übertragung angewendet und basierend darauf die Modularisierung durchgeführt [7]. Eine Methode, um nach produktstrategischen Aspekten zu Modularisierung, stellt das Modular Function Deployment nach Erixon da, wozu unternehmensspezifische Modultreiber jeder Lebensphase identifiziert werden, die Grundlage für die Modulbildung sind [8]. Der Integrierte PKT-Ansatz berück-

sichtigt beide Aspekte und beinhaltet als wesentliche Methodenbausteine die variantengerechte Produktgestaltung und die Lebensphasenmodularisierung. Bei der variantengerechten Produktgestaltung soll eine ideale variantengerechte Produktstruktur zur Reduzierung der internen Vielfalt erstellt werden. Dazu werden als unterstützende Visualisierungswerkzeuge verwendet, wie dem Module Interface Graph zur Darstellung der Komponenten, ihrer Form, Art der Varianz und deren Flüsse verwendet. Im Variety Allocation Model wird die externe Vielfalt beschrieben durch die kundenrelevanten Eigenschaften über die varianten Funktionen und Wirkprinzipien mit den Komponenten verknüpft. Die Lebensphasenmodularisierung zielt darauf ab, die Komponenten in Module zu gliedern, wozu Modultreiberausprägungen der Lebensphasen einer Produktfamilie zur Modulbildung herangezogen werden. Dazu werden als unterstützende Werkzeuge der Netzplan für die Modularisierungen jeder Lebensphase und der Module Process Chart, in dem die Modulwünsche alle Lebensphasen dokumentiert werden, herangezogen. Diese Werkzeuge werden häufig in PowerPoint erstellt und bearbeitet oder aber händisch papierbasiert. [2]

## 2.2 Grundlagen des Model-Based Systems Engineering

Durch das Model Based Systems Engineering wird anstelle einer dokumentenbasierten Produktentwicklung eine modellbasierte Produktentwicklung durch ein durchgängiges und vernetztes Modell ermöglicht. Durchgängigkeit kann durch drei Dimensionen beschrieben werden. Die zeitliche Durchgängigkeit ermöglicht, dass Modelle erweiterbar sind. Eine hierarchische Durchgängigkeit meint, dass je nach Phase unterschiedliche Detaillierungsebenen betrachtet werden können. Die Durchgängigkeit über verschiedene Modelle hinweg ist notwendig, um Konsistenz zu ermöglichen. Zwei Modelle eines Produktes dürfen sich nicht widersprechen [1]. Ein Modell kann dabei nach Alt als eine abstrakte Beschreibung der Realität verstanden werden [3]. Stachkowiak definiert drei Hauptmerkmale des allgemeinen Modellbegriffs. Das Abbildungsmerkmal meint, dass Modelle Abbildungen von etwas sind. Durch das Verkürzungsmerkmal wird beschrieben, dass Modelle meist nicht alle Attribute des Originals darstellen. Das Pragmatische Merkmal meint, dass Modelle nicht immer eindeutig dem Original zugeordnet werden können [9]. Hierbei kann auch zwischen strukturgleichen Modellen, bei denen jedes Element eines realen Systems ein Element im Modell gegenübersteht, und strukturähnlichen Modellen, wo weniger wichtige Elemente im Modell vernachlässigt werden, unterschieden werden [10].

Ein System kann als ein integrierter Satz an Elementen oder Subsystem verstanden werden, wobei Elemente hierbei Produkte, Prozesse, Personen,

Informationen oder weitere Elemente umfassen können [2]. Ein System nach Ropohl kann durch drei Bereiche beschrieben werden. Es besitzt Beziehungen zwischen den Attributen, besteht aus miteinander verknüpften Teilen oder Subsystemen und grenzt sich von seiner Umgebung ab [11]. Der Begriff Systems Engineering beschreibt Methoden zur erfolgreichen Entwicklung von Systemen [12]. Durch die drei Bausteine Systemarchitektur, Systemanforderungen und Systemverhalten ist das Systems Engineering aufgebaut [2]. Um das Model Based Systems Engineering umsetzen zu können, sind Sprachstandards vorhanden, wozu SysML zählt, welche als grafische Programmiersprache eine intuitive Bedienung ermöglicht. Die Modellierungssoftware Cameo System Modeler nutzt die SysML Notation und ergänzt diese um weitere Diagramme und Tabellen [2].

## 3 Gegenüberstellung des MBSE und der modularen Produktstrukturierung

In diesem Abschnitt wird das MBSE der Entwicklung modularer Produktfamilien gegenübergestellt. Dafür werden im ersten Abschnitt vorhandene Ansätze aus der Literatur analysiert, inwiefern sie ein durchgängiges Modell zur Entwicklung modularer Produktfamilien und dem Variantenmanagement liefern.

Bursac definiert ein Framework für die Verwendung von MBSE zur Entwicklung von Baukästen in der Produktgenerationsentwicklung [1]. Unterschiedliche Modellierungsmethoden für die Baukastenentwicklung werden bei Scheerer untersucht [13]. Weilkins beschreibt die Modellierung von Varianten mittels MBSE durch Variationspunkte, Variantenelemente, Variantenkonfigurationen und Variantenrandbedingungen [12]. Ansätze zur Verknüpfung des MBSE in der variantengerechten Produktfamilienentwicklung liefern Bahns et al. und Hanna und Krause [14] [15]. Ein durchgängiges MBSE-Modell für die Entwicklung modularer und variantengerechter Produktfamilien ist somit noch nicht gegeben. Verwendet man die definierten Begriffe des MBSE für die Entwicklung modularer Produktfamilien, so kann die Modularisierung als Ganzes als ein System bezeichnet werden, da dabei vernetzte Elemente und Subsysteme vorhanden sind. Ein Abbild davon kann dann das Modell der Modularisierung sein, da es das System verkürzt abbildet und nicht immer eindeutig dem Original entspricht. Dabei können die verwendeten Werkzeuge Teilmodelle sein, wie beispielsweise der Netzplan oder die DSM, in der die Systemelemente abstrahiert als Modellelemente miteinander verknüpft werden. Modellelemente können hierbei beispielsweise Komponenten oder aber auch Module sein. Sie kommen wiederholt in unterschiedlichen Modellen vor (siehe Bild 1).

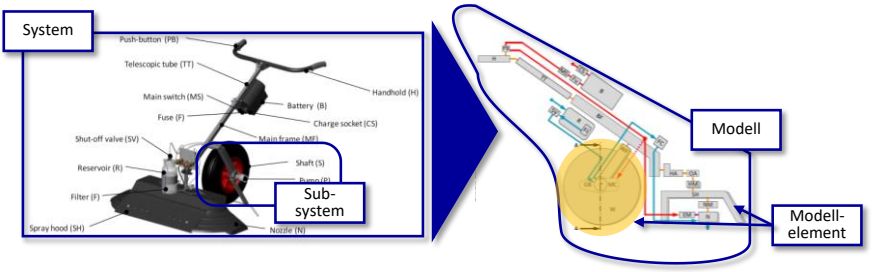



Bild 1: Verständnis der Grundlegenden Begriffe in diesem Paper am Beispiel des Module Interface Graphs nach [16]

Die Methoden zur Entwicklung modularer oder variantengerechter Produktfamilien haben damit häufig modellbasierte Anteile, da sie auf Modellen als visuelle Werkzeuge basieren. Sie stellen eine Abstraktion der Realität dar und Reduzieren das System auf das wesentliche. Allerdings liegt diesen Methoden kein Gesamtmodell zugrunde, in der alle verwendeten Elemente durchgängig und nachverfolgbar miteinander verknüpft sind. Beim Integrierten PKT-Ansatz werden bei der variantengerechten Produktgestaltung die Elemente Komponente sowohl im MIG als auch im VAM verwendet. Gleichzeitig aber auch bei der Lebensphasenmodularisierung in den Netzplänen der einzelnen Lebensphasen und im MPC. Diese Komponenten müssen in jedem Werkzeug einzeln erstellt werden. Außerdem führt eine Änderung an der Komponente dazu, dass sie in allen Werkzeugen geändert werden muss, in denen sie verwendet wird. Neben einem hohen Aufwand stellt das auch eine hohe Fehleranfälligkeit. Da diese Werkzeuge zwar modellbasiert arbeiten, aber kein Gesamtmodell der Methoden vorliegt, können die Methoden als Teil-modellbasiert angesehen werden. Die Verwendung von zahlreichen Office-Tools zeigt, dass die Methoden softwarebasiert unterstützt werden. Allerdings sind auch hier papierbasierte Anteile möglich, wenn beispielsweise beim PKT-Ansatz händisch Modulwünsche eingetragen werden. Diese dokumentenbasierte Entwicklung führt zu den oben beschriebenen Inkonsistenzen und kann durch ein modellbasiertes Vorgehen behoben werden.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie ein Gesamtmodell als Grundlage für die Verwendung eines MBSE-Tools verwendet werden kann.

# 4 Modellierung eines Datenmodells zur Entwicklung modularer Produktarchitekturen

Die Gegenüberstellung im vorherigen Kapitel zeigt, dass es ein Gesamtmodell zur Entwicklung modularer Produktfamilien benötigt wird, um Durchgängigkeit und Nachverfolgbarkeit zu gewährleisten. In diesem Kapitel wird ein Ausschnitt des Datenmodells für die Methodenbausteine variantengerechte Produktgestaltung und Lebensphasenmodularisierung gezeigt. Dabei sind zum einen die Modellelemente miteinander durchgängig verknüpft, als auch die verwendeten Werkzeuge, welche Untermodelle darstellen, abgebildet. Darüber hinaus ist die Dimension Versionierung eingefügt, welche die Modellelemente anzeigt, die in unterschiedlichen Versionen vorliegen.

In Bild 2 ist dargestellt, wie die drei beschriebenen Arten der Durchgängigkeit abgebildet werden.

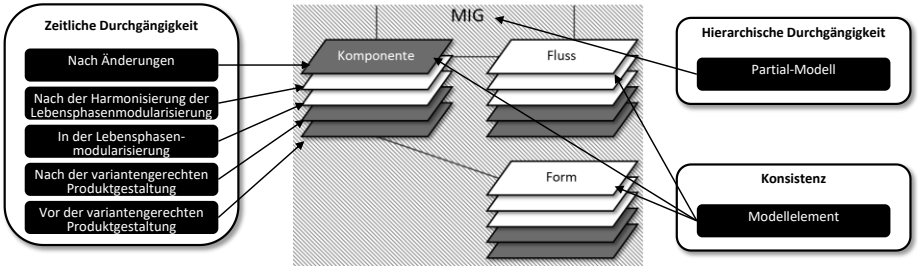



Bild 2: Durchgängigkeit des Datenmodelles am Beispiel des MIG

Um die Konsistenz zu gewährleisten, werden die Modellelemente definiert, die nur einmal im Datenmodell vorkommen dürfen. Eine zeitliche Durchgängigkeit wird hier durch die unterschiedlichen Layer beschrieben. Sie stehen für die unterschiedlichen Versionen, in denen ein Element vorliegen kann. Grau hinterlegt sind die Versionen, die in einem Werkzeug verwendet werden. Die Durchgängigkeit über unterschiedliche Hierarchieebenen wird durch die farblich markierten Teilmodelle visualisiert. Beispielsweise beinhaltet der Module Interface Graph (MIG) zur Darstellung der Internen Vielfalt neben den Komponenten, die in drei Versionen vor-liegen, die Flüsse zwischen den Komponenten und ihre Form. In Bild 3 ist das gesamte Datenmodell für die variantengerechte Produktgestaltung und die Lebensphasenmodularisierung abgebildet.

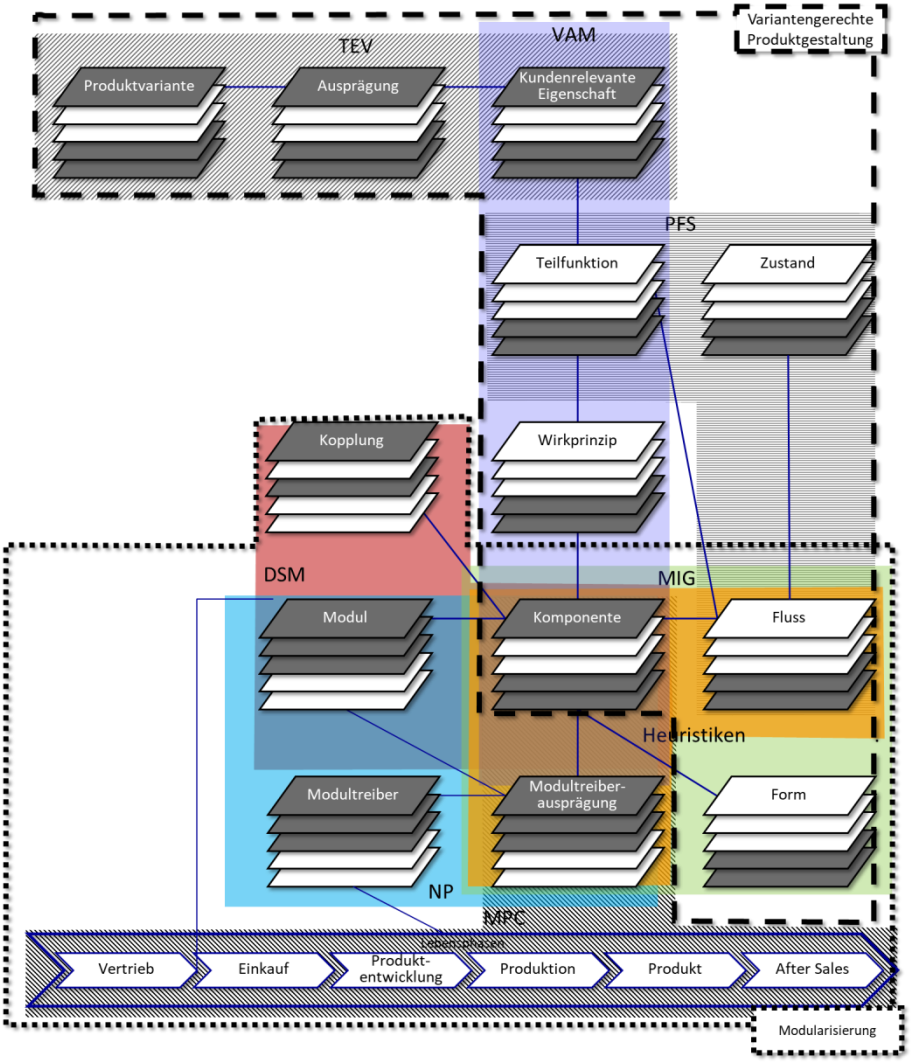



Bild 3: Datenmodell zu den Methodenbausteinen variantengerechte Produktgestaltung und Lebensphasenmodularisierung

Da in diesem Datenmodell jedes Modellelement nur einmal existiert, ist keine Redundanz an Informationen vorhanden. Die Verwendung der Modellelemente in den unterschiedlichen Modellen wird somit deutlich und damit auch, welche Auswirkungen auf welche Modelle eine Änderung eines Modellelementes liefert. So wird das selbe Element Komponente sowohl in den Modellen der Werkzeuge der variantengerechten Produktgestaltung (VAM,

MIG) als auch in den Werkzeugen der Modularisierung (Netzplan, DSM, MPS) verwendet. Durch die Verbindung der Elemente sind Informationen nun Rückverfolgbar. Durch die Darstellung der unterschiedlichen Versionen können Änderungen nun konsistent erfolgen. Die unterschiedlichen hierarchischen Leven ermöglichen die Durchgängigkeit durch die einzelnen Ebenen hindurch.

## 5 Anwendung des Modells und Ausblick

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie die Anwendung des Datenmodells auf die Entwicklung modularer Produktfamilien angewendet werden kann und welche weiteren Schritte im Rahmen dieser Forschung hier anknüpfen könnte. Zur Modellierung des Modells mittels einer MBSE-Software wurde der Cameo System Modeler verwendet. In Bild 4 ist die Verwendung der Daten dargestellt.

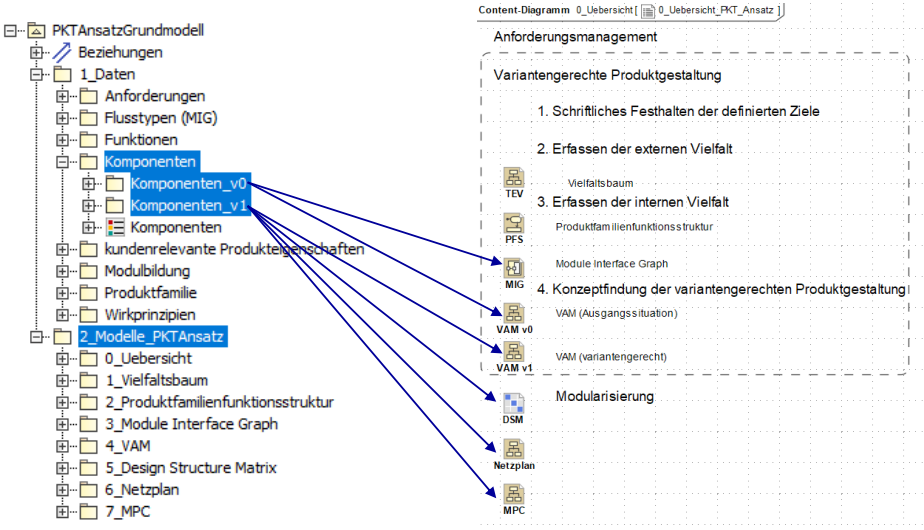



Bild 4: Konsistente Verwendung der Daten in den einzelnen Modellen

In Bild 4 ist links der Strukturbaum des Modells dargestellt und auf der rechten Seite die Schritte der variantengerechten Produktgestaltung sowie Icons, die mit den zugehörigen Modellen verlinkt sind. Auf oberster Ebene unter den Daten sind alle verwendeten Modellelemente zu finden. Dazu zählen die Komponenten, die hier zentral gespeichert werden und in den unterschiedlichen Modellen Verwendung finden (blau markiert). Dadurch ist eine Konsistenz gegeben, da die Änderung einer Komponente automatisch auch in

den Modellen, in denen sie Verwendung finden, geändert werden. Darüber hinaus ist der varianz-Bezug farblich hinterlegt.

In Bild 5 sind die Modelle vom Module Interface Graph und vom Variety Allocation Model abgebildet.

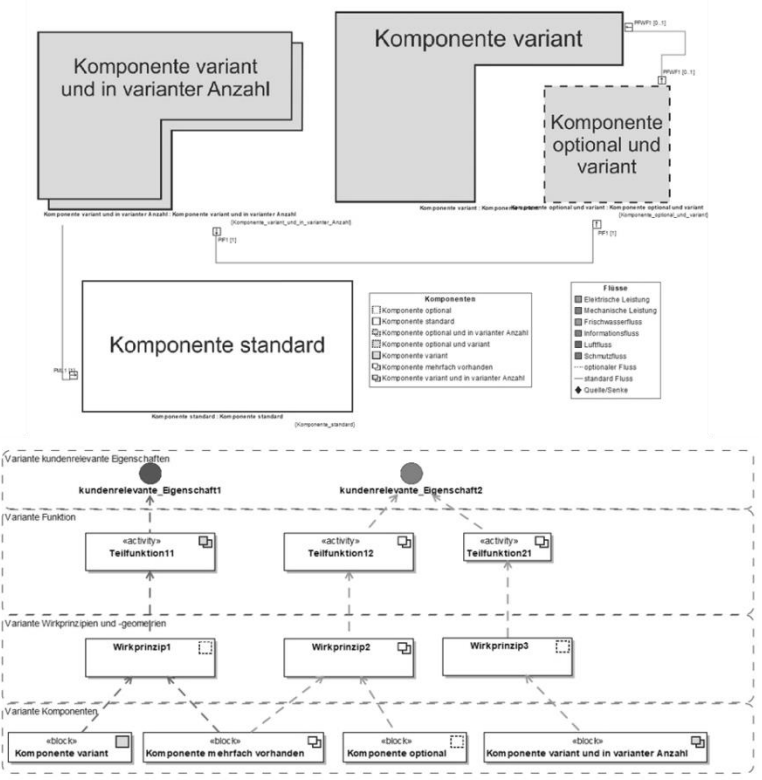



Bild 5: Modell des Module Interface Graph (oben) und des Variety Allocation Models (unten)

Im MIG sind die Komponenten als Interne Block Diagramme entsprechend der Art der Varianz (grau für variant, weiß für Standard) eingefärbt sowie Flüsse über Ports definiert. Im VAM sind die kundenrelevanten Eigenschaften über die Teilfunktionen und den Wirkprinzipien durchgängig mit den Komponenten verknüpft. Zusätzlich ist hier in der rechten oberen Ecke jedes Modellelements die Varianzart als Icon sichtbar.

Zukünftig könnte das Datenmodell um weitere Modularisierungsmethoden ergänzt werden, sowie eine Anknüpfung an die Unternehmensdaten bieten. Dabei kann einerseits auf eine Schnittstelle zur Unternehmensdaten der Produktentwicklung hinzugefügt werden. Andererseits kann eine Einbeziehung eines Kostenmodells die Entwicklung modularer Produktfamilien kostenbegleitend unterstützen. Einen ersten Ansatz zu Produktfamilienentwicklung mittels des integrierten PKT Ansatzes basierend auf Kosten kann dabei Verwendung finden [17]. Auch die Möglichkeit, Produktvarianten direkt konfigurieren zu können, könnte basierend auf den Ergebnissen modellbasiert ermöglicht werden.

## Literatur


[1] Bursac, N.: „Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung", IPEK, 2016

[2] Krause, D.; Gebhardt, N.: „Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien", Springer-Verlag, Berlin, 2018

[3] Alt, O.: „Modellbasierte Systementwicklung in SysML", Hanser, München, 2012

[4] Salvador F.; „Towards a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization", in: IEEE Transactions on Engineering Management, 2007, 54; S. 219-240.

[5] Steward, D.: "The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems", in IEE Transactions on Engineering Management, Vol. 28, No. 3, New York, 1981

[6] Pimmler, T. U.; Eppinger, S.D.: "Integration Analysis of Product Decompositions", in: Proceedings of the 6th Design Theory and Methodology Conference, New York, 1994, pp. 343-351

[7] Stone, R. B.: "Towards a Theory of Modular Design", University of Texas, Austin, 1997

[8] Erixon, G. (1998) "Modular function deployment: a method for product modularization", Royal Inst. of Technology

[9] Stachowiak, H.: „Allgemeine Modelltheorie", Springer, New York, 1973

[10] Domschke, W.: „Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre". Springer, 2008

[11] Ropohl, G.: "Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik". Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009

[12] Weilkins, T.: "Systems Engineering with SysML – UML", 2008

[13] Scherer, H.: "Model Based Methods for the Modeling of the System of Objectives and the Correlation between Form and Function to support the Series Development of Modular Systems Using the Example of Hybrid Powertrains", IPEK, 2016

[14] Bahns T., Melzer S., God R., Krause D.: „Ein modellbasiertes Vorgehen zur variantengerechten Entwicklung modularer Produktfamilien"; Tag des Systems Engineering 2015

[15] Hanna M.; Krause D.: "Model-based support for product family design", in: Proceedings of the 17th INTERNATIONAL DEPENDENCY AND STRUCTURE MODELING CONFERENCE, DSM 2017, Espoo, Finnland, 2017

[16] Blees C., Jonas H., Krause D.: „DEVELOPMENT OF MODULAR PRODUCT FAMILIES" in: Proceedings of the 17th INTERNATIONAL DEPENDENCY AND STRUCTURE MODELING CONFERENCE, DSM 2010, CAMBRIDGE, UK, 2010

[17] Hanna M.; Ripperda S.; Krause D.:"COST BASED DESIGN OF MODULAR PRODUCT FAMILIES USING THE EXAMPLE OF TEST RIGS" In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 3: Product, Services and Systems Design, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017.

# „Feedback to Design with Digital Lifecycle-Twins – literature review and concept presentation"

Theresa Riedelsheimer[1], Kai Lindow[1], Rainer Stark[1]

[1] *Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK; Fraunhofer Gesellschaft*

## Abstract

In this paper, the authors propose a concept for optimizing the design process as well as product-related features and services through learning from Digital Twin data and establishing a continuous feedback loop from downstream phases of the product lifecycle to the design phase. As a first step, a systematic review of existing concepts in literature as well as a gap analysis is conducted. The presented concept details existing Digital Twin concepts and implementations by focusing on the specific objective of realizing Feedback to Design and integrating the lifecycle aspect.

*Keywords: Digital Twin, Feedback to Design, Product Lifecycle Feedback, Design Optimization*

## 1 Introduction

Nowadays, many companies are struggling with the continuous information flow between product design and the downstream phases of the product lifecycle [1]. Design for X (DfX) is a well-known approach, but the optimal monitoring and optimization of the proposed objectives is still an unsolved issue. This issue is addressed by the concept of Feedback to Design (F2D) from

later lifecycle phases of products. At the same time, the complexity and intelligence of products is increasing with the enhancement to Cyber Physical Systems (CPS) and IoT-based products. In the framework of Industry 4.0 (I4.0), the concept of Digital Twins (DT) of products is discussed and promoted in research and industry. One basic feature of a DT is the collection, storage and analysis of product-specific data along different phases of the Product Lifecycle (PLC) and therefore the accumulation of an enormous data and information basis on the actual life of a product. Hence, it could serve as a suited mean for enhancing F2D. The overall goal of this paper is to extend or develop a concept for a closed feedback loop to design with Digital Lifecycle Twins (DLT), a topic that is currently not sufficiently explored. Accordingly, the first goal is to identify or develop a suitable concept by analyzing existing concepts in literature and conducting a gap analysis. Secondly, the enhancement of the existing F2D-concepts is targeted by proposing a first draft of the concept with DLTs. The following research questions are derived: (1) *Which concepts exist for F2D and DT?* (2) *Which challenges arise from traditional existing F2D-concepts?* (3) *Are any of the existing concepts based on the application of a DT and what are their characteristics?* (4) *How can a DT be designed to enable automated F2D?*

## 1.1 Feedback to Design (F2D)

According to Vardanega et al., F2D describes the process in which the results from analyzing a product's lifecycle and deriving corrective measures are fed back to the design level. "Basically, during a product's life, the analysis ensures that the system implementation meets the designated requirements. The determined measures are then fed back in order for the designer to keep current the actual real-time attributes of the system and either conclude the design process or perform further steps of design (and/or implementation) increment and corrective iteration." [2]. F2D can be classified into personalization and codification approaches [1]. The personalization approach focuses on communication with customers and communities and therefore on personal and informal data collection. Codification implies formal and automated capturing of the feedback. Most F2D approaches are part of knowledge management and focus on specific phases of the PLC, mainly the use phase. In traditional approaches the optimization influences the next product generation [3] and uses interpersonal feedback from the customers in the form of call center data [4] or service and repair events [1] to enhance product quality and reliability. More current research integrates automatic data collection and transfer with e.g. CPS of machinery [5].

The main challenges of traditional F2D concepts stated in literature are (1) the lack of quantifiable benefits and incentives for stakeholders to contribute to

F2D, and (2) the diverse and unstandardized processes with regard to product and feedback collection. The third main challenge is seen in the data collection, transfer and analysis (3): heterogeneous IT-systems, sources and information quality hinder a standardized and fast data collection. Overall, there is a high demand for data protection. Most of these challenges can be addressed by implementing an automated and codified process of F2D considering security aspects and developing new business models. The authors therefore propose the application of a DT in this context.

## 1.2 Digital Twin (DT)

"A DT is the digital representation of a unique asset (product, machine, service, product service system or other intangible asset), that compromises its properties, condition and behavior by means of models, information and data." [6, p. 1]. [7] propose that the DT is an integrated model of an existing product or a product in development, which represents all the relevant information about its lifecycle. The DT shall continuously display the current state of the physical product [8]. Originally, the concept was developed and described by NASA to simulate the performance of a spaceship before the use phase and to predict critical behavior [9]. While in the early publications the focus of the definition was put on the simulation aspect, nowadays research extends the spectrum. The DT is seen as an important mean for an effective Product Data Management (PDM), consequently an integral part for Product Lifecycle Management (PLM) [6] and new business models. Stark et al. describe an instance of a DT as a combination of the *as designed*-status – the universal Digital Master model –, the current status, condition and behavior – the Digital Shadow – and an intelligent linkage, such as data analytics or a simulation model [6, p. 2]. Oftentimes, the term DT is used in the same context as the terms digital thread, product avatar, digital or virtual surrogate. F2D is seen as one specific objective or application of a DT. The state of the DT is still on a research level with first exemplary demonstrators in industry. The implementation of a DT differs significantly with its use case (e.g. product type, objective), which demands for individual solutions and/or specific lifecycle phases, e.g. manufacturing. The focus of traditional F2D approaches lies on the use phase of a product and the selective feedback of maintenance events. The most research on DT applications on the other hand is conducted within the manufacturing environment. Because a DT application could present a solution to many classical F2D-problems, the following requirements are postulated for an integrated concept of F2D with DTs: (1) *F2X as objective*: The concept shall focus on feeding back information from a later lifecycle phase. (2) *Mean*: The concept shall use CPS or other means to support automated (not manual or personal) and continuous feedback. (3) *Product lifecycle perspective*: The concept shall focus on

feedback from all lifecycle phases of a product or system. (4) *Information flow* of feedback: The concept shall specify the information flow and content. (5) *DT Lifecycle Perspective*: The concept shall specify the lifecycle of the DT and put it into relation with the PLC.

## 2 Research Approach

The approach chosen to achieve the overall goal is an action research method following [10] as well as a systematic literature review and mapping approach described in [11] following [12] (see Figure 1). In this paper, the first three steps of exploration, gap analysis and concept definition are described. For the gap analysis, a systematic review of all existing concepts in literature was conducted. Based on the findings, a suitable concept for F2D with DTs is developed.

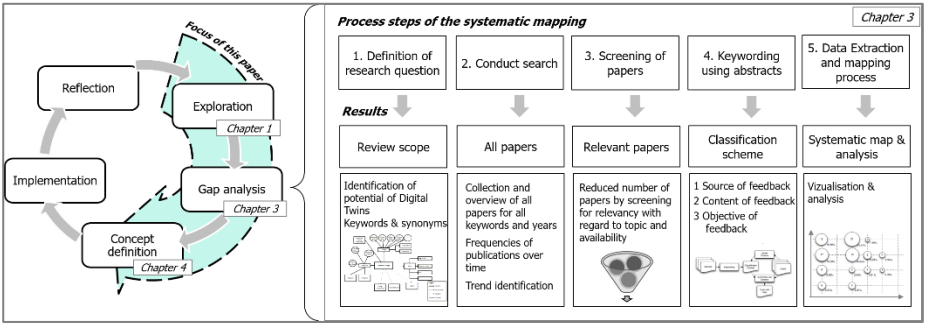



Figure 1: The approach – action research and systematic literature mapping following [10] and [11]

## 3 Systematic mapping of literature

### 3.1 Definition of review scope

The review scope is derived from the research questions. The authors used the database Web of Science for the research, because it is one of the most extensive research bases. In an iterative process, the keyword sets were refined (see Table 1) and terms with double meaning eliminated.

Table 1: Keyword sets

| Set ID | Web of Science search string (TS: Topic, SU: Research area, OR/AND: logical operators, *: Wild-card for any character, "": Exact phrase) |
|---|---|
| 1 | TS=("feedback*" OR "response*" OR "assessment*" OR "evaluation*" OR "data" OR "information" OR "input") AND SU=(ENGINEERING OR COMPUTER SCIENCE) |
| 2 | TS=("Design*" OR "development*" OR "conception*") AND SU=(ENGINEER-ING OR "COMPUTER SCIENCE") |
| 3 | TS=( "DT*" OR "Virtual Twin*" OR "Digital* Thread*" OR "Digital Shadow*" OR "Virtual* Thread*" OR "Virtual Shadow*" OR "Digital Surrogate*" OR "Vir-tual Surrogate*" OR "Digital* Master*" OR "Virtual* Master*" OR "product av-atar*") AND SU=(ENGINEERING OR "COMPUTER SCIENCE") |
| 4 | TS=( "cyber physical system*" OR "cyber-physical system*" OR "cyber-physi-cal-system*") AND SU=( ENGINEERING OR "COMPUTER SCIENCE") |

## 3.2 Literature overview

In this chapter, all papers for the keyword set #1 and #2 and (#3 or #4) are presented. The search was last executed in July 2018 and resulted in 1,029 papers. First, all papers were analyzed for common trends. The following figure shows the twelve most frequently used author keywords by occurrence as well as their development over time. The most frequent used keyword is *Cyber Physical System* with 602 mentionings. Only 18 of the papers used *DT* as a keyword. This is because DT is a relatively new trend, as the timeline analysis (see Figure 2) illustrates.

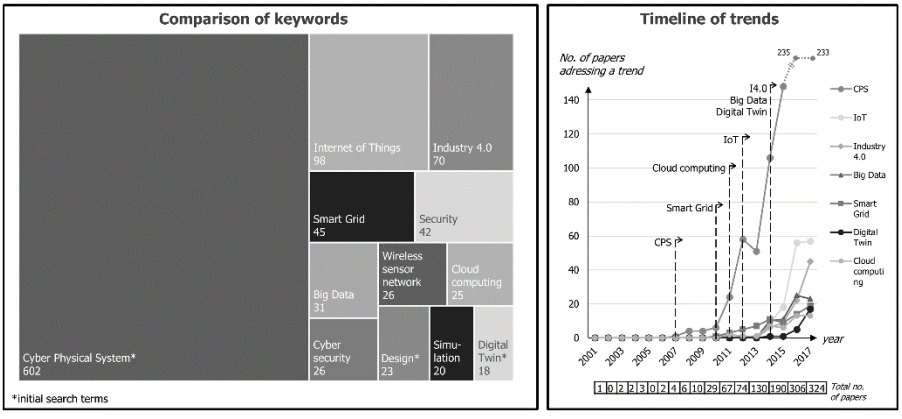



Figure 2: Related trend analysis

Figure 2 also shows the related technological trends *IoT*, *I4.0*, *Smart Grid*, *Big Data*, and *Cloud computing* and their mentions in the respective papers. In general, most of the research is accumulated in three countries: the United States, followed by the Peoples Republic of China and Germany.

## 3.3 Gap Analysis

To focus on new research topics and allow for a detailed analysis, the papers were screened for relevance. Those, which do not address the term DT were discarded. The screening of the remaining 66 papers was first focused on the title and abstracts of the paper. They were reduced to 36 primary papers, which all address the topic of feedback, design and DT. The keywording of the relevant abstracts led to a classification scheme with the categories approach of the paper, objective of the approach, product-type, content of the F2D as well as the lifecycle phases in form of information source and drain. In Figure 3, the analysis of the 36 papers is shown and the relevant gaps with regard to the postulated requirements are identified.

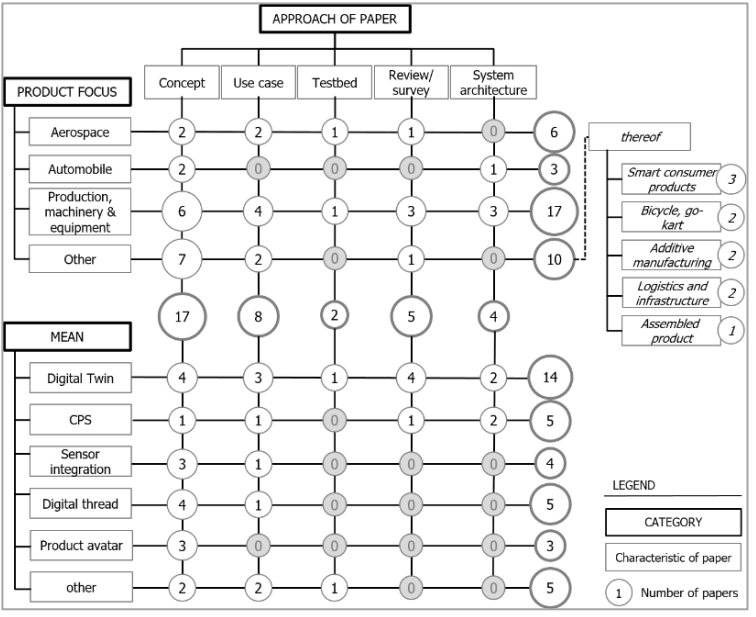



Figure 3: Results of the literature review: gap analysis

Most of the primary papers focus on the production environment, machinery or equipment and either provide a new concept or describe a use case.

Especially in the automotive industry, use cases, testbeds and surveys are missing. A gap is also identified in the definition of system architectures. Even though all papers address the topic of a DT in general, the chosen mean for F2D varies. A majority of the papers present new concepts, use cases and surveys. Figure 4 illustrates the clustering of objectives and lifecycle phases, which are stated as source for the feedback. The papers can be clustered in application areas: the feedback to product design, feedback to process design as well as an in situ optimization, i.e. source and drain being in the same phase of the PLC. The objective stated the most is optimizing the design of the product, especially for the category F2D, and process efficiency during manufacturing or the use phase. In summary, only a few papers partly meet the requirements (see chapter 1.2.3). The ones describing a feedback from the whole lifecycle, such as [13], do not specify on the information flow or the DT lifecycle.

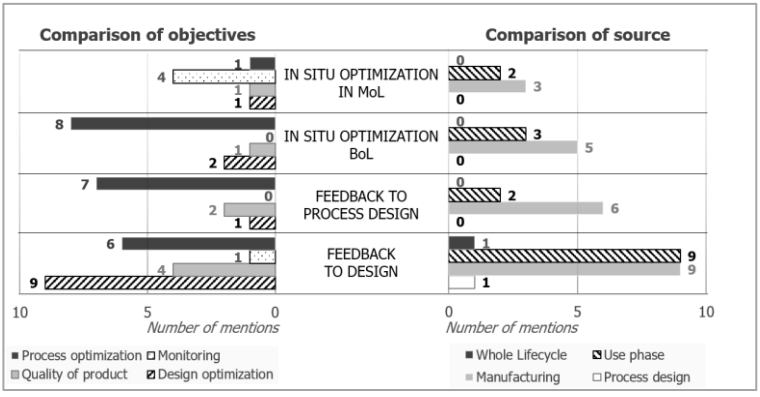



Figure 4: Results of the literature review: objectives and source of feedback

For simplification, for this paper, a factory or a production plant is also seen as a product, because it has a similar lifecycle structure and consists of several subsystems or products (such as machines). Therefore, the lifecycle is discussed analogous for products and factories, production plants – systems – and process design and design respectively.

## 4 Presentation of the concept

From the findings of the systematic literature mapping and the gap analysis, 19 papers were used as direct input for the concept development due to the described content [14–16], intelligence of the support system [17], product status [18], DT network [13, 19], service-integration [20] or detailed scenarios [21]. The derived concept of a DLT for F2D is shown in Figure 6. In general, a

DLT extends the current definition by Stark et al. to the whole lifecycle of the product and even beyond (see Figure 5). *The DLT is a digital replica of a product or system and its services containing and analyzing all relevant information of the whole lifecycle for a defined application.* The DLT evolves from a unique instance of its Digital Master Model – which defines the system's lifecycle - by integrating the system's individual digital shadow from Begin-of-Life (BoL) to End-of-Life (EoL).

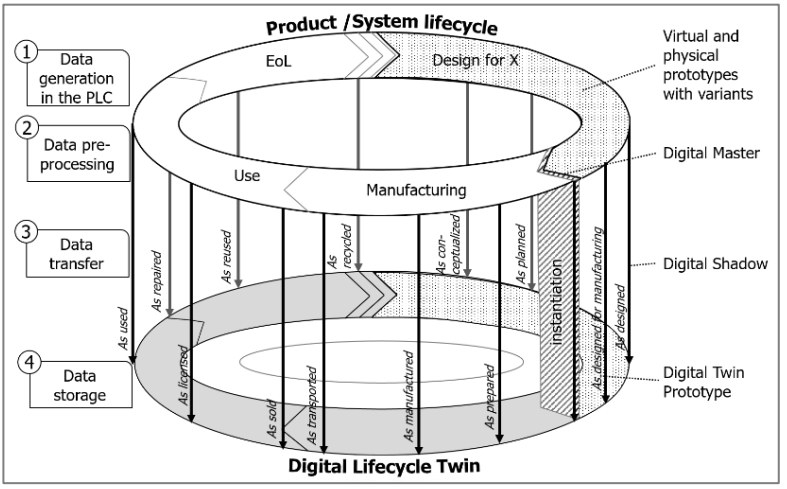



Figure 5: Concept for a Digital Lifecycle Twin following [6]

The DLT is using intelligent analysis and linkage to transform the collected data into valuable insights about the system. This decision support system can be implemented on several levels on the way to autonomous decision making. Therefore, the DLT contains data analytics, aiming at providing information on the status (monitoring), diagnosing it and interpreting the information (diagnosis), predicting the future status (prediction). On the highest level, an intelligent DLT will be supporting decisions or deciding and taking action autonomously.

Essentially, the idea of the presented concept of *DLT for F2D* is to collect system-individual insights from subsequent lifecycle phases and provide this valuable information to designers for optimizing product quality, design processes and product-accompanying services (see Figure 6). The proposed concept can be divided into the basic lifecycle phases of a product / system and its DLT. It is important to note that the DT of the whole lifecycle performs its own lifecycle, which is linked to the system but not necessarily the same. The *design phase* varies in its characteristics depending on the product type. Usually several products will be designed in the same process at the same time, leading

to a similar master model and similar design objectives. In design, a supported monitoring and optimization of the fulfillment of the objectives has a high impact and benefit. The feedback to the design phase allows the comparison of product states, such as *as designed* with *as manufactured*, *as in use* and *as reused*.

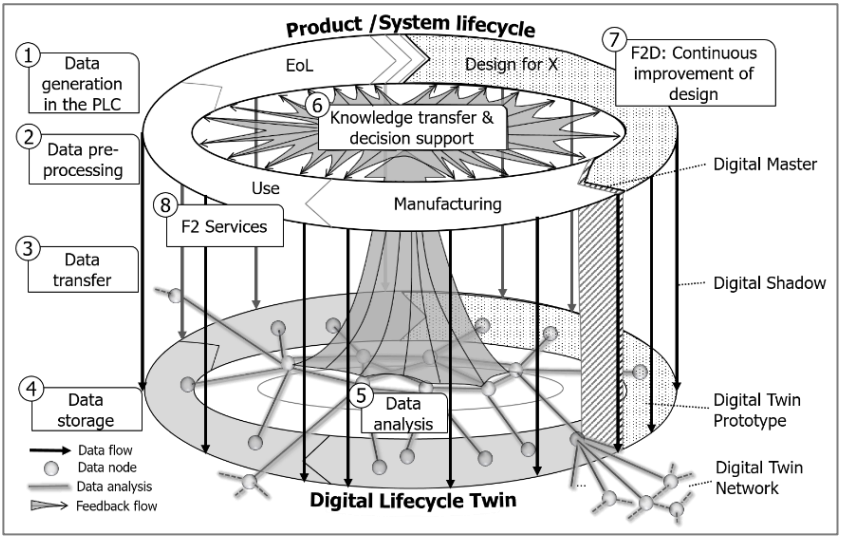



Figure 6: Concept for Feedback to Design with Digital Lifecycle-Twins

In the *manufacturing phase,* DLTs may also serve as a source of F2D engineers for upcoming engineering change orders, re-designs or new product designs [22]. Furthermore, a feedback loop upstream may inform engineers of the feasibility of their design for production. Lessons learned could be automatically added to the design knowledge saved in templates and archetypes. If applicable, the feedback from digital product twins may even trigger a design modification to better suit production requirements. In the *use phase,* information on the use of the product is collected and stored with the DLT to monitor DfX-objectives. An example would be the total operating time, energy consumption or data on the surroundings of the system to compare the real behavior of the system with the originally planned behavior. In the *End of Life (EoL)* phase, information of the product is collected and stored in the DLT to monitor DfX objectives, such as the percentage of material being recycled. The End-of Life of the product is not necessarily end-of-life of the DLT data, but the data might be reused depending on the data ownership and data storage. Additionally, the aggregated analysis of DT data can support a long term F2D and

serve as basis for the teaching of machine learning algorithms as part of DLTs in the future.

Overall, the specific characteristics of a DLT in the context of F2D are defined by the chosen objective for DfX during the design phase. One exemplary use case would be the monitoring of the sustainability of a product (Design for sustainability). During the lifecycle, a real time lifecycle assessment could be executed within the DLT. Therefore, a designer or a customer could know about the current sustainability status at all times and the DLT could function as decision support system.

## 5 Conclusion and outlook

The presented literature review showed gaps in the discussion and research on DTs and automated F2D. The concept for F2D with DLTs delineates from the state of the art of research, as it enhances F2D and details existing DT concepts and implementations by focusing on the specific objective of realizing F2D and integrating the lifecycle aspect. The authors argue that DLTs enable an enhanced automated real-time monitoring of the DfX-assumptions as well as support for continuous improvement of the design and services of systems. The DLT for F2D addresses most of the challenges of traditional F2D-approaches and the presented concept meets the postulated requirements. Nevertheless, some of the challenges remain to be solved. Especially the question of data ownership and data security [1, 23, 24] as well as lacking openness of the different stakeholders for cross-company collaboration can be showstoppers. Additionally, for industrial application it is necessary to weigh the benefit against the effort of implementation and the cost-intensive infrastructure [1] with a high security level [25]. The development of smart and data-driven services as well as a clear delineation of objectives will play an integral role for an establishment of the concept. As an outlook, the overall goal of the research will be targeted by identifying industrial needs and challenges for implementation based on the concept.

## References


[1] Igba, J.; Alemzadeh, K.; Gibbons, P. M.; and Henningsen, K., "A framework for optimising product performance through feedback and reuse of in-service experience," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 36, 2015, pp. 2–12.

[2] Vardanega, T. and van Katwijk, J., "Productive engineering of predictable embedded real-time systems: the road to maturity," *Information and Software Technology*, vol. 40, no. 13, 1998, pp. 745–764.

[3] Abramovici, M.; Neubach, M.; Fathi, M.; and Holland, A., "Knowledge Based Feedback of Product use information into product development," *International Conference on Engineering Design, Iced'09*, 2009.

[4] Magniez, C.; Brombacher, A. C.; and Schouten, J., "The use of reliability-oriented field feedback information for product design improvement: a case study," *Qual. Reliab. Engng. Int.*, vol. 25, no. 3, 2009, pp. 355–364.

[5] Brandmeier, M.; Bogner, E.; Brossog, M.; and Franke, J., "Product Design Improvement Through Knowledge Feedback of Cyber-physical Systems," *Procedia CIRP*, vol. 50, 2016, pp. 186–191.

[6] Stark, R.; Kind, S.; and Neumeyer, S., "Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017.

[7] Reid, J. B. and Rhodes, D. H., "Digital System Models: An investigation of the non-technical challenges and research needs," 2016.

[8] Negri, E.; Fumagalli, L.; and Macchi, M., "A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems," (English), *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim2017*, vol. 11, 2017, pp. 939–948.

[9] Shafto, M. *et al.,* "Modeling, simulation, information technology & processing roadmap," *National Aeronautics and Space Administration*, 2012.

[10] Yearworth, M. *et al.,* "Integrating Problem Solving and Research Methods Teaching for Systems Practice in Engineering," *Procedia Computer Science*, vol. 16, 2013, pp. 1072–1081.

[11] Petersen, K.; Feldt, R.; Mujtaba, S.; and Mattsson, M., "Systematic Mapping Studies in Software Engineering," *2008 - International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*, 2008.

[12] Kitchenham, B. and Charters, S., "Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering: EBSE Technical Report," EBSE-2007-01, 2007.

[13] Canedo, A., "Industrial IoT Lifecycle via Digital Twins," (English), *2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (Codes+Isss)*, 2016.

[14] Tao, F. and Zhang, M., "Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing," (English), *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 20418–20427.

[15] Siedlak, D. J. L. *et al.,* "A digital thread approach to support manufacturing-influenced conceptual aircraft design," (English), *Res Eng Design*, vol. 29, no. 2, 2018, pp. 285–308.

[16] Hribernik, K.; Wuest, T.; and Thoben, K. D., "A Product Avatar for Leisure Boats Owners: Concept, Development and Findings," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, v.409, *Product Lifecycle Management for Society: 10th IFIP WG 5. 1 International Conference, PLM 2013, Nantes, France, July 8-10, 2013, Proceedings*, A. Bernard, Ed., Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[17] Schuh, G. and Blum, M., "Design of a Data Structure for the Order Processing as a Basis for Data Analytics Methods," (English), *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (Picmet 2016): Technology Management for Social Innovation*, 2016, pp. 2164–2169.

[18] Rios, J.; Carlos Hernandez, J.; Oliva, M.; and Mas, F., "Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft," (English), *Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems*, vol. 2, 2015, pp. 657–666.

[19] Schluse, M.; Atorf, L.; and Rossmann, J., "Experimentable Digital Twins for Model-Based Systems Engineering and Simulation-Based Development," (English), *2017 11th Annual IEEE International Systems Conference (Syscon)*, 2017, pp. 628–635.

[20] Cheng, Y. *et al.,* "Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 97, no. 1-4, 2018, pp. 1209–1221.

[21] Tao, F. *et al.,* "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data," (English), *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 94, no. 9-12, 2018, pp. 3563–3576.

[22] Singh, V. and Willcox, K. E., "Engineering Design with Digital Thread," in *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Kissimmee, Florida, 2018, p. 16.

[23] Abramovici, M. *et al.,* "Decision support for improving the design of hydraulic systems by leading feedback into product development,"

[24] Olausson, D. and Berggren, C., "Managing asymmetries in information flows and interaction between R&D, manufacturing, and service in complex product development," *R&D Manage*, vol. 42, no. 4, 2012, pp. 342–357.

[25] Brunsmann, J.; Wilkes, W.; and Brocks, H., "Exploiting Product and Service Lifecycle Data," *PLM11 8th International Conference on Product Lifecycle Management*, pp. 309–318.

# Virtual Reality unterstützte Kreativitätstechnik: Vergleich mit klassischen Techniken

Iris Gräßler[1], Patrick Taplick[1]

[1] *Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung*

## Abstract

Virtual Reality carries promising potentials for enhanced creativity techniques. A comparison study was carried out to investigate differences of a new Virtual Reality (VR)-supported creativity technique ("Reizumgebungsmethode") and classical creativity techniques (Brainstorming, "Reizbildtechnik"). Consequently, the performance of the "Reizumgebungsmethode" was analyzed. Basis for the validation was an observation of probands in test scenario: Three tasks had to be solved by means of the aforementioned three different creativity techniques. Feedback by probands was collected with a questionnaire. Based on the results, guidelines and optimization potentials were identified to evolve VR-based creativity technique.

*Keywords: Virtual Creativity, Creativity techniques, Virtual Reality, Innovation*

## 1 Einleitung

Kreativitätstechniken werden zur Förderung der Kreativität eingesetzt und dienen somit der Generierung von Impulsen für innovative Ideen. Klassische Kreativitätstechniken unterliegen einigen Einschränkungen, wie beispielsweise der Ortsgebundenheit. Diese Ortsgebundenheit stellt für verteilt agierende

Entwicklungsteams eine Hürde dar. Die Zusammenkunft an einem Ort bedeutet für Unternehmen die Generierung von Reisekosten und für Projektmitarbeiter Reisestrapazen. Um es verteilt agierenden Entwicklungsteams zu ermöglichen über verschiedene Standorte miteinander zu interagieren, werden Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) eingesetzt. Interaktionen und Kommunikation von Projektteams im Kontext der Generierung neuer Lösungsideen führen dazu, dass konventionelle IKT an die Grenzen der Funktionalität stoßen. Aus diesem Grund ist es notwendig Technologien in den Kreativitätsprozess der Ideengenerierung einzubinden, die eine intuitive Interaktion und Kommunikation im verteilt agierenden Projektteam ermöglichen.

## 1.1 Motivation

Innovationen beruhen auf der Generierung neuer Ideen. Kreativität ist Voraussetzung bzw. Impulsgeber für die Ideengenerierung in Bezug auf verschiedene Merkmale eines Produktes. Beispielweise spielen die Relevanz, der Neuheitsgrad und die Originalität eine wichtige Rolle als Kriterien für Innovation [1, 2]. Kreativitätstechniken bieten in diesem Kontext die Möglichkeit, Individuen und Gruppen zu unterstützen. Diese Techniken müssen effektiv einsetzbar sein, um einem erhöhten Innovationsdruck zu genügen und eine verkürzte Time-to-Market zu erreichen. Virtual und Augmented Reality (VR/AR)-Technologie bietet Potenziale in Bezug auf einen intuitiven Zugang zu Informationen und die umfassende Dokumentation von Ideenfindungs-Prozessen [3]. Mittels VR können dynamische, visuelle Reize geschaffen werden, um die Effektivität und die Effizienz etablierter Kreativitätstechniken zu erhöhen [4].

## 1.2 Technologie-unterstützte Kreativität

Kreativität lässt sich nach Rhodes durch vier „P" beschrieben: Person, Prozess, Produkt und Umfeld (Pressure) [5]. Rhodes zeigt die multidimensionale Bedeutung der Kreativität und die Komplexität der kreativitätsförderlichen Einflüsse. Zur Beeinflussung der Kreativität werden Kreativitätstechniken eingesetzt. Die meisten Kreativitätstechniken haben den Nachteil, dass sie ortsgebunden sind und somit an einem zentralen Ort angewendet werden müssen. Dies ist ein Nachteil für verteilt agierende Teams, die somit nur die Möglichkeit haben einzeln Ideen auszuarbeiten (ohne physisches Meeting) oder sich gemeinsam an einem Ort zu treffen. Während bei einer individuellen Ideengenerierung allerdings die Nutzung von Synergieeffekten durch die Weiterentwicklung der Ideen anderer Teammitglieder fehlt, resultiert aus ortsbezogenen Kreativitäts-Sitzungen ein hoher Reiseaufwand.

Zur Vermeidung existieren Ansätze zur Unterstützung der Kreativität, die Technologie einbeziehen. Albers et al. beschreiben die Gestaltung einer Community-Plattform zum themenspezifischen Austausch von Ideen [6]. In einem weiteren Ansatz, dem Live Lab ProVIL, soll eine Unterstützung verteilt agierender Entwicklungsteams erreicht werden. Über eine Innovationsplattform agieren die Teammitglieder untereinander sowie mit Auftraggebern und Betreuern [7].

Wenige Forscher haben sich bereits mit der direkten Beeinflussung durch virtuelle Welten für Kreativität beschäftigt. Alahuhta et al. haben mit Hilfe einer ausführlichen Literaturrecherche Faktoren virtueller Welten identifiziert, die einen Beitrag zur Teamkreativität leisten [8]. Minas et al. und Bhagwatwar et al. haben sich im Rahmen Ihrer Forschung mit dem psychologischen Konzept des Primings in virtuellen Welten beschäftigt. Beim Priming handelt es sich um die Aktivierung von Gedächtnisinhalten durch Reizbeeinflussung [9, 10].

## 1.3 Forschungsproblematik und -ziel

Eine Forschungslücke besteht in der Kenntnis von Einflussfaktoren, die die Wirkung von VR-Technologie auf Kreativität beschreiben. Entsprechend existieren keine Richtlinien zur Gestaltung von VR-Applikationen (zur Unterstützung von Kreativitätstechniken) und virtueller Kreativumgebungen. Aus diesem Grund besteht ein Forschungsziel darin, technologie- und methodenbasierte Faktoren zu identifizieren, die a) zur Steigerung der Kreativität eines Individuums führen und b) durch VR unterstützt werden. Ein Teilziel ist die vergleichende Identifikation von Optimierungspotenzialen der VR-unterstützten Techniken gegenüber erprobten Kreativitätstechniken Brainstorming und Reizbildtechnik. Ein weiteres Teilziel ist die Analyse der Leistungsfähigkeit gegenüber klassischen Kreativitätstechniken. Dies wird als Grundlage zur Entwicklung der Gestaltungsrichtlinien für virtuelle Kreativumgebungen und der unterstützenden VR-Applikation einbezogen.

# 2 Wissenschaftliche Vorgehensweise

Auf Basis einer Literaturanalyse in den Bereichen Kreativität, verteilt agierende Teams und VR-Technologie in Bezug auf Beeinflussungsfaktoren (Literatur) und bisherige Einsatzmöglichkeiten der Technologie im Bereich von Kreativitätstechniken (Kapitel 1.2 Technologie-unterstützte Kreativität) wurde ein erster Prototyp der VR-Applikation „Virtual Creativity" entwickelt. Zur Durchführung der Vergleichsstudie sind drei Kreativitätstechniken anhand der folgenden Kriterien identifiziert worden: die Kategorisierung der Kreativitätstechnik, der Grad der visuellen Unterstützung und die Durchführungsdauer. Auf Basis von drei vergleichbaren Aufgabenstellungen soll das Szenario der Ideengenerierung

individuell mit Hilfe der drei Kreativitätstechniken von Probanden erprobt werden. Die Resultate der Vergleichsstudie, die sich durch Quantität und Qualität der generierten Ideen beschreiben lassen, werden dokumentiert und aufbauend auf den Ergebnissen Optimierungspotenziale identifiziert.

## 2.1 Beschreibung der untersuchten Kreativitätstechnik

Zur Umsetzung der Vergleichsstudie wurden zwei klassische Kreativitätstechniken anhand der folgenden Kriterien ausgewählt:

- Es werden intuitive, diskursive und kombinierte Kreativitätstechniken unterschieden. Die drei Kreativitätstechniken müssen einer Klasse entstammen, um Vergleiche zu ermöglichen. Da die Reizumgebung als intuitive Kreativitätstechnik klassifiziert wird, müssen die beiden Vergleichstechniken auch intuitive Kreativitätstechniken sein.

- Der Grad der visuellen Unterstützung soll im Kontext dieser Studie untersucht werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass sich die drei Techniken im Grad der visuellen Unterstützung unterscheiden.

- Als weiteres Kriterium wurde die Durchführungsdauer bei der Auswahl betrachtet. Es muss möglich sein, die Kreativitätstechniken für kurze Phasen der Ideengenerierung einzusetzen.

### 2.1.1 Brainstorming

Brainstorming ist eine klassische Technik, die 1939 von Alex Osborn entwickelt wurde [11]. Die Kreativitätstechnik Brainstorming lässt sich durch drei Schritte beschreiben. Im ersten Schritt, der Vorbereitung, werden Nutzer mit der Problemstellung konfrontiert. Der zweite Schritt beinhaltet die Durchführung, bei der die Nutzer spontan ihre Ideen nennen. Bei einer Nutzung in Gruppen ist es weiterhin möglich auf Ideen der anderen Nutzer aufzubauen. Im letzten Schritt müssen die generierten Ideen dokumentiert werden. Grundlage der Kreativitätstechnik ist die Einhaltung bestimmter Regeln. (bspw. keine Kritik und Bewertung von Ideen). Die Durchführung des Brainstormings wird in Gruppen durch die Einbindung eines Moderators unterstützt, der die Einhaltung der Regeln überwacht. Individuelle Brainstormings können sogar effektiver sein als die Durchführung in Gruppen [12].

### 2.1.2 Reizbildtechnik

Die Reizbildtechnik ist eine Methode zur Generierung von Ideen mit Hilfe von Bildern als visuelle Unterstützung. Ziel ist es anhand der unterstützenden Bilder in Verbindung mit Assoziationen des Nutzers eine andere Perspektive einzunehmen und Zugänge zur Lösung einer Aufgabenstellung zu finden. Dabei müssen die Bilder keinen Bezug zur Aufgabenstellung haben. Im ersten Schritt werden die Nutzer mit der Problemstellung konfrontiert. Im nächsten Schritt wählen Nutzer Reizbilder aus einer Sammlung von Bildern aus. Im Anschluss werden Aspekte aus den Bildern mit der Problemstellung in Verbindung gebracht. Dabei kann es um konkrete Objekte, Stimmungen und Farben handeln. Im finalen Schritt werden die generierten Ideen dokumentiert, so dass sie bewertet und weiterentwickelt werden können. [13]

### 2.1.3 Reizumgebungsmethode mit „Virtual Creativity"

Basierend auf der Reizbildtechnik wurde die Reizumgebungsmethode entwickelt [4]. Ziel ist es anhand der visuellen Unterstützung in Verbindung mit Assoziationen des Nutzers eine andere Perspektive einzunehmen und Zugänge zur Lösung einer Problemstellung zu bekommen. Kern der Weiterentwicklung der Reizbildtechnik ist die Anreicherung der visuellen Reize, die im Rahmen der Nutzung der VR-basierten Applikation „Virtual Creativity" erzeugt werden.

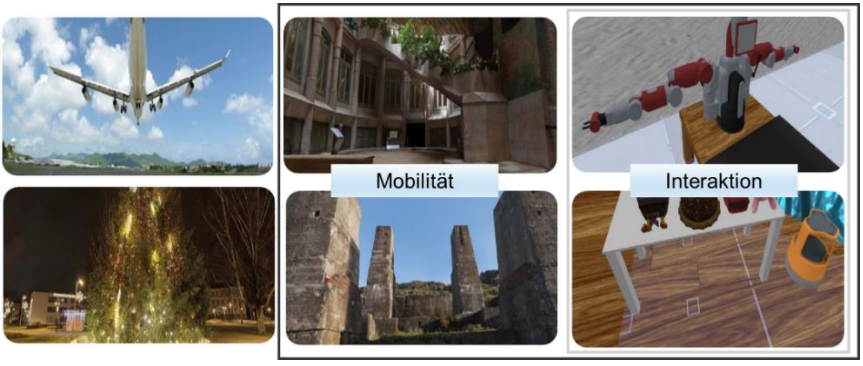



Abbildung 1: Virtuelle Kreativumgebungen und die eingebundenen Funktionen

Während die Reizbildtechnik Bilder benutzt, die statischen Inhalt bieten und wenige Interaktionsmöglichkeiten zulassen, ist in der Reizumgebungsmethode eine VR-Applikation enthalten, die interaktive Kreativumgebungen beinhaltet. Diese Umgebungen zeichnen sich durch unterschiedliche Themen (beispiels-

weise Technik und Natur) aus und besitzen Tools zur Interaktion, um die Umgebung aus verschiedenen Perspektiven erlebbar zu machen (Abbildung 1). Dazu gehört die Möglichkeit des Room-Scalings, die durch die VR-Hardware (HTC Vive) gegeben ist. Das Room-Scaling erlaubt es Nutzern sich auf einer definierten, physischen Fläche zu bewegen und diese Bewegungen direkt in die VR-Umgebung zu übertragen. Eine weitere Funktion der Mobilität, die es ermöglicht größere Entfernung in VR-Umgebungen zurück zulegen ist die Teleportation. Weiterhin gibt es die Funktion mit Gegenständen zu interagieren.

Die Prozessschritte unterscheiden sich nicht von der Reizbildtechnik. Anstatt der Auswahl von Bildern werden unterschiedliche VR-Umgebungen gewählt, die genutzt werden. Die Dokumentation der Ideen funktioniert durch das Tragen des Head Mounted Displays (HMD) anders als bei den klassischen Methoden. Bei der Nutzung der Reizumgebungsmethode ist ein weiterer Nutzer involviert, der die generierten Ideen dokumentiert und diese anschließend mit dem Nutzer der HMD abgleicht. Als weitere Unterstützung ist ein Moderator für die Nutzung dieser Kreativitätsmethode unerlässlich. Der Moderator unterstützt dabei den Fokus auf die Aufgabenstellung zu bewahren und eine Orientierung für den Nutzer der HMD zu geben. Im Vergleich zu klassischen Kreativitätstechniken ist durch die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ein technischer Mitarbeiter zur Systembetreuung notwendig.

## 3 Experimentelles Vorgehen

Die Vergleichsstudie beruht auf der Anwendung der drei Kreativitätstechniken. Zur Durchführung der Vergleichsstudie wurden zwölf Probanden mit ähnlichen Profil herangezogen. Bei den zwölf Probanden handelte es sich um Studierende eines technischen Studiengangs (Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen). Weiterhin befanden sich alle Probanden in einem vergleichbaren Alter (zwischen 20 und 25 Jahren). Zur Durchführung der Vergleichsstudie war es notwendig drei Aufgabenstellungen zu generieren, die vom Schwierigkeitsgrad, Inhalt und Grad der resultierenden Innovation vergleichbar sind. Inhaltlich wurden technische Aufgabenstellungen präferiert, die eine realistische Komplexität kreativer Arbeit in der Produktentwicklung beinhalten. Des Weiteren wurden die Aufgaben offen formuliert, um die Generierung einer Vielzahl von Ideen zu fördern. Bei den drei exemplarischen Aufgabenstellungen handelte es sich um die folgenden Formulierungen:

- Aufgabe 1) „Entwickeln Sie Ideen für innovative/unkonventionelle Antriebssysteme und Transportmöglichkeiten der Zukunft"

- Aufgabe 2) „Entwickeln Sie Ideen für innovative Verpackungen/Verpackungsmethoden der Zukunft"

- Aufgabe 3) „Entwickeln Sie Ideen für innovative/ intelligente Lager- und Logistikmöglichkeiten der Zukunft"

Das Vorgehen der Vergleichsstudie wurde standardisiert, so dass jeder Proband drei Aufgabenstellungen mit jeweils einer Kreativitätstechnik bearbeitet hat. Nach einer kurzen Begrüßung erläuterte der Moderator dem Proband das Vorgehen. Anschließend gab es drei zehnminütige Durchgänge, in denen der Proband jeweils mit Hilfe einer der drei Kreativitätstechniken Ideen zur Lösung einer der drei Aufgabenstellungen generierte. Die Ideen wurden vom Moderator dokumentiert und nach jedem Durchgang mit dem Probanden abgeglichen. Die Zuordnung der Kreativitätstechnik zu den Aufgabenstellungen wurde so gewählt, dass in der Vergleichsstudie jede Aufgabenstellung dreimal mit jeder Kreativitätstechnik bearbeitet wurde. Eine beispielhafte Durchgangsfolge:

- 1. Durchgang: Aufgabe 1 mit Brainstorming.

- 2. Durchgang: Aufgabe 2 mit der Reizbildtechnik.

- 3. Durchgang: Aufgabe 3 mit der Reizumgebungsmethode.

Nach drei Durchgängen beantworteten die Probanden einen Fragebogen, der die Selbsteinschätzung zur Generierung von Ideen mit Hilfe der verschiedenen Kreativitätstechniken dokumentierte. Weiterhin waren Fragen zur Bewertung der Bedienung und Funktionstauglichkeit und weitere gewünschte Funktionalitäten der VR-Applikation „Virtual Creativity" in diesem Kontext enthalten. Die generierten Ideen wurden anschließend von acht Ingenieuren in der Funktion von Experten anhand der Kriterien Neuheitsgrad, Machbarkeit und Relevanz bewertet. Dabei war den Experten nicht bekannt, welche Ideen mit welcher Kreativitätstechnik generiert wurden.

## 4 Ergebnisse

Basierend auf den Fragebögen der Probanden kann eine Präferenz bezüglich der Auswahl von Kreativitätstechniken abgeleitet werden. Ein weiterer Abschnitt des Fragebogens erlaubt Schlüsse in Bezug auf die Funktionalität und Gebrauchstauglichkeit der VR-Applikation. Anhand des Fragebogens für die Experten wird die Qualität der Ideen bewertet und damit die Grundlage für einen Vergleich geschaffen.

## 4.1 Bewertung der Probanden

Zunächst wurden die Probanden befragt, welche Kreativitätstechniken sie in ihrer Ideengenerierung unterstützt haben. Dabei wurden die Reizbildtechnik (10 von 12-mal genannt) und Reizumgebungsmethode (9 von 12) am häufigsten genannt. Brainstorming wurde fünfmal genannt. Anschließend wurden die Probanden befragt, wie jede Kreativitätstechnik sie in ihrer Ideenfindung beeinflusst (Bewertungsskala 1 bis 4). Die Reizumgebungsmethode schnitt mit einem Wert von 3,1 geringfügig besser als die Reizbildtechnik ab (2,9). Brainstorming schnitt mit einem Wert von 2,3 am schwächsten ab. Im folgenden Abschnitt standen die Vor- und Nachteile der Kreativitätstechniken im Fokus. Für die Reizumgebungsmethode, die hier als VR-basierte Technik hervorgehoben wird, wurden eine Vielzahl von Vor- und Nachteile genannt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Reizumgebungsmethode

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| Verbessertes Vorstellungsvermögens | Ablenkung |
| Besseres Einfühlungsvermögen | Reizüberflutung |
| Perspektivenwechsel | Fokus auf spezifische Visualisierung |
| Spaß | |
| Generierung von Motivation | |
| Anregung durch Visualisierung | |
| Gedankenanstöße durch Erfahrungen | |

Die Vorteile bestätigen die Einsatzfähigkeit zur Generierung von Ideen. Durch die Einbindung in virtuelle Umgebungen wird das Vorstellungsvermögen unterstützt und ein Perspektivenwechsel geschaffen. Dies schafft für die Nutzer neue Erfahrungen, die zu Gedankenanstößen führen und somit die Ideengenerierung begünstigen. Als weiterer Vorteil wurde die motivierende Eigenschaft durch die Reizumgebungsmethode genannt, die mit der Nutzung der VR-Technologie zusammenhängt. Die Motivation hängt direkt mit dem Faktor Spaß zusammen, die die Nutzung der VR-Technologie hervorruft. Bei der Identifikation von Nachteilen wurde von den Probanden eine geringere Anzahl genannt. Die Ablenkung wurde in diesem Kontext am häufigsten (7x) genannt. Weitere Nachteile, wie eine Reizüberflutung und die starke Fokussierung auf spezifische Visualisierungen, führen laut Probanden zu einer erschwerten Generierung von Ideen. Die Mehrheit der Probanden (66,7%) gaben an, dass sie im vorgegeben Zeitlimit

keine Schwierigkeiten hatten Ideen zu generieren. Probanden wurden weiterhin befragt, durch welche Kreativitätstechnik sie Ideen generiert haben, auf die sie ohne Anwendung der Kreativitätstechnik nicht gekommen wären. Dabei schnitt die Reizbildtechnik (50% der Probanden) vor Reizumgebungsmethode (33,3%) und Brainstorming (16,7%) am besten ab.

Die weiteren Fragen beinhalteten Aspekte des technischen VR-Systems, das für die Applikation „Virtual Creativity" im Kontext der Reizumgebungsmethode genutzt wurde. Fast alle Probanden (91,7%) bestätigten, dass sie bei der Nutzung des VR-Systems Spaß hatten. Alle Probanden bestätigten, dass sie keine großen Schwierigkeiten in der Nutzung des Systems hatten. Bei Auftreten von kleinen Schwierigkeiten wurde der Moderator der Methode als hilfreiche Unterstützung empfunden. Abschließend wurden die Probanden befragt, welche Funktionalitäten ihnen in virtuellen Umgebungen bei der Generierung von Ideen weiterhelfen würden. Am häufigsten wurden die folgenden vier Funktionen genannt:

- Kollaborative Nutzung der Applikation (75%)
- Implementierung von Modellierungstools (58,3%)
- Möglichkeit zur eigenen Gestaltung der Kreativumgebung (58,3%)
- Tool zur automatischen Dokumentation der Ideen (58,3%)

## 4.2 Bewertung der Experten

Die Ideen sind von acht Experten mit abgeschlossenem technischem Studium auf ihren Innovationsgrad bewertet worden. Bewertet wurden die drei Faktoren Neuheitsgrad, Machbarkeit und Relevanz. Über eine an Likert angelehnte Skala von 1 bis 5 wurden die drei Faktoren bewertet, so dass daraus einen Durchschnittswert aller Expertenbewertungen gebildet werden konnte (Tabelle 2):

Tabelle 2: Expertenbewertung der Ideen

| | Neuheitsgrad | Machbarkeit | Relevanz |
|---|---|---|---|
| Brainstorming | 2,4 | 3,9 | 3,2 |
| Reizbildtechnik | 2,6 | 3,2 | 2,6 |
| Reizumgebungsmethode | 2,2 | 3,5 | 2,8 |

Die Werte der unterschiedlichen Kreativitätstechniken zeigen geringfügige Abweichungen. Für den Faktor Neuheitsgrad sind die Ideen der unterschiedlichen

Kreativitätstechniken durchschnittlich bewertet (2,2 bis 2,6). Die Machbarkeit der generierten Ideen wird von den Experten höher bewertet (3,2 bis 3,9). Die Relevanz, die sich auf die Eignung der Ideen für die Lösung der Aufgabenstellung bezieht, wird zwischen 2,6 und 3,2 bewertet.

## 5 Analyse und Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die Reizumgebungsmethode eine vergleichbare Eignung zur Ideengenerierung aufweist wie Brainstorming und Reizbildtechnik. Die Beeinflussung durch visuelle Reize wurde von den meisten Probanden positiv hervorgehoben. Aus den Bewertungen der Probanden ergeben sich allerdings auch Handlungsbedarfe, um die Kreativitätstechnik zu optimieren. Diese Punkte betreffen den Prozess der Kreativitätstechnik und die eingesetzte VR-basierte Applikation, die in direkter Abhängigkeit zueinander stehen. Die Probanden nannten drei Nachteile der Reizumgebungsmethode. Als größter Nachteil wurde die Ablenkung von der Aufgabe durch visuelle Reize genannt. Ein weiterer Nachteil stellt die Reizüberflutung durch die virtuellen Kreativumgebungen dar. Der starke Fokus auf die visuellen Reize wurde vereinzelt als Nachteil genannt. Ansätze, um diese Nachteile zu beheben, sind:

1. **Stärkere Einbindung des Moderators**: Um eine zu starke Ablenkung von der eigentlichen Aufgabe zu vermeiden, muss der Moderator eine aktivere Rolle einnehmen. Dazu ist die Einbindung des Moderators in die Umgebung und eine klare Regelung, um die Konzentration auf die Aufgabe aufrecht zu erhalten, erforderlich.

2. **Einbindung von Gestaltungsrichtlinien**: Reizüberflutung und die Fixierung auf einzelne visuelle Reize sind Nachteile, die mit der direkten Gestaltung der virtuellen Kreativumgebungen zusammenhängen. Auf der konzeptionellen Ebene sind Gestaltungsrichtlinien erforderlich, die einen Autor virtueller Kreativumgebungen unterstützen. Diese Gestaltungsrichtlinien geben dem Gestalter notwendige Informationen, wie die Kreativität durch Sinnesreize beeinflusst werden kann.

3. **Unterstützung durch einen Konfigurator**: Die Einbindung eines Konfigurators zur Gestaltung virtueller Kreativumgebungen bietet Anwendern die notwendige Flexibilität. Mit einem Konfigurator ist es möglich eine Vielzahl unterschiedlicher Kreativumgebungen unter Einhaltung von Gestaltungsrichtlinien zu entwerfen und eine Fixierung auf bestimmte visuelle Reize zu minimieren.

Weiteren Einfluss auf die Methode haben die von den Probanden präferierten Erweiterungen von „Virtual Creativity". In den Phasen des Kreativitätsprozesses ist die kollaborative Nutzung der Applikation gewünscht. Diese Funktionalität ist notwendig, um den Moderator in die virtuellen Kreativumgebungen einzubinden, um in einer Gruppe gemeinsam Ideen zu generieren oder in den konvergenten Phasen zur gemeinsamen Bewertung von Ideen. Die Möglichkeit der Gestaltung von virtuellen Kreativumgebungen wird über einen Konfigurator ermöglicht. Gewünschte Modellierungstools, die bei der Generierung von Ideen unterstützen, werden identifiziert und in „Virtual Creativity" eingebunden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Vergleichsstudie konnte gezeigt werden, dass die Reizumgebungsmethode eine Alternative zu klassischen Kreativitätstechniken darstellt. Weiterhin wurden durch die Ergebnisse Optimierungspotenziale für diese neue Art von Kreativitätstechniken identifiziert. Diese wurden in drei konkrete Ansätze zur Optimierung transferiert. In der zukünftigen Forschung werden aufbauend auf den Resultaten der Prozess der Reizumgebungsmetode und die Applikation „Virtual Creativity" optimiert. Im Anschluss wird die optimierte Kreativitätstechnik in einem Projekt mit verteilt agierenden Team eingesetzt, um sie im Rahmen eines realistischen Einsatzbereichs zu validieren.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei den Teilnehmern der Vergleichsstudie und den Experten für Ihre Teilnahme und Ihr Engagement.

## Literatur

[1] Cropley, D. H., & Cropley, A. J. (2012). A psychological taxonomy of organizational innovation: resolving the paradoxes. Creativity Research Journal, 24(1), 29-40.

[2] Mumford, M. D., & Gustafson, S. B. (1988). Creativity syndrome: Integration, application, and innovation. Psychological Bulletin, 103, 27–43.

[3] Monahan, T., McArdle, G., & Bertolotto, M. (2008): Virtual reality for collaborative e-learning. Journal Computers & Education, Volume 50, Issue 4, 1339-1353.

[4] Gräßler, I., Taplick, P., Pottebaum, J. (2017). Enhancing Innovation Processes by Disruptive Technologies. SCIFI-IT 2017, 2017 EUROSIS, EUROSIS-ETI, S. 19-26.

[5] Rhodes, M. (1961). An analysis of creativity. Phi Delta Kappan,42, 305–310.

[6] Albers, A., Maul, L., Bursac, N., Heismann, R. (2015). CONNECTED CREATIVITY – A HUMAN CNRERED COMMUNITY PLATFORM FOR INNOVATION IMPULSES. The Third International Conference on Design Creativity (3rd ICDC) Bangalore, India. pp. 158.

[7] Albers, A., Bursac, N., Walter, B., Hahn, C., Schröder, J. (2016). ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor. Entwerfen, Entwickeln, Erleben : Werkzeuge und Methoden in Produktionsentwicklung und Design - Dresden, pp. 185–198.

[8] Alahuhta, P., Nordbäck, E., Sivunen, A., Surakka, T. (2014) Fostering team creativity in virtual worlds. Journal For Virtual Worlds Research, 7(3), 2014.

[9] Minas, R., Dennis, A., Massey, A. (2016). Opening the Mind: Designing 3D Virtual Environments to Enhance Team Creativity. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, USA, 2016, pp. 247-256.

[10] Bhagwatwar, A., Massey, A., & Dennis, A. R. (2013). Creative Virtual Environments: Effect of Supraliminal Priming on Team Brainstorming. In 2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 215–224.

[11] Osborn, A. (1957). Applied imagination: principles and procedures of creative thinking (rev. ed.). New York: Scribner.

[12] Stroebe, W.; Diehl, M (1994). Why groups are less effective than their members: on productivity losses in idea-generating groups. European review of social psychology, 1994, Vol. 5. (1), pp. 271-303.

[13] Behnken, E. (2010). Innovationsmanagement in Netzwerken: Analyse und Handlungskonzept zur kollektiven Innovationsgenerierung (Strukturwandel und Strukturpolitik. Structural Change and Structural Policies.). Peter Lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften; Auflage: 1.

# Einsatz von Process-Mining zur Erweiterung der semantischen Produktbeschreibung

Christopher Sauer, Fabian Dworschak, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)*
*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

## Abstract

Due to the increased data volume in product development, the use of PDM systems has become established. Current trends show a shift away from the monolithic integrated product model towards a semantic product model. In order to extend this product model by a description of the manufacturing process, which is particularly important against the background of the digital twin, methods of process mining are suitable. The result of these methods is always a model of the given process, which is to be fed to the higher-level system via a semantic interface. Thus, ontologies that enable a semantic description are suitable for the interface definition. Within the scope of this article, based on an exemplary manufacturing process, process mining is applied and a prototypical interface is designed.

*Keywords: Process mining, semantic product modeling, ontologies*

## 1 Einleitung und Motivation

Die Digitale Transformation durchdringt mittlerweile die meisten Gebiete des täglichen Lebens. So wurde auch die Produktentwicklung im Laufe der Jahre erst digitalisiert und ausgehend davon immer weiter digital transformiert.

Bei dieser Transformation werden bestehende Prozesse und Methoden mit Hilfe von digitalen Mitteln verbessert oder disruptiv ersetzt. Im Kontext der digitalen Transformation fallen auch immer mehr Daten im gesamten Produktlebenszyklus an. Zur Bewältigung dieser Datenmengen werden im Produktentstehungsprozess aktuell PDM-Systeme eingesetzt. Produktdaten aus den klassischen Erzeugersystemen der Fachrichtungen wie Konstruktion und Berechnung werden in solchen PDM-Systemen verwaltet. Dabei fungiert das PDM-System nach [1] wie in Bild 1 dargestellt vor allem als Metadaten-Managementsystem.

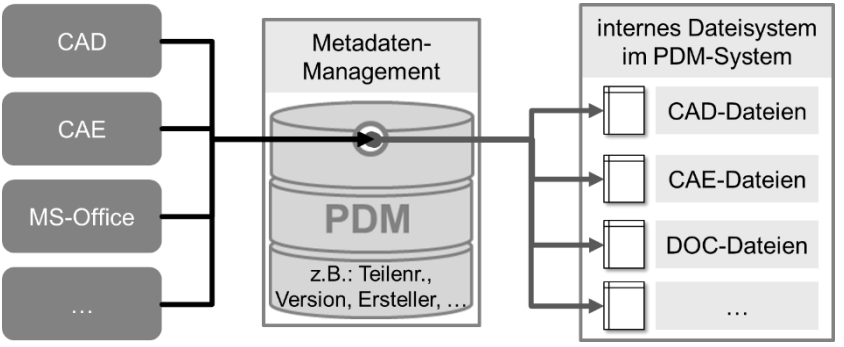



Bild 1: Das PDM-System zum Metadatenmanagement nach [1]

Trends in der derzeitigen Entwicklung zeichnen allerdings einen Weg in Richtung intelligenter Verknüpfung der einzelnen Datenquellen oder -silos. Dabei geht der Ansatz weg von einem integrierten Produktmodell, das monolithisch alle Produktdaten enthält, hin zu einer verknüpften semantischen Produktbeschreibung. So können darin auch Informationen aus dem Herstellungsprozess erfasst werden. Dafür müssen alle anfallenden Herstellungsprozessbestandteile dokumentiert und erfasst werden. Innerhalb dieses Beitrags wird die Möglichkeit untersucht, dies durch Methoden des Process-Mining zu ermöglichen. Die erzeugten Modelle lassen sich dann über eine semantische Schnittstelle den weiteren Systemen, wie zum Beispiel dem PDM-System zuführen. Produktionsprozesse lassen sich in einem ersten Schritt digitalisieren, durch die Analyse der Prozessmodelle eröffnen sich dann weitere Möglichkeiten. Vor allem unter dem Aspekt von Design-for-Manufacturing lässt sich eine Verbesserung der Produkte erzielen. So gehen besonders aufwendige und engpassanfällige Produktionsschritte direkt aus den Prozessmodellen hervor. Werden Prozessmodelle und Produkte miteinander verbunden und ein virtuelles Abbild der Produktion geschaffen, kann man hier auch von einem "Digitalen Zwilling" der Produktion sprechen. Für den Produktentwickler ergeben sich hieraus vor allem positive Effekte im Bereich der ganzheitlichen Eigenschaftsabsicherung über den Produktentstehungsprozess.

# 2 Hintergrund und Stand der Forschung

## 2.1 Produkt- und Prozessdaten-Management

Gegenwärtige PDM-Systeme verwalten die Produktstruktur hierarchisch und statisch [2]. Dabei steht das Projekt an oberster Stelle der Struktur, gefolgt von Produkten, die sich dann jeweils in einzelne Baugruppen gliedern. Mit dieser Struktur lassen sich vor allem CAD-Daten sehr gut verwalten, da CAD-Modellbäume ähnlich hierarchisch und statisch aufgebaut sind. Hier ist schon erkennbar, dass für die Integration von weiteren Daten, neue Funktionen im PDM-System notwendig sind. Dabei ist es zum Beispiel möglich CAE-Daten mit der zugehörigen CAD-Geometrie zu verknüpfen, die CAE-Eingangsdaten werden semantisch an die CAD-Geometrie gekoppelt. Nach [3] stellen PDM-Systeme unter anderem folgende Funktionalitäten bereit: Datenstrukturmanagement, Versionsverwaltung, Projektmanagement, Arbeitsablauf- und Prozessverwaltung. Gerade die Integration von Arbeitsabläufen und Prozessen ermöglicht neben dem reinen Produktdatenmanagement auch das Management von unternehmensinternen Prozessen. Dabei stehen vor allem Geschäftsprozesse, wie ein Zeichnungsfreigabeprozess oder ein Angebotserstellungsprozess im Fokus. Um weitere Prozessen im Sinne eines ganzheitlichen Prozessdaten-Managements zu integrieren, könnte hier angesetzt werden. Im vorliegenden Fall ist dies der Fertigungsprozess, der vor allem im Rahmen der Digitalisierung der Fertigung immer weiter in den Fokus der "Digital Production" rückt. Auch unter Gesichtspunkten einer Eigenschaftsabsicherung über den Fertigungsprozess hinaus, ist die Betrachtung des jeweiligen Fertigungsprozesses relevant. Grundsätzlich werden durch PDM-Systeme alle Informationen, die im Produktentstehungsprozess anfallen, transparent und nachvollziehbar abgelegt und miteinander verknüpft [4]. Gegenwärtig erfolgt diese Verknüpfung über die Definition von Metadaten. Zu verknüpfende Informationen können dabei zum Beispiel CAD-Daten, Anforderungslisten oder Simulationsdaten sein. Die zur Verknüpfung verwendeten Metadaten sind vor allem Daten, wie etwa die Teilenummer, der Ersteller oder die aktuelle Versionsnummer des Bauteils (siehe Bild 1). Die nächst höhere Integrationsebene wären semantische Systeme, die mit Hilfe einer semantischen Beschreibung des Produktes aus den vorhandenen Quellen sämtliche Produktdaten akquirieren und bereitstellen. Diese sogenannte semantische Produktbeschreibung soll im Folgenden noch einmal genauer erläutert werden.

## 2.2 Semantische Produktbeschreibung

Die VDI 2221 beschreibt den Produktentwicklungsprozess (PEP) als Problemlösungsprozess [5]. Er ist aufgeteilt in die Planungs-, Konzept-, Entwurfs

und Ausarbeitungsphase. Aus jeder dieser Phasen resultieren Produktbeschreibungen. Diese reichen von den Anforderungslisten bis hin zu den Fertigungsunterlagen. Sie bilden die Wissensbasis des PEP und sind in Bild 2 auf der linken Seite dargestellt. Damit Wissensbasis den Werkzeugen der digitalen Transformation zur Verfügung gestellt werden kann, muss sie in ein formales (computerverarbeitbares) Format überführt werden. Eine Möglichkeit für ein formales Wissensmodell und somit eine semantische Produktbeschreibung bieten Ontologien [6].

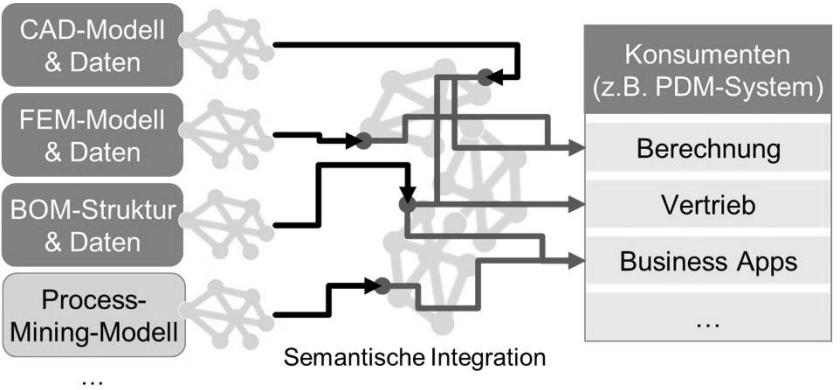



Bild 2: Semantische Produktbeschreibung

Eine Ontologie beschreibt eine Konzeptualisierung eines definierten Bereichs, welche von einer Anwenderdomäne geteilt wird, und kann als explizite, formale Beschreibung dienen [7]. Das Konzept ergibt sich aus der Definition von Klassen durch deren Attribute und deren Relationen, welche sie untereinander verknüpfen. Ontologien werden mit Hilfe von speziellen Repräsentationssprachen modelliert. In dieser Arbeit wird hierfür OWL (Web Ontology Language) verwendet [8]. Die Darstellung der Produktbeschreibung mit Hilfe einer Ontologie führt zu dem Begriff semantische Produktbeschreibung.

Durch die Beschreibung mit Ontologien ergeben sich folgende Eigenschaften für das formale Wissensmodell. Zum einen ist die Semantik durch die Repräsentationssprache definiert. Des Weiteren bietet sich durch Repräsentation in OWL die Möglichkeit Schlussfolgerungen automatisch aus der Produktbeschreibung abzuleiten. Hierfür werden Reasoner, wie zum Beispiel Pellet, eingesetzt [9]. Außerdem ist es möglich durch ontologiebasierte Integration die Konzepte miteinander zu verknüpfen. Diese Eigenschaft ermöglicht es einzelne semantische Produktbeschreibungen bei Bedarf in ein einziges Wissensmodell zu transferieren. Dieses Vorgehen wird als semantische Integration bezeichnet

und ist im mittleren Teil von Bild 2 dargestellt. Hierfür werden Merging und Mapping Techniken für Ontologien eingesetzt. Erstes wir genutzt, wenn eine Ontologie eigenständig in das globale Konzept integriert werden kann, ohne dass eine Schnittmenge gebildet wird. Beim Mapping muss für die Integration ein Übertragungsschema, welches die Schnittmenge beschreibt, erstellt werden.

## 2.3 Process-Mining vs. Data-Mining

Im Folgenden sollen die beiden Analysemethoden Data-Mining und Process-Mining voneinander abgegrenzt werden. Data-Mining-Methoden zielen vor allem darauf ab, anfallende Daten aus dem Unternehmen zu analysieren, um unerwartete Beziehungen zu finden und die Daten auf neuartige Weise zusammenzufassen, die für den Dateneigentümer sowohl verständlich als auch nützlich sind [10]. Diese Beziehungen und Schlussfolgerungen aus den Daten im entsprechenden Kontext können auch als das gewonnene Wissen aufgefasst werden. Wie das Data-Mining ist das Process-Mining ebenfalls datengetrieben. Im Gegensatz zu Process-Mining sind Data-Mining-Methoden jedoch nicht prozessorientiert. Prozessmodelle, wie zum Beispiel Petri-Netze, können von den wichtigsten Data-Mining-Tools weder entdeckt noch analysiert werden [11]. Einige wenige Data-Mining-Methoden kommen dem Process-Mining jedoch nahe, zum Beispiel Sequenz- oder Episodenmining [10]. Diese Techniken berücksichtigen jedoch keine Ende-zu-Ende-Prozesse. Bild 3 zeigt ein, durch eine Process-Mining erzeugtes Petri-Netz für die vier Jahreszeiten eines Jahres. Die einzelnen Jahreszeiten sind dabei als Vorgänge, in denen das Jahr in einem gewissen Status verharrt, durch einen Kasten mit runden Ecken dargestellt. Die Zwischenstationen, durch einen Kreis ausgedrückt, ermöglichen die Beschreibung eines Informationsübertrags von einem Status in einen anderen. Dieser Informationsübertrag könnte zum Beispiel eine Zeitdauer oder eine Änderung eines Parameters der mittleren Monatstemperatur sein.

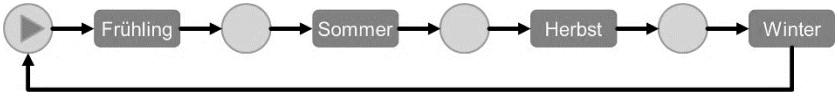



Bild 3: Beispielhaftes Petri-Netz der vier Jahreszeiten

Mit Hilfe von Petri-Netzen lassen sich zum Beispiel Produktionsabläufe oder Prozesse visualisieren [10]. Erzeugte Petri-Netze müssen nicht unbedingt in sich geschlossene Ketten bilden, sondern können auch Verzweigungen enthalten. Als Analyseaspekte für die Modellierung dienen vor allem die Dauer der einzelnen Prozessschritte oder die Häufigkeit des Auftretens einzelner Fehlercodes, die meist unternehmensintern definiert sind.

## 3 Forschungsproblem

Ausgehend von diesem Stand der Forschung eröffnen sich einige Forschungsfragen, die in diesem Abschnitt herausgearbeitet werden. Die vorher beschriebenen Methoden sollen nun auf die Produktentwicklung und die Herstellungsprozesse übertragen werden. Eine Forschungsfrage lautet in diesem Zusammenhang: *Wie lässt sich Wissen über den Herstellungsprozess in der Produktentwicklung nutzen?* Grundsätzlich bietet sich die Möglichkeit, Produkte auf den jeweiligen Herstellungsprozess oder die Herstellungsprozesskette zu optimieren. Prozessmodelle des Fertigungsprozesses ermöglichen dabei in erster Linie eine Analyse von Engpässen oder die Detektion von Teilen mit erhöhter Nacharbeit. Durch Erkenntnisse aus diesen Modellen lassen sich zum Beispiel Nacharbeit oder Iterationsschritte während des Entwicklungsprozesses einsparen. Darüber hinaus lassen sich auch Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die entstehenden Produkteigenschaften, im Sinne einer Eigenschaftsabsicherung über den Produktionsprozess, erfassen. Im Folgenden wird vor allem auf die Beschreibung des Prozesses durch Process-Mining Modelle eingegangen.

Eine weitere Frage lautet: *Wie lassen sich Herstellungsprozesse durch adäquate Modelle computerverarbeitbar beschreiben?* Dafür nutzt die in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehensweise Methoden des Process-Mining. Dadurch können Prozessmodelle wie zum Beispiel Petri-Netze erzeugt werden. Diese werden dann mit Informationen aus dem Prozess (Dauer, Menge, Fehlercodes) aufgewertet und für eine Analyse bereitgestellt. Im folgenden Konzept soll darauf eingegangen werden, wie die Eingangsdaten für solche computerverarbeitbaren Modelle aussehen müssen.

Im Kontext einer wie in Abschnitt 2.2 angesprochenen semantischen Produktbeschreibung stellt sich noch eine weitere Frage: *Wie lassen sich die erzeugten Modelle der Herstellungsprozesse mit einer semantischen Produktbeschreibung verknüpfen?* Dies wird durch genannte semantische Schnittstellen ermöglicht, die der semantischen Integration zugeführt werden können, um dadurch die Informationsdichte der Produktbeschreibung zu erhöhen. Auf einen möglichen Ansatz für eine semantische Schnittelle wird im Anwendungsbeispiel näher eingegangen.

## 4 Konzept

Für die Erfassung von Prozessen eignen sich wie oben erwähnt besonders Methoden des Process-Mining. Diese setzen dabei direkt auf den Protokollen des Prozesses auf. Protokolle lassen sich z.B. durch eine Prozessüberwachung während der Herstellung automatisiert erfassen. Im Zeitalter von Industrie 4.0

lassen sich solche Prozessüberwachungsmethoden zum Beispiel über Internet of Things (IoT) Ansätze verwirklichen. Dabei wird eine Fertigungsprozesslinie mit Sensoren bestückt. Diese erheben in definierten Abständen Daten über den gesamten Fertigungsprozess. In einer gemeinsamen Datenbank laufen dann all diese Daten zusammen und werden zentral abgespeichert. Innerhalb dieser Protokolle werden die einzelnen Prozessschritte in ihrer Reihenfolge, Dauer und inklusive aller auftretenden Störungen in Form von Fehlercodes erfasst. Dabei können Synergieeffekte genutzt werden, wenn die zu überwachende Fertigungslinie innerhalb der digitalen Fabrik integriert wird. Grundlage dieses Prozessprotokolls ist das standardisierte XES-Format. Der von der IEEE entwickelte "Standard for eXtensible Event Stream for Achieving Interoperability in Event Logs and Event Streams", kurz XES definiert verschiedene Typen von "Event streams" also Ereignis-Datenströmen die einen Prozess beschreiben [12]. Meist handelt es sich dabei um Datensätze, die bezogen auf eine zu fertigende Einheit vorliegen. Um eine Auswertung im Sinne des Process-Minings durchzuführen müssen vor allem die folgenden Daten enthalten sein:

- **Case ID** – eindeutige Nummer um ein Bauteil während des Prozesses zu verfolgen. Aufgrund der Verfolgbarkeit des Bauteils durch den Prozess ist diese eindeutige Nummer sehr wichtig. (Traceability)
- **Activity** – der vom Bauteil gerade durchlaufene Prozessschritt
- **Ressource** – der Ort oder die Ressource die den Prozessschritt bereitstellt
- **Start Timestamp** – der Zeitstempel als die **Activity** begonnen wurde
- **Complete Timestamp** – der Zeitstempel bei dem die **Activity** abgeschlossen wurde
- **Work Order Quantity** – die Menge der Teile in einem zu fertigenden Paket das den Prozess durchläuft, setzt sich aus der abgeschlossenen und fehlerhaften Menge zusammen
- **Part Description** – menschenlesbare Teilbeschreibung
- **Report Type** – die Beschreibung des eventuellen aufgetretenen Schadenfalls oder firmeninternen Fehlercodes

Ist ein solches Prozessprotokoll erstellt und liegt noch als tabellarischer Datensatz in einem Tabellenkalkulationsprogramm wie Microsoft Excel vor, lässt sich dieser Datensatz mit Hilfe der ProM-Software in das XES-Format konvertieren. Dieser Schritt ist notwendig, da die Process-Mining Methoden nur mit dem Austauschformat XES für Prozessdaten arbeiten. Auf Basis dieses Formats können dann Modelle des Herstellungsprozesses generiert werden. Dabei ist vor allem die Reihenfolge und die jeweilige Dauer der Prozessschritte von Interesse, um zum Beispiel im Rahmen eines Engpassmanagements oder einer Produktionsplanung frühzeitig eine Analyse der Prozesskette durchzuführen.

Ein Aspekt des Process-Mining ist dabei die Formulierung sogenannter Petri-Netze, die neben einer Erfassung der Dauer auch die Abfolge der einzelnen Herstellungsprozessschritte ermöglichen. Um die Erzeugung solcher Modelle zu vereinfachen ist die Verwendung einer entsprechenden Softwarelösung ratsam. In diesem Beitrag wurde hierfür die Software Disco verwendet [13]. Ähnlich der Herangehensweise bei einem Data-Mining-Prozess für Simulationsdaten [14] oder dem CRISP-DM [15], kann innerhalb von Disco vorgegangen werden. In einem ersten Schritt wird die Data Preparation, also die Datenvorbereitung durchgeführt. In diesem Schritt werden die Prozessdaten gefiltert und aufbereitet. So werden zum Beispiel unvollständige Zeilen entfernt. Die CRISP-DM Schritte Business und Data Understanding werden vorerst ignoriert, da die Modellerzeugung im Vordergrund steht. An die Datenvorbereitung schließt das Modeling, also die Modellerstellung, an. Hierbei werden Petri-Netze erzeugt, die wie in Kapitel 2.3 beschrieben ein genaues Modell des Prozesses erzeugen. Während der Evaluation werden innerhalb der Software die Modelle überprüft und auf die Konformität der Abbildung anhand des vorliegenden Prozessprotokolls geprüft. Der Schritt Deployment, die Bereitstellung, ist für eine grundsätzliche Analyse zwar nicht relevant, schließt aber in diesem Fall die Bereitstellung des Prozessmodells über eine semantische Schnittstelle ein, Bild 4 im nächsten Abschnitt fasst diese einzelnen Teilschritte noch einmal übersichtlich zusammen.

Ist nun ein solches Process-Mining Modell erstellt worden, kann dieses durch eine XML-basierte Beschreibungssprache computerverarbeitbar abgelegt werden. So kann ein Petri-Netz mit Hilfe der Disco Software direkt als XML-Modell exportiert werden [13]. Auf Basis dieser Formulierung setzen nun semantische Schnittstellen an. Über diese Schnittstellen lassen sich dann Abfragen durchführen, die es ermöglichen einzelne Aussagen aus dem Prozess zu ziehen. Hierfür wird die Ontologie-Abfragesprache SPARQL verwendet [8]. Die erzeugten Petri-Netze werden genutzt, um zum Beispiel Engpässe in der Produktion aufzudecken oder Entscheidungen entlang des PEP, die zu einer erhöhten Nacharbeit führen aufzudecken.

## 5 Anwendungsbeispiel: Fertigungsprozess

Anhand eines beispielhaften 7-teiligen Herstellungsprozesses für verschiedene Bauteile wird in diesem Abschnitt die Umsetzung des Konzepts beschrieben. Dabei wurden die Daten für den Prozess in tabellarischer Form aus dem Datensatz der TU Eindhoven gewonnen [16]. Dieser Datensatz ist frei verfügbar und kann ohne weitere Einschränkungen verwendet werden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben setzt sich die Vorgehensweise aus den Schritten Datenvorbereitung, Modellerzeugung, Evaluation und Bereitstellung zusammen. Zur besseren Übersichtlichkeit zeigt Bild 4 den entstehenden Arbeitsablauf.

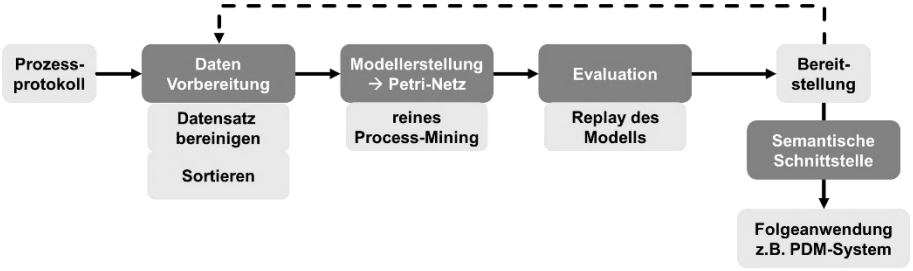



Bild 4: Workflow zur Erzeugung und Bereitstellung von Prozessmodellen

Ausgehend von einem Prozessprotokoll werden die Daten bereinigt und für den eigentlichen Schritt des Process-Mining vorbereitet. Process-Mining erzeugt dann aus dem bereinigten Datensatz ein Petri-Netz, welches durch das sogenannte Replay, also die Simulation des Prozesses aus dem Modell heraus und dem Abgleich mit den realen Daten die Konformität des Modells mit dem Prozess sicherstellt. Diese Konformität fungiert dabei ähnlich wie ein Gütekriterium bei einem Data-Mining-Prozess. Ist das Petri-Netz erzeugt und auf seine Konformität geprüft ergibt sich ein Prozessmodell wie in Bild 5 gezeigt. Die einzelnen Prozessschritte werden in ihrer Abfolge mit den in diesem Fall erhobenen Daten Menge und Dauer verknüpft dargestellt.

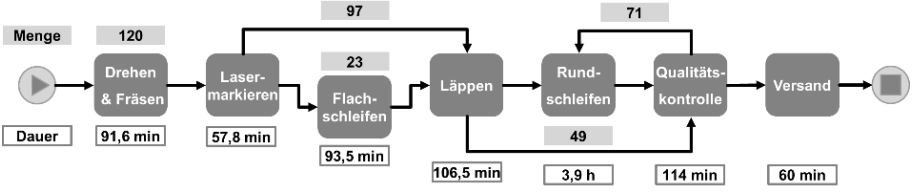



Bild 5: Beispielprozessmodell erzeugt aus dem Datensatz [16]

Wie in Bild 5 gezeigt können dabei auch Verzweigungen auftreten. Dies ist in diesem Fall dadurch zu erklären, dass die gefertigten Bauteile nach dem Prozessschritt schon die erforderliche Güte aufwiesen und deswegen die Nacharbeitsschritte für diese Teile entfallen. Das Prozessmodell kann nun in einem XML-Format abgespeichert werden. Die Aussagen, die aus dem Prozessmodell gezogen werden können, müssen in einem weiteren Schritt durch eine semantische Schnittstelle beschrieben werden. Dadurch wird es möglich, das bereitgestellte Prozessmodell für Folgeprozesse nutzbar zu machen. So können zum Beispiel PDM-Systeme auf Fertigungsprozesse und deren Daten zugreifen. Diese semantische Schnittstelle wird in diesem Beitrag über Ontologien realisiert. In der Beschreibung dieser Schnittstelle wurden die Klassen Prozess, Fertigungsschritt und Produkt eingeführt. Für die Eigenschaften des Prozesses gilt, dass dieser immer einen oder mehrere Fertigungsschritte enthält. Das Produkt benötigt immer mindestens einen Prozess. Der Prozess selbst hat dann im vorliegenden Fall die Eigenschaften: Zeitdauer, Menge, Fehlercode. Das daraus resultierende semantische Modell, stellt eine grundlegende Beschreibungsmöglichkeit der Prozessmodelle dar. Weitere Forschungsbedarfe richten sich an eine Erweiterung der Beschreibungsmöglichkeiten innerhalb der semantischen Schnittstelle.

Die so geschaffenen Methoden können dann auf weitere Fertigungsverfahren übertragen werden. Ein Beispiel wäre hier der Übertrag auf die Blechmassivumformung. Hierfür wären die jeweiligen Prozessmodelle für unterschiedliche umformtechnische Fertigungsverfahren für die gleiche Bauteilgestalt relevant. Dadurch können Aussagen für den zur Bauteilgestalt idealen Umformprozess getroffen werden, um zum Beispiel die Gestaltoptimierung [17] zu verbessern. So lassen sich dann die entsprechenden Prozessmodelle, mit den entstehenden Produkteigenschaften verbinden und dadurch eine Aussage über das passende Fertigungsverfahren gewinnen. Existieren diese Modelle in frühen Phasen der Produktentwicklung, kann dadurch für kommende Produktgenerationen eine Verbesserung herbeigeführt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde gezeigt, dass Process-Mining als Werkzeug für die Modellierung des Herstellungsprozesses geeignet ist. Die Verknüpfung zur semantischen Produktbeschreibung erfolgt durch eine semantische Schnittstelle. Dadurch lassen sich Produktionsprozesse analysieren und z.B. Auffälligkeiten oder Engpässe während der Herstellung im übergeordneten PDM-System erfassen. Darüber hinaus lassen sich entstehende Produkteigenschaften im Rahmen einer Eigenschaftsabsicherung über den Produktentstehungsprozess erfassen und absichern.

Weitere Forschungsbedarfe richten sich vor allem auf die semantische Beschreibung der Schnittstelle, zum Beispiel über eine Standardisierung XML-basierten Datenstruktur. Darüber hinaus sind auch noch weitere Process-Mining Methoden auf ihre Eignung als Modellierungswerkzeug zu untersuchen.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojekts B1 „Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems" im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 73.

Daneben ist diese Forschungsarbeit Teil des an der FAU geförderten Projekts "Optimierung und automatisierte Entwicklung mechatronischer Produkte" (EFRE/OptMePro) und wird durch das bayerische Programm "Investition für Wachstum und Beschäftigung" des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014-2020 finanziert. Dieser wird vom bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie verwaltet. Für den Inhalt dieser Publikation sind die Autoren verantwortlich.

## Literatur

[1] Abramovici, M.; Gerhard, D.: "Use of PDM in Improving Design Processes - State of the Art, Potentials and User Perspectives", Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design ICED 97, Riitahuhta, A., Design Society Tampere, 1997, S. 317–322.

[2] Conrad, J. et al.: "Comparison of knowledge representation in PDM and by semantic networks", ICED 2007 - Paris, 16th International Conference on Engineering Design, J.-C. Bocquet, Design Society Paris, 2007, S.550.

[3] Eigner, M; Stelzer R.: "Product Lifecycle Management", Springer-Verlag, Berlin, 2009.

[4] Vajna, S. et al.: "CAx für Ingenieure", Springer Vieweg Berlin, 2018.

[5] VDI 2221: "Methodik zum Konstruieren und Entwickeln technischer Systeme und Produkte", Beuth, Berlin, 1993.

[6] Kestel, P. et al.: "Konzept zur zielgerichteten, ontologiebasierten Wiederverwendung von Produktmodellen", Beiträge zum 28. DfX-Symposium 2017, Krause, D.; Pätzold, K.; Wartzack, S., TuTech Verlag, Hamburg, 2017.

[7] Staab, S.; Studer, R.: "Handbook on Ontologies (second edition). International Handbooks on Information Systems", Springer Heidelberg, Berlin, 2009.

[8] "OWL 2 web ontology language document overview (second edition)", Technical report, W3C, 2012, http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-overview-20121211.

[9] Sirin, E. et al.: "Pellet: A practical OWL-DL reasoned", Web Semantics Volume 5 Issue 2, 2007, 51-53.

[10] van der Aalst, W.: "Process Mining", Springer Heidelberg, 2016.

[11] Hand, D.; Mannila, H.; Smyth, P.: "Principles of Data Mining", MIT Press Cambridge, 2001.

[12] IEEE: "Standard for eXtensible Event Stream (XES) for Achieving Interoperability in Event Logs and Event Streams", IEEE New York, 2016.

[13] Günther, C.; Rozinat, A.: "Disco: Discover Your Processes." BPM (Demos) 940, 40-44, 2012.

[14] Röhner, S.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: "Acquisition of design-relevant knowledge within the development of sheet-bulk metal forming", 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Copenhagen, Denmark, 2011.

[15] Chapman, P. et al.: "CRISP-DM 1.0 Step-by-step data mining guide", CRISP-DM Consortium, 2000.

[16] Levy, D.: "Production Analysis with Process Mining Technology", NooL – Integration People & Solutions, Dataset, 2014, https://doi.org/10.4121/uuid:68726926-5ac5-4fab-b873-ee76ea412399.

[17] Ashhab, S.; Breitsprecher, T; Wartzack, S.: "Neural network based modeling and optimization of deep drawing – extrusion combined process", Journal of Intelligent Manufacturing 25: 77, 2014.

# Analyse eines Produktentwicklungsprozesses mit Process Mining

Gazmend Mavraj, Stephan Scheele, Frank Mantwill

*Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung,*
*Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg*

## Abstract

Process mining can be used to discover, monitor and improve business processes by extracting knowledge from the event logs of information systems. Process mining includes (automated) process discovery (extracting process models from an event log), conformance checking (monitoring deviations by comparing model and log), network mining, automated construction of simulation models, and model extension. In this paper, we show how process mining techniques can be applied to monitor, check, discover and enhance a potential development process in an automotive industry. The number of contributors and the spread of data over the information systems make the development process very complex. In this case, process mining is essential to check inconformity and compliance, analyze bottlenecks, and suggest improvements.

*Keywords: Process Mining, Event Log, Process Modeling, Optimization*

## 1 Einleitung

Durch den technologischen Fortschritt der digitalen Vernetzung nimmt der Einsatz von Informationssystemen zur computergestützten und automatisierten Verarbeitung von betrieblichen Prozessabläufen zu [1]. Informationssysteme, wie beispielsweise Workflow-Management-Systeme (WfMS), Enterprise-

Resource-Planning-Systeme (ERP) oder Customer-Relationship-Management-Systeme (CRM), bilden das Rückgrat vieler Organisationen. Während der Abwicklung von Prozessen durch Informationssysteme wird die Prozessausführung kontinuierlich in sogenannte Ereignislogs (*event logs*) festgehalten und protokolliert. Aus wirtschaftlicher Sicht steht die stetige Anpassung und Optimierung von Prozessen zur Reduzierung von Kosten im Vordergrund, was allgemein unter dem Begriff „Geschäftsprozessmanagement" (*Business Process Management*, BPM) bezeichnet wird [2].

Die Disziplin *Process Mining* stellt die Schnittstelle zwischen Maschineller Intelligenz und Data Mining auf der einen Seite und Prozessmodellierung und Analyse auf der anderen Seite dar. Die Grundidee von Process Mining ist es, reale Prozessverläufe durch Extrahieren von Wissen aus Ereignislogs heutiger (Informations-)Systeme zu erkennen, zu überwachen und zu verbessern [3]. Wenn es zu Engpässen bei einem Prozessablauf kommt, sind die entsprechenden Einflussfaktoren, die die langen Durchlaufzeiten beeinträchtigen, oftmals nicht zügig zu identifizieren. Es stellt sich die Herausforderung, wie die Daten aus den Ereignislogs verarbeitet werden müssen, um einen Einblick in die komplexen und damit auch häufig wenigen transparenten Prozessabläufe zu erkennen sowie prozessbezogene und objektive Aussagen zwischen SOLL- und IST-Modell zu erhalten [4].

Ziel ist es, unter Nutzung von Ereignislogs Process Mining Techniken anzuwenden, um automatisiert Produktentwicklungsprozesse zu erkennen, auf Übereinstimmungen zu überprüfen, Engpässe zu analysieren, Prozessvarianten zu vergleichen und Verbesserungen vorzuschlagen.

## 2 Process Mining

Mit Process Mining können unterschiedliche Aspekte eines Prozesses berücksichtigt werden. Beispiele sind der Kontrollfluss, d. h. die Abfolge von Aktivitäten, die Organisationsstruktur der Prozessteilnehmer, die verarbeiteten Datenobjekte oder auch die zeitliche Performanz der Prozessausführung [1]. Die Informationen der „digitalen Spur" von ausgeführten Prozessen sind in Ereignislogs hinterlegt (Bild 1).

### 2.1 Ereignislogs

Produktentwicklungsprozesse beinhalten verschiedene Aktivitäten (z.B. „Bauteil anlegen" und „Geometrie zuordnen"). Die konkrete Ausführung eines Produktentwicklungsprozesses bezeichnet man als Fall (*Case*) oder auch Prozessinstanz. Die Ausführung einer bestimmten Aktivität innerhalb eines Falls

korrespondiert mit einem zugehörigen Ereignis (*Event*), z.B. dem Start- oder Endereignis der Aktivität. Jedes Mal also, wenn eine Aktivität ausgeführt wird, wird ein Zeitstempel erstellt. Ereignisse, die mit derselben Aktivität verbunden sind, werden zu Ereignisklassen (*Event Classes*) zusammengefasst. Jede Ereignisklasse wird in dem durch Process Mining erzeugten Prozessmodell eindeutig mit einem Aktivitätsknoten assoziiert. Gerichtete Kanten (Verbindungen) definieren im Prozessmodell eine partielle Ordnung auf der Menge der Aktivitätsknoten und drücken die zeitlich-logische Reihenfolge der Knoten aus. Ereignisse sind eindeutig identifizierbar und werden vom ausführenden System als Ereignislog aufgezeichnet (*Event Log*). Um den Verlauf einzelner Fälle mit Process Mining analysieren zu können, muss jedes Event des Ereignislogs einem konkreten Fall zuordenbar sein.

| Fall ID | Zeitstempel | Aktivität | Ressource | Kosten [€] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 01-07-2018, 11:05 | A | Maschine 1 | 60 |
| 1 | 03-07-2018, 11:35 | B | Maschine 2 | 10 |
| 1 | 05-07-2018, 12:03 | D | Maschine 1 | 35 |
| 2 | 02-07-2018, 11:03 | A | Maschine 1 | 60 |
| 2 | 03-07-2018, 14:07 | C | Maschine 3 | 15 |
| 2 | 05-07-2018, 13:43 | B | Maschine 2 | 10 |
| 2 | 07-07-2018, 10:33 | D | Maschine 1 | 55 |
| 3 | 15-07-2018, 15:47 | A | Maschine 1 | 60 |
| 3 | 17-07-2018, 11:41 | B | Maschine 2 | 10 |
| 3 | 26-07-2018, 14:01 | C | Maschine 3 | 15 |

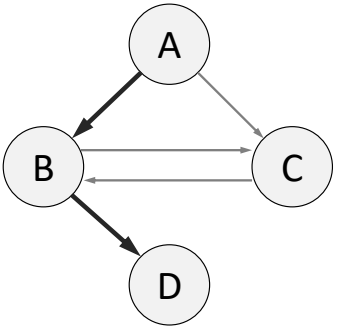



Bild 1: Aufbau eines Ereignislogs als Grundlage für Process Mining. Die Häufigkeiten der jeweiligen Aktivitäten-Übergange werden hervorgehoben.

## 2.2 Process Mining Techniken

Auf der Grundlage von Ereignislogs können die Analyseziele von Process Mining in den drei Kategorien Erkennung (*Discovery*), Konformitätsprüfung (*Conformance Checking*) und Erweiterung (*Enhancement*) [3] aufgeteilt werden (Bild 2).

Ein Großteil der bisher entwickelten Process-Mining-Verfahren ist im Open-Source-Rahmenwerk *ProM* (www.processmining.org) implementiert und frei

verfügbar. ProM wird an der Technischen Universität Eindhoven (TU/e) verwaltet. Die Software *Disco* der Firma Fluxicon (www.fluxicon.com) ermöglicht den Einsatz von Process-Mining-Verfahren durch Endanwender, wobei die Nutzung dieser Werkzeuge auch im akademischen Umfeld erfolgen kann.

Das von Process Mining erzeugte Prozessmodell ist oftmals ein Petri-Netz oder BPMN-Modell [4, Kap. 3]. Das Ziel beim Mining besteht darin, eine treffende Beschreibung aller Ausführungspfade (Abfolge von Aktivitäten) zu finden. Bekannte Algorithmen hierfür sind $\alpha$-Algorithmus, Fuzzy Miner, Heuristic Miner, Genetic Miner [4, Kap. 7].

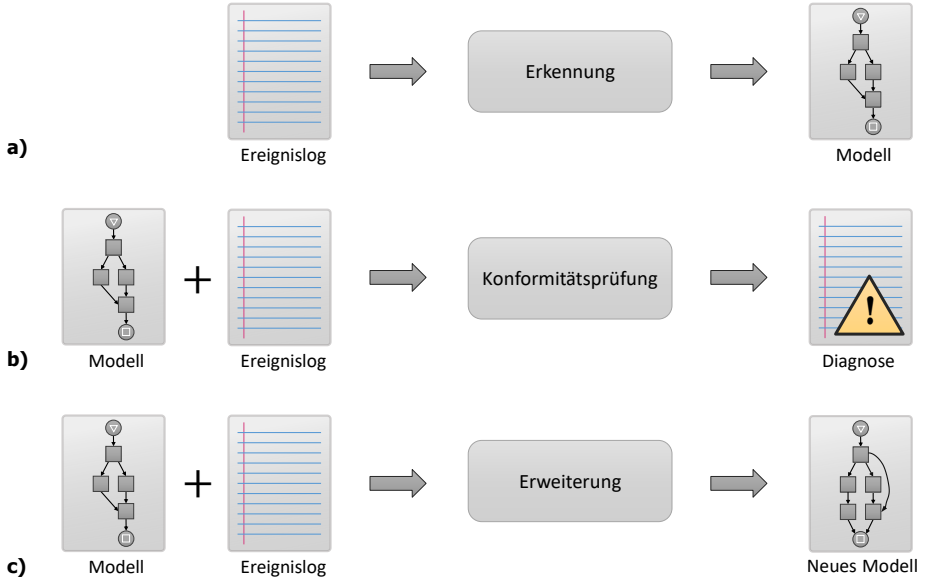



Bild 2: Drei Typen von Verfahren des Process Mining mit ihren Ein- und Ausgaben: a) Erkennung, b) Konformitätsprüfung und c) Erweiterung [1, 3].

### 2.2.1 Erkennung

Process-Mining-Verfahren zur Erkennung (*Process Discovery*) konstruieren einzig und allein aus gegebenen Ereignislogs ohne Hinzunahme weiterer A-priori-Informationen ein Prozessmodell und ermöglichen somit einen unvoreingenommenen Einblick in die Struktur des Prozesses [4, Kap. 2]. Diese Form der Analyse zeigt, wie der Prozess tatsächlich stattfindet. Dabei wird über die verwendete Linienstärke einzelner Verbindungen deren Häufigkeit visualisiert,

ebenso kann eine Animation des Prozessablaufs einzelner Fälle ausgeführt werden [4, Kap. 7].

Um Einsicht in die Organisationsstruktur des Prozesses zu erhalten, können Beziehungen als Kanten zwischen Prozessteilnehmern (Knoten) durch ein soziales Netzwerk dargestellt werden. Dadurch können die Prozessteilnehmer gruppiert und z. B. Rückschlüsse auf die Rollenverteilung in der Organisation gezogen werden [4, Kap. 9]. Bei der Anwendung dieser Art von Process-Mining-Verfahren entfällt nicht nur der Aufwand für die manuelle Erstellung eines Prozessmodells, die extrahierten Prozessmodelle reflektieren den tatsächlichen Prozessablauf, da sie ausschließlich auf Fakten und nicht auf Annahmen basieren [1].

### 2.2.2 Konformitätsprüfung

Ein Prozessmodell kann deskriptiven oder normativen Charakter aufweisen. Im ersten Fall beschreibt das Modell, was tatsächlich passiert, während es im zweiten Fall definiert, was passieren soll [1]. Verfahren der Konformitätsprüfung ermöglichen es, Diskrepanzen zwischen dem modellierten und dem protokollierten Verhalten aufzuzeigen. Dabei können nicht übereinstimmende Elemente in Log und Modell lokalisiert und visuell hervorgehoben werden [4, Kap. 8]. Zudem ist eine Bestimmung des globalen Grads der Übereinstimmung (*fitness*) mithilfe spezieller Metriken und entsprechender Verfahren möglich [1]. Werden Prozessvorgaben, wie beispielsweise Sicherheitsanforderungen in Form von Regeln über Prozesseigenschaften, modelliert, kann ihre Einhaltung automatisiert überprüft und von den Vorgaben abweichende Fälle aufgezeigt werden.

### 2.2.3 Erweiterung

Das wesentliche Ziel von Process-Mining-Verfahren des Typs Erweiterung (*Enhancement*) ist es, ein gegebenes Prozessmodell auf Basis der Informationen aus den Ereignislogs entweder a) zu erweitern oder b) zu korrigieren, um dadurch ein aussagekräftigeres oder optimiertes Prozessmodell zu erhalten [1].

Ein auf diese Art erzeugtes und erweitertes Prozessmodell kann Unternehmen wertvolle Informationen liefern. Ein Beispiel dafür bietet die Analyse von Entscheidungspunkten (*Decision Point Analysis*). Hierbei wird eine Grundidee aus dem Bereich des maschinellen Lernens erfolgreich umgesetzt. Sind im Prozessmodell Entscheidungspunkte, d. h. Stellen mit exklusiven Verzweigungen in verschiedene Ausführungspfade enthalten, können für diese Punkte Geschäftsregeln ermittelt werden, die angeben, unter welchen Voraussetzungen

für einen Fall ein bestimmter Pfad im Prozessmodell eingeschlagen wird [4, Kap. 2]. Ein weiteres typisches Beispiel berührt das Gebiet der Performanz-Analyse. Mit dieser werden für die Ausführung der Aktivitäten des gegebenen Prozessmodells sogenannte Key Performance Indicators (KPIs) ermittelt. Durch die Angabe von minimalen, maximalen und durchschnittlichen Ausführungszeiten können z. B. Wartezeiten oder Engstellen in Prozessen identifiziert und die Prozessausführung optimiert werden [4, Kap. 3].

## 3 Process Mining im Produktentwicklungsprozess

Die Prozessunterstützung durch digitale Werkzeuge und Methoden kann als einer der wesentlichen Hebel bei der Suche nach Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen in indirekten Bereichen der Forschung und Entwicklung gesehen werden. Dies betrifft die Automobilindustrie wie kaum eine andere Branche, da sowohl in der eigentlichen Entwicklung als aus in der Steuerung und Orchestrierung des Entwicklungsprozesses durch den Einsatz moderner IT-Technologien Potentiale gehoben werden können [5]. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die Entwicklung und Produktionsplanung eines Automobils durch Komplexität und Variantenreichtum sehr anspruchsvoll ist, zum anderen muss eine Vielzahl von entwicklungsbeteiligten Personen zielgerichtet und ihres Wertschöpfungsbeitrags entsprechend eingebunden werden [6].

### 3.1 Entwicklungsreife durch Wertschöpfungsbeiträge

Zwar werden unter dem Begriff der „Digitalisierung" in der Automobilindustrie vornehmlich Maßnahmen zusammengefasst, die ein gesteigertes Maß an Rechnerunterstützung in Bezug auf Qualitätsmerkmale des Produktes oder des Kundenerlebnisses betreffen, jedoch sind ebenso interne Prozessverbesserungen, beispielsweise durch kürzere und verlässlichere Abläufe im Rahmen der Produktentstehung des jeweiligen Erzeugnisses darunter fassbar [7]. Das Ziel hierbei ist eine bessere Abbildbarkeit, Durchgängigkeit und Verfolgbarkeit der virtuellen Entwicklung, inklusive der begleitenden Geschäftsobjekte. Um die Entwicklungszeugnisse (Bauteile, Softwarebestandteile, Dokumente usw.) zu jedem Zeitpunkt für alle Beteiligten transparent zu halten, existieren unterschiedliche Ablagemechanismen bzw. Ablagelogiken, die sich mitunter über mehrere IT-Systeme verteilen können. Einblicke in den automobilen Entwicklungsprozess zeigen, dass gerade die Vollständigkeit von Entwicklungsständen und die Steuerung von Entwicklungsergebnissen zu großen Teilen in der Festlegung und Verarbeitung von Metadaten einzelner Geschäftsobjekte liegt und deren Messung, Verfolgung und Steuerung eine Schlüsselrolle für valide Aussage im Hinblick auf Zeit, Kosten und Qualität des Entwicklungsprojektes spielt.

Dies ist insbesondere bei Automobil-Herstellern (OEMs) der Fall, da die eigentliche Erzeugung/Konstruktion des Bauteils oder des Softwarebestandteils oftmals bei spezialisierten Zulieferern stattfindet. Die Hauptaufgabe des Herstellers definiert sich in einer effizienten Verwaltung und Steuerung dieser Entwicklungserzeugnisse in der eigenen Prozesskette. Insbesondere in Entwicklungsbereichen kommt dieser Teilaufgabe eine hohe Bedeutung zu, da die Wertschöpfung und damit die Produktreife maßgeblich von frühzeitigen und qualitativ hochwertigen Entwicklungsbeiträgen der einzelnen Prozessbeteiligten abhängen [6, 8].

## 3.2 Exemplarischer Prozessablauf in der Bauteilentwicklung

Process-Mining-Verfahren tragen dazu bei Qualitäts- und Leistungsaussagen über prozessorientierte Geschäftsvorgänge durch Analyse von Massendaten zu erhalten [3, 9]. Dabei werden Verfahren zur Abbildung von (realen, tatsächlichen) Prozessabläufen geboten, bei denen nicht konformes Prozessverhalten (*Conformance Check*), erstmalige Prozessaufnahme (*Process Discovery*) und mögliche Prozesserweiterung zur zeitlichen oder strukturellen Optimierung (*Enhancement*) erkenn- und darstellbar sind [3, 9]. Bekannte Anwendungsgebiete sind beispielsweise Fertigungs- und Herstellungsprozesse physischer Erzeugnisse mit mehreren Bearbeitungsstationen oder aber auch EDV-gestützte Geschäftsprozesse, wie beispielsweise Bestellvorgänge oder Bonitätsprüfungen.

Eine Anwendung der Process Mining Techniken auf weitere Geschäftsprozesse (z.B. auf den automobilen Entwicklungsprozess), könnte vor dem Hintergrund der genannten Einsatzmöglichkeiten sinnvoll sein. Denn die Stärken von Process Mining aus Anwendersicht wirken vor allem dort, wo Transparenzdefizite in der End-to-End-Prozessüberwachung entstehen, entweder durch eine komplexe Zusammenführung der Beiträge unterschiedlicher Prozessbeteiligter, einer vielschichten und schwer zu überblickenden Prozesslandschaft im Allgemeinen oder der Abbildung in verschiedenen, heterogenen IT-Systemen entlang des Prozesses [10]. Gleichzeitig steigt der Bedarf an leistungsstarkem Monitoring des jeweiligen Entwicklungsfortschritts sowohl auf Bauteil-, als auch auf Komponentenebene. Die Voraussetzung für Process-Mining-Verfahren in allen diesen Anwendungsgebieten ist eine prozessorientierte Sicht auf die Daten, bei denen einzelne Prozessschritte (Aktivitäten) von einem gemeinsamen Vorgangsobjekt durchlaufen werden [9]. Des Weiteren müssen je Prozessinstanz und Prozessdurchlauf geeignete, in den Systemen entsprechend sensierte Event-Logs vorliegen, sodass das Durchschreiten der unterschiedlichen Stationen bzw. Aktivitäten dokumentiert wird und infolge dessen mit entsprechender

Process-Mining-Software analysiert und nachvollzogen werden kann. Ein Beispiel für ein Ereignislog in der Bauteilentwicklung wird in Bild 3 gezeigt.

| Zeitstempel | Instanz | Aktivität | Bearbeiter | Merkmal |
|---|---|---|---|---|
| 10:45:23 2018/06/03 | 1 | Bauteil anlegen | User-ID: AZNE3 | Object_ID: 342.212.757 |
| 15:12:17 2018/06/15 | 1 | Geometrie zu Bauteil zuordnen | User-ID: FW34R | Relation_ID: 3421, Relation_Type: G2B |

Bild 3: Beispiel eines Ereignislogs in der Bauteilentwicklung

Einzelnen Prozessinstanzen, den unterscheidbaren Einzeldurchläufen der Vorgangsobjekte, werden die Aktivitäten mit zeitlicher Verortung zugewiesen.

Gleichzeitig ist es möglich, weitere Attribute des Events miteinzubeziehen, beispielsweise in welchen Systemen diese und jene Aktivität sensiert worden ist oder durch welchen Benutzer dieser/jener Vorgang bearbeitet worden ist. Dies ist besonders dann von Interesse, wenn zusätzlich zum Prozess-Strukturdiagramm ein Beziehungsnetzwerk gezeichnet werden soll, an dem ebenso Konformitätsprüfungen oder erstmalige Prozesserfassung durchgeführt werden kann. Des Weiteren können aus den instanziierten Events unterschiedliche Prozessvarianten abgebildet werden, je nach tatsächlichem, realem Verlauf. So lassen sich IST- und SOLL-Verhalten vergleichen.

Bild 4 zeigt beispielhaft und ausschnittsweise einen übergeordneten Durchlauf eines Fahrzeugentwicklungsprojektes der Automobilindustrie. In dieser Detaillierung ist ein solcher Prozess grundsätzlich auch auf andere Industriebereiche übertragbar; im Vordergrund sollen hierbei jedoch die einzelnen Aktivitäten stehen, die die Reife eines Entwicklungserzeugnisses, in diesem Fall eines Bauteils, in dessen Wertschöpfungsprozess zeigen. In einem ersten Schritt wird dazu die Notwendigkeit eines Funktionsträgers, beispielsweise in einer Funktionsdokumentation oder in einer modellbasierten Fahrzeugarchitektur bestimmt. Idealerweise entsteht hierfür ein eigenes Geschäftsobjekt, sodass die Notwendigkeit bereits frühzeitig systemisch abgebildet werden kann, beispielsweise als Objekt in einem Produktdaten-Managementsystem. So entsteht gleichzeitig ein Arbeitsauftrag an den Bauteilentwickler, der nun entscheiden kann, ob er ein bestehendes Bauteil zur Funktionserfüllung heranzieht, oder eine Neuentwicklung durchführen muss. Im Falle einer Neuentwicklung gilt es, die in der Abbildung dargestellten Prozessschritte, wie Material- oder Geometriezuordnung, einzuhalten, sodass das Bauteil für einen Einsatz ausreichend beschrieben ist. Sobald dies geschehen ist, kann mit Hilfe des Bauteils auf die Funktionsnotwendigkeit geantwortet werden, indem beispielweise durch Zuordnung eine Relation in einem Datenmodell zwischen beiden Geschäftsobjekten erstellt wird. Folglich kann ein geometrischer und technischer Fit-Check des

Bauteils und dessen Geometrie im Fahrzeugkontext mit Hilfe von *Digital-Mock-Up*-Werkzeugen erfolgen. Diese Abfolge ist in der Praxis durchaus kreisläufig, da die spätere Geometrie iterativ in einem Kollaborationsprozess unterschiedlicher Gewerke entsteht. Eine ähnliche Abhängigkeit existiert bei den folgenden Aktivitäten, der verwendungsbezogenen Freigabevorbereitung und deren Genehmigung. Hierbei wir auf Basis eines passierten Fit-Checks weitere Dokumentation gesammelt, um das Bauteil in einem Fahrzeugprojekt sowohl im Hinblick auf die Produktionsplanung als auch für den späteren Gebrauch vor Kunde freigeben zu können. Ist die Freigabe erteilt, kann das Bauteil in einer entsprechenden Stückliste aufgeführt werden. Für den Fall einer Änderung nach diesem Zeitpunkt, besteht die Auflage, einen Änderungsprozess durch Antrag und nachfolgender Genehmigung zu durchlaufen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der tatsächliche Prozess einer Bauteilentwicklung und -steuerung in der Automobilindustrie im Detail durchaus komplexer sein kann und der hier vorliegende Ausschnitt vordergründig die Vielzahl an Aktivitäten und Beteiligten im Wertschöpfungsprozess illustrieren soll.

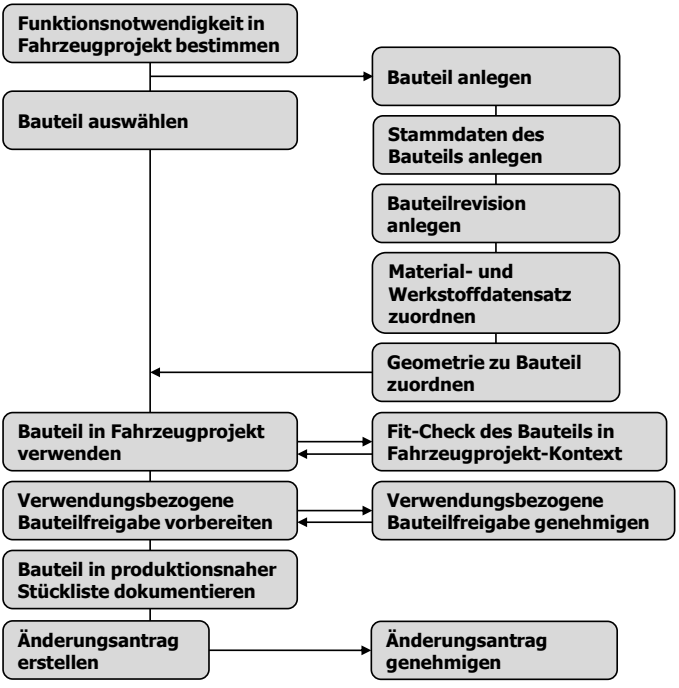



Bild 4: Ablaufschema Bauteilentwicklung

## 3.3 Darstellung als Process-Map

Betrachtet man im Folgenden die oben gezeigten Prozessschritte als erfassbare Log-Events heterogener Produktdaten- und Autorensysteme, so lässt sich mit beispielsweise ProM oder Disco eine *Process-Map* erstellen, in der der/die tatsächliche(n) Verlauf/Verläufe abgebildet werden können (Bild 5).

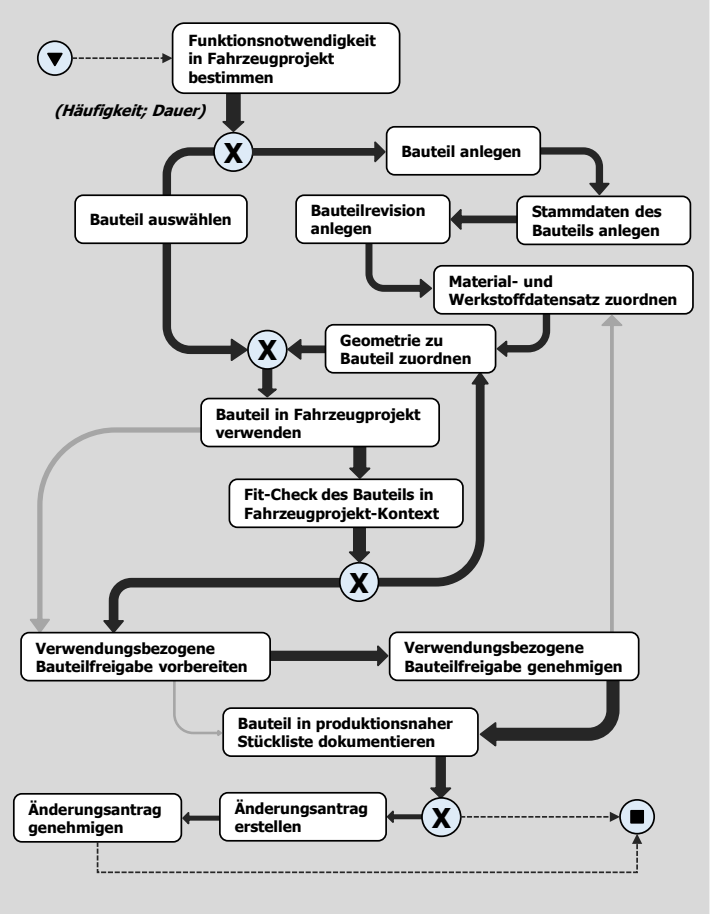



Bild 5: Modell für ein Process-Map im Bereich der Bauteilentwicklung

Zu erkennen sind neben der Flussstruktur aller Instanzen einer Variante je nach gewünschter Sicht die Häufigkeiten des Durchlaufs und die benötigte Dauer, sowohl in Durchschnitt als auch im Gesamten. Die Dicke der Pfeile symbolisiert die Häufigkeit zwischen zwei Aktivitäten, der sich rechnerisch stimmig

aufteilen muss. Die Analysen lassen an dieser Stelle nun zu, dass beispielsweise nicht konformes Prozessverhalten aufgedeckt werden kann, in diesem Fall dargestellt durch die grauen Flusspfeile. So wurde in wenigen Fällen bereits eine verwendungsbezogene Freigabe vorbereitet, ohne das die Geometrie des Bauteils einen Fit-Check durchlaufen hat. Oder aber eine Dokumentation in der Stückliste hat bereits stattgefunden, bevor die Freigabe akzeptiert worden ist. Solche, aber auch weitere denkbare Abweichung vom Soll-Prozess, lassen sich hiermit identifizieren. Insbesondere wenn eine Process-Map durch eine Beziehungsstruktur der einzelnen Bearbeiter in einer ergänzenden Sicht angereichtet wird, kann weiteres Real-Verhalten aufgedeckt werden (Compliance-Check, 4-Augen-Prinzip).

## 4 Fazit

Was die vorliegende theoretische Betrachtung ausklammert, sind die Herausforderung in der Praxis. Denn für eine solche Aufstellung benötigt es neben vieler Schnittstellen zu den verarbeitenden Systemen ebenso eine einheitliche Strukturierung der Log-Daten. Dies könnte sich, je nach Umfang des betrachteten Prozesses und der Vielzahl an beteiligen Bearbeitern und Aktivitäten, als sehr aufwändig erweisen. Da in der automobilen Entwicklung, selbst auf der beschreibenden Ebene, das tatsächliche Prozessverhalten schwer bis kaum nachvollziehbar ist, kann eine Anwendung von Process-Mining-Verfahren Chance und Herausforderung zugleich sein. Dennoch kann Process-Mining als Querschnitts- und Unterstützungstechnologie in bestehende Trends und Initiativen einzahlen, vordergründig bei der Erstellung von übergeordneten Vernetzungssichten auf Daten und Geschäftsobjekte (Dashboards, KPI-Kontrolle). Dabei ist aus IT-architektonischer Perspektive besonders die Verlagerung des Informationsgehalts auf eine höhere Logikebene von Interesse, da somit weitere Anwendungen des kontextsensitiven Arbeitens und des Arbeitens im Zuge eines systemübergreifenden *Digital Workplace* bedient werden können [11].

Des Weiteren können für zeitliche und leistungsorientierte Betrachtungen einzelner Prozessinstanzen die für die Durchlaufzeit des Prozesses kritischen Stellen automatisiert erkannt werden. Die Visualisierung des IST-Zustandes eines Prozessablaufs ermöglicht es, aufwandsreduziert zu objektiven und handlungsrelevanten Aussagen zu gelangen. Hieraus lassen sich beispielsweise Verbesserungsvorschläge für ein *Process Redesign* ableiten. Darüber hinaus lassen sich einzelne Teilprozessschritte (statt des gesamten) mittels statistischer Methoden ebenfalls auf Effizienz analysieren und dazu verschiedene Einflussfaktoren variieren. So kann der Nutzeneffekt bei Problemlösungs- und Entscheidungsfähigkeit vergrößert werden.

## Literatur


[1] Accorsi, R., Ullrich, M., van der Aalst, W.: "Process Mining", Informatik-Spektrum, 35(5), 2012, 354-359.

[2] Dumas, M. et al.: "Fundamentals of Business Process Management", 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2018.

[3] IEEE CIS Task Force on Process Mining: Process Mining Manifest (2011), https://www.win.tue.nl/ieeetfpm/lib/exe/fetch.php?media=shared:pmm-german-v1.pdf (Aufgerufen: 12.08.2018)

[4] van der Aalst, W.: "Process Mining: Data Science in Action", 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2016.

[5] Winkelhake, Uwe: Die digitale Transformation der Automobilindustrie. Treiber - Roadmap - Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Handbuch), 2017

[6] Braess, Hans-Hermann et al.: Produktentstehungsprozess. In: Hans-Hermann Braess und Ulrich Seiffert (Hg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 1133–1219.

[7] Gärtner, Christian: Der Fall der Automobilindustrie. In: Christian Gärtner und Christian Heinrich (Hg.): Fallstudien zur Digitalen Transformation, Bd. 96. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 1–35.

[8] Hab, Gerhard; Wagner, Reinhard: Projektmanagement in der Automobilindustrie. Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette. 4. Auflage, Wiesbaden: Springer, 2013

[9] Stocker, Thomas; Accorsi, Rafael; Rother, Tobias: Computergestützte Prozessauditierung mit Process Mining. In: HMD 50 (4), 2013, S. 92–103.

[10] Krebs, Matthias; Stadler, Fabian; Anke, Jürgen: Vorbereitung von SAP Event Logs für Process Mining mit ProM. In: HMD 55 (1), 2018, S. 104–119.

[11] Günther, Jochen: Digital Workplace – Herausforderungen und Implikationen für die Gestaltung. In: HMD 54 (6), 2018, S. 859–873.

# Geometrische Beschreibung fahrfremder Tätigkeiten

Niko Seebach[1,2], Florian Fitzen[1], Frank Arlt[1], Beate Bender[2]

[1] *BMW Group*

[2] *Lehrstuhl für Produktentwicklung;*
*Ruhr-Universität Bochum*

## Abstract

Caused by the technology of automated driving the user is temporarily released from driving and can perform non-driving-related tasks (NDRTs), such as sleeping or working. The aim of this paper is to describe NDRTs on a geometric level, to be able to integrate them in the geometric package of the car conception. To address the objective a literature based study was conducted as well as interviews with geometric car conception experts and a databased analysis of vehicle dimensions. The results of the research describe the NDRTs through the theme fields of anthropometrical ergonomics posture, orientation, room space, sight and reachability which are connected to geometric values in a matrix. The results can be used to describe the NDRTs in order to integrate them into the package.

*Keywords: Non-driving-related Tasks, vehicle package, user-centered product development, anthropometric ergonomics*

# 1 Einleitung

Durch die Technologie des automatisierten Fahrens entfällt für den Nutzer die Fahrtätigkeit temporär. Daher erhält er Zeit für die Ausübung fahrfremder Tätigkeiten (FFT) wie Schlafen, Filme Schauen oder Arbeiten [1]. Diese Tätigkeiten müssen während der frühen Phase der Fahrzeugkonzeptentwicklung und insbesondere bei der Gestaltung des Innenraums einbezogen werden [2]. Durch die Vielzahl der auftretenden FFT und deren Wechselwirkungen zu der ursprünglichen Fahrtätigkeit wird die geometrisch kollisionsfreie Anordnung der Fahrzeugkomponenten und Insassen, das sogenannte Package, deutlich komplexer [3]. Um geometrische Einbauuntersuchungen im Package durchführen zu können, ist es von zentraler Bedeutung, die FFT geometrisch zu beschreiben.

## 1.1 Motivation und Relevanz

Im Folgenden wird die Motivation weiter detailliert, um die Relevanz des Beitrages zu verdeutlichen und die Untersuchungen und Ergebnisse besser einzuordnen. Das weitläufige Feld der Automatisierung wird nach der Society of Automotive Engineers (SAE) in sechs Level des automatisierten Fahrens eingeteilt, vgl. Bild 1 [4].

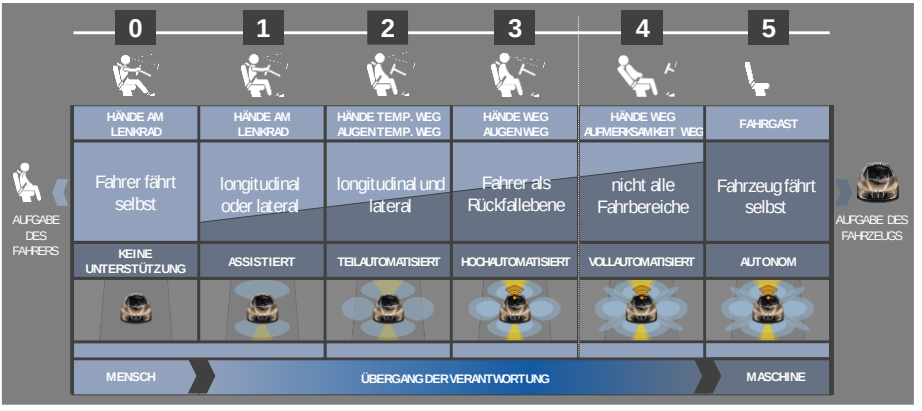



Bild 1: Die sechs Level der Automatisierung nach [4]

Level 0 beschreibt nach der Definition Fahrzeuge, die vollkommen ohne Automation ausgestattet sind und ausschließlich vom Nutzer gesteuert werden. Diese Fahrzeuge machen den größten Anteil der auf der Welt vorhandenen Fahrzeuge aus [5]. Bei Level 1 Fahrzeugen wird entweder die longitudinale oder laterale Steuerung des Fahrzeugs vom System übernommen. Bei Level 2 werden beide Funktionen unter ständiger Überwachung des Fahrers übernommen.

In Level 3 wird es dem Fahrer erstmalig ermöglicht, seine Augen von der überwachenden Funktion abzuwenden und sich kurzzeitig auf andere Tätigkeiten zu konzentrieren, jedoch unter Beachtung einer Übernahmeaufforderung des Fahrzeugs mit ausreichender Zeitreserve [4], [6]. Demzufolge ist der Fahrer in diesem Level noch immer die kritische Rückfallebene, die bei einer Gefahrensituation eingreifen muss. Der Level 3 ist der höchste erreichte Level bei aktuell existierenden Fahrzeugen [6]. Erstmalig in Level 4 wird der Fahrer von dieser zeitkritischen Übernahmeaufforderung in bestimmten Fahrbereichen befreit, so dass er seine Aufmerksamkeit vollständig von der Fahrtätigkeit abwenden kann. Dieser Level wird laut Experteneinschätzungen frühestens ab 2025 erreicht [6]. Dabei übernimmt das System des Fahrzeugs in bestimmten Fahrbereichen wie z.B. einer Autobahnfahrt, die Rückfallebene und ist in diesem Bereich immer in der Lage, den minimalen Risikozustand herzustellen. Da viele unterschiedliche Fahrbereiche bestehen, welche von Geschwindigkeit, Straßentyp, Witterungsbedingungen, Tageszeiten und Verkehrsdichte abhängen, ist es immer noch erforderlich, dass der Fahrerarbeitsplatz erhalten bleibt. Dadurch kann der Mensch in den Fahrbereichen, in denen das System nicht komplett autark agiert, die Fahraufgabe wieder selbstständig auszuführen. Level 5 deckt alle Fahrbereiche ab, die während einer Fahrt auftreten, deshalb kann der Fahrerarbeitsplatz entfallen und es wird dem Nutzer möglich, ausschließlich als Passagier zu agieren. Dieser Level wird, falls er überhaupt umsetzbar ist, frühestens ab 2035 erreicht [6].

Für eine genaue Definition der FFT ist es notwendig, die Mensch-Maschine Interaktion und den Einfluss der Automatisierung ab Level 4 einzuordnen, daher ist in Bild 3 der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis dargestellt.

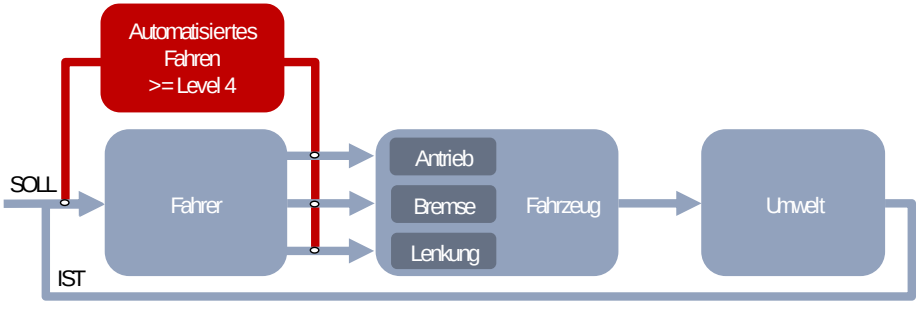



Bild 2: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis nach [7]

Ab Level 4 wird der Fahrer in dem spezifischen Anwendungsfall der automatisierten Fahrt aus dem Regelkreis entkoppelt und somit von seiner Fahraufgabe befreit. Damit entfallen die primäre Fahraufgabe, welche aus Navigation,

Führung und Stabilisation besteht sowie die sekundäre Fahraufgabe, welche Aufgaben wie Blinken, Hupen, Wischen, Auf- und Abblenden beinhaltet [7]. Lediglich die tertiäre Fahraufgabe, die alle Tätigkeiten umfasst, die nichts mit der eigentlich Fahraufgabe zu tun haben, bleibt vorhanden und wird in der Forschung als fahrfremde Tätigkeit bezeichnet [1]. Mit zunehmender Entwicklung der Automatisierungsfunktionen und somit Erschließung der unterschiedlichen Fahrbereiche, nimmt der Anteil der FFT an der Fahrzeit weiter zu und die eigentliche Fahrtätigkeit rückt in den Hintergrund, womit sich die Bedeutung der FFT stetig erhöht, wie bereits in unterschiedlichen Studien belegt [8], [9].

Die Relevanz der geometrischen Beschreibung ergibt sich aus der zentralen Rolle der Konzeptentwicklungsphase innerhalb des Produktentwicklungsprozesses, welcher in Standardwerken wie dem Pahl/Beitz beschrieben ist [10]. An dieser Stelle werden innerhalb der frühen Phase die wesentlichen Produktmerkmale bestimmt [11]. Um auch auf die Relevanz für die Industrie zu verweisen, wird im Folgenden spezifisch auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung eingegangen. Die Fahrzeugkonzeptentwicklung ist durch alle Aufgaben gekennzeichnet, die in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses eines Fahrzeuges bearbeitet werden, um einen in sich konsistenten ersten Produktentwurf zu erstellen [3], [12]. Im Fahrzeugentwicklungsprozess befindet sich die Konzeptentwicklung innerhalb der ersten Phase, der Produktdefinition. Die zwei darauffolgenden Phasen sind die Produktentstehung und die Serienbetreuung, vgl. Bild 3.

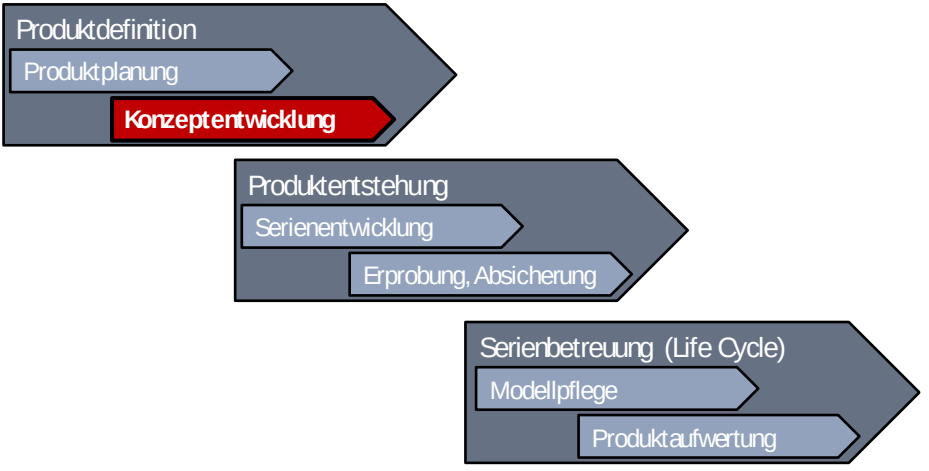



Bild 3: Der Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie nach [3]

Innerhalb der Produktdefinition ist der Konzeptentwicklung die Produktplanung vorgelagert [13]. Dabei legt die Produktplanung maßgeblich den Fahrzeugcharakter bzw. Typen aufgrund von Eingangsgrößen wie Kundenwünschen, Studien, Herstellerimage, Marktuntersuchungen, Wettbewerb und Trends fest. Als Schnittstelle zwischen der Produktplanung und der Konzeptentwicklung werden aufgrund dieser unterschiedlichen Eingangsgrößen erste Ziele für das Fahrzeug definiert und festgelegt. Die definierten Ziele werden anschließend in der Konzeptentwicklung durch die jeweiligen Abteilungen bearbeitet und in regelmäßigen Abstimmterminen auf Gesamtfahrzeugebene ausgetauscht. Einen großen Anteil an der frühen Konzeptentwicklung hat die geometrische Gestaltung, das sogenannte Package, bei dem die groben Abmessungen der unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten und Insassen zueinander untersucht und kollisionsfrei angeordnet werden. Die FFT werden bereits durch die Produktplanung und deren Studien erfasst, jedoch fehlen im Package der Konzeptentwicklung Ansätze zur systematischen geometrischen Beschreibung und Integration. Diese Ansätze sind in der frühen Phase von großer Bedeutung, da dort bereits ein Großteil der Kosten festgelegt wird und es im Laufe des Entwicklungsprozesses immer aufwändiger wird, Änderungen einzusteuern. Dem entgegengesetzt ist der niedrige Wissensstand zu Beginn der Entwicklung, was durch das Paradoxon der Konstruktion beschrieben wird.

## 1.2 Stand der Forschung, Forschungsproblem und -Ziel

Im Stand der Forschung bestehen lediglich Ansätze zur geometrischen Beschreibung der Fahrtätigkeit. Sie wird nach Bubb über die folgenden Themenfelder der anthropometrischen Ergonomie definiert: Sitzhaltung, Sicht, Erreichbarkeit und Raumbedarf [7]. Die Themenfelder (z.B. Sitzhaltung) können durch unterschiedliche Merkmale (z.B. Torsowinkel) und deren konkrete Ausprägungen in Form von Maßen, die sich aus ergonomischen Betrachtungen ergeben (z.B. Torsowinkel: 20°-35°), beschrieben werden. Die Themenfelder, Merkmale und Maßausprägungen sind bisher allein durch die Fahrtätigkeit vorgegeben und müssen im Hinblick auf das automatisierte Fahren und die FFT angepasst werden [2]. Ziel des Beitrages ist es daher, ein Modell zu erarbeiten, das für die anstehenden Veränderungen eine transparente Unterstützung des Entwicklers darstellt. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage: Wie werden die FFT in einem Modell geometrisch, unter Berücksichtigung angepasster Themenfelder, Merkmale und Ausprägungen beschrieben?

## 2 Verwendete Methoden, Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur geometrischen Beschreibung der FFT wurde in fünf Schritten erarbeitet. Im ersten Schritt wurden durch eine Literaturanalyse verschiedener Fahrzeugkonzeptionsansätzen die bestehenden Themenfelder angepasst [2]. Im Anschluss wurden die Merkmale der jeweiligen Themenfelder mithilfe einer Literaturanalyse von ergonomischen Studien mit einem anderen Produktbezug wie z.B. Flugzeugen, Zügen und Büroarbeitsplätzen ermittelt [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Außerdem wurden die Merkmale durch mündliche, partiell strukturierte und offene Expertengespräche mit Fahrzeugkonzeptentwicklern und Ergonomen (n=15) qualitativ konkretisiert und je ein ausprägungsbestimmendes Merkmal pro Themenfeld festgelegt. Im dritten Schritt erfolgte die Bestimmung der minimalen und maximalen Ausprägung des ausprägungsbestimmenden Merkmals durch die ergonomischen Studien. Um eine vereinfachte Zuordnung der FFT zu den Ausprägungen in der frühen Konzeptentwicklung zu ermöglichen, wurden mithilfe der Expertengespräche die Anzahl der Ausprägungen zwischen den Extrema festgelegt. Diese Anzahl wurde aus Sicht der Experten so grob gewählt, dass die Komplexität in der frühen Phase einerseits nicht zu hoch wird und andererseits so fein aufgeteilt, dass eine differenzierte Beschreibung der FFT möglich ist.

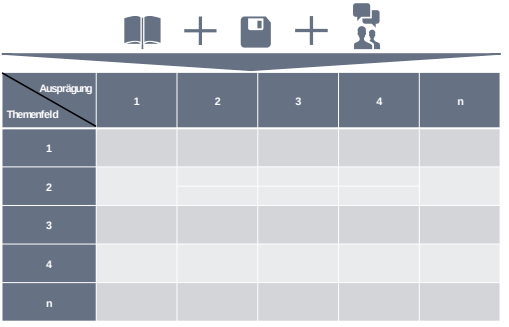



Bild 4: Vorgehen zur Erstellung des Modells für die Beschreibung FFT

Im vierten Schritt wurden neben den Ausprägungen der ausprägungsbestimmenden Merkmale auch die Ausprägungen der jeweils davon abhängigen Merkmale durch die Literaturanalysen bestimmt. Mithilfe einer datenbankbasierten Auswertung statistischer Körpermaße und einer Fahrzeugdatenbank (n=259) wurden die Ausprägungen in Bezug zu der Fahrzeugkonzeptentwicklung gesetzt und durch einen Vergleich mit den Literaturwerten plausibilisiert. Zuletzt wurden die einzelnen Ergebnisse in einer Matrix miteinander verknüpft, um ein transparentes Modell zur Beschreibung der FFT zu erstellen. Bild 4 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung und Verknüpfung der Untersuchungsergebnisse.

## 3 Ergebnisse

Die Kombination der Einzeluntersuchungen der jeweiligen Themenfelder wird innerhalb einer Matrix verbunden und stellt damit eine transparente Unterstützung für den Entwickler dar. Bild 5 zeigt die befüllte Matrix und die Ausprägung der Maße am Beispiel einer entspannten Haltung. Im Folgenden werden die 5 Themenfelder mit ihren 21 Merkmalen und Ausprägungen detailliert vorgestellt.

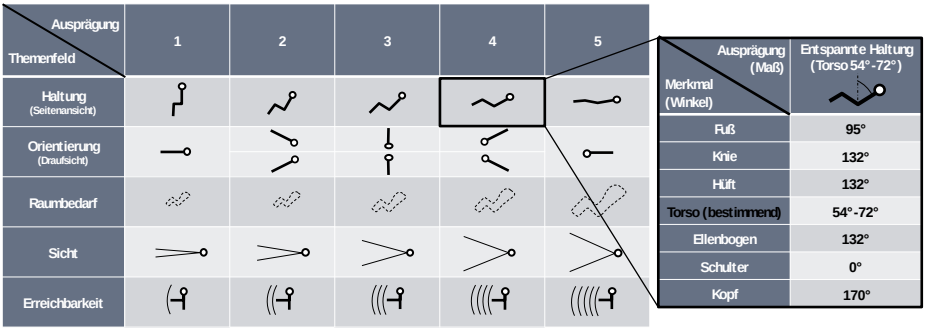



Bild 5: Modell für die geometrische Beschreibung FFT

Das erste Themenfeld ist die Haltung, die der Nutzer annimmt. Diese wird über folgende Merkmale in Form von Gelenkwinkeln beschrieben: Fuß, Knie, Hüft, Torso, Ellbogen, Schulter und Kopf, vgl. Bild 6. Die Ausprägungen variieren zwischen einer aufrechten und einer liegenden Haltung, um die kritischen geometrischen Extrema darzustellen. Bild 6 zeigt die fünf definierten Maßausprägungen, die in Abhängigkeit von dem jeweiligen ausprägungsbestimmenden Torsowinkel stehen.

| Ausprägung in ° / Merkmal | Aufrecht | Halbaufrecht | Halbentspannt | Entspannt | Liegen |
|---|---|---|---|---|---|
| Fuß | 97 | 105 | 108 | 95 | 95 |
| Knie | 95 | 100 | 115 | 132 | 170 |
| Hüft | 90 | 104 | 119 | 132 | 160 |
| Torso | 9 (0-18) | 27 (18-36) | 45 (36-54) | 63 (54-72) | 81 (72-90) |
| Ellenbogen | 93 | 121 | 140 | 132 | 170 |
| Schulter | 10 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Kopf | 140 | 187 | 185 | 170 | 170 |

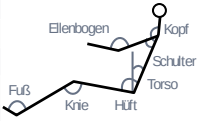



Bild 6: Themenfeld Haltung: Merkmale mit Maßausprägungen

Das Themenfeld Orientierung stellt eine Erweiterung der Haltung dar. Es wird durch das Merkmal des Z-Achsenwinkels beschrieben, da es dem Nutzer ermöglicht wird eine Rotation um die Z-Achse auszuführen, vgl. Tabelle 1. Um eine Abdeckung aller Orientierungsbereiche aufzuspannen, sind die Ausprägungen auf die jeweiligen Quadranten und Mittellinien eingeteilt.

Tabelle 1: Themenfeld Orientierung: Merkmale mit Maßausprägungen

| Ausprägung in ° / Merkmal | vorwärts | vorwärts links / vorwärts rechts | seitlich links / seitlich rechts | rückwärts links / rückwärts rechts | rückwärts |
|---|---|---|---|---|---|
| Z-Achsenwinkel | 0 (337,5-22,5) | 45 (22,5-67,5) | 90 (67,5-112,5) | 135 (112,5-157,5) | 180 (157,5-202,5) |
| | | 225 (202,5-247,5) | 270 (247,5-292,5) | 315 (292,5-337,5) | |

Das Themenfeld Raumbedarf wird durch Merkmale beschrieben, die ein relatives Offset zu den jeweiligen Körperregionen des Nutzers vorgeben, vgl. Bild 7. Dazu wurden folgende Körperregionen herangezogen: Kopf, Oberarm, Unterarm, Torso, Oberschenkel, Unterschenkel und Fuß. Dabei sind die Abstände immer adaptiv an die jeweilige vorher bestimmte Haltung und Orientierung gekoppelt und können somit flexibel eingesetzt werden.

| Ausprägung in mm / Merkmal | Aktivität Klein | Aktivität Mittelklein | Aktivität Mittel | Aktivität Mittelgroß | Aktivität Groß |
|---|---|---|---|---|---|
| Kopf | 20 | 49 | 77 | 106 | 134 |
| Oberarm | 60 | 84 | 108 | 131 | 155 |
| Unterarm | 73 | 98 | 123 | 147 | 172 |
| Torso | 17 | 44 | 70 | 97 | 123 |
| Oberschenkel | 59 | 69 | 79 | 89 | 99 |
| Unterschenkel | 53 | 63 | 73 | 83 | 93 |
| Fuß | 12 | 38 | 64 | 90 | 116 |

Bild 7: Themenfeld Raumbedarf: Merkmale mit Maßausprägungen

Das Themenfeld Sicht wird durch die Merkmale der jeweiligen Sichtkegel in Y sowie positiver und negativer Z-Richtung bestimmt, in Abhängigkeit vom Augpunkt des Nutzers, vgl. Tabelle 2. Dadurch wird bestimmt, wo das für die FFT benötigte Interaktionselement liegen sollte [24]. Abhängig von dem ausprägungsbestimmenden Merkmal der Nutzungshäufigkeit, werden die Sichtkegelbereiche größer und kleiner festgelegt. Dadurch wird bei einer hohen Nutzungshäufigkeit eine ermüdungsfreie Sicht auf das Interaktionselement gewährleistet. Bei einer niedrigen Nutzungshäufigkeit sind die Freiheitsgrade der Anordnung des Interaktionselements größer.

Tabelle 2: Themenfeld Sicht: Merkmale mit Maßausprägungen

| Ausprägung in ° / Merkmal | Dauerhaft | Oft | Meistens | Manchmal | selten | nie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Y-Sichtkegel | 0-15 | 15-30 | 30-75 | 75-95 | >95 | - |
| Z-Sichtkegel +0 | 0-15 | 10-25 | 25-60 | 60-110 | >110 | - |
| Z-Sichtkegel -0 | 0-(-15) | (-15)-(-40) | (-40)-(-70) | (-70)-(-130) | <-130 | - |

Das Themenfeld Erreichbarkeit wird durch die Merkmale des X-,Y- und Z-Bedienabstandes bzw. Greifraums bestimmt, in dem das Interaktionselement liegt, vgl. Tabelle 3. Die Messung der Angabe bezieht sich auf den Sitzreferenzpunkt des Nutzers. Auch bei diesem wird als ausprägungsbestimmendes Merkmal die Nutzungshäufigkeit festgelegt. Dadurch muss bei einer häufigen Nutzung der Bedienabstand geringer sein als bei einer Selteneren, so dass auch neben einer ermüdungsfreien Sicht auch eine ermüdungsfreie Erreichbarkeit gewährleistet ist.

Tabelle 3: Themenfeld Erreichbarkeit: Merkmale mit Maßausprägungen

| Ausprägung in mm / Merkmal | Dauerhaft | Oft | Meistens | Manchmal | selten | nie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| X-Bedienabstand | 0-100 | 100-160 | 160-450 | 450-780 | >780 | - |
| Y-Bedienabstand | 30-250 | 0-30,250-380 | 20-400 | -200-420 | <-200, >420 | - |
| Z-Bedienabstand | 0-100 | 100-160 | 160-450 | 450-780 | >780 | - |

## 4 Diskussion und Fazit

Das Ergebnis stellt ein Modell zur geometrischen Beschreibung der FFT dar. Mithilfe dieses Modells erhält der Entwickler eine transparente Unterstützung, um die FFT den angepassten Themenfeldern, Merkmalen und Ausprägungen in Form von Maßen zuzuordnen. Erst durch die Einbeziehung dieser Ergebnisse ins Package ist es möglich, Wechselwirkungen von FFT zu zukünftigen automatisierten Fahrzeugkonzepten zu erkennen. Bild 8 zeigt die Anwendung des Modells am Beispiel der FFT „Film auf internem Display schauen". Als Haltung ist die Ausprägung vier festgelegt, was in einer entspannten Position mit den jeweiligen Gelenkwinkeln resultiert. Die Orientierung liegt mit Ausprägung eins in Fahrtrichtung, um Kinetose zu vermeiden. Da die Aktivität der Tätigkeit gering ist, wird ein kleiner Raumbedarf mit der Ausprägung zwei festgelegt. Die Sicht auf den Bildschirm ist essentiell für die Ausführung der Tätigkeit, daher muss er in einem kleinen Sichtkegelbereich liegen und wird somit über die Ausprägung eins definiert. Die Erreichbarkeit kann in einem größeren Abstand liegen, da die physische Interaktion nur einen geringen Anteil an der Interaktion hat.

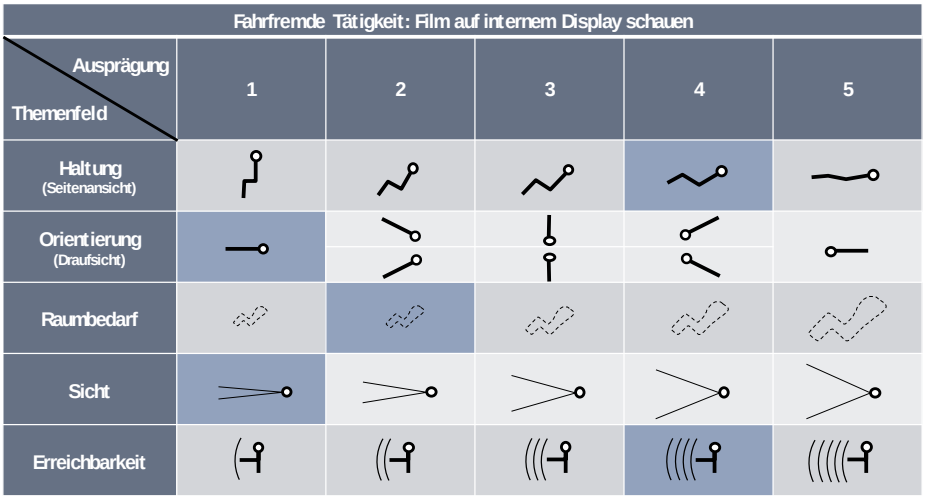



Bild 8: Angewendetes Modell am Beispiel der FFT Film schauen

Um die ermittelten Ausprägung der Maße aus den Studien anderer Produkte zu validieren, sind in Zukunft weitere Ergonomiestudien durchzuführen. Außerdem bedarf es im weiteren Entwicklungsprozess einer detaillierteren Ausarbeitung der FFT. In weiterführenden Forschungsvorhaben müssen Konzepte gefunden werden, um die FFT in das Package einzubeziehen. Im Fokus stehen dabei die Wechselwirkungen zwischen der Fahrtätigkeit und den FFT, um Zielkonflikte aufzeigen zu können.

## Literatur

[1] Pfleging, B.; Schmidt, A.: "(Non-) Driving-Related Activities in the Car: Defining Driver Activities for Manual and Automated Driving", Workshop on Experiencing Autonomous Vehicles: Crossing the Boundaries between a Drive and a Ride,CHI'15, 2015.

[2] Tzivanopoulos, T. et al.: "Neue Denkansätze in der Fahrzeugkonzeption", ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 117,9, 2015, S. 16–21.

[3] S. Pischinger and U. Seiffert, Eds.: "Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik", 8th ed., Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.

[4] SAE International: "SAE J3016 Surface Vehicle Recommended Practice, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems", SAE International, Warrendale and Troy, 2016.

[5] Hirz, M.; Walzel, B.: "Sensor and object recognition technologies for self-driving cars", Computer-Aided Design and Applications, 2018, S. 1–8.

[6] Fraunhofer IAO and Horváth & Partners: "The Value of Time, Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren", Fraunhofer IAO and Horváth & Partners, Stuttgart, 2016.

[7] Bubb, H. et al.: "Automobilergonomie", Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.

[8] Fitzen, F.; Amereller, M.; Paetzold, K.: "Approximation of the user behaviour in a fully automated vehicle referring to a stationary prototype-based research study" in 15th International Design Conference, Clarkson et al. (Hg.), Design Society, Dubrovnik,, 2018, S. 2187–2196.

[9] Pfleging, B.; Rang, M.; Broy, N.: "Investigating user needs for non-driving-related activities during automated driving" in MUM 2016: 15th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia : proceedings : Dec 12 - Dec 15, 2016, Rovaniemi, Finland, Rovaniemi, Finland, 2016, S. 91–99.

[10] Pahl, G.; Beitz, W.: "Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung", Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.

[11] Song, Y.-W. et al.: "Optimierung des Produktentwicklungsprozesses mittels Risikoanalyse vernetzter Anforderungen", Design for X: Beiträge zum 28. DfX-Symposium, Oktober 2017, D. Krause, K. Paetzold, and S. Wartzack, Eds., 1st ed.: Tutech Verlag, TuTech Innovation GmbH, Hamburg, Hamburg, 2017.

[12] Krasteva, P. et al.: "Zielkonfliktidentifikation zwischen Design, Technik und Ergonomie – Ein Beitrag zur Lösungsfindung am Beispiel der PKW-Maßkonzeption", Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Stuttgart, 2017.

[13] Hirz, M.; Wilhelm, D.; Anton, G.: "Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development, Development Processes, Geometric Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data Management", Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2013.

[14] Workineh, S. A.; Yamaura, H.: "Effects of Multiple Working Positions on User Comfort, A Study on Multi-position Ergonomic Computer Workstation", Procedia Manufacturing, Vol. 3, 2015, S. 4792–4799.

[15] Miehlke, P.: "Der Fluggastsitz - vom Konzept zum Produkt", HAW Hamburg, AIDA Development GmbH mit DGLR und VDI, 2005.

[16] DIN EN 547-2: "Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Grundlagen für die Bemessung von Zugangsöffnungen", Beuth Verlag, Berlin, 2009.

[17] Kilincsoy, Ü. et al.: "Comfortable rear seat postures preferred by car passengers", Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE, 2014, S. 30–39, 2014.

[18] DIN EN 1022: "DIN EN 1022 Wohnmöbel – Sitzmöbel – Bestimmung der Standsicherheit;", 2005.

[19] Haynes, S.; Williams, K.: "Impact of seating posture on user comfort and typing performance for people with chronic low back pain", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 38,1, 2008, S. 35–46.

[20] Jung, E. et al.: "Coach design for the Korean high-speed train", Applied ergonomics, Vol. 29,6, 1998, S. 507–519.

[21] DIN EN 1729-1: "DIN EN 1729-1 Möbel – Stühle und Tische für Bildungseinrichtungen – Teil 1: Funktionsmaße;", 2016.

[22] DIN 33402-1: "DIN 33402-1 Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Begriffe, Messverfahren", 2008.

[23] DIN EN 547-1: "DIN 547-1 Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Grundlagen zur Bestimmung von Abmessungen für Ganzkörper-Zugänge an Maschinenarbeitsplätzen", 2009.

[24] Fitzen, F. et al.: "Nutzerorientierte Charakterisierung fahrfremder Tätigkeiten in automatisierten Fahrzeugen", Krause, D., Paetzold, K., Wartzack, S. (Hg.), DfX-Symposium, TuTech Verlag, Tutzing, 2018.

# Nutzerorientierte Charakterisierung fahrfremder Tätigkeiten in automatisierten Fahrzeugen

Florian Fitzen[1], Niko Seebach[1], Maximilian Amereller[1], Kristin Paetzold[2]

[1] *BMW Group*

[2] *Institut für Technische Produktentwicklung;*
*Universität der Bundeswehr München*

## Abstract

The progressing deployment of autonomous driving technology fundamentally affects the starting situation for designing and developing the automotive interior. As the driver will not be occupied with driving tasks, a self-driving car should enable him and other passengers to productively organize their driving time in a new way. Basing on existing ranges of topics for designing the automotive interior this contribution acquires a systematic approach. It therefore characterises secondary activities in automated vehicles regarding the ranges of topics and enhances them by relevant items of interaction. All in all this approach enables developers to systematically describe secondary activities and thus provide the basis for shaping user-oriented interior of automated vehicles.

*Keywords: user centred design, secondary activities, automated driving, interior of the future*

## 1 Motivation

Die Erfassung individueller Nutzerwünsche stellt eine der elementaren Herausforderungen im Fahrzeugentwicklungsprozess dar. Für die Automobilhersteller hat dies zur Folge, dass, unabhängig von der Fahrzeugklasse, bereits mehrere Jahre vor Verkaufsstart eines neuen Derivats die dann aktuellen Trends bekannt sein sowie die Voraussetzungen für die Umsetzung in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung geschaffen werden müssen [1]. In dem vom Nutzer stark wahrgenommenen Fahrzeuginterieur ergibt sich besonders durch die Einflüsse des automatisierten Fahrens, speziell ab Level 4, eine veränderte Ausgangslage gegenüber der heutigen Situation. Verkehrsforscher haben für dieses Szenario in Deutschland einen maximalen Anteil an automatisierten Fahrzeugen von 42% im Jahr 2035 errechnet [2]. Das selbstfahrende Auto ermöglicht dem Fahrer demzufolge eine freiere Gestaltung der gewonnenen Zeit, die statt der Erfüllung von Fahraufgaben zur Ausführung von fahrfremden Tätigkeiten (FFT) genutzt werden kann. Derzeit ist in dieser Hinsicht lediglich bekannt, dass sich Insassen während einer hochautomatisierten Fahrt vermutlich einer FFT zuwenden, nicht jedoch welcher Art diese Tätigkeit ist [3]. Dabei können Einflussfaktoren wie unterschiedliche Fahrzeugzielgruppen oder Fahrszenarien [4] – beispielsweise Streckendistanz oder Fahrtzweck - verschiedene Auswirkungen auf das Verhalten des Nutzers haben und dementsprechend eine differenzierte Gestaltung des Innenraums notwendig machen [5]. Während eine FFT *Arbeiten* [6] etwa einen Tisch, verschiedene Ablagen sowie diverse Eingabe- und Anzeigemöglichkeiten erfordern kann, könnte für die FFT *Schlafen* primär eine angenehme Sitz-/Liegeposition in einem stillen, dunklen Umfeld wichtig sein. Für andere FFT wie *Virtuelles Sightseeing*, *Film anschauen* oder *Fitness* ergeben sich potentiell ebenso Unterschiede. In diesem Rahmen bilden solche FFT die Basis für die Ableitung der Auswirkungen auf die nutzerorientierte Innenraumgestaltung.

## 2 Forschungsproblem und Forschungsziel

Um auf dieser Grundlage funktionale Anforderungen an den Innenraum abzuleiten, sollen die FFT systematisch beschrieben werden. Hierzu gibt es in der Literatur bisher zu geringe detaillierte Erkenntnisse. Daraus leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

1. Auf Basis welcher Themenfelder können FFT im Hinblick auf den funktionalen Innenraum systematisch charakterisiert werden?

2. Wie können die Interaktionselemente für die Mensch-Maschine-Interaktion als Funktionsträger der jeweiligen FFT in die Charakterisierung miteinbezogen werden?

Ziel dieses Beitrags ist die Erarbeitung eines Vorgehens, das ein fundiertes Muster für die Charakterisierung der FFT in automatisierten Fahrzeugen bildet. Jede FFT wird daher zunächst durch Funktionen beschrieben. Die Interaktionselemente für die MMI als Funktionsträger sollen für die Ableitung funktionaler Anforderungen eine zentrale Rolle einnehmen. Anhand dieses Musters soll es möglich sein sämtliche Tätigkeiten systematisch zu beschreiben und somit die Grundlage für die weitere Bestimmung der Auswirkungen auf den Innenraum zu legen.

## 3 Vorgehensweise zur Charakterisierung fahrfremder Tätigkeiten

Da in diesem Kontext bisher keine Charakterisierung der FFT existiert, wurde für die Erarbeitung eines Bewertungsschemas zunächst eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dabei sind besonders ergonomische Themenfelder zu berücksichtigen, die sich mit der Anthropometrie des Menschen beschäftigen [7].

Basierend auf den von Bubb, Grünen (2015) genannten Themenfeldern Sitzen, Sicht, Raumgefühl (Funktionscharakteristika) sowie den Bedien- und Anzeigekomponenten (Funktionsträger) [7] können diese im Kontext der Ausübung einer FFT während der Fahrt wie folgt übertragen werden: Sitzen beinhaltet *Haltung* und *Orientierung* des Insassen, das Raumgefühl kann je nach Aktivität der Tätigkeit auf den Begriff *Raumbedarf* erweitert werden. Im funktionalen Kontext können für den Nutzer außerdem weitere Themenfelder wie Ablagen und Befestigungselemente, Oberflächen oder Features eine maßgebliche Rolle bei der Ausübung einer FFT spielen. Des Weiteren werden die Themenfelder Sicht und Bedien- und Anzeigekomponenten stark von der jeweiligen FFT und den jeweilig verwendeten *Funktionsträgern* beeinflusst. Das vollständige Bewertungsschema wird in Seebach et al. (2018) [8] dargestellt. Im Folgenden wird die spezifische Herleitung relevanter Funktionsträger für die FFT betrachtet.

### 3.1 Beanspruchungsgrad fahrfremder Tätigkeiten

Neben der geometrischen Charakterisierung fahrfremder Tätigkeiten über Themenfelder wie *Haltung* und *Orientierung* ist aus Nutzersicht auch eine Beschreibung der Interaktion mit dem Fahrzeug relevant. Die bereits genannten

Bedien- und Anzeigekomponenten stellen dabei Funktionsträger dar, die definierte und vom Nutzer geforderte Funktionen erfüllen. Um von den fahrfremden Tätigkeiten auf die Funktionen und schlussendlich relevante Funktionsträger schließen zu können, wurden die 32 im Betrachtungsumfang liegenden FFT in Anlehnung an Petermann-Stock et al. (2013) [9] und Feldhütter et al. (2018) [3] zunächst hinsichtlich der Art der Nutzerbeanspruchung bewertet. Dabei wird zwischen kognitiver, akustischer, visueller und motorischer Beanspruchung unterschieden. Die Beanspruchungsarten werden zu einem gesamten Beanspruchungsgrad des Nutzers für die jeweilige FFT zusammengefasst. Dies ist in Tabelle 1 dargestellt.

| Fahrfremde Tätigkeit | Beanspruchungsart | | | | Beanspruchungsgrad |
|---|---|---|---|---|---|
| | kognitiv | akustisch | visuell | motorisch | |
| Telefonieren | x | x | | | niedrig |
| Unterhalten mit Mitfahrern | x | x | | | niedrig |
| Film anschauen | x | x | x | | mittel |
| Arbeiten am Notebook | x | x | x | x | hoch |
| Schlafen | | | | | passiv |

Tabelle 1: Art der Beanspruchung und Beanspruchungsgrad exemplarischer FFT in Anlehnung an Petermann-Stock et al. (2013)[9] und Feldhütter et al. (2018) [3]

FFT mit niedrigem Beanspruchungsgrad beinhalten demnach kognitive und akustische Beanspruchung. Dazu gehören Tätigkeiten wie *Telefonieren*, *Unterhalten mit Mitfahrern* oder *Musik hören*. Tätigkeiten, bei denen eine visuelle Beanspruchung hinzukommt, werden mit mittlerem Beanspruchungsgrad bewertet. Beispiel hierfür ist das *Schauen eines Films*. Bei zusätzlicher motorischer Beanspruchung wird von einer Tätigkeit mit hohem Beanspruchungsgrad gesprochen. *Arbeiten am Notebook*, *Spielen auf dem Smartphone* oder *Lesen* stehen exemplarisch für dieses Niveau. Die FFT *Schlafen* betrifft keine dieser Beanspruchungsarten, da der Nutzer sich währenddessen in sensorischer und motorischer Ruhe befindet und der menschliche Körper reduziert auf äußere Reize reagiert. Folglich wird diese Tätigkeit als passiv eingestuft.

## 3.2 Relevante Funktionen und mögliche Funktionsträger für fahrfremde Tätigkeiten

Für die Identifikation relevanter Funktionen und Funktionsträger wurde zunächst eine umfassende Literaturrecherche in vorangegangenen Forschungsarbeiten zu den optimalen Umfeldbedingungen während der Ausführung der jeweiligen Tätigkeit durchgeführt. Hierbei wurden die fünf in Kapitel 3.1 betrachteten FFT auch außerhalb des Fahrzeugkontexts genauer untersucht. Zu einigen FFT wie *Arbeiten am Notebook* existierte nur mäßig umfangreiche Literatur, weshalb darauf aufbauend ein Workshop mit Experten aus den Bereichen der Innenraumgestaltung sowie des Innenraums der Zukunft durchgeführt wurde. Hierbei sollten die in der Literatur gefundenen Funktionen und Funktionsträger validiert und ggf. mittels Kreativitätsmethoden um fehlende Aspekte erweitert werden. Ziel war es hiermit den Lösungsraum für die Charakterisierung FFT möglichst weit zu fassen, um nicht bereits in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses Einschränkungen vorzunehmen.

| Relevante Funktionen |
|---|
| Stilles Umfeld sicherstellen |
| Individuelle Beleuchtungsmöglichkeit sicherstellen |
| Angenehme Temperatur sicherstellen |
| Abdunkelung ermöglichen |
| Zugang zum Internet gewährleisten |
| Angenehmen Geruch generieren |
| Massagefunktion zur Verfügung stellen |
| An die Natur angelehnten Innenraum gestalten |
| Bequeme und variable Sitzposition ermöglichen |
| Armauflage ermöglichen |
| Beinauflage ermöglichen |
| Wenig ruckartige Fahrzeugbewegungen zulassen |
| … |

| Funktionsträger |
|---|
| Notebook |
| Tastatur |
| Smartphone |
| Drucker |
| Schlafmaske |
| Armlehne |
| Zimmerpflanze |
| Tablet |
| Ohrstöpsel |
| Kissen |
| Kopfhörer |
| Tisch |
| … |

Tabelle 2: Exemplarische Darstellung geforderter Funktionen und möglicher Funktionsträger für die FFT *Arbeiten am Notebook*

Als Resultat daraus sind hier exemplarisch die von potentiellen Nutzern geforderten Funktionen sowie Möglichkeiten der Umsetzung durch diverse Funktionsträger für die FFT *Arbeiten am Notebook* in Tabelle 2 genannt. Auf dieser Datenbasis wurde eine Befragung mit dem Ziel der Erhebung quantitativer Daten erstellt. Zu jeder FFT wurden n=30 Testpersonen befragt, welche zunächst relevante Funktionen für die jeweilige Tätigkeit auswählen und anschließend priorisieren konnten. Selbiges Verfahren wurde anschließend auf die Funktionsträger angewandt. Für die Ausgestaltung des Innenraums für automatisierte Fahrzeuge können hier wichtige Erkenntnisse hinsichtlich Präferenzen bei der Ausübung FFT gewonnen werden.

## 3.3 Verknüpfung von Beanspruchungsarten mit Funktionsträgern

Um die vom Nutzer geforderten fahrfremden Tätigkeiten mit den Funktionsträgern zu verknüpfen, wurden die Funktionsträger im Anschluss nach verschiedenen Kriterien klassifiziert. Analog zur Beschreibung der Beanspruchungsart bei einer FFT wurde nach visueller, akustischer und motorischer Interaktion unterschieden [3]. Auch die Trennung zwischen fester Installation im Fahrzeug oder mitgebrachtem Interaktionselement des Kunden wurde vorgenommen und ist in Abbildung 1 dargestellt.

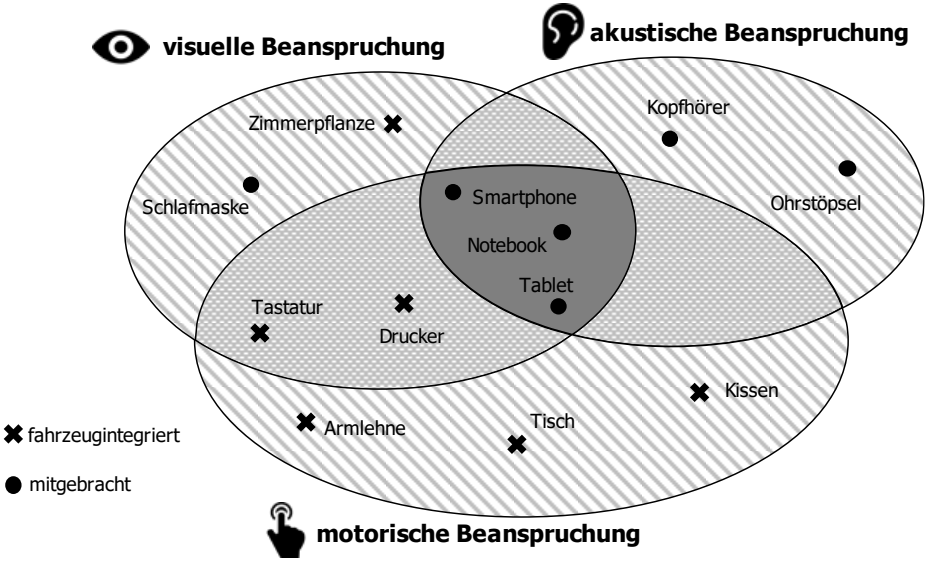



Abbildung 1: Auszug aus dem Schema zur Klassifizierung der Funktionsträger nach Beanspruchungsart und Integration im Fahrzeug für die FFT *Arbeiten am Notebook*

Resultierend aus dieser Klassifizierung können nun die relevanten Funktionsträger, welche eine vom Nutzer geforderte Funktion erfüllen, über die Beanspruchungsart mit den FFT verknüpft werden. Exemplarisch wurden für die FFT *Arbeiten am Notebook* alle vier Beanspruchungsarten kognitiv, akustisch, visuell und motorisch als relevant identifiziert. Die dafür vom Nutzer geforderte Funktion *Stilles Umfeld sicherstellen* adressiert dabei die akustische Interaktion mit dem Umfeld und zielt auf eine möglichst minimale akustische Belastung ab. Um diese akustische Belastung zu reduzieren, kann nun über das Klassifizierungsschema (Abb. 1) ein geeigneter Funktionsträger, beispielsweise der *Kopfhörer* mit aktiver Lärmkompensation, zur Erfüllung der Funktion *Stilles Umfeld sicherstellen* identifiziert werden. Dieses Vorgehen kann für sämtliche FFT und deren Funktionen analog durchgeführt werden und ist essentieller Bestandteil der Charakterisierung FFT.

## 4 Zusammenfassung und Diskussion

Das Ergebnis stellt ein Vorgehen zur Charakterisierung FFT dar. Elementarer Bestandteil ist dabei eine Klassifizierung der Funktionsträger nach den Kategorien Beanspruchungsart und Integration im Fahrzeug, welche in dieser Form mit Fokus auf FFT in automatisierten Fahrzeugen bisher nicht vorgenommen wurde. Aufbauend auf Bubb, Grünen (2015) [7] wurden die relevanten Themenfelder Haltung, Orientierung, Raumbedarf sowie relevante Funktionen und Funktionsträger identifiziert. Über die Aufstellung möglicher Beanspruchungsarten einer jeden FFT ist es möglich mit Hilfe der von Nutzern genannten relevanten Funktionen eine Verbindung zwischen FFT und den Funktionsträgern herzustellen, die für die Ausübung einer FFT im automatisierten Fahrzeug benötigt werden. Die Funktionen und Funktionsträger wurden mit Hilfe einer umfassenden Literaturrecherche und einem darauf aufbauenden Expertenworkshop erhoben und durch eine Befragung von potentiellen Nutzern um ihre Relevanz und Priorität erweitert. Für jede FFT soll mit der beschriebenen Vorgehensweise eine umfassende systematische Beschreibung hergeleitet werden können, die sowohl in geometrischer als auch funktionaler Hinsicht relevante Aspekte umfasst. Zusammenfassend kann hiermit die Basis für die Ableitung der Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf den Innenraum gelegt werden. Eine Möglichkeit der weiteren Forschung kann mit der Ausweitung des Schemas auf Themenfelder, die über den funktionalen und geometrischen Kontext hinausgehen, genannt werden. Im Hinblick auf eine vollständige Beschreibung muss hier jedoch zunächst untersucht werden, welche Themenfelder sich für eine Einarbeitung in das Schema eignen bzw. im Ergebnis einen Mehrwert für den Nutzer generieren. Des Weiteren kann es nach Erkenntnissen aus vorherigen Untersuchungen sinnvoll sein, die durch Recherche, Expertenworkshop

und Nutzerbefragung erhobenen Daten zu relevanten Funktionen und Funktionsträgern in bestimmten Zeitabständen zu wiederholen, somit zu überprüfen und ggf. zu erweitern.

## Literatur


[1] Tomforde, J.: „Entwicklung und Design von Freizeitmobilen", in: Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hg.), Automobildesign und Technik, Vieweg & Sohn, Wiesbaden, S. 202-216, ISBN 978-3-8348-9411-3, 2007.

[2] Institute for Mobility Research: „Autonomous Driving: The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour", München, 2016.

[3] Feldhütter, A.; Hecht, T.; Bengler, K.: „Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren", Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 82.0628/2015, München, 2018.

[4] Fraunhofer IAO; Cordence Worldwide; Horváth & Partners: „Enabling the Value of Time: Implikationen für die Innenraumgestaltung autonomer Fahrzeuge", Stuttgart, 2018.

[5] Fitzen, F.; Amereller, M.; Paetzold, K.: „Approximation of the user behaviour in a fully automated vehicle referring to a stationary prototype-based research study", International Design Conference, Clarkson et al. (Hg.), Design Society, Dubrovnik, 2018, S. 2187-2196. https://doi.org/10.21278/idc.2018.0130

[6] Fraunhofer IAO; Horváth & Partners: „The Value of Time – Nutzerbezogene Service-Potenziale durch autonomes Fahren", Stuttgart, 2016.

[7] Bubb, H.; Grünen, R. E.: „Anthropometrische Fahrzeuggestaltung", in: Bubb, H. et al. (Hg.), Automobilergonomie, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 345-470, ISBN 978-3-8348-1890-4, 2015.

[8] Seebach, N. et al.: „Geometrische Beschreibung fahrfremder Tätigkeiten", Krause, D., Paetzold, K., Wartzack, S. (Hg.), DfX-Symposium, TuTech Verlag, Tutzing, 2018.

[9] Petermann-Stock, I. et al.: „Wie lange braucht der Fahrer? Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Fahrt", Wolfsburg, 2013.

# Bewertbarkeit unscharfer Mengen am Beispiel der Eigenschaft Produkteinfachheit

Fabian Pilz[1], Michael Schabacker[1], Sándor Vajna[1]

[1] *Otto-von-Guericke Universität Magdeburg*

## Abstract

When developing products, the product has to be unambiguous, simple and safe. While "safety" and "ambiguity" can be defined in relation to a certain environment by precise definitions, simplicity is usually characterized by fuzzy parameters. It results from the interaction of a multitude of attributes, which influence and migrate each other. This paper shows a way to define and evaluate the simplicity of products. First of all, the necessity and diversity of simplicity are discussed. This is followed by an analysis of the different properties and characteristics of simple products and their interrelationships. As a result, a possible evaluation approach of fuzzy parameters is shown, which makes it possible to determine the degree of simplicity of a product.

*Keywords: Simplicity, Complexity, Fuzzy, Decision-model*

## 1 Einleitung

Durch die immer weiter steigende Produktvielfalt, Funktionsintegrationen innerhalb eines Produktes sowie zunehmende Informationsflut wird nahezu überall eine Reduzierung der entstehenden Komplexität gefordert. Konstruktionsprinzipien aus dem Bereich der Konstruktionstechnik fordern, dass ein Produkt so einfach wie möglich zu gestalten ist. Bei der Entwicklung von Pro-

dukten werden noch vor den Gestaltungsrichtlinien drei Prinzipien aufgestellt: Eindeutig, einfach, sicher [1]. Besonders die Einfachheit eines Produktes bietet Vorteile für Nutzer und Hersteller. Einfache Produkte ermöglichen unter anderem eine intuitive, fehlerarme und effiziente Bedienbarkeit. Die hieraus resultierende Benutzungsfreundlichkeit trägt zur Zufriedenheit des Nutzers bei. Für den Hersteller senken einfach zu fertigende Produkte die Kosten der Produktion, reduzieren den Wartungsaufwand und verringern die Notwendigkeit kundenbezogener Dienstleistungen, wie bspw. umfangreichen Bedienungsanleitungen [2]. Während „eindeutig" und „sicher" klar definierte und abgrenzbare Gestaltungsprinzipien darstellen, ist Einfachheit ein unscharfer Begriff. Aktuelle Ansätze zur Bewertung von Einfachheit bestehen entweder in der Reduzierung auf deterministische Werte [2], wodurch dem Bewertungsmodell eine starke Abstraktion vom Realmodell wiederfährt, oder in der Verwendung unscharfer Kenngrößen, welche den unscharfen Begriff Einfachheit auf weitere unscharfe Begriffe aufteilen (eine einfache Montage entsteht durch einen leichten Zusammenbau) [1]. Klare Handlungsempfehlungen werden nicht gegeben, da sie das Realproblem entweder nicht genug widerspiegeln oder sich innerhalb subjektiv definierter Bereiche bewegen. Hierdurch ist ein systematisches und gezieltes Entwickeln einfacher Produkte kaum realisierbar. Es fehlen ganzheitlichen Bewertungskriterien, die mögliche (und zumeist subjektive) Kenngrößen einfacher Produkte systematisch erfassen und in Verbindung mit deterministischen Größen setzen. In diesem Beitrag soll die Möglichkeit eines ganzheitlichen Entscheidungsmodells für deterministisch sowie unscharfe Kenngrößen überprüft und am Grades der Einfachheit von Produkten beispielhaft aufgezeigt werden.

## 2 Einfache Produkte

Einfache Lösungen und Erklärungen haben immer Vorteile gegenüber komplexen Ansätzen. Menschen neigen dazu, eine komplexe Lösung abzulehnen, wenn eine einfache die gleichen Ergebnisse erzielt [3]. Ein weit verbreitetes Forschungsprinzip ist Ockhams Rasiermesser, auch bekannt als das Wirtschaftsprinzip, welches besagt, dass die einfachste Theorie von mehreren möglichen Erklärungen für die gleichen Tatsachen zu bevorzugen ist [4]. So bietet auch Einfachheit im Bezug zu Produkten, Prozessen und Dienstleistungen mehrere Vorteile, wie eine schnelle Lernkurve und fehlerarme Bedienung (vgl. hierzu [2]). Trotz dieser Vorteile ist der "einfache" Status oft unterschiedlich oder teilweise auch überhaupt nicht definiert.

## 2.1 Diversität von Einfachheit

Bei der Untersuchung der einzelnen Kategorien des Produktlebenszyklus (nach Vajna [5]) bezüglich einer allgemeinen Definitionen von Einfachheit ist festzustellen, dass Produkteinfachheit unterschiedlich aufgefasst und zudem durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden kann. Eine grundlegende Übersicht der untersuchten Bereiche, die das Thema Produkteinfachheit behandeln, kann Tabelle 1 entnommen werden. Für mehr Informationen ist auf [6] zu verweisen.

Tabelle 1: Dominierende Forschungsbereiche [6]

| **Forschungsgebiet** | **Kernthema** |
|---|---|
| Konstruktion | Strukturelle Komplexität: Einfachheit ergibt sich aus der Anzahl der Elemente, deren Beziehungen und ihren Randbedingungen. |
| Produktgestalt | Die Vielfalt der einzelnen Gestaltungselemente beeinflusst die Wahrnehmung von Einfachheit und Komplexität. |
| Fertigung | Schlanke Produktion: Mitarbeiterschulung, Kundenbindung, niedrige Hierarchien, Fertigungsverfahren, Montageschritte |
| Baugruppenmanagement | Standardisierung, Fragmentierung und Modularisierung |
| Instandhaltbarkeit | Demontage, Montageaufbau, Anschlussarten |
| Usability | Art der Funktionsausführung, Wirksamkeit der Ausführung, Effizienz der Ausführung, Zufriedenheit der Ausführung |
| User Experience | Wie wird sie wahrgenommen? Inwieweit stimmt die Wahrnehmung mit den Erwartungen über das Produkt überein? |
| Management | Strukturwandel, Unzureichende Transparenz, Produkterweiterungen, Komplexität als Know-how-Schutz |
| Allgemeine Vereinfachung | Die zehn Gesetze der Einfachheit, Vereinfachung des Alltags |

Bei der Analyse der verschiedenen Forschungsbereiche aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass ein einfaches Produkte je nach Forschungsbereich unterschiedlich definiert ist. Während in der Systemtheorie ein System aufgrund der Anzahl seiner Komponenten und der Anzahl der Beziehungen zwischen ihnen als einfach definiert wird, wird die Verwendbarkeit von Produkten hauptsächlich durch die Qualität der Benutzungsschnittstelle bewertet. Der Fokus liegt hierbei auf der effizienten Handhabung der Produkte im Zusammenspiel mit dem jeweiligen Produktdesign [7] [8]. Aus Sicht des Anbieters müssen sowohl die Herstellbarkeit als auch die Wirtschaftlichkeit des Produktes im Mittelpunkt stehen [5]. Daraus ergeben sich zwei Hauptgruppen (nach [9], welches es bei der Unterscheidung zu beachten gilt [6]:

- **Der Nutzer** (als Untergruppe des Käufers)
- **Der Hersteller** (als übergruppe aller an der Entwicklung, Fertigung und Vermarktung des Produktes beteiligten Gruppen)

## 2.2 Definition von Einfachheit

Bei der Definition von Einfachheit werden die Begriffe "Kompliziertheit" und "Komplexität" oft im selben Zusammenhang genannt. Komplizierte Systeme unterscheiden sich von einfachen Systemen durch die Varietät der einzelnen Elemente, die Anzahl der Elemente und deren Verbindungen. Sie können unter anderem durch Strukturierung und Modularisierung vereinfacht werden. Weiterhin kann ein kompliziertes System aus mehreren Subsystemen bestehen. Das Durchdringen eines komplizierten Systems ist im direkten Zusammenhang zum jeweiligen menschlichen Wissen und Erfahrungen zu setzen. Ein Uhrwerk beispielsweise ist für jemanden ohne Erfahrung auf diesem Gebiet ein kompliziertes System, hingegen erscheint das System für einen Uhrmacher durch das nötige Fachwissen als einfach. Komplexe Produkte hingegen haben eine Vielzahl von dynamischen Variablen, die sich gegenseitig beeinflussen. Oft sind sie durch zufällige Wertänderungen gekennzeichnet. Ihre Dimensionen unterliegen einer zeitlichen Varianz. Sie sind schwer zu zerlegen, zu berechnen und zu organisieren. In diesem Beitrag wird Kompliziertheit als schwindende Einfachheit betrachtet, der durch entsprechende Humanzentrierung entgegengewirkt werden kann.

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, ist bei der Beschreibung von Einfachheit zwischen dem Nutzer und dem Hersteller zu differenzieren. Wird der Nutzer betrachtet, welcher mit dem Produkt interagiert, so kann von einem einfachen Produkt gesprochen werden, wenn der Nutzen des Produkts erwartungsgemäß innerhalb eines definierten Zeitintervalls intuitiv störungs- und fehlerfrei mit dem erwarteten Funktionsumfang zur Verfügung steht. Aus Herstellersicht steht vor allem die Rentabilität des Produktes im Vordergrund, wodurch eine Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus notwendig ist. Für den Hersteller erscheint ein Produkt dann einfach, wenn seine Rentabilität schnell, planbar und ohne Störungen erreicht werden kann [6]. Daraus ergibt sich gleichwohl, dass die Kriterien eines einfachen Produktes aus vielen verschiedenen Eigenschaften bestehen, welche sowohl gegenseitig unterstützend als auch gegenläufig sein können. Beispielsweise ist es durchaus möglich, dass eine komplizierte Fertigung eine sehr viel einfachere Montage ermöglicht, wodurch unter dem Ziel der Rentabilität diese Teilkompliziertheit zur Gesamteinfachheit beiträgt.

## 2.3 Eigenschaften einfacher Produkte

Unter dem Gesichtspunkt der Diversität von Einfachheit ist fraglich, mit welchen Teileigenschaften die Produkteinfachheit bewertet werden kann. Hierzu wurden Meinungen und Einschätzungen von Experten aus der Forschung und Industrie zum Thema einfacher Produkte im Zuge eines Workshops während der DESIGN 2018 befragt. Ziel war es, mit Hilfe einer Auswahl vorher vorbereiteter mechanischer und mechatronischer Produkte Ursachen und Eigenschaften für die Einfachheit eines Produktes zu bestimmen. Die daraus entstandenen Ursachen-Cluster wurden für die Nutzersicht in einem zweiten Schritt innerhalb eines studentischen Umfelds weiter verifiziert und verfeinert. Insgesamt ergeben sich acht Hauptkriterien, welche als dominierende Aspekte für die Wahrnehmung von Einfachheit festgestellt werden konnten, dargestellt in Abbildung 1.

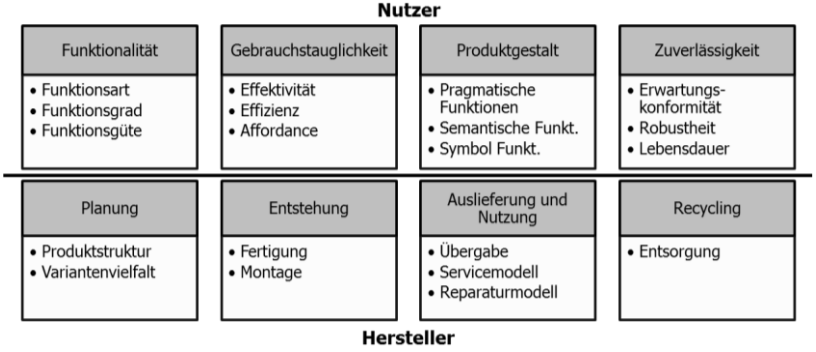



Abbildung 1: Eigenschaften und Merkmale einfacher Produkte (in Anlehnung an [2] [5] [10])

Aus der Sicht des Herstellers wird das Partialmodell des Produktlebenszyklus nach [10] herangezogen, welches das Produkt von der Idee bis zur Entsorgung betrachtet. Für den Nutzer ergeben sich Attribute, welche mit der direkten Handhabung des Produktes in Verbindung stehen. Werden die Attribute und daraus folgende Kenngrößen betrachtet, ist festzustellen, dass die einzelnen Attribute sich alle gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise definieren die pragmatischen Funktionen (nach [11]) die Elemente des Produktes, welche für die visuelle Wahrnehmung der Bedienung relevant sind. Es wird dabei beabsichtigt, bestehende Kenntnisse des Nutzers zu treffen, um so eine möglichst intuitive Bedienung zu realisieren. Von der Qualität der pragmatischen Funktionen werden andere Kenngrößen, wie bspw. die Erwartungskonformität oder die Effizienz mit beeinflusst. Diese Einflüsse können mit Hilfe einer Einflussmatrix abgebildet werden. Hieraus ist es möglich die Attribute

mit dem größten Einfluss und der größten Beeinflussbarkeit abzuleiten (Abbildung 2).

| Einfluss von \ auf | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | kummulierte Einflussstärke |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Funktionsart | x | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| 2. Funktionsgrad | 0 | x | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| 3. Funktionsgüte | 0 | 0 | x | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| 4. Effektivität | 0 | 0 | 0 | x | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 5 |
| 5. Effizienz | 0 | 0 | 0 | 0 | x | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 6. Affordanz | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 7. Pragmatische Funktionen | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | x | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 8 |
| 8. Semantische Funktionen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 9. Symbolfunktionen | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | x | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 10. Erwartungskonformität | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | x | 1 | 0 | 6 |
| 11. Robustheit | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | x | 1 | 5 |
| 12. Lebensdauer | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | x | 2 |
| Kummulierte Beeinflussbarkeit | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 8 | 6 | 0 | 2 | 11 | 6 | 1 | - |

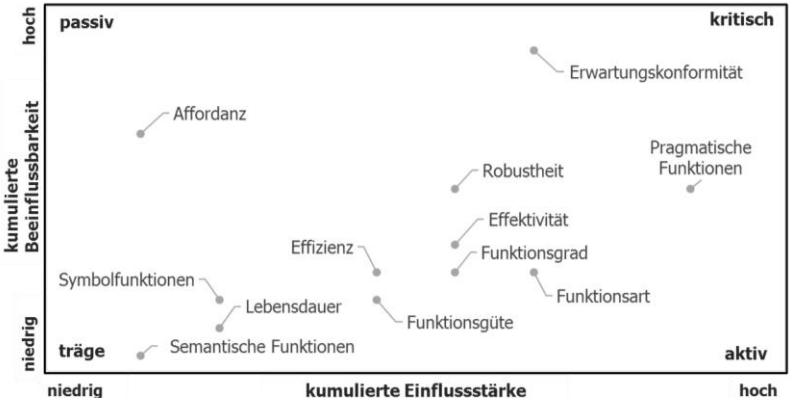



Abbildung 2: Einflussmatrix aus nutzerbezogenen Kenngrößen

In Abbildung 2 sind relevante Kenngrößen der ermittelten vier Attribute des Nutzers und ihre Abhängigkeiten untereinander dargestellt. Kenngrößen mit einer hohen Einflussstärke sind als aktiv zu bezeichnen, während Kenngrößen mit einer hohen Beeinflussbarkeit passiv sind. Besonderes Interesse gilt den kritischen Größen, da sie sowohl einen großen Einfluss auf das gesamte System haben, als auch stark beeinflusst werden. Es ist zu erkennen, dass der größte Einfluss für einfache Produkte aus den pragmatischen Funktionen des Produktes abzuleiten ist. Der größte beeinflussbare Kennwert stellt die „Affordance" (nach [12]) dar, welche sowohl durch Funktionalität und Gebrauchstauglichkeit als auch die Produktgestalt geprägt wird. Weiterhin ist ersichtlich, dass semantischen Funktionen und Symbolfunktionen einen geringen Einfluss auf andere Kenngrößen haben und gleichzeitig kaum beeinfluss-

bar sind, was zu dem Schluss führt, dass diese in der Bewertung eine geringere Gewichtung einnehmen.

## 2.4 Unscharfe Mengen

Die Problematik bei der Bewertung eines Produktes hinsichtlich des Grades der Einfachheit zeigt sich bei der Betrachtung der Attribute des Nutzers. Während Funktionsgrad oder die Lebensdauer durch scharfe, deterministische Werte beschrieben werden können, sind die Attribute wie die Produktgestalt, als auch die Gebrauchstauglichkeit hauptsächlich durch subjektive und unscharfe Größe zu beschreiben. Die semantischen Funktionen eines Produktes werden häufig über Methoden wie die Likert-Skala bewertet. Es fällt Menschen sehr leicht eine linguistische Bewertung eines Zustandes zu geben, ohne dabei klare Grenzen aufzustellen. Diese Aussagen sind im Allgemeinen nicht auf ein umfassendes theoretisches Wissen zurückzuführen, sondern eine Zusammenfassung von Regeln, welche der Bewertende bei seiner Entscheidung unterbewusst beachtet. Es ist jedoch schwierig, diese unscharfen Bewertungen wie „schön" oder „gut" zurück in deterministische Größen zu führen. Abhilfe hierbei bieten Fuzzy-Entscheidungssysteme, welche nicht auf solch klare Grenzen innerhalb von Bewertungsgrößen angewiesen sind [13]. Im Folgenden wird die Funktionsweise eines solchen Entscheidungssystems anhand eines ausgewählten Bereichs bei der Bewertung eines Produktes verdeutlicht. Besonders durch die heterogene Struktur der nutzerbezogenen Attribute bieten diese eine gute Eignung für die Verdeutlichung des Ansatzes.

# 3 Unscharfe Entscheidungssysteme

Eine Gegenüberstellung der zu bewertenden Produkte erfordert eine vereinheitlichte Form aller unterschiedlichen Wertedimensionen. Eine solche Vereinheitlichung kann durch Vergabe von Punkten einer nummerischen Werteskala, getrennt nach quantitativen Werten und qualitativen Aussagen, erfolgen [14]. Während die Attribute auf Herstellerseite prinzipiell quantitative Werte enthalten, muss bei der Bewertung der Nutzung von Produkten auf qualitative Aussagen zurückgegriffen werden. Zur Aufstellung eines Entscheidungssystems, welches diesen Typ von Aussagen verarbeiten kann, sind die in Abbildung 3 dargestellten Schritte zu befolgen [13].

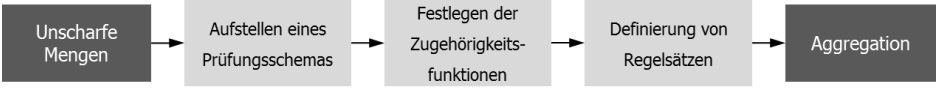



Abbildung 3: Aufbau eines Unschärfen-Entscheidungssystems (nach [13])

Der erste Schritt ist das Aufstellen eines hierarchischen Prüfungsschemas. Dabei wird der Betrachtungsgegenstand schrittweise in Teilaspekte zerlegt und hierarchisch in Abhängigkeit ihres Sachzusammenhangs stufenweise aufgestellt. Ziel ist im darauffolgenden Schritt durch eine Aggregation der einzelnen Kenngrößen eine Gesamtbewertung zu erhalten. Eine schematische Darstellung eines solchen hierarchischen Aufbaus ist Abbildung 4 zu entnehmen.

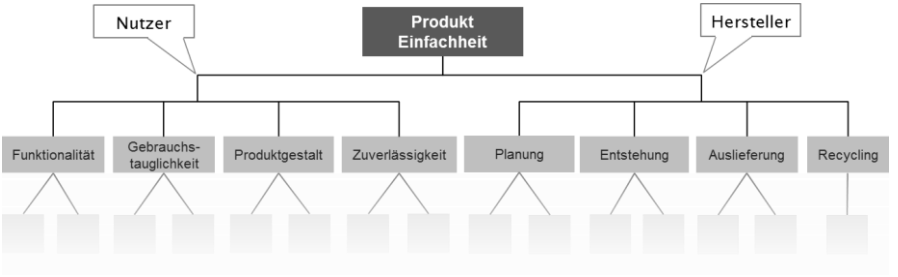



Abbildung 4: Hierarchisches Prüfungsschema einfacher Produkte

Zur weiteren Verwendung ist für jede Kenngrößen eine definierte Zugehörigkeitsfunktion zu bestimmen. Im Gegensatz zur klassischen Mengendefinition, in der jedes Element eine eindeutige Zugehörigkeit zu einer Menge hat, können Fuzzy-Elemente auch nur zu einem gewissen Grad einer Menge angehören [15]. In Abbildung 5 sind zur Verifizierung der Methode die Zugehörigkeitsfunktionen der Kenngrößen Robustheit und Lebensdauer für das Attribut Zuverlässigkeit abgebildet. Die Lebensdauer wird auf die wahrgenommene Produktqualität abgebildet. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten wird in diesem Beispiel die dritte Kenngröße Erwartungskonformität vernachlässigt. Da unterschiedliche Produkte verschiedene Lebensdauern haben, wird hier der Totalausfall des Produktes innerhalb seiner approximierten Lebensdauer bewertet. Mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen ist es möglich die Fehlerrobustheit anhand der Wahrscheinlichkeit einer linguistischen Bewertung zuzuordnen, ohne dabei scharf abzugrenzen wo die Grenzen liegen.

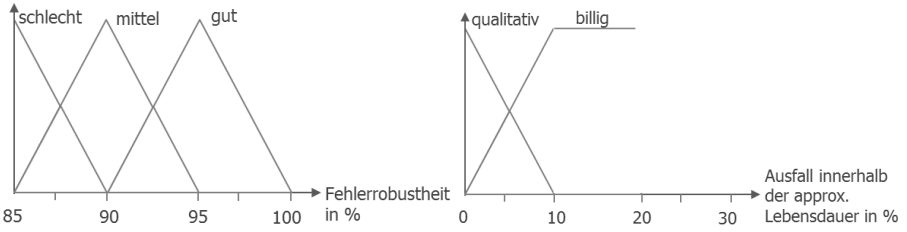



Abbildung 5: Zugehörigkeitsfunkt. der Robustheit und des Produktausfalls

Diese verbalen Bewertungen werden im letzten Schritt (nach Abbildung 3) durch von Experten formulierten Regeln in geeigneter Weise zu einer übergeordneten Bewertung verknüpft. Da das Attribut der Zuverlässigkeit nicht bereits durch eine isolierte Betrachtung, sondern erst unter Berücksichtigung der Wirkzusammenhänge zwischen den Kenngrößen möglich ist, muss für jede mögliche Kombinationsmöglichkeit eine Regelhypothese aufgestellt werden, welche die jeweilige Situation beschreibt. An dieser Stelle ist es möglich die einzelnen Bewertungen der untersten Hierarchieebene über mathematische Operatoren, wie das arithmetische Mittel, zu berechnen, jedoch spiegeln diese Operatoren das Entscheidungsverhalten eines Menschen nur unvollkommen wieder [13]. Eine andere Möglichkeit ist anstelle eines mathematischen Operators die Aggregation mittels aufgestellten Regelblöcken zu definieren. Um diese festzulegen werden entweder Expertenmeinungen oder quantitative Studien benötigt [16]. Das bedeutet gleichwohl, dass die Anzahl der möglichen Regeln mit jeder Antwortmöglichkeit der Kenngröße stark vervielfacht wird. In dem in Abbildung 5 dargestellten Beispiel von zwei Kenngrößen mit insgesamt fünf Zugehörigkeiten sind sechs Regeln notwendig (siehe Tabelle 2). Um eine unterschiedliche Gewichtung und dadurch Differenzierung der einzelnen Bewertung zu ermöglichen, wurden zusätzlich weitere Bewertungskategorien zugelassen, welche „schlecht" und „gut" weiter unterteilen. Beispielsweise kann eine mittlere Fehlerrobustheit immer noch eine gute Zuverlässigkeit ergeben, während ein als billig bewertetes Produkt lediglich eine mittlere Zuverlässigkeit erzielt.

Tabelle 2: Bewertung der Zuverlässigkeit

| **Fehlerrobustheit** | **Produktausfall** | **Zuverlässigkeit** | |
|---|---|---|---|
| schlecht | billig | sehr schlecht | |
| schlecht | qualitativ | schlecht | |
| mittel | billig | schlecht | ***Min* (0,4; 0,3) = 0,3** |
| mittel | qualitativ | gut | ***Min (0,4; 0,7) = 0,4*** |
| gut | billig | mittel | ***Min (0,6; 0,3) = 0,3*** |
| gut | qualitativ | sehr gut | ***Min (0,6; 0,7) = 0,6*** |

## 4 Beispielhafte Darstellung

Nachdem die Voraussetzungen geschaffen wurden, ist es möglich die Eingangsbewertungen mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelblöcke zu aussagekräftigen Bewertungen zusammenzuführen. Wird bspw. bei

einem Produkt eine Fehlerrobustheit von 93% angenommen und eine Ausfallrate von 3% ergeben sich die in Abbildung 6 gezeigten Teilzugehörigkeiten.

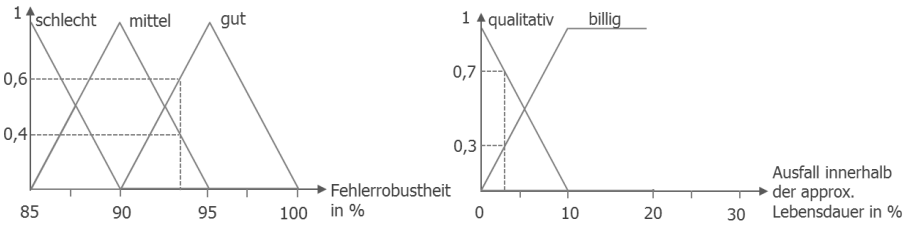



Abbildung 6: Bewertung der Zuverlässigkeit

Unter Verwendung eines Minimum-Operators folgen mit Hilfe des Regelblocks insgesamt vier verschiedene Bewertungen für die Zuverlässigkeit (siehe Tabelle 2). Hieraus entsteht eine Verteilung für die Zuverlässigkeit mit ihren verschiedenen Mengenzugehörigkeiten. Um eine Aggregation dieser Verteilung zu bilden, ist es sinnvoll als letzten Schritt eine sogenannte Defuzzifizierung vorzunehmen, welche beispielsweise durch die Bildung des entstandenen Flächenschwerpunkts erfolgen kann (durch die Strichpunktlinie in Abbildung 7 gekennzeichnet).

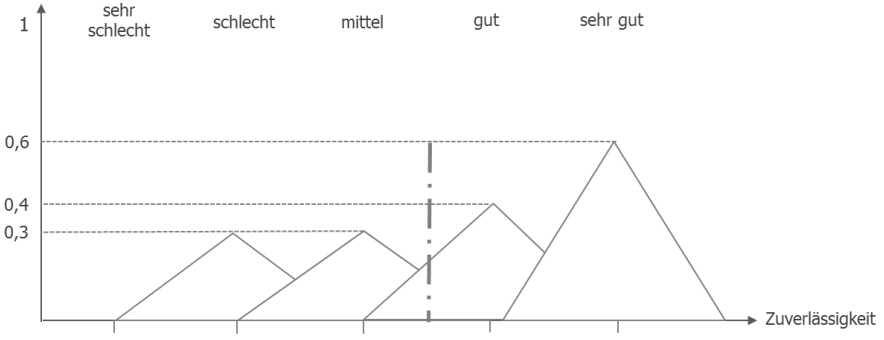



Abbildung 7: Aggregation der Zuverlässigkeit nach Tabelle 2

Eine solche Defuzzifizierung ist aber höchsten auf oberster Ebene des hierarchischen Bewertungssystems vorzunehmen. Ansonsten werden im weiteren Vorgehen die einzelnen Bewertungsausprägungen weiterverwendet, und mit der nächsten Kenngröße auf die nächst höhere Stufe aggregiert [13].

## 5 Diskussion und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Bewertung der Einfachheit von Produkten vorgestellt, welche auf der Analogie der unscharfen Mengen aus dem Bereich die Entscheidungsmodelle basiert. Auf Basis einer Unterscheidung der beteiligten Gruppen innerhalb des Produktlebenszyklus werden Kenngrößen und deren Beziehungen untereinander aufgestellt und auf ihre Bewertbarkeit überprüft. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird eine beispielhafte Bewertung unscharfer Mengen innerhalb eines Fuzzy-Entscheidungssystems durchgeführt. Das entwickelte Konzept bietet Möglichkeiten zur Integration von Expertenwissen innerhalb des Bewertungsprozess, wodurch subjektive Kenngrößen mathematisch erfassbar werden. Hierdurch ist es möglich einen holistischen Bewertungsansatz für einfache Produkte zu bilden, welcher sowohl nutzer- als auch herstellerbezogene Attribute betrachtet. Somit hebt sich der vorgestellte Ansatz deutlich von bisherigen Ansätzen für Produkteinfachheit ab (vgl. hierzu [6]). In den nächsten Schritten ist eine Weiterentwicklung des Entscheidungssystems geplant, um eine Validierung der benötigten Expertenregeln zu ermöglichen. Weiterhin ist eine Verfeinerung der aus den Attributen entstehenden Kenngrößen anzustreben, da diese maßgeblich für die Qualität des Entscheidungssystems verantwortlich sind. Mit diesem Ansatz soll es möglich werden, eine Methodentoolbox abzuleiten, welche für den jeweiligen Problemfall Strategien zur Vereinfachung bietet.

## Danksagung

Diese Forschungsarbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (Förderkennzeichen VA 134 13-1).

## Literatur

[1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. Springer, Heidelberg, 2007.

[2] Hartmann, S.: Ein Beitrag zur frühzeitigen Abschätzung der Produktkomplexität und zur Definition einfacher Produkte. Dissertation-Universität, Magdeburg, 2013.

[3] Charter, N.: Simplicity and the mind. The Psychologist, 1997, Vol. 10; S. 495–498.

[4] Jefferys, W.H.; Berger, J. O: Ockham's razor and Bayesian analysis. American Scientist, 1992, Vol. 80; S. 64–72.

[5] Vajna, S. Hrsg.: Integrated Design Engineering. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Springer Heidelberg, 2014.

[6] Pilz, F.; Vajna, S.; Schabacker, M.: Achieving Simplicity: Development and Design of Simple Products. ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2018.

[7] Robier, J.: Das einfache und emotionale Kauferlebnis. Mit Usability, User Experience und Customer Experience anspruchsvolle Kunden gewinnen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.

[8] Hassenzahl, M.: The Interplay of Beauty, Goodness, and Usability in Interactive Products. Human-Computer Interaction, 2004, 19; S. 319–349.

[9] Urakami, J.; Vajna, S.: Human Centricity in Integrated Design Engineering: 15th International Design Conference. In Proceedings of DESIGN 2018 (edited by D. Marjanovic, M. Storga), University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK, 2018, 2018; S. 679–690.

[10] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser, München, 2013.

[11] Burmester, M.; Hassenzahl, M.; Koller, F.: Usability ist nicht alles: Wege zu attraktiven Produkten (Beyond Usability: Appeal of interactive Products). i-com, 2002, 1; S. 292.

[12] Norman, D. A.: The design of everyday things. Basic Books, New York, 2013.

[13] Rommelfanger, H.: Fuzzy-Logik basierte Verarbeitung von Expertenregeln. OR Spektrum, 1993, 15; S. 31–42.

[14] Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Springer Heidelberg, 1997.

[15] Rommelfanger, H. J.; Eickemeier, S. H.: Entscheidungstheorie. Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen. Springer, Heidelberg, 2002.

[16] Eickemeier, S.: Fuzzy-Entscheidungsmodelle im Risikomanagement. In (Schubert, S. Hrsg.): Informatik bewegt. 32. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI). 30. Sept. - 3. Okt. in Dortmund, Bonn, 2002.

# Methodischer Ansatz zur Bewertung und Auswahl einer Validierungsumgebung

Steven Yan[1], David Nickel[2], Matthias Behrendt[1], Albert Albers[1]

*[1] IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

*[2] AVL Deutschland GmbH;*

## Abstract

The activity "validation and verification" triggers the development of a validation environments at various stages of the product development process, which includes specific product models and validation methods. Due to the great variety of possibilities to meet validation goals with the help of suitable validation environments, the decision to use an existing one, adapt or develop of a new validation environment is influenced by various criteria. Therefore, an approach for the initial support of the evaluation and selection process of a suitable validation environment is presented. The authors suggest an approach with two stages including initial exclusion and evaluation criteria. The criteria can be classified into a technological, organizational, user and economical perspective.

*Keywords: validation environment, decision making, procedural method, evaluation criteria*

# 1 Einleitung

Die Validierung ist insbesondere durch den schnellen Wandel der Technologien und der dadurch gestiegenen technologischen Unsicherheit die zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess. Um dieser Herausforderungen effektiv begegnen zu können, wurde der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) entwickelt [1]. Ein Teilsystem kann dabei nur integriert im Gesamtsystem und im Zusammenspiel mit den weiteren interagierenden Systemen wie bspw. der Umwelt validiert werden. Für die Umsetzung des IPEK-XiL-Ansatzes wird eine Validierungsumgebung (VU) benötigt, in der u.a. Prüfstände, Messtechnik, Modelle und Methoden zur Ausführung von Validierungsaktivitäten enthalten sind. Bezogen auf ein Validierungsziel ist die Entscheidung für die Verwendung bzw. Entwicklung einer VU methodisch bisher kaum unterstützt und erfolgt oft durch implizites Erfahrungswissen der beteiligten Validierungsingenieure.

# 2 Stand der Forschung

## 2.1 Validierung in der Produktentwicklung

Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentwicklungsprozesses und ist maßgeblich für den Erfolgt des Produktes am Markt verantwortlich [1],[2]. Nach der "Zehnerregel" steigen die Kosten für Änderungen am Systemkonzept oder Design für jede Designphase um den Faktor 10 [3]. Daher ist ein kontinuierliches Validierungskonzept notwendig, welche schon in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses ansetzt [4].

Zur Validierung wird bei Bedarf die Entwicklung von Validierungssystemen angestoßen, welche u.a. spezifische Produktmodelle zur Validierung und geeigneten Validierungsumgebungen und -methoden für die verschiedenen Aktivitäten der Produktentstehung beinhaltet [5]. In diesem Verständnis verlangen Validierungsaktivitäten weitere Modelle und Ressourcen als Ergebnis der jeweiligen Produktentwicklungsaktivitäten. Daher wird dieser Ansatz als "Pull-Prinzip der Validierung" bezeichnet [1]. Dabei werden simultan produkt- und validierungsrelevante Ergebnisse während der Produktentwicklung generiert. Die so entstehenden Entwicklungsartefakte haben immer einen konkreten Kontext, in dem sie gezielte Anforderungen bezüglich der Validierungsaufgabe erfüllen müssen [4].

## 2.2 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Zu Beginn eines Entwicklungsprozesses liegt das zu entwickelnde Gesamtsystem überwiegend in Teilen vor, wobei dabei der Reifegrad der sich in der

Entwicklung befindenden Teilsystem of stark variiert. Validierung kann also nicht nur mit dem fertigen Gesamtsystem, sondern muss frühzeitig auch mit Teilsystemen durchgeführt werden. Dabei müssen die relevanten Wechselwirkungen des Teilsystems mit dessen Übersystem zwingend abgebildet werden, da Funktionen zur Bedarfserfüllung in der Regel durch das Gesamtsystem bzw. Systemverbünde und nicht durch einzelne Teilsysteme erreicht werden [1]. Um dieser komplexen Herausforderungen effektiv über den kompletten Entwicklungsprozess begegnen zu können, wurde der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) entwickelt. Das "X" steht für das sogenannte System-in-Development (SiD), welches sich in der Entwicklung befindet bzw. welches der Entwickler zu verantworten hat. Der Ansatz integriert die in der Steuergeräteentwicklung bereits etablierten Methoden Model-in-the-Loop- (MiL), Software-in-the-Loop- (SiL) bzw. Hardware-in-the-Loop-Ansätze (HiL) [6] und erweitert diese konsequent um die Belange der Mechanik bzw. Mechatronik sowie der Entwickler aus unterschiedlichen Fachdisziplinen [1]. Versuche mit virtuellen, physischen und auch mit gemischt physisch-virtuellen Prototypen werden somit im Produktentwicklungsprozess nahtlos integriert.

## 2.3 Validierungsumgebung

Eine *Validierungsumgebung (VU)* ist eine Untermenge des verfügbaren *Validierungssystems (VS).* Gemäß dem integrierten Produktentwicklungsmodell (iPeM) umfasst es alle entwickelten Elemente (Systeme, Methoden und Prozesse), die eine Validierung des Produkts ermöglichen [5]. Eine geeignete VU bietet die Voraussetzungen für Validierungsaktivitäten im Sinne des IPEK-XiL-Ansatz, bei denen ein (Teil-) System im Kontext des Übersystems und der interagierenden Systeme validiert wird. Daher ist eine Validierungsumgebung eine konkrete Ausprägung eines Handlungssystems zur Validierung in Bezug auf Methoden und das Ressourcensystem für mindestens eine Kombination aus einem Produkt und einem Validierungsziel zu einem bestimmten Zeitpunkt im Produktlebenszyklus [1]. Eine VU besteht dabei aus mindestens einer *Validierungskonfiguration (VK)*, bei der es sich um eine spezifische und bedarfsgerechte Kombination von Methoden, Modellen, Parametrisierung, Testfällen sowie Ressourcen handelt [7].

In verteilten Produktentwicklungsumgebungen, wie sie z.B. in der heutigen Automobilindustrie anzutreffen sind, befinden sich die benötigten Bestandteile einer VU (z.B. virtuelle Modelle oder Prüfstände) nicht immer an einem Entwicklungsstandort. Die Anwendung des IPEK-XiL-Ansatzes wurde dementsprechend so erweitert, dass sich virtuelle und physische Modelle an einem anderen Standort befinden und trotzdem mit anderen (Teil-) Systemen interagieren können [8]. Dementsprechend ergibt sich eine *verteilte Validierungsumgebung*

*(VVU)* die als ein System-of-Systems angesehen werden kann, welches aus mehreren miteinander verbundenen Einzelsystemen (Teilsystemen) besteht und für eine spezifische Aufgabe und zu einem spezifischen Zeitpunkt erzeugt wird [7].

Für die praktische Umsetzung einer Validierungskonfiguration kann ein Top-Down-Modellierungsansatz verwendet werden, bei dem im Kontext der Fahrzeugentwicklung das System "Fahrer, Fahrzeug, Umwelt" in Teilsysteme aufgeteilt wird [1], [9]. Diese Teilsystemmodelle können virtuell, physisch oder gemischt physisch-virtuell vorliegen und variieren in der Regel in ihrem Detaillierungs- und Reifegrad (vgl. [10]). Sie werden dann dem SiD und den restlichen interagierenden Teilsystemen (Connected Systems CS) zugeordnet. Um die verschiedenen Modelle zu verknüpfen, die aufgrund von Inkompatibilität (z. B. zwischen virtueller und physikalischer Domäne) keine direkte Verbindung herstellen können, werden sogenannte Koppelsysteme benötigt [11]. Diese sollen die Kompatibilität der verschiedenen Teilsystemmodelle realisieren, dürfen aber das relevante Systemverhalten nicht verändern. Man unterscheidet zwischen physisch / physische, virtuell / virtuelle und virtuell / physische Koppelsysteme [11]. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen beispielhaft Modelle und Koppelsysteme von Validierungskonfigurationen, bei denen der Top-Down-Modellierungsansatz angewendet wurde.

## 3 Motivation und Zielsetzung

Durch die Vielzahl an Möglichkeiten, Validierungsziele mit Hilfe von passenden VUen zu bedienen, ist die Entscheidung zum Einsatz einer vorhanden VU, Anpassung einer VU oder Entwicklung einer neuen VU durch viele Auswahlkriterien beeinflusst und oft nicht mehr nachvollziehbar. Besonders Produktentwicklungsprozesse mit geringen Übernahmeanteilen im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung weisen ein höheres Entwicklungsrisiko auf [12]. Dabei können sich Validierungsbedarfe ergeben, die mit dem aktuell bestehenden VS nicht zu bedienen sind und bei denen keine Erfahrungsbasis vorhanden ist. Zur Auswahl der geeigneten VU lassen sich in der Literatur lediglich sehr allgemein gefasste Kriterien finden [13]. Diese werden aber in keinen Bezug zu einem systematischen Vorgehen gesetzt. Ziel dieses Beitrags ist deswegen die Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur initialen Unterstützung bei der Bewertung und Auswahl einer geeigneten VU aus einer Menge an Alternativen, die potentiell das Validierungsziel bedienen können. Dabei soll der Fokus auf dem generellen Vorgehen zur Auswahl einer für den Einsatz geeigneten VU liegen und weniger auf der detaillierten Beschreibung und Erläuterung der Bewertungskriterien, welche in diesem Beitrag lediglich exemplarisch ausgewählt wurden.

## 4 Vorgehen bei der Bewertung und Auswahl

Ausgangspunkt für das Vorgehen zur Bewertung und Auswahl einer VU ist das Validierungsziel des Produktentwicklers, aus dem sich die Basisanforderungen an die VU ableiten, die sich in Ausschlusskriterien umformulieren lassen. Bereits zur Verfügung stehende VUen aus dem Ressourcensystem können direkt oder mit angepasster VKen als Alternativen aufgenommen werden (vgl. Abbildung 1 $VU_A$ und $VU_B$). Eine weitere Alternative ist die neue Entwicklung von VUen. In Abbildung 1 stellt $VU_C$ eine lokale neu zu entwickelnde VU dar, während $VU_D$ eine neue VVU unter Einsatz von bereits vorhandenen VUen repräsentiert.

Im *ersten Schritt* werden die zur Auswahl stehenden VUen beschrieben (vgl. Kapitel 2.3). Diese werden dann Ausschlusskriterien unterworfen, um sicherzustellen, dass mit der später ausgewählten VUen das Validierungsziel erreicht werden kann. Die verbleibenden VUen werden in einem *zweiten Schritt* anhand von weiteren Bewertungskriterien bewertet und gewichtet aufsummiert (vgl. z.B. Nutzwertanalyse). Somit lässt sich die bzgl. den Bewertungskriterien entsprechender Stakeholder und deren Gewichtungen die beste VU unter Berücksichtigung des Validierungsziels aus den Alternativen auswählen.

Die Ausschlusskriterien des ersten Schritts ergeben sich aus harten physikalischen Randbedingungen (wie z.B. Leistungsbedarf, Dynamik) für ein Validierungsziel, während die Bewertungskriterien für den zweiten Schritt sowohl von harten als auch weichen, noch nicht endgültig definierbaren Randbedingungen oder schwer objektivierbaren Eigenschaften (z.B. Bedienbarkeit, Zugänglichkeit für Messtechnik) abgeleitet werden können. Nach Paulweber [13] werden zur Auswahl der geeigneten Validierungsumgebung die Modelldomäne (virtuell bzw. physisch), Kosten, Reproduzierbarkeit, Genauigkeit und Flexibilität genannt. Weitere initiale Kriterien als Ausgangsbasis stammen aus einem Experteninterview von Ingenieuren, die in der Vergangenheit maßgeblich an Planung, Aufbau und Betrieb von diversen VUen beteiligt waren. Basierend auf dem Konzept der *Balanced Scorecards* [14] werden die Kriterien verschiedenen Perspektiven zugewiesen. Aus der Vielzahl an möglichen Kriterien muss noch individuell entschieden werden, welche für die Entscheidungsfindung herangezogen und entsprechend gewichtet werden. Kaplan und Norten sind der Meinung, dass bei einem Bewertungsprozess insgesamt nicht mehr als 16 bis 20 Kriterien verwendet werden sollten [15]. Die Ausschluss- und Bewertungskriterien lassen sich tendenziell *einer technologischen, organisatorischen, anwenderorientierten und wirtschaftlichen Perspektive* zuordnen.

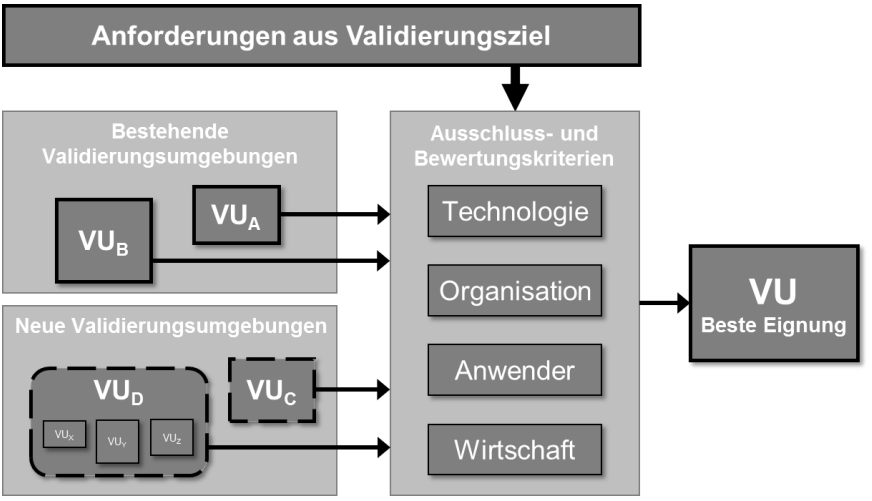



Abbildung 1: Bewertung und Auswahl einer Validierungsumgebung

Im Folgenden werden Beispiele für Kriterien der jeweiligen Perspektive genannt:

- Technologische Perspektive: Technologischer Reifegrad, Dynamik von systemischen Wechselwirkungen, Reproduzierbarkeit, Sicherheit, Zugänglichkeit für Messtechnik

- Organisatorische Perspektive: Zeitaufwand für Transport und Inbetriebnahme, Zeitaufwand für Modellierung, Flexibilität, Wiederverwendbarkeit von Bestandteilen der VU, Auswirkung auf andere Projekte, strategische Ausrichtung

- Anwenderperspektive: Benutzerfreundlichkeit bzw. einfache Bedienbarkeit, vorhandenes Systemverständnis über das Produkt, vorhandenes Systemverständnis über die VU

- Wirtschaftliche Perspektive: Beschaffungskosten, Entwicklungskosten, Inbetriebnahmekosten, Betriebskosten, Transportkosten, Reisekosten

## 5 Anwendungsbeispiel

Der methodische Ansatz wird an einem Anwendungsfall aus der industriellen und wissenschaftlichen Praxis demonstriert. Als Beispiel wird die Entwick-

lung einer Torque-Vectoring-Funktion in einem E-Fahrzeug mit Radnabenantrieben an der Hinterachse herangezogen. Torque-Vectoring ermöglicht durch die radselektive Drehmomentaufbringung eine Optimierung des Fahrverhaltens. Nach jedem Iterationszyklus müssen die Änderungen an dem Regler und den Parametern validiert werden. Hierbei sind neben dem Fahrverhalten insbesondere die systemischen Wechselwirkungen der Teilsysteme zu beobachten, da die Eingriffe der Torque-Vectoring-Funktion das Belastungsprofil der Teilsysteme maßgeblich beeinflussen. Ziel der durchzuführenden Testläufe ist der Nachweis über die Verbesserung der Querdynamik des Fahrzeugs sowie die Untersuchung möglicher Einflüsse auf die Teilsysteme des Antriebstrangs.

Zur Erreichung dieses Validierungsziels muss die VU einige Mindestanforderungen erfüllen, die sich in Ausschlusskriterien überführen lassen. Dazu zählt beispielsweise die technologische Anforderung, dass mechanische Wechselwirkungen zwischen den E-Motoren und dem Rest-Fahrzeug in einem Frequenzbereich bis 1000 Hz abzubilden sind.

## 5.1 Alternative Validierungsumgebungen zum Validierungsziel

*E-Motorprüfstand mit Rest-Fahrzeugsimulation (VU1):*

Auf dem E-Motorprüfstand können die Radnabenantriebe in ein virtuelles Fahrzeug integriert und in Verbindung mit einem Fahrer- und Umweltmodell betrieben werden. Die Systeme Fahrer, Umwelt, Rest-Fahrzeug werden in der virtuellen Domäne abgebildet. Neben einem detaillierten Fahrzeugmodell steht ein einfaches elektrisches Batteriemodell zur Verfügung (vgl. Abbildung 2 links).

*E-Integrationsprüfstands (VU2):*

Der E-Integrationsprüfstand ermöglicht den Test des elektrischen Antriebsstrangs (inkl. Traktionsbatterie), ohne dass dieser in ein Trägerfahrzeug eingebaut werden muss. Die Systeme Fahrer, Umwelt, Rest-Fahrzeug werden in der virtuellen Domäne abgebildet (vgl. Abbildung 2 rechts).

*Vernetzte Komponentenprüfstände (VU3):*

Wie bei VU2 können mit VU3 die physischen Prototypen ohne ein Trägerfahrzeug im Verbund getestet werden. Die Teilsysteme befinden sich allerdings an verschiedenen Entwicklungsstandorten und müssen nicht wie bei VU2 an einen zentralen Standort transportiert werden (vgl. Abbildung 3). Die VVU beinhaltet einen E-Motorprüfstand und einen Batterieprüfstand an einem weiteren

Standort. Wechselwirkung zwischen beiden Standorten sind dabei nur über die virtuelle Domäne möglich [8].

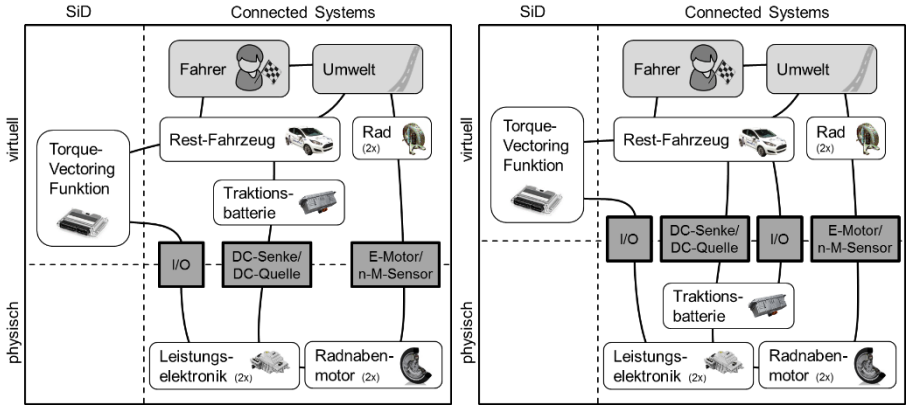



Abbildung 2: Modell der XiL-Architektur des E-Motorprüfstands VU1 (links) und des E-Integrationsprüfstands VU2 (rechts)

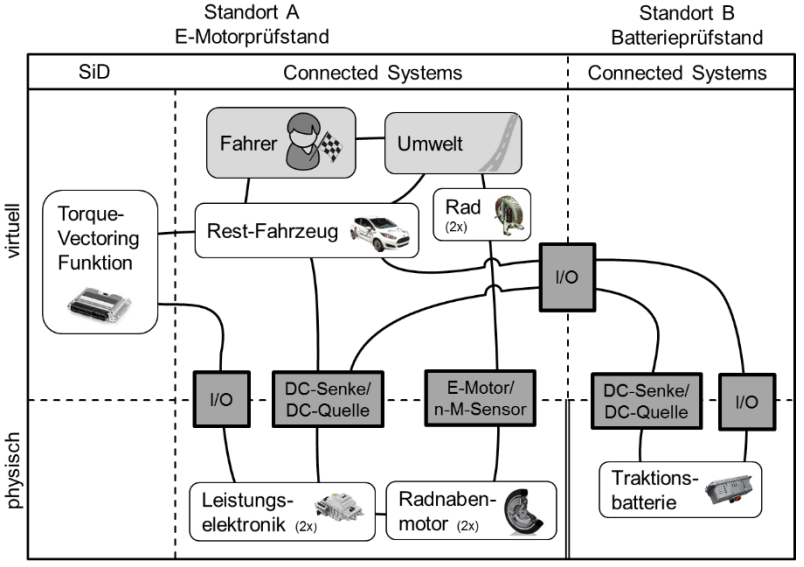



Abbildung 3: Modell der XiL-Architektur der vernetzten Komponentenprüfstände VU3

*Fahrzeugprototyp auf Teststrecke (VU4):*

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen VUen sind in VU4 Fahrer, Fahrzeug und Umwelt physisch vorhanden. Die Integration der Radnabenantriebe und der Traktionsbatterie in den Fahrzeugprototypen ermöglichen somit auch Tests ohne virtuelle Anteile.

## 5.2 Bewertung und Auswahl

Alle vier vorgestellten VUen sind prinzipiell für die Erreichung des definierten Validierungsziels geeignet, da kein Ausschlusskriterium zum Tragen kommt. Im Folgenden wird ein Vergleich anhand der technologischen, organisatorischen, anwenderorientierten und wirtschaftlichen Perspektiven durchgeführt (vgl. Kapitel 4). Diese werden im Anwendungsbeispiel gleichgewichtet. Die Ausprägungen der jeweiligen Bewertungskriterien werden anhand einer fünfstufigen Skala (sehr schlecht 1 bis sehr gut 5) bewertet, wobei hohe Zahlenwerte für eine positive Bewertung der VU bezüglich des jeweiligen Kriteriums stehen. Die subjektiv getroffenen Bewertungen basieren auf Erfahrungswerten der Projektpartner aus dem wissenschaftlichen und industriellen Umfeld. Insgesamt wurden 14 Kriterien verwendet, Tabelle 1 zeigt aus Übersichtlichkeitsgründen die Ergebnisse zusammengefasst als gewichteten Mittelwert für die jeweiligen Perspektiven. Die einzelnen Kriterien waren dabei auch alle gleichgewichtet.

Tabelle 1: Bewertung der Validierungsumgebungen

| | **Gew.** | **VU 1** | **VU 2** | **VU 3** | **VU 4** |
|---|---|---|---|---|---|
| *Technologie* | 1 | 4,80 | 4,80 | 4,00 | 3,40 |
| *Organisation* | 1 | 4,00 | 3,75 | 4,00 | 2,75 |
| *Anwender* | 1 | 4,33 | 4,33 | 4,00 | 4,00 |
| *Wirtschaftlichkeit* | 1 | 5,00 | 2,33 | 4,00 | 3,00 |
| **Gesamtbewertung** | | **4,53** | **3,80** | **4,00** | **3,29** |

Aus der technologischen Perspektive sind der E-Motorprüfstand (VU1) und der E-Integrationsprüfstand (VU2) am besten bewertet. Beispielsweise ist hier die Reproduzierbarkeit und Zugänglichkeit für die Einbringung von Messtechnik am Prüfstand besser als bei VU4 am Fahrzeug. Aufgrund des technologischen Neuheitsgrades der VVU bergen die vernetzten Komponentenprüfstände (VU3) ein technologisches Restrisiko. Zudem ist die Reproduzierbarkeit etwas schlechter, da die Datenverbindung zwischen den zwei Standorten Qualitätsschwankungen

unterworfen ist. Organisatorisch sind VU1, VU2 und V3 ähnlich bewertet, wohingegen VU4 vor allem aufgrund der geringeren Flexibilität und Auswirkung auf andere laufende Projekte im Unternehmen durch z.B. Terminverzug schlechter abschneidet. Aus Anwendersicht werden alle vier VUen ähnlich bewertet. VU3 und VU4 fallen etwas ab, da bei VU3 das Know-How über VVU noch beschränkt ist und bei VU4 die Benutzerfreundlichkeit etwas geringer ist. Wirtschaftlich ist der VU1 am günstigsten, da nur eine physische Komponente in der VU aufgebaut und in Betrieb genommen werden muss. Die VU3 ist durch die Einbindung einer weiteren VU etwas schlechter bei der Inbetriebnahme bewertet, aber durch den Wegfall der Transportkosten in der Gesamtkostenbilanz günstiger als der VU2. VU4 liegt in etwa zwischen VU2 und VU3. Bei einer Auswahl mit homogener Gewichtung ergibt sich VU1 als beste Alternative, um das Validierungsziel „Entwicklung und Optimierung einer Torque-Vectoring-Funktion in einem E-Fahrzeug" zu bedienen. Des Weiteren zeigt sich unter wirtschaftlichen und organisatorischen Aspekten bei VU3 auch die Potenziale von VVUen.

## 6 Diskussion

Der methodische Ansatz unterstützt den Validierungsingenieur bei der Auswahl einer VU, die für die jeweiligen Bedürfnisse am geeignetsten ist. Gerade bei erforderlichen Validierungsaktivitäten, bei denen lediglich eine geringe oder keine Erfahrung vorhanden ist, ist davon auszugehen, dass damit die Auswahl von VUen unterstützt werden. Die Übertragung auf das Anwendungsbeispiel zeigt, dass basierend auf dem Validierungsziel und den Alternativen an VUen eine systematische, nachvollziehbare Auswahl unterstützt werden kann. Das implizit vorhandene Wissen der Validierungsingenieure zur Auswahl von VUen kann damit systematisch erfasst und für weitere Entwicklungen von VUen der nächsten Produktgeneration genutzt werden (vgl. [16]). Mit dem vorgestellten methodischen Ansatz wird die Transparenz der Entscheidungsfindung gefördert, so dass es dadurch möglich ist, die Entscheidungsgüte für eine konkrete VU zu steigern. Hierbei ist eine einheitliche Beschreibung von VUen ein wichtiger Faktor, um die Vergleichbarkeit verschiedener VUen zu gewährleisten.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aktivität „Validierung und Verifizierung" kann in verschiedenen Phasen des Produktentstehungsprozesses die Entwicklung einer VU anstoßen. Durch die Vielzahl an Möglichkeiten, Validierungsziele mit Hilfe von passenden VUen zu bedienen, ist die Entscheidung zum Einsatz einer vorhanden VU, Anpassung einer VU oder Entwicklung einer neuen VU häufig nicht mehr offensichtlich nachvollziehbar. Mit dem vorgestellten Ansatz können Validierungsingenieure

bei der Bewertung und Auswahl der für die entsprechenden Stakeholder geeigneten VU initial unterstützt werden. Die dabei verwendeten Bewertungskriterien lassen sich dabei einer technologischen, organisatorischen, anwenderorientierten und wirtschaftlichen Perspektive zuordnen. Die Übertragung auf das Anwendungsbeispiel zeigt, dass basierend auf den Eingangsdaten zum Validierungsziel und den VUen eine systematische, nachvollziehbare Auswahl getroffen werden kann.

Die beispielhaft angeführten Kriterien stellen keinen Anspruch auf Vollständigkeit dar. Weitere Arbeiten können hier anknüpfen und ergänzende bzw. angepasste Kriterien und zugehörige Gewichtungen erforschen. Zudem führt die steigende Systemkomplexität der Produkte zu neuen Herausforderungen in der Validierung. Hierfür können Eigenschaften des Produkts und der Validierungsumgebung in Zusammenhang gebracht werden, um eine effektivere Auswahl der Validierungsumgebung zu ermöglichen. Dafür können z.B. Ansätze des MBSE vielversprechend sein [17].

## Literatur


[1] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler, and K. Matros, 'Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess', in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Ed. München: Carl Hanser Verlag, 2016, pp. 541–569.

[2] A. Albers, 'Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences', in *Proceedings of the TMCE 2010*, 2010.

[3] K. Ehrlenspiel and H. Meerkamm, *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 5. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2013.

[4] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler, N. Reiss, and N. Bursac, 'Agile product engineering through continuous validation in PGE – Product Generation Engineering', *Des. Sci. J.*, vol. 3, 2017.

[5] A. Albers, N. Reiss, N. Bursac, and T. Richter, 'iPeM – integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering', in *CIRP Design 2016*, Stockholm, 2016.

[6] E. Bringmann and A. Krämer, 'Model-Based Testing of Automotive Systems', 2008, pp. 485–493.

[7] A. Albers, C. Mandel, S. Yan, and M. Behrendt, 'System of Systems Approach for the Description and Characterization of Validation Environments', in *Proceedings of DESIGN 2018*, 2018.

[8] A. Albers, S. Yan, and M. Behrendt, 'Validation Support for Distributed Vehicle Development Based on the XiL-Approach', in *FISITA 2016 World Automotive Congress*, Busan, 2016.

[9] M. Geier, S. Jäger, C. Stier, A. Albers, and ASME Verification and Validation Symposium, 'Combined real and virtual domain product validation using top-down strategies', 2012.

[10] H. Stachowiak, *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer, 1973.

[11] A. Albers, T. Pinner, S. Yan, R. Hettel, and M. Behrendt, 'Koppelsystems: Obligatory Elements within Validation Setups', in *Proceedings of DESIGN 2016*, 2016.

[12] A. Albers, S. Rapp, C. Birk, and N. Bursac, 'Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung', in *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017*, Stuttgart, 2017.

[13] M. Paulweber and K. Lebert, *Mess- und Prüfstandstechnik: Antriebsstrangentwicklung - Hybridisierung - Elektrifizierung*. Wiesbaden: Springer, 2014.

[14] R. Kaplan and D. P. Norton, 'The Balance Scorecard-Measures That Drive Performance', *Harv. Bus. Rev.*, vol. 70, pp. 71–9, 1991.

[15] R. S. Kaplan and D. P. Norton, *The balanced scorecard: translating strategy into action*, Nachdr. Boston, Mass: Harvard Business School Press, 2009.

[16] A. Albers, N. Bursac, and E. Wintergerst, 'Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive', in *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015 SSP 2015*, 2015.

[17] T. Weilkiens and R. M. Soley, 'Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur', 2014.

# Testfallgenerierung - Vorgehen zur Lastkollektivermittlung durch Data Mining am Winkelschleifer

Sven Matthiesen, Matthias Dörr, Sebastian Zimprich

*IPEK – Institut für Produktentwicklung*
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

## Abstract

In product development, load spectra are required for validation using test environments and as a requirement for design. However, the determination of these load spectra is very complex and sometimes not possible. This paper presents a method for determining the load spectra at the contact of an angle grinder with a workpiece. In addition, a regression model for determining load spectra from internal measurements variables of an angle grinder and a measurement system for recording internal measurements variables are provided. With a developed regression model, load spectra can be derived directly during the real field application of the angle grinder.

*Keywords: Test case, Angle Grinder, Regression, Handheld Power Tools*

## 1 Einleitung

Bei der Validierung in der Produktentwicklung wird zwischen der realen Anwendung eines Systems durch einen Anwender und deren Abbildung in einem Test unterschieden [1]. Die Durchführung von Tests ist notwendig, um die Sys-

temeigenschaften eines Systems reproduzierbar bei Betrachtung der relevanten Einflussgrößen für ein Entwicklungsziel zu untersuchen. Ein Test besteht aus einem Testfall, einer Testumgebung und einer Testinterpretation [2]. Ein Testfall enthält einen Input-Verlauf eines Systems, die zugehörigen Start- und Randbedingungen sowie das erwartete Systemverhalten und wird in einer Testumgebung wie beispielsweise einem Prüfstand umgesetzt [3].

## 1.1 Lastkollektive in der Produktentwicklung

Für die Untersuchung der Lebensdauer sind Lastkollektive als Input-Verlauf eines Systems ein wichtiger Bestandteil eines Testfalls. Bei der Durchführung von Tests mit Entwicklungsprüfständen ist die Ermittlung der Lastkollektive somit ein wesentlicher Bestandteil der Validierung. Die Lastkollektive können entweder aus Messungen abgeleitet oder synthetisch über statistische Modelle gebildet werden. Neben der Validierung sind Lastkollektive wichtig für die Auslegung in der Konstruktion, da sie die Belastung an einer definierten Stelle beschreiben. Mit der Kenntnis der Lastkollektive lässt sich über Zählverfahren die Schädigung eines Bauteils und die Lebensdauer bei Versagen durch in Form von Gewaltbruch, Ermüdungsbruch oder plastische Verformung berechnen [4]. Die Messung der Lastkollektive ist mit großem Aufwand verbunden und in manchen Fällen gar nicht möglich [5]. Daher sind Lastkollektive in der Produktentwicklung oftmals nicht explizit bekannt, sondern beruhen auf dem Erfahrungswissen der Hersteller [6].

## 1.2 Lastkollektive am Winkelschleifer

Das Systemverhalten eines Winkelschleifers wird durch verschiedene Anwendungen wie beispielsweise Schruppen, Schleifen oder Trennen bestimmt. Für die Validierung von Winkelschleifern ist es notwendig die relevanten Anwendungen für eine Entwicklungszielgröße zu identifizieren und in Testfälle zu überführen [7]. Relevante Stellen zur Ermittlung der mechanischen Belastung auf einen Winkelschleifer im Betrieb liegen entweder im Winkelschleifer, beispielsweise an der Arbeitswelle [8], oder an der Systemgrenze zum Untergrund vor. Im Folgenden liegt der Fokus dieses Beitrags auf den Lastkollektiven an der Systemgrenze zur Anwendung. Hier wird zwischen dem Scheiben-Werkstück-Kontakt, der die direkte Belastung auf die Arbeitswelle beschreibt, und der Schnittstelle zwischen Winkelschleifer und Scheibe, die zur Betrachtung des Gesamtsystems Winkelschleifer geeignet ist, unterschieden.

Eine Methode zur Messung oder Bestimmung der Lastkollektive zwischen Winkelschleifer und Scheibe ist unter anderem aufgrund der schwierigen Zu-

gänglichkeit der Schnittstelle nicht bekannt. Eine direkte Messung am Wirkkontakt zwischen Scheibe und Werkstück ist nicht möglich [9], jedoch gibt es verschiedene Konzepte zur Ermittlung der Lastkollektive. Ein Ansatz zur Ermittlung der hochdynamischen Kräfte am Winkelschleifer ist die Verschiebung der Messstelle in einen Prüfaufbau [6], wodurch quantitativ [10] oder qualitativ [11] das vorliegende Lastkollektiv bestimmt werden kann. Lim [9] stellt zwei weitere Ansätze zur Ermittlung eines eindimensionalen Kollektivs über Transferfunktionen vor. Zum einen die Ermittlung der Lastkollektive über die Beschleunigung des Werkstücks und zum anderen die Ermittlung der Lastkollektive über die Beschleunigung am Power-Tool, wobei der Versuchsaufbau nicht vollständig expliziert und eine Validierung anhand gemessener Kraftverläufe nicht durchgeführt wurde. Im Bereich der Werkzeugmaschinen werden Regressionsmodellen zur Ermittlung von Lastkollektiven oder des Verschleißes eingesetzt [12].

### 1.3 Zielsetzung

Die vorgestellten Ansätze beschränken sich auf Messungen auf einem Prüfaufbau oder eine eindimensionale Ermittlung der Belastung. Eine Ermittlung von mehrdimensionalen Lastkollektiven aus dem Power-Tool in Feldtests ist bislang nicht möglich. Die resultierende übergeordnete Forschungsfrage lautet: Wie können aus Messungen am Winkelschleifer im realen Feldeinsatz mehrdimensionale Lastkollektive zur Beschreibung der vorliegenden Belastung am Wirkkontakt abgeleitet werden? Ziel dieses Beitrags ist daher die Erweiterung der bestehenden Ansätze um ein Modell zur Ermittlung der Lastkollektive aus den inneren Betriebsgrößen eines Winkelschleifers mittels Data Mining.

Dazu werden im Rahmen dieses Beitrags ein Berechnungsmodell in Form von Regressionsmodellen zur Berechnung der Lastkollektive aus den inneren Betriebsgrößen (Kapitel 2) und ein Datenlogger zur Messung von inneren Betriebsgrößen im realen Feldeinsatz vorgestellt (Kapitel 3). Anschließend wird eine Vorgehensweise zur Messung der mehrdimensionalen Kräfte an der Schnittstelle zwischen Winkelschleifer und Scheibe und die Übertragung auf ein Berechnungsmodell zur Ableitung der Lastkollektive aus dem realen Feldeinsatz präsentiert (Kapitel 4).

## 2 Regressionsmodell zur Ermittlung von Lastkollektive

In diesem Kapitel wird ein Berechnungsmodell in Form von Regressionsmodellen vorgestellt. Dazu werden der verwendete Prüfaufbau und das Versuchssetup zur Datenerfassung präsentiert. Anschließend wird die Generalisierbarkeit des Regressionsmodells für verschiedene Anwender, Geräteklassen, Scheiben und Schleifmittel überprüft.

## 2.1 Prüfaufbau und Versuchsaufbau

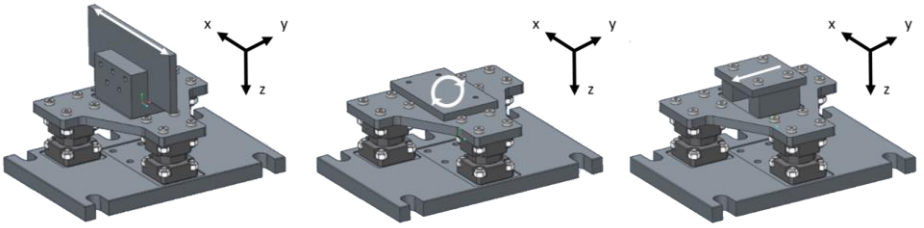



Abbildung 1: Prüfaufbau für drei verschiedene Anwendungen
(Links: Schruppen, Mitte: Schleifen, Rechts: Trennen)

Für die Messung der Kräfte im Wirkkontakt wurde ein Prüfaufbau verwendet. Dabei wurden die Kräfte unter dem Werkstück mittels drei piezoelektrischen 3-Komponenten-Kraftmesselementen Typ 9347C von Kistler mit einer Abtastfrequenz von 20000 Hz gemessen. Zusätzlich wurden als innere Betriebsgrößen Drehzahl, elektrische Leistung und Beschleunigung am Getriebegehäuse gemessen. Insgesamt wurden drei verschiedene Anwendungen auf dem Prüfaufbau abgebildet: Schruppen, Schleifen und Trennen. Die drei Ausführungen des Prüfaufbaus sind in Abbildung 1 zu sehen. Weiß eingezeichnet ist die Arbeitsbewegung des Winkelschleifers. Links ist der Prüfaufbau zum Schruppen zu sehen, der die Nachbearbeitung einer Schweißnaht abbildet. In der Mitte ist die eingeschraubte Probe für das flächige Schleifen mit kreisender Bewegungen abgebildet. Rechts ist der Prüfaufbau zum Trennen zu sehen. Der Trennschnitt wird hier durch die Probe zum Anwender hingezogen. Der Vorgang des Trennens ist in Abbildung 2 zu sehen.

Abbildung 2: Durchführung eines Trennversuchs

Insgesamt wurden jeweils acht verschiedene Versuche von einem professionelleren Anwendungstechniker und einem Anwender mit Erfahrung aus dem

nicht-professionellen Umfeld durchgeführt, wobei sich die Arbeitsweise beider Anwender unterscheidet. So passt der Anwendungstechniker seine Arbeitsweise stark an den verwendeten Winkelschleifer an [13]. Die Schrupp- und Schleifversuche wurden jeweils drei Minuten ausgeführt. Die Versuche mit durchgeführter Anwendung, verwendeter Geräteklasse und verwendeter Scheibe inklusive Schleifmittel sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Durchgeführte Versuche

| Anwendung inkl. Scheibe | Anwendungstechniker | | Nicht-prof. Anwender | |
|---|---|---|---|---|
| | Gerätkl. | Schleifmittel | Gerätkl. | Schleifmittel |
| Schruppen mit Schruppscheibe | 800W | Korund | 800W | Korund |
| | 800W | Keramik | 800W | Keramik |
| Schruppen mit Fiberscheibe | 1400W | Zirkonkorund | 1400W | Zirkonkorund |
| | 1400W | Keramik def. | 1400W | Keramik def. |
| Schleifen mit Fächerschleifscheibe | 800W | Zirkonkorund | 800W | Zirkonkorund |
| | 1400W | Zirkonkorund | 1400W | Zirkonkorund |
| Trennen mit Trennscheibe | 800W | Keramik | 800W | Keramik |
| | 1400W | Korund | 1400W | Korund |

## 2.2 Preprocessing und Aufbau des Regressionsmodells

Eingangsgröße bzw. unabhängige Variablen für das Regressionsmodell bilden die Messgrößen der Drehzahl, Beschleunigung und elektrische Leistung. Die Drehzahl und Leistung werden mit 200 Hz tiefpassgefiltert. Für die Beschleunigung wird ein Bandpassfilter von 5 Hz bis 200 Hz verwendet. Anschließend werden die Zeitreihen auf Abschnitte von 100 Millisekunden segmentiert, sodass jedes Segment 2000 Datenpunkte enthält. Aus jedem Segment werden jeweils 40 Merkmale extrahiert. Zu diesen Merkmalen gehören:

- Minimum, Maximum, Mittelwert und Median der absoluten Werte
- Standardabweichung, RMS, Interquartilsbereich, mehrere Perzentile
- Schiefe, Wölbung, Anzahl Null- und Mittelwertdurchgänge
- RMS von Daubechies-Wavelets
- Mittelwert und Median der absoluten Frequenz
- Peaks und spektrale Energie in Abschnitten des Amplitudenspektrums

Ausgangsgröße bzw. abhängige Variable für das Regressionsmodell bildet jeweils der Median der Kraft zwischen Werkstück und Scheibe für eine Raumrichtung. Somit liegen für jeden Beobachtungspunkt (100 ms eines Versuchs) 120 Merkmale als Eingangsgröße und der zugehörige Median der Kraft als Ausgansgröße vor. Als Algorithmus zur Regressionsanalyse werden Entscheidungswälder mit dem Bagging-Algorithmus mit 30 einzelnen Entscheidungsbäumen verwendet. Die Auswahl der Trainings- und Validierungsdaten erfolgt anhand einer fünffachen Kreuzvalidierung. Als Bewertungsgrößen für die Validierung der Regressionsmodelle wird die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RSME) und das Bestimmtheitsmaß ($R^2$) verwendet. RSME beschreibt die durchschnittliche Abweichung des über das Regressionsmodell berechneten Werts gegenüber dem tatsächlichen Wert. $R^2$ beschreibt den Anteil der erklärten Varianz $\{R^2 \in \mathbb{R} \mid 0 \leq R^2 \leq 1\}$ und liefert somit den Anteil der Abhängigkeit der Kräfte am Wirkkontakt von den gemessenen inneren Betriebsgrößen.

## 2.3 Ergebnisse

Die gemessene und die berechnete Kraft in Z-Richtung (Andruckkraft) aus einem Schruppversuch des Anwendungstechnikers mit einem 800W-Winkelschleifer und einer Korund-Schruppscheibe ist in Abbildung 3 zu sehen. Beide Verläufe zeigen eine sehr gute Übereinstimmung ($R^2$=0,95; RSME=2,56).

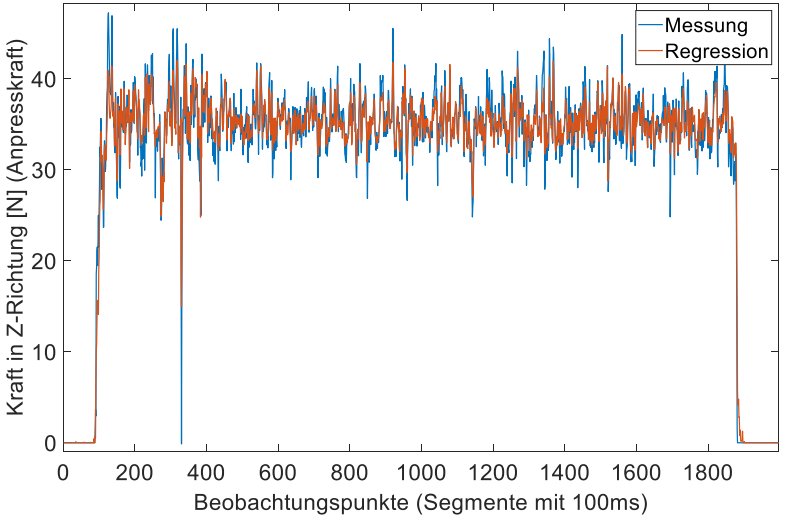



Abbildung 3: Gemessenes und berechnetes Lastkollektiv für ein Schruppversuch des Anwendungstechniker

Die Ergebnisse für alle drei Raumrichtungen, jeweils für eine Anwendung, sind in Tabelle 2 dargestellt. Entsprechend Tabelle 1 wurden die Versuche mit verschiedenen Geräteklasse, Schleifmittel und Anwendern durchgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse des Regressionsmodell innerhalb einer Anwendung

| Anwendung | Kraft X [N] | | Kraft Y [N] | | Kraft Z [N] | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $R^2$ | RSME | $R^2$ | RSME | $R^2$ | RSME |
| Schruppen | 0,27 | 2,02 | 0,94 | 1,42 | 0,97 | 2,08 |
| Schleifen | 0,22 | 2,06 | 0,97 | 1,60 | 0,97 | 2,04 |
| Trennen | 0,51 | 1,35 | 0,83 | 1,58 | 0,98 | 2,37 |

## 2.4 Diskussion der Ergebnisse der Regressionsmodelle

Die Ergebnisse aus Tabelle 2 weisen durch die unterschiedlichen Anwender, Geräteklassen, Scheiben und Schleifmittel auf eine gute Generalisierbarkeit der Regressionsmodelle trotz der unterschiedlichen Arbeitsweise zwischen den Anwendern einer Anwendung hin. Mit den Regressionsmodellen lassen sich für alle drei Anwendungen sehr gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Kräften für die Raumrichtungen Y und Z erzielen. Die berechneten Kraftverläufe haben geringere Amplituden als die gemessenen Kraftverläufe. Die Kräfte zeigen eine deutlich höhere Genauigkeit als [9], der die Kräfte nur in Z-Richtung ermittelt hat.

Die Kräfte in X-Richtung lassen sich nur eingeschränkt aus den gewählten inneren Betriebsgrößen des Winkelschleifers berechnen. Der Kraftverlauf in X-Richtung resultiert beim Schruppen hauptsächlich aus dem Vorschub, beim Trennen aus den Kräften quer zur Trennrichtung und beim Schleifen aus einem geringen Anteil des Vorschubs und der Tangentialkraft aufgrund der kreisenden Arbeitsbewegung. Somit sind die Kräfte in X-Richtung vor allem von der Arbeitsweise des Anwenders und nicht vom Winkelschleifer abhängig. Der Kraftverlauf in Y-Richtung besteht hauptsächlich aus der Tangentialkraft, die aus dem Moment des Winkelschleifers resultiert. Der Kraftverlauf in Z-Richtung besteht hauptsächlich aus der Anpresskraft. Somit lassen sich über die Regressionsmodelle aus den Messgrößen Drehzahl, elektrische Leistung und Beschleunigung die Vorschubkraft und die Tangentialkraft des Winkelschleifers sehr gut berechnen. Der Einfluss der Arbeitsweise lässt sich nur beschränkt aus diesen Messgrößen abbilden.

## 3 Datenlogger zur Messung im realen Feldeinsatz

In diesem Kapitel wird ein Datenlogger zur Messung im realen Feldeinsatz vorgestellt, der als Messsystem ein Bestandteil der in Kapitel 2 vorgestellten Vorgehensweise dienen soll. Bei der Anwendung von Winkelschleifer steht der Anwender in Wechselwirkung mit dem Winkelschleifer. Bei der Applikation von Messtechnik müssen die Einflüsse auf die Anwendung und den Anwender minimiert werden. Anforderungen an das Messsystem sind eine autonome, kabellose Messung im realen Feldeinsatz bei möglichst geringfügiger Beeinflussung des Anwenders mit Datenaufnahme über mehrere Stunden. Dazu wurde ein Datenlogger entwickelt, mit dem Messungen an der Schnittstelle zwischen Akku und Power-Tool möglich sind. Der Datenlogger ist in Abbildung 4 abgebildet.

Abbildung 4: Datenlogger zur Messung der inneren Betriebsgrößen zwischen Winkelschleifer und Akku

Das Gewicht des Datenloggers mit einem passenden zwei Amperestunden-Akku entspricht ungefähr dem Gewicht desgleichen Akkutyps mit vier Amperestunden. So wird der Einfluss durch das Gewicht minimiert. Der Datenlogger besteht aus einem Micro Controller (Arm Cortex M0+), einem SD-Kartenleser, einer Echtzeituhr, einem eigenen Akku, verschiedene interne Sensoren (Inertial Measurment Unit: LSM9DS0, I2S MEMS Micro: SPH0645LM4H, Shunt Monitor: INA 169 mit LVK25R001FER) und Schnittstellen für externe Sensoren. Die Abtastrate beträgt 1000 Hz. In Tabelle 3 sind die Messgrößen und deren Zielsetzung dargestellt.

Tabelle 3: Messgrößen des Datenloggers

| **Messgröße** | **Zielsetzung** |
|---|---|
| Strom | Elektr. Leistung |
| Spannung | Elektr. Leistung, Abnahme Akkuspannung |
| Beschleunigung [x,y,z] | Anregung Power-Tool, Bewegung Anwender |
| Winkelgeschwindigkeit [x,y,z] | Bewegung Anwender |
| Magnetfeld [x,y,z] | Lage des Geräts im Erdmagnetfeld |
| Schalldruck (Lautstärke) | Belastung und Anregung Power-Tool |

## 4 Vorgehensweise zur Messung und Berechnung der Lastkollektive

In diesem Kapitel wird eine initiale Vorgehensweise zur Messung der Lastkollektive zwischen Winkelschleifer und Scheibe vorgestellt und die Ableitung in ein Berechnungsmodell zur Berechnung der Lastkollektive aus Messungen der indirekten Betriebsgrößen im realen Feldeinsatz vorgestellt. Die zwei Vorgehensweisen sind in Abbildung 5 dargestellt.

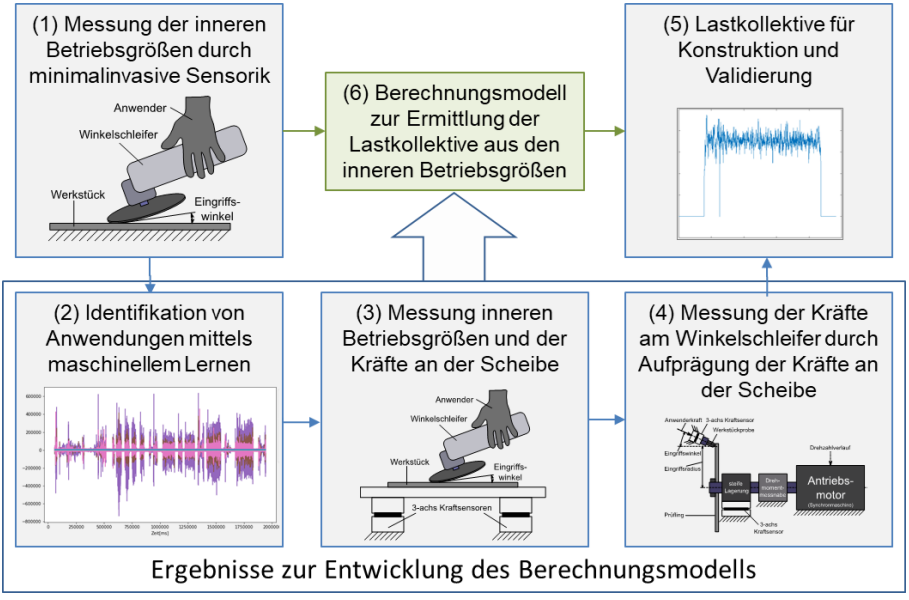



Abbildung 5: Ermittlung von Lastkollektiven über manuelle Tests an einem Prüfaufbau (1,2,3,4,5) oder über ein Berechnungsmodell (1,6,5)

## 4.1 Vorgehensweise zur Messung von Lastkollektiven

Im ersten Schritt werden Messungen mit minimalinvasiver Sensorik im realen Feldeinsatz mit dem in Kapitel 3 vorgestellten Datenlogger durchgeführt (1). Aus den Messdaten werden mittels Data-Mining die relevanten Anwendungen identifiziert (2). Aus den Anwendungen werden jeweils Testfälle zur Ermittlung der Lastkollektive zwischen Scheibe und Werkstück abgeleitet. Die resultierenden Testfälle werden auf einem Prüfaufbau durch manuellen Tests abgebildet. Dabei werden die Kräfte am Werkstück und die inneren Betriebsgrößen des Winkelschleifers gemessen (3). Die gemessenen Kräfte bilden den Input-Verlauf für einen Prüfstand. Die Kräfte werden auf eine Scheibe aufgeprägt und die resultierenden Kräfte an der Arbeitswelle eines Winkelschleifers gemessen. Mit dem Verhältnis der Kräfte lässt sich die Übertragungsfunktion der Scheiben und damit die Kräfte zwischen Winkelschleifer und Scheibe bestimmen (4). Ergebnis des Vorgehens sind die Lastkollektive an beiden Schnittstellen als Inputverlauf für einen Testfall zur Umsetzung in einer Prüfumgebung oder als Anforderung für die Konstruktion (5).

## 4.2 Übertragung auf ein Berechnungsmodell

Aus den Ergebnissen der Schritte (2,3,4) lässt sich ein Modell zur Ermittlung der Kräfte an beiden Schnittstellen entwickeln (6). Die inneren Betriebsgrößen aus dem realen Feldtest bilden die Eingangsgröße für das Modell (1). In dem Berechnungsmodell werden die Messdaten mittels Maschinellem Lernen der durchgeführten Anwendung zugeordnet (2). Anschließend werden über ein Regressionsmodell analog zu Kapitel 2 die Kräfte zwischen Scheibe und Werkstück berechnet. Dabei wird das entsprechende Regressionsmodell durch die Identifikation der Anwendung gewählt. Input für die Entwicklung des Regressionsmodells bilden Referenzversuche an einem Prüfaufbau oder mittels einer Kraftmessplatte. Anschließend können die Kraftverläufe an der Schnittstelle zwischen Winkelschleifer und Scheibe über eine Übertragungsfunktion berechnet werden, die wiederum aus Referenzversuchen an einem Prüfstand bestimmt werden. Ergebnis des Berechnungsmodells sind Lastkollektive zur Validierung und zur Konstruktion.

Für die Forschungsfrage *Wie können aus Messungen am Winkelschleifer im realen Feldeinsatz Lastkollektive zur Beschreibung der vorliegenden Belastung am Wirkkontakt abgeleitet werden?* bilden das vorgestellte Berechnungsmodell und der vorgestellte Datenlogger als Messsystem für den realen Feldeinsatz die Grundlagen zur Umsetzung der beschriebenen Vorgehensweise und zur Übertragung auf ein Berechnungsmodell. Mit der Ergänzung um ein Modell zur Klas-

sifikation der Anwendungen kann das Berechnungsmodell die ausgeführte Anwendung in den Messdaten erkennen. Die Ergänzung um einen Prüfstand zur Bestimmung der Übertragungsfunktion ermöglicht die Ermittlung der Lastkollektive an der Schnittstelle zwischen Winkelschleifer und Scheibe.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Berechnungsmodell zur Ermittlung der Lastkollektive aus inneren Betriebsgrößen eines Winkelschleifers vorgestellt. Das Berechnungsmodell zeigt im Rahmen dieser Studie eine hohe Genauigkeit und ein großes Potential für die Testfallgenerierung. Zudem wurde ein Datenlogger zur Messung von inneren Betriebsgrößen im realen Feldeinsatz präsentiert. Außerdem wurde eine Vorgehensweise zur Ermittlung von Lastkollektive mittels eines Prüfaufbaus und die Übertragung auf ein Berechnungsmodell vorgestellt.

Als nächsten Schritt müssen die Robustheit und die Unabhängigkeit vom Anwender in einer größeren Studie mit Messdaten aus dem Datenlogger validiert werden. Es muss untersucht werden wie sich die Ergebnisse der Regressionsmodelle mit der geringeren Abtastrate und einer anderen Auswahl an Messgrößen des Datenloggers verändert. Zusätzlich muss die Klassifikation von Anwendungsfällen anhand von Messdaten des Datenloggers untersucht werden. Um von den Kräften zwischen Werkstück und Scheibe auf die Kräfte zwischen Winkelschleifer und Scheibe schließen zu können muss ein einsprechender Prüfstand entwickelt werden.

## 6 Danksagung

Die Versuche wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 19881 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Zusätzlich danken die Autoren Herrn Marcel Vogt für die Unterstützung bei der Umsetzung des Datenloggers.

## 1 Literatur

[1] Pinner, T.: "Ein Beitrag zur Entwicklung von Koppelsystemen für die Validierung im Kontext des X-in-the-Loop-Frameworks am Beispiel eines Schaltroboters", Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2017.

[2] Ebel, B.: "Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung", Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, 2015.

[3] Albers, A. et al.: "Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess", Handbuch Produktentwicklung, S. 541–569, Carl Hanser Verlag, München, 2016.

[4] Köhler, M. et al.: "Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit", Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.

[5] Rieg, F., Steinhilper, R.: "Handbuch Konstruktion", Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2012.

[6] Matthiesen, S. et al.: "Modellunterstützte Reduktion von Störgrößen in einem Messsystem zur Erfassung der Geräte-Werkstück-Wechselwirkungen", DFX 2015: Proceedings of the 26th Symposium Design for X, S. 157-169, TuTech Verlag, Hamburg, 2015.

[7] Matthiesen, S. et al.: "Prozessmodell zur anwendungsorientierten Entwicklung von Power-Tools", Zweite Transdisziplinäre Konferenz - Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen, Zweite Transdisziplinäre Konferenz, Hamburg, S. 223-232, 2016.

[8] Matthiesen, S. et al.: "Experimentelle Ermittlung von Bauteilbelastungen eines Power Tool Antriebsstrangs durch indirektes Messen in realitätsnahen Anwendungen als ein Baustein in der Teilsystemvalidierung", Forschung im Ingenieurwesen, S. 17–27, 2016.

[9] Lim, A.; Kim, J.; Zechmann, E.: "Development of an Experimental Method to Estimate the Operating Force of a Hand-Held Power Tool Utilizing Measured Transfer Functions", 2013.

[10] Gärtner, H.: "Einflussgrössen auf die Geräuschemission von handgeführten Schleifmaschinen unter Berücksichtigung des Abtrags- und Verschleissverhaltens". Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart, Medien-Verl. Köhler, Tübingen, 2004.

[11] Matthiesen, S.; Gwosch, T.; Bruchmueller, T.: "Experimentelle Identifikation von Schwingungsursachen in Antriebssträngen von Power-Tools". VDI Fachtagung Schwingungen 2017: Berechnung, Überwachung, Anwendung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2017.

[12] Kalla, D.; Sheikh-Ahmad, J.; Twomey, J.: "Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers", International Journal of Machine Tools and Manufacture 50, S. 882–891, 2010.

[13] Duffy, V. G.; Lin, J.-H.; McGorry, R. W. et al.: "Dynamic Power Tool Operation Model: Experienced Users vs. Novice Users", Digital Human Modeling, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

# Methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Jonas Reinemann[1], Tobias Hirschter[1], Constantin Mandel[1], Jonas Heimicke[1], Albert Albers[1]

*[1] IPEK – Institut für Produktentwicklung,*
*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

## Abstract

Product validation at an early development stage plays a key role in meeting customer requirements and ultimately securing a product's market success. At the same time, early validation activities are subject to specific challenges resulting from a high degree of uncertainty. A promising approach to meet these challenges is the use of augmented reality technology. With the help of AR, different product variants can be experienced early in the development process. This paper presents a methodical support of product validation in AR environments at an early development stage, addressing the entire validation process, from the definition of validation objectives to the derivation of development decisions.

*Keywords: product validation, early development stage, augmented reality, customer focus*

# 1 Einleitung

Angesichts des globalen Wettbewerbs und sich stetig verkürzender Entwicklungszyklen in der Entwicklung mechatronischer Systeme, wird die Fähigkeit von Unternehmen, noch exakter und schneller auf Kundenwünsche zu reagieren, immer erfolgskritischer. Vor diesem Hintergrund werden neue Formen der direkten Kundenintegration entwickelt, die Kundenwünsche nicht bloß einmalig zu Beginn eines Produktentwicklungsprozesses als dokumentierte Anforderung berücksichtigen, sondern im Rahmen kontinuierlicher Validierungsaktivitäten [1]. Eine Voraussetzung zur Generierung zielgerichteten Kundenfeedbacks im Rahmen der Validierung ist das Vorhandensein von (alternativen) Repräsentationen des späteren Produktes [2]. Physische Prototypen, die hierfür in Frage kämen, können jedoch meist erst recht spät im Entwicklungsprozess realisiert werden. Stattdessen bieten sich zur frühzeitigen Integration von Kunden in den Entwicklungsprozess Virtual Reality- und Augmented Reality-Anwendungen (VR und AR) an, mit denen unterschiedliche Varianten eines Produkts frühzeitig erfahrbar gemacht werden können. Insb. die AR-Technologie bietet hier große Potentiale, da sie es ermöglicht, bestehende, physische Referenzprodukte mit virtuellen Projektionen zu kombinieren. In diesem Beitrag wird eine methodische Unterstützung zur Validierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung mithilfe bestehender Referenzprodukte beschrieben.

# 2 Stand der Forschung

## 2.1 Erweitertes ZHO-Modell der Produktentwicklung

Der Theorie der Systemtechnik nach ROPOHL folgend wird im Zuge der Produktentwicklung ein initial vages Zielsystem mittels eines Handlungssystems in ein konkretes Objektsystem (Sachsystem) überführt [3]. Das Zielsystem beinhaltet dabei alle relevanten Ziele für das zu entwickelnde Produkt, sowie deren Wechselwirkungen und Randbedingungen. Um den iterativen Charakter der Produktentwicklung und die zentrale Rolle des Entwicklers zu verdeutlichen, ergänzen ALBERS ET AL. im *erweiterten ZHO-Modell* die Basisaktivitäten der Analyse und Synthese [4]. Gleichzeitig konkretisieren sie das Handlungssystem durch die Einführung der Wissensbasis und des Lösungsraums (vgl. Abbildung 1). Anhand des so gewonnenen Modells lässt sich die Produktentwicklung als wiederkehre Abfolge von beliebig vielen Kreations- und Validierungsschritten beschrieben. Dabei besteht die Kreation aus den Basisaktivitäten der Ziel-Analyse und Objektsynthese, während sich die Validierung als Objekt-Analyse und anschließender Ziel-Synthese begreifen lässt.

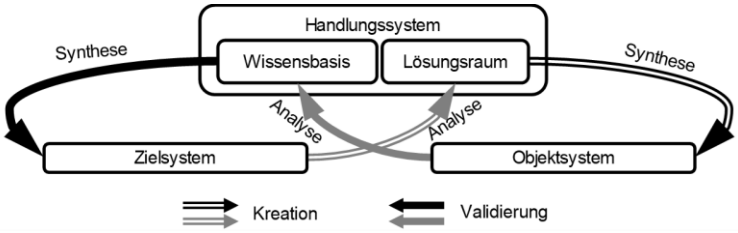



Abbildung 1: Erweitertes ZHO-Modell nach ALBERS [4]

## 2.2 PGE – Produktgenerationsentwicklung

Die PGE – Produktgenerationsentwicklung ist ein Erklärungsmodell nach ALBERS, das die Entwicklung mechatronischer Systeme in Generationen beschreibt. Es fußt auf zwei grundlegenden Hypothesen. Entsprechend der ersten Hypothese erfolgt die Entwicklung jeder neuen Produktgeneration auf Basis mindestens eines Referenzprodukts (Vorgängergeneration, bestehende Teilsysteme oder -lösungen). Die zweite Hypothese besagt, dass jede Entwicklung durch die systematische Kombination der Aktivitäten *Übernahmevariation* (Übernahme einzelner Teilsysteme des Referenzprodukts), *Gestaltvariation* (Anpassung der Gestalt der Teilsysteme) und *Prinzipvariation* (Anpassung des Wirkprinzips der Teilsysteme) zu charakterisieren ist. Neben der Entwicklung mechatronischer Systeme unterstützt der empirisch fundierte Ansatz die Erforschung und Entwicklung neuer Methoden und Verfahren zur Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen. [5]

## 2.3 Initiale Zielsystembildung in der Frühen Phase der PGE

Große Bedeutung kommt in Praxis und Wissenschaft der *Frühen Phase der PGE* zu. Ausgehend von der Initiierung eines Projekts wird in dieser Phase das initiale Zielsystem einer neuen Produktgeneration erstellt [6]. Eine zentrale Aktivität der initialen Zielsystembildung ist das Finden von *Produktprofilen*. Nach ALBERS ET AL. ist ein Produktprofil „ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht" [7]. Eine konkrete Form der Modellierung von Produktprofilen stellen sog. Eigenschaftsprofile dar. Aufgrund ihres lösungsoffenen Charakters ermöglicht sie die frühzeitige Beschreibung von Entwicklungszielen einer Produktgeneration, ohne dabei den technischen Lösungsraum vorzugeben. Eigenschaftsprofile beschreiben eine Produktgeneration durch vorgegebene Ausprägungen einer Reihe produktspezifischer, kundenerlebbarer Eigenschaften. Neben der Bestimmung einer Soll-Veränderung gegenüber Referenzprodukten,

lassen sich Eigenschaften in Eigenschaftsprofilen auch hinsichtlich der Kundenrelevanz (beispielsweise anhand der Kano-Systematik [8]) oder der Positionierung im Wettbewerb bewerten. Im Zuge der initialen Bewertung des Produktprofils erfolgt die Verknüpfung mit lösungsspezifischen Elementen, um so gezielt Übernahme- und Variationsanteile technischer Teilsysteme aus Referenzprodukten zu identifizieren. Für die Strukturierung und Verknüpfung der lösungsoffenen und lösungsspezifischen Elemente der initialen Zielsystembildung schlagen ALBERS ET AL. ein Referenzproduktmodell vor, das die Beschreibungsebene kundenerlebbarer Produkteigenschaften mit der Ebene der Produktfunktionen und der Ebene technischer Teilsysteme in Bezug setzt (vgl. Abbildung 2). [9]

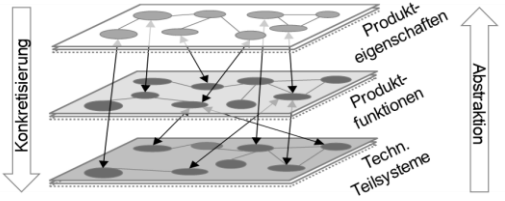



Abbildung 2: Produktmodell zur Strukturierung der Elemente der initialen Zielsystembildung [9]

## 2.4 Validierung technischer Systeme

Nach ALBERS ET AL. stellt die Validierung die zentrale, wissensgenerierende Aktivität im Produktentstehungsprozess dar [4]. Im Gegensatz zur Verifikation, die allein den Abgleich von Ziel- und Objektsystem beinhaltet, wird im Rahmen der Validierung zudem die Gültigkeit des Zielsystems vor dem Hintergrund der Anforderungen verschiedener Stakeholder überprüft. Der Einbindung der Stakeholder-Sicht, insb. des Kunden, kommt bei der Produktvalidierung daher eine entscheidende Bedeutung zu. Zur Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess existiert eine Vielzahl von Ansätzen (siehe z. B. [10]). Aufgrund ihrer Hebelwirkung betonen viele davon die besondere Bedeutung frühzeitiger Validierungsaktivitäten [11]. Oftmals wird die Validierung in Referenz-Prozessmodellen als abgeschlossene Phase betrachtet (siehe z. B. [10, 11]). Im Zuge der Etablierung agiler Produktentwicklungsprozesse, wird jedoch immer häufiger der Bedarf an kontinuierlichen, begleitenden Validierungsaktivitäten formuliert [12]. So fußt etwa der agile Entwicklungsansatz *ASD – Agile Systems Design* neben weiteren Grundprinzipien explizit auf dem Prinzip einer *frühen und kontinuierlichen Validierung* [13].

ALBERS ET AL. präsentieren mit dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL) ein kontinuierliches Validierungskonzept, das dieses Grundprinzip operationalisiert und so für die mechatronische Entwicklung nutzbar macht [4]. Im zugrundliegenden Modellverständnis wird die Gesamtheit aller entwickelten Systeme, Methoden und Prozesse zur Validierung eines Systems als *Validierungssystem* bezeichnet. Die Auswahl der Elemente des Validierungssystems, die der Erreichung eines spezifischen Validierungsziels dienen, bilden die *Validierungsumgebung*. Validierungsumgebungen besitzen wiederum mindestens eine *Validierungskonfiguration*, eine spezifische Kombination von Methoden, Testfällen, Ressourcen und Parametrisierungen, welche aus der Validierungsumgebung abgeleitet wird [14]. Zwingender Bestandteil jeder Validierungskonfiguration ist das zu untersuchende System selbst (System in Development), welches in physischer, virtueller oder gemischt physisch-virtueller Form und auf verschiedenen Systemebenen (vom Gesamtsystem bis hin zum Wirkflächenpaar) vorliegen kann. Für die Validierung wird das zu untersuchende System in das Gesamtsystem, die Umwelt und ggf. weitere interagierende Teilsysteme (Connected Systems) eingebunden, welche ebenfalls physisch, virtuell oder gemischt physisch-virtuell vorliegen können [4]. Zur Verknüpfung einzelner Teilsysteme in der virtuellen und physischen Domäne der Validierungskonfiguration kommen sog. Koppelsysteme zum Einsatz. Dabei kann es sich etwa um Sensor-Aktor-Paare oder um Augmented Reality-Brillen handeln.

## 2.5 Augmentierte Realität (AR)

MILGRAM ET AL. beschreiben den Begriff der *Augmented Reality* in Abgrenzung zu anderen Darstellungs- und Wahrnehmungsformen entlang des sog. *Reality-Virtuality Continuum* als Mischform zwischen der realen Umwelt und der vollständig virtuellen Umwelt *(Virtual Reality)* [15]. Eine virtuelle Umwelt zeichnet sich nach BURDEA UND COIFFET durch die drei Eigenschaften der Immersion, Interaktion und Imagination aus. Der Immersion kommt dabei eine besondere Rolle zu. Sie bezeichnet die Einbindung des Anwenders in die virtuelle Umwelt. Erreicht die virtuelle Umwelt einen hohen Immersionsgrad, ist der Anwender im Extremfall nicht mehr in der Lage zwischen der realen und der virtuellen Umwelt zu unterscheiden [16]. Der Immersionsgrad hängt dabei insb. von der Fähigkeit der virtuellen Umwelt ab, verschiedene Sinnesmodalitäten (insb. visuell, auditiv, haptisch) anzusprechen [17]. Durch die Möglichkeit zur Kombination virtueller und realer Elemente lassen sich in AR-Umgebungen tendenziell höhere Immersionsgrade erzielen als in einer rein virtuellen Umwelt. Dies lässt sich u. a. auf die haptischen Sinnesreize zurückführen, die von den realen Elementen in der AR-Umgebung ausgehen [18]. Gleichzeitig wird der Immersionsgrad sowohl in VR- wie auch in AR-Umgebungen maßgeblich von den verwendeten Ausgabegeräten beeinflusst. DAMGRAVE unterscheidet dabei zwischen

Fenster-gebundenen (z. B. über einen Tablet- oder Smartphonebildschirm), immersiven (über einen Head-Mounted Display) und räumlichen (über Projektionen) Darstellungsformen von AR-Umgebungen [19]. In der Praxis existieren verschiedenste Anwendungen von AR-Umgebungen in den Bereichen Architektur, Industrie, Militär, Medizin, Unterhaltung und Freizeit [20]. Auch erste Anwendungen im Rahmen der Produktentwicklung im Allgemeinen und der Produktvalidierung im Speziellen werden etwa bei KATICIC beschrieben [17].

## 3 Forschungsfragen und Forschungsvorgehen

Als Grundlage für die Entwicklung der methodischen Unterstützung zur Validierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE wurden drei Forschungsfragen formuliert:

F1: Wie ist das Zielsystem einer methodischen Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen zu spezifizieren, um den Schwierigkeiten früher Validierungsaktivitäten effektiv begegnen zu können?

F2: Wie ist eine Systematik zu gestalten, um die Validierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE methodisch zu unterstützen?

F3: Wie lässt sich die entwickelte methodische Unterstützung in der Praxis anwenden?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden zunächst Fallstudien realer Entwicklungsprozesse betrachtet und hinsichtlich der auftretenden Schwierigkeiten bei Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der PGE untersucht. Basierend auf der Untersuchung wurde ein Zielsystem für die zu entwickelnde methodische Unterstützung abgeleitet (F1). Anschließend erfolgte die iterative Ausgestaltung der methodischen Unterstützung (F2). Abschließend wurde die entwickelte Unterstützung in einer ersten Fallstudie am Beispiel der Entwicklung der neuen Generation einer Dunstabzugshaube evaluiert (F3).

## 4 Entwicklung der methodischen Unterstützung

Um das Zielsystem der methodischen Unterstützung zu spezifizieren, wurden in beobachtenden Fallstudien die spezifischen Randbedingungen von Validierungsaktivitäten in der Frühen Phase der PGE erfasst und daraus Anforderungen an die methodische Unterstützung abgeleitet, die diese Randbedingungen adressieren. In Abbildung 3 sind die Elemente des Zielsystems dargestellt.

| Spezifische Randbedingungen von Validierungs-aktivitäten in der Frühen Phase der PGE | Anforderungen an die methodische Unterstützung |
|---|---|
| ▪ Geringe Ressourcenverfügbarkeit | Zweckmäßiges Verhältnis von Aufwand und Nutzen |
| ▪ Informationsverlust durch wenig strukturierte Prozesse | Durchgängige Unterstützung des gesamten Validierungsprozesses |
| ▪ Stark iteratives Vorgehen | Sicherstellung der Rückführung der Validierungsergebnisse in das Zielsystem |
| ▪ Große Bedeutung von implizitem Wissen | Zugang zu implizitem Wissen durch direkte Kundenintegration |
| ▪ Potenzial zur Steigerung der Kundenorientierung | Eigenschaftsorientierte Definition von Validierungszielen |
| ▪ Potenzial durch Nutzung vorhandener Informationen aus Referenzprodukten | Integration von Referenzprodukten in die Validierungsumgebung |

Abbildung 3: Zielsystem der entwickelten methodischen Unterstützung

Ausgehend von den Anforderungen wurde die methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE entwickelt. Den Rahmen der methodischen Unterstützung bildet ein Referenzprozessmodell, das das Vorgehen bei der Produktvalidierung in AR-Umgebungen in fünf Prozessschritte unterteilt (vgl. Abbildung 4). Das methodische Vorgehen entlang der fünf Prozessschritte ist im Folgenden beschrieben.

| Validierungsziel festlegen | Validierungsumgebung konfigurieren | Validierungsumgebung aufbauen | Test durchführen | Testergebnisse interpretieren |
|---|---|---|---|---|
| ▪ Auswahl und Konkretisierung zu validierender Produkt-eigenschaften<br>▪ Generierung alternativer Merkmals-ausprägungen | ▪ Ableitung Anforderungsprofil<br>▪ Abgleich Anforderungsprofil mit Profilen von Referenz-konfigurationen<br>▪ Ableitung geeigneter Validierungs-konfiguration | ▪ Festlegung Testfälle<br>▪ Konkretisierung Validierungs-konfiguration<br>▪ Aufbau AR-Umgebung | ▪ Durchführung Probandenstudie<br>▪ Erhebung und Dokumentation von Probandenfeedback | ▪ Auswertung von Probandenfeedback<br>▪ Ableitung von Entwicklungs-entscheidungen und Synthese konkretisiertes Ziel-system |

Abbildung 4: Referenzprozessmodell der methodischen Unterstützung

## 4.1 Validierungsziel festlegen

Ausgangspunkt der methodischen Unterstützung ist die Festlegung des Validierungsziels. Dazu wird ein Vorgehen gewählt, das den Bezug zu den lösungsoffenen Kundenanforderungen sicherstellt und gleichzeitig konkrete Rückschlüsse auf die lösungsspezifischen Elemente des Validierungssystems ermöglicht. Um dieser Forderung gerecht zu werden, muss eine Verknüpfung der verschiedenen Modellebenen des Referenz-Produktmodells zur Strukturierung der Elemente der initialen Zielsystembildung hergestellt werden (vgl. Abbildung 2). Zunächst erfolgt dazu auf der Modellebene der kundenerlebbaren Produktei-

genschaften die Auswahl eines oder mehrerer Eigenschaftsziele als Validierungsziel. Unterstützend wird dazu das Produktprofil in seiner Modellierung als Eigenschaftsprofil herangezogen. Die Auswahl des Validierungsziels erfolgt anhand der dort dokumentierten Informationen zur Soll-Veränderung gegenüber dem Referenzprodukt, zur Wettbewerbspositionierung und zur Kundenrelevanz jeder Produkteigenschaft. Mit der Auswahl des Validierungsziels wird ein Entwicklungsschwerpunkt für den gesamten Validierungs- und Kreationszyklus gesetzt. Der nachfolgende Kreationsschritt innerhalb des Zyklus orientieren sich ebenfalls am Validierungsziel. Ein solches Vorgehen lässt sich daher als Validierungs-getriebene Kreation verstehen. Im Anschluss an die Festlegung des Validierungsziels auf der Modellebene kundenerlebbarer Eigenschaften, erfolgt seine Konkretisierung durch die Verknüpfung mit denjenigen Elementen der Funktions- und Baustruktur des Referenzprodukts, die einen Beitrag zur Erfüllung des im Validierungsziel postulierten Kunden- und Anwendernutzens leisten und daher potenziell eine Prinzip- bzw. Gestaltvariation in der zu entwickelnden Produktgeneration erfahren. Auf die Identifizierung relevanter Funktionen und technischer Teilsysteme folgt in einem separaten Kreationsschritt die Generierung alternativer Lösungen, die anschließend im Zuge der Validierung hinsichtlich des Validierungsziels zu bewerten sind. Die Lösungsfindung findet auf der Ebene einzelner charakterisierender Merkmale statt, denen jeweils alternative Merkmalsausprägungen zuzuordnen sind.

## 4.2 Validierungsumgebung konfigurieren

Auf Basis des definierten Validierungsziels und der dazugehörigen alternativen Merkmalsausprägungen erfolgt im zweiten Prozessschritt die Auswahl einer geeigneten Validierungskonfiguration. Als Auswahlkriterium wird dazu die Wiedergabetreue des teilvirtuellen Prototyps in der AR-basierten Validierungsumgebung im Vergleich zum fertigen Produkt, die sog. Fidelity, herangezogen. In Anlehnung an das Filter-Fidelity-Model nach KOHLER ET AL. [21] wurden dazu eine Reihe von Dimensionen definiert, entlang derer die Anforderungen an die Wiedergabetreue in Abhängigkeit des Validierungsziels zu bewerten sind. Die berücksichtigten Dimensionen beziehen sich dabei etwa auf die Wiedergabetreue der Gestalt (z. B. hinsichtlich Größe, Farbe, Form), der Funktionalität oder der Interaktivität des teilvirtuellen Prototyps. Das erstellte Anforderungsprofil wird anschließend mit einer vordefinierten Sammlung von Referenzprofilen abgeglichen. Jedem Referenzprofil ist eine repräsentative Konfiguration einer AR-basierten Validierungsumgebung für eine elementare Validierungsaufgabe zugeordnet, die den im jeweiligen Referenzprofil beschriebenen Anforderungen an die Wiedergabetreue gerecht wird. Durch den Abgleich von Anforderungs-

und Referenzprofilen lassen sich mögliche Kombinationen von Validierungskonfigurationen identifizieren. Daraus wird diejenige ausgewählt, die eine maximale Übereinstimmung zum Anforderungsprofil erreicht.

## 4.3 Validierungsumgebung aufbauen

Auf die Auswahl einer geeigneten Validierungskonfiguration im zweiten Prozessschritt folgt anschließend der Aufbau der Validierungsumgebung. Dazu sind zunächst weitere Randbedingungen zu definieren. Hierzu zählt insb. die Beschreibung der Testfälle. Ein Testfall wird als ein „repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen" verstanden [4]. Die Auswahl geeigneter Anwendungsfälle erfolgt im Hinblick auf ihre Eignung zur Unterstützung des definierten Validierungsziels. Die Testfallbeschreibung bezieht sich dabei nicht allein auf das zu untersuchende System. Vielmehr beinhaltet sie auch Angaben zu seinen Wechselwirkungen mit den umgebenden Systemen [4]. Als solches ist auch der Nutzer mit seinem vorausgedachten Verhalten Teil der Testfallbeschreibung. Anhand der Testfallbeschreibung lässt sich die ausgewählte Validierungskonfiguration anschließend in Bezug auf die zu berücksichtigenden umgebenden Systeme (Connected Systems) konkretisieren. Die so konkretisierte Validierungskonfiguration ist anschließend in virtuelle Szenen umzusetzen. KATICIC schlägt dafür ein dreigeteiltes Vorgehen aus *Geometriedefinition*, *Erstellung des Visualisierungsmodells* und *Implementierung von Funktionalität und Verhalten* vor [17]. In AR-Umgebungen schließt sich daran als ein vierter Teilschritt die *Verknüpfung von virtuellen Modellen und realer Umgebung* an. Die Umsetzung der Validierungskonfiguration in AR-Umgebungen lässt sich durch entsprechende Toolketten unterstützen. Deren Auswahl sowie der verbundene Aufwand hängt wesentlich von der Komplexität zu implementierender Produktfunktionen, den Interaktionsmöglichkeiten (rein visuell, haptisch) und der verwendeten Trackingsysteme und -methoden (Marker-basiert, Modell-basiert) ab [20].

## 4.4 Test durchführen

An den Aufbau der Validierungsumgebung schließt sich im vierten Prozessschritt die Testdurchführung an. Zu Beginn der Testdurchführung wird der Proband mit dem Aufbau der Validierungsumgebung, insb. mit dem Referenzprodukt und dem eingesetzten Koppelsystem zur Überblendung der virtuellen Elemente (z. B. AR-Brille) vertraut gemacht. Anschließend folgt die Bewertung der alternativen Merkmalsausprägungen in Bezug auf das definierte Validierungsziel. Um die Anzahl der zu bewertenden Alternativen und damit den Aufwand für die Probanden zu reduzieren, wird kein rein dekompositioneller Befragungsansatz wie etwa bei der klassischen Conjoint-Analyse gewählt, bei dem jede

mögliche Kombination alternativer Merkmalsausprägungen einzeln betrachtet werden müsste [22]. Stattdessen liegt der Testdurchführung ein *nicht-adaptiver, hybrider Befragungsansatz* zugrunde. Dabei erfolgt zunächst eine isolierte Bewertung der alternativen Ausprägungen jeweils eines Merkmals. Dazu wird das Referenzprodukt nacheinander jeweils in Bezug auf ein Merkmal variiert. Vermerkt wird pro Merkmal pro Proband jeweils die am meisten und die am wenigsten favorisierte Ausprägung. Um anschließend die relative Wichtigkeit der Merkmale untereinander zu bestimmen, sind die Probanden aufgefordert, jeweils das Merkmal zu benennen, dessen Variationsbedarf ausgehend vom Referenzprodukt sie als am höchsten bzw. am niedrigsten bewerten. Abgeschlossen wird die Testdurchführung durch eine Befragung des Probanden, um qualitatives Feedback zum Produkt sowie zur Testdurchführung zu erhalten.

## 4.5 Testergebnisse interpretieren

Im Anschluss erfolgt die Interpretation der Testergebnisse und die Ableitung von Entwicklungsentscheidungen, anhand derer sich das Zielsystem konkretisieren lässt (vgl. Abbildung 1). Auch hierfür wird ein Vorgehen in zwei Schritten gewählt, wobei zunächst die Merkmalsebene und anschließend die Ebene einzelner Merkmalsausprägungen betrachtet wird. Der Interpretationsbedarf der Testergebnisse auf der Merkmalsebene besteht hinsichtlich der Auswahl solcher Merkmale, deren Variationsbedarf ausgehend vom Referenzprodukt von den Probanden als positiv bewertet wurde. Merkmale dieser Art sind als Entwicklungsschwerpunkt zu betrachten, während für solche mit negativer Bewertung eine Übernahmevariation gerechtfertigt erscheint. Auf der Ebene der Merkmalsausprägungen ist durch den Vergleich der Bewertungsergebnisse der einzelnen Ausprägungen je eines Merkmals wiederum jeweils die favorisierte Ausprägung zu identifizieren. Die Interpretation der Testergebnisse lässt sich sowohl auf der Merkmalsebene wie auch auf der Ebene der Merkmalsausprägungen durch Kennzahlbildung aus den Befragungsergebnissen automatisieren. Eine vollständig automatisierte Ableitung von Entwicklungsentscheidungen ist jedoch nicht mehr möglich, sobald nicht eindeutige Antworten vorliegen (z. B. widersprüchliche Befragungsergebnisse), die zwingend vom Produktentwickler zu interpretieren sind (z. B. Weiterverfolgung mehrere Ausprägungsvarianten).

# 5 Exemplarische Anwendung

Die entwickelte methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen wurde in einer ersten Fallstudie am Beispiel der Entwicklung der neuen Generation einer Tischhaube evaluiert. Ausgangspunkt der Fallstudie war das gegebene Referenzprodukt (aktuelle Produktgeneration) sowie das

vorformulierte Produktprofil, das in Form von kundenerlebbaren Produkteigenschaften und ihrer jeweils gewünschten Ausprägung relativ zum Referenzprodukt modelliert war. Im Zuge der Festlegung des Validierungsziels wurden zunächst diejenigen Eigenschaftsziele identifiziert, die unter dem Gesichtspunkt der Soll-Veränderung zum Referenzprodukt, der Kundenrelevanz und der Wettbewerbsdifferenzierung relevante Entwicklungsschwerpunkte darstellten. Zu den relevanten Eigenschaftszielen zählte etwa die Verbesserung der Durchsichtwirkung. Demnach sollte die zu entwickelnde Produktgeneration weniger stark als visuelle Barriere wirken, um das Produkt für Besitzer von Wohnküchen attraktiver zu machen. Im Zuge der Konkretisierung des Eigenschaftsziels wurde das Gehäuse des Referenzprodukts als relevantes technisches Teilsystem und dessen Bauform als Merkmal mit starkem Bezug zum Eigenschaftsziel identifiziert. Für die Bauform wurden mithilfe der TRIZ-Kreativitätsmethode zwei alternative Ausprägungen (Galgen-Form, T-Form) generiert (vgl. Abbildung 5).

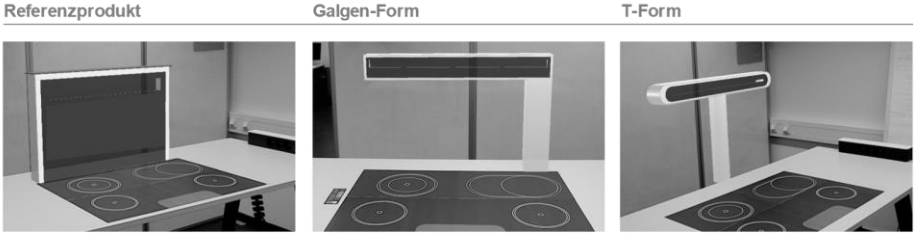



Abbildung 5: Teilvirtuelle Prototypen mit alternativen Ausprägungen des Merkmals Bauform

Auf Basis des definierten Validierungsziels wurde anschließend ein Anforderungsprofil an eine geeignete Validierungsumgebung erstellt und durch den Abgleich mit den verfügbaren Referenzprofilen eine geeignete Validierungskonfiguration abgeleitet (vgl. Abbildung 6). Die Validierungskonfiguration sah aufgrund des rein visuellen Interaktionskanals zwischen dem Gehäuse der Tischhaube und dem Probanden eine rein virtuelle Repräsentation dieses Validierungsobjekts vor. Andere Objekte, deren Bewertung einen haptischen Interaktionskanal erforderten, wurden hingegen in Form physischer Modelle realisiert (z. B. Bedienfeld). Als Koppelsystem zwischen virtuellen und physischen Objekten kam eine AR-Brille (Microsoft® HoloLens™) zum Einsatz. Im Rahmen der Testdurchführung waren die Probanden zur Bewertung der Merkmale und alternativen Merkmalsausprägungen aufgefordert. Auf Basis der Testergebnisse konnte die Bauform als relevantes, zu variierendes Merkmal bestätigt werden. Darüber hinaus ließen die Testergebnisse einen Rückschluss auf die Galgen-

Form als favorisierte Merkmalsausprägung zu. Das Eigenschaftsziel der Verbesserung der Durchsichtwirkung ließ sich daraufhin durch definierte Anforderungen an die Gehäuseform konkretisieren.

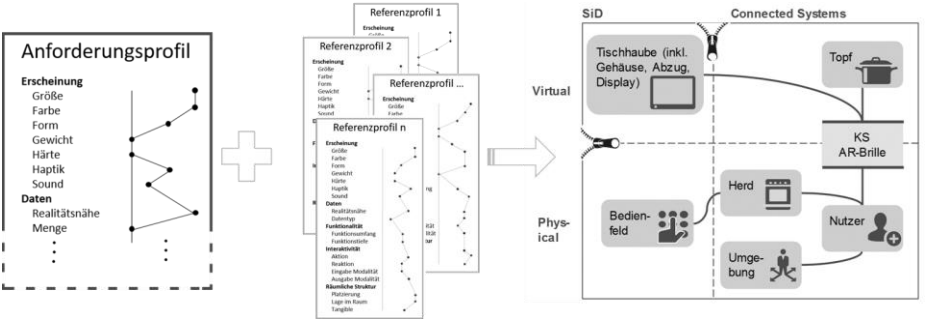



Abbildung 6: Aufbau der AR-basierten Validierungskonfiguration

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine methodische Unterstützung zur Produktvalidierung in AR-Umgebungen in der Frühen Phase der PGE beschrieben. Im Sinne eines durchgängigen Ansatzes wird der gesamte Validierungsprozess von der Festlegung der Validierungsziele bis zur Ableitung von Entwicklungsentscheidungen adressiert. Die methodische Unterstützung wurde in einer ersten Fallstudie am Beispiel der Entwicklung der neuen Generation einer Dunstabzugshaube evaluiert und dabei die grundsätzliche Eignung der methodischen Unterstützung für die praktische Anwendung bestätigt. Im Sinne des ASD konnte die Integration des PGE-Gedankens in die Aktivitäten der frühen und kontinuierlichen Validierung methodisch operationalisiert werden. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen sind weiterführende Forschungen anzustellen. Diese betreffen zum einen die Weiterentwicklung und Detaillierung der entwickelten methodischen Unterstützung und zum anderen die systematische Untersuchung der Potenziale, die sich durch den Einsatz der AR-Technik im Rahmen früher Validierungsaktivitäten im Hinblick auf die Zielerreichung in der Produktentwicklung erzielen lassen. Einen Ansatzpunkt für die Weiterentwicklung der methodischen Unterstützung stellt eine Toolunterstützung für die verschiedenen Prozessschritte dar, um auf diese Weise Automatisierungspotenziale zu nutzen. Weiterhin ist eine inhaltliche Detaillierung der methodischen Unterstützung etwa hinsichtlich der fallspezifischen Anpassung der Dimensionen von Anforderungs- und Referenzprofil sinnvoll. Zukünftig ist außerdem eine Ausweitung der methodischen Unterstützung über AR hinaus auf alternative Technologien zur prototypischen Umsetzung von Produktmodellen in frühen Validierungsaktivitäten anzustreben.

## Literatur


[1] Ponn, J., Lindemann, U.: „Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte", Springer, Berlin, 2008.

[2] Stolper, M.: „Market Driving-Konzept", Springer, Berlin, 2007.

[3] Ropohl, G.: „Systemtechnik", Hanser, München, 1975.

[4] Albers, A. et al.: „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess". In: Lindemann, U. (Hrsg.): „Handbuch Produktentwicklung", Hanser, München, 2016.

[5] Albers, A. et al.: „Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive". In: Binz, H. et al. (Hrsg.): „Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2015", 2015.

[6] Albers, A. et al.: „Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung". In: Binz, H. et al. (Hrsg.): „Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017", 2017.

[7] Albers, A. et al.: „Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations". In: Lauwers, B., Kruth, J.-P. (Hrsg.): „Procedia CIRP 70", 2018, 253–258.

[8] Kano, N. et. al.: „Attractive Quality and Must-be Quality". In: Journal of the Japanese Society for Quality Control, 14, 1984, 147-156.

[9] Albers, A. et al.: „Supporting Potential Innovation in the Early Phase of PGE – Product Generation Engineering: Structuring the Development of the Initial System of Objectives". In: Enkel, E. (Hrsg.): „R&D Management Conference 2018", 2018 (im Druck).

[10] Eigner, M., Roubanov, D., Zafirov, R.: „Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung", Springer, Berlin, 2014.

[11] Paulweber, M. et al.: „Mess- und Prüfstandstechnik", Springer, Wiesbaden, 2014.

[12] Schmidt, T. et al.: „Agile development and the constraints of physicality: A network theory-based cause-and-effect analysis". In: Maier, A. et al. (Hrsg.): „Proceedings of ICED17", 2017.

[13] Albers, A. et al.: „20 years of co-creation using case based learning: An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering". In: Auer, M. E. et al. (Hrsg.): „Proceedings of the 20th ICL Conference", 2017.

[14] Albers, A. et al.: „System of Systems Approach for the Description and Characterization of Validation Environments". In: Marjanović, D. et al. (Hrsg.): „Proceedings of the DESIGN 2018", 2018, 2799–2810.

[15] Milgram, P. et al.: „Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum". In: Hari, D. (Hrsg.): „Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies", 1994.

[16] Burdea, G., Coiffet, P.: „Virtual reality technology", Wiley, 2003.

[17] Katicic J.: „Methodik für Erfassung und Bewertung von emotionalem Kundenfeedback für variantenreiche virtuelle Produkte in immersiver Umgebung", Diss. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2012.

[18] Van Krevelen, D. W. F., Poelman, R.: „A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations", Delft University of Technology, 2010.

[19] Damgrave, R.: „Augmented Reality". In: Laperrière, L., Reinhart, G. (Hrsg.): „CIRP Encyclopedia of Production Engineering", Springer, Berlin, 2014, 66-67.

[20] Schilling, T.: „Augmented Reality in der Produktentstehung", Diss. TU Ilmenau, Ilmenau, 2008.

[21] Kohler, K., et al.: „Durch schnelles Scheitern zum Erfolg: Eine Frage des passenden Prototypen?" In: German UPA e.V. (Hrsg.): „Usability Professionals 2013", 2013, 78–84.

[22] Steiner, M.: „Nachfrageorientierte Präferenzmessung: Bestimmung zielgruppenspezifischer Eigenschaftssets auf Basis von Kundenbedürfnissen", Diss. Universität Jena, Jena, 2007.

# Einsatz eines Similaritätskriteriums bei der multikriteriellen Optimierung zur Variantenbildung

Andreas Wilhelm Meyer[1], Sándor Vajna[1]

[1] *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*

## Abstract

To implement frontloading as a tool of lean development the use of computer aided structural optimization during the early phases of product development is promising. To meet the requirements of creating multiple solutions to a given problem with little starting information an approach has been developed using stochastic topology optimization. Because of the need to evaluate the diversity of the created structures, a similarity criterion is introduced. The results of a multi-objective optimization using this criterion are topics of this paper.

*Keywords: Structural optimization, topology optimization, stochastic algorithm, similarity*

## 1 Motivation

Mit Hilfe des Frontloadings, des frühen Erkenntnisgewinns durch die Vorverlagerung von Aktivitäten und Ressourcen in die Produktentwicklung, wird angestrebt, hohe Änderungskosten in den späten Phasen des Produktlebenszyklus zu vermeiden. Als Teil des Lean Developments nimmt es eine zentrale Rolle ein [1]. Eine Möglichkeit zur Umsetzung von Frontloading ist die Verwendung von computerunterstützter Optimierung. Insbesondere bei mechanischen

Problemen kann die computerunterstützte Strukturoptimierung zur Lösungsfindung beitragen. Allerdings sind die Anforderungen an eine solche Optimierung in den frühen Phasen andere als bei Produkten, die schon die Detailierungsphase durchlaufen haben. Vor allem ist die Informationsmenge zu einem Produkt zu diesem frühen Zeitpunkt noch relativ gering, was zum einen zur Folge hat, dass die Strukturoptimierung mit Modellen geringen Detaillierungsgrades durchführbar sein muss. Zum anderen ist es notwendig, dem Produktentwickler mehrere Vorschläge zur Produktgestalt bereitzustellen. Dies ist vor allem essentiell, wenn ein grundlegendes Gestaltungsprinzip des Frontloadings, das Set-Based Engineering, zur Anwendung kommt. Das Set-Based Engineering basiert auf dem zentralen Ansatz, dass für jede Komponente eine Menge an Lösungen oder Varianten erzeugt wird, die dann im Laufe des Entwicklungsprozesses bewertet, detailliert und selektiert werden, bis sich die Gesamtlösung als Kombination der Komponenten ergibt [2].

Ein weiterer Ansatz, der die Weiterentwicklung von parallel existierenden Varianten einer Entwicklungsaufgabe postuliert, ist die Autogenetische Konstruktionstheorie (AKT), nach Bercsey und Vajna [3]. Die AKT verwendet *Vorgehensweisen* und *Operatoren* der biologischen Evolution zur Entwicklung und Anpassung von Produkten, während in der Bionik *Ergebnisse* der Evolution als Vorbilder für technische Lösungen verwendet werden. Da die biologische Evolution nicht direkt auf Individuen, sondern auf Generationen von Populationen wirkt, ist das Ergebnis dieses Prozesses immer eine Menge von einzigartigen Individuen, die von gleichem Wert sind, aber sich in ihrer Gestalt und in ihren Eigenschaften unterscheiden. Analog dazu ist das Ergebnis der AKT im Idealfall eine Menge von gleichwertigen, aber nicht gleichartiger Lösungen, die alle den Stand der Anforderungen und Bedingungen erfüllen.

Um in den frühen Phasen der Produktentwicklung diese Vielfallt an Lösungen mittels computerunterstützter Strukturoptimierung zu erhalten, wurde ein Verfahren entwickelt, welches mit Hilfe der stochastischen Topologieoptimierung mehrere unterschiedliche Strukturen für ein gegebenes mechanisches Problem automatisiert erzeugt [4]. Allerdings hat es sich bei diesen Untersuchungen gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Ähnlichkeit zwischen den unterschiedlichen Strukturen bemessen zu können, um eine automatisierte Bewertung zu ermöglichen und die Erzeugung von Populationen mit einer hohen Diversität in der Ausprägung der Gestalt zu forcieren. In diesem Beitrag wird ein möglicher Wert zur Bemessung der Ähnlichkeit von Strukturen eingeführt und dessen Ermittlung und Anwendung innerhalb der zuvor erwähnten stochastischen Topologieoptimierung erläutert.

## 2 Stochastische Topologieoptimierung

Anforderungen an ein strukturelles Optimierungsverfahren für die frühen Phasen der Produktentwicklung sind das Erzeugen einer Vielzahl von Varianten und das Erzielen von Ergebnissen mit möglichst wenig Informationen. Diese werden von der stochastischen Topologieoptimierung erfüllt.

Zum einen werden für die Generierung einer Vielzahl von Varianten stochastische Algorithmen gewählt, da diese, anders als deterministische Verfahren, in der Lage sind, bei gleichen Eingangsgrößen eine Menge an verschiedenen Lösungen zu erzeugen. Durch die Verwendung von gewissen Zufallsprinzipien gelingt es stochastischen Algorithmen zusätzlich, lokale Optima zu überwinden und mit einer hohen Wahrscheinlichkeit das globale Optimum zu finden. Zudem werden stochastische Optimierungsverfahren oft den deterministischen Verfahren vorgezogen, wenn multikriterielle Optimierungen durchgeführt werden sollen oder die Designvariablen diskreter Natur sind.

Zum anderen wird die Anforderung an ein Verfahren, welches mit geringen Informationen arbeiten kann, am besten durch die Topologieoptimierung erfüllt. Dies wird deutlich, wenn die in der Literatur beschriebenen drei Methoden der Strukturoptimierung (Bild 1) untersucht werden:

- Topologieoptimierung: Beschreibt die Suche nach der optimalen Verteilung von Materie innerhalb eines gegebenen Bauraums gemäß einem definierten Ziel.

- Formoptimierung: Beschreibt die Suche nach der optimalen Form, wobei der Rand der Struktur die Designvariable darstellt. Die grundlegende Topologie bleibt davon unberührt, d.h. die Anzahl der Strukturelemente, wie Hohlräume und Streben, verändert sich nicht [5].

- Dimensionierung: Beschreibt die Optimierung des Querschnittes bzw. der Wanddicke einer Struktur [6]. Die Topologie bzw. die generelle äußere Form werden dadurch nicht beeinflusst.

Dadurch, dass für Formoptimierung und Dimensionierung die Informationen der Topologie der Struktur bereits vorhanden sein muss, ist die Topologieoptimierung die Methode, die mit der geringsten Informationsmenge arbeitet. Hierbei sei angemerkt, dass in dem Zusammenhang dieses Beitrags der Begriff Topologieoptimierung als Synonym für die kontinuierliche Topologieoptimierung verwendet wird. Die Topologieoptimierung mittels Stabwerken wird hier nicht betrachtet.

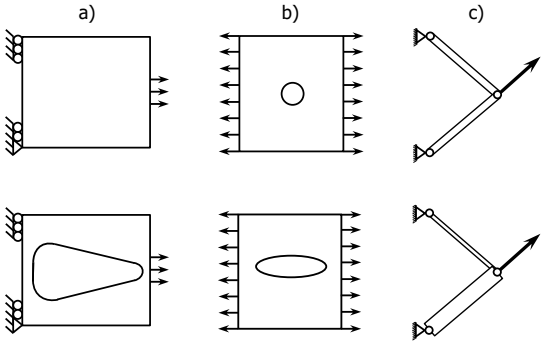



Bild 1: a) Topologieoptimierung, b) Formoptimierung und c) Dimensionierung (nach [7])

## 2.1 Stand der Forschung

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von wissenschaftlichen Beiträgen, die die Erforschung der stochastischen kontinuierliche Topologieoptimierung thematisieren [8]. Ein Großteil verwendet dabei den mikrostrukturellen Ansatz, d.h. der zu optimierende Bauraum wird in finite Elemente unterteilt und die Designvariable der Optimierung ist der Zustand der einzelnen Elemente. Der Zustand eines Elements kann dabei den Wert 1 annehmen, d.h. dass dieses Element vollständig mit Material gefüllt ist, oder er kann 0 betragen, was einen leeren Raum repräsentiert. Diese binäre Darstellungsweise hat den Vorteil, dass Werte zwischen 0 und 1, die technisch schwer interpretierbar sind, vermieden werden [9].

Aufbauend auf diesen Modelleigenschaften wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, die unterschiedliche stochastische Algorithmen einsetzen. Ein Großteil davon verwenden genetische Algorithmen [10, 11], aber auch simulierte Abkühlung [12] oder Partikelschwarmoptimierung [13] werden implementiert.

Diese Untersuchungen haben aber auch den großen Nachteil des mikrostrukturellen Ansatzes aufgezeigt. Dadurch, dass der Status jedes Elements als Design-Variable fungiert, erhöht sich die Anzahl der Design-Variablen mit der Zahl der verwendeten Elemente und damit auch der Rechenaufwand zur Lösung des Optimierungsproblems. Dies führt dazu, dass der mikrostrukturelle Ansatz vor allem für kleine Modelle mit relativ geringer Elementzahl anwendbar ist.

## 2.2 Verwendete Methode

Um die Nachteile des mikrostrukturellen Ansatzes zu umgehen, wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine Kombination aus mikro- und makrostrukturellen Methoden verwendet [4]. Das Optimierungsverfahren umfasst zwei Optimierungsschleifen pro Iteration (Bild 2). In der äußeren Schleife werden in einen Bauraum eines FE-Modells Makrostrukturen injiziert. Als Makrostrukturen werden in diesem Fall Löcher oder auch Non-Design-Bereiche, also Bereiche, die nicht als Design-Variable deklariert werden, eingesetzt.

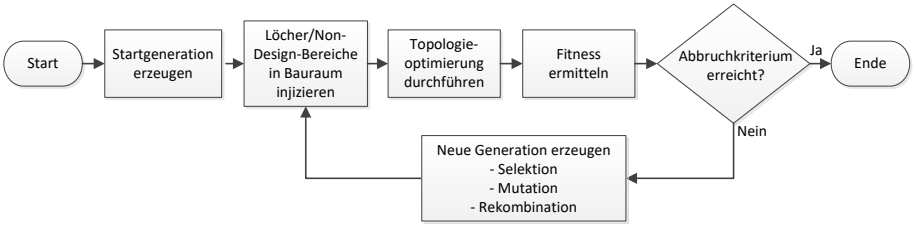



Bild 2: Ablaufdiagramm des Optimierungsverfahrens

Die Größe und Position dieser Makrostrukturen werden über Parameter gesteuert, deren Ausprägungen von einem genetischen Algorithmus, als Vertreter der stochastischen Verfahren, bereitgestellt und manipuliert werden. Dabei ist die Anzahl an Parametern im Vergleich zu mikrostrukturellen Ansätzen deutlich geringer, was den Rechenaufwand wesentlich minimiert und das Optimieren von großen Modellen ermöglicht. Die Manipulation dieser Parameter bei der Erzeugung einer neuen Generation erfolgt in der äußeren Schleife mittels der evolutionären Operatoren Selektion, Mutation und Rekombination.

Die innere Schleife umfasst eine Topologieoptimierung, die auf den durch die Makrostrukturen manipulierten Bauraums eines jeden Individuums angewendet wird. Diese Topologieoptimierung setzt das äußerst populäre Verfahren der SIMP-Methode (Solid Isotropic Microstructure with Penalization) ein. Die SIMP-Methode verwendet eine kontinuierliche Beschreibung der künstlichen Elementdichte und lässt somit auch Werte zwischen 0 und 1 zu. Damit aber eine technische Interpretation ermöglicht wird, werden Zwischenwerte bestraft und somit Lösungen mit Elementen, die entweder vollständig mit Materie ausgefüllt sind oder keine Materie besitzen, erzwungen [14, 15]. Die Ergebnisse der inneren Schleife mit der Topologieoptimierung werden entsprechend ausgewertet und die jeweiligen Fitnesswerte der verschiedenen Individuen einer Generation werden ermittelt. Anhand dieser Fitnesswerte wird geprüft, ob das Abbruchkriterium erfüllt ist. Wird das Abbruchkriterium nicht erreicht, beginnt

der genetische Algorithmus mit Hilfe der bereits erwähnten evolutionären Operatoren die Erstellung einer neuen Generation. Andernfalls wird der iterative Optimierungsprozess beendet.

## 2.3 Implementierung der Methode

Für die Implementierung der Methode kommen zwei Softwaresysteme zum Einsatz, die die jeweiligen Funktionen der inneren und äußeren Schleife abbilden. Aufgrund der notwendigen Automatisierung der einzelnen Schritte des Optimierungsverfahrens werden diese Systeme mittels diverser Skripte unterschiedlicher Programmiersprachen miteinander verknüpft und gesteuert. Die Durchführung und Kontrolle der äußeren Optimierungsschleife wird das System NOA (Natürlicher Optimierungsalgorithmus) verwendet, eine Entwicklung des Lehrstuhls für Maschinenbauinformatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. NOA nutzt genetische Algorithmen, um Lösungen für eine Vielzahl an Anwendungen, z. B. im Bereich der AKT, bereitzustellen.

Die Makrostrukturen werden auf ein FE-Model angewendet, welches mit der Software HyperMesh der Firma Altair erstellt wird. Dieses Model fungiert als Template für jedes Individuum im Optimierungsprozess. Nach dem Injizieren der Makrostrukturen führt das System Hyperworks mit dem Solver OptiStruct die Topologieoptimierung aus. Die Automatisierung von HyperMesh erfolgt dabei mittels entsprechender Skripte in der Sprache Tcl (Tool command language). Skripte der Programmiersprache Python werten die Ergebnisdateien von HyperMesh aus, berechnen den Fitnesswert jedes Individuums und schreiben diese in entsprechende Text-Dateien, die das System NOA verwerten kann.

# 3 Einführung eines Similaritätskriteriums

Das übergeordnete Ziel dieses Verfahrens ist die Bereitstellung von Strukturen, die zwar gleichwertig aber unterschiedlich in der gestalterischen Ausprägung sein sollen. Da nicht nur von Interesse ist, dass die einzelnen Lösungen eine unterschiedliche Form besitzen, sondern wie sehr diese sich unterscheiden, wird eine Größe benötigt, die den Grad der Ähnlichkeit zwischen Individuen bemisst. Somit ist nicht nur eine qualitative, sondern auch eine quantitative Aussage möglich. Diese Größe soll im Folgenden als Similaritätskriterium $\zeta$ bezeichnet werden. Da das verwendete Grundmodell mikrostruktureller Natur ist, basiert der Ansatz zur Berechnung des Similaritätskriteriums, der in diesem Beitrag postuliert wird, auf den Eigenschaften der finiten Elemente der verschiedenen Individuen. Konkret wird die künstliche Dichte $\rho$, die bei der SIMP-Methode jedem Element zugewiesen wird, als maßgebende Größe verwendet. Dies geschieht, indem die Dichte jedes Elements des Modells des Ergebnisses

der reinen Topologieoptimierung, also eine Optimierung des nicht manipulierten Bauraums, mit der Dichte des korrespondierenden Elements der einzelnen Modelle der Individuen der Optimierung verglichen wird. Als korrespondierende Elemente werden in diesem Fall Elemente bezeichnet, deren Knoten identische Koordinaten besitzen bzw. Elemente, die kongruent sind.

Zur Herleitung des Similaritätskriterium $\zeta$ wird ein Diversitätskriterium $\varphi$ eingeführt , das wie folgt definiert wird:

$$\zeta = 1 - \varphi \tag{1}$$

Für die Berechnung von $\varphi$ werden die Beträge der Differenzen der künstlichen Elementdichten der Individuen $\rho_i$ mit der denen der korrespondierenden Elemente des Modells der reinen Topologieoptimierung $\rho_{oi}$ ermittelt. Um diese Werte zu normieren, werden diese mit der maximal möglichen Differenz der künstlichen Dichten $|\rho_o - \rho|_{max}$ dividiert. Für die Berechnung des Mittelwerts über alle Elemente ist die Division der Summe aller normierter Differenzen mit der Elementanzahl $n$ vonnöten:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{|\rho_{oi} - \rho_i|}{|\rho_o - \rho|_{max}}}{n} \tag{2}$$

Mit (1) ergibt sich für das Similaritätskriterium $\zeta$:

$$\zeta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{|\rho_{oi} - \rho_i|}{|\rho_o - \rho|_{max}}}{n} \tag{3}$$

Im speziellen Fall der SIMP-Methode mit Elementdichten von 0 bis 1 ergibt sich:

$$|\rho_o - \rho|_{max} = 1 \tag{4}$$

Damit lässt sich $\zeta$ mit der folgenden Gleichung berechnen:

$$\zeta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |\rho_{oi} - \rho_i|}{n} \tag{5}$$

Bei den nachfolgenden Untersuchungen wird das Similaritätskriterium verwendet, da das Ziel der Optimierung eine Minimierung der Zielgrößen darstellt.

## 4 Beispiele und Diskussion

Um zu prüfen, welchen Effekt das postulierte Similaritätskriterium auf die Vielfalt der Lösungen einer Optimierung mit dem präsentierten Ansatz hat, wird in der äußeren Schleife eine multikriterielle Optimierung aufgebaut. Als Ergebnis ist ein Lösungsraum zu erwarten, der pareto-optimale Lösungen enthält. Das sind die Lösungen, bei denen die Verbesserung einer Zielgröße nur durch eine Verschlechterung einer anderen Zielgröße erreicht werden kann. Die Menge dieser Lösungen wird als Pareto-Front bezeichnet. In dem vorliegendem Beispiel werden als Zielgrößen zum einen das Similaritätskriterium $\zeta$ und zum anderen die relative Nachgiebigkeit $\delta_r$ der Struktur verwendet. Die relative Nachgiebigkeit wird ermittelt, indem die Nachgiebigkeit der Struktur des Individuums in Relation zur Nachgiebigkeit der Struktur der reinen Topologieoptimierung gesetzt wird. Zur Umsetzung benötigt NOA einen Fitnesswert. Dieser wird durch die sog. Fitnessfunktion ermittelt. In diesem Fall errechnet sich der Fitnesswert als Summe der beiden Zielgrößen.

Die Topologieoptimierung der inneren Schleife besitzt als Zielgröße ausschließlich die Nachgiebigkeit. Eine Masse der optimierten Struktur von maximal 30% der Ausgangsmasse des Bauraums dient der inneren Schleife als Randbedingung.

Als mechanisches Modell dient ein zweidimensionaler Bauraum, der an zwei Punkten gelagert ist und auf den eine Kraft wirkt. Beispielhaft werden bei dieser Optimierung jeweils zwei kreisförmige Non-Design-Bereiche und Löcher in den Bauraum injiziert. Dies führt dazu, dass die Designvariablen des genetischen Algorithmus der äußeren Schleife 12 Parameter umfassen, jeweils zwei Lage- $(x_i, y_i)$ und einen Formparameter $(r_i)$. Bild 3 zeigt den generellen Aufbau des verwendeten Modells und die Injektionen von jeweils einem Loch und einem Non-Design-Bereich mit den entsprechenden Parametern.

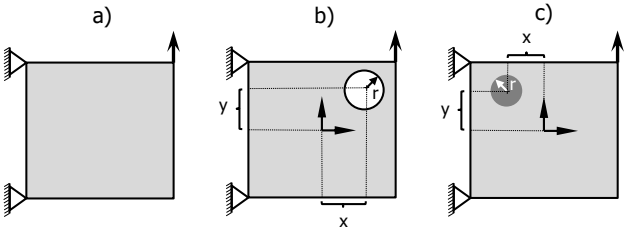



Bild 3: a) Aufbau des generellen Modells mit Bauraum, Lagerung und Last, b) Injektion eines Loches, c) Injektion eines Non-Design-Bereichs (vgl. [4])

Für die Optimierung mit dem genetischen Algorithmus wird eine Populationsgröße von 50 Individuen bei einer maximalen Anzahl von 200 Generationen definiert. Das Abbruchkriterium greift bei einer Änderung in der Fitness von kleiner als 0,5% nach vier Generationen.

## 4.1 Darstellung der Ergebnisse

Das Bild 4 zeigt den Zielfunktionsraum der beispielhaften Optimierung.

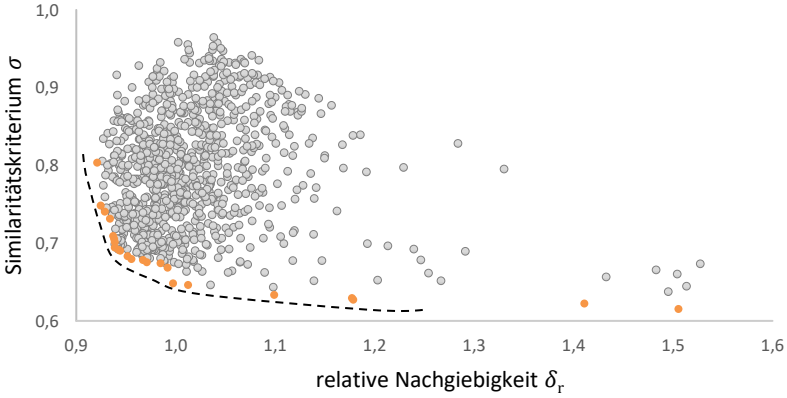



Bild 4: Lösungsraum mit pareto-optimalen Individuen und Pareto-Front

Dabei werden die erzeugten Individuen anhand ihrer Zielgrößen, relative Nachgiebigkeit und Similaritätskriterium, abgebildet. Außerdem sind die pareto-optimalen Lösungen farblich gekennzeichnet und ihnen angenähert ist ein möglicher Verlauf der Pareto-Front abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich die Werte des Similaritätskriteriums im Lösungsraum von 0,62 bis 0,95 erstrecken. Außerdem besitzt eine Vielzahl an Lösungen eine relative Nachgiebigkeit von unter 1. Diese Individuen besitzen eine höhere Steifigkeit als die Struktur der reinen Topologieoptimierung.

Dabei werden die erzeugten Individuen anhand ihrer Zielgrößen, relative Nachgiebigkeit und Similaritätskriterium, abgebildet. Außerdem sind die pareto-optimalen Lösungen farblich gekennzeichnet und ihnen angenähert ist ein möglicher Verlauf der Pareto-Front abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich die Werte des Similaritätskriteriums im Lösungsraum von 0,62 bis 0,95 erstrecken. Außerdem besitzt eine Vielzahl an Lösungen eine relative Nachgiebigkeit von unter 1. Diese Individuen besitzen eine höhere Steifigkeit als die Struktur der reinen Topologieoptimierung.

Eine Auswertung der Strukturen der pareto-optimalen Lösungen zeigt die Auswirkung des Similaritätskriteriums. Das Bild 5 zeigt drei Beispiele von Strukturen der von pareto-optimalen Lösungen im Vergleich mit der Struktur der reinen Topologieoptimierung. Dabei stellen die blauen Bereiche Elemente mit einer Dichte nahe 0 dar und die roten Bereiche Elemente mit einer Dichte von 1.

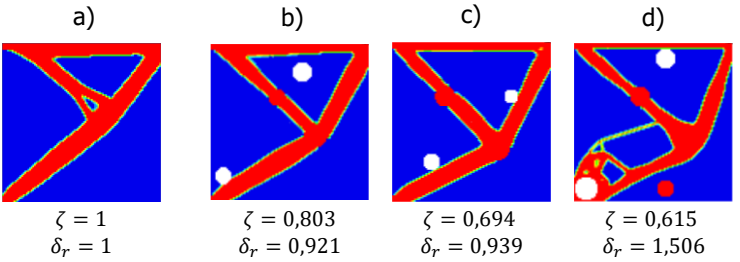



Bild 5: Struktur der a) reinen Topologieoptimierung, b) pareto-optimalen Lösung mit dem höchsten $\zeta$, c) pareto-optimalen Lösung mit dem niedrigsten Fitnesswert, d) pareto-optimalen Lösung mit dem niedrigsten $\zeta$

Es ist zu erkennen, dass die Lösung mit dem höchsten Wert des Similaritätskriteriums auch sehr ähnlich der Struktur der reinen Topologieoptimierung ist. Der Unterschied liegt vor allem in der Ausprägung der mittleren Verbindung der zwei Hauptstreben. Des Weiteren weist die Lösung mit dem niedrigsten Fitnesswert einen deutlich niedrigeren Wert von $\zeta$ auf, erscheint aber in der generellen Topologie keine großen Unterschiede zur Variante b) aufzuweisen, was sich auch in der Größe der Nachgiebigkeit widerspiegelt. Dagegen können bei der Lösung mit dem geringsten Wert für $\zeta$ Unterschiede in der Topologie ausgemach werden. Die Anzahl von Hohlräumen und Streben weichen von der reinen Topologieoptimierung deutlich ab.

## 4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das in diesem Beitrag postulierte Similaritätskriterium für die Bewertung der Ähnlichkeit von Strukturen verwendet werden kann und der Einsatz als Zielgröße einer multikriteriellen Optimierung mit dem Ziel der Maximierung der Variantenvielfallt möglich ist.

Allerdings besitzt diese Form eines Similaritätskriteriums auch Nachteile. Zum einen gelingt es mit dieser Methode nicht, topologische Eigenschaften, wie die Anzahl von Hohlräumen und Streben, abzubilden. Dadurch kann es vorkommen, dass Lösungen, die an sich stark unterschiedliche Topologien besitzen,

den gleichen Wert des Similaritätskriteriums aufweisen. Zum anderen ist die Berechnung anhand der Struktur der reinen Topologieoptimierung nicht ideal, da die Ähnlichkeit der Lösungen einer Generation untereinander nicht mit in Betracht gezogen werden. Somit wird die Diversität innerhalb einer Population nicht zwangsweise im Laufe der Optimierung erhöht.

## 5 Ausblick

Ziel der weiteren Forschungsarbeit ist es die Aussagekraft des Similaritätskriteriums zu erhöhen und die Nachteile der jetzigen Vorgehensweise zu beseitigen. Um dies zu erreichen, ist ersten Schritt die Ähnlichkeit anhand der Individuen innerhalb einer Population zu bestimmen. Im zweiten Schritt könnte die Aussagekraft des Kriteriums erhöht werden, indem die topologischen Eigenschaften der entstehenden Strukturen mit in die Berechnung einbezogen werden.

Darüber hinaus ist ein Ziel das vorgestellte Verfahren der stochastischen Topologieoptimierung mittels anderer stochastischer Algorithmen umzusetzen, um den Einfluss des Algorithmus auf die Diversität der erzielten Lösungen zu bestimmen. Auch die Erweiterung des Verfahrens auf realitätsnahe Anwendungen ist ein Ziel folgender Untersuchungen.

## 6 Literaturverzeichnis


[1] Dombrowski, U. Hrsg.: Lean Development. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015.

[2] Kennedy, M. N.: Product development for the lean enterprise. Why Toyota's system is four times more productive and how you can implement it. Oaklea Press, Richmond, Va., 2003.

[3] Vajna, S.; Bercesey, T.; Clement, S.; Jordan, A.; Mackowiak, P.: Autogenetische Konstruktionstheorie. Ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie. In Konstruktion Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, 2004; S. 71–77.

[4] Meyer, A. W.; Vajna, S.: Support of Searching for Solutions by Automated Structural Optimization. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK, 2018; S. 369–380.

[5] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.

[6] Céa, J.; Garreau, S.; Guillaume, P.; Masmoudi, M.: The shape and topological optimizations connection. In Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 188; S. 713–726.

[7] Duysinx, P.: Optimisation Topologique: Du Milieu continu a la Structure Elastique. Dissertation, Lüttig, 1996.

[8] Bulman, S.; Sienz, J.; Hinton, E.: Comparisons between algorithms for structural topology optimization using a series of benchmark studies. In Computers & Structures, 2001, 79; S. 1203–1218.

[9] Jakiela, M. J.; Chapman, C.; Duda, J.; Adewuya, A.; Saitou, K.: Continuum structural topology design with genetic algorithms. In Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 186; S. 339–356.

[10] Jensen, E. D.: Topological structural design using genetic algorithms. U.M.I., Ann Arbor, MI, 1992.

[11] Chapman, C.: Structural Topology Optimization Via the Genetic Algorithm. Doktorarbeit, Massachusetts, 1994.

[12] Bureerat, S.; Limtragool, J.: Structural topology optimisation using simulated annealing with multiresolution design variables. In Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44; S. 738–747.

[13] Luh, G.-C.; Lin, C.-Y.; Lin, Y.-S.: A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization. In Applied Soft Computing, 2011, 11; S. 2833–2844.

[14] Bendsøe, M. P.: Optimal shape design as a material distribution problem. In Structural Optimization, 1989, 1; S. 193–202.

[15] Rozvany, G. I. N.; Zhou, M.; Birker, T.: Generalized shape optimization without homogenization. In Structural Optimization, 1992, 4; S. 250–252.

# Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen additiv gefertigter Produkte

Iris Gräßler[1], Christian Oleff[1], Philipp Scholle[1]

*[1] Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung*

## Abstract

In this paper, a novel approach towards risk classification of requirements of additively manufactured (AM) products is presented. The classification of an individual requirement is based on two aspects: a) influence factors implying dynamics of its specification and b) network indices quantifying the degree of cross-linkage with other requirements. Both aspects can indicate requirement changes. Influences on a requirement are assessed by a priority index based on criteria 'uncertainty', 'dynamics' and 'relevance for product development'. Effects from other requirements are captured by network theoretical indices such as active and passive sum. In the end, requirements are classified according to their criticality. By this approach, requirements can be identified which might strongly affect the product development process of AM products.

*Keywords: Requirements Engineering, FMEA; Engineering Change Management, Network Theory*

## 1 Motivation

Der Erfolg von Produktentwicklungsprojekten wird durch den Umgang mit veränderlichen Anforderungen mitbestimmt [1]. Aufgrund von Anforderungsänderungen ergeben sich für bis zu 24% der (Software-) Entwicklungsprojekte Verzögerungen [2]. Die Anforderungen sind hierbei untereinander abhängig und beeinflussen sich gegenseitig [3]. Die Veränderlichkeit der Anforderungen ist weitestgehend auf die Dynamik der zugrundeliegenden Kundenwünsche und weiterer Restriktionen sowie der Unschärfe bei der Erfassung zurückzuführen [4]. Ein Beispiel mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit vieler Anforderungsänderungen sind additiv gefertigte Produkte: Weiterentwicklungen von Fertigungsverfahren und neue Fähigkeiten z. B. im Bereich der Prozesssimulation implizieren Änderungen von Restriktionen und damit Potenzial für die Produktgestaltung, aber auch das Risiko von Verzögerungen.

## 2 Forschungsproblem und Forschungsziel

Zur Identifikation der veränderlichen Anforderungen im Entwicklungsprozess additiver Produkte ist eine Methode erforderlich, mit Hilfe derer die Risiken von Änderungen der Anforderungen erfasst und darauf aufbauend die Anforderungen klassifiziert werden können. Dafür werden die Abhängigkeiten der Anforderungen untereinander und deren unmittelbare Einflussfaktoren (z.B. Kundenwünsche oder die Technologieentwicklung additiver Fertigungsverfahren) als mögliche Ausgangspunkte der Anforderungsänderungen betrachtet. Das Forschungsziel liegt in der Beantwortung folgender Forschungsfragen:

1. Wie können Risiken von Änderungen der Anforderungen bewertet und kritische Anforderungen identifiziert werden?
2. Wie können die möglichen Ursachen der Anforderungsänderungen in die Bewertung des Risikos integriert werden?

## 3 Vorgehensweise

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird aufgrund des Domänenbezugs die Design Research Methodology [5] gewählt. Aufbauend auf einer Literaturstudie (Research Clarification) werden im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes „OptiAMix" Anforderungen an die Methode anhand von a) Interviews mit den Industriepartnern verschiedener Unternehmenstypen und Branchen und b) einer Literaturstudie erhoben. Diese Anforderungen werden in Form von Kriterien für „support"-, „application"- und „success"-Kriterien interpretiert. Aufbauend auf dieser Descriptive Study I (Abschnitt 4) wird in der Prescriptive

Study auf Basis verschiedener Fallstudien eine Methode entwickelt (siehe Abschnitt 5), um ausgehend von einer Bewertung der Einflussbereiche und einer Analyse generischer Abhängigkeiten eine Einschätzung des Risikos von Anforderungsänderungen und der Identifikation kritischer Anforderungen zu ermöglichen. Die Methode wird durch Workshops mit den Industriepartnern des Projektes „OptiAMix" und einer Fallstudie – ein additiv gefertigter Radträger eines Rennwagens der Formula Student – evaluiert (Descriptive Study II, siehe Abschnitt 6).

## 4 Stand der Technik

Im Rahmen der Descriptive Study I wurde eine Literaturstudie zum Anforderungsmanagement und zur Vernetzung von Anforderungen durchgeführt. Die zentrale Rolle der Anforderungen in der Produktentwicklung als möglicher Auslöser von Iterationen wird durch Wynn et al. [6] festgestellt. Der Umgang mit Anforderungen, also ihre Erhebung, Festlegung, Dokumentation und Nachverfolgung sowie Änderung und Validierung wird unter dem Aspekt des Requirements Engineering zusammengefasst [2]. Insbesondere in der Softwaretechnik existieren verschiedene Modelle für die Abhängigkeiten zwischen Anforderungen (siehe [2, 7]). Dahlstedt [7] unterscheidet aufbauend auf dem Modell nach Pohl [2] in ihrem Referenzmodell verschiedene Typen von Anforderungs-Abhängigkeiten, welche entweder strukturell oder in Bezug auf die Zielerreichung untergliedert werden können. Bei einer Gliederung in Bezug auf die Zielerreichung werden zusätzlich Restriktionen und Kosten/Nutzen unterschieden.

Gräßler et al. haben einen Ansatz aus maschinenbaulicher Perspektive vorgestellt, welcher die Abhängigkeiten der Anforderungen als Ausgangspunkt einer Auswirkungsanalyse von Anforderungsänderungen im Sinne von Szenarien ermöglicht [8, 9]. Dieser Ansatz wurde um eine teilautomatisierte Erfassung von Anforderungsabhängigkeiten auf Basis einer Wissensbasis erweitert [10]. Hierbei werden die Hauptmerkmale nach Pahl/Beitz als Basis generischer Abhängigkeiten verwendet. Ergebnis ist ein Anforderungsnetzwerk, welches die Wechselwirkungen der Anforderungen abbildet. Die Knoten in diesem Netzwerk repräsentieren die Anforderungen. Die Wechselwirkungen werden durch Kanten repräsentiert [11]. In der Literatur existieren weitere Ansätze, welche der Analyse der Vernetzung von Anforderungen dienen, um daraus auf deren Bedeutung zu schließen. Hierbei sind die Auswirkungen der Anforderungsänderungen im Fokus [12, 13]. Die Bewertung gründet sich dabei ausschließlich auf netzwerktheoretischen Kennwerten wie beispielsweise der Aktivität, Passivität, Kritikalität oder Impulsivität der Knoten. Ursachen von Anforderungsänderungen werden in solchen Modellen nicht abgebildet.

Die Anforderungen an eine Methode zur Strukturierung von Anforderungen wurde durch Scholle et al. hergeleitet [14]: Zentrale Aspekte sind dabei die Abbildung von Wechselwirkungen, der Dynamik, der Unsicherheit und der Beeinflussbarkeit der Anforderungen; bisherige Klassifizierungsansätze erfüllen diese Anforderungen nur unzureichend.

## 5 Methode zur Anforderungsklassifizierung

In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer Methode dokumentiert, mit der die Ursachen der Anforderungsänderungen in die Bewertung der Kritikalität nachvollziehbar integriert werden können. Die Anforderungen an die Methode beruhen dabei auf zwei Perspektiven: Die Betrachtung von Anforderungen aus der theoretischen Perspektive wird in Abschnitt 5.1 erläutert, die Anforderungen aus der praktischen Perspektive folgen in Abschnitt 5.2. Die zweite Perspektive zielt auf die praktische Gebrauchstauglichkeit der Methode ab und wird aus Interviews und Workshops mit potenziellen Anwendern aus der Industrie abgeleitet. Teilnehmer waren Projektmanager und Entwickler aus der Automobilindustrie sowie dem Maschinen- und Anlagenbau. Die Methodenentwicklung ist in Abschnitt 5.3 dokumentiert.

### 5.1 Anforderungen aus der theoretischen Perspektive

Basierend auf einer Literaturstudie wurden theoretische Anforderungen an die risikoorientierte Klassifizierung von Anforderungen ermittelt. Diese Betrachtung basiert vor allem auf der Literaturstudie von Scholle et al. (2015). Bisherige Betrachtungen fokussieren sich ausschließlich auf die Auswirkungen einer Anforderungsänderung. Für eine Risikobeurteilung sollte aber auch der Ursprung dieser Änderung betrachtet werden. Da die hier vorgestellte Methode einen ganzheitlichen Anspruch an die Risikoklassifizierung stellt, sind sowohl die Auswirkungen im Anforderungsnetzwerk (Aktiv- und Passivsumme, siehe [13]) als auch die Quellen von Anforderungsänderungen einzubeziehen [14].

### 5.2 Anforderungen aus der praktischen Perspektive

Die zweite Perspektive zielt auf die Einbindung von Erfordernissen einer praktischen Anwendung ab. Dafür wurden im Rahmen des BMBF geförderten Projekts „OptiAMix" potenzielle Anwender befragt und Evaluationskriterien aus einer praxisorientierten Sichtweise erhoben. Dazu wurden Interviews mit Industriepartnern durchgeführt, die einen Bezug zur additiven Fertigung haben und unterschiedliche Industriezweige repräsentieren. Die Ergebnisse wurden geclustert und folgende Kernkriterien abgeleitet:

- Minimaler Anwendungsaufwand, Nutzerfreundlichkeit
- Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse
- Einbindung in einen bestehenden Anforderungsmanagement-Prozess und Umsetzung in einer entsprechenden Software
- Erfahrungswissen nutzbar machen, Lerneffekte fördern

## 5.3 Entwicklung der Methode

Die Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen ist in drei Schritte gegliedert (siehe Abbildung 1): Die Betrachtung der Vernetzung der Anforderungen, die Priorisierung der Anforderungen und als Synthese aus beiden Schritten die Risikoklassifizierung der Anforderungen.

Abbildung 1: Methode zur Bewertung von Anforderungsänderungen additiv gefertigter Produkte

Ausgangspunkt der Methode sind die erfassten und dokumentierten Produktanforderungen in Form einer Anforderungsliste. Die Vernetzung der Anforderungen mittels Regelbasis ist bereits in [10] beschrieben. Ausgangspunkt der teilautomatischen Vernetzung sind generische Vernetzungen, die z.B. aus physikalischen Zusammenhängen hergeleitet wurden. Diese wurden auf Grundlage der Hauptmerkmalliste nach Pahl/Beitz ausgearbeitet (siehe [4]).

Für die Priorisierung der Anforderungen werden in einem ersten Schritt diejenigen Einflüsse auf die Produktentwicklung identifiziert, aus denen neue Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt und Veränderungen von bestehenden Anforderungen resultieren können. Die Identifikation solcher Einflüsse erfolgt in Bezug auf die Methode anwendungsspezifisch, da sich die Resultate aufgrund der Branche, dem Produkt und Unternehmenscharakteristika unterscheiden. Die Einflüsse werden anschließend zu Einflussbereichen zusammengeführt, um den Aufwand der darauffolgenden Priorisierung zu reduzieren. Der Detaillierungsgrad kann abhängig von den individuellen Erfordernissen der Anwender festgelegt werden. Zur Priorisierung der Einflussbereiche werden die

drei Kriterien Unsicherheit (U), Dynamik (D) und Relevanz (R) bewertet. Um die intuitive Anwendung der Methode sicherzustellen und eine hohe Nutzerfreundlichkeit sowie ein – aus Sicht des Anwenders – ausgewogenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis zu erreichen, ist die Priorisierung der Einflussbereiche an die in der Industrie etablierte und in vielen Normen empfohlene Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) angelehnt [15]. Die für die FMEA gebräuchlichen Bewertungskriterien werden durch die bereits einführten Aspekte Unsicherheit, Dynamik und Relevanz substituiert und anschließend analog zur FMEA durch Multiplikation die Prioritätszahl ermittelt. Dies ist in Formel 1 dargestellt.

Formel 1: Berechnung der Prioritätszahl eines Einflussbereiches

$$Prioritätszahl(PZ) = Unsicherheit(U) * Dynamik(D) * Relevanz(R)$$

Die Bewertung basiert auf Erfahrungswerten der Anwender und ist individuell vorzunehmen. Um die Subjektivität auf ein Mindestmaß zu reduzieren und die Bewertung nachvollziehbarer zu gestalten, werden dem Anwender einige Leitfragen zur Orientierung angeboten.

- Die Beurteilung der Unsicherheit stützt sich unter anderem auf die Vollständigkeit der Anforderungen aus diesem Einflussbereich (z.B. implizite vs. explizite Anforderungen) und der Vorhersagbarkeit der Einflüsse (z.B. Neukunde vs. Bestandskunde).
- Die Dynamik des Einflussbereichs resultiert aus Einschätzungen zur Häufigkeit von Anforderungsänderungen (z.B. regelmäßig vs. nie), der Intensität von Anforderungsänderungen (z.B. gravierend vs. vernachlässigbar) und einigen weiteren Fragestellungen.
- Das letzte Kriterium ist die Relevanz. Hilfestellung für den Anwender sind beispielsweise Fragen zur Realisierbarkeit der Anforderungen (z.B. aufwändig vs. simpel), der Beeinflussbarkeit von potentiellen Anforderungsänderungen (z.B. Forderung vs. Wunsch) und der Bedeutung für den Projekterfolg (z.B. erheblich vs. gering).

Die Zuordnung der Leitfragen zu Kriterien ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Die drei Kriterien werden anwenderspezifisch für jeden Einflussbereich von Anforderungen auf einer Skala (1 bis 10) bewertet.

Tabelle 1: Kriterien zur Bewertung der Einflussbereiche

| Unsicherheit | Dynamik | Relevanz |
|---|---|---|
| Vorhersagbarkeit | Häufigkeit | Kritikalität |
| Messbarkeit | Erkenntnis | Realisierbarkeit |
| Vollständigkeit | Zeitpunkt | Beeinflussbarkeit |
| Individualisierung | Intensität | Handhabbarkeit |

In einem abschließenden Schritt werden die drei Kriterien mit der Aktiv- und Passivsumme der Anforderungen (aus dem Schritt „Vernetzung") kombiniert. Die Klassifizierung anhand der Vernetzung erfolgt dabei in Anlehnung an das Systemgrid nach Reibnitz (siehe [16]). Hierzu werden die Aktiv- und Passivsumme einer Anforderung in Relation zum Durchschnitt betrachtet. Die Grenzen der Risikokategorien sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Klassifizierung der Anforderung ergibt sich durch Kombination der Klassengrenzen für die Vernetzung mit der Prioritätszahl und ist in Abbildung 2 dargestellt.

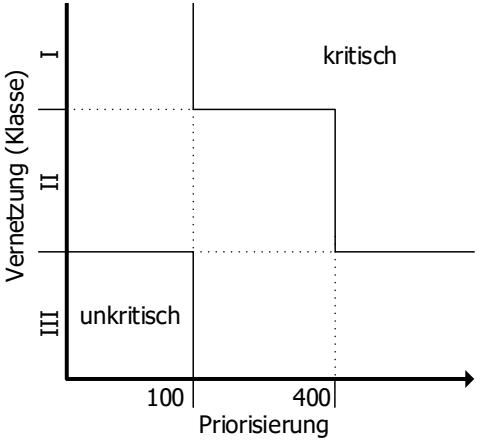



Abbildung 2: Klassifizierung der Anforderungen in Abhängigkeit von Vernetzung und Priorisierung

Tabelle 2: Klassengrenzen für die Vernetzung

| Zuordnung Passivsumme (PS) | Zuordnung Aktivsumme (AS) | |
|---|---|---|
| | $AS_i \geq Ø\ AS$ | $AS_i < Ø\ AS$ |
| $PS_i \geq Ø\ PS$ | Klasse I | Klasse II |
| $PS_i < Ø\ PS$ | Klasse I | Klasse III |

Ein unterstützendes Informationssystem zur Methode wurde in Mathworks Matlab implementiert. Der Prototyp verfügt über eine direkte Schnittstelle zu Microsoft Excel, welches von allen Unternehmen im Projekt OptiAMix als primäres Tool zum Anforderungsmanagement genutzt wird (siehe hierzu auch [17, 18]). Hierdurch soll eine Integration in die existierenden Prozesse vereinfacht werden. Neben der automatisierten Klassifizierung wird die Ausgabe der Ergebnisse durch farbliche Visualisierung angereichert. Die Nutzerfreundlichkeit wird durch Auswahlmöglichkeiten und die Kennzeichnung fehlender Inputdaten verbessert. Bei Bedarf werden dem Anwender Detailinformationen zur Vernetzung und Priorisierung angezeigt. Dadurch werden die Ergebnisse nachvollziehbar und der Anwender kann die wichtigsten Treiber des Risikos identifizieren. Die Software ermöglicht weiterhin eine Erfassung und Speicherung historischer Daten zur Dokumentation von Erfahrungswissen und zum Erreichen von Lerneffekten. Ein Ausschnitt aus dem Graphical User Interface (GUI) des Softwareprototypen ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: GUI des Softwareprototypen. Die Anforderungen sind bereits klassifiziert.

## 6 Fallstudie und Evaluation

Die Evaluation der Methode im Sinne der DRM zur Beantwortung der beiden Forschungsfragen erfolgt anhand einer Fallstudie und eines Workshops mit den Industriepartnern des BMBF-Projektes OptiAMix. Die Fallstudie für einen additiv gefertigten Radträger wird in Abschnitt 6.1 beschrieben, die Ergebnisse des Workshops in Abschnitt 6.2.

### 6.1 Fallstudie: Additiv gefertigter Radträger

Als Fallstudie wurde der Radträger eines Rennwagens aus der studentischen „Formula Student" Rennserie verwendet. Insgesamt wurden 25 Produktanforderungen erhoben und dokumentiert. Der Radträger sowie die Vernetzung der Anforderungen sind in Abbildung 1 dargestellt.

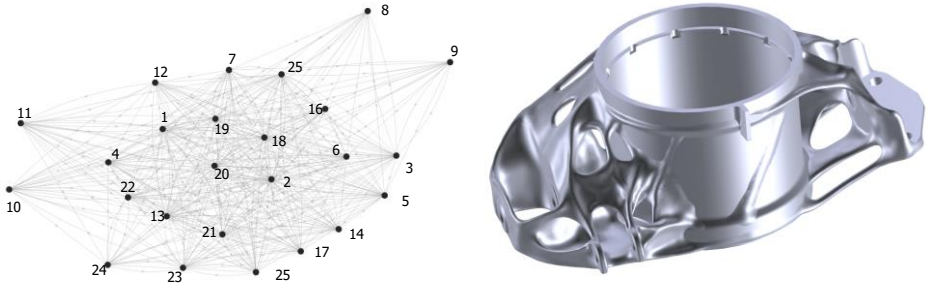



Abbildung 4: Radträger (rechts) und Vernetzungsgraph der Anforderungen (links)

Die Anforderungen, welche mit dem Fertigungsverfahren (#20, #21 ,#22) und Material (#1, #2) zusammenhängen, weisen die höchste Aktivsumme auf. Zugleich weisen die Anforderungen #20, #21 und #22 auch die höchste Prioritätszahl auf, da bei den Entwicklern große Unsicherheit in Bezug auf die Fertigungsrestriktionen besteht. Diese wird von hoher Dynamik in der Forschung zum Thema „Design for AM" oder Konstruktionsrichtlinien für additive Fertigungsverfahren begleitet. Die fertigungsbezogenen Anforderungen besitzen außerdem eine hohe Relevanz für die Gestaltung des Produktes. Im Gegensatz dazu besitzen die Anforderungen #1 und #2 zwar eine hohe Aktivsumme, aber eine geringe Prioritätszahl. Weder Unsicherheit noch Dynamik werden hoch eingestuft.

An dem Beispiel wurde gezeigt, dass die Entscheidungsgüte bezüglich Maßnahmen zur Vermeidung oder Handhabung von Anforderungsänderungen durch die Anwendung der Methode verbessert wurde. Grund dafür ist, dass

nicht nur die Vernetzung, sondern auch auf das inhärente Änderungsrisiko einbezogen werden konnten.

## 6.2 Validierungsworkshop

Innerhalb des Workshops wurde die Methode „World Café" angewandt. Die zwölf Teilnehmer waren angehalten, a) unterschiedliche Aspekte zur Nutzerfreundlichkeit auf der einen als auch Nutzen und Funktionsumfang des Softwaretools auf der anderen Seite zu bewerten sowie b) Verbesserungspotenziale vorzuschlagen und spontan zu bewerten.

Die einfache, auf der FMEA-Logik aufbauende Priorisierung wurde durch die Teilnehmer positiv bewertet. Trotz der hohen Subjektivität wurde die intuitive Bewertung sowie die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und Kriterien betont. Wunschfunktionalitäten seitens der Teilnehmer waren unter anderem die Funktionserweiterung um Cockpit-Charts, die zur besseren Übersichtlichkeit betragen sollen. Des Weiteren wurde die Implementierung einer statistischen Auswertung über verschiedene Projekte hinweg als sinnvolle Maßnahme zur kontinuierlichen Verbesserung der Ergebnisgüte erachtet. Abschließend wurde eine Machbarkeitsstudie bezüglich der Verknüpfung des Werkzeuges mit künstlichen neuronalen Netzen im Sinne des Maschinellen Lernens von den Teilnehmern des Workshops gewünscht.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode ermöglicht die Identifikation von kritischen Anforderungen in der Produktentwicklung additiv gefertigter Produkte. Die Bewertung stützt sich auf die Auswirkungen von Anforderungsänderungen auf Basis einer netzwerktheoretischen Betrachtung und Analyse von Einflussbereichen. Anwender werden durch die Methode befähigt, Anforderungsänderungen im Hinblick auf die jeweils möglichen Ursachen und die Auswirkungen auf andere Anforderungen zu bewerten, kritische Anforderungen zu identifizieren und diese Erkenntnisse in den Produktentstehungsprozess zu integrieren. Durch Interviews mit Industriepartnern und einer Fallstudie wurden die Ergebnisse validiert und weitere Verbesserungspotenziale identifiziert. Die Subjektivität und Vereinfachung der FMEA-Logik wurde dabei als positiv bewertet. Ausgehend von den Workshop-Ergebnissen ist es Ziel, die Methode um eine statistische Auswertung zu erweitern. Die netzwerktheoretische Betrachtung ist aktuell auf die Abhängigkeiten als Kanten des Netzwerkes begrenzt. Die Modellierung der Anforderungen als Netzwerk bietet weiterreichende Potenziale, unter anderem für eine vorausschauende Betrachtung der Anforderungsänderungen.

## Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „OptiAMix" wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Additive Fertigung – Individualisierte Produkte, komplexe Massenprodukte, innovative Materialen (ProMat_3D)" gefördert.

## Literatur

[1] Brauns, C.: „Requirements Engineering und Management in der wehrtechnischen Beschaffung. Empirische Bestandsaufnahme, Konzeptentwicklung, Evaluation".Dissertation, Hamburg, 2016.

[2] Pohl, K.: „Requirements engineering. Fundamentals, principles, and techniques". Springer, New York, 2010.

[3] Song, Y.-W.; Chahin, A.; Scholle, P.; Bender, B.; Gräßler, I.; Paetzold, K.: „Optimierung des Produktentwicklungsprozesses mittels Risikoanalyse vernetzter Anforderungen". In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium. Hamburg, 2017, S. 339–351.

[4] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: „Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung". Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.

[5] Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: „DRM, a Design Research Methodology". Springer London, Guildford, Surrey, 2009.

[6] Wynn, D. C.; Eckert, C. M.; Clarkson, P. J.: „Modelling iteration in engineering design International Conference on Engineering Design, 2007.

[7] Dahlstedt, Å. G.; Persson, A.: „Requirements Interdependencies - Moulding the State of Research into a Research Agenda Ninth International Workshop on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality (REFSQ 2003), held in conjunction with CAiSE 2003, 2003, S. 71–80.

[8] Gräßler, I.; Scholle, P.: „Szenario-basierte Analyse von Anforderungen im Produktentwicklungsprozess". In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) Design for X. Beiträge zum 27. DfX-Symposium, 2016, S. 231–242.

[9] Gräßler, I.; Scholle, P.; Pottebaum, J.: "Integrated process and data model for applying scenario-technique in requirements engineering". In: Design Society (Hrsg.) ICED17. 21st International Conference on Engineering Design Vancouver, 2017, S. 261–270.

[10] Gräßler, I.; Scholle, P.; Hentze, J.; Oleff, C.: "Semi-Automatized Assessment of Requirement Interrelations". In: Marjanović, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N.; Škec, S. (Hrsg.) Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference, 2018, S. 325–334.

[11] Gräßler, I.; Hentze, J.: "Structuring and Describing Requirements in a Flexible Mesh for Development of Smart Interdisciplinary Systems". In: Araujo, A.; Mota Soares, C. A. (Hrsg.) Smart Structures and Materials. Basel, 2017, S. 1622–1631.

[12] Eben, K. G. M.; Lindemann, U.: "Structural Analysis of Requirements. Interpretation of structural criterions 12th International Dependency and Structure Modelling Conference DSM '10, 2010, S. 249–261.

[13] Eben, K. G. M.; Daniilis, C.; Lindemann, U.: "Interrelating and Prioritising Requirements on Multiple Hierachy Levels". In: Marjanović, D. (Hrsg.) Proceedings of the DESIGN 2010 11th International Design Conference. Zagreb, 2010, S. 1055–1064.

[14] Scholle, P.; Song, Y.-W.; Herzog, M.; Bender, B.; Gräßler, I.: „Methoden der Anforderungsstrukturierung zur Steuerung von Produktentwicklungsprozessen". In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.) Design for X. Beiträge zum 26. DfX Symposium. Hamburg, 2015, S. 121–132.

[15] Werdich, M.: „FMEA - Einführung und Moderation". Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.

[16] Reibnitz, U. v.: „Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung". Gabler, Wiesbaden, 1992.

[17] Ebert, C.: „Systematisches Requirements Engineering. Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten". dpunkt.verl., Heidelberg, 2014.

[18] Fraunhofer IESE, HOOD Gmbh and Universität Zürich: RE-Kompass: Ergebnisbericht. , 2015.