

## **Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau**

---

### **Beitrag zur Bemessung scheibenbeanspruchter Stahl-Glas-Elemente**

Andreas Haese

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. Gebbeken (federführend)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Brünig

Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Holzer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Keuser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. I. Mangerig

em. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. C. Petersen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Siebert

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Schriftleitung:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. Gebbeken

Institut für Mechanik und Statik

Labor für Ingenieurinformatik

Universität der Bundeswehr München

Werner-Heisenberg-Weg 39

85577 Neubiberg

Tel.: 089-6004-3414

Email: [norbert.gebbeken@unibw.de](mailto:norbert.gebbeken@unibw.de)

© 2013

Autor

Werner-Heisenberg-Weg 39

85577 Neubiberg

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Mit Genehmigung des Autors/Herausgebers ist es gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise zu vervielfältigen.

ISSN 1431-5122

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN  
FAKULTÄT FÜR BAUINGENIEURWESEN UND UMWELTWISSENSCHAFTEN

Thema der Dissertation: Beitrag zur Bemessung scheibenbeanspruchter Stahl-Glas-  
Elemente

Verfasser: Dipl.-Ing. Andreas Haese MBA

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig

1. Berichterstatter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert

2. Berichterstatter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider (TU Darmstadt)

Tag der Prüfung: 28. März 2013

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Neubiberg im April 2013



Kleider machen Leute  
*(Volksmund/Gottfried Keller)*

Fassaden machen Gebäude  
*(Thyssen Krupp)*



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Baukonstruktion und Bauphysik am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München.

Als Erstes und ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Professor Siebert bedanken, für die Möglichkeit der Promotion im Bereich des Konstruktiven Glasbaus und für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit. Seine Unterstützung, die kritischen Fragen und seine Offenheit für neue Ideen oder Ansätze trugen in unverzichtbarer Weise zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Mein besonderer Dank geht auch an Herrn Professor Schneider von der TU Darmstadt, für seine Bereitschaft, meine Arbeit als externer Gutachter zu prüfen und an Herrn Professor Mangerig für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Ganz herzlich danken möchte ich meinen Kollegen Tobias Herrmann und Matthias Seel für ihre stete Diskussionsbereitschaft, ihre freundschaftliche Unterstützung, die sportlichen Wettkämpfe und für die interessante gemeinsame Zeit. Mein Dank gilt auch den übrigen Kollegen am Institut. Der alltägliche und fachübergreifende Wissens- und Informationsaustausch und der starke Gemeinschaftssinn bildeten eine wertvolle Basis für diese Arbeit. Ein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern des Labors, allen voran Herrn Robert Nothaft, für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und ganz besonders meiner Frau Susanne. Ohne ihre fortwährende Unterstützung, ihr Verständnis, ihre Geduld und ihren Rückhalt hätte diese Arbeit nicht entstehen können. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Andreas Haese



## Zusammenfassung

Auf Grund der geringen Erfahrung und der fehlenden Grundlagen sind in allen derzeit für den Bereich des Konstruktiven Glasbaus gültigen Normen Beanspruchungen der Scheiben in Scheibenebene (außer Eigengewicht) und auf Schub explizit ausgeschlossen. Auch in den Arbeiten zur [DIN18008] ist dieser Bereich ausgeklammert.

Auf der anderen Seite herrscht aber kein Zweifel darüber, dass Verglasungen zur Abtragung von Lasten in Scheibenebene herangezogen werden können, als auch, dass der Ansatz von Fassadenelementen zur Aussteifung in Fassadenebene prinzipiell möglich ist und zu deutlich wirtschaftlicheren und leichteren Konstruktion führen würde.

Im Rahmen diverser Forschungsprojekte wurden und werden die grundlegenden Tragmechanismen im Hinblick auf Stabilität untersucht. Die dabei zu Grunde liegenden Randbedingungen sind jedoch vielfach nicht direkt auf eine mögliche Anwendung übertragbar. Konkret heißt dies z. B. für Fassadenkonstruktionen, dass ein „echtes“ Beulen der Scheiben nur schwer erreicht werden kann, da die Steifigkeit der Unterkonstruktion dazu zu gering ist, so dass diese entsprechend mit verformt wird. Mit dem Ziel einer möglichst schlanken Stahlkonstruktion wurde in diesem Projekt das Zusammenwirken von Stahl und Glas als Modul bzw. Verbund-Modul betrachtet und so ein System entwickelt, das die Vorteile beider Materialien vereint. Es wurden numerische und experimentelle Untersuchungen an Glaselementen durchgeführt, die an den vertikalen Kanten durch U-Profile (allg. Randbalken) verstärkt waren.

Im ersten Schritt wurde zur Untersuchung der Fragestellung ein numerisches Modell entwickelt, das durch Vergleichsrechnungen mit Beispielen aus der Literatur und auch durch die im weiteren Verlauf durchgeführten Versuche verifiziert wurde.

Für das zu untersuchende System wurden verschiedene Lasteinleitungsvarianten für mehrere Geometrien von Scheibe und Randbalken sowohl numerisch, wie auch experimentell untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass eine Lasteinleitung direkt in den Randbalken für das Gesamttragverhalten am günstigsten ist, d. h. eine große Vertikallast bei geringer Verformung zulässt. Dies hat insofern weitreichende Folgen für dieses Projekt, als die Problematik der Spannungskonzentrationen bei Lasteinleitung in die Scheibenkanten damit entfällt.

Mit Hilfe des numerischen Modells wurde das Last-Verformungsverhalten eingehender untersucht. Dabei stellte sich u.a. heraus, dass für das Gesamttragverhalten die Art der Querbelastung senkrecht zur Scheibenebene keinen wesentlichen Einfluss hat. Das Last-Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Vertikallast hängt in erster Linie von der durch die Querbelastung hervorgerufene Verformung des Randbalkens ab.

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden die Modelle für fassaden-typische Randbedingungen berechnet und die Ergebnisse als Tabellen aufbereitet. In der weiteren Auswertung der Ergebnisse zeigten sich wesentliche Gemeinsamkeiten aller Modelle, die eine einheitliche Formulierung des Last-Verformungsverhaltens erlauben.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Bemessungskonzept für das im Rahmen dieses Projekts untersuchte System aus Scheiben mit Randbalken entwickelt. Dabei wurden auch verschiedene Schadensszenarien bis hin zum Ausfall einzelner Scheiben berücksichtigt.



## Abstract

The initial idea behind this project was to optimize the interaction or co-action of glass and steel for in-plane loaded glass elements. In respect to typical façade applications the boundary conditions, e.g. loads, dimensions, connections, materials, were determined. Based on that mechanical and numerical models were developed that are capable to describe the structural behavior. The investigated system was then reduced to a single “module” as a representative element of the structure. For this project one element is considered as a glass pane with a (small) edge beam on two opposite edges.

Common façade concepts usually use glass as envelope material transferring only wind load and dead load to the substructure. Integrating the substructure into the façade surface, glass pane and steel frame act together for both in-plane and surface loads. Most research projects dealing with in-plane loaded glass elements assume rigid boundary conditions, i.e. large cross sections for the sub-structure, as they are usually not given in façades due to economic and architectural reasons. Additionally – and in contrast to i.e. columns – façade elements are loaded in-plane and out of plane and therefore usually not stability criteria but deformation restrictions are decisive for the design, especially due to strict limitations in façade design codes.

In a first step different load-paths and boundary conditions were investigated for the described glass-steel elements. As load paths were considered the load transfer from glass edge to glass edge, uniformly distributed along the edge or concentrated near the corners, from edge beam to edge beam and hybrid forms of those. The edge beams were regarded as slender as well as massive. Extreme values for the edge beam (rigid or not existing) lead to standard systems with known solutions i.e. for stability analysis (buckling). Based on these systems the verification was done by comparison with values given in literature.

One important result of this first step is, that even for very slender edge beams the load carrying capacity is higher when introduction the loads into the steel instead of the glass. Accompanying to the numerical analysis experimental testing was done to verify the calculation model and outcome.

In the second step multiple systems with different geometries, measures, stiffness and loads were examined determining deformations, stresses and stability-parameters. The input parameters (loads, dimensions, stiffness values) were defined assuming realistic façade applications.

As a first result, the load-deformation behavior and load-stress characteristics were constituted as tables for typical parameters. The further analysis of the data showed an important communality for all models leading to a uniform parametric formulation of the load-deformation behavior. On that basis a general design method for the described kind of glass-steel-members was developed.

Although in-plane loaded glass elements are not new as such, as there are a lot of projects realized already, for many applications a frame for the glass is necessary anyway for fixing or connection purpose. For those cases this thesis presents the investigation results and an easy design concept for glass elements with slender edge beams that allows designing very economic façade elements.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Leitidee.....	3
1.2	Ziel und Aufgabenstellung .....	3
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und der Forschung.....</b>	<b>6</b>
2.1	Stand der Technik.....	6
2.2	Stand der Forschung.....	8
2.2.1	Material/Bemessung.....	9
2.2.2	VSG/PVB/SGP.....	9
2.2.3	Resttragfähigkeit .....	9
2.2.4	Bohrungen und Punkthalter.....	9
2.2.5	Kleben .....	9
2.2.6	Aussteifung mit geklebten Elementen.....	10
2.2.7	Stabilität bei Glasbauteilen.....	10
2.2.8	Absturzsicherung.....	10
2.2.9	Hochdynamische Einwirkungen.....	10
2.2.10	Übersicht .....	11
2.3	Zusammenfassung.....	11
<b>3</b>	<b>System.....</b>	<b>12</b>
3.1	Materialien .....	12
3.1.1	Stahl.....	12
3.1.2	Glas.....	12
3.1.3	Zwischenmaterial .....	13
3.2	Aufbau.....	14
3.2.1	Gesamtsystem.....	14
3.2.2	Vertikale Elemente .....	15
3.2.3	Horizontale Elemente .....	16
3.2.4	Verbindungsvarianten .....	16
3.3	Äußere Lasten.....	18
3.4	Vorverformungen .....	18
3.5	Systemreduktion und Parametrisierung.....	19
3.6	Mechanische Grundformen .....	22
3.6.1	Scheibentragwirkung.....	23

3.6.2	Plattentragwirkung.....	24
3.6.3	Kombinierte Tragwirkung .....	25
3.6.4	Proportionen .....	26
3.7	Bauphysikalische Aspekte.....	26
<b>4</b>	<b>Numerische Untersuchungen.....</b>	<b>27</b>
4.1	Modell.....	27
4.1.1	Programm .....	27
4.1.2	Randbedingungen .....	27
4.1.3	Elementansätze .....	29
4.1.4	Lagerung.....	31
4.1.5	Äußere Lasten.....	31
4.1.6	Ergebnisse.....	32
4.2	Validierung und Verifizierung.....	32
4.3	Verformungsfigur .....	35
4.4	Parameterstudie zur Art der Lasteinleitung .....	39
4.5	Parametervariation und -kombination .....	43
4.5.1	Scheibe .....	43
4.5.2	Randbalken.....	44
4.5.3	Querriegel .....	45
4.5.4	Lager und Anschlüsse.....	46
4.5.5	Last und Verformung.....	46
4.5.6	Unsymmetrische Belastung .....	46
4.5.7	Übersicht.....	47
4.5.8	Berechnung und Ergebnisse .....	48
4.5.9	Auswertung.....	48
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>61</b>
5.1	Allgemeines.....	61
5.2	Vorverformung .....	61
5.3	Versuchsaufbau .....	61
5.3.1	Modul .....	61
5.3.2	Lagerung.....	62
5.3.3	Belastung .....	63
5.4	Versuchsprogramm.....	64
5.5	Versuchsergebnisse .....	64
5.5.1	Versuche am Hochformat 1000 mm x 1500 mm (RS1H) .....	65

5.5.2	Versuche am Querformat 1500 mm x 1000 mm RS1Q .....	68
5.5.3	Vergleich der Lasteinleitungen.....	69
<b>6</b>	<b>Vergleichsberechnungen und Ergebnisse.....</b>	<b>71</b>
6.1	Vergleich von Berechnung und Versuch.....	71
6.2	Vergleichsberechnung unter Ansatz eines Biegebalkens nach Theorie II. Ordnung .....	71
6.2.1	Verformungen .....	72
6.2.2	Spannungen .....	82
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	84
<b>7</b>	<b>Bemessung.....</b>	<b>86</b>
7.1	Vorbemerkung.....	86
7.2	Kontext und Einordnung .....	86
7.3	Grundlagen .....	87
7.3.1	DIN 1055.....	87
7.3.2	DIN 18800.....	89
7.3.3	DIN 18008.....	89
7.3.4	Weitere Grundlagen .....	90
7.4	Bemessungsansatz.....	91
7.4.1	Konzept .....	91
7.4.2	Nachweis Stahl .....	92
7.4.3	Nachweis Glas .....	94
7.4.4	Grenzzustände .....	95
7.5	Konstruktive Gestaltung.....	95
7.5.1	Lasteinleitung .....	95
7.5.2	Verbindung Randbalken und Glas.....	95
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>97</b>
8.1	Bearbeitung und Ergebnisse .....	97
8.2	Mögliche Weiterentwicklung .....	98
8.3	Ausblick .....	99
<b>Quellen.....</b>		<b>100</b>
Literatur.....		100
Normen, Regeln und AbZ .....		104
Andere Quellen .....		104
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>		<b>105</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>		<b>108</b>
<b>Anhang</b>		



## Abkürzungen und Bezeichnungen

### Abkürzungen

AbZ	Allgemeines bauaufsichtliche Zulassung
AbP	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
ZiE	Zustimmung im Einzelfall
TVG	Teilvorgespanntes Glas
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FG	Floatglas / Glas ohne thermische/chemische Vorspannung
VSG	Verbundsicherheitsglas
VG	Verbundglas
RB	Randbalken
POM	Polyoxymethylen (Thermoplast)
EPDM	Ethylene-Propylene-Diene-Monomer (Elastomer)
RS1	Referenzscheibe
-H	Hochformat
-B	Querformat

### Indizes

...RB	Randbalken
...QR	Querriegel
...id	ideeller Wert
...0	Anfangszustand
...Glas	bezogen auf die Glasscheibe bzw. das Glas
...St	Stahl
...RBM	Mitte des Randbalkens, bzw. Mitte des (vertikalen) seitlichen Randes der Scheiben (entsprechend über der Mitte des Randbalkens)
...QRM	Mitte am (horizontalen) Querrand der Scheibe
...SMP	Mittelpunkt der Scheibe (horizontal und vertikal mittig)

### Bezeichnungen

E-Modul	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
F	[N], [kN]	Vertikallast als Einzellast
q	[kN/m <sup>2</sup> ]	Flächenbelastung der Scheibe
p	[kN/m]	Aus q resultierende Linienlast am Randbalken
B	[mm]	Scheibenbreite
H	[mm]	Höhe/Länge der Scheibe

$t$	[mm]	Dicke der Scheibe
$v$	[-]	Vergrößerungsfaktor
$I_y / I_z$	[mm <sup>4</sup> ]	Flächenträgheitsmoment 2. Grades für Biegung um die y-Achse / z-Achse
$M_y / M_z$	[Nmm]	Moment um die y-Achse / z-Achse
$c$	[N/mm]	Federsteifigkeit
$a$	[-]	Ansichtsverhältnis B/H
$s$	[-]	Steifigkeitsverhältnis
$s_k$	[mm]	Knicklänge
$F_{krit}$	[N], [kN]	Verzweigungslast
$B_m$	[mm]	Mitwirkende Breite
$m$	[-]	Mitwirkungsbeiwert
$\gamma_M, \gamma_F$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für das Material / die Einwirkung
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung
$w$	[mm]	Verformung in z-Richtung

## 1 Einführung

Auch nach vielen Jahren der Forschung im Bereich des Konstruktiven Glasbaus und nach der Realisierung sehr beeindruckende Fassaden bleibt das Streben nach möglichst transparenten Gebäudehüllen ein starker Antriebsfaktor für weitere Entwicklungen in diesem Bereich.

Eines der herausragenden und sicherlich auch bekanntesten aktuellen Beispiele für maximale Transparenz ist der Eingang des Apple Store in Shanghai.



Abbildung 1-1: Apple Store in Shanghai [GSI 2010]

Das in Abbildung 1-1 gezeigte Bauwerk kommt dem Ziel des architektonischen Strebens nach – optischer – Auflösung der Tragstruktur bereits sehr nahe. Innovative Glasfassaden sind ein wesentlicher Bestandteil zahlreicher Apple Stores. Trotz der dadurch entstandenen Vielzahl an Variationen dieser Bauart, können diese nach wie vor als Pionierbauwerke im Konstruktiven Glasbau gelten, die dem Stand der Technik voraus sind.

Während die allumfassende transparente Gebäudehülle lange Zeit als anzustrebendes Ideal gerade für Hochhäuser galt und durch große Architekturbüros weltweite Verbreitung fand und findet, führen die zunehmend strengeren Beschränkungen hinsichtlich Emissionen und Primärenergieverbrauch langsam zu einem Umdenken. Genau diese Eigenschaften, die nun zur Kritik an Glasfassaden führen – der hohe Energieeintrag durch direkte Sonneneinstrahlung – waren es auch, die zu den ersten Gebäudehüllen aus Glas geführt haben. Die ersten Vertreter dieser Bauart waren fast ausschließlich Gewächshäuser und Wintergärten bei denen der sogenannte Treibhauseffekt, zum Teil auch als Glashauseffekt bezeichnet, gezielt zur Züchtung und/oder Überwinterung von Pflanzen genutzt wurde.

Eindrucksvolle Beispiele gibt es hierzu vor allem aus Großbritannien, wo der Glashausbau Anfang des neunzehnten Jahrhunderts eine erste Blütephase hatte. Abbildung 1-2 zeigt das Palmenhaus in den Bicton Botanical Gardens. Bekannter noch ist der sogenannte Crystal Palace der, entworfen von Joseph Paxton, in London für die Weltausstellung 1851 errichtet wurde (vgl. Abbildung 1-3).

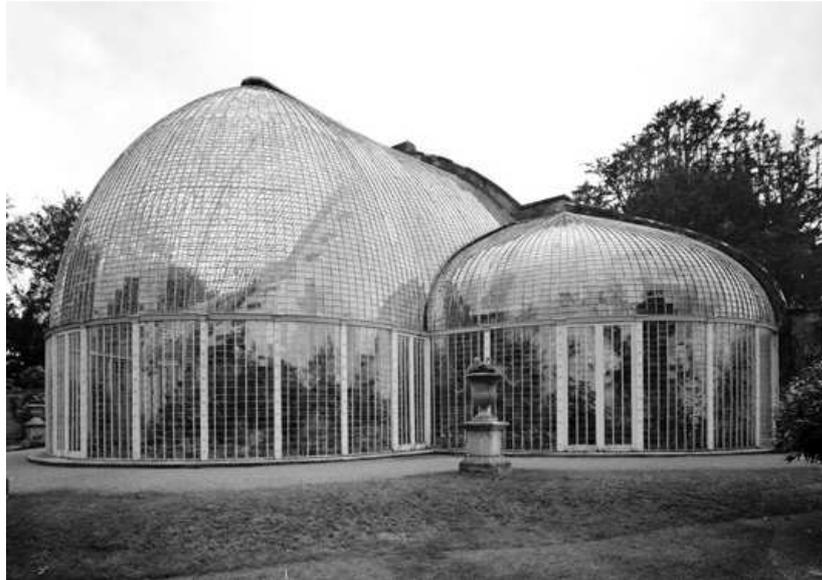


Abbildung 1-2: Palmenhaus in den Bicton Gardens [BT2001]

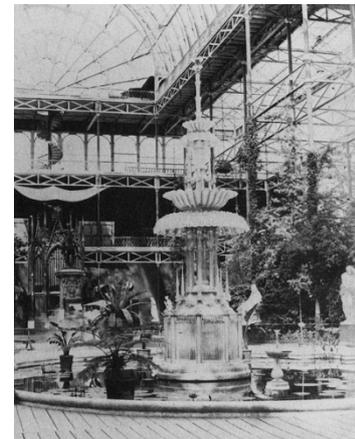


Abbildung 1-3: „Crystal Palace“ [DICKINSON 1854] [PHD1851]

Der Crystal Palace ist zwar deutlich imposanter, allein auf Grund seiner Größe und der innovativen (Guss-)Eisen-Systembauweise, aus Sicht des Konstruktiven Glasbaus ist das Tragwerk jedoch als konservativ im Vergleich zu den Gewächshäusern zu beurteilen. Bereits beim Crystal Palace finden sich in der Literatur einige Hinweise, dass die Scheiben einen nicht unwesentlichen Betrag zur Aussteifung geleistet haben, offensichtlich wird das Zusammenwirken der Elemente beim Palmenhaus, das seine Stabilität und Tragfähigkeit nur durch das Zusammenwirken der schlanken Stahlprofile mit den eingeklebten Glaselementen erhält.

Die Entstehung des Glasbaus und besonders die Entwicklung der Glasproduktion haben eine noch viel längere Geschichte, deren – bautechnisch interessanter – Anfang meist mit dem sogenannten Waldglas beschrieben wird. Über die Entwicklung von dort bis zum heutigen Stand des Konstruktiven Glasbaus gibt es zahlreiche Veröffentlichungen (z.B. [ENGLHARDT 2007], [MOCIBOB 2008]), weshalb auf eine

Darstellung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet wird. Stattdessen wird in Abschnitt 2 der aktuelle Stand im Konstruktiven Glasbau umfassend beschrieben, um die Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, im Gesamtkontext der aktuellen Forschung darstellen zu können.

## 1.1 Leitidee

Die Idee zu dieser Arbeit bzw. zu dem dieser Arbeit zu Grunde liegendem Forschungsprojekt waren Überlegungen zu einer Fassade, die einem Gebäude vorgesetzt wird, in das keine Vertikallasten eingeleitet werden können oder sollen. Ein Beispiel hierfür wäre ein unter Denkmalschutz stehendes Gebäude, das durch eine „zweite Haut“ geschützt werden soll.

Eine naheliegende Lösung ist die klassische Pfosten-Riegel-Lösung, bei der die Glaselemente nur ausfachend eingesetzt werden, d.h. Eigengewicht und Windlasten werden von jedem Glaselement unmittelbar in die dahinter liegenden Pfosten und Riegel übertragen. Ein hoher ästhetischer Anspruch kann mit dieser Lösung in der Regel jedoch nicht erfüllt werden. Eine alternative Seilnetzfassade benötigt einen massiven Überbau, der die Kräfte aus der Verspannung aufnehmen kann. Dieser Überbau müsste folglich zusätzlich um die Fassade herum gebaut werden. Dies würde den Aufwand stark erhöhen und wäre in den meisten Fällen architektonisch kaum vertretbar.

Diesen klassischen Lösungen steht die aktuelle Forschung im Bereich des Konstruktiven Glasbaus gegenüber, in der die Scheibenbeanspruchung mit den Versagensmechanismen Knicken und Beulen von Glasscheiben eingehend untersucht wird. In den zugehörigen Versuchen werden die Scheiben an den Rändern stets gelenkig und nahezu unverschieblich gelagert um den Versagensfall Beulen zu erreichen. Ein Blick auf die dazu notwendig Unterkonstruktion zeigt sehr schnell, dass diese idealen Bedingungen in einer Fassade nur für solche Sonderfälle gegeben sind, bei welchen an die Scheibe massive Bauteile direkt angrenzen.

Hinzu kommt, dass für die beschriebene vorgesetzte Fassade auch für den idealtypischen Fall direkt „übereinander gestapelter“ Scheiben stets „Bindeglieder“ zwischen den Scheiben untereinander als auch zum Gebäude vorhanden sein müssen, d.h. eine Lagerung der Scheiben gegeben sein muss, sowohl zur Lastabtragung in, wie auch senkrecht zur Scheibenebene. Man stelle sich die Glaskante umgreifende Profile vor, mit welchen die Scheiben vertikal untereinander, als auch horizontal mit dem Gebäude verbunden werden können.

Da diese Profile häufig ohnehin notwendig sind, liegt es nahe, diese auch zur Lastabtragung heranzuziehen. In welcher Weise dies idealerweise geschieht, ist Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit, welcher im Folgenden genauer definiert wird.

## 1.2 Ziel und Aufgabenstellung

In Abbildung 1-4 ist die Leitidee dieser Arbeit anschaulich dargestellt. Ausgehend von der Pfosten-Riegelfassade (Abbildung 1-4a) nach Stand der Technik, soll die Möglichkeit untersucht werden, die Lastabtragung in die Scheibenebene zu verlegen, jedoch ohne Überbauten, wie sie für Seilnetzsysteme zwingend notwendig wären.

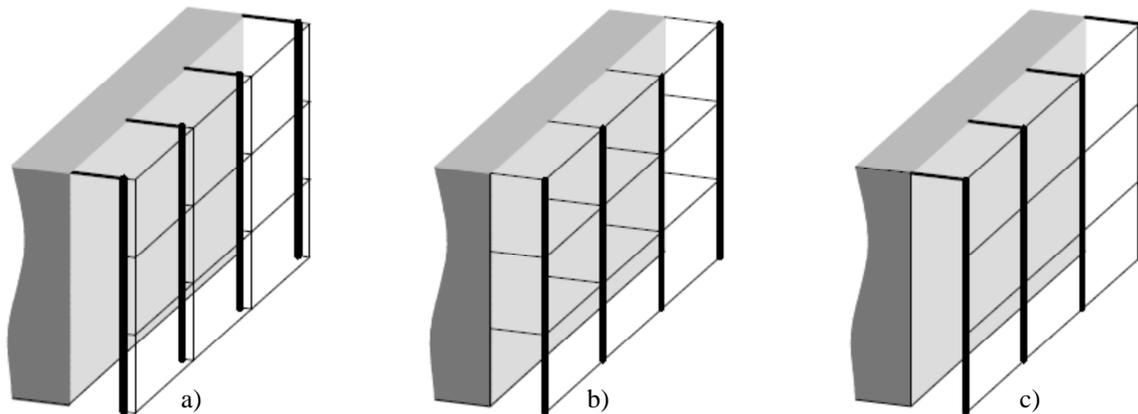


Abbildung 1-4: Leitidee

Hinsichtlich der Lastabtragung gilt es zwei Varianten zu unterscheiden. In Abbildung 1-4b ist ein System skizziert, das an den jeweiligen Kreuzungspunkten der Stoßfugen in die Tiefe zum Gebäude hin aussteift ist. Für dieses System ist eine Übertragung von Biegemomenten in den horizontalen Stoßfugen nicht notwendiger Weise erforderlich. Soll auf die Aussteifung in die Tiefe – außer an den Rändern der Fassade – verzichtet werden, so können die horizontalen Elementfugen biegesteif ausgeführt werden. Eine biegesteife Verbindung von zwei Scheiben ist in der Regel nur mit einer großen Einspanntiefe zu erreichen. Dies steht jedoch im Widerspruch zum Anspruch an die Filigranität des Systems. Wird auf die horizontalen Verbindungselemente verzichtet, so können die vertikalen Randprofile durchlaufend angeordnet werden, so dass eine über die gesamte Höhe gespannte Fassade mit reduzierter Biegetragfähigkeit an den Stoßfugen entsteht (Abbildung 1-4c).

In einem ersten Schritt wird im Rahmen dieser Arbeit ein System betrachtet, das, wie in Abbildung 1-4b, die Vertikallasten in Scheibenebene nach unten abträgt, für die Lasten senkrecht zur Scheibenoberfläche an den Elementecken in die Tiefe aussteift ist. Abbildung 1-5 zeigt das untersuchte System ohne Belastung.

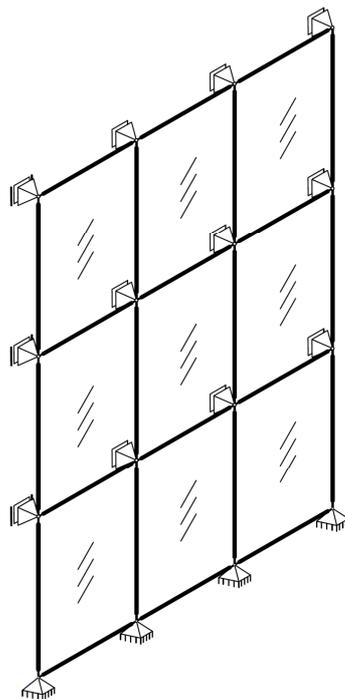


Abbildung 1-5: Untersuchtes System

Ziel der Untersuchung ist es, die Lasten so auf das System und im System zu übertragen, dass die maximale Tragfähigkeit erreicht wird. Zur Erreichung dieses Ziels sind einige wichtige Randbedingungen zu beachten. Das System soll eine Verbesserung gegenüber der klassischen Pfosten-Riegel-Lösung sein. Dazu muss vor allem die Filigranität erhalten bleiben. Dies stellt eine wichtige Einschränkung für die Wahl der möglichen Randprofile dar, da die Ansichtsbreiten gering bleiben sollen.

Eine zweite wichtige Forderung ist die der Wirtschaftlichkeit. Ziel ist es nicht nur, das System bis an die Grenzen zu verschlanken, vielmehr soll das Zusammenwirken von Glas- und Stahlelementen so optimiert werden, dass sich eine hohe Tragfähigkeit mit angemessenem Aufwand erzielen lässt. Dieser Aspekt ist auch Grundlage des Forschungsprojektes „Tragende Scheibenelemente aus Stahl-Glas-Verbund“, gefördert durch die ehemalige Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung, jetzt Allianz Industrie Forschung AiF in dessen Rahmen wichtige Ergebnisse dieser Arbeit erzielt wurden. Ein dritter wichtiger Aspekt darin ist die Realisierbarkeit unter den baupraktisch gegebenen Randbedingungen.

## 2 Stand der Technik und der Forschung

### 2.1 Stand der Technik

Der Stand der Technik im Konstruktiven Glasbau lässt sich sehr gut an der aktuellen Entwicklung der Normung in diesem Bereich darstellen. Für beschränkte Anwendungsbereiche, in welchen bereits sehr viele Erfahrungswerte vorliegen, existieren Technische Regeln. Hier gibt es bislang Technische Regeln für liniengelagerte Verglasungen [TRLV], für absturzsichernde Verglasungen [TRAV] und für punktgehaltene Verglasungen [TRPV] als eingeführte technische Baubestimmungen. Derzeit wird an der DIN 18008: „Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln“ [DIN18008] gearbeitet. Bei der inhaltlichen Ausarbeitung zeigte sich, dass trotz der vielfältigen und zahlreichen realisierten Projekte in allen Bereichen des Konstruktiven Glasbaus der Erfahrungsbereich der bisherigen Technischen Regeln nur sehr gering ausgeweitet werden kann, da für eine Extrapolation der gültigen Größenbeschränkungen und eine Erweiterung des Anwendungsrahmens die notwendigen Grundlagen z.T. fehlen oder nicht konsensfähig sind.

Im Glasbau wird zudem oft die Möglichkeit wahrgenommen, für häufig verbaute Bauprodukte und Bauarten, die nicht durch die eingeführten technischen Regeln abgedeckt sind, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) zu beantragen. Dies ist einmalig mit einem sehr hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden, mit Erteilung der AbZ gilt die Bauart bzw. das Bauprodukt aber als geregelt und kann dann durch einen Nachweis, der in der jeweiligen Zulassung festgelegt ist, verwendet werden. Auf Grund der zahlreichen, teilweise auch sehr ähnlichen Bauarten und Bauprodukte, die im Bereich des Konstruktiven Glasbaus über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen geregelt sind, kann man diese ebenso als Stand der Technik betrachten. Dies gilt insbesondere auch, da die Zulassungen nur einen beschränkten Gültigkeitszeitraum haben und zur weiteren Verwendung regelmäßig verlängert werden müssen. Diesen Aufwand nehmen die Hersteller nur dann in Kauf, wenn am Fortbestand der Zulassung ein ausreichend großes wirtschaftliches Interesse besteht. Auf diese Weise bilden die AbZ den Stand der Technik, der über die technischen Regeln hinaus geht, sehr aktuell ab.

Der aktuelle Zeitplan sieht eine zeitgleiche, baurechtliche Einführung der Teile 1 bis 6 der [DIN18008] für 2012 vor. Betrachtet man zudem die derzeit gültigen AbZ lässt sich der aktuelle Stand der Technik gut abbilden, weshalb im Folgenden kurz auf die wesentlichen Inhalte eingegangen werden soll.

Die „DIN 18008 – Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln“ besteht derzeit aus folgenden Teilen:

- Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen
- Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
- Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen
- Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen
- Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbbare Verglasungen
- Teil 6: Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungszwecken betretbare Verglasungen
- Teil 7: Sonderkonstruktionen

Als wichtigste Neuerung im Vergleich zu den technischen Regeln wird mit den allgemeinen Grundlagen in Teil 1 das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte eingeführt, wodurch das sogenannte „Zulässig-Sigma-Konzept“, bei dem die Sicherheiten ausschließlich auf der Widerstandsseite berücksichtigt wurden, abgelöst wird. Entsprechend wird in Teil 1 die Ermittlung der anzusetzenden Festigkeiten definiert. Für die

charakteristischen Festigkeiten der Glasarten wird jedoch auf die Produktnormen verwiesen. Besonders zu erwähnen ist hierbei, dass für Gläser ohne thermische Vorspannung (typischerweise Floatglas) ein Faktor  $k_{\text{mod}}$  eingeführt wird, der unterschiedliche Lasteinwirkungsdauern berücksichtigt.

Teil 2 „Linienförmig gelagerte Verglasungen“ ist in den wesentlichen Inhalten identisch mit der [TRLV], besondere Erwähnung verdient hier die Festschreibung des Mindestglaseinstandes auf 10 mm. Auf die für diese Arbeit relevanten Anwendungsbedingungen dieses Normteils wird in Abschnitt 7.3.3 näher eingegangen.

Teil 3 „Punktförmig gelagerte Verglasungen“ wird die [TRPV] ablösen, im Hauptteil aber die Grundstruktur dieser übernehmen. Darüber hinaus wird ein vereinfachtes Nachweisverfahren eingeführt, das für definierte Haltergeometrien einen Nachweis mittels einfacher FE-Plattenmodelle ermöglicht und für das auf eine aufwändige Haltermodellierung verzichtet werden kann. Gleichzeitig werden den Anwendern von Finite-Element-Modellen Hilfestellungen in Form von Referenzlösungen gegeben, mit deren Hilfe die Ergebnisse und damit das verwendete Modell überprüft werden können. Im Anhang wird zudem ein Prüfverfahren beschrieben, mit dem die Widerstandswerte für Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise für die Punkthalter selbst ermittelt werden können. Dies war bislang eine Lücke in den Regelungen, da ein rechnerischer Nachweis der Halter auf Grund der komplexen Geometrie oder der verwendeten Materialien oft nicht möglich war und es bis dahin keine eingeführte Prüfvorschrift gab, die ein AbP ermöglicht hätte. Diese Lücke wurde durch einige Hersteller durch die Beantragung (und Erteilung) Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen für Punkthalter geschlossen.

Die [TRAV] wird durch Teil 4 „Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen“ abgelöst werden, aber auch hier bleibt die Struktur im Hauptteil des Normteils weitgehend gleich. Über die bisherigen Regelungen hinaus werden im Anhang zwei rechnerische Nachweismöglichkeiten der Absturzsicherheit gegeben, einerseits ein vereinfachtes Verfahren auf Basis einer statischen Ersatzlast, andererseits als volldynamisch transiente Simulation des Stoßvorganges. Dies kann als wesentlicher Fortschritt gelten, denn noch immer stellen Pendelschlagversuche zum Nachweis der Stoßsicherheit einen großen Anteil der Versuche im Bereich des Glasbaus dar, die mit Einführung dieser Berechnungsgrundlage zum Teil entfallen können. In zwei weiteren Anhängen wird nun auch ein experimentelles Nachweisverfahren für die Wirksamkeit eines Kantenschutzes beschrieben bzw. zwei Bauarten für einen Kantenschutz angegeben, deren Wirksamkeit bereits nachgewiesen wurde.

In Teil 5 „Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen“ sind die Bestimmungen, die bereits in den [TRLV] zu begehbaren Verglasungen gegeben waren und die Anforderungen, die durch die Bauaufsichten üblicherweise im Rahmen der notwendigen Zustimmungsverfahren gesetzt wurden, zusammengefasst worden. In diesem Normteil werden sowohl die rechnerischen, wie auch die experimentellen Nachweise beschrieben, als auch Beispiele für Aufbauten angegeben, für welche die Begehbarkeit im Sinne dieser Norm bereits nachgewiesen ist.

Ähnlich verhält es sich mit Teil 6 „Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungsmaßnahmen betretbare Verglasungen“. Auch hier wurden im Wesentlichen die bisher auf [DIN4426] beruhenden Anforderungen umgesetzt und an das Nachweisverfahren im Kontext der [DIN18008] angepasst. Eine – mögliche – Neuerung stellt die Möglichkeit eines rechnerischen Stoßnachweises analog zu Teil 4 dar.

Teil 7 – Sonderkonstruktionen – befindet sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Hier liegen weder die Inhalte fest, noch gibt es einen angestrebten Einführungsstermin.

Eine Übersicht über die aktuell gültigen Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen wird vom Deutschen Institut für Bautechnik auf dessen Internetseite zur Verfügung gestellt (vgl. [DIBT 2011]). Darin finden sich derzeit im Zulassungsbereich 70 – Glas im Bauwesen sechs Unterbereiche:

- 70.1 Geklebte Fassadenelemente
- 70.2 Punktförmig gelagerte Vertikalverglasung
- 70.3 Überkopfverglasungen
- 70.4 linienförmig gelagerte Vertikalverglasungen
- 70.5 Absturzsichernde Verglasungen
- 70.6 Begehbare Verglasungen

Unter geklebten Fassadenelementen sind hier spezielle Bauteile (z.B. Fenster) zur Verwendung in sogenannten Structural-Glazing Fassaden (s.u.) zu verstehen. Wie oben beschrieben, sind Glashalter bei punktförmig gelagerten Verglasungen bisher häufig nicht durch eingeführte Baubestimmungen nachweisbar, deshalb finden sich im Zulassungsbereich 70.2 vorwiegend Verglasungen mit festgelegten Punkthaltern oder Klemmen. Für Überkopfverglasungen ist eine ausreichende Resttragfähigkeit eine wichtige Anforderung, daher finden sich in diesem Bereich hauptsächlich Verglasungen aus VSG und dabei speziell VSG aus TVG. Damit wird gleichzeitig das TVG als solches, als auch in seiner Verwendung als VSG als Bauprodukt geregelt. Der Bereich 70.3 enthält zudem die Zulassung weiterer Zwischenmaterialien zur Verwendung analog zu PVB (vgl. hierzu 3.1.2). Auch im Bereich 70.4 finden sich hauptsächlich Zulassungen von TVG und VSG aus TVG verschiedener Hersteller. Unter den zugelassenen absturzsichernden Verglasungen (70.5) finden sich vor allem Systeme mit bestimmten Punkthaltern und Klemmen. Grund dafür ist einerseits, dass, wie oben beschrieben, der statische Nachweis der Punkthalter oft schwierig ist, andererseits sind für liniengelagerte Verglasungen erteilte Allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse (AbP) oft übertragbar, wohingegen sich die Ergebnisse mit verschiedenen Punkthaltern meist nicht direkt vergleichen lassen. Im Bereich der begehbaren Verglasungen (70.6) gibt es derzeit insgesamt nur zwei Zulassungen.

Auf europäischer Ebene gibt es eine Richtlinie für geklebte Glaskonstruktionen [ETAG002] und darauf basierend einige zugelassene Klebstoffe und Fassadensysteme. Hierbei wird die Klebung ausschließlich für Eigen- und Windlasten aus der aufgeklebten Scheibe angesetzt, wobei bei den in Deutschland zugelassenen Bauprodukten bzw. Bauarten der Abtrag von Eigengewicht durch die Klebung bislang ausgeschlossen ist.

Eine vertiefte Darstellung zum Stand der Technik mit Hinweisen zur Umsetzung und Beispielen zur Bemessung für alle relevanten Bereiche des Konstruktiven Glasbaus findet sich z.B. in [SIEBERT ET.AL. 2007]. Eine sehr anschauliche Übersicht über Glasbauteile, die als tragendes Element wirken findet sich in [WURM 2007].

## **2.2 Stand der Forschung**

Die beiden großen Forschungsschwerpunkte im Bereich des Konstruktiven Glasbaus sind aktuell die Untersuchung von stabilitätsgefährdeten und aussteifenden Bauteilen auf der einen Seite und Klebeverbindungen auf der anderen Seite, zum Teil auch in Kombination. Analog zum Stand der Technik, wird auch für den Stand der Forschung zunächst ein kurzer Überblick über den ganzen Bereich des Konstruktiven Glasbaus gegeben, bevor auf die Arbeiten näher eingegangen wird, die im direkten Bezug zu dieser Arbeit stehen. Dies erscheint insofern sinnvoll und angemessen, als die Kernproblematik im Glasbau unabhängig vom Anwendungsbereich, sehr häufig einem der Bereiche Stabilität, Spannungskonzentration, Zwischenlage oder Kleben oder einer Kombination daraus zuzuordnen ist.

### 2.2.1 Material/Bemessung

Ausgehend von Bemessungsansätzen mittels schadensäquivalenter Spannungen für sehr spezielle Anwendungsfälle (vgl. [BLANK 1994] und [GÜSGEN 1998]) wurden auf Basis der Bruchmechanik allgemeine Bemessungsverfahren für den Glasbau entwickelt ([SHEN 1997], [SIEBERTG 1999]).

Da diese Ergebnisse Eingang in die technischen Regeln gefunden haben, sind sie als Grundlagen für statische Nachweise verfügbar. Aktuell wird in Forschungsprojekten – z.B. im Zusammenhang mit der Errichtung von Lärmschutzwänden an Bahnstrecken – die Gültigkeit dieser Grundlagen für hohe Lastwechselzahlen untersucht.

### 2.2.2 VSG/PVB/SGP

Während für Glas linear elastisches Materialverhalten für alle Bemessungssituationen angesetzt werden kann, ist das Verhalten der Zwischenlage von VSG stark abhängig von äußeren Einflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit oder Lastdauer. Während über einen langen Zeitraum vor allem die PVB-Folie untersucht wurde (vgl. [KUTTERER 2003], [SACKMANN 2008]) stehen nun vor allem neue Materialien wie z. B. die deutlich steifere Zwischenlage des Herstellers DuPont (in der Regel mit SG-Folie bezeichnet) oder Folien aus EVA (Ethylvinylacetat) im Fokus der Forschung ([BUCAK ET.AL. 2006], [VANIMPE ET AL. 2009]). Gerade die SG-Folie verspricht eine höhere Steifigkeit und eine bessere Resttragfähigkeit, der Laminationsprozess ist jedoch aufwändiger und anfälliger für Fehler und Störungen im Verbund.

### 2.2.3 Resttragfähigkeit

Hinsichtlich der Resttragfähigkeit gibt es zwei wesentliche Forschungsrichtungen: zum einen wird versucht, das Resttragfähigkeitsvermögen für bestimmte Anwendungsfälle, z.B. durch Einlegen von Netzen oder Gittern in die Zwischenlage, zu verbessern (vgl. [NEUGEBAUER 2005], [FEIRABEND 2010]), zum anderen werden Ansätze gesucht, das Resttragverhalten von Verbund(sicherheits)glas rechnerisch zu erfassen (vgl. z.B. [KOTT 2006], [FAHLBUSCH 2007]).

### 2.2.4 Bohrungen und Punkthalter

Aus bruchmechanischer Sicht sind Punkthalter, die in Bohrungen sitzen, ein sehr ungünstiger Fall, da hier einerseits das Glas durch die Bohrung geschwächt wird, und andererseits genau am Bohrungsrand Spannungskonzentrationen auftreten. So ist es nicht verwunderlich, dass diesem Bereich sehr viel Forschungsaufmerksamkeit gewidmet wird.

Die Ansätze sind hierbei sehr verschieden. Zum einen wird die Glasfestigkeit an der Bohrung untersucht (z.B. in [MANIATIS 2006], [SEDLACEK ET. AL. 2001]), zum anderen werden die Lastabtragungsmechanismen im Bohrungs- und Halterbereich untersucht ([ALBRECHTN 2004], [Seel 2012]) um daraus Bemessungskonzepte abzuleiten (vgl. z.B. [SIEBERTB 2005], [BEYER 2007], [SEEL ET AL. 2011])

Für Sonderfälle wie z.B. Senkkopfhalter sind weitere Untersuchungen notwendig (vgl. z.B. [HERRMANN 2010]).

### 2.2.5 Kleben

Wie oben beschrieben, ist das Thema Kleben im Glasbau derzeit sehr aktuell. Grundsätzlich ist Kleben für den Glasbau die ideale Verbindungstechnik, da durch die flächige Verbindung Spannungsspitzen vermieden werden, gleichzeitig – bei Verwendung entsprechender Klebstoffe – auch die Transparenz erhalten bleibt. Das Kernproblem ist dabei der Nachweis der Dauerhaftigkeit der Verbindung. Nur für sehr wenige Klebstoffe liegen langjährige Erfahrungen vor, und auch dabei zumeist nur bei vergleichsweise geringen Spannungen.

Die Forschung zum Thema Kleben im Glasbau lässt sich in zwei Richtungen unterteilen. Zum einen wird Grundlagenforschung mit verschiedenen Klebstoffen durchgeführt, mit dem Ziel die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln (vgl. z.B. [WELLER 2009], zum anderen werden Anwendungsfälle mit Blick auf eine mögliche Umsetzung mit Klebeverbindungen untersucht (z.B. in [PETERS 2006], [SCHADOW 2006]).

Ein weiterer Teilbereich des Klebens, der derzeit wieder in den Fokus rückt, ist der Randverbund von Isolierglasscheiben. Durch die immer häufigere Verwendung von sogenanntem Dreifach-Isolierglas haben sich die Beanspruchungen auf den Randverbund erhöht. Entsprechend herrscht ein Interesse seitens der Glashersteller, die Auswirkungen daraus auf den Kantenschubverbund und die Dichtigkeit von Isolierglaselementen zu untersuchen.

### **2.2.6 Aussteifung mit geklebten Elementen**

Ein weiteres großes Forschungsfeld im konstruktiven Glasbau ist die aussteifende und tragende Verwendung von Glas. Eine Umsetzungsmöglichkeit dazu ist die Verklebung der Scheibe mit dem Rahmen um so die Scheibe zur Schubaussteifung zu aktivieren. Dies wurde von [MOCIBOB 2008] für die Verbindung mit Punkthaltern und mittels Randverklebung und von [HUVENERS 2009] für verschiedene Varianten sehr schmaler Randverklebungen untersucht. Auch in [WELLERSHOFF 2006] wird die Randverklebung untersucht, zudem die Aussteifung durch Eckklotzung.

Dass diese Möglichkeit nicht nur für Stahlrahmen, sondern auch für Holz besteht, wird in [NIEDERMAIER 2005] gezeigt.

### **2.2.7 Stabilität bei Glasbauteilen**

Erste Untersuchungen zum Tragverhalten von druckbelasteten Bauteilen finden sich in [LIESS 2001], eine sehr umfangreiche Untersuchung aller wesentlichen Stabilitätsfälle für Tragelemente aus Glas ist in [LUIBLE 2004] gegeben. Das Beulverhalten von Glasscheiben wurde von [ENGLHARDT 2007] weiterverfolgt.

Die Knicksicherheit von Stützen wurde z.B. in [LIESS 2001] und [AMADIO ET AL. 2011] untersucht, in [KASPER2005] und [LINDNER ET AL. 2006] wird der Versagensfall Biegedrillknicken betrachtet.

In einem Forschungsprojekt an der RWTH Aachen werden derzeit die Möglichkeiten zur Standardisierung und Vereinfachung von Stabilitätsnachweisen von Glaselementen untersucht (vgl. [FELDMANN ET AL. 2010]).

### **2.2.8 Absturzsicherung**

Gegenstand der Forschung für absturzsichernde Verglasungen ist vor allem der rechnerische Nachweis. Bereits in [WÖRNER ET AL. 2005] bzw. [SCHNEIDER 2001] wurden die Grundlagen dazu geschaffen. Auch [BRENDLER 2007] widmet sich dieser Fragestellung. Dennoch wurden zur Übernahme der rechnerischen Verfahren zum Nachweis stoßbeanspruchter Scheiben in die [DIN18008] zusätzliche Versuche und Vergleichsberechnungen durchgeführt.

### **2.2.9 Hochdynamische Einwirkungen**

Seit 2001 widmet sich die Forschung im Bauwesen verstärkt dem Schutz der Infrastruktur und von Gebäuden vor terroristischen Angriffen, dabei besonders vor Angriffen durch Sprengkörper. Fassaden bilden hier als äußerste Hülle – im Falle einer Explosion außerhalb des Gebäudes – eine der ersten Barrieren gegen diese Angriffe und rückten entsprechend in den Fokus des Interesses. Dabei gilt es, die Gesamtstruktur der Fassade hinsichtlich der Energieabsorption zu optimieren. Gleichzeitig soll dabei das einzelne Glaselement nicht splitternd versagen, aber auch nicht auf Grund zu hoher Steifigkeit als Ganzes aus der Fassade gerissen werden. Diesen Fragestellungen widmen sich u.a. [SEICA ET AL. 2010], [GEBBEKEN ET AL. 2010] und [TEICH 2011].

### 2.2.10 Übersicht

Abschließend sollen die Forschungsarbeiten, die im direkten Kontext zu dieser Arbeit stehen kurz zusammengefasst dargestellt werden. Dazu gehören zunächst vor allem die Arbeiten, die sich dem Stabilitätsversagen von Scheiben widmen. Abbildung 2-1 zeigt die untersuchten Belastungsszenarien für die wesentlichen Arbeiten zu dieser Thematik.

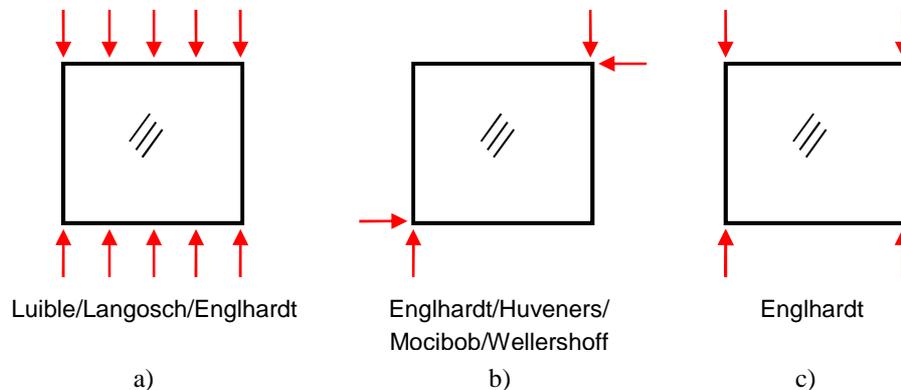


Abbildung 2-1: Untersuchte Belastungsszenarien

Dabei sind besonders [LUIBLE 2004], [ENGLHARDT 2007] und [FELDMANN ET AL. 2010] (Abbildung 2-1a) hervorzuheben, deren Ergebnisse als Vergleichsmöglichkeit zur Überprüfung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und benutzten numerischen Modelle genutzt werden.

[PETERS 2006] widmet sich in erster Linie der Untersuchung unterschiedlicher Klebeverbindungen, im Rahmen der Arbeit wurde jedoch auch der Prototyp einer Fassade entwickelt, bei dem die Tragfähigkeit und Steifigkeit durch die gemeinsame Wirkung von Glas und GFK erreicht wird. Der verwendete Ansatz dahinter ist entsprechend sehr ähnlich dem hier verfolgten Ziel, das Zusammenwirken von Stahl und Glas zur Lastabtragung zu nutzen.

Ein anderer Ansatz wird bei dem in [EEKHOUT ET AL. 2010] vorgestellten System gewählt. Hier wird eine Seilnetzfassade entworfen, bei der die tragenden Seile in Scheibenebene, also zwischen den Scheiben geführt werden. Dieses System stellt aber insofern einen Gegenpol zu dem in dieser Arbeit untersuchten System dar, als zur Spannung der Seile zu allen Seiten der Fassade, also auch über dieser ein massiver Baukörper vorhanden sein muss, während für das hier betrachtete System die Lasten in der Fassade nach unten gebracht werden sollen, ohne zusätzliche Vertikallasten auf das Gebäude zu übertragen.

## 2.3 Zusammenfassung

Im Hinblick auf die Untersuchungen in dieser Arbeit lässt sich zum Stand der Technik zusammenfassend feststellen, dass es nach jetzigem Stand weder in den derzeit eingeführten technischen Regeln, noch in der zukünftigen [DIN18008] Teil 1 – 6, noch im Bereich der Zulassungen Regelungen für in Scheibenebene belastete Glaselemente vorhanden sind. Auch die Berücksichtigung der aussteifenden Wirkung der Scheiben wird bislang ausgeschlossen.

Der Überblick über den Stand der Forschung verdeutlicht, dass das Interesse, Glasscheiben als tragende (Scheiben-) Elemente zu nutzen, groß ist, wie die Vielzahl an Forschungsarbeiten in diesem Bereich zeigt. So werden einerseits grundlegende Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten von Glaselementen (Trägern, Stützen, Scheiben) durchgeführt, als auch konkrete Anwendungen mit tragenden Glaselementen realisiert. Auf Grund dieser Entwicklung werden tragende Glaselemente auf lange Sicht auch zum Stand der Technik gehören werden und Eingang in die Normung finden werden.

### 3 System

Ein wesentlicher Anspruch dieser Forschungsarbeit ist es, die Untersuchungen auf Basis baupraktisch realistischer Randbedingungen durchzuführen. Um diese zur Verwendung in den Berechnungsmodellen einzugrenzen bzw. festzulegen, wird im Folgenden näher auf die verwendeten Materialien, Systemkomponenten, Lasten und auch auf die zu Grunde gelegten mechanischen Modelle eingegangen.

#### 3.1 Materialien

Um eine breite Anwendbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden für Stahl und Glas die jeweils geregelten Bauprodukte angenommen. Zu beiden Baustoffen gibt es, neben den in der Bauregelliste aufgeführten Normen, zahlreiche Veröffentlichungen, so dass im Rahmen dieser Arbeit auf eine ausführliche Darstellung der Eigenschaften und Regelungen dazu verzichtet werden soll. Im Folgenden wird daher nur auf die für die weiteren Erläuterungen maßgeblichen Besonderheiten eingegangen.

##### 3.1.1 Stahl

Für die detaillierten Angaben zum Werkstoff Stahl sei hier auf die [DIN18800] verwiesen. Für die numerischen Untersuchungen sind die wesentlichen Eigenschaften der E-Modul von  $210.000 \text{ N/mm}^2$  und die Querdehnzahl 0,3. Für die Versuche wurden kalt-geformte U-Profile des Werkstoffs S-235 verwendet, entsprechend mit einer charakteristischen (Mindest-) Zugfestigkeit von  $360 \text{ N/mm}^2$  und einer Streckgrenze von  $240 \text{ N/mm}^2$ .

##### 3.1.2 Glas

Für den Werkstoff Glas existiert kein ähnlich geschlossenes Regelwerk wie für Stahl. Wie beim Stahl sind die wesentlichen Eigenschaften für das FEM-Modell der E-Modul von  $70.000 \text{ N/mm}^2$  und die Querdehnzahl von 0,23 gemäß [TRLV]. Die gleichen Werte finden sich auch in der zukünftigen [DIN18008].

Folgende Bauprodukte aus Glas sind derzeit geregelt:

- Basiserzeugnisse nach [EN572-9]<sup>1</sup> (Floatglas, Drahtglas, Ornamentglas,...)
  - Einscheibensicherheitsglas (ESG) nach [DINEN12150-1]<sup>1</sup>
  - Heißgelagertes Einscheibensicherheitsglas (ESG-H)<sup>2</sup>
  - Verbundsicherheitsglas (VSG) nach [EN14449]<sup>1</sup>
  - Verbundglas (VG) nach [EN14449]<sup>1</sup>
  - Beschichtetes Glas nach [EN1096-4]<sup>1</sup>
  - Mehrscheibenisoliervglas nach [EN1279]<sup>1</sup>
  - Teilvorgespanntes Glas (TVG) gemäß AbZ
  - Verbundsicherheitsglas gemäß AbZ
- <sup>1</sup> mit Zusatzanforderungen gemäß Bauregelliste [BRL]  
<sup>2</sup> wie ESG, jedoch mit Zusatzanforderungen nach [BRL]

Für die einzelnen Bauprodukte die zulässigen Spannungen anzugeben ist ungleich aufwändiger als beim Stahl, da diese auch von der Einbausituation (Vertikal / „Überkopf“) und möglichen Oberflächenbehandlungen (z.B. Siebdruck) abhängen.

Hinzu kommt, dass sich durch die Einführung der [DIN18008] auch das einer Bemessung zu Grunde liegende Sicherheitskonzept ändert. Passend zur DIN [DIN1055-100] werden darin partielle Sicherheitsfaktoren verwendet mit einer entsprechenden Aufteilung auf Last- und Widerstandsseite. Eine umfassen-

de Darstellung würde hier den Rahmen sprengen. Etwas detaillierter wird darauf im Abschnitt 7.3.3 eingegangen.

Eine für das weitere Vorgehen wesentliche Eigenschaft des Glases ist das fehlende Plastizierungsvermögen, d.h. sein Spröbruchverhalten. Für monolithische Scheiben kann man vereinfachend davon ausgehen, dass jeder Bruch zu einem vollständigen Verlust der Tragfähigkeit führt. Für VSG muss zwischen verschiedenen Schädigungsgraden unterschieden werden, je nachdem ob, abhängig von der Anzahl der laminierten Scheiben, nur eine, mehrere oder alle Lagen gebrochen sind. Auch hierauf wird in Abschnitt 7 näher eingegangen.

Die Eigenschaften der Zwischenlage bei VSG hängen stark von äußeren Einflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Lastdauer ab. Da für eine genaue Erfassung des Materialverhaltens und die Anwendung für die jeweilige Bemessungssituation der Aufwand sehr hoch wäre und zudem hierzu zum Teil die Grundlagen fehlen, sind nach derzeitigem Stand zwei Grenzfälle zu untersuchen: kein Verbund und voller Verbund.

Für den ersten Fall können die Einzelscheiben der Dicke  $t_i$  wie lose übereinander liegend betrachtet werden. Für Berechnungen mit einer Ersatzscheibe ist dann eine Ersatzscheibendicke  $t_{id}$  (auch ideelle Dicke genannt) anzusetzen:

$$t_{id, \text{ ohne Verbund}} = \sqrt[3]{\sum t_i^3} \quad (3-1)$$

Zur Ermittlung der resultierenden Spannungen sind diese zurückzurechnen mit:

$$\sigma_i = \sigma_{id} \cdot \frac{t_i}{t_{id}} \quad (3-2)$$

Ergeben sich durch eine größere Steifigkeit der Scheibe höhere Beanspruchungen (z. B. bei Isoliergläsern), so ist auch das Verhalten bei vollem Verbund zu untersuchen. Die dazu anzunehmende Steifigkeit entspricht einer Scheibe gleicher Dicke mit monolithischem Querschnitt. Die Ersatzscheibendicke  $t_{id}$  ergibt sich entsprechend zu:

$$t_{id, \text{ voller Verbund}} = \sum t_i \quad (3-3)$$

Eine ausführliche Erläuterung zur Ermittlung der resultierenden Steifigkeit unter Ansatz anderer (als voller oder kein Verbund) Schubmoduli findet sich z.B. in [SIEBERT 2001].

### 3.1.3 Zwischenmaterial

Die Materialien, die zwischen Glas und Stahl angeordnet werden, haben im Wesentlichen folgende Aufgaben und Anforderungen zu erfüllen:

- Ausreichende Festigkeit,
- Toleranzausgleich,
- Vermeidung von Spannungsspitzen,
- Beständigkeit gegen Feuchtigkeit,
- Beständigkeit gegen Temperatureinflüsse und –wechsel
- Beständigkeit gegen UV-Strahlung.

Die Anforderungen stehen zum Teil im Widerspruch zueinander. Während mit weicheren Materialien die Last besser verteilt wird und größere Unebenheiten ausgeglichen werden können, lassen sich mit steiferen Zwischenlagen größere Kräfte (je Fläche) übertragen.

In der Praxis haben sich deshalb zwei Materialien durchgesetzt und bewährt. Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (kurz EPDM) wird üblicherweise für flächige Auflagerung verwendet (z.B. für Linienlager oder unter den Tellern von Punkthaltern), Polyoxymethylen (kurz POM) wird für konzentrierte Lasteinleitungen (z.B. bei Senkkopfhaltern) verwendet. Weitere Angaben über die Eignung von Zwischenlagen finden sich z.B. in [ENGLHARDT 2006].

Als Zwischenmaterial können auch die Klebstoffe bei geklebten Verbindungen betrachtet werden. Analog zu den beschriebenen Zwischenlagen aus EPDM und POM finden sich auch hier sowohl weiche Klebstoffe, die mit einer Dicke von bis zu mehreren Millimetern eingesetzt werden (z.B. Silikone), als auch sehr steife dünne Klebeverbindungen (z.B. auf Acrylatbasis). Der Einsatz der Letztgenannten wird dadurch erschwert, dass eine aufwändige Vorbereitung der Klebefläche notwendig ist. Weitere Angaben zu Zwischenmaterialien sind in Abschnitt 3.2.4 beschrieben.

## 3.2 Aufbau

### 3.2.1 Gesamtsystem

Abbildung 3-1 zeigt den Aufbau des Systems schematisch mit den einzelnen Komponenten und den verwendeten Bezeichnungen.

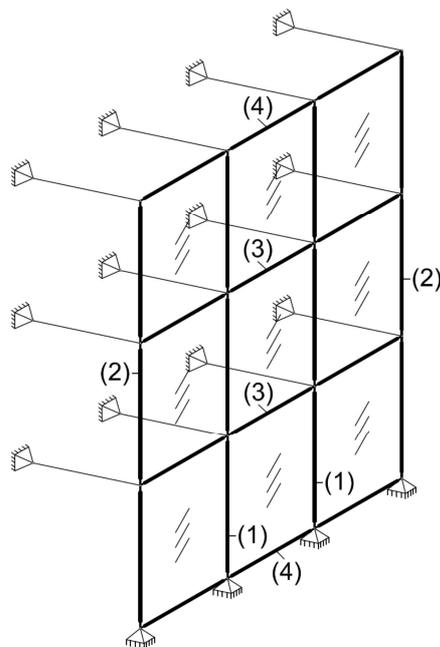


Abbildung 3-1: Systemkomponenten

Die Ständerprofile (1) und (2), die zwischen den vertikalen Kanten der Scheiben abgeordnet sind, werden mit Randbalken bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen äußeren (2) und inneren (1) Randbalken ist notwendig, da zwischen den Glasscheiben jeweils zwei Randbalken – je einer je Scheibenkante – angeordnet sind und sich für die Betrachtung als einteiliges Ständerprofil hierfür andere Querschnittswerte ergeben.

Die Anordnung durchlaufender Randbalken ist konstruktiv möglich, geht aber entweder mit einer Vorfertigung über die gesamte Höhe einher oder bedeutet eine aufwändige Montage vor Ort. Für die Ausbildung eines Stoßdetails für die übereinander angeordneten Randbalken ist in Anbetracht der angestrebten Filität des Systems nur eine Schweißnaht vorstellbar, da Schraubverbindungen die Ebenmäßigkeit der Fassadenfläche stark beeinträchtigen würden.

Zwischen den horizontalen Stößen sind – zunächst – Querriegel (3) und (4) angeordnet. Für die Ausbildung der Querriegel sind sehr unterschiedliche Möglichkeiten vorstellbar. Zur Minimierung der Ansichtsfläche können die Querriegel nur zur Verbindung der beiden Randbalken einer Scheibe dienen, zur Maximierung der Steifigkeit sind hier auch Klemmkonstruktionen möglich, die eine Übertragung von Biegemomenten über die horizontale Kante der Scheibe ermöglichen.

### 3.2.2 Vertikale Elemente

Unter vertikalen Elementen sind in diesem Zusammenhang alle Elemente zu verstehen, die eine Lastabtragung von oben nach unten ermöglichen: die Scheibe und die Randbalken. Für die Lastaufteilung gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Fall a: Vertikale Lasten werden nur über das Stahlprofil abgetragen, d.h. das Glas dient nur der Versteifung des Stahlprofils.
- Fall b: Durch konstruktive Ausbildung erfolgt eine Lastaufteilung zwischen Scheibe und Randbalken.
- Fall c: Vertikale Lasten werden an den äußeren Kantenabschnitten konzentriert in das Glas eingeleitet (Klotzung), so dass die Stahlprofile der Aussteifung und der Lastabtragung im Falle defekter Scheiben dienen.
- Fall d: Die Einleitung der vertikalen Lasten erfolgt über die Scheibenkante.

In Abbildung 3-2 sind die möglichen Lastpfade schematisch dargestellt.

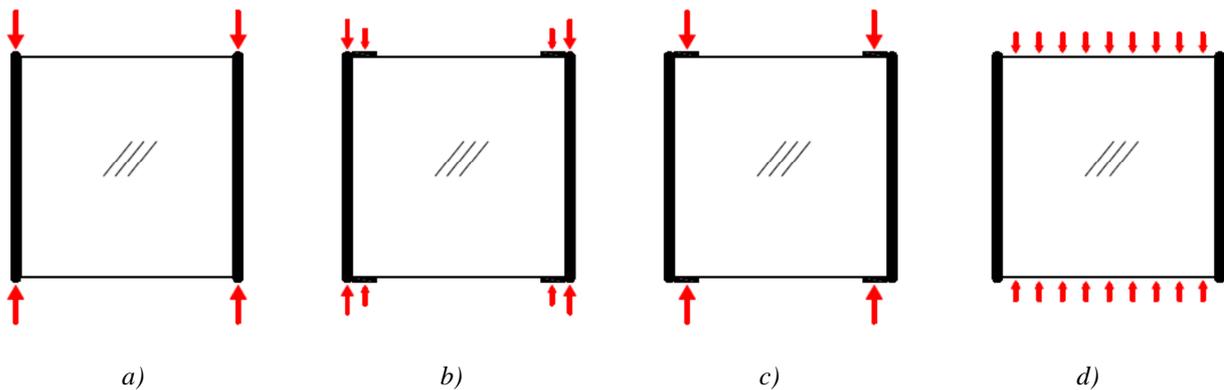


Abbildung 3-2: Lastpfade

Am schwierigsten umzusetzen ist Fall b), da die Lastaufteilung zwischen Scheibe und Randbalken sehr stark von den Steifigkeiten der verwendeten Zwischenlagen abhängig ist. Abbildung 3-3 zeigt eine Skizze aus der Frühphase dieser Arbeit. Sie entstammt den Überlegungen zu einer Art „Einkammerung“ der Scheibe in Längsrichtung, d.h. die ecknahe horizontale Scheibenkante und der jeweilige Randbalken bekommen eine gemeinsame „Kopfplatte“, auf welche die Vertikallast wirkt. Über die Zwischenlagen wird die Last auch auf die Glaskante verteilt.

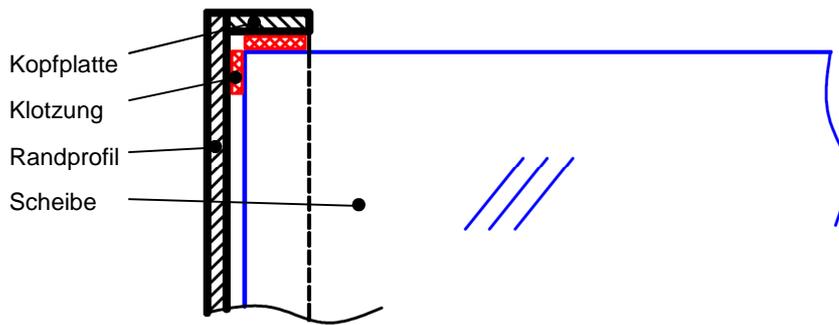


Abbildung 3-3: „Einkammerung“ der Scheibe in das Randprofil

Die tatsächliche Lastaufteilung ist bei diesem System nur sehr ungenau bestimmbar, da z.B. schon minimale Veränderungen der Geometrie die Lasteinleitung ins Glas vollständig ausschließen können (Spalt).

Die grundsätzliche Möglichkeit, die Last aufzuteilen, wird in den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit aber dennoch berücksichtigt, allerdings unter Annahme einer willkürlichen Aufteilung der Lasten auf Scheibe und Randbalken.

### 3.2.3 Horizontale Elemente

Die Querriegel als horizontale Verbindungselemente können mehrere Funktionen übernehmen:

- Übertragung der vertikalen Lasten von Scheibe zu Scheibe,
- Übertragung des Biegemomentes zwischen den Scheiben,
- Lagerung bzw. Versteifung des horizontalen Scheibenrandes.

Theoretisch ist eine Übertragung der vertikalen Lasten von Scheibe zu Scheibe direkt, d.h. auch ohne Querriegel möglich. Da ein direkter Kontakt von Glas zu Glas aber auszuschließen ist, muss zwischen den Scheiben für eine Lastübertragung über die gesamte Kantenlänge eine Zwischenlage angeordnet werden. Für die konzentrierte Lasteinleitung in einen Teilbereich der Scheibenkante, ist eine Klotzung vorzusehen. Beides, Zwischenlage und Klotzung sind dauerhaft gegen Herausrutschen zu sichern. In der Regel wird man folglich auf die Anordnung eines Hilfsprofils auch für diesen Fall nicht verzichten können.

Für die Übertragung eines Randmomentes an den Scheibenkanten ist – zur wirksamen Einspannung des Scheibenrandes – ein großes Glaseinstandsmaß notwendig. Dies jedoch steht im Widerspruch zu den angestrebten geringen Ansichtsbreiten der Profile.

Besonders für breite Scheiben kann eine Versteifung des horizontalen Scheibenrandes notwendig werden, um die Verformungen im Feldbereich der Scheibe zu reduzieren. Da in der Regel sowohl Winddruck als auch –sog berücksichtigt werden muss, ist auch hierfür ein die Glaskante umfassendes Profil notwendig.

### 3.2.4 Verbindungsvarianten

Für die Verbindung von Randbalken/Querriegel und Scheibe sind zunächst mehrere Varianten naheliegend. In Betracht kommen

- Klotzung/Formschluss,
- Klebung,
- Verguss und
- Klemmung.

Als Klotzung wird üblicherweise das Ausfüllen der Spalte zwischen Glas und Unterkonstruktion mit dünnen Plättchen oder Keilen bezeichnet. Die wesentliche Anforderung an die Klötze ist dabei einerseits weich genug zu sein, um Spannungsspitzen im Glas zu verhindern, andererseits aber steif genug zu sein,

um einen Kontakt von Glas und Stahl zu verhindern (vgl. Abschnitt 3.1.3). Im Allgemeinen werden die Klötze an den Scheibenrändern über die Dicke der Scheibe angeordnet, und verhindern so den Kontakt zu Elementen der Unterkonstruktion in Scheibenebene. Im Gegensatz dazu wird hier der Begriff aber auch für die Zwischenlagen zwischen Randbalken und Scheibenfläche (entlang der Scheibenränder) verwendet. Grundsätzlich erfolgt die Lastübertragung dabei durch Formschluss, d.h. der Randbalken umgreift die Scheibenkante, die Zwischenlage verhindert einerseits den Kontakt und andererseits das Vorhandensein von Spiel zwischen Randbalken/Querriegel und Scheibe. Eine mögliche Schubübertragung ist nur über Reibung möglich.

Mit einer – nachzuweisenden – Klebung sind im Gegensatz zur Klotzung auch Verbindungen ohne Formschluss möglich. Durch die Klebung wird sowohl Druck, Zug als auch Schub übertragen. Je nach Anordnung und Geometrie der Elemente können dadurch auch zweiteilige Profile verwendet werden, da die Steiner-Anteile durch die Schubübertragung aktiviert werden.

Die Variante „Verguss“ setzt wie die Klotzung einen Formschluss durch die Profilgeometrie des Randbalkens/Querriegels voraus. Das Vergießen von Zwischenräumen wird im Bereich des Konstruktiven Glasbaus z.B. bei Punkthaltern zwischen Bolzen und Bohrungsrand eingesetzt. Dadurch lassen sich die zur Montage notwendigen Toleranzen im eingebauten Zustand ausgleichen und ein Kraftschluss herstellen. Spezielle Mörtel verhindern durch eine geeignete Festigkeit und Härte zudem Spannungsspitzen bei der konzentrierten Lasteinleitung.

Durch die Klemmung wird die Einspannwirkung der Scheibe in den Randbalken/Querriegel – im Vergleich zur Klotzung (wie unter 3.2.3 beschrieben) – verbessert. Zur Minimierung der Einstandstiefe wird für die Klemmung in der Regel die Glasscheibe durchbohrt und die Flansche der Klemmung durch die Glasscheibe miteinander verschraubt.

Hinsichtlich der Bedeutung der Einspannung für das System muss zwischen der Untersuchung des Lastverformungsverhaltens und der Bestimmung der kritischen (Vertikal-) Last unterschieden werden. Abbildung 3-4 zeigt die Wirkung der Einspannung durch die Querriegel und die damit verbundene Koppelung der Verdrehung an den horizontalen Scheibenkanten. Abbildung 3-4a zeigt die Situation ohne Momentenübertragung, in Abbildung 3-4b sind die Verformungen nur zwischen den Scheiben gekoppelt, in Abbildung 3-4c sind auch die Ränder eingespannt. Die Verformung reduziert sich dabei um fast 80 %.

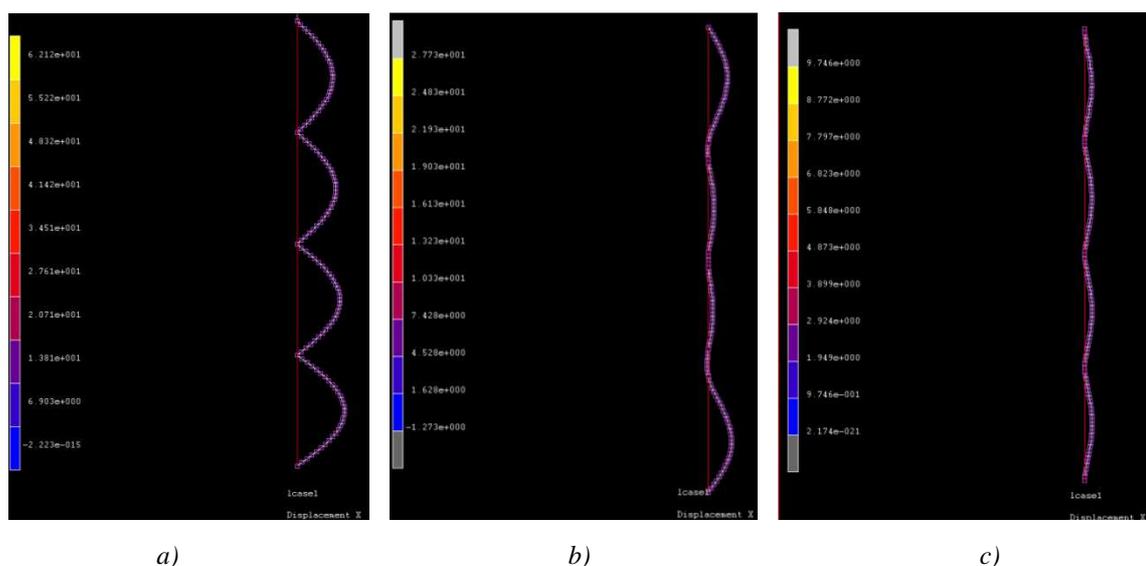


Abbildung 3-4: Wirkung der Momentenübertragung

Im Gegensatz zur durch Wind hervorgerufenen Verformungsfigur ist die Eigenform durch die Befestigung zum Baukörper an den Scheibenecken dergestalt, dass sich die Knicklänge für die Randbalken –für den Ansatz als Knickstab – als Abstand zwischen den Fixpunkten an den Scheibenecke ergibt, unabhängig von der Wirksamkeit der Kopplung der Verformung durch die Querriegel. In Abbildung 3-5 ist dies verdeutlicht.

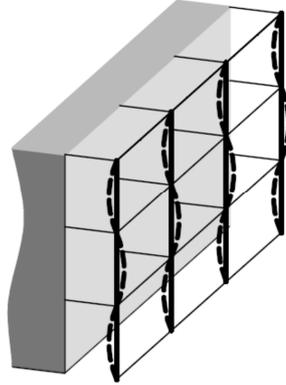


Abbildung 3-5: Versagensform für Vertikallasten auf den Randbalken

Auf die Bedeutung der einzelnen Verbindungsvarianten für das hier untersuchte System und das numerische Modell wird in Abschnitt 4.1.3.3 näher eingegangen.

### 3.3 Äußere Lasten

Ausgehend von einer Fassadenanwendung ist Wind die maßgebende Einflussgröße. Für den Fall der geneigten bis horizontalen Anwendung kommt Schnee hinzu. Insgesamt lassen sich diese aber zu einer resultierenden äußeren Last zusammenfassen. Im Folgenden werden daher zunächst alle Lasten, die senkrecht zur Scheibenebene wirken, mit  $q$  bezeichnet, unabhängig von der Herkunft aus Wind und/oder Schnee. Eine Differenzierung erfolgt in Abschnitt 7 – Bemessung. Lasten in Scheibenebene, die auf das System oder einen betrachteten Teil des Systems wirken, werden mit  $F$  bezeichnet.  $F$  wird in der Regel aus dem Eigengewicht der jeweils über dem betrachteten System liegenden Bauteile herrühren, kann aber grundsätzlich auch veränderliche Einwirkungen aus anderen Bauwerksteilen enthalten. Eine Differenzierung ist hier erst bei den Bemessungsansätzen erforderlich.

Das anzusetzende Windszenario ist nicht unerheblich für die Bemessung, da entweder je "Spalte" der Fassade nur eine einheitliche Windlast anzusetzen ist oder je Feld eine andere. Eine pauschale Aussage ist hier nicht möglich, da gerade bei größeren Fassaden, die umliegende Bebauung einen wesentlichen Einfluss auf die Verteilung der Windlasten auf das Gebäude hat. Eine feldweise in unterschiedliche Richtung wirkende Belastung kann die ungünstigste Vorbelastung für die Betrachtung einer "Spalte" darstellen. Bei Betrachtung von jeweils nur einem Element ist die Windaufteilung unerheblich, da die durch mögliche Horizontalriegel übertragene Randverdrehung bei gleicher Windsog- wie Winddrucklast im ungünstigsten Fall die Drehbehinderung durch den Horizontalriegel wieder aufhebt. Dieser Fall entspricht dem ungelagerten bzw. verdrehungsunbehinderten Querrand, wie er im einzelnen Feld ohnehin berücksichtigt ist.

### 3.4 Vorverformungen

Für die Randbalken als Stahlbauteil ist eine Berücksichtigung von Imperfektionen auf Grundlage der [DIN 18800] möglich. Für den Fall der Lasteinleitung über den Randbalken ist dieser das direkt beanspruchte Bauteil. Entsprechend müssen hier Vorverformungen entsprechend den Anforderungen an stabilitätsgefährdete Bauteile berücksichtigt werden.

Da stabilitätsgefährdete Bauteile aus Glas bislang nicht geregelt sind, gibt es noch keine Regeln zur Bestimmung der anzusetzenden Vorverformungen. Eine direkte Übertragung der Werte aus den Bemessungsregeln anderer Materialien, z.B. Stahl, ist kaum zu begründen, da die Herstellungsverfahren nicht vergleichbar sind. Um diese Lücke zu füllen, wurde in [BELIS ET AL. 2010] eine Versuchsreihe ausgewertet, in der eine große Anzahl von Probekörpern unterschiedlicher Glasarten und Scheibengeometrie von verschiedenen Herstellern hinsichtlich der vorhandenen Vorverformung untersucht wurden. Als Ergebnis wird der Ansatz einer Vorverformung von  $L/400$  vorgeschlagen, wobei einzelne Proben diesen Wert überschritten haben. Seitens der Produktspezifikation gibt es eine Begrenzung der Vorverformung nur für TVG und ESG, die bei allen Proben eingehalten wurde. Ferner wurde festgestellt, dass bei VSG die Vorverformung stark vom Hersteller, jedoch kaum von der Art der Zwischenlage abhängig ist.

Für das betrachtete Gesamtsystem können die Amplituden der Vorverformungen ausgehend von den Werten für Glas und Stahl berücksichtigt werden. Die ungünstigste Vorverformungsfigur für Untersuchungen nach Theorie II. Ordnung ist die – skalierte – zugehörige Eigenform.

### 3.5 Systemreduktion und Parametrisierung

Eine Fassade ist in aller Regel eine individuelle Lösung für ein bestimmtes Gebäude und richtet sich meist in erster Linie nach architektonischen Vorgaben und muss den klimatischen und technischen Randbedingungen des betreffenden Gebäudes gerecht werden. Diese Individualität der Lösungen ist einerseits ein bedeutendes Charakteristikum des Bauwesens, andererseits verhindern die zahlreichen variierenden Randbedingungen eine Allgemeingültigkeit von statischen Berechnungen und konstruktiven Betrachtungen.

Ziel dieser Arbeit ist die möglichst allgemeine Betrachtung der beschriebenen Fassadenkonstruktion. Als ersten Schritt gilt es daher, das Gesamtsystem „Fassade“ auf ein repräsentatives (Teil-) System mit definierten Randbedingungen zu reduzieren. Dazu wird die offensichtliche Modularität des Gesamtsystems genutzt. Das in Abbildung 3-6 dargestellte System lässt sich auch als zusammengesetzte Struktur betrachten, wobei eine Komponente aus einer Scheibe mit jeweils den „halben“ Zwischenprofilen ( $\frac{1}{2} \cdot EI_V$ ,  $\frac{1}{2} \cdot EA_V$  bzw.  $\frac{1}{2} \cdot EI_H$ ,  $\frac{1}{2} \cdot EA_H$ ) bzw. den entsprechenden Randprofilen besteht. Dieses Teilsystem wird im Folgenden als Modul bezeichnet.

Berücksichtigt man zudem die von Stockwerk zu Stockwerk zwischen Druck und Sog alternierende Belastung der Fassade als ungünstige Laststellung, die in einer Verformungsfigur resultiert, wie sie in Abbildung 8-3b dargestellt ist, so wird deutlich, dass die Steifigkeit der horizontalen Riegelprofile zwischen den Modulen – für diesen Lastfall – unerheblich ist, da die relative Verdrehung der angrenzenden Scheibenkanten null ist. Zum gleichen Ergebnis kommt man auch durch Betrachtung der ersten Eigenform des Systems für vertikale Lasten (analog Abbildung 3-5).

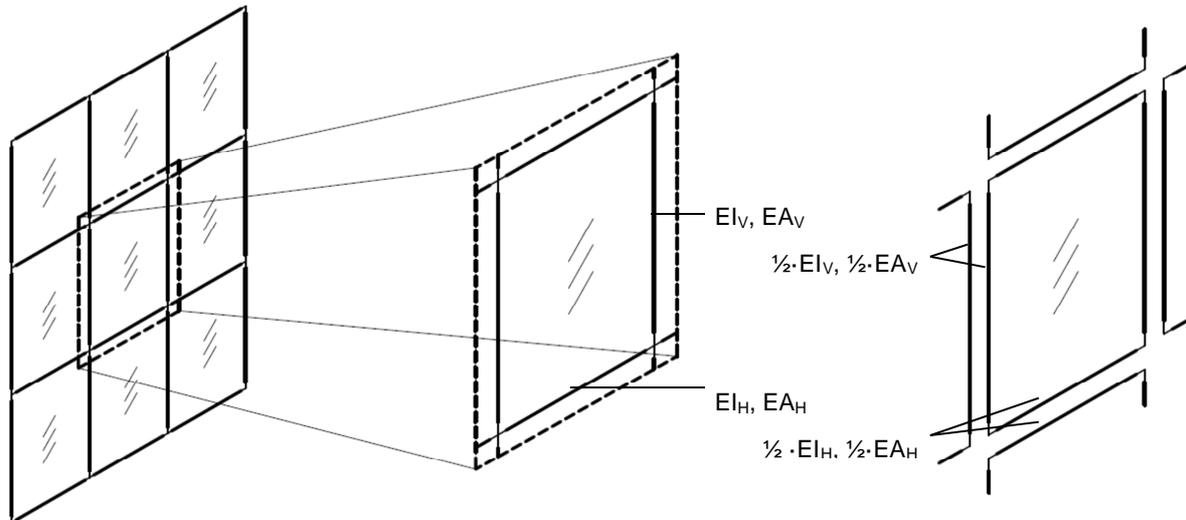


Abbildung 3-6: Teilsystem als „Modul“

Für die weiteren Betrachtungen des Moduls wird die Randbedingung der Einspannung bzw. die drehelastische Lagerung der horizontalen Ränder des Moduls – sowohl für den Randbalken als auch für die Scheibe – vernachlässigt.

Da sich die folgenden Untersuchungen im Wesentlichen auf das Modul beziehen, wird die je Modul eigentlich halbierte Steifigkeit der vertikalen Randbalken im Folgenden als  $EI_{RB}$  bzw.  $EA_{RB}$  bezeichnet (vgl. Abbildung 3-7).

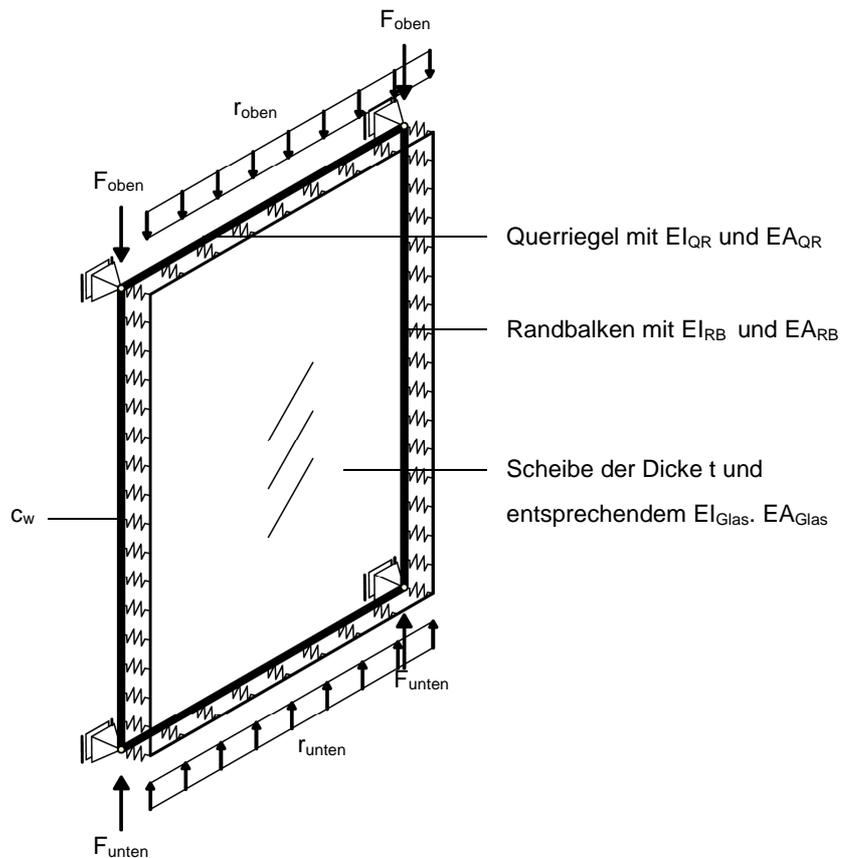


Abbildung 3-7: Modul mit Randbedingungen

Ausgehend von dem beschriebenen Modul lassen sich mit definierten Randbedingungen, Werkstoff- und Bauteileigenschaften und zugehörigen Abmessungen numerische Berechnungen durchführen, um das

Tragverhalten des Systems zu untersuchen. Da das System aber nicht nur für einen speziellen Anwendungsfall, sondern für ein möglichst breites Anwendungsspektrum untersucht werden soll, sind zahlreiche Berechnungen mit unterschiedlichen Kombinationen der einzelnen Eigenschaften, Randbedingungen und Abmessungen notwendig. Im Detail wird darauf in Abschnitt 5 eingegangen, an dieser Stelle sollen zunächst die genannten Eigenschaften als Parameter definiert werden, um die nachfolgenden Betrachtungen übersichtlich und nachvollziehbar zu machen. Die wesentlichen Parameter sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst:

Tabelle 3-1: Systemparameter

Parameter	Einheit	Erläuterung
B	mm	Breite der Glasscheibe in der Ansicht
H	mm	Höhe der Glasscheibe in der Ansicht
t	mm	(ideelle) Dicke der Glasscheibe im Querschnitt
$E_{\text{Glas}}$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul der Glasscheibe
$I_{\text{RB}, y}$	mm <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment des Randbalkens für Biegung aus der Scheibenebene heraus
$I_{\text{RB}, z}$	mm <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment des Randbalkens für Biegung in der Scheibenebene
$E_{\text{RB}}$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul des Randbalkens
$A_{\text{RB}}$	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche des Randbalkens
$I_{\text{QR}, y}$	mm <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment des Querriegels für Biegung aus der Scheibenebene heraus
$I_{\text{QR}, z}$	mm <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment des Querriegels für Biegung in der Scheibenebene
$E_{\text{QR}}$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul des Querriegels
$c_w$	N/mm <sup>2</sup>	Steifigkeit der Verbindung zwischen Randbalken bzw. Querriegel und Glas senkrecht zur Scheibenebene
$c_{\varphi, \text{Glas}}$	Nmm/rad	Drehfedersteifigkeit der Verbindung durch die Querriegel bzw. zum unteren und oberen Abschluss
$c_{\varphi, \text{RB}}$	Nmm/rad	Drehfedersteifigkeit der Verbindung der Randbalken untereinander
F	N	Vertikallast als Einzellast
r	N/mm	Vertikallast als Linienlast
q	N/mm <sup>2</sup>	Belastung der Scheibe senkrecht zur Scheibenebene (z.B. aus Wind)
w	mm	Verschiebung senkrecht zur Scheibenebene

Die Dicke der Scheibe wird mit t bezeichnet. In der Praxis wird es sich bei Konstruktionen analog zu den hier untersuchten in der Regel um Scheiben aus VSG handeln. Da das Tragverhalten des Systems im Hinblick auf die Scheibe im Wesentlichen durch ihre Biegesteifigkeit beeinflusst wird, wäre für VSG statt der tatsächlichen Dicke die Ersatzdicke  $t_{\text{id}}$  anzusetzen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Für die nachfolgenden Untersuchungen wird aber zunächst nicht zwischen VSG und monolithischen Glas unterschieden, so dass die Dicke einheitlich mit t bezeichnet wird. In Abschnitt 7.4 wird dieser Aspekt differenzierter betrachtet.

Aus den in Tabelle 3-1 aufgeführten Parametern lassen sich weitere Kenngrößen ableiten, die der einfacheren Darstellung der Zusammenhänge dienen. Diese sind in Tabelle 3-2 aufgeführt:

Tabelle 3-2: Abgeleitete Systemparameter

Parameter	Bedeutung	Einheit	Erläuterung
$I_{\text{Glas}}$	$B \cdot t^3 / 12$	$\text{mm}^4$	Eigentlich $I_{y, \text{Glas}}$ , vereinfacht zu $I_{\text{Glas}}$
$EI_{\text{Glas}}$	$E_{\text{Glas}} \cdot I_{\text{Glas}}$	$\text{Nmm}^2$	Vereinfachung der Darstellung
$EI_{\text{RB}}$	$E_{\text{RB}} \cdot I_{\text{RB}}$	$\text{Nmm}^2$	Vereinfachung der Darstellung
$EA_{\text{RB}}$	$E_{\text{RB}} \cdot A_{\text{RB}}$	N	Vereinfachung der Darstellung
a	$B / H$	-	Seitenverhältnis
B/t	$B / t$	-	Querschnittsverhältnis
s	$EI_{\text{RB}} / EI_{\text{Glas}}$	-	Steifigkeitsverhältnis Randbalken zu Scheibe

### 3.6 Mechanische Grundformen

Bei dem beschriebenen System handelt es sich mechanisch betrachtet um ein Flächentragwerk, das für die Flächenlast  $q$  als Platte trägt und für die Belastungen  $F$  und  $r$  als Scheibe wirkt. Die Lagerung der Glasscheibe erfolgt dabei auf elastischen Randbalken mit – in  $z$ -Richtung – unverschieblichen Eck- bzw. Endpunkten.

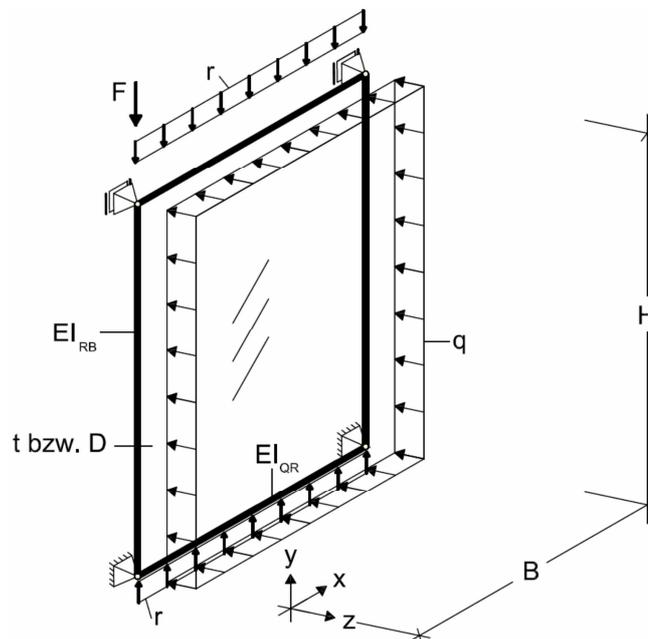


Abbildung 3-8: System und Belastung – Bezeichnungen und Konventionen

Für die Untersuchung des Tragverhaltens, speziell im Hinblick auf die Bemessung, ist das gleichzeitige Wirken der Belastungen in und senkrecht zur Scheibenfläche ausschlaggebend, d.h. eine Betrachtung des Systems nach Theorie II. Ordnung. Im Folgenden soll daher nur kurz auf die mechanischen Grundmodelle eingegangen werden, bei welchen die Scheiben- und Plattentragwirkung unabhängig voneinander betrachtet werden und die in der Literatur ausgiebig behandelt sind.

### 3.6.1 Scheibentragwirkung

Bei Betrachtung der Scheibentragwirkung unabhängig von der Querbelastung und der Vernachlässigung von Vorverformungen gilt es, ein Verzweigungsproblem zu lösen. Dabei ist die Art der Lasteinleitung wesentlich.

Bei einer Lasteinleitung mit gleichmäßiger Verteilung über die Scheibenkante tritt als Versagensform, abhängig von der Steifigkeit der Randbalken, Beulen oder Knicken auf. Für den Fall sehr steifer Randbalken und Querriegel ( $EI_{RB} \rightarrow \infty$ ,  $EI_{QR} \rightarrow \infty$ ) wird das Feld beulen (Abbildung 3-9a), für den Fall ohne bzw. biegeweicher Randbalken ( $EI_{RB} \rightarrow 0$ ) wird die Scheibe knicken (Abbildung 3-9b). Mit zunehmender Breite der Scheiben ( $B \gg H$ ) schwindet der Einfluss der Randbalkensteifigkeit und die Eigenformen von Knicken und Beulen nähern sich an. Dieser Effekt wird als knickstabähnliches Verhalten bezeichnet.



Abbildung 3-9: Versagensformen für unterschiedliche Randbedingungen

Der Fall konzentrierter Lasteinleitung über einen Teilbereich der Scheibenkanten (vgl. 3.2.2) ist zwar kein klassischer Beulfall, wurde aber schon mehrfach untersucht. Für den Fall der Navierlagerung von Glasscheiben (vierseitig linienförmig, gelenkig) wurde er in [ENGLHARDT 2007] behandelt und Beulkurven dafür entwickelt (Abbildung 3-10).

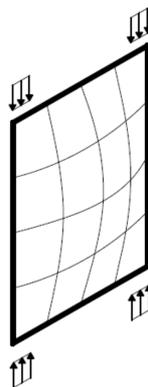


Abbildung 3-10: Versagensformen für konzentrierte Lasteinleitung

Bei Lasteinleitung direkt in den Randbalken handelt es sich nicht mehr um Beulproblem im eigentlichen Sinne, da die Scheibe nicht mehr direkt als solche belastet wird, sondern nur noch als Versteifung des Randbalkens dient. In diesem Fall reduziert sich das System auf zwei Randbalken mit einer durch die mitwirkende Wirkung der Glasscheibe vergrößerten Steifigkeit  $EI_{RB}^*$  (Abbildung 3-11). Auf diesen Ansatz wird in 6.2 näher eingegangen.

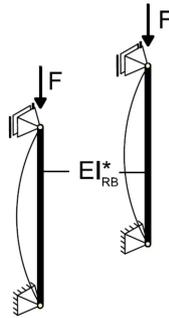


Abbildung 3-11: Ersatzsystem

### 3.6.2 Plattentragwirkung

Mit der Abbildung der Plattentragwirkung lässt sich der Verformungs- und Spannungszustand der Scheibe in Abhängigkeit der Querbelastung  $q$  ermitteln. Im Vorgriff auf die Ergebnisse dieser Arbeit sei an dieser Stelle bereits erwähnt, dass sich für die Bemessung des untersuchten Systems eine Möglichkeit durch Handrechnung bietet, wenn die Verformungen und Spannungen aus der maßgebenden Querbelastung  $q$  für die Mitte der Scheibe und in der Mitte der vertikalen und horizontalen Scheibenkanten bekannt sind. Aus diesem Grund wird auf die Abbildung des Plattentragverhaltens im Folgenden näher eingegangen.

Die Differentialgleichung für die gleichförmig belastete ebene Platte lautet

$$\frac{\delta w}{\delta x^4} + 2 \cdot \frac{\delta w}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta w}{\delta y^4} = \frac{q}{D} \quad (3-4)$$

mit Plattensteifigkeit  $D$

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (3-5)$$

Für die Lösung der inhomogenen partiellen Differentialgleichung gibt es diverse Methoden (z.B. Entkopplung der DGL mittels Reihenentwicklung; vgl. z.B. [VIDEKHINA 2005]). Zur Bestimmung der Integrationskonstanten sind die Randbedingungen zu formulieren und einzusetzen.

Für die oben beschriebene Platte sind dabei folgende Randbedingungen möglich (nach [SZILARD 1974] mit Bezeichnungen nach Abbildung 3-12) und  $h=t$ :

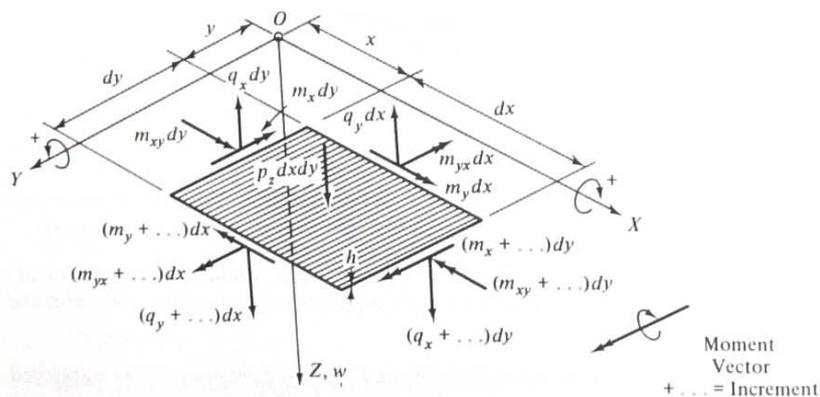


Abbildung 3-12: Bezeichnungen am inkrementellen Element nach [SZILARD 1974]

Gelenkige Lagerung (Navier-Lagerung;  $EI_{RB} \rightarrow \infty$  bzw.  $EI_{QR} \rightarrow \infty$ ; hier am Rand  $x = a$ ):

$$(w)_{x=a} = 0 \quad (3-6)$$

$$(m_x)_{x=a} = \left( \frac{\delta w}{\delta x^2} + \nu \cdot \frac{\delta w}{\delta y^2} \right)_{x=a} = 0 \quad (3-7)$$

Ungestützter Rand (für  $x = a$ ):

$$(v_x)_{x=a} = \left( \frac{\delta w}{\delta x^3} + (2 - \nu) \cdot \frac{\delta w}{\delta x \delta y^2} \right)_{x=a} = 0 \quad (3-8)$$

$$(m_x)_{x=a} = \left( \frac{\delta w}{\delta x^2} + \nu \cdot \frac{\delta w}{\delta y^2} \right)_{x=a} = 0 \quad (3-9)$$

Elastische Lagerung am Rand  $x = a$ :

$$(m_x)_{x=a} = \left( \frac{\delta w}{\delta x^2} + \nu \cdot \frac{\delta w}{\delta y^2} \right)_{x=a} = 0 \quad (3-10)$$

$$(w)_{x=a} = \rho^{-1} \left( \frac{\delta w}{\delta x^3} + (2 - \nu) \cdot \frac{\delta w}{\delta x \delta y^2} \right)_{x=a} = 0 \quad (3-11)$$

mit  $\rho$  als Feder- oder Verschiebungssteifigkeit

Die Randbedingung nach Gleichung (3-11) kann für den Randbalken der Biegesteifigkeit  $EI$  formuliert werden als

$$\left( EI \frac{\delta w}{\delta y^4} \right)_{x=a} = \pm D \cdot \left( \frac{\delta w}{\delta x^3} + (2 - \nu) \cdot \frac{\delta w}{\delta x \delta y^2} \right)_{x=a} = 0 \quad (3-12)$$

mit  $D$  nach Gleichung (3-5)

Mit Hilfe dieser Randbedingungen kann ein Gleichungssystem formuliert werden, mit dessen Hilfe die Integrationskonstanten der gesuchten Funktion  $w(x,y)$  bestimmt werden können. Darin sind weiterhin folgende Parameter vorhanden:  $EI_{QR}$ ,  $EI_{RB}$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $D$  bzw.  $t$  und  $q$ . Die Anzahl der Parameter zeigt, dass die vollständige Angabe der relevanten Lösungen ein eigenes Tabellenwerk erzeugen würde, zumal die Lösungen für jeweils drei Punkte ermittelt werden müssen. In der Regel ist es daher praktikabler, die Verformungen und Spannungen der Platte für die Belastung aus  $q$  durch ein einfaches FEM-Programm (z.B. SJ-MEPLA) zu bestimmen. Für bestimmte Geometrien und Steifigkeitsverhältnisse sind die Lösungen z.B. in [SZILARD 1974] oder [PILKEY 1994] angegeben.

### 3.6.3 Kombinierte Tragwirkung

Auf die Lösung der Differentialgleichung für kombinierte Beanspruchung (in und senkrecht zur Scheibenebene / Platten und Scheibentragwirkung) z.B. nach [PETERSEN 1982]

$$D \cdot \left( \frac{\delta w}{\delta x^4} + 2 \cdot \frac{\delta w}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta w}{\delta y^4} \right) = N_x \frac{\delta w}{\delta x^2} + 2 \cdot N_{xy} \frac{\delta w}{\delta x \delta y} + N_y \frac{\delta w}{\delta y^2} + q(x,y) \quad (3-13)$$

mit

$D$  nach Gleichung (3-5),

$N_x$ ,  $N_y$  als Normalkräfte und

$N_{xy}$  als Schubkraft am Schnittpunkt des inkrementellen Elements

wird nicht näher eingegangen, da eine geschlossene Lösung nur für sehr bestimmte Randbedingungen existiert. Wie leicht zu ersehen ist, lassen sich aus Gleichung (3-13) sowohl die Plattengleichung ( $N_i = 0$ ) als auch die Beulgleichung ( $q = 0$ ) ableiten.

Für den Fall der Lasteinleitung direkt in den Randbalken, d.h. einer Reduktion auf einen Stab mit Normal- und Querbelastung, ergibt sich die Differentialgleichung nach [PETERSEN 1982] zu:

$$EI \frac{\delta w}{\delta y^4} + F \frac{\delta w}{\delta y^2} = p(y) \quad (3-14)$$

Für den Fall mit konstantem EI und F ist die Lösung in Abschnitt 6.2.1 angegeben.

### 3.6.4 Proportionen

Alle dargestellten mechanischen Grundformen lassen sich durch bezogene Kenngrößen abbilden. In 3.5 wurde die Parametrisierung des untersuchten Systems dargestellt und auch die Kennwerte  $a = B/H$  und  $s = EI_{RB}/EI_{Glas}$  bereits eingeführt. Da die Berechnung mit der Methode Finiter Elemente an die Eingabe konkreter Abmessungen gebunden ist, wird als Ausgangswert die Höhe H des Systems vorgegeben. Alle anderen Kenngrößen lassen sich anhand der Parameter nach 3.5 daraus bestimmen. Eine Übertragbarkeit bzw. Skalierbarkeit auf andere Ausgangswerte für H unter Beibehaltung der jeweiligen Parameter wird auf Grund der Gültigkeit für die mechanischen Grundmodelle auch für das untersuchte System ohne weiteren Nachweis unterstellt.

## 3.7 Bauphysikalische Aspekte

Bei Einfachverglasungen sind die bauphysikalischen Anforderungen vergleichsweise unproblematisch, da die Wärmedämmung, bedingt durch die gute Wärmeleitfähigkeit von Glas, ohnehin ungenügend ist. Bei Isolierverglasungen jedoch können die Verbindungsteile Wärmebrücken bilden mit der Gefahr der Tauwasserbildung an der warmen Innenseite und den bekannten Folgeproblemen.

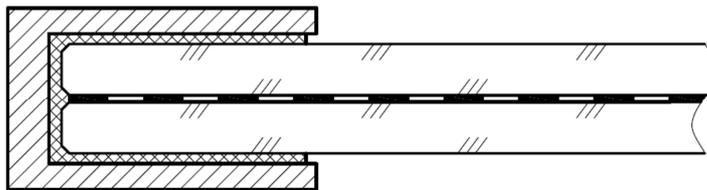


Abbildung 3-13: Prinzipskizze Verbundprofil

Für Einfachverglasungen ist die Ausbildung des Randbalkens als U-Profil nahe liegend, da hier sowohl der Formschluss einfach erfolgt, als auch durch die Wirkung als (Gesamt-) Profil eine hohe Biegesteifigkeit entsteht.

Was zunächst selbstverständlich erscheint, wird bei Betrachtung von Isolierverglasungen zum Problem. Denn der Steg des U-Profils, der einerseits selbst einen erheblichen Anteil zur Biegesteifigkeit (für  $M_y$ ) leistet, sorgt durch die Verbindung der Flansche für die Aktivierung der „Steiner-Anteile“ derselben. Eine Durchtrennung des Stegs im Sinne einer thermischen Trennung, also das Einfügen einer Wärmeflussbarriere verhindert beides und sorgt so für eine erhebliche Reduzierung der Tragfähigkeit des Randbalkens. Eine direkte Wärmebrücke durch das Stahlprofil kann auf Grund dessen guter Wärmeleitfähigkeit für Isolierverglasungen nicht akzeptiert werden. Für Isolierglasscheiben müssen daher andere Lösungen gefunden werden, um eine ausreichende Gesamttragfähigkeit zu erreichen.

## 4 Numerische Untersuchungen

### 4.1 Modell

In den folgenden Abschnitten wird die Abbildung der zu untersuchenden Struktur mit den beschriebenen Randbedingungen als Finite-Elemente-Modell erläutert.

#### 4.1.1 Programm

An der Universität der Bundeswehr München stehen diverse Finite-Element-Programme zur Verfügung. Im Bereich des Konstruktiven Glasbaus wird hier vorwiegend mit MarcMentat – aktuell Version 2010 – gearbeitet, da dieses Programm einerseits alle notwendigen strukturmechanischen Zusammenhänge abbilden kann, zudem aber im Bereich der Kontaktmodellierung über Algorithmen verfügt, mit welchen sich die Kraftübertragung zwischen weichen und steifen Materialien sehr gut abbilden lässt. Dies ist besonders für Modelle mit Punkthaltern sehr wichtig, da hier die Spannungsverläufe stark von dem Verhalten der Zwischenmaterialien abhängig sind.

#### 4.1.2 Randbedingungen

Unter Randbedingungen sind im Zusammenhang mit der Modellbildung die Kriterien zu verstehen, die das Modell erfüllen muss, um die zu untersuchende Fragestellung in geeigneter Weise abzubilden. Im Hinblick auf die Untersuchung möglicher Traglasten heißt dies insbesondere, dass das Modell Ergebnisse liefern muss, die „auf der sicheren Seite“ liegen, d.h. die nicht zum Überschätzen der Tragfähigkeit des untersuchten Systems führen.

Gleichzeitig ist bei der Anwendung der Finite Elemente Methode (FEM) darauf zu achten, die Anzahl der verwendeten Elemente und Systemparameter nicht zu groß werden zu lassen, um die Rechenzeit so gering wie möglich zu halten. Andererseits führen zu komplexe Systeme leicht zu Interpretationsproblemen bei den Ergebnissen, da der gegenseitige Einfluss der vielen Parameter nicht mehr ohne weiteres quantifiziert werden kann.

Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, sind die Glasscheiben seitlich in Stahl(-U)-Profilen gelagert. In der Ausführung kann diese Verbindung sehr unterschiedlich aussehen. Die Lastübertragungsmechanismen von Klotzung, Verguss, Klemmung oder Verklebung können im Detail sehr komplex und auch sehr unterschiedlich sein, jedoch muss hierbei differenziert werden zwischen lokalen Effekten einerseits und der Wirkung auf die Gesamtstruktur andererseits. Relevant für die Modellierung sind dabei ausschließlich solche Einflüsse, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtstruktur haben und solche, die auf Grund der lokalen Effekte eine Schädigung der Glasscheibe verursachen können, welche zum Ausfall der gesamten Scheibe führen können und somit wieder einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtsystem haben.

Als relevante Einflüsse werden betrachtet:

- Abmessungen der Glasscheibe ( $B$ ,  $H$  und  $t$ )
- E-Modul der Scheibe ( $E_{\text{Glas}}$ ) und des Randbalkens ( $E_{\text{RB}}$ )
- Biegesteifigkeiten von Randbalken und Querriegel ( $EI_{\text{RB}}$ ,  $EI_{\text{QR}}$ )
- Dehnsteifigkeit des Randbalkens ( $EA_{\text{RB}}$ )
- Steifigkeit der Verbindung Glas-Stahl ( $c_w$ )
- Belastung der Scheibe senkrecht zur Oberfläche (z.B. durch Wind) ( $q$ )
- Geometrische Imperfektionen ( $w_0$ )

- Anschlusssteifigkeiten der Profile an die Unterkonstruktion ( $c_{wu}$ ,  $c_{\varphi}$ )

Nicht berücksichtigt werden dagegen

- Einspanneffekt der Verbindung Stahl-Glas
- Schubübertragung zwischen Stahl und Glas
- Biegesteifigkeit/Momentenübertragung der Verbindung Glas-Glas über Horizontalstreben

Der Einspanneffekt für das Glas im Stahlprofil hängt sehr von der Ausführungsvariante (Klotzung, Klebung, Klemmung oder Verguss) ab. Grundsätzlich ist die Einspannung umso wirksamer, je größer die Einstandtiefe des Glases in das Stahlprofil ist. Dieses Maß bestimmt aber gleichzeitig maßgeblich die Ansichtsbreite des Profils in der Fassade und wird deshalb so gering wie möglich gehalten. Gleichzeitig ist zur Aktivierung dieses Effekts ein torsionssteifer Anschluss bzw. eine torsionssteife Verbindung der Stahlelemente notwendig. Da diese aber nur an den jeweiligen Ecken angeschlossen werden sollen, ist der Beitrag der Einspannwirkung als nachrangig zu beurteilen. Analog gilt dies für die Momentenübertragung an den Glasquerrändern durch Horizontalprofile.

Soll für die Zwischenlagen, über ihre Funktion als Abstandhalter hinaus, auch eine Übertragung von Schubspannungen – v.a. aus Reibung – berücksichtigt werden, gilt es diese zu quantifizieren. Hierzu wurden von [HERRMANN 2012] Untersuchungen für einen möglichen Ansatz der Reibung durchgeführt. Hierin kommt er zu dem Ergebnis, dass allein die Einflüsse aus Temperatur und Feuchtigkeit eine zu große Streuung der Reibwerte bedingen, so dass ein zuverlässiger Mindestreibwert nicht angegeben werden kann. Hinzu kommen die variablen Belastungsverhältnisse aus Wind- und Vertikallast, so dass schlussendlich auf den Stand der Technik zurückgegriffen werden kann bzw. muss, demzufolge ein Ansatz der Reibung nicht zulässig ist. Die günstige Wirkung der Reibung wird daher im Modell nicht berücksichtigt. Für die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche wird daher PTFE (Polytetrafluorethylen, besser bekannt unter dem Produktnamen Teflon des Herstellers DuPont) als Zwischenlage verwendet, da dies im Kontakt mit Glas ein ähnlich steifes und gutmütiges Verhalten zeigt wie POM, aber gleichzeitig durch seinen sehr geringen Reibbeiwert den Einfluss der Reibung minimiert.

Bei den Untersuchungen zur Reibung wurde ein weiterer Effekt deutlich, der bisweilen vernachlässigt wird. Für dünne Zwischenlagen mit einer Querkontraktionszahl nahe 0,5, also z.B. auch für EPDM, ergibt sich ein erheblicher Unterschied in der effektiven Steifigkeit der Zwischenlage abhängig davon, ob an den Kontaktflächen Reibung auftritt. Verdeutlichen lässt sich dieser Effekt mit den Extremfällen „keine Reibung“ und „keine Relativverschiebung“. Im ersteren Fall kann sich die Zwischenlage an den Kontaktflächen frei verschieben, d. h. es tritt die idealtypische Stauchung mit dem üblichen E-Modul des Materials als Steifigkeit auf. Für hohe Reibwerte, im Extremfall also ohne Relativverschiebung an den Kontaktflächen, muss die Verformung auf Grund der annähernden Volumenkonstanz ( $\nu \approx 0,5$ ) durch ein Ausbauen der Zwischenlage erfolgen. Bei dünnen Zwischenlagen führt dies zu einer Erhöhung der effektiven Steifigkeit gegenüber der Materialsteifigkeit bis zu drei Größenordnungen [POPOV]. Für die Betrachtungen dieser Arbeit kann dieser Effekt jedoch vernachlässigt werden, da durch eine erhöhte effektive Steifigkeit der Zwischenlage die Verformungen senkrecht zur Scheibenebene reduziert würden, also auch im Hinblick auf die Verformungen nach Theorie II. Ordnung einen günstigen Einfluss hätte.

Für den derzeitigen Stand der Technik (SSG nach ETAG, vgl. Abschnitt 2.1) sind die ansetzbaren Schubspannungen bei Verklebungen sehr gering. Zusätzlich kommt die Fragestellung der Dauerhaftigkeit auf, die auch durch die Forschung für Klebstoffe mit hohen Festigkeiten noch nicht abschließend geklärt ist. Entsprechend dürfen nach aktuellem Stand der Regelungen weder Klebung noch Reibung statisch angesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.1).

Für die hier untersuchten Systeme, bei welchen die Mittelebenen von Glas und Randbalken in einer Ebene liegen, ist die Dehnung und Verschiebung der in Kontakt kommenden Grenzflächen von beiden Elementen gleich groß, so dass hier kein Schub auftritt. Für die Tragfähigkeit bleibt daher der Ansatz der Verklebung ohne Einfluss, es wird daher auf die Modellierung der Schubverbindung Stahl-Glas verzichtet.

Berücksichtigt man die dargestellten Einschränkungen, bleibt – mechanisch gesehen – als Interaktion zwischen Stahl und Glas nur die Kraftübertragung durch Kontakt über das Zwischenmaterial.

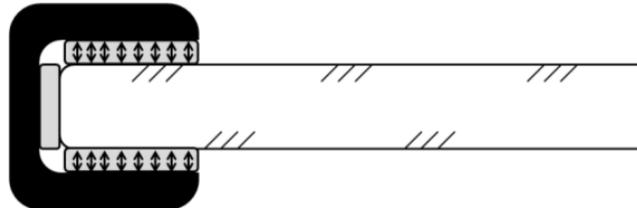


Abbildung 4-1 - Kraftübertragung zwischen Stahl und Glas

Das System lässt sich folglich vereinfachen auf das Randprofil als Biegeträger, das mit der Scheibe als Plattenelement gekoppelt ist. Im Zuge der für die Abbildung als FEM-Modell notwendigen Diskretisierung lässt sich die Kopplung durch eine Feder darstellen, deren Federsteifigkeit die Steifigkeit der Zwischenlage auf der diskretisierten Fläche entspricht. Abbildung 4-2 zeigt schematisch die Umsetzung der Kopplung zwischen Stahl und Glas im Modell.

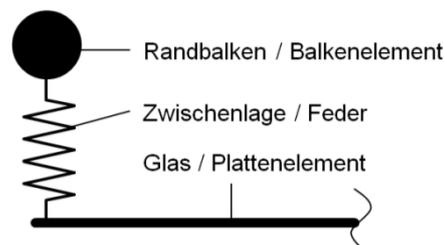


Abbildung 4-2 – Schema der Kopplung von Randbalken und Glasscheibe

Durch die Abbildung der Zwischenlage als Feder wird einerseits die Verschiebung normal zur Scheibenebene von Randbalken und Scheibe richtig gekoppelt und gleichzeitig sichergestellt, dass zwischen Randbalken und Glas keine Kräfte in Scheibenebene (Schubkräfte) übertragen werden, da die Feder hier als Pendelstab wirkt.

### 4.1.3 Elementansätze

#### 4.1.3.1 Glasscheibe

Bei der Glasscheibe handelt es sich im mechanischen Sinn um eine Platte und eine Scheibe gleichermaßen, da Belastungen sowohl in als auch normal zur Scheiben-/Plattenebene auftreten. Durch die im Vergleich zur Fläche geringe Dicke lässt sich die Glasscheibe als „ebene Schale“ beschreiben, für die die Scheibe im FEM-Modell wird in diesem Zusammenhang die Abbildung mit Elementen verstanden, die nur über Knoten in einer – auch gekrümmten – Ebene definiert sind. Das gewählte „Shell-Element Nr. 75“ aus MarcMentat wird über vier Knoten mit den jeweiligen  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Koordinaten definiert. Jeder Knoten hat sechs Freiheitsgrade, jeweils Verschiebung und Verdrehung in bzw. um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse. Über die dem Element zugewiesene Dicke und den Materialparametern ergibt sich die Steifigkeit. Als Ergebnis liefert das Element in seiner Ebene Verzerrung und Krümmung sowie die Schubverzerrung.

Ferner lassen sich die daraus resultierenden Spannungen und Spannungskomponenten über sog. Layer in verschiedenen, gleichmäßig zur Elementebene verteilten Abständen über die angegebene Dicke ausgeben.

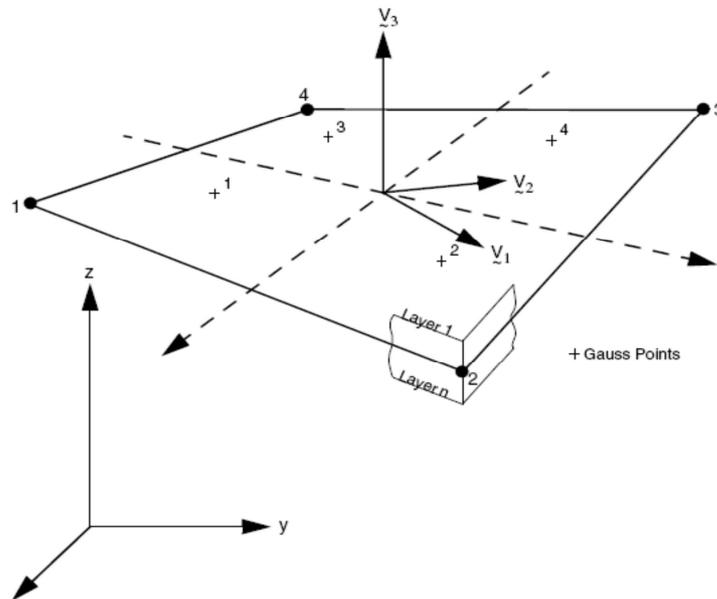


Abbildung 4-3: Shell-Element 75 [MSC-VOLB]

#### 4.1.3.2 Stahl-Randprofil

Das Stahl-Profil wirkt für die Glasscheibe als elastische Randlagerung, bzw. als elastischer Randbalken. Wie oben erläutert, wird die Verbindung zwischen Stahl und Glas nicht als biegesteif betrachtet. Die maßgeblichen Eigenschaften des Randbalkens sind folglich nur seine Dehn- und Biegesteifigkeiten. Diese Anforderungen werden bei Marc Menat vom Elementtyp „98“ erfüllt. Es handelt sich dabei um ein gerades Balkenelement, dem entweder Querschnittsformen zugeordnet werden können oder für das die Querschnittswerte als Fläche  $A$  und Trägheitsmomente  $I_{xx}$  und  $I_{yy}$  direkt eingegeben werden können. Die Dehnsteifigkeit für das Element ergibt sich somit zu  $E \cdot A$  und die Biegesteifigkeiten zu  $E \cdot I_{xx}$  bzw.  $E \cdot I_{yy}$ . Die Elementformulierung berücksichtigt zudem die Torsionssteifigkeit mit  $(I_{xx} + I_{yy}) \cdot E / (2 + 2 \cdot \nu)$ . Dies hat jedoch für das hier beschriebene Modell keinen Einfluss, da das Element nur an seinen Knoten durch externe Querkräfte belastet wird und die Verdrehung durch die Federn nicht mit der Verdrehung der Scheibe gekoppelt ist.

Bei der Elementformulierung ohne Querschnittsform können die Abstände des Schwerpunkts zu den Randfasern nicht berücksichtigt werden, d.h. aus den ermittelten Biegemomenten können keine Spannungen ermittelt werden. Aus diesem Grund erübrigt sich auch die Formulierung des Werkstoffgesetzes als ideal-elastisch-ideal-plastisch, da der Übergang vom elastischen zum plastischen Verhalten vom Programm mit dieser Elementformulierung nicht bestimmt werden kann. Dem Stahl-Randprofil wird entsprechend das rein elastische Materialverhalten zu Grunde gelegt. Die tatsächlichen Querschnittsbeanspruchungen können im Rahmen der Bemessung nach Abschnitt 7.4 direkt ermittelt werden.

#### 4.1.3.3 Zwischenlage

Die Zwischenlage wird im Modell als Feder abgebildet, wobei sich die Federsteifigkeit aus der Fläche, der Dicke und dem E-Modul der angenommenen Zwischenlage ergibt:  $c_w = E \cdot A / t$ . Für übliche Zwischenlagen liegen die Steifigkeiten im Bereich von  $100 \text{ N/mm}^2$  (EPDM) bis  $7500 \text{ N/mm}^2$  (PTFE). Die Dicke wird meist zwischen 1 und 3 mm betragen. Damit variiert die Federsteifigkeit zwischen  $33 \text{ N/mm}^3 \cdot A$  und  $7500 \text{ N/mm}^3 \cdot A$ .  $A$  steht dabei für die Fläche, die je Feder diskretisiert wird. Bei

MarcMentat können Federn direkt zwischen zwei Knoten angeordnet werden, die übertragene Kraft ergibt sich zu  $F_{\text{Feder}} = c \cdot (u_2 - u_1)$  mit  $c$  als frei zu definierende Federkonstante und  $u_2$  und  $u_1$  als Verschiebungen der verbundenen Knoten in Richtung des jeweilig anderen Knotens (sog. „true direction“). Der Vorteil dieser Formulierung ist, dass die Steifigkeit der Feder Verbindung unabhängig von der Länge der Federelemente ist, sondern nur von der Relativverschiebung der beiden gekoppelten Knoten abhängt.

#### 4.1.4 Lagerung

Die Scheibe selbst ist nur über die Federelemente mit dem Randbalken verbunden. Zur Erreichung der numerischen Stabilität ist sie zudem unten an zwei Knoten vertikal und an den horizontalen Rändern jeweils mittig horizontal gelagert.

Der Randbalken ist, gleich einem Einfeldträger, statisch bestimmt gelagert, das untere Ende fest, das obere Ende vertikal verschieblich. Abbildung 4-4 zeigt das Modell mit seinen Randbedingungen. Um eine rechnerisches Umkippen des Randbalkens zu verhindern, ist an Randknoten zusätzlich in Achsrichtung die Torsion behindert.

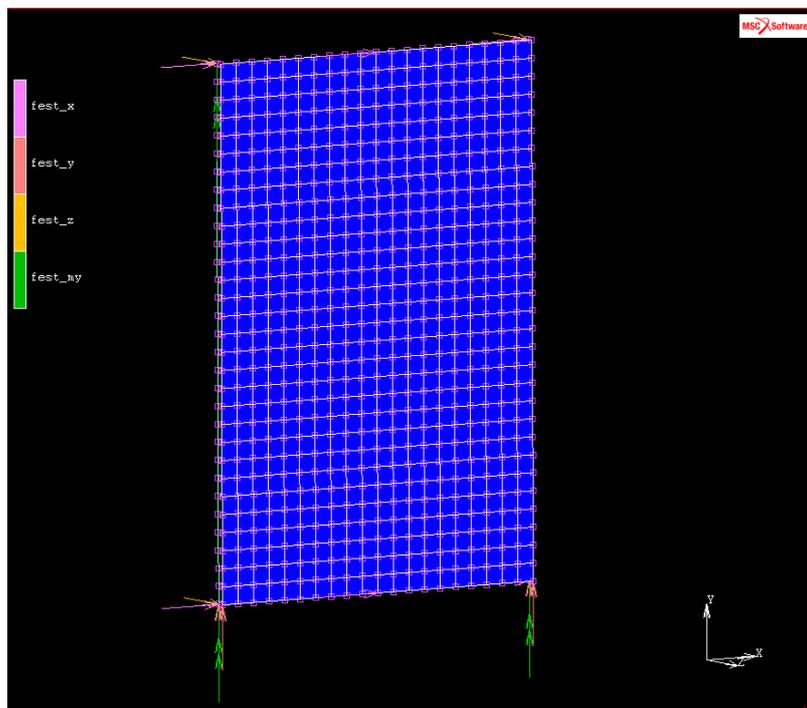


Abbildung 4-4: Randbedingungen des Modells

Das in der Abbildung dargestellte Koordinatensystem wird in dieser Weise für alle Rechnungen beibehalten; die Scheibe liegt in der x-y-Ebene, der Randbalken in z-Richtung versetzt „dahinter“.

Die beschriebene Lagerungssituation gilt genau so nur für das Hauptmodell, mit dem die bemessungsrelevanten Rechnungen durchgeführt werden. In den Modellen für Vergleichs- und Verifizierungsberechnungen werden zum Teil andere Randbedingungen gesetzt, auf die aber in den jeweiligen Abschnitten eingegangen wird.

#### 4.1.5 Äußere Lasten

Im Modell werden Windlast und vertikale Lasten berücksichtigt. Die Windlast kann direkt als Flächenlast (Druck bzw. Sog) auf die Flächenelemente aufgebracht werden. Die vertikale Belastung wird in den meisten Fällen als Punktlast definiert. Je nach untersuchter Situation werden diese auf die Randknoten der Balkenelemente aufgebracht oder als Lasteinleitung in die Scheibe auf mehrere Knoten am Rand der

Scheibe verteilt. Für Vergleichsberechnung zur Verifizierung des Modells wird ferner die Lasteinleitung über eine gleichmäßige Verschiebung der oberen Randknoten der Scheibe in Abhängigkeit einer vertikalen Gesamtlast modelliert.

Wind- und Vertikallast werden schrittweise aufgebracht. Auf diese Weise kann das Last-Verformungsverhalten für verschiedene Laststufen in einem Rechengang ermittelt werden. Gleichzeitig trägt das stufenweise Aufbringen der Last zur numerischen Stabilität der Berechnung bei.

#### 4.1.6 Ergebnisse

Bei Ermittlung der kritischen Last bzw. eines Verzweigungsfaktors sind als Ergebnis vornehmlich der Zahlenwert des Faktors und die Verformungsfigur von Interesse. Bei kombinierten Belastungen aus Wind- und Vertikallast werden sowohl die Verformungen von Glas und Randbalken ermittelt, als auch die Spannungen im Glas. Die Spannungen im Randbalken können auf Grund der einfachen Elementformulierung ohne Querschnittform nicht ausgegeben werden. Für einen definierten Querschnitt lassen sich diese allerdings aus Normalkraft und Biegemomenten ermitteln.

Die Spannungen im Glas lassen sich über eine einzustellende Anzahl an „Layern“ in verschiedenen Ebenen parallel zur Glasmittelsebene ausgeben. Relevant sind hierbei in erster Linie die Spannungen an beiden Oberflächen, dabei besonders die Hauptzugspannungen, da diese für das Glas bemessungsrelevant sind.

## 4.2 Validierung und Verifizierung

In dem beschriebenen Modell sind die relevanten Randbedingungen hinsichtlich Lagerung und Belastung berücksichtigt. Die verwendeten Elemente sind in der Lage, die benötigten Informationen in der Ausgabe zu liefern. Von daher kann zunächst grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass das Modell in der Lage ist, die in Abschnitt 3 beschriebene Problemstellung abzubilden. Auf eine detaillierte Validierung des Berechnungsmodells wird jedoch verzichtet, da diese ohnehin im Rahmen der Verifizierung einiger Fälle erfolgt.

Das Vertrauen in Ergebnisse aus Berechnungen, die mit Hilfe der FEM durchgeführt wurden, ist heutzutage leider – gerade auch unter den Anwendern – nicht besonders groß. Grund dafür sind häufig die mittlerweile oft sehr komplexen Modelle, die eine solche Fülle an Parametern bieten, dass bei entsprechender Wahl oder Einstellung nahezu jedes Ergebnis „produziert“ werden kann. Gerade bei vergleichenden Berechnungen zu bereits vorliegenden Daten (z. B. Versuche, Messungen) kann der Modellierungsprozess leicht zu einem Kalibrierungsprozess geraten. Damit soll keineswegs gesagt werden, dass dadurch absichtlich falsch gerechnet wird, vielmehr ist es selbst für den erfahrenen Benutzer oft nicht möglich, das „wahre“ Modell zu identifizieren, wenn keine echten Referenzwerte vorliegen. Die genannte „Kalibrierung“ ist für viele Einsatzzwecke ein probates Mittel, um zuverlässig rechnende Modelle zu erhalten, solange dabei sichergestellt ist, dass die Übertragbarkeit auf die neue Fragestellung, die mit Hilfe der Berechnung untersucht werden soll, gewährleistet ist. Als Beispiel aus dem Konstruktiven Glasbau sei hier die Berechnung punktgehaltener Systeme genannt. Auf Grund des Zusammenspiels lokaler und globaler Effekte, dem Einsatz unterschiedlicher visko-elastischer Zwischenmaterialien und der Spannungskonzentration am Bohrlochrand gibt es bei der Bemessung kaum eine Alternative zum Einsatz der FEM. Da es sich dabei in der Regel um eine Bemessungsaufgabe und nicht um Vergleichsberechnungen handelt, müssen absolute Spannungswerte zuverlässig ermittelt werden. Um dies sicherzustellen wurden im Rahmen von mehreren Forschungsarbeiten Verifizierungsverfahren entwickelt, die in einem schrittweisen Verfahren anhand von Vergleichslösungen die Eignung des Modells überprüfen. Wichtig ist dabei, dass

die einzelnen Schritte eine getrennte, d.h. einzelne Untersuchung und Verifizierung der maßgeblichen Parameter ermöglichen (vgl. z.B. [SIEBERTB]).

Die Implementierung eines Verfahrens für die Anwendung in der DIN 18008 dauert bis heute an. Der betriebene Aufwand verdeutlicht die Komplexität und die Bedeutung einer zuverlässigen Verifizierung von FEM-Modellen für die Anwendung in Bemessungsaufgaben.

Das oben beschriebene Modell für die rechnerischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit besteht im Wesentlichen aus den Elementen der Scheibe, des Randbalkens und den verbindenden Federn. Für alle diese Elemente wird lineares Material- bzw. Elementverhalten angesetzt (vgl. 3.1). Diese gezielt einfache Modellierung hat den Vorteil, dass einerseits numerische Probleme minimiert werden, andererseits unter speziellen Randbedingungen eine direkte Überprüfung des Modells durch analytische Vergleichsrechnung des mechanischen Modells möglich ist.

Wählt man die Biegesteifigkeit des Randbalkens  $EI_{RB} \rightarrow \infty$  und bringt als Belastung eine gleichmäßig auf die Scheibenbreite verteilte Last in Scheibenebene auf, so erhält man die klassische Beulsituation (vgl. Zeile 1 in Tabelle 4-1). Setzt man die Biegesteifigkeit dagegen mit „0“ an, so erhält man eine Knicksituation analog Eulerfall 2 (vgl. Zeile 2 in Tabelle 4-1). Für beide Fälle gibt es analytische Lösungen. In [Englhardt2007] wird die Beulsituation mit einer an den Ecken der Scheibe konzentrierten Lasteinleitung untersucht. Auch diese Lösung wird zum Vergleich herangezogen (vgl. Zeile 3 in Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Vergleichslösungen

	<b>Belastung/Lagerung</b>	<b>Ergebnis der Vergleichslösung</b>	<b>Ergebnis im FEM-Modell</b>
1	Beulen - Scheibe b x h: 1000 mm x 1000 mm - t = 6 mm - Gleichmäßige Last am Querrand - $EI_{RB} \rightarrow \infty$	$P_{crit} = 52,5 \text{ kN}$ mit $P_{crit} = k \cdot \pi^2 \cdot D / b$ $D = E \cdot t^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$ $k = 4$	$P_{crit, num} = 53,7 \text{ kN}$
2	Knicken - Scheibe b x h: 1000 mm x 2000 mm - t = 12 mm - Gleichmäßige Last am Querrand - $EI_{RB} \rightarrow 0$	$P_{ki} = 24,9 \text{ kN}$ mit $P_{ki} = \pi^2 \cdot E \cdot I / s_k^2$ $s_k = h$	$P_{ki, num} = 25,2 \text{ kN}$
3	Beulen mit konzentrierter Lasteinleitung - Scheibe b x h: 1000 mm x 1000 mm - t = 6 mm - Lasteinleitung konzentriert am Rand - $EI_{RB} \rightarrow \infty$	$P_{crit} = 76 \text{ kN}$	$P_{crit, num} = 74,9 \text{ kN}$

Die Ergebnisse zeigen, dass das gewählte Modell in der Lage ist, die mechanischen Zusammenhänge richtig abzubilden. Für den Vergleich mit der analytischen Lösung der Beulplatte liegt die Abweichung bei 2,3 %, für den Knickfall bei 1,2 %. Auch im Fall der nahe der Scheibenecke konzentrierten Lasteinleitung zeigt das Modell trotz der einfachen Belastung durch Punktlasten in den eck-nahen Knoten eine gute Übereinstimmung mit der Referenzlösung (Abweichung 1,4 %).

Im Vorgriff auf die weiteren Ergebnisse lässt sich am Beispiel nach Zeile 2 in Tabelle 4-1 der Beitrag des Randbalkens zur Strukturstabilität sehr gut erkennen. Bei sonst gleichen Randbedingungen und einem

Randbalken mit  $EI_{RB}$  und  $EA_{RB}$  entsprechend einem U-Profil  $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$  und einer Lasteinleitung in den Randbalken beträgt die Knick- bzw. Verzweigungslast  $57,21 \text{ kN}$  statt  $25,2 \text{ kN}$ . Damit bringt ein minimaler Rahmen der Scheibe eine Verdopplung der Scheibentragfähigkeit.

Bei der Ermittlung der Tragfähigkeit sind neben den Systembedingungen, d.h. Abmessungen, Materialparameter und Steifigkeiten, die Belastungen senkrecht zur Scheibenebene (Wind) und in Scheibenebene (d.h. Vertikallast) die maßgebenden Eingangsparameter. Die Berechnung erfolgt nicht-linear, aber rein statisch, d.h. es werden keine dynamischen Effekte berücksichtigt. Folglich soll jedem Belastungszustand, d.h. jeder Kombination aus Wind- und Vertikallast, ein eindeutiger Verformungs- und Spannungszustand entsprechen, unabhängig von der Belastungsreihenfolge. Für die folgenden Berechnungen ist dies insoweit von Bedeutung, als dass, entgegen der wahrscheinlicheren realen Situation, numerisch zuerst die Belastung senkrecht zur Scheibenebene aufgebracht werden soll und dann die Vertikallast. Auf diese Weise lässt sich, ausgehend von einer definierten Struktur mit einer gegebenen Vorbelastung aus Wind, die maximale Tragfähigkeit des Systems für Vertikallasten anhand der Spannungs- und Verformungskurven ermitteln.

In Abbildung 4-5 sind die beiden mögliche Belastungsreihenfolgen, zuerst die Flächenlast  $q$ , dann die Vertikallast  $F$  – bezeichnet mit  $q \rightarrow F$  – und umgekehrt – bezeichnet mit  $F \rightarrow q$  – miteinander verglichen.

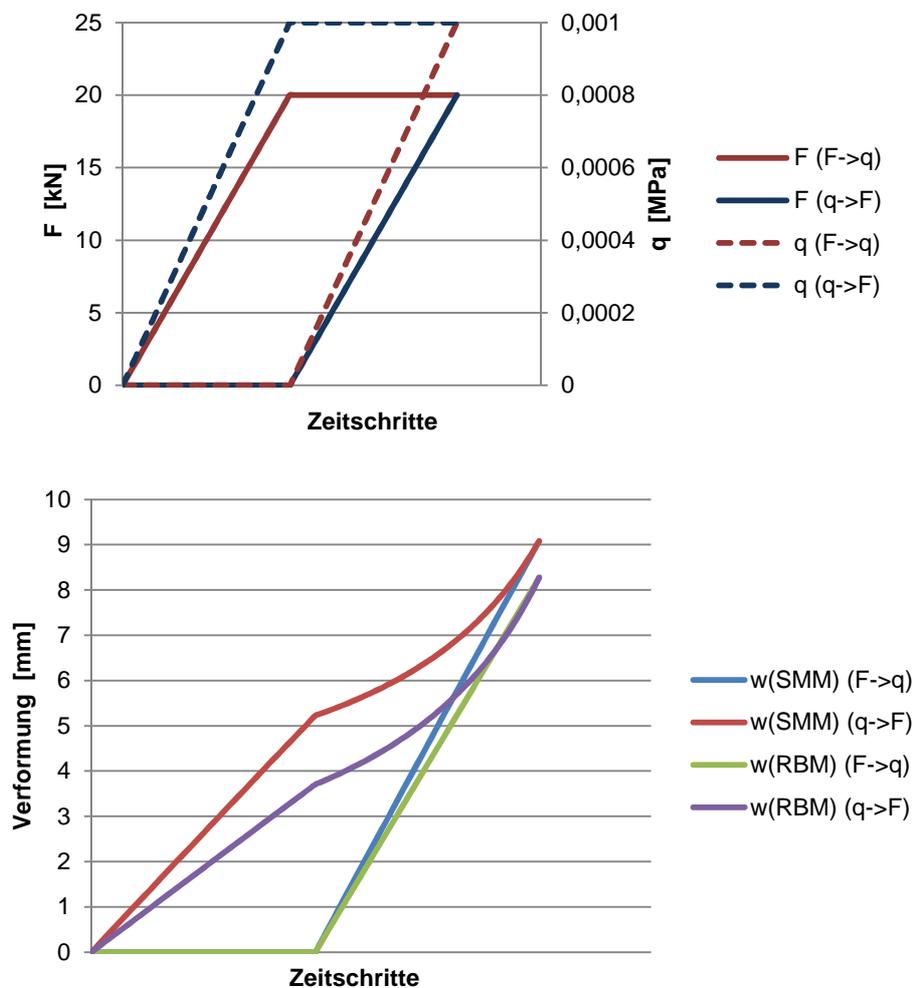


Abbildung 4-5: Vergleich der Lasthistorien

Es zeigt sich, dass der Verformungsverlauf erwartungsgemäß unterschiedlich, die Endverformung für die definierte Lastkombination aus  $F$  und  $q$  aber gleich ist.

### 4.3 Verformungsfigur

Für den Begriff der Verformungsfigur gilt es zunächst zu unterscheiden zwischen belastungsbedingten Verformungen und geometrischen Imperfektionen (Vorverformung). Für eine Betrachtung des Verformungsverhaltens des Systems nach Theorie II. Ordnung in Abhängigkeit von der Vertikallast, wirkt die Verformung aus der Flächenlast sehr ähnlich der Vorverformung aus geometrischer Imperfektion. Der wesentliche Unterschied ist der Spannungszustand. Während bei der geometrischen Imperfektion davon ausgegangen wird, dass dieser Zustand spannungsneutral entstanden ist, bringt eine belastungsinduzierte Verformung eine Veränderung des Spannungszustandes mit sich.

Der Verformungszustand ohne Vertikallast wird üblicherweise durch Wind verursacht sein. Grundsätzlich sind aber auch andere Belastungsszenarien denkbar, z.B. durch Holmlast an zugänglichen Fassadenelementen. Es gilt daher, den Einfluss der Verformungsfigur auf das Last-Verformungsverhalten zu bestimmen.

Die folgenden Betrachtungen werden an einer Referenzscheibe (RS) mit dem Seitenverhältnis  $H/B = 1,5$  (RS1) durchgeführt. Der Nachweis der Gültigkeit der dabei ermittelten Annahmen und Erkenntnisse erfolgt für andere Abmessungen in den folgenden Kapiteln.

Die ungünstigste Vorverformung ist die zur jeweiligen Belastung gehörige Beulfigur, skaliert auf die zu Grunde gelegte Größe der Verformung. Abbildung 4-6 zeigt für eine durch Randbalken verstärkte Scheibe (RS1) die erste Beulfigur – durch Lasteinleitung im Randbalken – und eine durch die Flächenlast  $q$  verursachte Vorverformung.

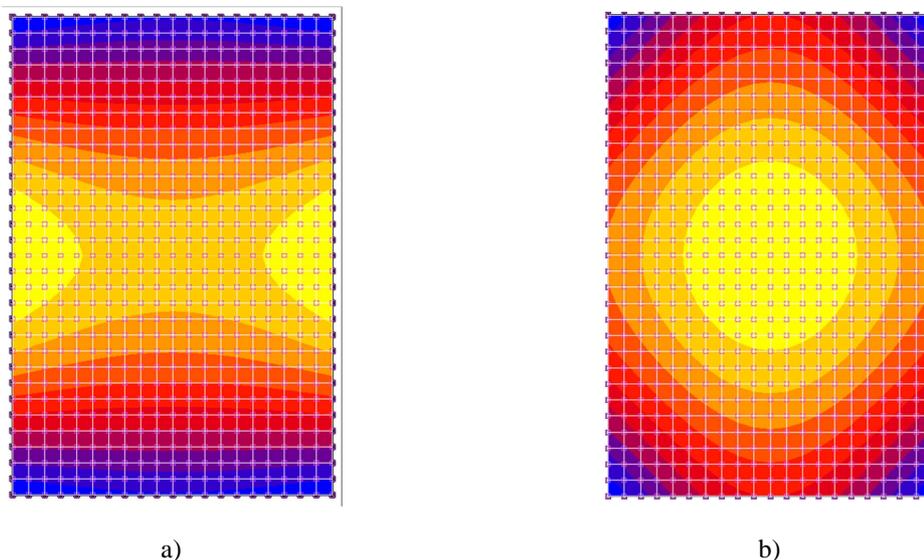


Abbildung 4-6: Erste Beulfigur (a) und Verformung durch  $q$  (b)

Bringt man die Belastung in Scheibenebene nach der Flächenlast auf, so nimmt die (wirksame) Steifigkeit der Randbalken durch die steigende Normalkraft ab, so dass die Verformungsfigur sich der einer zweiseitig gelagerten Platte annähert. Gleichzeitig nähert sie sich damit an die Beulfigur an (vgl. Abbildung 4-7d und Abbildung 4-6a).

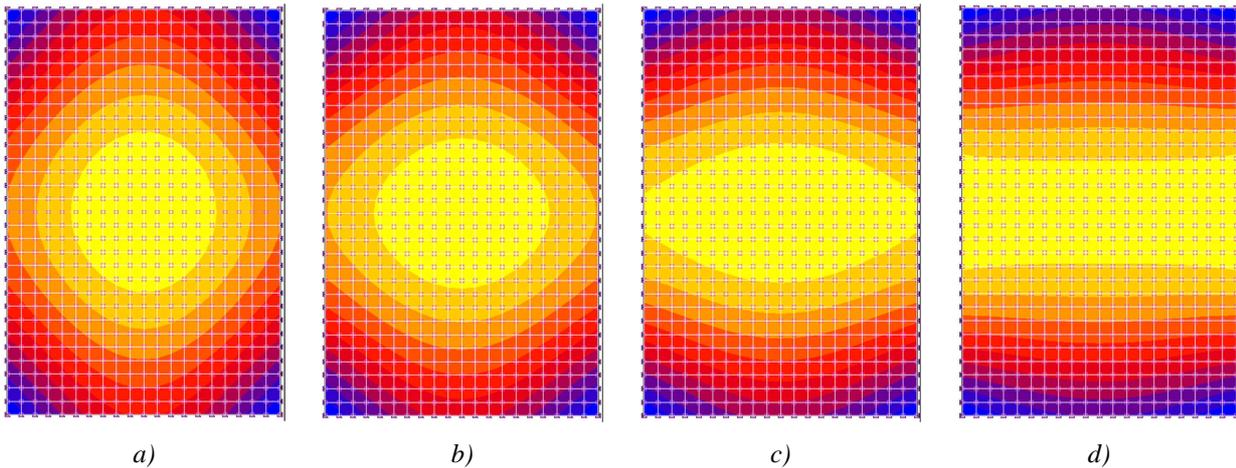


Abbildung 4-7: Änderung der Verformungsfigur mit zunehmender Vertikalkraft

Betrachtet man den Kraft-Verformungsverlauf für die Belastung aus  $F$  bei einer Vorbelastung aus  $q$  („ $w(F(q))$ “) im Detail, so fällt auf, dass sich die Verformungen in der Mitte der Scheibe „ $w(SMP)$ “ und in der Mitte des vertikalen Randes der Scheibe „ $w(RBM)$ “ sehr schnell angleichen und dann annähernd gleich verlaufen (vgl. Abbildung 4-8a/b).

Es zeigt sich auch, dass die Zunahme der Verformung in Abhängigkeit von der Vertikallast in der Mitte zunächst geringer ist als am Rand und dann maximal gleich groß ist. Im Vorgriff auf mögliche Bemessungsansätze lässt sich also vermuten, dass die Formulierung der Verformung in Abhängigkeit von der Vertikallast über einen Vergrößerungsfaktor  $v = w_{RBM}(F) / w_0$  bei gleichem Faktor für die Mitte der Scheibe auf der sicheren Seite liegt, wenn der Faktor die Zunahme der Verformung am Rand richtig abbildet.

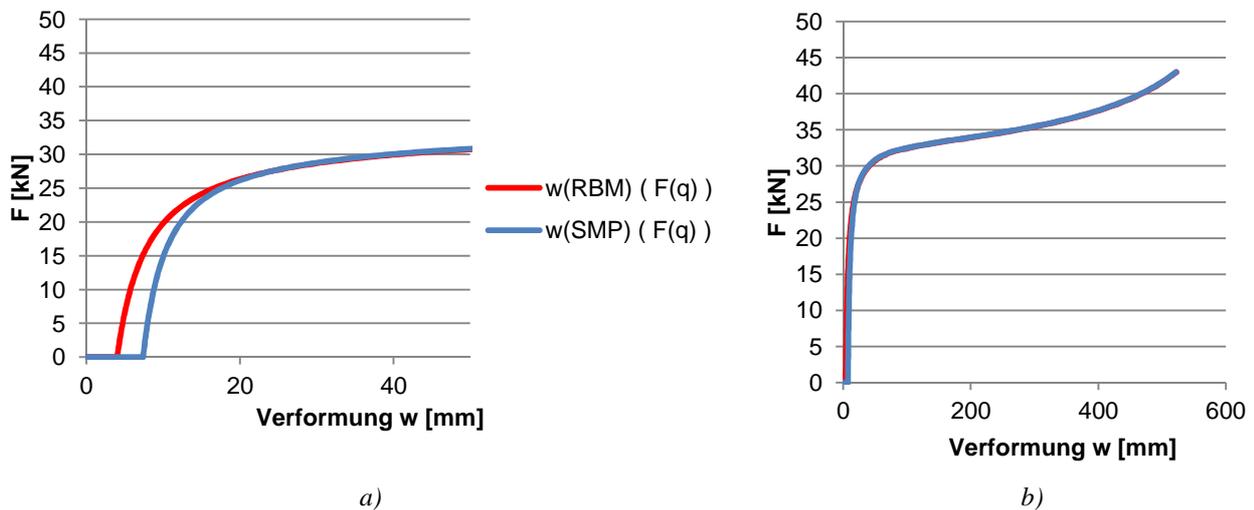


Abbildung 4-8: Kraft-Verformungsverlauf für Vorbelastung aus Flächenlast

Wie oben beschrieben, ist die flächige Belastung ( $q$ ) der Scheibe die wahrscheinlichste Art der Querbelastung der Scheibe, da das Tragverhalten aber allgemein untersucht werden soll, werden auch andere Belastungen betrachtet. Als Vergleichsbeispiel zur Flächenlast  $q$  wird eine Belastung der Randbalken durch jeweils eine mittige Einzellast  $P$  gewählt (vgl. Abbildung 4-9a). Diese Art der Belastung repräsentiert zum einen eine Art Gegenstück zur Belastung in der (Glas-) Fläche, da die Verformung im Gegensatz

dazu nicht in der Fläche, sondern an den Rändern bzw. an den Randbalken am größten ist. Zum anderen erzeugt diese Belastung eine Verformungsfigur (vgl. Abbildung 4-9b), die annähernd identisch mit der Beulfigur (vgl. Abbildung 4-6a) ist.

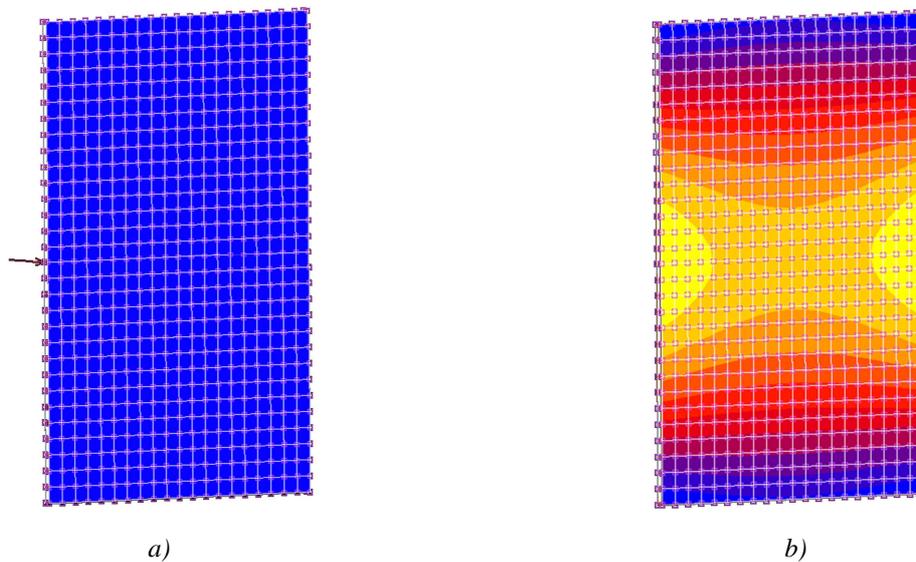
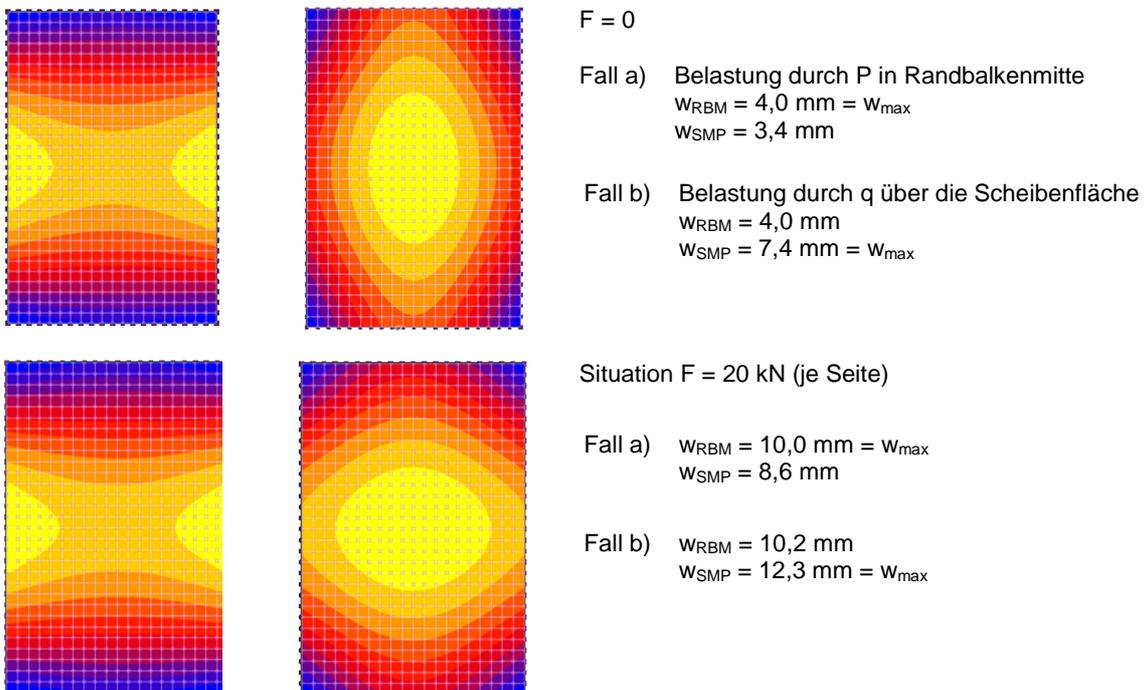


Abbildung 4-9: Vorverformung durch Einzellasten  $P$  in Randbalkenmitte

Bezieht man das Last-Verformungs-Verhalten auf die maximale Durchbiegung der Scheibe, so verhält sich das System für verschiedene Querlasten ( $q$ ) durchaus unterschiedlich. Auch in Bezug auf die absolute Lasthöhe, ist keine einheitliche Formulierung möglich.

In folgendem Vergleich sind die Belastungen  $P$  bzw.  $q$  so gewählt, dass sich ohne Vertikallast in Randbalkenmitte die gleiche Verformung einstellt.



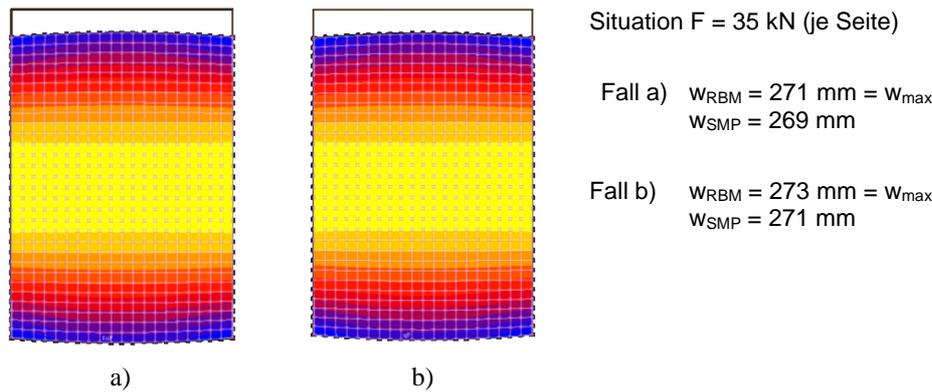


Abbildung 4-10: Vergleich der Verformung bei zunehmender Vertikallast

Berücksichtigt man die gleiche Anfangsverformung in Randbalkenmitte und die immer stärkere Annäherung der Gesamtverformung in Form und Maß trotz der anfänglich sehr unterschiedlichen Vorverformungsfigur (vgl. Abbildung 4-10), so lässt sich zunächst vermuten, dass die Vorverformung des Randbalkens, unabhängig vom Ursprung dieses Zustandes, eine wesentliche Rolle für das Gesamttragverhalten spielt.

Dieser Eindruck bestätigt sich bei der genaueren Betrachtung des Verformungsverlaufs für den in Abbildung 4-10 dargestellten Vergleich. Abbildung 4-11 zeigt den Verlauf der Verformungen in Randbalkenmitte (RBM) und in Scheibenmitte (SMP) in Abhängigkeit von der Vertikalkraft  $F$  (je Randbalken) für die Fälle einer Vorbelastung durch  $q$  („ $F(q)$ “) und durch die skalierte Eigenform („ $F(f_0)$ “) jeweils für eine anfängliche Vorverformung in Randbalkenmitte  $w_{\text{RBM}} = 4 \text{ mm}$ . Wie sich darin erkennen lässt, differiert der Kraft-Verformungsverlauf nur am Anfang deutlich für die Scheibenmitte. Bezogen auf das Gesamttragverhalten für hohe Vertikalkräfte ist die Figur der Vorverformung – zumindest für das ausgewählte Beispiel – nicht entscheidend. Anzumerken zu diesem Vergleich bleibt, dass der in Abbildung 4-8b und Abbildung 4-11b dargestellte Verformungsverlauf nur numerisch so dargestellt werden kann. Für das gewählte System wären in Realität bei diesen Magnituden die ertragbaren Spannungen und damit die Tragfähigkeit insgesamt deutlich überschritten. Der numerisch erzeugte Verlauf basiert auf der Annahme eines ideal elastischen Verhaltens ohne Versagens- oder Elastizitätsgrenze (profilabhängig).

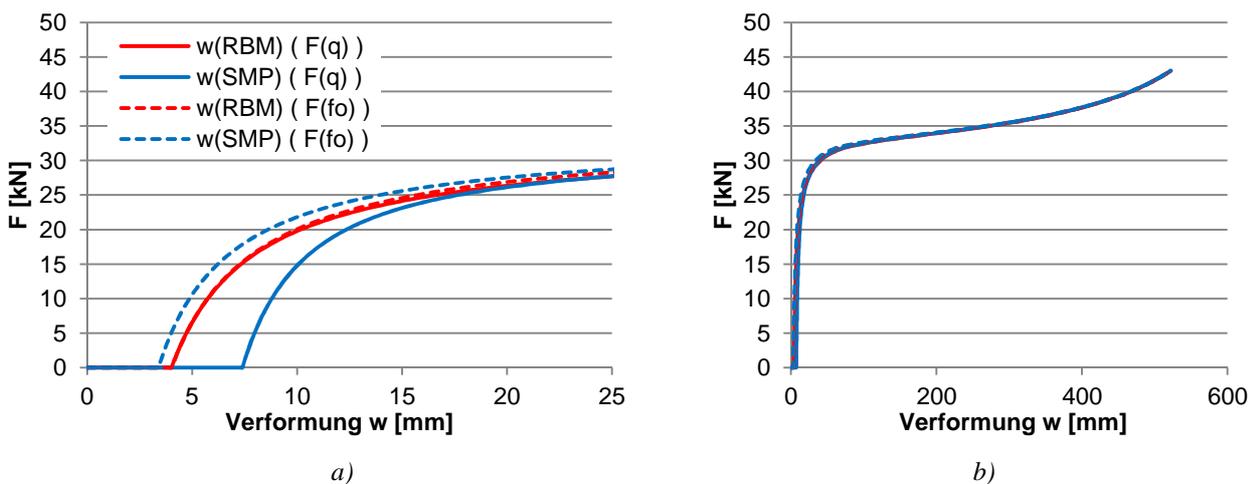


Abbildung 4-11: Kraft-Verformungsverläufe für den Vergleichsfall

Auf Grund der gefundenen Ergebnisse soll in der weiteren numerischen Untersuchung des Tragverhaltens der Ansatz der direkten Abhängigkeit des Last-Verformungsverhaltens von der Vorverformung des Randbalkens weiter verfolgt werden.

#### 4.4 Parameterstudie zur Art der Lasteinleitung

Eine der wesentlichen Fragestellungen ist die Art der Übertragung der Lasten in Scheibenebene. Auf eine Ableitung der Lasten aus den einzelnen Scheiben bzw. Modulen auf eine dahinterliegende Konstruktion soll zugunsten der direkten Weiterleitung der Lasten in Scheibenebene verzichtet werden.

Für die Art der Lasteinleitung bzw. -überleitung von einem Modul zum nächsten sind zwei prinzipielle Varianten möglich. Entweder die Last, insbesondere die Last in Scheibenebene, wird von Glas zu Glas weitergegeben, d.h. durch Kontakt mit entsprechenden Zwischenlagen, oder die Last wird in den Randbalken geführt und weitergegeben.

Abhängig davon kann auch die Herangehensweise an die Aufgabenstellung in zweierlei Hinsicht interpretiert werden: Entweder der Stahl trägt die Lasten und das Glas dient zur Stabilisierung der Stahlstruktur durch seine Biegesteifigkeit, oder das Glas übernimmt die Lastabtragung in Scheibenebene und der Stahl dient zur Aussteifung und Verbindung der Scheiben.

Für die oben dargestellte Referenzscheibe (RS1) und ein quadratisches Format sollen die beiden Ansätze hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit untersucht werden. Maßgebend dafür kann sowohl die Knicklast, als auch eine Spannungsüberschreitung im Glas oder Stahl sein. Zunächst soll jedoch nur das Gesamttragverhalten untersucht werden, d.h. der Einfluss von Spannungskonzentrationen am Lastübergabepunkt (Stahl oder Glas oder beides) bleibt zunächst unberücksichtigt. Dies stellt eine starke Vereinfachung dar, da gerade die Lasteinleitung bei Glas ein kritischer Punkt bei kleinen Flächen wie der Glaskante ist. Die Begründung für diese Vereinfachung erfolgt ex post in den folgenden Kapiteln.

Für drei verschiedene Abmessungen ( $t = 5,8$  mm,  $B \cdot H$ :  $1500$  mm  $\cdot$   $1000$  mm,  $1000$  mm  $\cdot$   $1000$  mm und  $1000$  mm  $\cdot$   $1500$  mm) werden jeweils vier Varianten der Lastaufteilung untersucht (Gesamtvertikallast  $V = 2 F$ ).

Fall a) Je  $\frac{1}{2}$  Last auf RB:

Die Vertikallast wird auf zwei Punktlasten aufgeteilt, wovon jeweils eine direkt auf den obersten Knoten des Randbalkens angeordnet wird.

Fall b) Last auf Scheibenkante:

Die Last wird in Form einzelner Punktlasten an den Knoten des oberen horizontalen Randes der Scheibe angeordnet, entsprechend einer diskretisierten Linienlast auf die obere Scheibenkante. Die – vertikale – Lagerung der Scheibe erfolgt analog an allen Knoten des unteren Randes. Darüber hinaus sind für diesen Lastfall die Randknoten der horizontalen Ränder der Scheibe in z-Richtung gehalten (entsprechend Lastfall Beulen bei konstanter Randspannung). Für den Fall senkrecht zur Scheibenebene verschieblicher Randknoten sind die kritischen Lasten so gering, dass der Fall für die weitere Betrachtung nicht relevant ist (vgl. 4.4).

Fall c) Je  $\frac{1}{4}$  Last auf RB und Glas:

Die Last wird in vier Punktlasten aufgeteilt, davon jeweils eine auf den linken bzw. rechten Randbalken und auf die linke bzw. rechte obere Scheibenecke, so dass insgesamt jeweils die Hälfte der Last in die Scheibe und in den Randbalken geht.

Fall d) Je  $\frac{1}{2}$  Last auf Glasecke:

Die Last wird links und rechts auf jeweils zwei ecknahe Knoten aufgeteilt. Die vertikale Lagerung der Scheibe erfolgt entsprechend auch an vier Knoten an der unteren Kante der Scheibe.

Die Belastungsszenarien der Scheibe sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

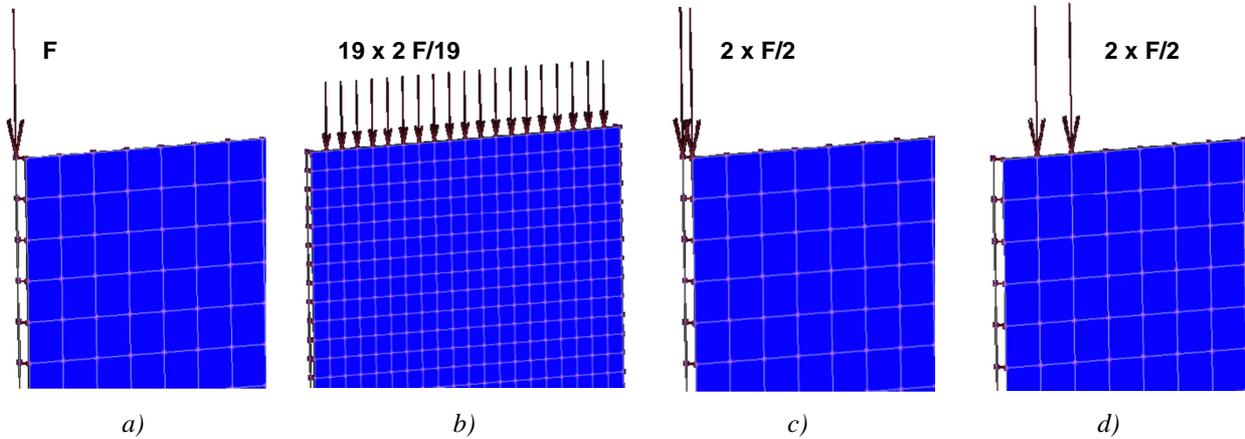


Abbildung 4-12: Untersuchte Lastaufteilungsvarianten

Jedes Belastungsszenario wird mit zwei Randbalkentypen untersucht, wovon einer einem – im Verhältnis zu den Scheibenabmessungen – sehr kleinen Randbalken und einer einem sehr massiven Randbalken entspricht. Für jede Kombination wird die kritische Gesamtlast ermittelt, um so die Fälle direkt miteinander vergleichen zu können. Die Ergebnisse sowie die zugehörigen Randbedingungen sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Vergleich der maximalen Tragfähigkeit nach Art der Lasteinleitung

Abmessung B · H [mm · mm]	Fall	Lasteinleitung	P <sub>Ki</sub> für RB <sub>Klein</sub> [kN]	P <sub>Ki</sub> für RB <sub>Groß</sub> [kN]	P <sub>Beul, Glas</sub> [kN]
1500 · 1000	a)	je ½ Last auf RB	(112,5)	(1038)	-
	b)	Last auf Scheibenkante <sup>1</sup>	34,9	36,9	37,1
	c)	je ¼ Last auf RB und Glas	67,9	73,7	-
	d)	je ½ Last auf Glasecke	80,9	100,3	-
1000 · 1000	a)	je ½ Last auf RB	(111,6)	(1036)	-
	b)	Last auf Scheibenkante <sup>1</sup>	40,3	46,6	47,4
	c)	je ¼ Last auf RB und Glas	74,4	93,1	-
	d)	je ½ Last auf Glasecke	68,6	75,9	-
1000 · 1500	a)	je ½ Last auf RB	50,4	(464,3)	-
	b)	Last auf Scheibenkante <sup>1</sup>	31,9	51,1	51,5
	c)	je ¼ Last auf RB und Glas	45,8	102,2	-
	d)	je ½ Last auf Glasecke	34,9	46,3	-
V <sub>max</sub>			92,8	294	-

Anmerkungen und Randbedingungen:

- Bei V<sub>max</sub> wird die maximale Spannung im Stahl erreicht.
- Die Zahlen in Klammer bedeuten, dass die maximale Spannung überschritten ist.
- Dicke der Scheiben: 5,8 mm
- Angenommener Grenzwert für die Spannung im Stahl: 210 N/mm<sup>2</sup>
- Randbalken (RB) (~ U30 bzw. U50):
 

Klein:	I <sub>RB</sub> = 25.000 mm <sup>4</sup>
	A <sub>RB</sub> = 221 mm <sup>2</sup>
Groß:	I <sub>RB</sub> = 250.000 mm <sup>4</sup>
	A <sub>RB</sub> = 700 mm <sup>2</sup>

<sup>1</sup> hier: horizontale Scheibenkante in z-Richtung gehalten, dadurch wird der Vergleich mit dem Beul-lastfall möglich. Für den Fall freier Querränder ergeben sich nochmals deutlich kleinere kritische Lasten.

Die größenmäßige Sortierung der kritischen Lasten ist für die drei Formate unterschiedlich. Gemeinsam ist den sechs Varianten jedoch, dass die größte kritische Last jeweils bei einer direkten Belastung des Randbalkens auftritt. Da diese Feststellung wesentlich für die weitere Betrachtung des Systems ist, werden die vier Fälle zusätzlich hinsichtlich des Last-Verformungsverhaltens untersucht. Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 zeigen die Last-Verformungsverläufe für die vier Lasteinleitungsvarianten bei einem Scheibenformat B · H = 1000 mm · 1500 mm (entsprechend RS1).

Der Übersichtlichkeit halber wurden in den Diagrammen folgende Abkürzungen verwendet:

LERB	Lasteinleitung direkt in den Randbalken (vgl. Abbildung 4-12a)
LEG	Lasteinleitung über die ganze horizontale Glaskante (vgl. Abbildung 4-12b) Hierbei ist die horizontale Glaskante in z-Richtung gehalten.

- LEG QR-frei    wie LEG, der Querrand der Scheibe ist jedoch frei
- LERBGK        Lasteinleitung je zur Hälfte in die Glaskante und in den Randbalken (vgl. Abbildung 4-12c)
- LEGK          Lasteinleitung in die Glaskante, ecknah auf zwei Punktlasten je Seite konzentriert (vgl. Abbildung 4-12d)

Für jeden Fall werden der Knoten in der Mitte der Scheibe (SMP) und der Knoten mittig am vertikalen Rand der Scheibe (RBM) betrachtet.

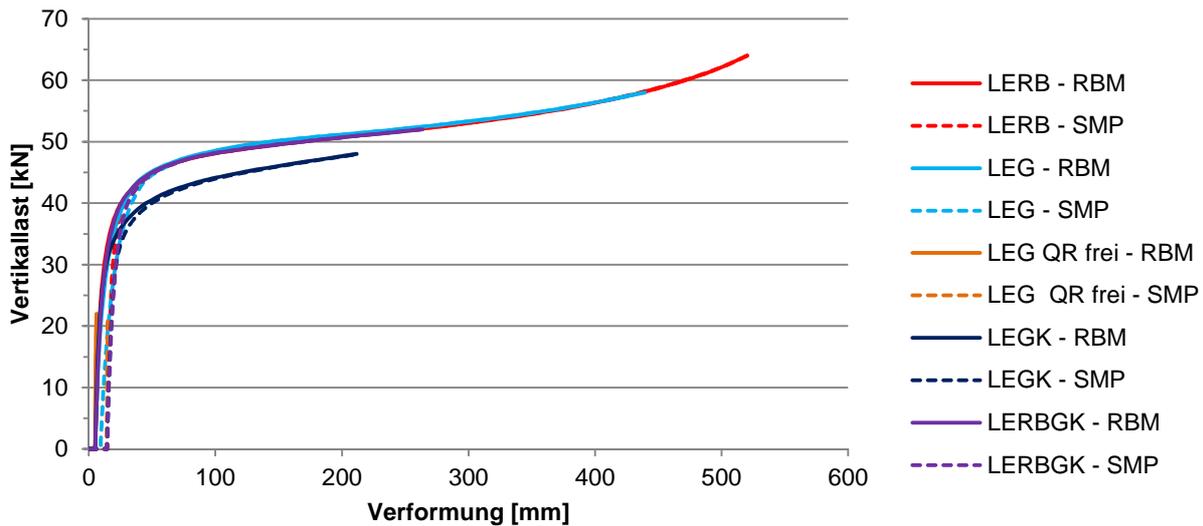


Abbildung 4-13: Vergleich der Lasteinleitungsvarianten

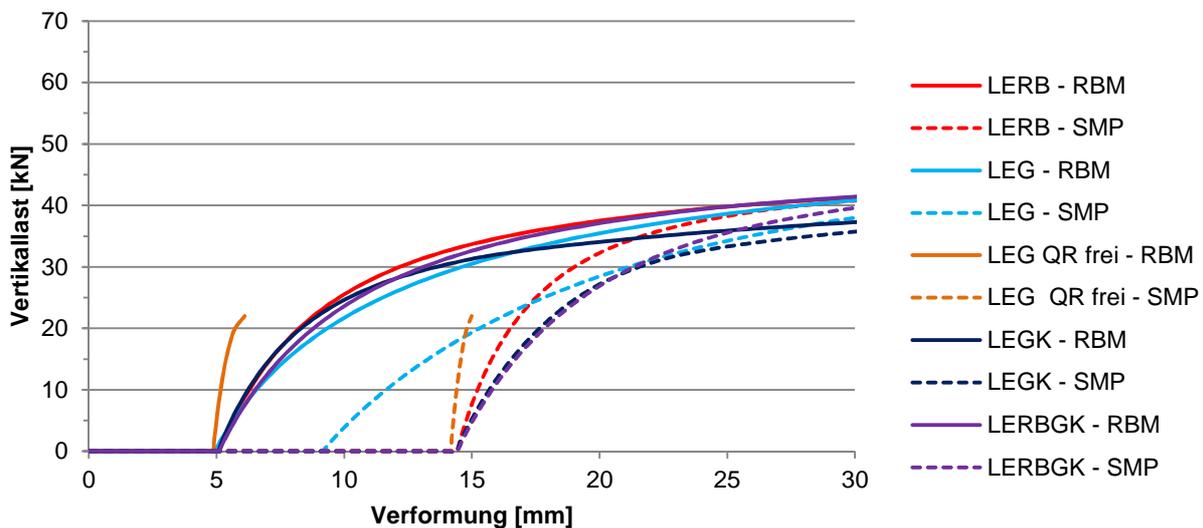


Abbildung 4-14: Detail zu Abbildung 4-13

Die Last-Verformungskurven bestätigen die Ergebnisse des Vergleichs der kritischen Lasten. Auf Grund der gleichen Lagerungsbedingungen in z-Richtung und der gleichen Vorbelastung  $q$  beginnen die Kurven für den Rand- (RBM) und den Mittelknoten (SMP) jeweils mit dem gleichen Wert. Einzige Ausnahme bildet hier – für den Punkt in Scheibenmitte (SMP) – die Lasteinleitung über die Glaskante „LEG“, da hier die Verformung in z-Richtung, wie oben beschrieben, behindert ist. Für den gleichen Lastfall mit

freiem Querrand heben sich die Kurven durch ein deutlich steiferes Verhalten von den anderen ab. Grund dafür ist die sich einstellende hyperbolische Verformungsfigur, die zunächst für eine Versteifung des Systems sorgt. Allerdings liegt die Verzweigungslast dieser Art der Lasteinleitung und ohne Unterstützung des Querrandes bei nur 22 kN. Daher bricht auch die Verformungsberechnung an dieser Stelle ab.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass rein aus strukturmechanischer Sicht die Lasteinleitung über den Randbalken die größten Tragfähigkeiten bei einem recht steifem Verhalten verspricht. Ein weiterer sehr großer Vorteil dieser Variante ist die einfache konstruktive Umsetzung, da eine Lasteinleitung ins Glas und die damit verbundene Problematik der Spannungskonzentration an der Glaskante vermieden wird. Im Folgenden wird daher diese Variante weiter untersucht.

## 4.5 Parametervariation und -kombination

Durch die Festlegung der Lasteinleitung – der Vertikallasten – direkt und nur in den Randbalken, entsprechend den Ergebnissen des vorangegangenen Abschnitts, wurde das Modell weiter konkretisiert. Zudem wurde bereits in 3.2 erläutert, dass die Kopplung der Verdrehung der in der Gesamtstruktur übereinander stehenden Scheiben, d.h. für das Modul die (Teil-) Einspannung der horizontalen Scheibenränder nicht zu berücksichtigen ist. Im Folgenden werden die weiteren Parameter auf ihre Bedeutung für das Tragverhalten des Moduls untersucht, zunächst einzeln und die relevanten Parameter dann auch in den möglichen Kombinationen, um auch die wechselseitigen Zusammenhänge der Parameter untereinander darstellen und etwaige Abhängigkeiten und Unabhängigkeiten erkennen zu können. Die Bezeichnungen der Parameter sind in Abschnitt 3.5 definiert.

### 4.5.1 Scheibe

Die Eigenschaften der Scheibe lassen sich beschreiben durch

- Höhe  $H$ ,
- Breite  $B$ ,
- Dicke  $t$  und
- E-Modul  $E_{\text{Glas}}$ .

Wie in 3.6.4 beschrieben, lassen sich sowohl Platten- als auch Scheibenzustände über relative Größen beschreiben. Die Scheibe lässt sich folglich auch beschreiben mit

- $a = B / H$ ,
- $B/t$ ,
- E-Modul  $E_{\text{Glas}}$
- und einen „Größenwert“  $B$ ,  $H$  oder  $t$ .

Diese „Umformulierung“ hilft zwar zunächst nicht, die Anzahl der Parameter zu reduzieren, jedoch wird dadurch deutlich, dass sich auch die Ergebnisse (z. B. Durchbiegung, Spannung) als relative Werte angeben lassen (vgl. dazu auch Abschnitt 3.6.4). Dies wiederum bedeutet, dass die Berechnung für entsprechend gleiche „Relativparameter“ nur einmal durchgeführt werden muss und die Ergebnisse auf verschiedene Größen skalierbar sind, die sonst hätten einzeln hätten berechnet werden müssen. Voraussetzung dafür ist, dass auch die übrigen Parameter relativ formuliert werden.

Für die Berechnungen in diesem Abschnitt wird von einer einheitlichen Höhe  $H = 1500$  mm ausgegangen. Dieser Wert hat sich aus den Versuchsscheiben ergeben, die im Hochformat entsprechend 1500 mm hoch waren. Als Ansichtsverhältnis wird zunächst  $a = 0,5$ ,  $1$  und  $2$  gewählt, also entsprechend  $B = 750$  mm,  $1500$  mm und  $3000$  mm.

Die Wahl von  $t$  wird in erster Linie bestimmt von der Forderung nach einer „sinnvollen“ Anfangsverformungsfigur, d.h. die resultierenden Anfangsverformungen (aus  $q$ ) sollen im bemessungsrelevanten Bereich liegen (zur weiteren Untersuchung bis zum Versagen vgl. 4.5.8). Da die Verformung auch lastabhängig ist, wird die Last bei der Wahl der Scheibendicke herangezogen. Da die tatsächliche maximale Verformung vor der Berechnung unbekannt ist, wird die betrachtete Scheibe zunächst als einfacher Einfeldträger mit der Spannweite entsprechend der maximalen Kantenlänge betrachtet und dafür postuliert, dass die Verformung für dieses System unter der jeweiligen Last  $1/100$  oder  $1/50$  der Spannweite sein soll, also

$$t = \sqrt[3]{\frac{5}{32} \cdot \frac{q \cdot L^3}{E \cdot f}} \quad \text{mit } f = \{1/100, 1/50\} \text{ und } L = \text{MAX}\{H, B\} \quad (4-1)$$

Der E-Modul der Scheibe wird einheitlich mit dem üblichen Wert für Glas von  $E_{\text{Glas}} = 70.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

#### 4.5.2 Randbalken

Die sog. Randbalken stellen eine Versteifung des vertikalen Scheibenrandes dar. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, können die Randbalken als eigenständige Elemente betrachtet werden, die nur durch die Kopplung der Verformung senkrecht zur Scheibenebene mit den Scheiben verbunden sind und ansonsten einen Balken auf zwei Stützen darstellen. Dieser lässt sich durch die Parameter

- Querschnittsfläche  $A_{\text{RB}}$ ,
- E-Modul  $E_{\text{RB}}$ ,
- Flächenträgheitsmomente  $I_{y, \text{RB}}$  und  $I_{z, \text{RB}}$  und
- Länge  $L$

beschreiben. Die Länge  $L$  entspricht der Höhe der Scheibe  $H$  und stellt somit keinen zusätzlichen Parameter dar. Die in der praktischen Ausführung möglicherweise notwendigen Abweichungen bleiben hier unberücksichtigt.

Für den E-Modul der Randbalken wird zunächst der für Stahl übliche Wert von  $210.000 \text{ N/mm}^2$  angenommen. Im Rahmen einer Bemessung wäre hier eine Abminderung für stabilitätsgefährdete Bauteile bzw. für die Bemessung nach Theorie II. Ordnung zu beachten. Darauf wird in Abschnitt 7 eingegangen.

Durch die Kopplung von Scheibe und Randbalken durch „Feder-Pendelstäbe“ ist das Modell unempfindlich gegenüber Dehnungen des Randbalkens entlang seiner Längsachse, solange die Dehnungen klein gegenüber den Verformungen senkrecht zur Stabachse bleiben. Für die Randbalken werden daher abhängig vom Flächenträgheitsmoment  $I_{y, \text{RB}}$  Werte für  $A_{\text{RB}}$  so gewählt, dass ein typisches U-Profil mit der Querschnittsfläche  $A_{\text{RB}}$  ein Flächenträgheitsmoment  $I_{y, \text{RB}}$  aufweist.

Das Flächenträgheitsmoment  $I_{y, \text{RB}}$  bestimmt das Biegetragverhalten des Randbalkens für Verformungen senkrecht zur Scheibenebene und hat damit maßgeblichen Einfluss auf das Gesamttragverhalten des Moduls, da gerade für diese Richtung die Verformungen von Scheibe und Randbalken gekoppelt sind. Um auch hier eine einfache Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Modul-Größen zu gewährleisten, wird  $I_{y, \text{RB}}$  über das Steifigkeitsverhältnis  $s$  an die Scheibendicke und –breite gekoppelt. Dadurch wird ebenfalls erreicht, dass Profildimension und Scheibengröße – gleichbleibend – in einem baupraktisch sinnvollen Verhältnis bleiben. Es gilt:

$$s = \frac{EI_{y,RB}}{EI_{Glas}} \quad (4-2)$$

Begrenzt durch eine vernachlässigbare Mitwirkung des Randbalkens am Gesamttragverhalten einerseits und einem extrem steifen Verhalten desselben andererseits wird der Bereich von  $s$  zwischen 1 und 10 festgelegt. Entsprechend ergibt sich:

$$I_{y,RB} = s \cdot I_{Glas} \cdot \frac{E_{Glas}}{E_{RB}} \quad \text{mit } s = \{1, 5, 10\} \quad (4-3)$$

Die Steifigkeit um die andere Achse ( $EI_{z,RB}$ ) ist für diese Betrachtung nachrangig, da die Profile des Randbalkens in der Fassade zwischen den Scheiben angeordnet sind und damit für diese Richtung durch die Glasscheiben gestützt werden. Dazu kommt, dass die Profile in der Fassade jeweils zwei Module miteinander verbinden und damit jedes Profil in Scheibenebene annähernd doppelt so breit ist und damit eine deutlich größere Biegesteifigkeit für diese Richtung hat. Entsprechend wird  $I_{z,RB}$  im Modell so groß gewählt, dass Versagen (Ausknicken) um die  $z$ -Achse für den Randbalken nicht maßgebend wird.

### 4.5.3 Querriegel

Für den Querriegel bestehen auf Grund der mechanisch ähnlichen Funktion zunächst die gleichen Parameter wie für die Randbalken. Analog dazu kann daher bei den Querriegeln  $EI_{z,QR}$  außer Betracht bleiben. Da für diese Bauteile eine Normalkraftbeanspruchung nicht auftritt, gilt dies auch für  $EA_{QR}$ . Die Länge entspricht der Scheibenbreite. So bleibt als relevanter Parameter die Biegesteifigkeit  $I_{y,QR}$ .

Da die Randbalken zusätzlich zur Biegebeanspruchung die Vertikallasten aufnehmen müssen, könnte man zunächst davon ausgehen, dass die Querriegel filigraner ausgeführt werden können, da eine Stabilitätsgefährdung hier deutlich geringer ist. Durch das mechanische Modell der Querriegel sollen jedoch auch die Fälle abgebildet werden können, für die die Querränder der Scheiben mit den Riegeln über ihre ganze Länge an die Geschossdecken angeschlossen sind. Abgebildet werden kann dies durch eine sehr hohe Biegesteifigkeit der Riegel. Gleichzeitig soll auch der Fall berücksichtigt werden, dass die Querriegel ausschließlich der Übertragung vertikaler Lasten zwischen den Modulen dienen, also keinen wesentlichen Beitrag zur Biegesteifigkeit leisten.

Für die Biegesteifigkeit der  $I_{y,QR}$  eines Moduls gilt es folglich die Extremfälle „freier“ und „gestützter“ horizontaler Scheibenrand zu untersuchen. Entsprechend wird dies im Modell durch Lagerung oder Nicht-Lagerung der Querränder in  $z$ -Richtung umgesetzt.

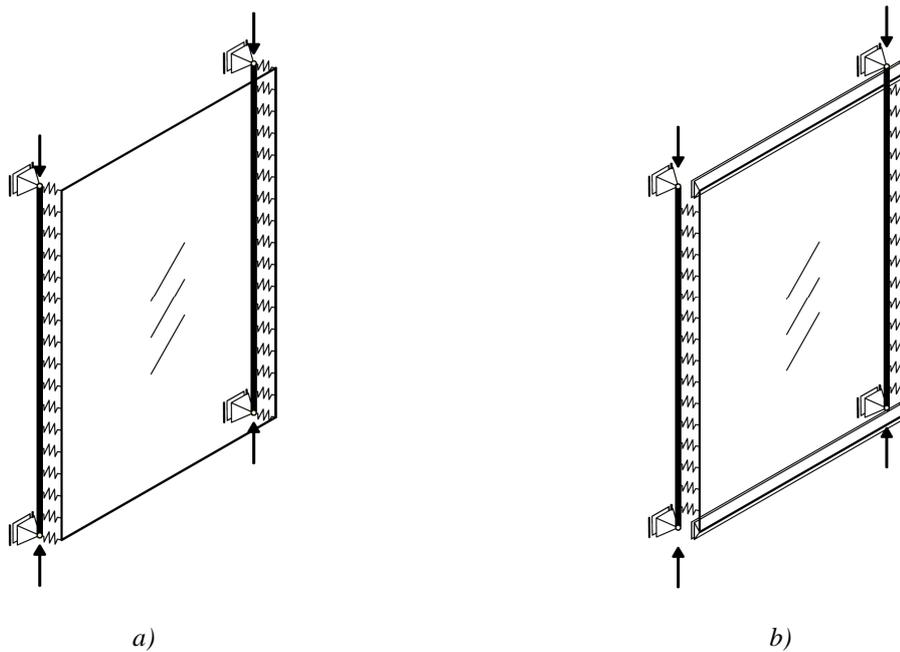


Abbildung 4-15: Modell mit freiem (a) und gelagertem (b) Querrand

#### 4.5.4 Lager und Anschlüsse

Die Endpunkte der Randbalken werden als Lager betrachtet, wobei die unteren in alle Richtungen unverschieblich, die oberen nur vertikal verschieblich sind. Verdrehungen werden aus den unter 4.1.2 genannten Gründen nicht behindert.

Die Verbindung zwischen Randbalken und Scheibe erfolgt mittels Federelementen. Die Steifigkeit ergibt sich durch die Steifigkeit der Zwischenlage, die zunächst mit konstant  $4000 \text{ N/mm}^2$  angenommen wird. Der Glaseinstand wird in Anlehnung an die Versuche mit  $15 \text{ mm}$  angenommen, die Dicke der Zwischenlage mit  $2 \text{ mm}$ , der Diskretisierungsabstand im Modell beträgt  $50 \text{ mm}$ . Damit ergibt sich die Federsteifigkeit zu  $c = E \cdot A / t = 4000 \text{ N/mm}^2 \cdot 15 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm} / 2 \text{ mm} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$ . Diese steife Verbindung hat den Vorteil, dass zwischen Randbalken und Glas nur geringe Relativverschiebungen in  $z$ -Richtung auftreten, so dass das Zusammenwirken besser beurteilt werden kann. Auf die Auswirkungen einer deutlich geringeren Steifigkeit wird in Abschnitt 7 genauer eingegangen.

#### 4.5.5 Last und Verformung

Das Verhalten der Module für unterschiedliche Vertikallasten ist Hauptgegenstand dieser Untersuchung, daher wird diese in den Berechnungen bis zum (numerischen) Versagen gesteigert. Entsprechend den Ergebnissen aus den Untersuchungen zur Lasteinleitung erfolgt die Lasteinleitung direkt in die Oberkante der Randbalken (vgl. Abschnitt 4.4).

Die Querbelastung  $q$  wird in aller Regel durch Wind verursacht. Grundsätzlich kann sich die Belastung aber auch aus einer Kombination von Wind und Schnee zusammensetzen und ist dann als Gesamtwert der Einwirkungen zu betrachten. Eine Präzisierung dieser Betrachtung erfolgt in Abschnitt 7. Für die Parameterstudie wird für  $q$   $0,5 \text{ kN/m}^2$ ,  $1,0 \text{ kN/m}^2$  und  $1,5 \text{ kN/m}^2$  angesetzt.

#### 4.5.6 Unsymmetrische Belastung

Auf Grund des zu erwartenden Verformungsverhaltens und Vergleichen mit den zugehörigen Eigenformen gilt es zu erwarten, dass die symmetrische Belastung, d.h. gleiche Normalkraft in beiden Randbalken, die ungünstigste ist, d.h. zu den geringsten aufnehmbaren Lasten je Randbalken führt. Diese Annah-

me soll anhand einiger Vergleichsrechnungen überprüft werden. Als Vergleichsfall zur symmetrischen Belastung soll dazu eine einseitige Belastung, also Belastung nur eines Randbalkens dienen.

#### 4.5.7 Übersicht

Auf Grund der ausführlichen Erklärungen zu den einzelnen Parametern in den obigen Abschnitten wird in Tabelle 4-3 ein zusammenfassender Überblick über die Parametervariation und Kombination gegeben.

Tabelle 4-3: Übersicht zur Parameterstudie

Parameter	Einheit	Werte	Ermittlung/Ableitung	Anzahl
H	mm	1500	Basiswert (Festlegung)	1
a	-	0,5 1 2	$B = a \cdot H$	3
q	kN/m <sup>2</sup>	0,5 1,0 1,5	Festlegung	3
f	-	L/50 L/100	Festlegung: Forderung, dass die Durchbiegung der entlang der größeren Seitenabmessung einachsigt gespannten Scheibe L/50 bzw. L/100 beträgt → $t_1, t_2 \rightarrow EI_{\text{Glas}}$	2
t	mm	var.	$t_1 = t (f = L/50), t_2 = t (f = L/100)$	
s	-	1 5 10	$EI_{\text{RB,y}} = s \cdot EI_{\text{Glas}}$	3
$c_{\text{QR}}$	N/mm	0	Freier Querrand	1
Symm.	-	-	Symmetrische Belastung	
Kombinationen/Modellanzahl				54
$c_{\text{QR}}$	N/mm	$\infty$	Gelagerter Querrand: Vergleichsberechnung zu drei Referenzmodellen	3
Kombinationen/Modellanzahl				3
asymm.	-	-	Einseitige Belastung (nur auf einen RB) Vergleichsberechnung zu drei Referenzmodellen	3
Kombinationen/Modellanzahl				3
Konstante Parameter:				
$c_{\text{RB}}$		$1,5 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$		
$E_{\text{RB}}$		$210.000 \text{ N/mm}^2$		
$E_{\text{Glas}}$		$70.000 \text{ N/mm}^2$		

Eine Übersicht über die Parameter der einzelnen Modelle und die zugehörigen Modellbezeichnungen ist im Anhang gegeben. Abbildung 4-16 zeigt die Parameter am Modell.

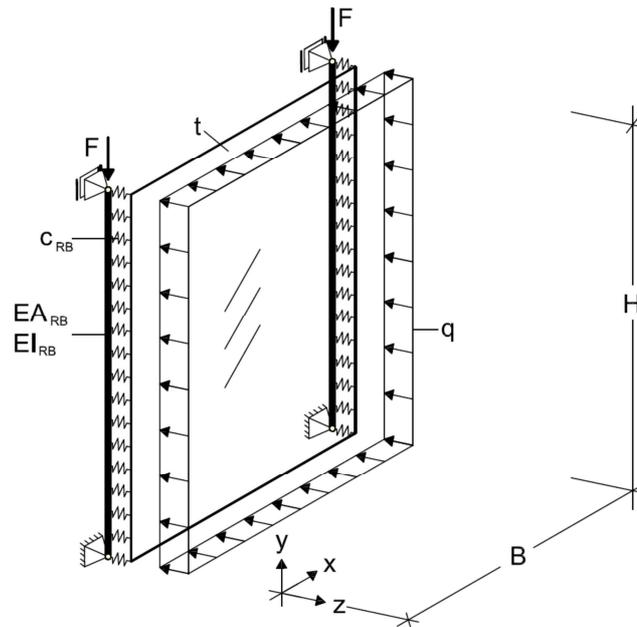


Abbildung 4-16: Systemparameter

#### 4.5.8 Berechnung und Ergebnisse

Im ersten Schritt wird der Verzweigungslastfaktor für die Belastung (nur) durch Vertikallast bestimmt. Die daraus ermittelte kritische Last dient als Anhaltswert für die Maximallast im zweiten Schritt.

Zur Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens wird im zweiten Schritt in jedem Modell zunächst die Flächenlast  $q$  aufgebracht und anschließend die Vertikallast auf den Randbalken bis zum – numerischen – Versagen gesteigert. Als Ergebnisse werden die Spannungs- und Verformungsverläufe bezogen auf die Vertikallast für drei Punkte ausgegeben: Am Scheibenrand über der Mitte eines Randbalkens (bezeichnet mit „RB Mitte“), in Scheibenmitte (bezeichnet mit „Glas Mitte“) und am oberen Scheibenrand mittig (bezeichnet mit „Glas Rand“).

Die angegebenen Spannungen sind die maximalen Hauptzugspannungen in der Scheibe. Als Verformung wird die Knotenverschiebung in  $z$ -Richtung ausgegeben. Auf Grund der steifen Kopplung von Randbalken und Scheibe unterscheiden sich die Verformungen in  $z$ -Richtung am vertikalen Rand der Scheibe und vom Randbalken nicht wesentlich, so dass hier nur ein Wert ausgegeben wird.

Die Ergebnisse für alle Modelle sind im Anhang zusammenfassend dargestellt. Jedes Modell ist zur einfacheren Nachvollziehbarkeit durch eine Nummer eindeutig gekennzeichnet. Alle in diesem Abschnitt untersuchten Modellbezeichnungen beginnen mit den Buchstaben „PS“ für Parameterstudie und einer dreistelligen Nummer. Die erste Ziffer bezeichnet die jeweilige Parameterstudie, die letzten beiden Ziffern sind laufende Nummern. Die Modelle werden wie folgt benannt:

- PS0xx: Variation der Parameter nach Abschnitt 4.5
- PS1xx: Variation der Modulbreite zur Untersuchung der „Effizienz“ nach Abschnitt 4.5.9.5
- PS2xx: Vergleichsberechnung zur Untersuchung unsymmetrischer Belastung nach 4.5.6
- PS3xx: Vergleichsberechnung zur Untersuchung gestützter Querränder nach 4.5.3

#### 4.5.9 Auswertung

##### 4.5.9.1 Verformungsverhalten

Im ersten Schritt der Auswertung wird das Verformungsverhalten für die drei verschiedenen Seitenverhältnisse ( $a = 0,5, 1$  und  $2$ ) untersucht. Die Ergebnisse werden an drei Modellen dargestellt, die stellver-

tretend für die 54+6 untersuchten Modelle stehen (vgl. Tabelle 4-3). Die Vertikalkraft  $F$  bezieht sich dabei immer auf die Belastung eines Randbalkens, d.h. für das Modul mit zwei Randbalken ist die Belastung doppelt so groß.

Für die Betrachtung der schmalen Variante mit  $a = 0,5$  wird das Modell PS010 verwendet, das sich vor allem durch die im Verhältnis zur Scheibe geringe Randbalkensteifigkeit ( $s = 1$ ) auszeichnet. Die Begründung für diese Wahl erfolgt ex post in Abschnitt 6.2.



Abbildung 4-17: Verformungszustände a)  $q$  und b)  $q+V$  für  $a = 0,5$

Abbildung 4-17 zeigt die Verformung des Systems für eine Belastung nur durch  $q$  (Abbildung 4-17a) und eine kombinierte Belastung durch  $q$  und  $V$  (Abbildung 4-17b). Wie auf Grund der ähnlichen Abmessung (vgl. 3.4) zu erwarten, wird die zunächst beul-ähnliche Verformungsfigur, wie sie bei den Untersuchungen zur Vorverformung bereits beschrieben wurde, mit zunehmender Vertikallast zu einer typischen Knickfigur.

Betrachtet man den Kraft-Verformungsverlauf an den charakteristischen Punkten im Detail (vgl. Abbildung 4-18), so wird auch dabei deutlich, wie die anfangs größere Verformung in der Mitte durch die Verformung über der Mitte des Randbalkens „eingeholt“ wird und anschließend einen annähernd gleichen weiteren Verlauf nehmen. Die Verformung am oberen Scheibenrand bleibt insgesamt dahinter zurück.

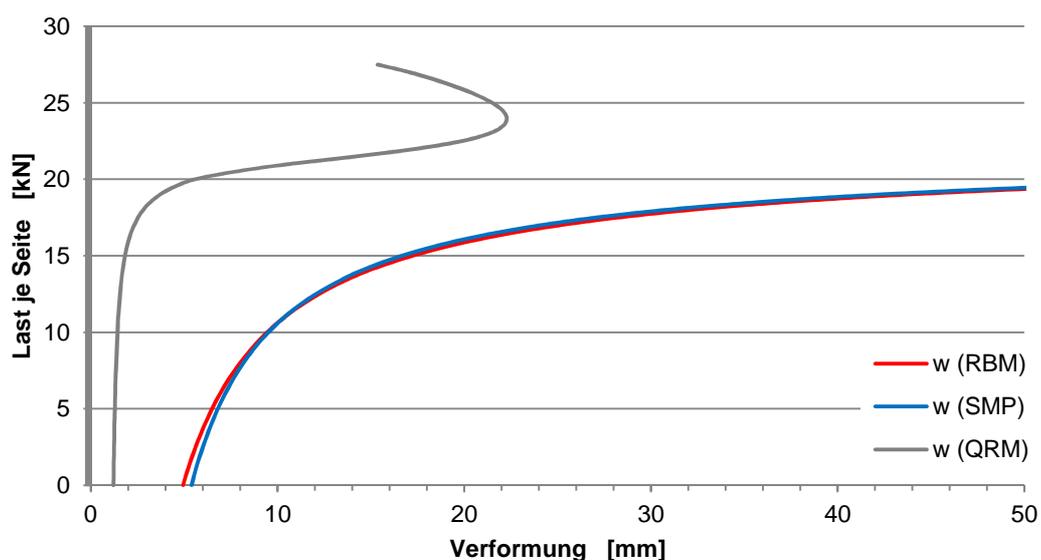


Abbildung 4-18: Typischer Kraft-Verformungsverlauf für  $a = 0,5$  (PS010)

Festzustellen ist für dieses Modell zudem, dass die Zunahme der Verformung für die Stelle über der Mitte des Randbalkens stets am größten ist. Dies gilt sowohl für die Steigung ( $\delta w/\delta F$ ), als auch bezogen auf den Anfangswert ( $w(F)/w_0$ ).

In Abbildung 4-19 sind die Verläufe von Verformung und Spannung zusammen dargestellt. Darin zeigt sich, dass für die Spannung gleichermaßen gilt, dass die Zunahme der Spannung ( $\delta\sigma/\delta F$  und  $\sigma/\sigma_0$ ) für den Punkt „RB-Mitte“ am größten ist. Für die Steigung ist dies aus dem Diagramm nicht eindeutig ersichtlich, geht aber aus den zugehörigen Zahlenwerten hervor.

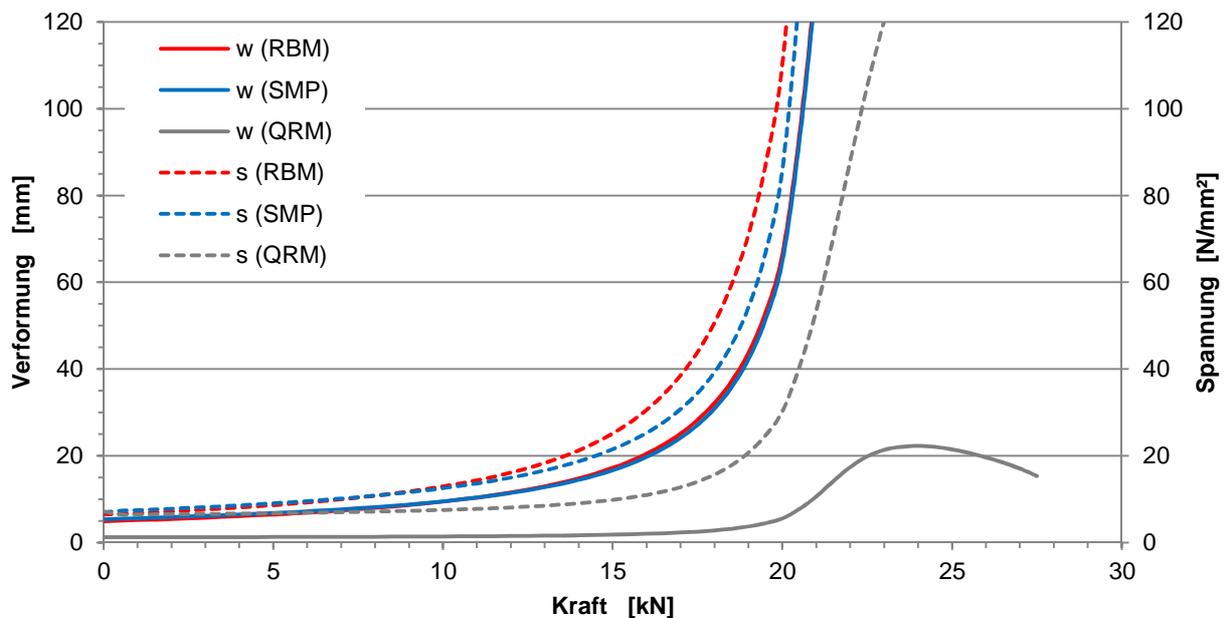


Abbildung 4-19: Auszug aus Verformungs-/Spannungs-Kraftverlauf für  $a = 0,5$  (PS010)

Abbildung 4-19 zeigt zudem, dass die Spannungen im Vergleich zu den Verformungen stärker zunehmen. Ein direkter, linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung ist nicht darstellbar.

Als Referenz für die Modelle mit  $a = 1$  dient das Modell PS028, das, abgesehen von der Breite, die gleichen Parameter wie das zuvor untersuchte Modell PS010 aufweist. Auf Grund der im Vergleich zum Modell PS010 größeren Breite überwiegt für die Flächenlast  $q$  die Biegung in  $x$ -Richtung zwischen den Randbalken (vgl. Abbildung 4-20a). Mit steigender Vertikalbelastung ändert sich dies jedoch, so dass bei höheren Lasten die Biegung entlang der  $y$ -Achse überwiegt (vgl. Abbildung 4-20b).

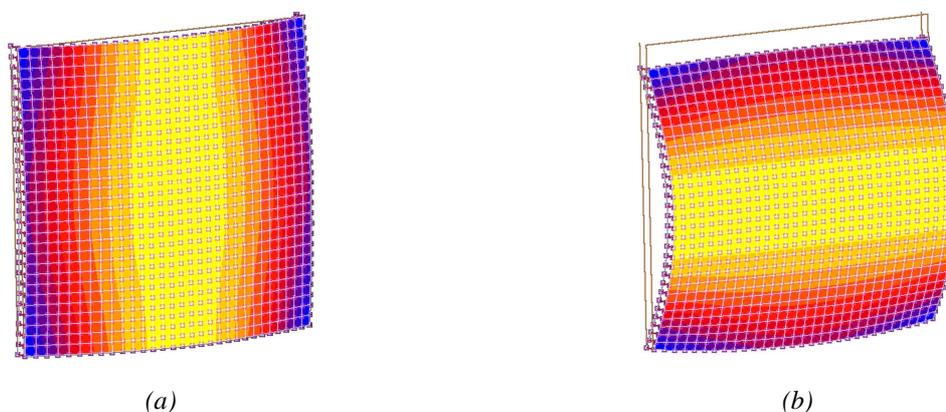


Abbildung 4-20: Verformungszustände  $q$  (a) und  $q+V$  (b) für  $a = 1$

In der Betrachtung als Kraft-Verformungsdiagramm (vgl. Abbildung 4-21) zeigt sich dies dadurch, dass die Verformung am Randbalken die Verformung in der Mitte größtmäßig „einholt“, d.h. die Zunahme der Verformung ist am Randbalken wiederum am größten.

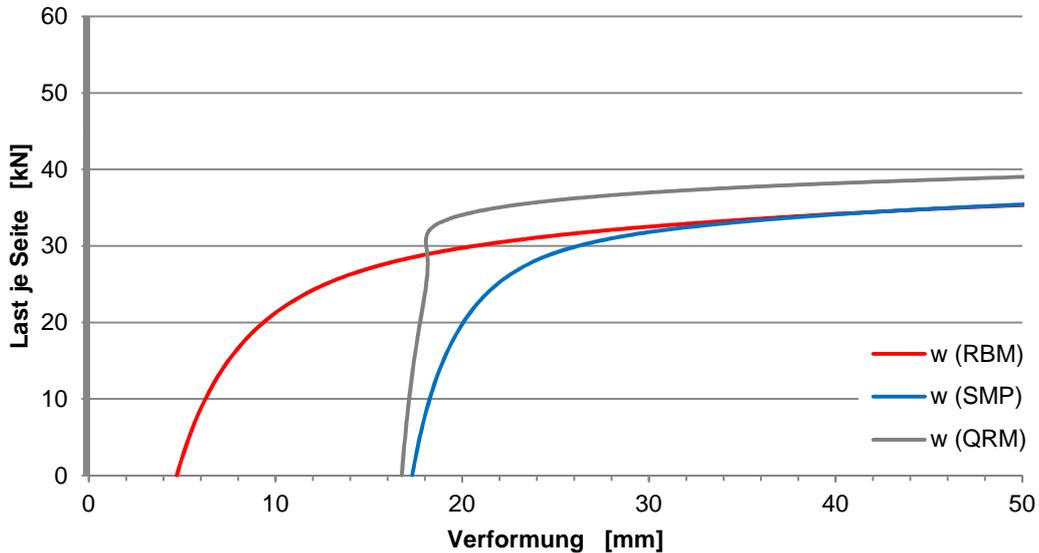


Abbildung 4-21: Typischer Kraft-Verformungsverlauf für  $a = 1$  (PS028)

Abbildung 4-22 zeigt, dass dies analog für die Spannungen gilt. Darin wird wiederum deutlich, dass die Spannungen im Vergleich zu den Verformungen zumindest in Teilbereichen überproportional zunehmen.

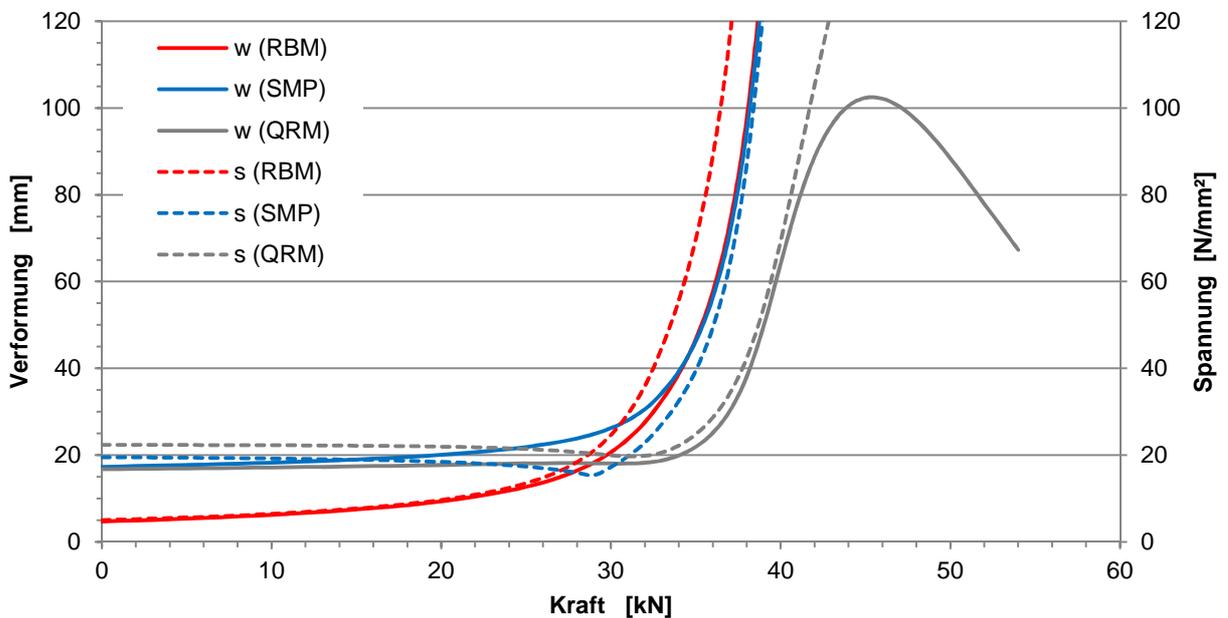


Abbildung 4-22: Auszug aus Verformungs-/Spannungs-Kraftverlauf für  $a = 1$  (PS028)

Für das Seitenverhältnis  $a = 2$  wirkt die Scheibe annähernd wie ein Einfeldträger für die Querbelastung  $q$ . Abbildung 4-23a zeigt die zugehörige typische Verformungsfigur. Die Randbalken selbst erfahren nur eine sehr geringe Verformung.

Mit zunehmender Vertikallast  $F$  wird durch die zunehmende Verformung der Randbalken auch die Scheibe eine Krümmung entlang der vertikalen Richtung eingeprägt, bis diese schließlich überwiegt.

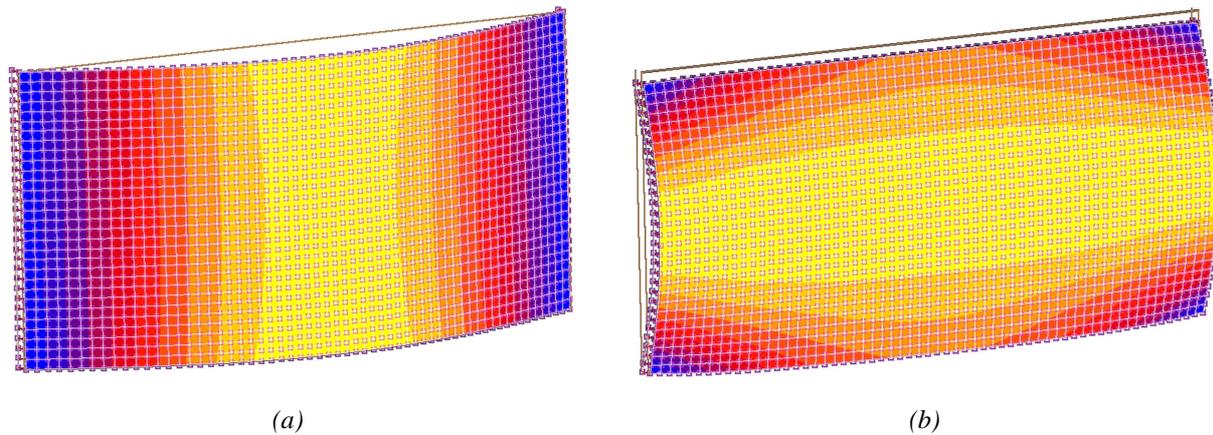


Abbildung 4-23: Verformungszustände  $q$  (a) und  $q+V$  (b) für  $a = 2$

Trotz des anfänglich großen Unterschiedes zwischen Scheibenmitte und Randbalkenmitte, gleichen sich die Verformungen zunehmend an bis auch hier der Verlauf annähernd gleich ist (vgl. Abbildung 4-24).

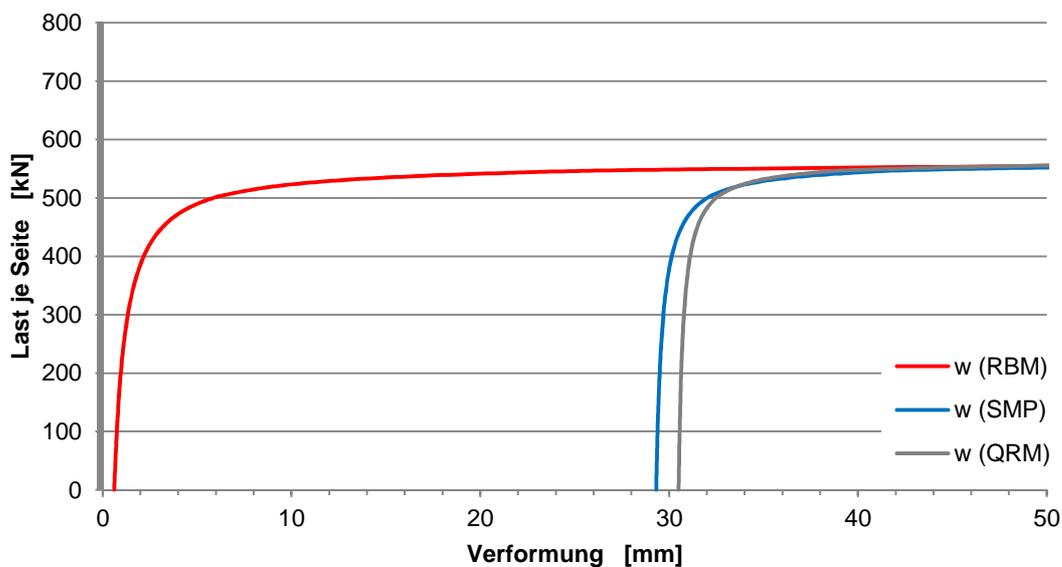


Abbildung 4-24: Typischer Kraft-Verformungsverlauf für  $a = 2$  (PS046)

Hinsichtlich der Spannungsverläufe (vgl. Abbildung 4-25) ist bemerkenswert, dass diese in der Mitte der Scheiben und über dem Randbalken zunächst trotz zunehmender Verformung nahezu gleich bleiben und erst kurz vor Erreichen der maximalen Last stark zunehmen.

Darüber hinaus gilt auch für diese Modell, dass der Punkt über der Mitte des Randbalkens die größte Zunahme sowohl der Spannung ( $\delta\sigma/\delta F$  und  $\sigma/\sigma_0$ ) als auch der Verformung ( $\delta w/\delta F$  und  $w/w_0$ ) aufweist und die Spannung über dem Randbalken stärker zunimmt als die Verformung.

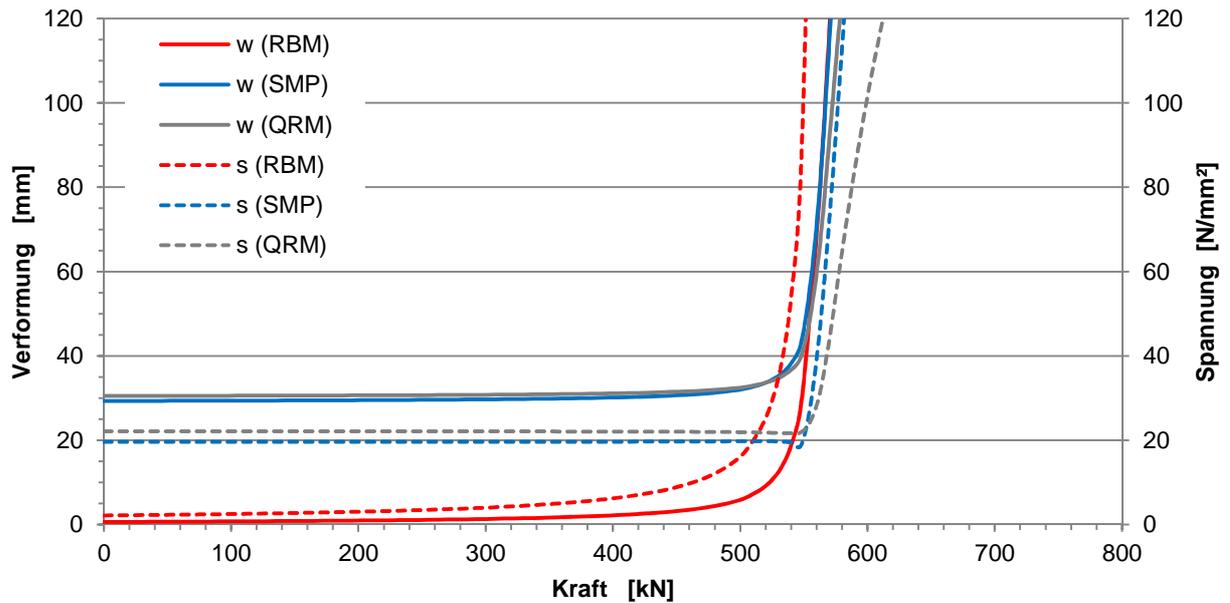


Abbildung 4-25: Auszug aus Verformungs-/Spannungs-Kraftverlauf für  $a = 2$  (PS046)

#### 4.5.9.2 Maximale Hauptzugspannungen

Bislang wurden für Verformungen und Spannungen nur die drei Punkte Scheibenmitte (SMP) und jeweils Mitte des horizontalen (RBM) und vertikalen (QRM) Scheibenrandes berücksichtigt. Dass dies gerechtfertigt ist, zeigen die folgenden Abbildungen. In den jeweils linken Abbildungen ist die Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für die Belastung  $q$  dargestellt, auf der jeweils rechten Seite für die Belastung aus  $q$  und  $F$ , kurz vor Versagen des Systems.

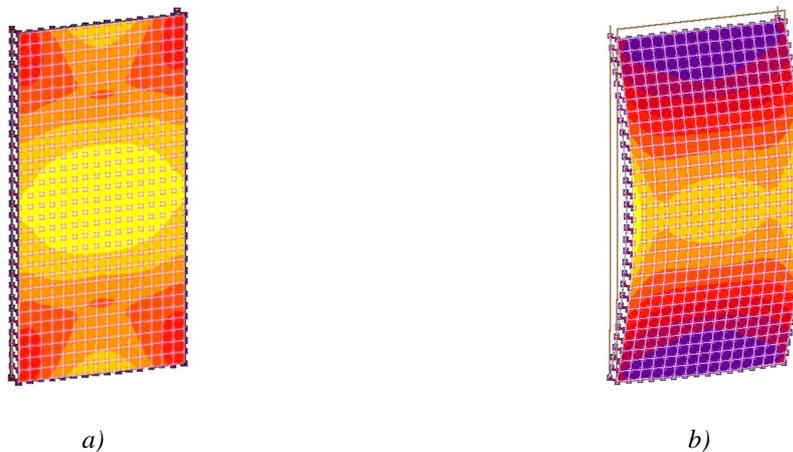


Abbildung 4-26: Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für PS010

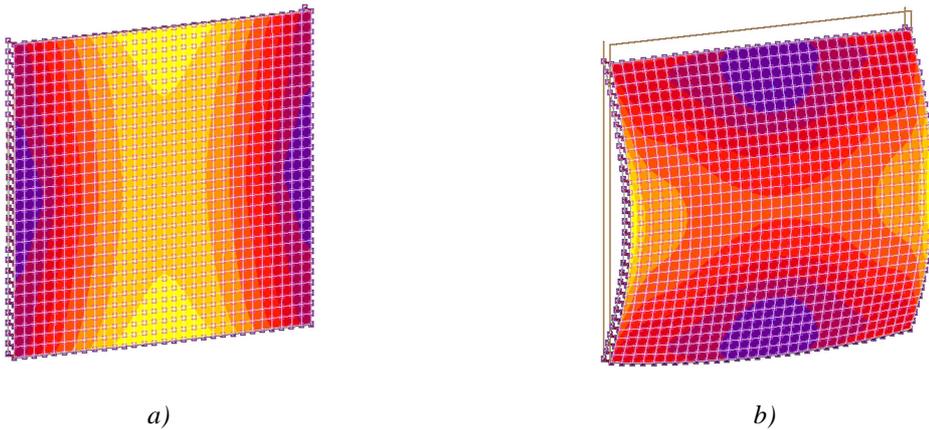


Abbildung 4-27: Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für PS028

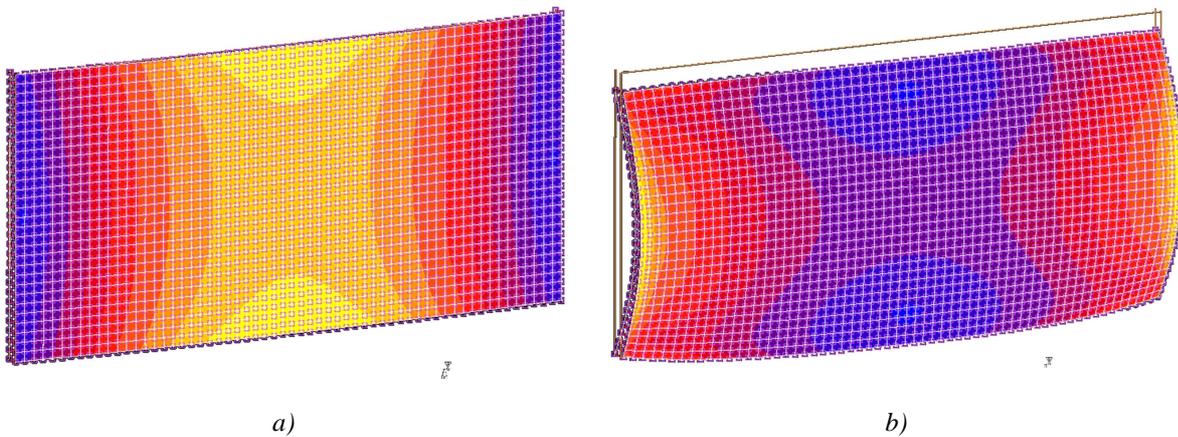


Abbildung 4-28: Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für PS046

Wie sich in den Abbildungen zeigt und auch durch die konkreten numerischen Ergebnisse bestätigt wird, treten die maximalen Zugspannungen stets an einem der betrachteten Punkte, Mitte der Scheibe oder in der Mitte des horizontalen oder vertikalen Scheibenrandes, auf.

#### 4.5.9.3 Unsymmetrische Belastung

Zur Untersuchung der Auswirkung unsymmetrische Belastungen wurden die beiden Extremfälle, gleiche Last auf beide Randbalken und Belastung nur eines Randbalkens, direkt gegenübergestellt.

Wie zu erwarten, zeigen die untenstehenden Abbildungen das steifere Verhalten bei unsymmetrischer Belastung. Ferner zeigt sich der abnehmende Einfluss mit zunehmender Scheibenbreite. Mit  $a = 2$  ist der Unterschied hinsichtlich Verformung und aufnehmbarer Last nur noch gering.

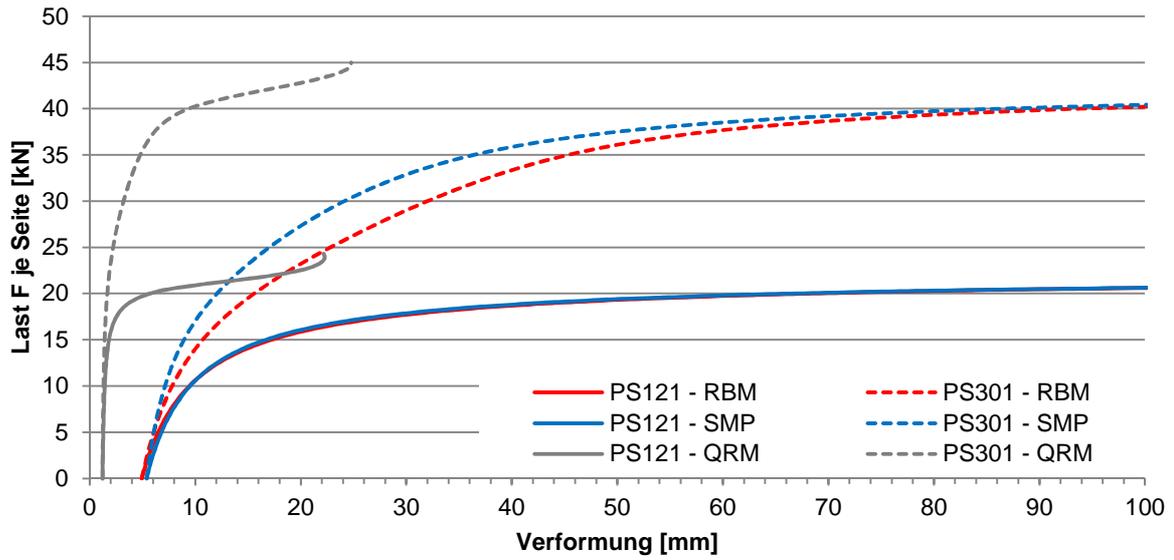


Abbildung 4-29: Symmetrische (PS121=PS010) und unsymmetrische(PS301) Belastung für  $a = 0,5$

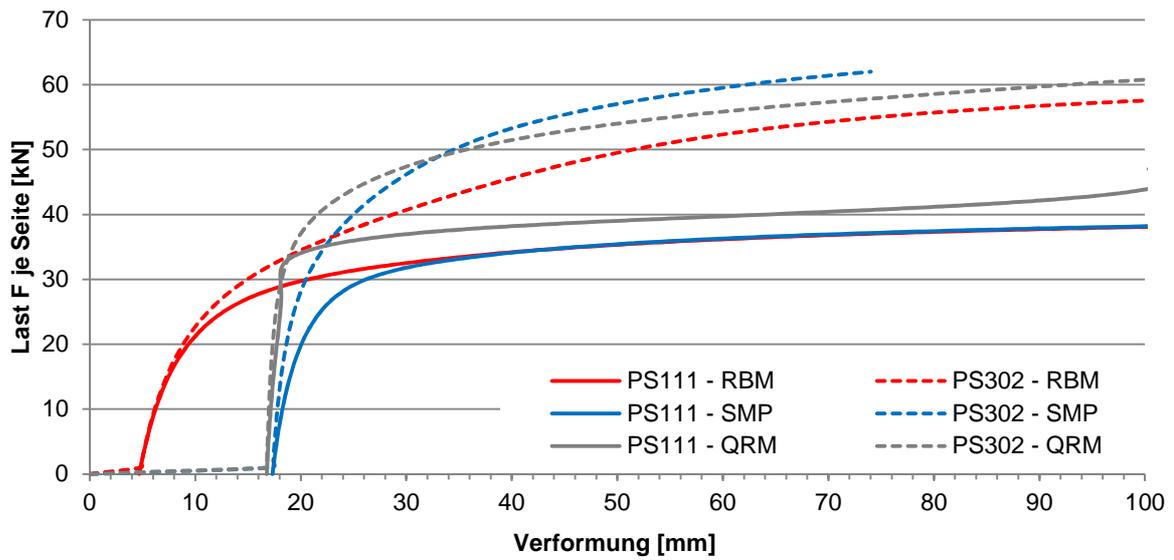


Abbildung 4-30: Symmetrische (PS111=PS028) und unsymmetrische (PS302) Belastung für  $a = 1$

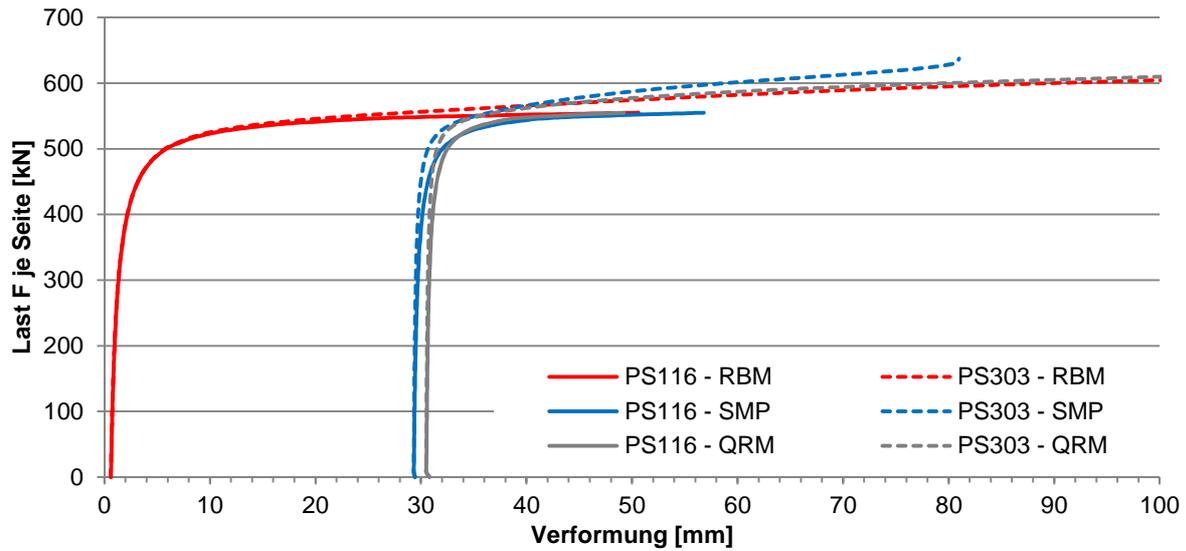


Abbildung 4-31: Symmetrische (PS116=PS046) und unsymmetrische (PS303) Belastung für  $a = 2$

#### 4.5.9.4 Steifer Querriegel

Auch für den Vergleich biegesteifer und biegeweicher Querriegel bzw. die Umsetzung im Modell als in z-Richtung gestützter und ungestützter Rand kann festgestellt werden, dass die zuvor in der Parameterstudie PS0xx (vgl. 4.5) gewählte Variante (freier Querrand) die – statisch – ungünstigere und damit zu berücksichtigende ist. Dies begründet sich jedoch nicht nur in dem steiferen Verhalten, sondern vor allem in der veränderten Verformungsfigur für die Belastung  $q$ . Durch die Stützung der Querränder wird aus der zweiseitigen Lagerung der Scheibe eine vierseitige Lagerung. Dadurch reduzieren sich die Verformungen bei Belastung durch  $q$  und damit die „Vorverformung“ für die Belastung durch  $F$ .

Während dieser Einfluss für die schmalen Scheiben ( $a = 0,5$ ) noch relativ gering ist (vgl. Abbildung 4-32), wird er für breitere Scheiben (Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34) sehr deutlich.

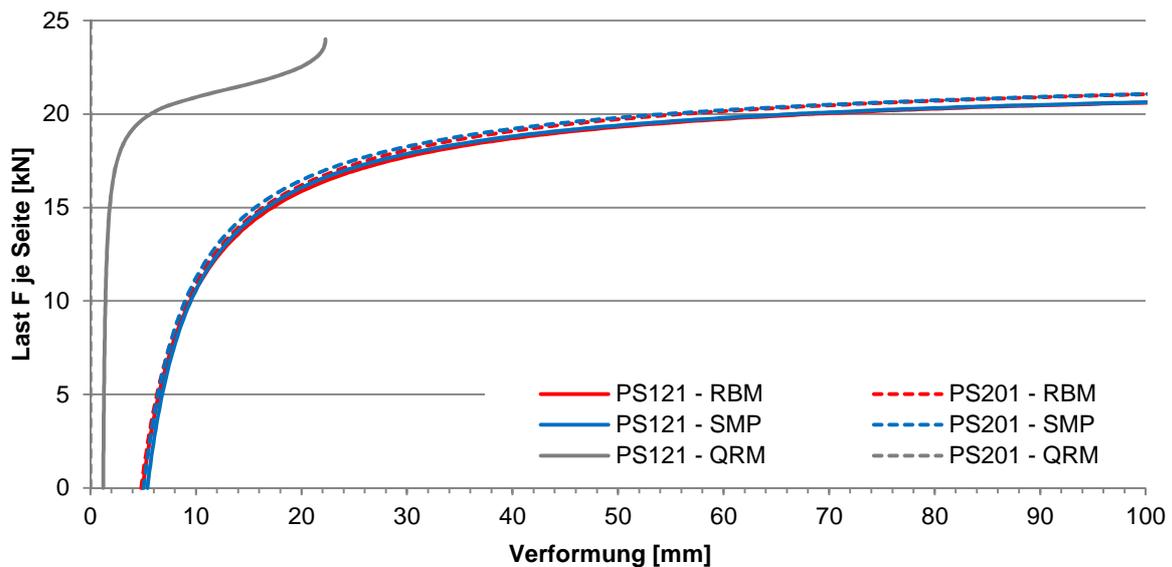


Abbildung 4-32: Vergleich mit (PS201) und ohne (PS121) Lagerung der Querränder für  $a = 0,5$

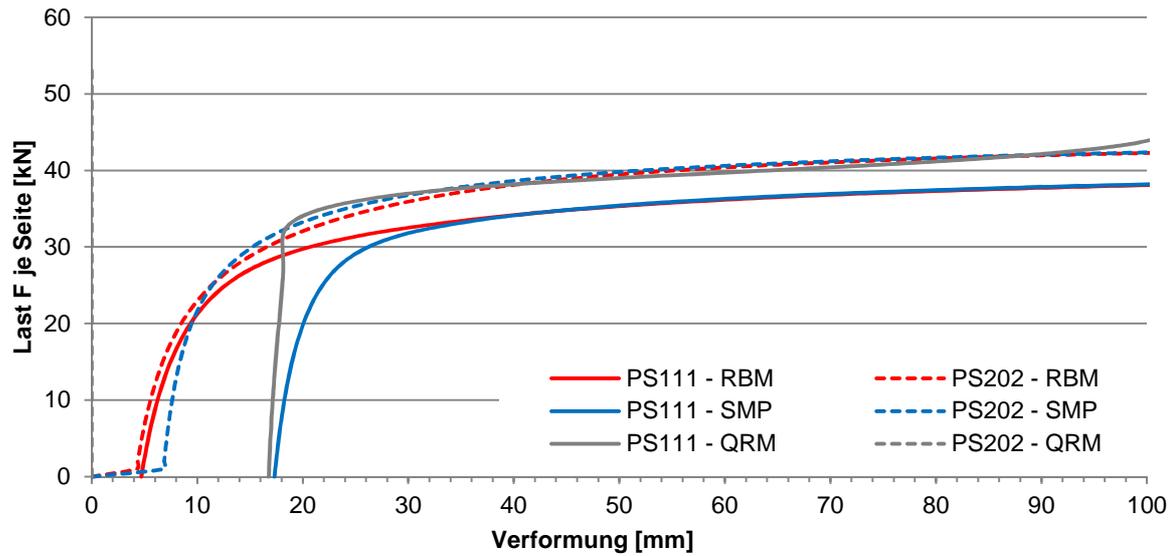


Abbildung 4-33: Vergleich mit (PS202) und ohne (PS111) Lagerung der Querränder für  $a = 1$

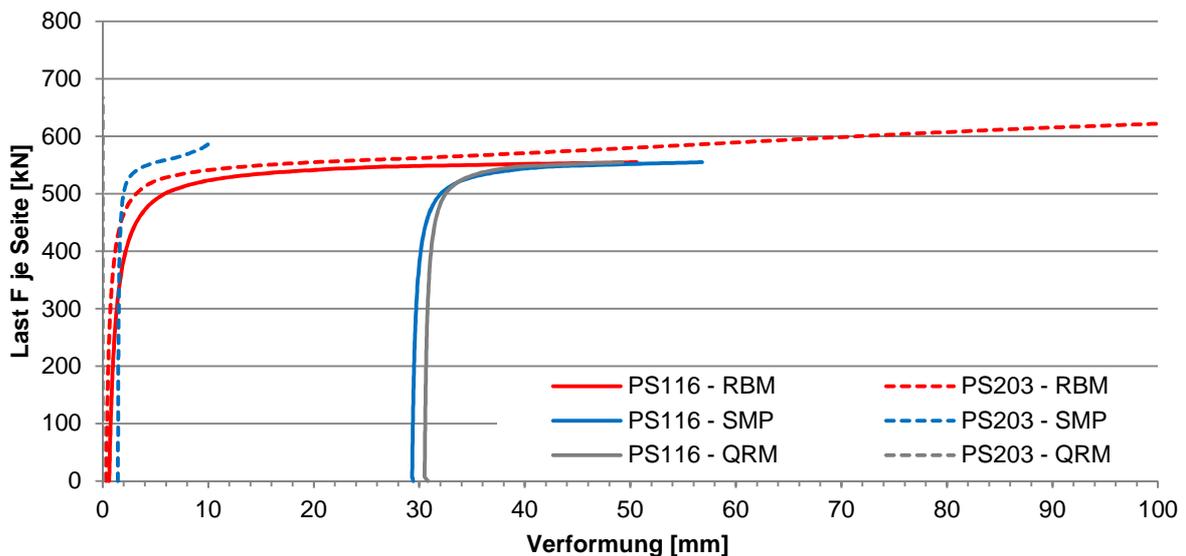


Abbildung 4-34: Vergleich mit (PS203) und ohne (PS116) Lagerung der Querränder für  $a = 2$

#### 4.5.9.5 Effizienz

Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, das Zusammenwirken von Stahl und Glas bei dem beschriebenen System zu untersuchen und, soweit möglich, Methoden zur Optimierung zu finden.

Durch die Ergebnisse der Versuche und Berechnungen zur Art der Lasteinleitung und das daraus resultierende System, bei dem die Lasteinleitung direkt in den Randbalken erfolgt, lässt sich das System im mechanischen Sinne auch als Knickstab betrachten (vgl. 3.6), wobei sich die (Biege-) Steifigkeit des Knickstabes aus der Steifigkeit des Randbalkens und der Steifigkeit der Scheibe zusammensetzt. Für den Randbalken ist davon auszugehen, dass dieser mit seiner ganzen Steifigkeit eingeht, für das Glas ist zu erwarten, dass der Beitrag von der Art und Größe der Vorverformung abhängt.

Als Ergebnisse der Parameterstudie liegen auch die Verzweigungslastfaktoren für eine Belastung nur durch F vor, aus welchen sich die Verzweigungslast  $F_{\text{krit}}$  je Randbalken bzw. je Seite ermitteln lässt. Aus dieser Verzweigungslast lässt sich eine wirksame Steifigkeit  $EI_{\text{eff}}$  ermitteln:

$$F_{\text{krit}} = \frac{\pi^2 \cdot EI_{\text{eff}}}{s_k^2} \quad (4-4)$$

und damit

$$EI_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{krit}} \cdot s_k^2}{\pi^2} \quad (4-5)$$

mit  $s_k = \beta \cdot l$  für die gegebenen Randbedingungen:  $\beta = 1$  und  $l = H$

Die wirksame Gesamtsteifigkeit  $EI_{\text{eff}}$  als Kompositum aus Steifigkeit des Randbalkens und anteiliger Steifigkeit der Scheibe lässt sich schreiben als

$$EI_{\text{eff}} = EI_{\text{RB}} + m \cdot EI_{\text{Glas}} \quad (4-6)$$

Damit lässt sich der wirksame Anteil der Scheibe ermitteln:

$$m = \frac{F_{\text{krit}} \cdot s_k^2 - EI_{\text{RB}} \cdot \pi^2}{EI_{\text{Glas}} \cdot \pi^2} \quad (4-7)$$

Der Faktor m kann dabei als Maß der Effizienz in Bezug auf die Scheibensteifigkeit betrachtet werden.

Eine weitere Möglichkeit, das Tragverhalten zu beurteilen ist es, die effektive Gesamtsteifigkeit in Bezug zur Steifigkeit des Randbalkens zu setzen. Dadurch erreicht man einen Ausdruck der Effektivität (e) der Wirksamkeit des Randbalkens, ohne dabei die Eigensteifigkeit der Scheibe zu berücksichtigen:

$$e = \frac{EI_{\text{eff}}}{EI_{\text{RB}}} \quad (4-8)$$

Die Werte für m und e wurden für alle Modelle ermittelt (vgl. Anhang) und sind in Abbildung 4-35 über der Breite des jeweiligen Modells aufgetragen. Dabei wird deutlich, dass der aktivierte Anteil der Steifigkeit der Scheibe (m in %) stark von den untersuchten Parametern abhängig ist und auch für eine bestimmte Breite stark variiert. Darüber hinaus lässt sich auch erkennen, dass die Werte für m mit zunehmender Breite abnehmen.

Die Werte für die Effizienz e zeigen, dass die effektive Steifigkeit des Systems Randbalken mit Scheibe um bis zu 60% größer sind, als die Steifigkeit des Randbalkens selbst. Mit zunehmender Breite leistet die Scheibe jedoch – nach dieser Auswertung – kaum noch einen Beitrag zum Tragverhalten.

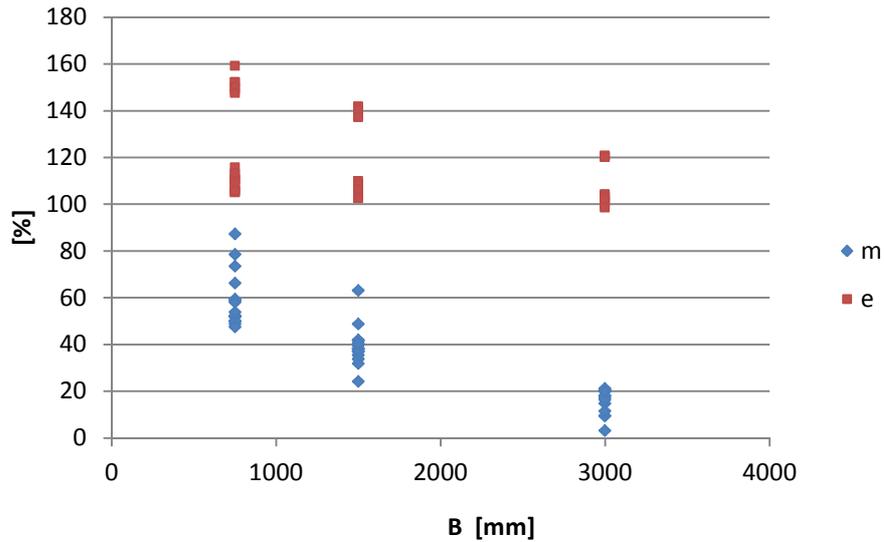


Abbildung 4-35: Effektiver Anteil der Scheibensteifigkeit  $m$  und Effizienz  $e$

Um diesen Zusammenhang eingehender zu untersuchen, wurden in einer weiteren Parameterstudie (PS1xx) unterschiedliche Breiten untersucht. Die übrigen Parameter wurden dabei analog den Vergleichsversuchen nach 4.5.9.3 und 4.5.9.4 übernommen (zur Begründung der Parameterwahl vgl. 6.2):

- $H = 1500$  mm
- $s = 1$
- $q = 1,0$  kN/m<sup>2</sup>
- $f = 0,01$

In Abbildung 4-36 sind die Werte von  $m$  und  $e$  für die untersuchten Breiten dargestellt. Darin zeigt sich nun sehr deutlich die Abhängigkeit der effektiven Scheibenbreite von der Gesamtbreite der Scheibe.

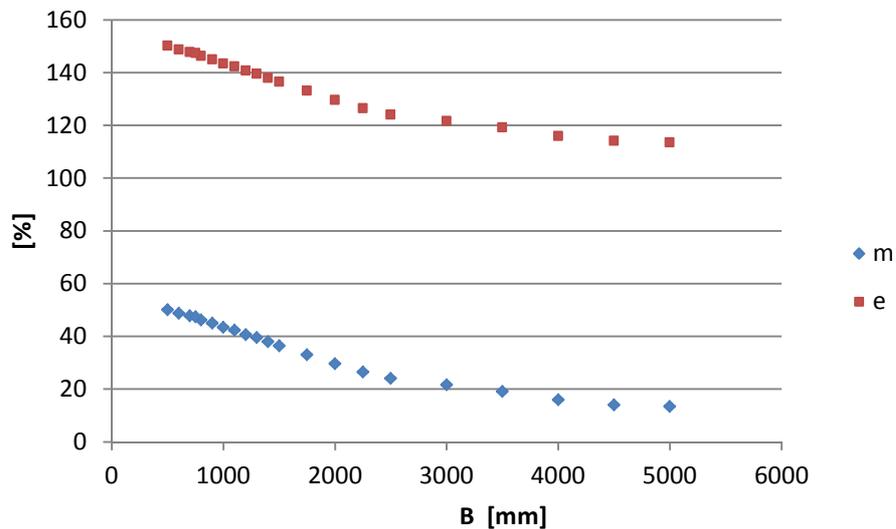


Abbildung 4-36: Werte von  $m$  und  $e$  für weitere Breiten

#### 4.5.9.6 Zusammenfassung der Auswertung

Der Übersichtlichkeit halber sind die Ergebnisse der Parameterstudien hier nochmals kurz zusammengefasst:

Die Untersuchungen zum Verformungsverhalten bestätigten die Ergebnisse aus den Betrachtungen zur Vorverformung. Unabhängig vom Ansichtsverhältnis  $a = B / H$  nehmen die Verformungen am Randbalken am stärksten zu und „holen“ die Verformungen in der Mitte und am Rand „ein“, bis sich ein Verformungsbild ähnlich dem eines durch Knicken verursachten Verformungsbildes.

Die Spannungen (Hauptzugspannungen an der Oberfläche der Scheibe) nehmen zum Teil im Vergleich zur Verformung überproportional zu, so dass hier kein linearer Zusammenhang ermittelt werden kann.

Die Vergleichsberechnungen der Parameterstudie PS2xx haben ergeben, dass der freie Querrand die ungünstigere und damit im direkten Vergleich die maßgebende Lagerung darstellt, da sich für einen gestützten Querrand die höheren Steifigkeiten und auch die höheren Tragfähigkeiten ergeben. Der Unterschied zwischen gestütztem und ungestütztem Rand wird mit zunehmender Breite größer, was hauptsächlich durch die aus der Stützung resultierende zweiseitige Lagerung verursacht wird.

Ferner wurde durch weitere Vergleichsberechnungen (in PS3xx) gezeigt, dass die unsymmetrische Belastung der Scheibe, d.h. als Extremfall nur ein Randbalken belastet wird, günstiger ist und zu geringeren Verformungen und höheren Tragfähigkeiten je Randbalken führt.

Um die Wirksamkeit der Gesamtkonstruktion hinsichtlich des Zusammenwirkens von Randbalken und Scheibe zu beurteilen wurden zwei Ergebnisparameter definiert:  $e$  als Effektivität der Tragwirkung bezogen auf den Randbalken und  $m$  als Maß für die Effizienz als Wirksamkeit der Scheibe, ausgedrückt als anteilige Biegesteifigkeit aus der Rückrechnung der Verzweigungslasten. Dabei stellte sich heraus, dass die Parameter insgesamt einen großen Einfluss auf die Effizienz haben und dabei speziell die Effizienz mit zunehmender Breite abnimmt.

## 5 Experimentelle Untersuchungen

### 5.1 Allgemeines

Die Versuche dienen in erster Linie zur Überprüfung der auf theoretischem und numerischem Wege gefundenen Ergebnisse. Dies ist insofern wichtig, als dass die Versuche nicht die Basis für die in den anderen Kapiteln dargestellten Ergebnisse sind. Für eine rein versuchstechnische Ermittlung der Traglasten für verschiedenen Abmessungen, Steifigkeits- und Lastverhältnisse wäre ein viel größere Anzahl an Versuchen notwendig gewesen. Durch die Kombination aus numerischer Berechnung und versuchstechnischer Verifizierung – durch die im Folgenden beschriebenen Versuche und die im Rahmen anderer Forschungsprojekte erfolgten Untersuchungen – ist eine geringe zusätzliche Versuchsanzahl ausreichend.

Mit den Versuchen werden insgesamt zwei Module unterschiedlicher Geometrie („Hochformat“: RS1H und „Querformat“: RS1Q) in verschiedenen Belastungsszenarien untersucht. Ein Modul besteht aus einer Glasscheibe und zwei Randbalken. Zunächst wird auf die Module eine Vorverformung senkrecht zur Scheibenebene aufgebracht, anschließend werden sie in Scheibenebene belastet. Ermittelt und aufgezeichnet wird der (Vertikal-) Kraft-Verformungsverlauf sowie die Verformung der Scheibe an fünf Punkten.

### 5.2 Vorverformung

Wie in 4.5.9 gezeigt, ist für das Gesamttragverhalten die aus der Vorbelastung resultierende Verformung der Randbalken maßgebend. Das steuerbare Aufbringen einer Einzellast ist experimentell einfacher als die Belastung der gesamten Fläche, gerade in diesem Fall, da die Scheiben vertikal angeordnet sind. Die Scheibe soll daher nur mittig durch eine Stellschraube ausgelenkt werden. Die Verformung der Scheibe wird währenddessen aufgezeichnet, so dass die Auslenkung in der Mitte der Scheibe genau so eingestellt werden kann, dass in der Mitte der Randbalken eine definierte geometrische Vorverformung erreicht wird.

Bei der Auslenkung mittels einer Stellschraube handelt es sich um eine weggesteuerte Einstellung der Vorverformung. Diese unterscheidet sich wesentlich von einer lastinduzierten, also kraftgesteuerten Vorverformung. Entscheidend ist dabei nicht der Zustand im Moment der Auslenkung, sondern das Verhalten bei anderweitiger Verformung bzw. Belastung des Systems, hier durch die Vertikalkraft. Im Fall der Stellschraube bleibt die Auslenkung – zunächst – konstant, im Fall einer lastgesteuerten Belastung wirkt die auslenkende Kraft mit stets gleicher Größe. Die Stellschraube weist zudem die Besonderheit auf, dass die Verformung nur „auf Druck“ definiert ist, d. h. die Scheibe ist mindestens bis zur Stellschraube ausgelenkt, kann jedoch, mit zunehmender Vertikalkraft, davon abheben. Mit dem Zeitpunkt des Abhebens wirkt von der Stellschraube keine Kraft mehr auf die Scheibe, damit unterscheidet sich das Verhalten von dem eines Systems mit konstanter Krafteinwirkung. Wichtig ist dieser Unterschied vor allem für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungen (vgl. Abschnitt 6.1).

### 5.3 Versuchsaufbau

#### 5.3.1 Modul

Jedes Modul besteht aus einer Scheibe mit den Abmessungen  $B \cdot H = 1000 \text{ mm} \cdot 1500 \text{ mm}$  bzw.  $B \cdot H = 1500 \text{ mm} \cdot 1000 \text{ mm}$  und der Dicke  $t = 8,0 \text{ mm}$  und jeweils zwei Randbalken in Form von gekanteten Stahl-U-Profilen. Diese wiesen zum Teil sehr starke Abweichungen zur Soll-Geometrie auf. Daher werden die einzelnen Profile exakt vermessen und die geometrischen Größen für jedes Profil bestimmt.

Um den Einfluss der Reibung zu minimieren, werden in das U-Profil dreiseitig Streifen aus PTFE (Handelsname „Teflon“) eingelegt, bevor das Glas eingeschoben wird. Die Dicke der Zwischenlage wird so gewählt, dass kein Spiel vorhanden ist, die Scheiben jedoch nicht stark geklemmt werden. Auch dies dient der Minimierung des Reibungseinflusses.

Um alle Varianten der Lasteinleitung untersuchen zu können, sind die Randbalken genauso lang wie die entsprechende Scheibenkante.

### 5.3.2 Lagerung

Das Modul wird stets an vier Punkten gelagert. Je nach Lasteinleitung sind das die Enden der Randbalken oder die horizontale Glaskante direkt neben den Enden Randbalken. In beiden Fällen erfolgt die Lastübertragung durch gelenkig gelagerte Stahlschuhe, in denen ein Zwischenstück aus POM eingesetzt ist, der so ausgefräst ist, dass er genau über die Scheibe bzw. den Randbalken passt (vgl. Abbildung 5-1b bzw. a). Zur Umrüstung zwischen Hoch- und Querformat sowie zwischen Lasteinleitung in den Randbalken oder ins Glas kann der Schuh verschoben werden.



Abbildung 5-1: Lasteinleitung a) in den RB und b) in die Glaskante

Es gibt drei Varianten des POM-Zwischenstücks mit

- Ausfräsung entsprechend der Dicke der Scheibe für die Lasteinleitung in die Glaskante (Abbildung 5-1b),
- Ausfräsung auf die Breite des Randbalkens, darin aber plan, für die kombinierte Lasteinleitung in Glas und Randbalken und
- Ausfräsung auf die Breite des Randbalkens, jedoch mit einer zusätzlichen Vertiefung in der Mitte auf Scheibenbreite; dadurch wird sichergestellt, dass die Last nur in den Stahlquerschnitt des Randbalkens eingeleitet wird (Abbildung 5-1a).

An der Unterkante des Moduls erfolgt die Lagerung analog.

Durch die Vorverformung werden die U-Profile der Randbalken um ihre starke Achse beansprucht. Um sicherzustellen, dass sie durch die Vertikallast nicht vorzeitig um die schwache Achse ausknicken, wer-

den seitlich Gleitplatten als Führung angebracht, die jeweils vor Versuchsbeginn genau justiert werden. Auf die Gleitplatten werden Streifen aus PTFE aufgeklebt, um im Falle von Kontakt die auftretende Reibung zu minimieren. Die Torsion der Randbalken ist nicht behindert.

### 5.3.3 Belastung

Die Vertikallast wird von oben durch einen Elektrozyylinder mit einer maximalen Kraft von 50 kN aufgebracht. Zwischen Zylinder und den Lasteinleitungsschuhen ist ein Querbalken eingesetzt, der die Belastung gleichmäßig auf beide Seiten aufteilt.

Abbildung 5-2 zeigt den Versuchsaufbau schematisch und in der Umsetzung im Labor des Instituts Konstruktiver Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München.

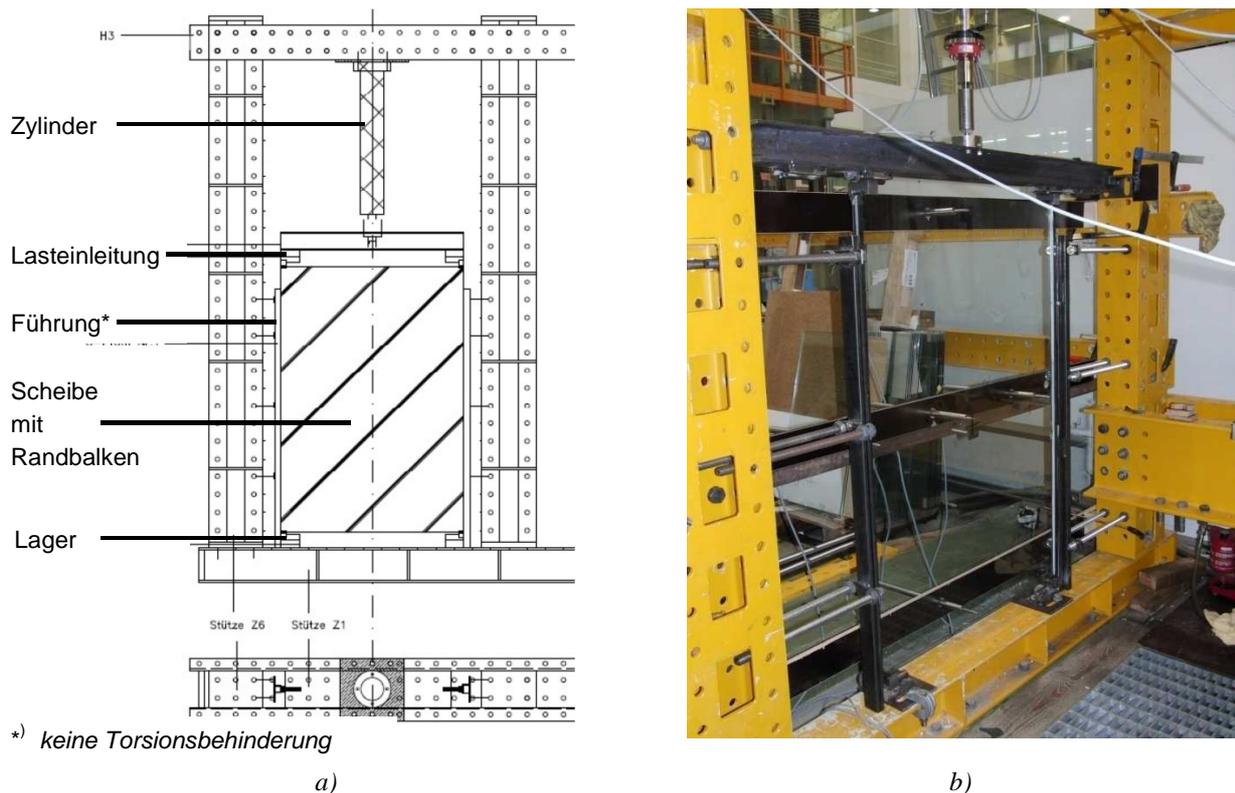


Abbildung 5-2: Versuchsaufbau schematisch (a) und im Labor des Instituts (b)

Die Verformung der Scheibe wird an fünf Punkten gemessen. Eine Übersicht über die Lage der Punkte gibt Abbildung 5-3.

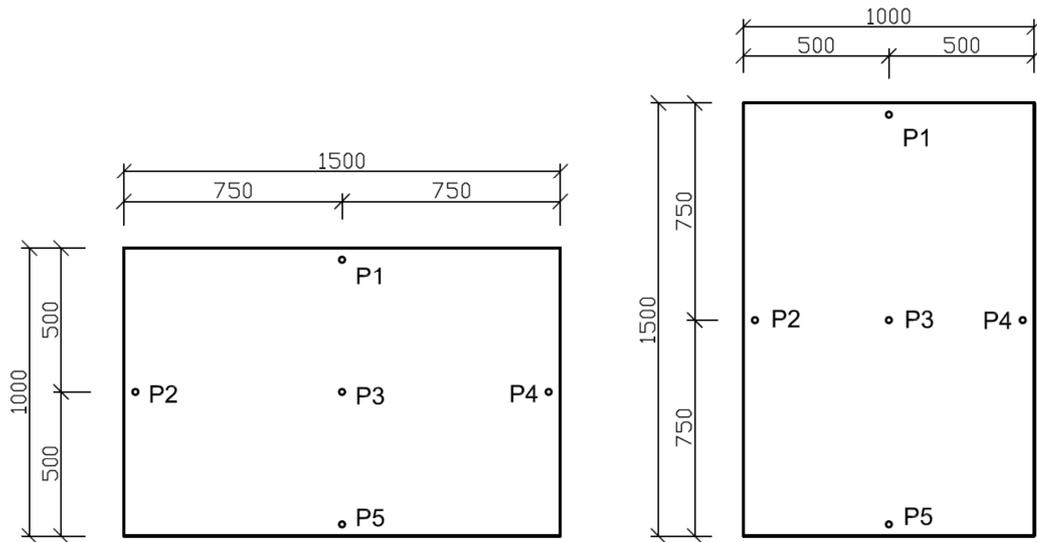


Abbildung 5-3: Lage der Wegaufnehmer in den Versuchen

## 5.4 Versuchsprogramm

Wesentliches Ziel der Versuche ist es, das rechnerisch ermittelte Last-Verformungsverhalten der Module zu überprüfen. Durch eine Variation der Lasteinleitung (Randbalken/Glas) soll auch das Ergebnis aus 4.4 bestätigt werden, wonach die Lasteinleitung direkt in den Randbalken die statisch günstigste Variante ist.

Es werden folgende Versuche durchgeführt:

- Hochformat - Belastung der Randbalken
- Hochformat - Belastung der Glaskante
- Querformat - Belastung der Randbalken
- Querformat - Belastung der Glaskante

Die Varianten werden unter verschiedenen Vorverformungszuständen untersucht und jeweils mehrfach belastet.

Die Belastung wird stets weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,05 mm/s aufgebracht.

## 5.5 Versuchsergebnisse

Obwohl der Versuchsumfang nicht sehr groß ist, ergibt sich durch die einzelnen Variationen eine große Datenmenge. Auf eine umfangreiche oder gar vollständige Darstellung der Versuchsergebnisse wird daher im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Die Ergebnisse sind in einer Bachelorarbeit [GOLEMBUS 2011] zusammengefasst.

Im Folgenden wird daher direkt der Vergleich des jeweiligen Versuches mit der entsprechenden Berechnung dargestellt. Während in den numerischen Untersuchungen der vorangegangenen Abschnitte auf Grund des in der Regel symmetrischen Verhaltens die Betrachtung von drei Punkten ausreichend war, müssen zur Darstellung der Versuche, auch auf Grund der unterschiedlichen Abweichungen bei den Randbalken von der „Soll-Form“, die Ränder oben/unten bzw. links/rechts gesondert betrachtet werden. Gleiches gilt für die numerische Abbildung der Versuche. Die Zuordnung zur bisherigen Nomenklatur ist dabei:

- |           |             |                        |
|-----------|-------------|------------------------|
| P1 und P5 | entsprechen | QRM (Querrand-Mitte)   |
| P2 und P4 | entsprechen | RBM (Randbalken-Mitte) |

P3 entspricht SMP (Scheibenmittelpunkt)

Zur Darstellung der Versuchsergebnisse werden für numerische und experimentelle Werte einheitlich die Bezeichnungen P1 bis P5 entsprechend der Darstellung in Abbildung 5-3 verwendet.

Hinsichtlich der Lasteinleitungsvarianten wird die Nomenklatur unverändert beibehalten:

LEGK Lasteinleitung in die Glaskante – konzentriert nahe den Ecken

LERB Lasteinleitung in den Randbalken

Die Abkürzung FEM steht in den Diagrammen für die Ergebnisse der Vergleichsberechnung mittels Finiter-Elemente-Methode.

### 5.5.1 Versuche am Hochformat 1000 mm x 1500 mm (RS1H)

Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die Randbedingungen des Versuches. Nach Lieferung der Profile für die Randbalken stellte sich heraus, dass die gekanteten Profile recht große Abweichungen zur Soll-Geometrie hatten, besonders aber auch untereinander. Es wurde daher jedes einzelne Profil genau vermessen, um die tatsächlichen geometrischen Daten zu ermitteln. In Tabelle 5-1 sind daher rechter und linker Randbalken separat beschrieben. Zudem mussten die Profile auf Grund starker bleibender Verformung einmal ausgetauscht werden, deshalb sind jeweils zwei Werte angegeben. Die unterschiedliche Geometrie wurde auch bei der Vergleichsberechnung berücksichtigt.

Tabelle 5-1: Übersicht Versuch RSIH

Allgemeine Parameter	Abk.	Wert/Eigenschaft
Scheibe		
- Breite	B	1000 mm
- Höhe	H	1500 mm
- Dicke	t	8,0 mm
- Glasart	-	ESG
Randbalken links <sup>2</sup>		
- "wirksames" Flächenträgheitsmoment <sup>1</sup>	$I_{RBy}$	32287 mm <sup>4</sup> / 30497 mm <sup>4</sup>
- Flächenträgheitsmoment senkrecht zum "wirksamen"	$I_{RBz}$	19443 mm <sup>4</sup> / 17606 mm <sup>4</sup>
- Querschnittsfläche	$A_{RB}$	309 mm <sup>2</sup> / 297 mm <sup>2</sup>
Randbalken rechts <sup>2</sup>		
- "wirksames" Flächenträgheitsmoment <sup>1</sup>	$I_{RBy}$	28410 mm <sup>4</sup> / 29460 mm <sup>4</sup>
- Flächenträgheitsmoment senkrecht zum "wirksamen"	$I_{RBz}$	17029 mm <sup>4</sup> / 17331 mm <sup>4</sup>
- Querschnittsfläche	$A_{RB}$	293 mm <sup>2</sup> / 297 mm <sup>2</sup>
Lagerung		
- RB als seitlich unverschieblicher Einfeldträger		
- Scheibe in z-Richtung mit RB gekoppelt		
- Scheibe unten gegen "Abrutschen" gelagert		
<sup>1</sup> Als "wirksames" Flächenträgheitsmoment wird jenes bezeichnet, welches maßgebend für die Aussteifung senkrecht zur Scheibe wirkt. Vgl. hierzu auch Abschnitt 4.1.3.2.		
<sup>2</sup> Es sind jeweils zwei Werte angegeben, da die Randbalken einmal ausgetauscht wurden.		

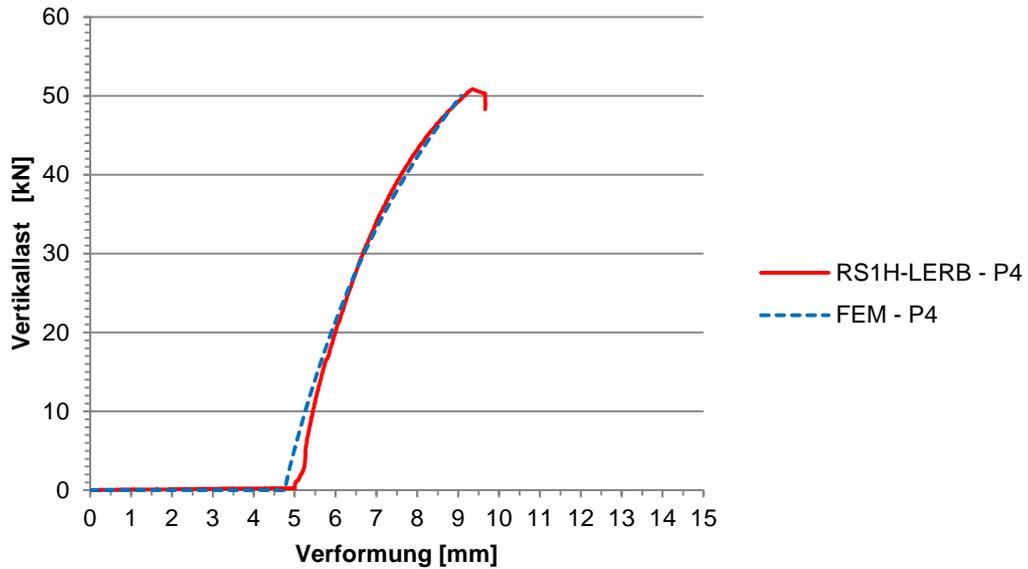


Abbildung 5-4: Hochformat mit Lasteinleitung im Randbalken

Der in Abbildung 5-4 dargestellte Verlauf bezieht sich auf die Verformung in der Mitte des Randbalkens senkrecht zur Scheibenebene. Es zeigt sich, dass Kraft-Verformungsverlauf von Berechnung und Versuch hier recht gut übereinstimmen. Die Last wurde dabei direkt in den Randbalken eingeleitet. Die durch die mittige Auslenkung hervorgerufene Vorverformung in der Mitte des Randbalkens lässt sich direkt auf der x-Achse ablesen.

Abbildung 5-5 zeigt die Ergebnisse analog für den Fall der Lasteinleitung in die Glaskante. Hier kamen die recht unterschiedlichen Randbalken zum Einsatz, deshalb sind beide Seiten dargestellt. Auch hier zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung von Rechnung und Versuch.

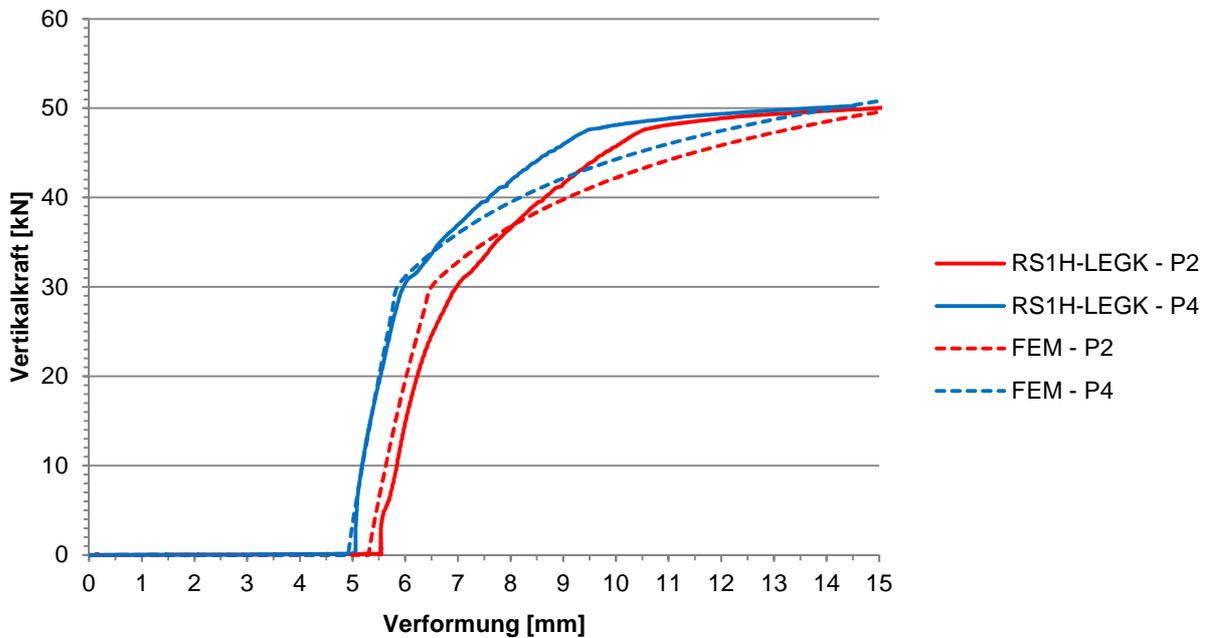


Abbildung 5-5: Hochformat mit Lasteinleitung in die Glaskante

### 5.5.2 Versuche am Querformat 1500 mm x 1000 mm RS1Q

Tabelle 5-2 zeigt die wesentlichen Parameter des Versuchsaufbaus RS1Q.

Tabelle 5-2: Übersicht Versuch RS1Q

Allgemeine Parameter	Abk.	Wert/Eigenschaft
Scheibe		
- Breite	B	1000 mm
- Höhe	H	1500 mm
- Dicke	t	8,0 mm
- Glas	-	ESG
Randbalken links		
- "wirksames" Flächenträgheitsmoment <sup>1</sup>	$I_{RBy}$	31131 mm <sup>4</sup>
- Flächenträgheitsmoment senkrecht zum "wirksamen"	$I_{RBz}$	18452 mm <sup>4</sup>
- Querschnittsfläche	$A_{RB}$	303 mm <sup>2</sup>
Randbalken rechts		
- "wirksames" Flächenträgheitsmoment <sup>1</sup>	$I_{RBy}$	30985 mm <sup>4</sup>
- Flächenträgheitsmoment senkrecht zum "wirksamen"	$I_{RBz}$	18492 mm <sup>4</sup>
- Querschnittsfläche	$A_{RB}$	303 mm <sup>2</sup>
Lagerung		
- RB als seitlich unverschieblicher Einfeldträger Scheibe in z-Richtung mit RB gekoppelt		
- Scheibe unten gegen "Abrutschen" gelagert		
		
<sup>1</sup> Als "wirksames" Flächenträgheitsmoment wird jenes bezeichnet, welches maßgebend für die Aussteifung senkrecht zur Scheibe wirkt. Vgl. hierzu auch Abschnitt 4.		

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen den Kraft-Verformungsverlauf in der Mitte der Randbalken senkrecht zur Scheibenebene in Abhängigkeit von der Vertikallast, die im ersten Fall direkt in die Randbalken eingeleitet wird (Abbildung 5-6) und im zweiten Fall (Abbildung 5-7) in kurze ecknahe Bereiche der Glaskante eingeleitet wird.

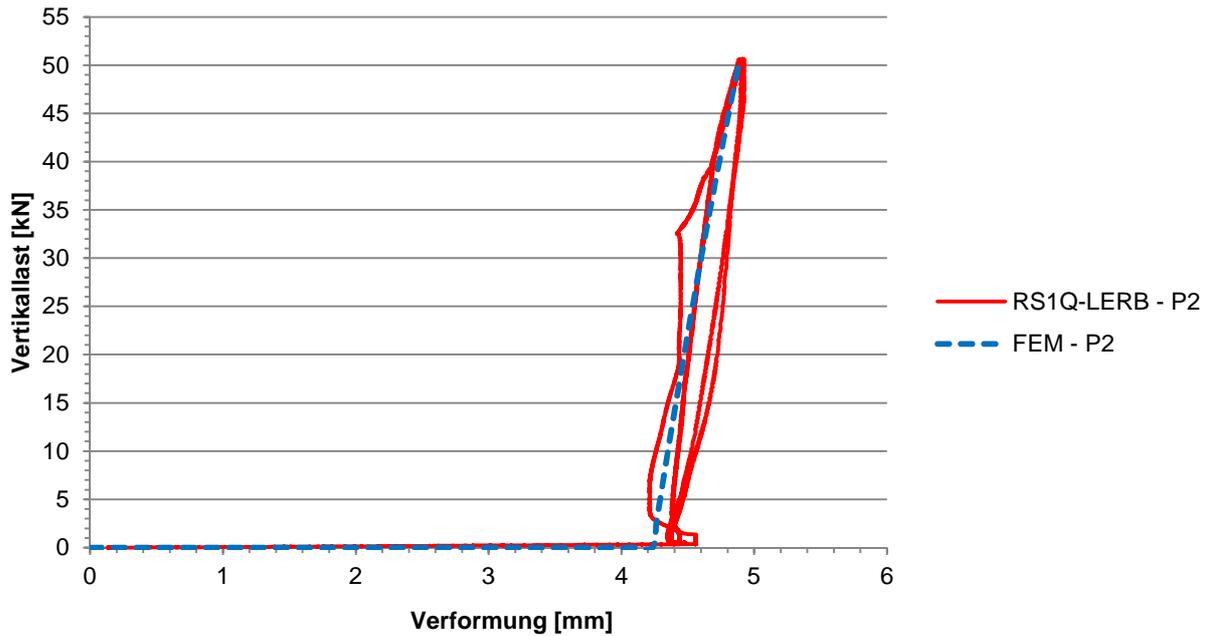


Abbildung 5-6: Querformat mit Lasteinleitung in die Randbalken

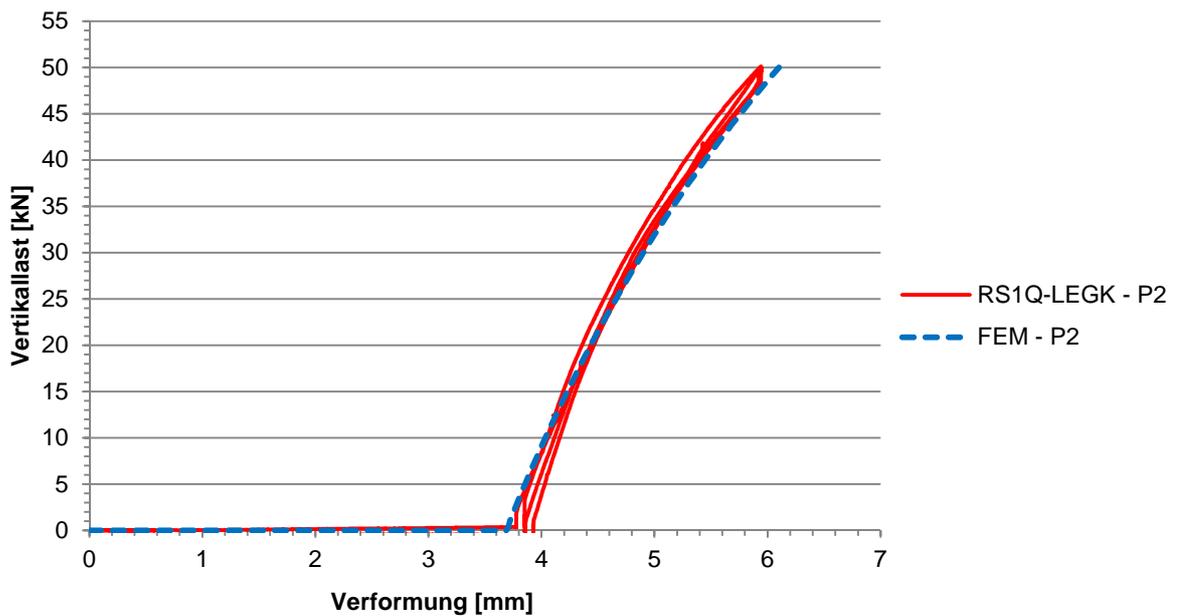


Abbildung 5-7: Querformat mit Lasteinleitung in die Glaskante

Für die Lasteinleitung in den Randbalken zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch – in Abbildung 5-6 sind mehrere Belastungszyklen dargestellt – ebenso wird die Lasteinleitung in die Glaskante zeigt durch das Modell gut abgebildet.

### 5.5.3 Vergleich der Lasteinleitungen

In Abbildung 5-8 werden die Ergebnisse von Versuch und Rechnung für die beiden Lasteinleitungsvarianten für den Aufbau RS1H direkt gegenübergestellt.

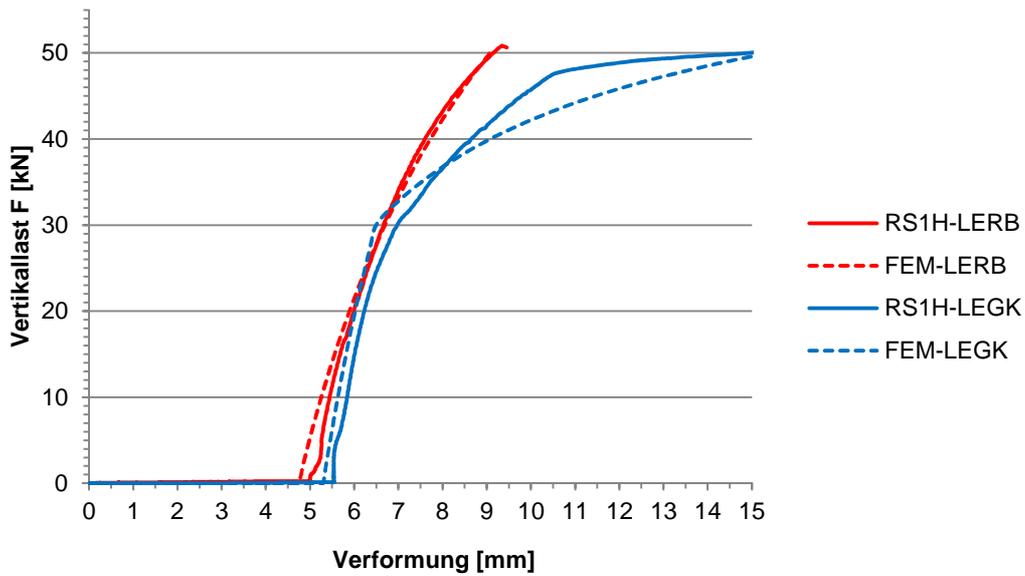


Abbildung 5-8: Vergleich der Lasteinleitungsvarianten im Versuch

Es zeigt sich deutlich, dass für die gleiche maximale Last von 50 kN die Verformung des Moduls, bei dem die Last in die Scheibenkante eingeleitet wird, deutlich größer ist. Zudem deutet sich durch die in diesem Fall für die höheren Lasten stark zunehmende Verformung an, dass die maximale Tragfähigkeit annähernd erreicht ist, während bei der Lasteinleitung in den Randbalken noch Reserven vorhanden sind.

Insofern wird die Wahl der Lasteinleitung aus 4.5.3, die im Wesentlichen auf der kritischen Last beruhte, auch durch das Last-Verformungsverhalten der Varianten bestätigt.

## 6 Vergleichsberechnungen und Ergebnisse

### 6.1 Vergleich von Berechnung und Versuch

Die durchgeführten Versuche dienen im Wesentlichen der versuchstechnischen Validierung der numerischen Modelle. Für eine explizite Verifizierung ist der beschriebene Versuchsumfang zu gering. Zudem wird im Versuch die Vorverformung durch eine – statische – Mindestanfangsverformung erzeugt, wohingegen die Vorverformung in den Berechnungsmodellen stets durch eine Belastung der Scheibe ( $q$ ) verursacht wird. Dadurch wird eine direkte Vergleichbarkeit erschwert. Für die Validierung wurde daher der im Versuch benutzte Auslenkungsmechanismus (Stellschraube) durch einen weggesteuerten Kontaktkörper implementiert, durch den die Scheibe ausgelenkt wird, der jedoch ein Abheben der Scheibe zulässt.

Mit den Versuchen konnte das numerisch untersuchte Tragverhalten bestätigt werden. In Abbildung 6-1 ist ein typischer Kraft-Weg-Verlauf aus den Versuchen dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die anfangs größere Verformung in Scheibenmitte (SMP) durch die stärker zunehmende Verformung in Randbalkenmitte (RBM) „eingeholt“ wird. Ferner ist zu erkennen, dass die Verformungen an den Querrändern (QRM) sich kaum verändern.

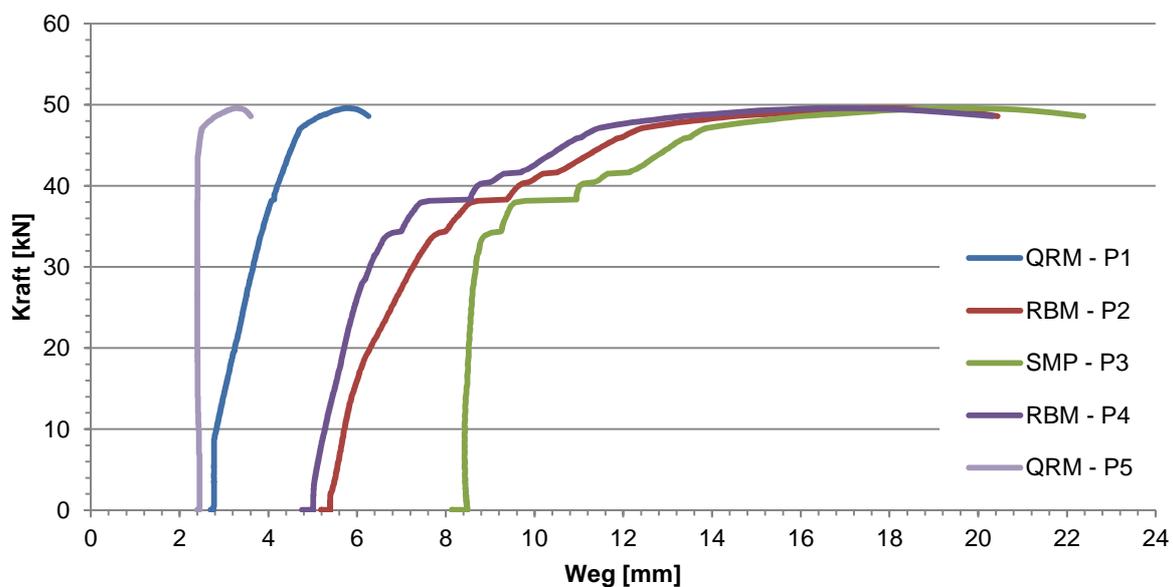


Abbildung 6-1: Kraft-Weg-Verlauf aus den Versuchen

Der direkte Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen des beschriebenen Modells, ist bereits in Abschnitt 5.5 in den jeweiligen Diagrammen dargestellt und soll an dieser Stelle nicht wiederholt werden. Zusammenfassend lässt sich dazu feststellen, dass die Berechnungen bestätigt werden konnten.

### 6.2 Vergleichsberechnung unter Ansatz eines Biegebalkens nach Theorie II. Ordnung

Das Ziel dieser Arbeit, das Zusammenwirken von Stahl und Glas bzw. von Randbalken und Scheibe zu untersuchen, konnte durch die parametrisierte Abbildung und Berechnung erreicht werden. Eine ausführliche Darstellung aller untersuchten Varianten ist im Anhang gegeben und wie in Abschnitt 3.6.4 beschrieben, können diese Ergebnisse unter Berücksichtigung der jeweiligen Parameter auf andere Abmessungen übertragen werden. Demzufolge müssen Systeme, die durch die gewählten Parameter nicht erfasst

werden, mit entsprechendem Aufwand durch eine verifizierte Berechnung untersucht werden. Für Einzelprojekte ist dies durchaus akzeptabel, dennoch wären Bemessungsansätze wünschenswert. Im Hinblick auf die Ableitung von Bemessungsgrundsätzen werden im Folgenden Möglichkeiten untersucht, die Tragwirkung des Systems allgemeingültiger abzubilden.

Wie in Abschnitt 3.6 dargestellt, lässt sich das System aus Randbalken und Scheibe je nach Kombination der Randbedingungen und Art der Lasteinleitung als Beulplatte oder als Einfeldträger nach Theorie II. Ordnung betrachten.

### 6.2.1 Verformungen

Die Untersuchungen zeigten, dass eine Lasteinleitung direkt in den Randbalken die günstigere ist. Somit ist das gewählte System dem des Einfeldträgers mit Druck-Normalkraft „näher“. Zum Erreichen einer Beultragwirkung müssen sehr steife Randbalken vorhanden sein müssen. Dies wiederum steht im Widerspruch zum Anspruch des Systems, die Stahlbauteile möglichst filigran zu halten. Im Weiteren wird daher die Analogie zwischen den ermittelten Kraft-Weg-Verläufen und einem Einfeldträger mit Normalkraft untersucht.

Für den Ansatz der Vergleichsberechnungen sind zunächst zwei Varianten naheliegend:

- Einfeldträger mit Normalkraft und Linienbelastung (aus q)
- Einfeldträger mit Normalkraft und – gegebener – Vorverformung (aus q)

Das Verformungsverhalten eines gedrückten Stabes nach Theorie II. Ordnung ist grundsätzlich maßgeblich abhängig von der Form und Größe der Vorverformung. Der Ansatz mit Linienbelastung hätte den Vorteil, dass die Vorverformung „automatisch“ mitberücksichtigt würde, wohingegen bei Ansatz ausgehend von der Vorverformung diese selbst zunächst nach Form und Größe ermittelt werden muss. In Abbildung 6-2 sind die beiden Systeme mit den zugehörigen Kenngrößen abgebildet (nach [PETERSEN 1982]).

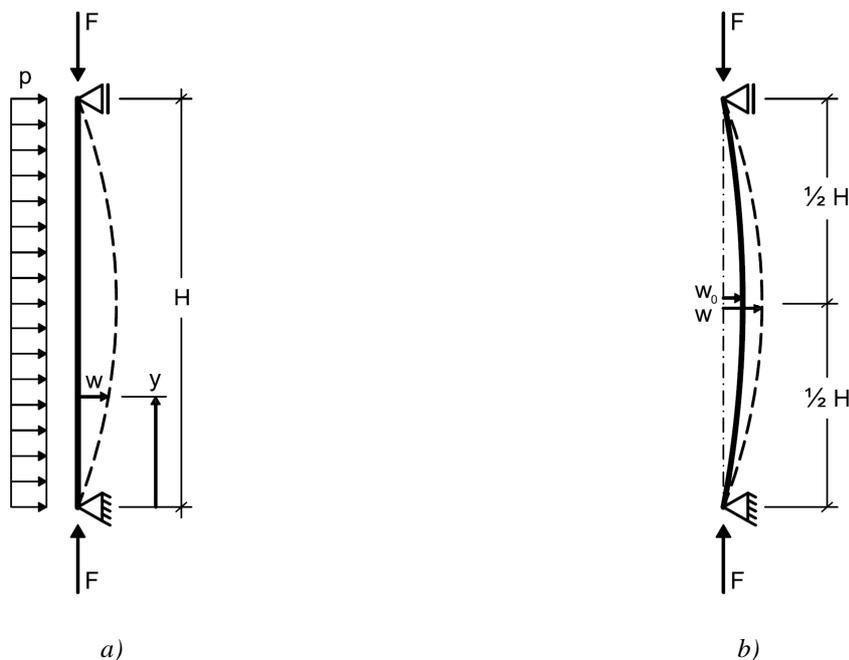


Abbildung 6-2: Einfeldträger mit Normalkraft mit Linienlast (a) und Vorverformung  $w_0$  (b)

### 6.2.1.1 Einfeldträger mit Normalkraft und Linienlast p

Zunächst wird die naheliegende Variante mit Belastung des Einfeldträgers (vgl. Abbildung 6-2) durch eine Linienlast untersucht. Nach [PETERSEN 1982] ergibt sich die Durchbiegung w dabei zu

$$w = \frac{p \cdot H^4}{EI \cdot \varepsilon^4} \cdot \left[ \cos \varepsilon \frac{y}{H} + \frac{1 - \cos \varepsilon}{\sin \varepsilon} \cdot \sin \varepsilon \frac{y}{H} - 1 - \frac{\varepsilon^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{y}{H}\right) \cdot \frac{y}{H} \right] \quad (6-1)$$

mit

$$\varepsilon = H \cdot \sqrt{\frac{F}{EI}} \text{ als Stabkennzahl} \quad (6-2)$$

Die Linienlast entspricht der Flächenlast der halben Scheibe:

$$p = \frac{q \cdot B}{2} \quad (6-3)$$

Bei der Betrachtung des halben System ergibt sich die Steifigkeit zu

$$EI = EI_{RB} + \frac{1}{2} \cdot EI_{Glas} \quad (6-4)$$

Für die weitere Betrachtung wird jedoch weiterhin die Abkürzung EI verwendet.

Der Vergleich der Verformung wird in der Mitte des Randbalkens durchgeführt, da hier die Ergebnisse aus den FEM-Berechnungen bereits vorliegen. Damit gilt

$$\frac{y}{H} = 0,5 \quad (6-5)$$

Aus den Gleichungen (6-1), (6-3) und (6-5) folgt

$$w = \frac{q \cdot B \cdot H^4}{2 \cdot EI \cdot \varepsilon^4} \cdot \left[ \cos \frac{\varepsilon}{2} + \frac{1 - \cos \varepsilon}{\sin \varepsilon} \cdot \sin \frac{\varepsilon}{2} - 1 - \frac{\varepsilon^2}{8} \right] \quad (6-6)$$

Für das Modell PS111 (entspricht dem Modell PS010) sind in Abbildung 6-3 die Ergebnisse aus der numerischen Berechnung (bezeichnet mit „w(RB,FEM)“) denen des Vergleichsansatzes nach Gleichung (6-6) (bezeichnet mit „w(ThIO-q) – bm = B/2“) gegenübergestellt. Darin zeigt sich, dass die anfängliche Vorverformung gut abgebildet wird, der weitere Verlauf mit zunehmender Vertikalkraft F aber stark von der numerischen Lösung abweicht. Weitere Vergleichsberechnungen bestätigen dieses Ergebnis (vgl. Anhang).

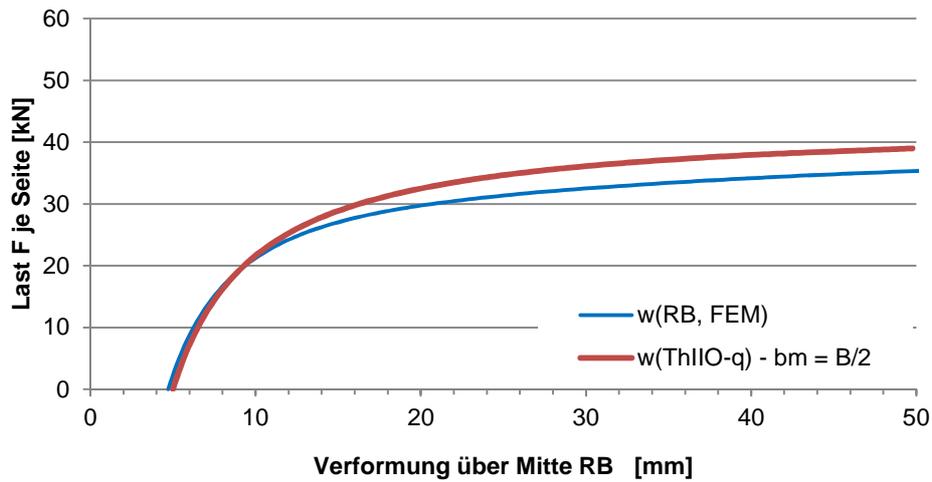


Abbildung 6-3: Vergleich der numerischen und analytischen Ergebnisse – Ansatz  $q$  mit  $b_m = B/2$

In Abbildung 6-4 sind die Anfangsverformungen ( $F = 0$ ) aus der analytischen Lösung den Ergebnissen aus den FEM-Berechnungen gegenübergestellt und zur Verdeutlichung in Abbildung 6-5 im direkten Bezug dargestellt. Darin wird deutlich, dass die Anfangsverformung in den meisten Fällen etwas überschätzt wird, jedoch maximal 5,5 % unterschätzt wird.

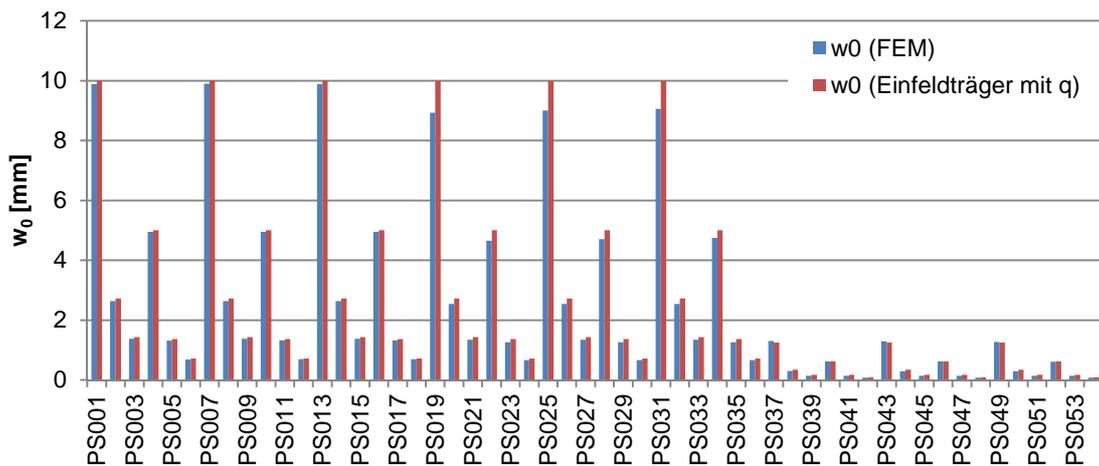


Abbildung 6-4: Anfangsverformung in Randbalkenmitte – Vergleich FEM – analytischer Ansatz

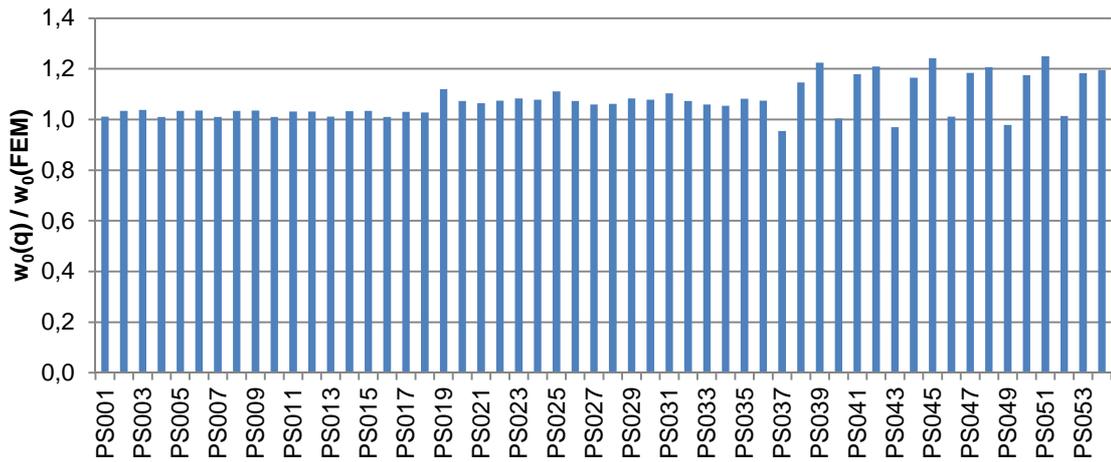


Abbildung 6-5: Über- bzw. Unterschätzen der Anfangsverformung

In Abbildung 6-6 sind die Last-Verformungsverläufe der analytischen Lösung den Ergebnissen der numerischen Berechnung gegenübergestellt.

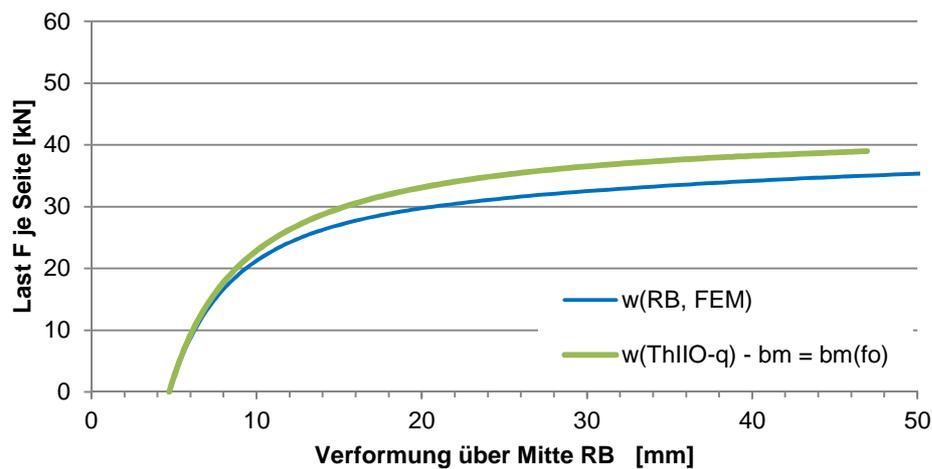


Abbildung 6-6: Vergleich der numerischen und analytischen Ergebnisse – Ansatz  $q$  mit  $b_m(f_0)$

Um auszuschließen, dass der Unterschied maßgeblich aus der differierenden Anfangsverformung herührt, wurde in einem zweiten Schritt die Steifigkeit so groß gesetzt, dass die Anfangsverformung der Vergleichslösung der der numerischen Berechnung exakt entspricht (bezeichnet mit „ $w(ThIIQ-q) - bm = bm(fo)$ “). Wie Abbildung 6-6 zeigt, bringt dies keine wesentliche Verbesserung.

### 6.2.1.2 Einfeldträger mit Normalkraft und Vorverformung

Für den Ansatz des Einfeldträgers mit Normalkraft und einer – sinusförmigen – Vorverformung mit mit-tigem Maximalwert  $w_0$  ergibt sich die Verformung in der Mitte nach [PETERSEN 1982] zu

$$w = w_0 + w_0 \cdot \frac{\varepsilon^2}{\pi^2 - \varepsilon^2} \tag{6-7}$$

mit  $\varepsilon$  als Stabkennzahl nach Gleichung (6-2).

Für das Modell PS111/PS028 sind die Vergleichskurven in Abbildung 6-7 dargestellt, die Daten aus der numerischen Berechnung bezeichnet mit „w(RB, FEM)“ und der beschriebene Vergleichsansatz mit „w(ThIIO-w0) – EI“.

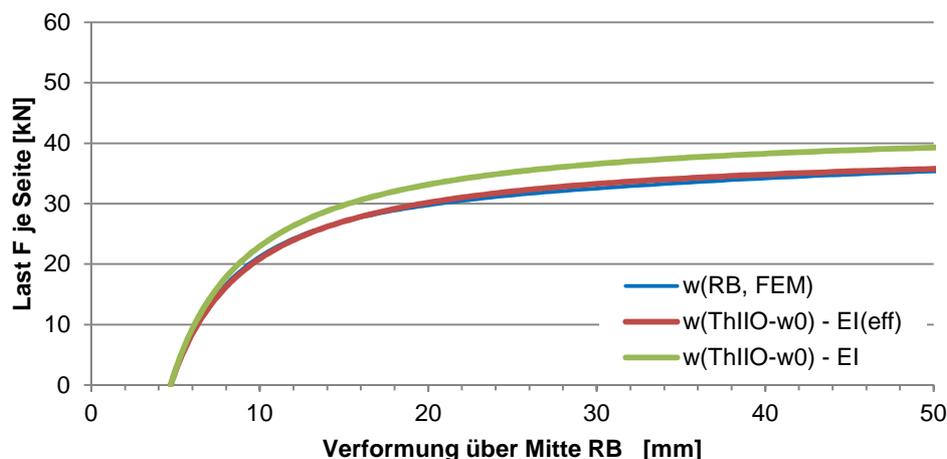


Abbildung 6-7: Vergleich der numerischen und analytischen Ergebnisse – Ansatz  $w_0$

Es zeigt sich, dass die Tragfähigkeit auch durch diesen Ansatz überschätzt wird. Jedoch bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, die Vergleichskurve mit „angepasster“ Steifigkeit zu ermitteln, ohne dass sich die Anfangsverformung ändert, da diese aus der Vorberechnung – in diesem Fall den numerischen Ergebnissen – herrührt. In Abschnitt 4.5.9.5 wurde bereits der Begriff der Effizienz eingeführt mit  $m$  als Maß für den wirksamen Anteil der Scheibensteifigkeit, ermittelt aus der Verzweigungslast. Für das Vergleichsmodell PS111/PS028 (quadratisch,  $a = 1$ ) wurde dieser Anteil zu 36% ermittelt (vgl. Anhang). Setzt man dementsprechend

$$EI_{\text{eff}} = EI_{\text{RB}} + m \cdot EI_{\text{Glas}} \quad (6-8)$$

und konkret für das Modell PS111/PS028

$$EI_{\text{eff}} = EI_{\text{RB}} + 0,36 \cdot EI_{\text{Glas}} \quad (6-9)$$

so ergibt sich die dritte Kurve in Abbildung 6-7, bezeichnet mit „w(ThIIO-w0) – EI(eff)“. Damit zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen analytischer und numerischer Abbildung des Tragverhaltens. Wendet man das gleiche Vorgehen auf die beiden anderen Vergleichsmodelle (PS010/PS121 mit  $a = 0,5$  und PS046/PS116 mit  $a = 2$ ) so zeigen sich ähnlich gute Ergebnisse (vgl. Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9).

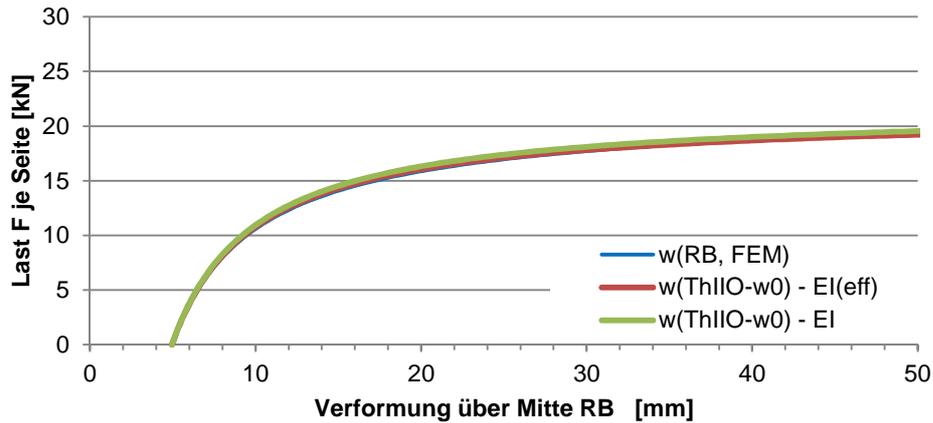


Abbildung 6-8: Vergleich für PS010

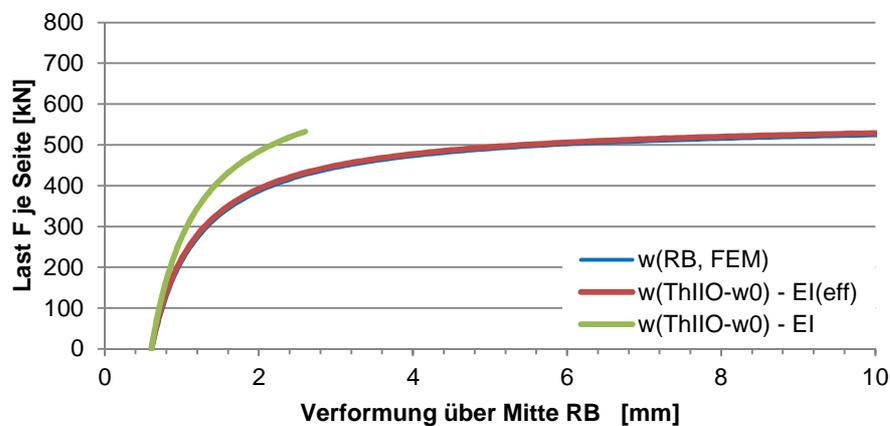


Abbildung 6-9: Vergleich für PS046

Wie in Abschnitt 4.5.9.5 in Abbildung 4-35 dargestellt, variieren die Werte für  $m$  deutlich in Abhängigkeit von der jeweiligen Parameterkombination. Führt man das oben dargestellte Verfahren für alle untersuchten Modelle durch, so zeigt sich, dass die Abbildung mit der aus der Verzweigungslast ermittelten effektiven Steifigkeit  $EI_{\text{eff}}$  überwiegend gut ist, jedoch in einigen Fällen nicht optimal. Durch weitere Anpassungsversuche zeigt sich ferner, dass für jedes Modell eine effektive Steifigkeit gefunden werden kann, die das Tragverhalten sehr gut abbildet.

Dieses Vorgehen mutet zunächst recht willkürlich an, ist jedoch letztlich nur eine weitere Methode, die effektive Steifigkeit des jeweiligen Systems zu bestimmen. Die Kenngröße der effektiven Steifigkeit hat in einer anderen Darstellungsart weitere Verbreitung gefunden.

Nach Gleichung (4-6) gilt

$$EI_{\text{eff}} = EI_{\text{RB}} + m \cdot EI_{\text{Glas}} \quad (6-10)$$

Mit

$$I_{\text{Glas}} = \frac{B_{\text{Glas}} \cdot t^3}{12} \quad (6-11)$$

folgt

$$EI_{\text{eff}} = EI_{\text{RB}} + E_{\text{Glas}} \cdot \frac{(m \cdot B_{\text{Glas}}) \cdot t^3}{12} \quad (6-12)$$

In dieser Schreibweise wird deutlich, dass sich die effektive Steifigkeit als Kompositum aus der Steifigkeit des Randbalkens und einer mitwirkenden Steifigkeit der Scheibe betrachten lässt. Und die mitwirkende Steifigkeit der Scheibe wiederum lässt sich durch den Ausdruck  $(m \cdot B_{\text{Glas}})$  auch als mitwirkende Breite interpretieren.

Der Ansatz der mitwirkenden Breite findet bekanntermaßen auch für andere Konstruktionselemente (z.B. Plattenbalken, vgl. [ALBRECHT 1967]) Anwendung. Im Folgenden wird der Ansatz der mitwirkenden Breite (bezeichnet mit  $b_m$ ) weiterverfolgt.

Analog zu Gleichung (4-7) lässt sich die mitwirkende Breite aus der Verzweigungslast direkt bestimmen:

$$b_m = \frac{F_{\text{krit}} \cdot s_k^2 - EI_{\text{RB}} \cdot \pi^2}{E_{\text{Glas}} \cdot \pi^2 \cdot \frac{t^3}{12}} \quad (6-13)$$

Bezieht man  $b_m$  auf die Modulbreite und damit auf die ganze Breite der Scheibe, so ist der Ausdruck  $b_m/B$  identisch mit dem Ausdruck für  $m$ . In Parameterform, kann die Breite auch als Seitenverhältnis  $a$  dargestellt werden. In Abbildung 6-10 sind beide Darstellungsvarianten dargestellt. Da die mitwirkende Breite linear abhängig von  $m$  ist, treten hier die gleichen großen Streuungen auf.

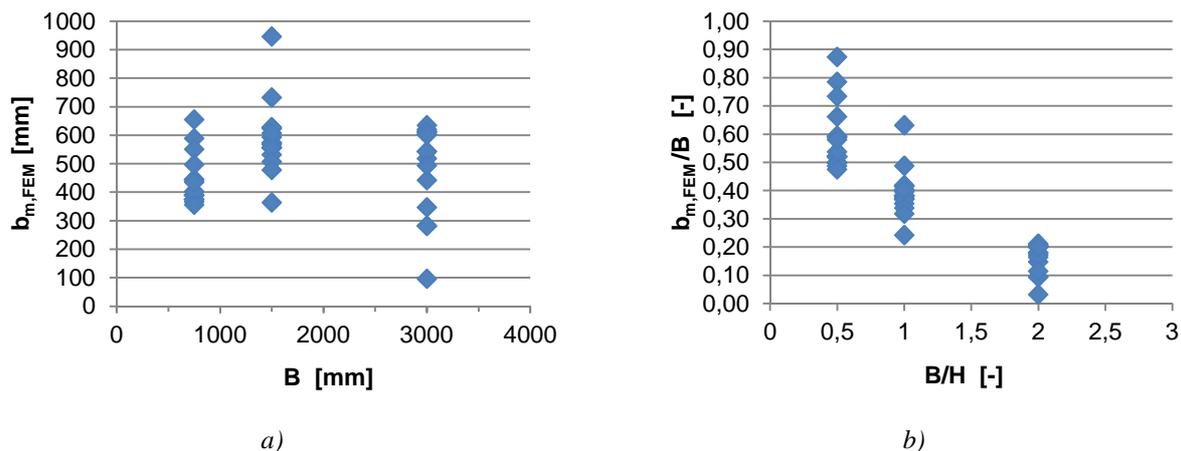


Abbildung 6-10: Mitwirkende Breite aus  $N_{ki}$  für die untersuchten Systeme

Im nächsten Schritt wird, wie bereits beschrieben, für jedes Modell die mitwirkende Breite so bestimmt, dass das Tragverhalten optimal abgebildet wird. Dies erfolgt durch die Auswertung der Diagramme, indem die Abbildung des Lastverformungsverhaltens nach Theorie II. Ordnung für den Einfeldträger unter Normalkraft unter Ansatz verschiedener mitwirkender Breiten erfolgt und jeweils mit der Last-Verformungs-Kurve aus den numerischen Berechnungen verglichen wird. Der Fokus liegt dabei auf einer möglichst guten Übereinstimmung im Bereich bis ca. 50 mm Verformung, da dieser Bereich für das untersuchte System (Systemlänge 1500 mm) den baupraktisch relevanten Bereich (50 mm entsprechend  $L/30$ ) vollständig abdeckt.

Die Auswertung wird für alle Modelle der beschriebenen Parameterstudien durchgeführt. Die Ergebnisse sind mit den zugehörigen Diagrammen, aus welchen die Übereinstimmung hervorgeht, im Anhang dargestellt. Für die drei Vergleichsmodelle sind die Verläufe der Durchbiegung in Randbalkenmitte jeweils aus

den FEM-Ergebnissen und für den Vergleichsansatz in den folgenden Abbildungen (Abbildung 6-11 bis Abbildung 6-13) dargestellt.

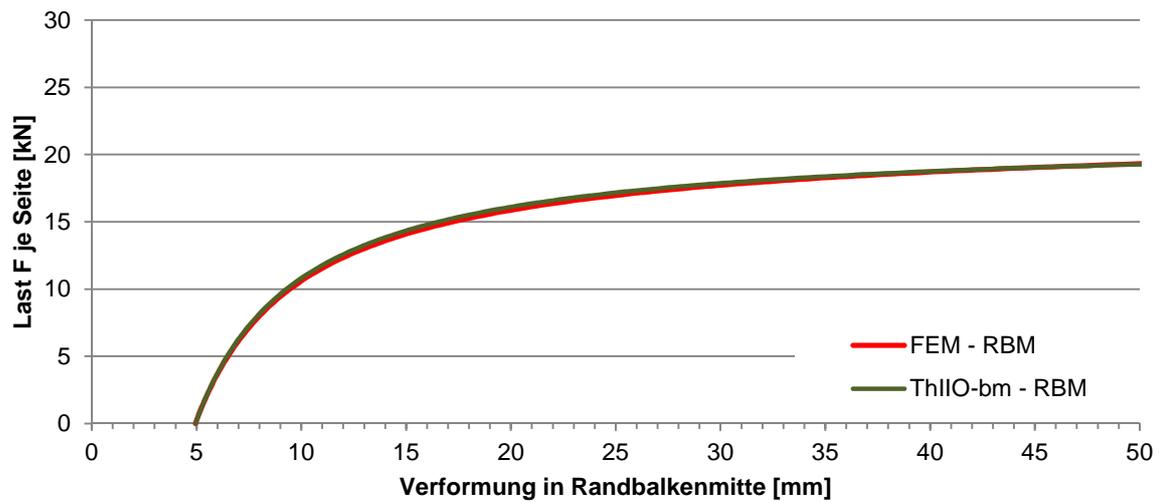


Abbildung 6-11: Vergleich FEM mit angepasstem  $b_m$  für Modell PS010

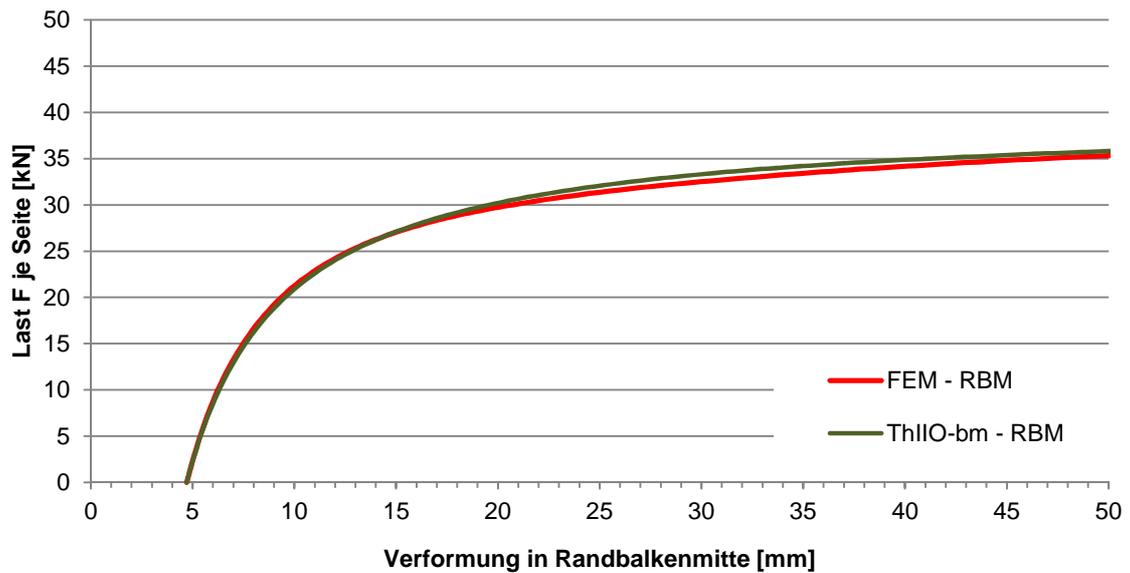


Abbildung 6-12: Vergleich FEM mit angepasstem  $b_m$  für Modell PS028

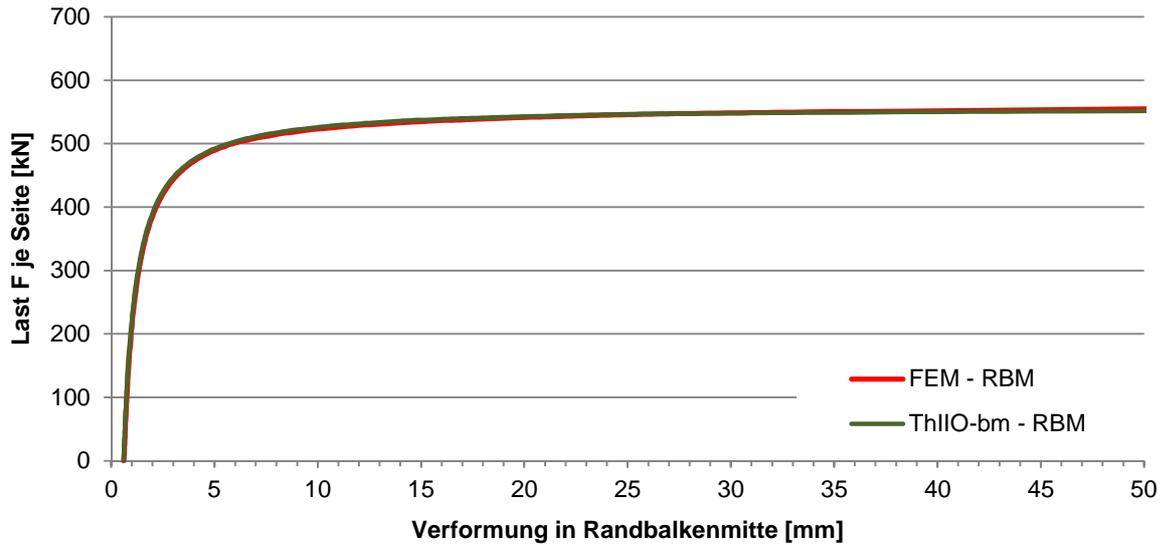


Abbildung 6-13: Vergleich FEM mit angepasstem  $b_m$  für Modell PS046

In Analogie zu Abbildung 6-10 sind in die Ergebnisse für die untersuchten Systeme als direkte Größen und als auch in parametrisierter Form angegeben.

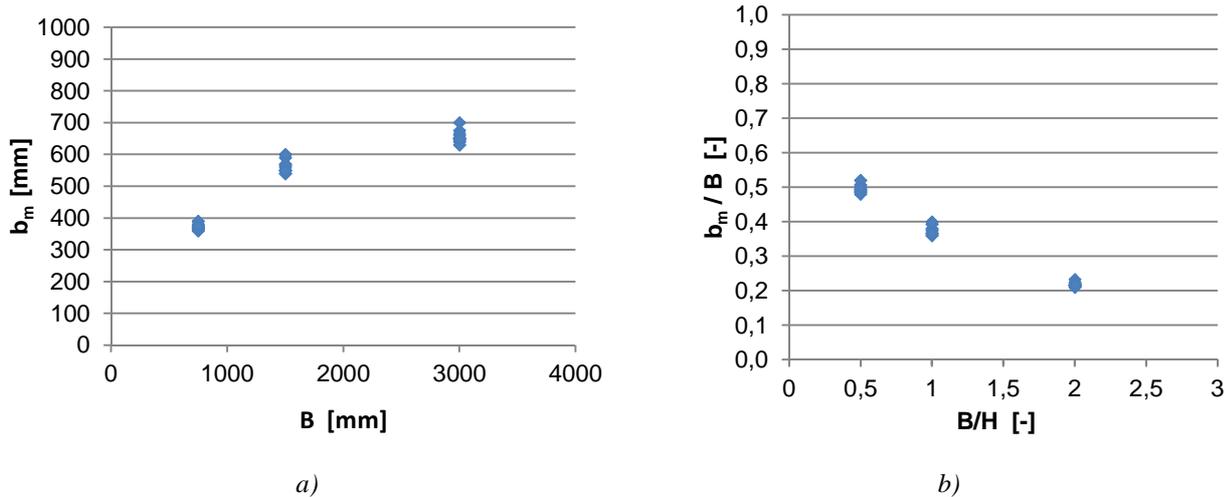


Abbildung 6-14: Mitwirkende Breite aus Vergleichskurven für die untersuchten Systeme

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse hier deutlich weniger streuen, d.h. trotz der stark variierenden Parameter /-kombinationen ist die mitwirkende Breite in erster Linie nur vom Seitenverhältnis der Scheibe und damit des Moduls abhängig. Die übrigen Parameter haben einen eher geringen Einfluss.

Im Hinblick auf die Entwicklung von Bemessungsgrundsätzen und auf eine Verallgemeinerung der Ergebnisse gilt es für weitere Untersuchungen, die Parameter so zu wählen, dass sie auf der sicheren Seite liegen. D.h. innerhalb der Modellgruppen mit gleicher Breite sind die Parameterwerte zu identifizieren, für welche die geringste mitwirkende Breite ermittelt wurde (vgl. Anhang).

Für die untersuchte Scheibenbreite  $B = 750$  mm ( $a = 0,5$ ) streuen die Ergebnisse kaum. Die geringste mitwirkende Breite (360 mm) tritt dabei zweimal auf, die beiden zugehörigen Modelle weisen jedoch – abgesehen von  $B$  bzw.  $a$  – keine weiteren gemeinsamen Parameter auf. In der Gruppe der Modelle mit der Breite  $B = 1500$  mm ( $a = 1$ ) tritt die geringste mitwirkende Breite dreimal auf. Während die übrigen Pa-

parameter differieren, weisen alle drei Modelle das Steifigkeitsverhältnis  $s = EI_{RB} / EI_{Glas} = 1$ , den geringsten Wert für diesen Parameter auf. Dies bestätigt sich auch beim Blick auf die Modelle der Breite  $B = 3000 \text{ mm}$  ( $a = 2$ ), auch hier tritt die geringste mitwirkende Breite (630 mm) bei den Modellen mit  $s = 1$  auf.

Zudem tritt die geringere mitwirkende Breite überwiegend bei den Modellen mit der geringeren Verformung aus  $q$  ( $L/100$ ) auf. Zusammen mit den obigen Ergebnissen lässt sich daraus der Erklärungsansatz ableiten, dass eine geringere Steifigkeit der Scheibe – im Verhältnis zur Steifigkeit des Randbalkens – und die damit einhergehenden größeren Verformungen der Scheibe relativ zum Randbalken zu einer „Zunahme“ der Steifigkeit der Scheibe insgesamt führen, da die gekrümmte Scheibe im Querschnitt ein höheres Flächenträgheitsmoment aufweist als die plane Scheibe. Entsprechend treten die geringsten mitwirkenden Breiten bei den Modellen auf, für die die relative Verformung der Scheibe zum Randbalken aus am geringsten ist ( $s = \min$ ;  $w_0 = \min$ ).

Auf Grund der beschriebenen Zusammenhänge wird die weitere Untersuchung mit folgenden Parametern durchgeführt:

- $s = \text{MIN} [1, 5, 10] = 1$
- $q = 1,0 \text{ kN/m}^2$
- $t = \text{MAX} [t_1, t_2] = t_2$  (Aus der Verformungsbegrenzung  $L/100$  bzw.  $L/50$ ; vgl. Abschnitt 4.5)
- $B = [500 \text{ mm} \dots 5000 \text{ mm}]$

Diese Werte wurden bereits in der Parameterstudie 1xx verwendet, wie sie bereits in Abschnitt 4.5.9.5 beschrieben wurde. Entsprechend dem dargestellten Verfahren wurden auch für diese Modelle die mitwirkenden Breiten ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-15 dargestellt.

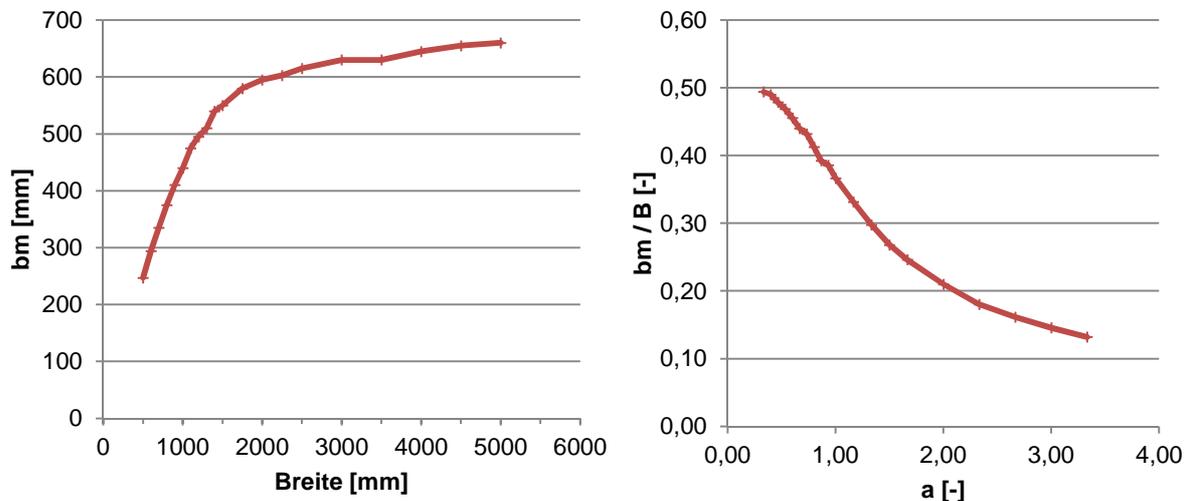


Abbildung 6-15: Mitwirkende Breiten  $b_m$  für verschiedene Scheibenbreiten

Es zeigt sich, dass bei schmalen Scheiben nahezu die ganze Scheibe, d.h. je Seite die halbe Scheibe ( $b_m / B = 0,5$ ) mitträgt, mit zunehmendem Seitenverhältnis  $a$  die mitwirkende Breite zwar als Absolutwert zunimmt, jedoch im Verhältnis zur Scheibenbreite abnimmt. Ferner kann man aus dem Verlauf der Kurve annehmen, dass für große Seitenverhältnisse  $B/H$  weniger als 30 % ( $2 \cdot 15 \%$ ) der Scheibe „aktiviert“ werden können.

### 6.2.2 Spannungen

Wie in Abschnitt 4.5.9 dargestellt, nehmen Spannung und Verformung keine parallelen oder affinen Verläufe, d.h. eine direkte Umrechnung durch Vergrößerungsfaktoren, die sich aus dem Verformungsverlauf ableiten ließen ( $v = w(F) / w_0$ ), ist nicht möglich.

Dies ist insofern unbefriedigend, als dass durch die analytische Vergleichslösung eine Möglichkeit gefunden wurde, das Tragverhalten ohne die vollständige Abbildung als FE-Modell darzustellen. Im Hinblick auf die im Rahmen einer Bemessung zu führenden Nachweise sind jedoch auch die Spannungen im Glas gegen die entsprechenden Grenzwerte nachzuweisen, auch wenn die Ergebnisse bisher gezeigt haben, dass für die angestrebten schlanken Konstruktionen in der Regel die Begrenzung der Verformung maßgebend sein wird. Es wurden daher mehrere Alternativansätze geprüft, zunächst auf Basis der direkten mechanischen Zusammenhänge, dann auch im Sinne einer empirischen Lösung durch Auswertung „passender“ Kurven. Aus den Ergebnissen daraus konnte eine einfache aber effektive Methode zur Beschreibung des Tragverhaltens abgeleitet werden.

Für die Spannungsverläufe in Scheibenmitte und am oberen Rand kann der aus der Verformung abgeleitete Vergrößerungsfaktor verwendet werden, damit liegt man auf der sicheren Seite, wie die Verläufe in Abschnitt 4.5.9 zeigen. Somit kann man als Abschätzung der Spannung annehmen:

$$\sigma_{SMP}(F) = v \cdot \sigma_{0,SMP} \quad (6-14)$$

bzw.

$$\sigma_{QRM}(F) = v \cdot \sigma_{0,QRM} \quad (6-15)$$

mit

$$v = \frac{w(F)}{w_0} \quad (6-16)$$

Die Spannungen in der Scheibe über der Mitte des Randbalkens würden dadurch unterschätzt, werden aber gut abgebildet durch:

$$\sigma_{RBM}(F) = v^{1,2} \cdot \sigma_{0,RBM} \quad (6-17)$$

In den folgenden Abbildungen sind die numerischen Ergebnisse den Vergleichsrechnungen nach den Gleichungen (6-14) bis (6-17) anhand dreier Modelle (PS121 mit  $a = 0,5$ , PS111 mit  $a = 1$  und PS116 mit  $a = 2$ ) gegenübergestellt.

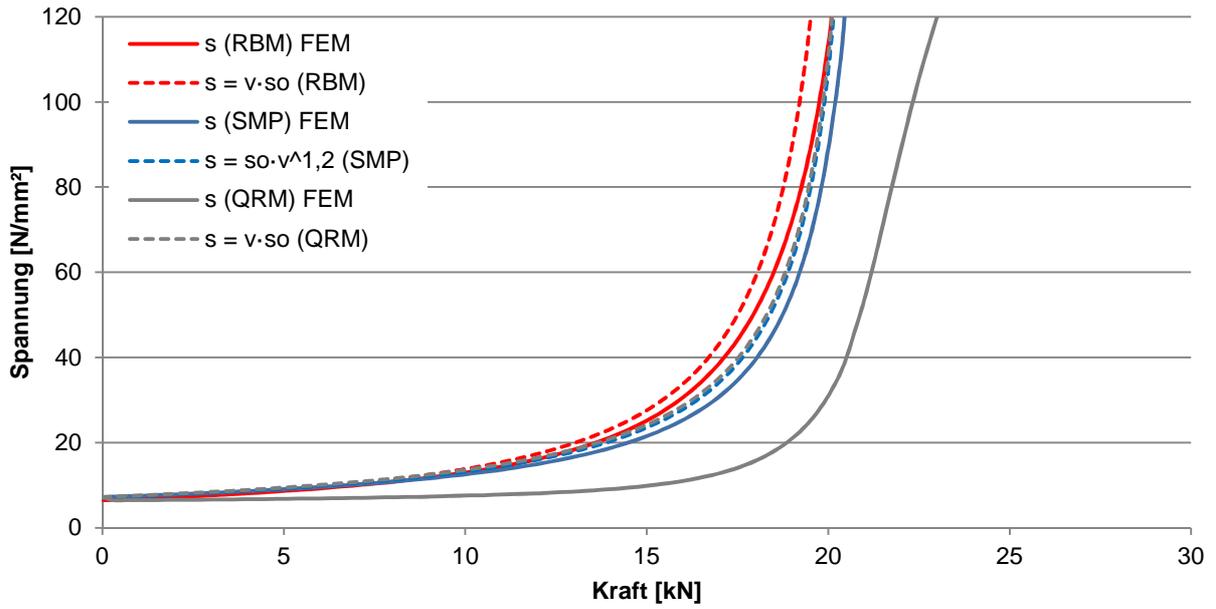


Abbildung 6-16: Vergleich der Spannungen für PS121 ( $a = 0,5$ )

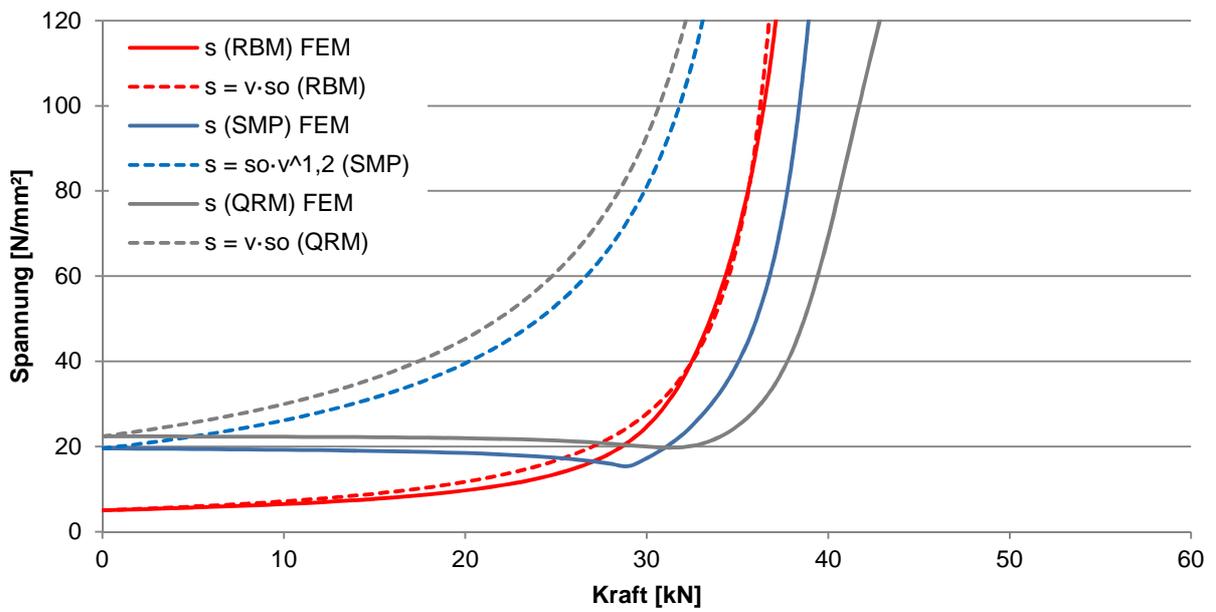
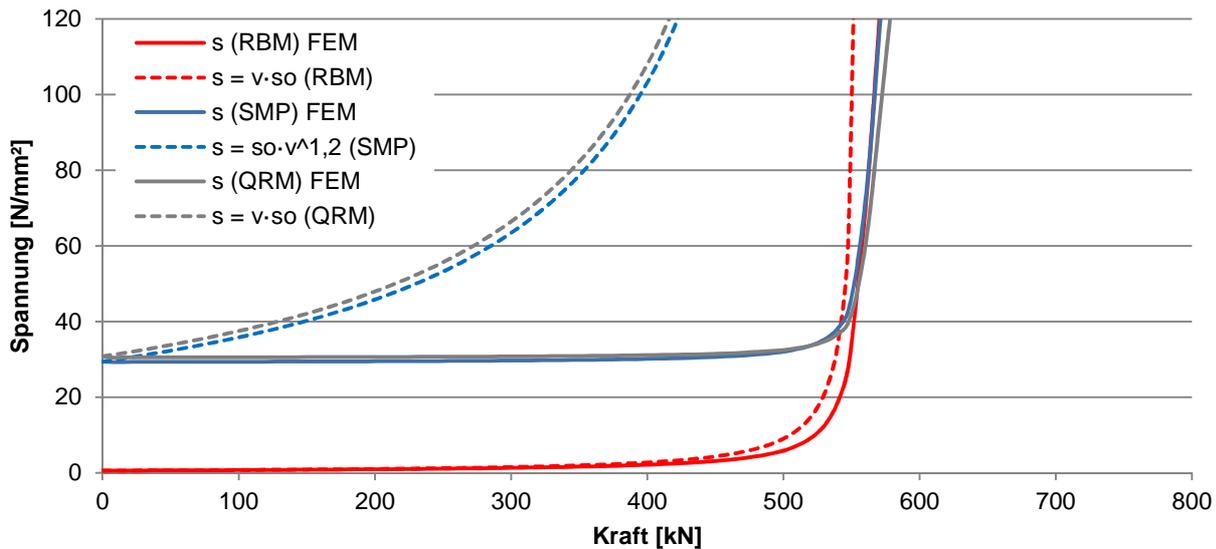


Abbildung 6-17: Vergleich der Spannungen für PS111 ( $a = 1$ )


 Abbildung 6-18: Vergleich der Spannungen für PS116 ( $a = 2$ )

Es zeigt sich, dass die Spannungen über der Mitte des Randbalkens für alle Module sehr gut abgebildet wird, an den beiden anderen Punkten werden nur schmale Module gut abgebildet. Bei den breiteren Varianten werden die Spannungen stark überschätzt. Dies ist nach dem vorgestellten Verfahren unvermeidbar, da mit einem Vergrößerungsfaktor gerechnet wird, der aus der Verformungszunahme über dem Randbalken ermittelt wird, bei den breiten Modulen die Spannung in der Mitte jedoch kaum zunimmt bzw. bereichsweise sogar abnimmt. Ein Ansatz zur Verbesserung der Ergebnisse wäre es, den Vergrößerungsfaktor abhängig von der Scheibenbreite zu machen. Da in aller Regel bei den hier betrachteten Systemen die Spannung aber nicht maßgebend wird, soll dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt werden. Die Vergleichskurven sind für alle Modelle in den Diagrammen im Anhang angegeben.

### 6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zum Last-Verformungsverhalten der untersuchten Module konnten durch die Versuche bestätigt werden. Hierbei ist besonders die Festlegung auf die Art der Lasteinleitung direkt in den Randbalken zu erwähnen.

Durch Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Ansätzen konnte eine Methode gefunden werden, das Last-Verformungsverhalten des Randbalkens im relevanten Bereich der Verformung analytisch sehr gut abzubilden. Die Anfangsverformung lässt sich dabei durch die Annahme eines Einfeldträgers mit Linienlast ( $q \cdot B/2$ ) in ausreichender Genauigkeit ermitteln. Dabei wird für die (Biege-) Steifigkeit des Ersatzträgers die Steifigkeit des Randbalkens plus die halbe Steifigkeit der Scheibe angenommen. Das Verformungsverhalten unter der Normalkraft  $F$  lässt sich gut durch den Ansatz eines Einfeldträgers mit Vorverformung abbilden, wenn man für die Steifigkeit des Systems eine mitwirkende Breite der Scheibe berücksichtigt, die maßgeblich nur vom Seitenverhältnis  $a = B/H$  abhängig ist. Die entsprechenden Werte für  $b_m/B$  wurden für den Bereich  $a = 0,33$  bis  $a = 3,33$  ermittelt. Die Zunahme der Verformung ist über der Mitte des Randbalkens am größten. Der Ansatz des gleichen Vergrößerungsfaktors  $v = w(F)/w_0$  für die übrigen Punkte liegt somit auf der sicheren Seite.

Der Verlauf der Spannung ist nicht affin zum Verlauf der Verformung. Eine einfache Ermittlung der Spannung mit dem beschriebenen aus der Verformung ermittelten Vergrößerungsfaktor ist daher nicht möglich. Es wurde jedoch eine Methode gefunden, durch die der Spannungsverlauf über dem Randbalken gut abgebildet wird. Für die Punkte in der Mitte der Scheibe und am oberen Rand, kann die Spannung für

den jeweiligen Lastzustand durch den Vergrößerungsfaktor  $v$  ermittelt werden. Die Ergebnisse liegen dabei – zum Teil erheblich – auf der sicheren Seite. Der Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den Ergebnissen der dargestellten Methode ist für alle untersuchten Modelle im Anhang dargestellt.

## 7 Bemessung

### 7.1 Vorbemerkung

Für die Bemessung eines Tragwerkselementes bedarf es im Normalfall einer sogenannten Bemessungsregel. Diese muss nicht notwendiger Weise eine Norm sein, sondern kann auch in anderer Form, z.B. als technische Regel oder als Bestandteil einer AbZ vorliegen. Für Einzelprojekte kann auch ganz auf die Grundlage einer Bemessungsregel verzichtet werden, solange sichergestellt ist, dass das Tragwerk und seine Elemente die gestellten Anforderungen, neben den funktionalen vor allem die an eine ausreichende Sicherheit, erfüllt. Basis dafür sind in der Regel Vergleiche mit ähnlichen, bewährten Systemen zu denen es bereits Bemessungsgrundlagen gibt. Im Folgenden werden daher die Bemessungsgrundlagen im – technischen – Umfeld des untersuchten Systems betrachtet und ein Nachweiskonzept für das betrachtete System entwickelt.

Mit der Einordnung der Ergebnisse in den Normkontext soll nicht behauptet werden, dass das System bereits „reif“ für die Aufnahme in eine Bemessungsnorm ist! Eine Norm stellt, im Idealfall den aktuellen, Stand der Technik dar, für das dargestellte System gibt es jedoch noch keine relevante Anzahl von Umsetzungen, so dass hier nicht vom Stand der Technik sondern eher vom Stand der Forschung gesprochen werden muss.

Die im Folgenden vorgeschlagenen Bemessungsgrundsätze sollen daher in erster Linie zukünftige Realisierungen des Systems vereinfachen und einer Weiterentwicklung Vorschub leisten.

### 7.2 Kontext und Einordnung

Bei dem vorgeschlagenen System handelt es sich um eine nicht-geregelte Bauart, d.h. ein statischer Nachweis nach eingeführten technischen Baubestimmungen ist nicht direkt möglich. Durch die Verwendung von Stahl und Glas muss das System im Kontext der [DIN18800] für Stahl und der [DIN18008] als zukünftige Glasbaunorm betrachtet werden. Für die Einwirkungen muss [DIN 1055-100] beachtet werden. Wenn sich das System in der Praxis bewährt und eine Aufnahme der Konstruktions- und Bemessungsregeln in die Norm erfolgen soll, würde dies wohl in Teil 7 der [DIN18008] erfolgen, der für Sonderkonstruktionen vorgesehen ist. Dies ist jedoch sicher nicht auf kurze Sicht zu erwarten. Eine kurz- oder mittelfristige Umsetzung würde eher im Rahmen einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder einer Zustimmung im Einzelfall erfolgen.

Das Ergebnis aus 4.4, nachdem die Lasteinleitung direkt in den Randbalken das statisch günstigste Verhalten zeigt, ist für die Bemessung von großem Vorteil. Durch die Lasteinleitung in den Stahl entfällt die Problematik der Spannungskonzentration im Bereich der Lasteinleitung bei Glas. Für Stahl stellt eine konzentrierte Lasteinleitung kein Problem dar, da lokale Spannungsspitzen durch Plastizieren abgebaut werden können (vgl. hierzu 3.1).

Durch die in den voran gegangenen Abschnitten dargestellten Untersuchungen wurde ein Rechenmodell erstellt, durch das sich das Tragverhalten des entwickelten Systems zuverlässig abbilden lässt. Dieses kann auch zur Bemessung der Bestandteile, Scheibe und Randbalken, direkt genutzt werden. Dafür gilt es jedoch, Beanspruchungen und Widerstände der Bauteile im Sinne eines bautechnischen – statischen – Nachweises so anzusetzen, dass ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht wird. Gerade im Hinblick auf das zu erreichende Sicherheitsniveau gibt es im Konstruktiven Glasbau sehr verschiedene Ansätze.

Durch die Lasteinleitung in den Randbalken lässt sich das System auch als zwei Knickstäbe oder Biegebalken nach „Theorie II. Ordnung“ betrachten, die durch die verbindende Scheibe ausgesteift sind. Die Besonderheit ist dabei, dass die aussteifende Scheibe in ihrer Eigenschaft als Platte (für Lasten senkrecht zur Scheibenoberfläche, z. B. Wind) selbst Lasten in den Randbalken einträgt und so für eine weitere Verformung sorgt.

### 7.3 Grundlagen

Die wesentliche Grundlage für eine Bemessungsaufgabe im Bereich Stahl und Glas sind die drei genannten Normen mit den relevanten Teilen

DIN 18800-1	Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion
DIN 18800-2	Stahlbauten - Teil 2: Stabilitätsfälle - Knicken von Stäben und Stabwerken
DIN 18008-1	Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen
DIN 18008-2	Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen
DIN 1055-1	Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen
DIN 1055-3	Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten
DIN 1055-4	Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten
DIN 1055-100	Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln

Eine allgemeine inhaltliche Darstellung der Normteile ist dem Rahmen dieser Arbeit nicht angemessen, im Folgenden sollen jedoch die wichtigsten relevanten Inhalte in Bezug auf das untersuchte System kurz zusammengefasst dargestellt werden.

#### 7.3.1 DIN 1055

Die [DIN1055-100] ist die konkrete Umsetzung der [EN1990] als nationale – eingeführte – technische Baubestimmung. Sie bildet daher eine wesentliche Basis für die Bemessung aller Bauwerke und tragenden Bauteile in Deutschland. Darin sind auch die Begrifflichkeiten, die im Bereich der Sicherheitstheorie bzw. der gültigen Sicherheitskonzepte zu verwenden sind, geregelt und sollen daher hier nicht umfassend dargestellt werden.

##### 7.3.1.1 Grenzzustände

Nach [DIN1055] sind zwei Zustände zu untersuchen und nachzuweisen:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit und
- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Für beide Grenzzustände wird zwischen verschiedenen Bemessungssituationen unterschieden (vgl. [DIN1055-100], Abschnitt 9.3 und 10.3). Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit gibt es dabei die „außergewöhnliche“ Situation, für die als Beispiele Feuer, Brand, Explosion und Anprall genannt sind. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass für tragende Glasbauteile stets auch der Bruch einer Scheibe bzw. einzelner Lagen einer VSG-Scheibe zu betrachten sind. Inwiefern sich dies als außergewöhnliche Situation im Sinne der [DIN1055-100] einordnen lässt, wird in Abschnitt 7.4.1 diskutiert.

### 7.3.1.2 Nicht-lineares Verhalten

In Abschnitt 8.5 (5) [DIN1055-100] wird zwischen zwei Fällen nichtlinearen Verhaltens unterschieden.

Im Fall a) steigt der Wert der Auswirkung schneller als der Wert der Einwirkung; in diesem Fall ist der Teilsicherheitsbeiwert für die entsprechende Einwirkung auf die Einwirkung selbst anzuwenden und damit die Auswirkung der Einwirkung zu bestimmen.

Im Fall b) steigt der Wert der Auswirkung geringer als der Wert der Einwirkung; dann ist der Bemessungswert der Einwirkungen durch den Teilsicherheitsbeiwert der vorherrschenden Einwirkung zu teilen, damit die Auswirkung zu ermitteln und diese wieder mit dem Teilsicherheitsbeiwert der vorherrschenden Einwirkung zu multiplizieren.

Abbildung 7-1 veranschaulicht den Unterschied der beiden Fälle für den einfachen Fall einer unabhängigen Einwirkung  $F$  mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F = 1,5$  und der zugehörigen Auswirkung  $w(F)$ . Bei einem linearen Zusammenhang ist es unerheblich, ob der Teilsicherheitsbeiwert auf die Einwirkung oder die Auswirkung angewendet wird.

Im Fall a) liegt die Anwendung des Teilsicherheitsbeiwertes auf die Einwirkung auf der sicheren Seite, da hiermit dem überproportionalen Anstieg der Auswirkung Rechnung getragen wird. Im Fall b) würde dieses Vorgehen – im Vergleich zu dem in [DIN1055-100] beschriebenen Vorgehen – auf der unsicheren Seite liegen (gekennzeichnet durch b'). Auch die Anwendung des Vorgehens nach b) für Systeme nach Fall a) würde Ergebnisse auf der unsicheren Seite liefern (gekennzeichnet durch a').

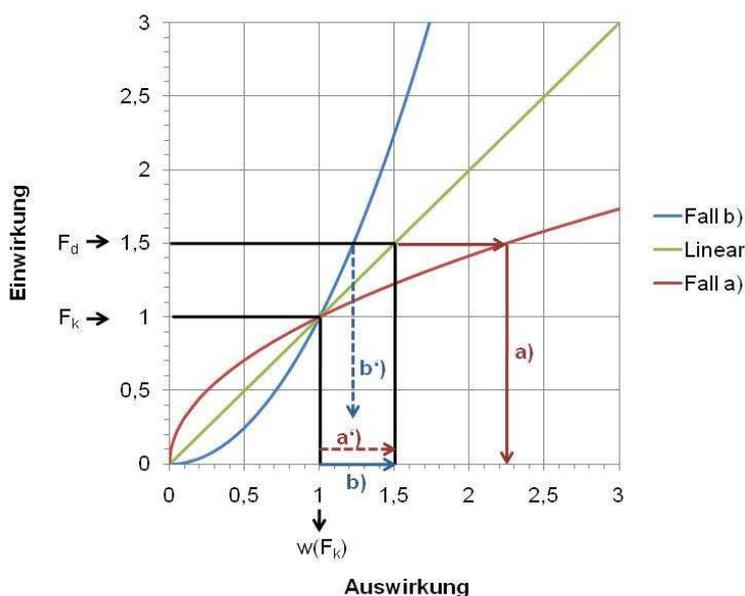


Abbildung 7-1: Vergleich linearen und nicht linearen Verhaltens

Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Stahl-Glaselemente sind grundsätzlich zwei unabhängige Einwirkungen zu untersuchen, Wind senkrecht auf die Glasoberfläche und die Last  $F$  in Scheibenebene. Die Untersuchungen sollen unabhängig von der Art der Einwirkung  $F$  sein, d.h. unabhängig davon, ob die Last aus dem Eigengewicht der darüber liegenden Scheiben, also einer ständigen Last "G" im Sinne der DIN 1055-100 oder aus veränderlichen Einwirkungen auf darüber liegende Bauteile, bzw. einer Kombination aus beidem herrührt.

Betrachtet man die Last-Verformungskurven aus den vorangegangenen Kapiteln, die in der Regel von der Last  $F$  als variabler Einwirkung ausgehen, so wird deutlich, dass das System in Fall a) einzuordnen ist. Zu

dem gleichen Ergebnis kommt man auch bei Betrachtung des Analogsystems des Balkens mit Linienlast und Druck-Normalkraft, dargestellt durch Gleichung (6-1) oder anschaulich in Abbildung 4-5. Daraus geht auch hervor, dass für die Querkraft  $q$  ein linearer Zusammenhang zwischen Einwirkung ( $q$ ) und Auswirkung ( $w(q)$ ) besteht, unabhängig vom Lastzustand  $F$ .

Im Ergebnis bedeutet dies, dass eine Behandlung des Systems entsprechend Fall a), d.h. die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite zu berücksichtigen, auf der sicheren Seite liegt.

### 7.3.1.3 Geometrische Größen

Für die Bemessungswerte geometrischer Größen sind nach [DIN1055-100] in der Regel die nominalen Abmessungen zu Grunde zu legen. Abweichungen sind aber dann zu berücksichtigen, wenn diese „kritischen“ Einfluss haben. Als Beispiel werden Imperfektionen bei Stabilitätsberechnungen genannt. Analog verhält es sich jedoch auch für Abweichungen der Bauteilgeometrie für stabilitätsgefährdete Bauteile. Darauf wird in Abschnitt 7.3.2 eingegangen.

## 7.3.2 DIN 18800

[DIN 18800-1] enthält anzusetzende Materialdaten, Grundsätze für die Konstruktion, Angaben für mögliche Verbindungen von Bauteilen sowie ergänzende Angaben zur Ermittlung der Einwirkungen und der Widerstandsgrößen für Stahlbauteile. Hierzu ist besonders zu erwähnen, dass in Element (721) der [DIN 18800] die Anforderung nach 7.3.1.3 dahingehend präzisiert wird, dass für die Bauteilsteifigkeit ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,0$  bzw.  $\gamma_M = 1,1$  angegeben wird, abhängig davon, ob sich für eine geringere Steifigkeit erhöhend auf die Beanspruchungen auswirkt. Dies ist für Systeme, die nach Theorie II. Ordnung zu bemessen sind, typischerweise der Fall. Insofern ist dies bei der Bemessung des hier untersuchten Systems zu berücksichtigen.

Da es sich bei den Randbalken um stabilitätsgefährdete Stahlbauteile handelt und die Abgrenzungskriterien nach Abschnitt 7.5.1 der [DIN 18800-1] in der Regel nicht erfüllt sein werden, sind diese nach [DIN18800-2] zu betrachten und die Nachweise gegen Stabilitätsversagen zu führen. Hierin wird auch die Vorkrümmung als anzusetzende geometrische Imperfektion abhängig von der Querschnittform angegeben. Eine Vorverdrehung kommt bei dem betrachteten System auf Grund der Fixpunkte an den Enden der Randbalken nicht in Betracht. Im Kontext der [DIN 18800-2] lassen sich die Randbalken als Stäbe mit einachsiger Biegung und Normalkraft (Abschnitt 3.4) betrachten. Dementsprechend sind hierfür die Nachweise für Biegeknicken und Biegedrillknicken zu führen.

## 7.3.3 DIN 18008

Die [DIN 18008] basiert, wie auch die [DIN 18800] auf dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend [DIN 1055-100]. Dies ist gleichzeitig der wesentliche Unterschied der [DIN18008] zu den dadurch abgelösten technischen Regeln [TRLV], [TRAV] und [TRPV]. Streng genommen gelten zum aktuellen Zeitpunkt noch die genannten technischen Regeln, wohingegen die [DIN18008] noch nicht in die Liste der technischen Baubestimmungen aufgenommen wurde (vgl. Abschnitt 2.1). Da dies jedoch in naher Zukunft geschehen soll und die Bauaufsichten für aktuelle Projekte die Verwendung der bereits veröffentlichten Teile 1 und 2 der [DIN18008] in der Regel akzeptieren, erscheint es sinnvoll, diese auch als Grundlage dieser Arbeit zu benutzen. Auch hier wird auf eine ausführliche Wiederholung des Norminhalts verzichtet und nur auf folgende Besonderheiten, die zum Teil auch schon in Abschnitt 3.1.2 dargestellt wurden, hingewiesen.

In Teil 1 der [DIN 18008] werden die Grundlagen und Begriffe für die Bemessungs- und Konstruktionsregeln für den konstruktiven Glasbau beschrieben. Hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes und der anzusetzenden Einwirkungskombinationen wird auf [DIN1055-100] verwiesen, wobei der Nachweis der Trag-

fähigkeit anhand der maximalen Hauptzugspannungen an der Glasoberfläche zu führen ist (Abschnitt 8.3.2 der [DIN 18008-1]). Ein günstig wirkender Schubverbund bei VSG oder VG-Scheiben darf grundsätzlich nicht angesetzt werden (7.2.1 in [DIN 18008-1]). Nach 8.2 sind die Bemessungswerte geometrischer Größen mit ihren Nennwerten anzusetzen. Ein Sicherheitsbeiwert für „kritische“ Bauteile ist hier nicht vorgesehen.

In Teil 2 der [DIN18008] werden linienförmig gelagerte Verglasungen geregelt. Dabei wird zwischen Vertikalverglasungen mit einer Neigung von maximal 10° zur Vertikalen und Horizontalverglasungen mit einer Neigung von mehr als 10° zur Vertikalen unterschieden. Einschränkungen hinsichtlich der zu verwendenden Bauprodukte gibt es besonders für Horizontalverglasungen, da hier zusätzlich eine ausreichende Resttragfähigkeit für den Fall beschädigter Scheiben sichergestellt werden muss.

In Bezug auf das untersuchte System ist ferner von Bedeutung, dass der Glaseinstand mindestens 10 mm betragen muss und die Scheiben an mindestens zwei gegenüberliegenden Seiten linienförmig gelagert sein müssen, um in den Anwendungsbereich dieses Normteils zu fallen. Während diese beiden Anforderungen in der Regel erfüllt sein werden, stellt die dritte Anwendungsbedingung nach 4.3 die stärkste Einschränkung für das zu untersuchende System dar: Eine Seite gilt als eben linienförmig gelagert, wenn die Durchbiegung der Unterkonstruktion für charakteristische Einwirkungen (Gleichung (22) in [DIN1055-100]) nicht mehr als 1/200 der aufgelagerten Scheibenlänge entspricht. Dies ist insofern eine deutliche Einschränkung, da dieser Normteil entsprechend des formulierten Anwendungsbereiches (Abschnitt 1) nur für eben gelagerte Verglasungen gilt und somit nicht mehr gilt, wenn sich die Auflager um mehr als 1/200 verformen.

#### 7.3.4 Weitere Grundlagen

In den bereits existierenden Teilen der DIN 18008 ist die Beanspruchung der Glaselemente in Scheibenebene grundsätzlich ausgeschlossen. Stabilitätsgefährdete Glasbauteile kann es im Sinne dieser Norm folglich nicht geben. So ist es auch zu erklären, warum, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, das Glas grundsätzlich mit seiner Nenndicke angesetzt werden darf, wohingegen bei Stahlbauteilen ungünstige Abweichungen, die zu einer verminderten Steifigkeit führen, bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen durch einen zusätzlichen Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt werden müssen.

Im untersuchten System ist die Scheibe zwar nicht selbst in Scheibenebene belastet, trägt jedoch mit ihrer Biegesteifigkeit zur Gesamtsteifigkeit des Randbalkens bei. Die Scheibendicke hat daher direkten Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems auch für Belastungen in Scheibenebene.

Tabelle 7-1 zeigt die zulässigen Grenzabmaße für die Scheibendicke nach [EN572-2] (Bezeichnungen entsprechend der Norm).

Tabelle 7-1 zeigt ferner die resultierende Abweichung A in Prozent, ermittelt als

$$A = 100 \cdot \frac{a}{d} \tag{7-1}$$

Tabelle 7-1: Grenzabmaße nach [EN572-2]

Neendicke d [mm]	Grenzabmaße a [mm]	Abweichung A [%]	notwendiges $\gamma_M$ [ - ]
2	$\pm 0,2$	10,0	1,37
3	$\pm 0,2$	6,7	1,23
4	$\pm 0,2$	5,0	1,17
5	$\pm 0,2$	4,0	1,13
6	$\pm 0,2$	3,3	1,11
8	$\pm 0,3$	3,8	1,12
10	$\pm 0,3$	3,0	1,10
12	$\pm 0,3$	2,5	1,08
15	$\pm 0,5$	3,3	1,11
19	$\pm 1,0$	5,3	1,18
25	$\pm 1,0$	4,0	1,13

Da die Scheibendicke in die Steifigkeit  $EI_{\text{Glas}}$  in der dritten Potenz eingeht, gilt

$$\frac{1}{\gamma_M} = \frac{(d - a)^3}{d^3} \quad (7-2)$$

und somit

$$\gamma_M = \frac{d^3}{(d - a)^3} \quad (7-3)$$

Für den konstruktiven Glasbau, insbesondere für das hier betrachtete System sind Glasdicken kleiner als 5 mm unrealistisch, so dass die maximale Abweichung im relevanten Bereich 5,3 % beträgt bzw. der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1,18$  die möglichen Abweichungen von der Nennglasdicke berücksichtigt.

## 7.4 Bemessungsansatz

### 7.4.1 Konzept

Ein Nachweis lässt sich in zwei Schritten führen. Der Randbalken wird als Stab im Sinne der [DIN18800] betrachtet, der durch Normalkraft, Biegung und gegebenenfalls Torsion beansprucht wird. Die Aussteifung durch die Scheibe kann z.B. in Form einer Ersatzsteifigkeit oder einer elastischen Bettung des Stabes berücksichtigt werden. Die dafür notwendigen Werte können durch Auswerten der Last-Verformungskurven ermittelt werden. Der Vorteil der Betrachtung als Stab nach [DIN18800] liegt auch darin, dass die hierfür anzusetzenden Vorverformungen aus geometrischen Imperfektionen und der Stabilitätsnachweis durch [DIN18800] geregelt sind.

Das Glas erfährt keine direkte Normalkraft, d.h. Scheibenbeanspruchung, sondern wird durch die Querlast  $q$  belastet und erfährt dann aus der resultierenden Verformung am Rand eine Zwangsbeanspruchung durch die Biegung des Randbalkens. Dieser Lastzustand ist so bislang nicht durch allgemeine Bemessungsregeln abgedeckt. Aus den Ergebnissen der numerischen Berechnung des Systems kann jedoch der maßgebliche Belastungs-/Verformungszustand, d. h. die auftretenden Spannungen und Verformungen auf

der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden. Die Scheibe selbst ist nicht stabilitätsgefährdet und erfährt keine konzentrierte Lasteintragung, daher kann ein Nachweis allein durch Vergleich mit den Grenzspannungen und Verformungen geführt werden.

Wie bereits in 3.1.3 dargestellt, lässt sich die Reibung als günstig wirkender Einfluss nicht zuverlässig berücksichtigen. Ähnlich verhält es sich nach aktuellem Stand der Technik für Verklebungen, da gerade für länger andauernde Lasten die ansetzbaren Schubspannungen sehr gering sind. Für symmetrische Anordnung des Randbalkens bzw. mit der Scheibe in der Spannungs-Nulllinie für Biegung des Randbalkens hat die Reibung keinen Einfluss. Bei unsymmetrischer, d.h. exzentrischer Anordnung erhält die Scheibe aus Biegung des Randbalkens auch Spannungen aus dem „Steiner-Anteil“ des Gesamtflächenträgheitsmomentes. Da dies zu einer erhöhten Beanspruchung der Scheibe führt bzw. führen kann, müssen für diesen Fall Grenzfälle für die Reibung bzw. Klebung betrachtet werden. Für das hier untersuchte System braucht dies aber nicht berücksichtigt zu werden.

Für die Variante des Systems, bei der die Lasteinleitung der Vertikallasten ganz oder teilweise ins Glas erfolgt, wäre zwingend zu untersuchen gewesen, wie sich das Modul, insbesondere die Scheibe im geschädigten Zustand verhält. Das Risiko eines Totalausfalls der Scheibe wäre konstruktiv, z.B. durch Verwendung von VSG mit mindestens drei Lagen zu minimieren gewesen.

Durch das gewählte System mit der Lasteinleitung direkt in den Randbalken ist der Ausfall der Scheibe nicht zwangsläufig mit dem Ausfall des gesamten Moduls verbunden, da auch bei Bruch der Scheibe die Randbalken allein noch einen Teil der Last übertragen können. Für die Bestimmung dieser reduzierten Tragfähigkeit gibt es mehrere mögliche Ansätze:

Über die Definition eines Schadenszenarios kann bei Einsatz von VSG die verbleibende Steifigkeit der Scheibe über die Anzahl der als intakt anzusetzenden VSG-Schichten bestimmt werden. Je nach Exposition der Konstruktion und möglichen Folgen eines Versagens sind hier sicherlich unterschiedliche Annahmen zu treffen. Mögliche Ansätze hierzu finden sich in [BOS 2009].

Ein weiterer Ansatz ist die Betrachtung der Gesamtstruktur. Bei nebeneinander angeordneten Modulen können die jeweils zwei Randbalken zwischen zwei Scheiben als gemeinsamer Randbalken ausgeführt und betrachtet werden. Für diesen fehlt bei Bruch einer der beiden Scheiben nur ein Teil der Steifigkeit. Besondere Beachtung müssen dann aber entsprechend die äußeren Randbalken der Struktur erfahren und z.B. verstärkt ausgeführt werden.

Der vollständige Ausfall einer Scheibe kann, gerade bei VSG, sicherlich als außergewöhnliche Bemessungssituation betrachtet werden. Insofern können die anzusetzenden Einwirkungskombinationen für diesen Fall mit geringeren Teilsicherheitsbeiwerten ermittelt werden.

#### **7.4.2 Nachweis Stahl**

Grundsätzlich können die Randbalken als Stäbe mit Biegung und Normalkraft nach Teil 2 der [DIN18800] betrachtet und nachgewiesen werden. Der wichtigste Aspekt ist dabei die Berücksichtigung der Kopplung der Randbalken mit der Scheibe, d.h. die Berücksichtigung der zusätzlichen Steifigkeit, die, wie in Abschnitt 4.5.9.5 dargestellt, mit Hilfe der ermittelten mitwirkenden Breiten quantifiziert werden kann. Eine naheliegende Möglichkeit wäre die Einführung einer elastischen Bettung des Stabes, die den versteifenden Effekt der Scheibe berücksichtigt. Entlehnt aus dem Verbundbau wird jedoch eine andere Methode vorgeschlagen und im Folgenden beschrieben.

Im Verbundbau (vgl. z.B. [THIELE ET AL. 1997]) wird bei der Ermittlung der Querschnittswerte für den Gesamtquerschnitt mit Hilfe der sogenannten Reduktionzahl  $n$  ein ideelles Flächenträgheitsmoment bestimmt, so dass die Wirkung des Betons im Sinne eines zusätzlichen Stahlquerschnitts berücksichtigt

wird. Dieses Vorgehen lässt sich analog für das untersuchte System durchführen, wobei die Reduktionszahl  $n$  hier auf Grund des ideal linear-elastischen Verhaltens konstant angenommen werden kann mit

$$n = \frac{E_{St}}{E_{Glas}} \quad (7-4)$$

Das ideale Flächenträgheitsmoment  $I_{Glas,id}$  für die Scheibe ergibt sich damit zu

$$I_{Glas,id} = \frac{I_{Glas}}{n} \quad (7-5)$$

und mit Berücksichtigung der mitwirkenden Breite

$$I_{Glas,id} = \frac{B_m \cdot t^3}{12 \cdot n} \quad (7-6)$$

Das anzusetzende Flächenträgheitsmoment für den Randbalken unter Berücksichtigung der Scheibenmitwirkung beträgt somit

$$I_{RB,id} = I_{RB} + I_{Glas,id} \quad (7-7)$$

oder

$$I_{RB,id} = I_{RB} + \frac{B_m \cdot t^3}{12 \cdot n} \quad (7-8)$$

bzw. die Gesamtsteifigkeit

$$EI_{RB,id} = E_{St} \cdot \left( I_{RB} + \frac{B_m \cdot t^3}{12 \cdot n} \right) \quad (7-9)$$

Gleichung (7-9) ist eine andere Darstellung der Gleichung (6-10), der große Vorteil dieser Formulierung liegt darin, dass durch die Beschreibung als  $I_{RB,id}$  die Nachweise direkt nach [DIN18800-2] mit den angegeben bezogenen Schlankheitsgraden geführt werden können.

Auch die in 7.3.2 beschriebene notwendige Abminderung der Steifigkeit für stabilitätsgefährdete Bauteile kann hier direkt berücksichtigt werden:

$$I_{RB,id, d} = \frac{I_{RB} + \frac{B_m \cdot t^3}{12 \cdot n}}{\gamma_M} \quad (7-10)$$

bzw.

$$EI_{RB,id, d} = \frac{E_{St}}{\gamma_M} \cdot \left( I_{RB} + \frac{B_m \cdot t^3}{12 \cdot n} \right) \quad (7-11)$$

Die Verwendung eines einheitlichen Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  setzt voraus, dass dieser für Glas und Stahl gleichermaßen verwendbar ist. [DIN18800-2] fordert hier einen Wert von  $\gamma_M = 1,1$ . Wie in 7.3.4 dargestellt, beträgt der mindestens notwendige Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung möglicher – zulässiger – Abweichung der Scheibendicke  $\gamma_M = 1,18$ . Da die Scheibe selbst nicht stabilitätsgefährdet ist, brauchen keine weiteren Einflüsse der Scheibengeometrie berücksichtigt zu werden, sofern die mittragende Breite entsprechend sorgfältig bzw. auf der sicheren Seite liegend aus dem Diagramm ermittelt wird. Somit deckt ein  $\gamma_M = 1,2$  die zu berücksichtigen Unsicherheiten sowohl für die Scheibe als auch für den

Randbalken ab und kann daher als einheitlicher Beiwert auf der sicheren Seite verwendet werden. Alternativ kann der Steifigkeitsbeitrag der Scheibe unter Ansatz der minimal zulässigen Glasdicke statt der nominellen Glasdicke ermittelt werden, so dass ein  $\gamma_M = 1,1$  wieder ausreichend ist. Mit den ermittelten Werten  $I_{RB,id,d}$  bzw.  $EI_{RB,id,d}$  können die Nachweise wie für einteilige Stäbe nach [DIN18800-2] für den Fall einachsige Biegung mit Normalkraft (Abschnitt 3.4) geführt werden. Dabei sind sowohl Biegeknicke, als auch Biegedrillknicken zu berücksichtigen, da die Einspannwirkung der Scheibe im Randbalken, d.h. eine Torsionsbettung des Randbalkens bislang nicht ausreichend untersucht wurde und daher von einer freien Verdrehbarkeit des Randbalkens ausgegangen werden muss.

### 7.4.3 Nachweis Glas

Für die Scheibe kann ein direkter Nachweis nach eingeführten technischen Baubestimmungen nur dann erfolgen, wenn die Maximalverformung des Randbalkens unter Ansatz der charakteristischen Lasten nach Gleichung (22) der [DIN1055-100] 1/200 der Randbalkenlänge nicht überschreitet. In allen anderen Fällen ist [DIN18008-2] nicht anwendbar und der Verwendbarkeitsnachweis ist mittels AbZ oder ZiE zu führen. Hierfür gilt es nachzuweisen, dass ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht wird. Da die Scheibe selbst nicht stabilitätsgefährdet ist, sondern nur auf Biegung beansprucht wird, genügt dazu der Nachweis der maximalen Hauptzugspannungen und der maximalen Verformungen analog den Anforderungen nach [DIN18008] Teile 1 und 2, wenn keine zusätzlichen Anforderungen z.B. hinsichtlich Resttragfähigkeit, Betret-/ Begehbarkeit oder Absturzsicherheit gestellt werden. Konkrete Regelungen könnten in Teil 7 der [DIN18008] berücksichtigt werden.

Der Nachweis der Scheibe kann in zwei Schritten erfolgen. Das Verhalten der Scheibe für die Belastung aus  $q$  kann für bestimmte Randbedingungen analytisch nach Abschnitt 3.6.2 bestimmt werden. Für andere Randbedingungen lässt sich das System „Scheibe mit Randbalken“ durch die meisten – auch einfachen – FEM-Programme (z.B. SJ Mepla) abbilden und die resultierenden Spannungen und Verformungen lassen sich so ermitteln. Zu ermitteln sind diese dabei für die drei relevanten Punkte Scheibenmitte (SMP) und in der Mitte des horizontalen (QRM) und vertikalen Scheibenrandes (RBM). Für VSG- oder VG-Scheiben ist das System mit der ideellen Scheibendicke abzubilden und die Spannungen umzurechnen (vgl. 3.1.2).

Die so ermittelte Verformung in Randbalkenmitte (RBM) dient dann als Eingangswert der Vorverformung  $w_0$  für das Analogiesystem nach 6.2.1.2. Unter Ansatz der Kennwerte nach 7.4.2 (reduzierte Steifigkeit  $EI_d$ ) lässt sich damit die Verformung in Randbalkenmitte für die ermittelte Vertikallast  $F$  bestimmen. Daraus wiederum ergibt sich nach Gleichung (6-16) der Vergrößerungsfaktor  $v$  zu

$$v = \frac{w(F)}{w_0} \quad (7-12)$$

Wie in Abschnitt 4.5.9.1 gezeigt wurde, ist die Zunahme der Verformung in der Mitte des Randbalkens am größten, so dass die Anwendung des Vergrößerungsfaktors für Verformungen am oberen Scheibenrand und in der Mitte der Scheibe auf der sicheren Seite liegt:

$$w_{SMP}(F) = v \cdot w_{0,SMP} \quad (7-13)$$

bzw.

$$w_{QRM}(F) = v \cdot w_{0,QRM} \quad (7-14)$$

Analog verhält es sich, wie in 6.2.2 dargestellt, für die Spannungen am oberen Rand und in Scheibenmitte:

$$\sigma_{\text{SMP}}(\text{F}) = v \cdot \sigma_{0,\text{SMP}} \quad (7-15)$$

bzw.

$$\sigma_{\text{QRM}}(\text{F}) = v \cdot \sigma_{0,\text{QRM}} \quad (7-16)$$

Für die Mitte des vertikalen Scheibenrandes gilt:

$$\sigma_{\text{RBM}}(\text{F}) = v^{1,2} \cdot \sigma_{0,\text{RBM}} \quad (7-17)$$

Für die Ermittlung der Spannungen liegt dieses Vorgehen zum Teil sehr weit auf der sicheren Seite, da diese aber in der Regel nicht maßgebend werden, kann dies hingenommen werden. Eine genauere Abschätzung ist auf Basis der im Anhang gegebenen Diagramme für alle untersuchten Parameterkombinationen möglich.

#### 7.4.4 Grenzzustände

Da für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit unterschiedliche Einwirkungskombinationen zu Grunde gelegt werden müssen, ist das oben beschriebene Vorgehen hierfür zweimal zu durchlaufen. Hierzu kommt gegebenenfalls die Berücksichtigung des Ausfalls der Scheibe oder einzelner Lagen einer VSG-Scheibe. Dazu sind die Widerstandswerte erneut zu ermitteln. Gleichzeitig können dabei die anzusetzenden Einwirkungen durch die Betrachtung als außergewöhnlicher Lastfalls reduziert werden.

### 7.5 Konstruktive Gestaltung

Unabhängig von der konstruktiven Umsetzung des beschriebenen Systems gilt es, einige Detailpunkte zu beachten, damit die wesentlichen Randbedingungen für die dargestellte Art der Bemessung erfüllt werden können.

#### 7.5.1 Lasteinleitung

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass für das untersuchte System eine Lasteinleitung direkt in den Randbalken am sinnvollsten ist. Die Möglichkeiten zur Lasteinleitung ins Glas wurden daher nicht weiter untersucht. In den Experimenten hat sich gezeigt, dass durch die Wahl geeigneter Zwischenlagen auch große Kräfte in vergleichsweise kleine Bereiche der Glaskante übertragen werden können.

Grundsätzlich gilt es aber, die Lastübergangspunkte so auszubilden, dass die Lasten tatsächlich direkt in den Randbalken eingeleitet werden. Ist dies nicht gewährleistet, stellt sich eine unbestimmte Lastverteilung zwischen Glas und Randbalken mit entsprechend unbekanntem Auswirkungen ein.

Da Ausmittigkeiten bei der Lasteinleitung die Beanspruchungen erhöhen und somit die Gesamttragfähigkeit verringern, gilt es diese zu minimieren.

#### 7.5.2 Verbindung Randbalken und Glas

Bei den in den Experimenten untersuchten Modulen bestanden die Randbalken aus U-Profilen. Für die Anwendung in der Fassade sind auch andere Querschnitte vorstellbar. Naheliegend wären hier z.B. I bzw. H-Querschnitte, um so nebeneinander angeordnete Module direkt zu verbinden. Dabei sollte in Betracht gezogen werden, dass für Glaselemente in der Regel die Möglichkeit zum Austausch gegeben sein sollte, so dass bei Verwendung kombinierter Profile Öffnungsmöglichkeiten vorgesehen werden sollten.

Auf Grund der symmetrischen Anordnung von Scheibe und Randbalken mit gleicher Mittelachse ist die Möglichkeit der Schubübertragung der Zwischenlage unwesentlich für die mechanische Betrachtung. Wichtig ist hingegen, dass das Zwischenmaterial eine ausreichende Steifigkeit aufweist, um einen Formschluss zwischen Stahl und Glas sicherzustellen. Nur dadurch kann sichergestellt werden, dass die Verformungen senkrecht zur Scheibenebene von Randbalken und Scheibe am Rand gleich sind und die Scheibe tatsächlich mitwirkt. Ein möglicherweise auftretende „Schlupf“ durch ungenügende Zwischenlage wäre zwingend durch eine verminderte Anfangssteifigkeit zu berücksichtigen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Bearbeitung und Ergebnisse

Ein Überblick über die aktuellen Entwicklungen im Konstruktiven Glasbau zeigt, dass sich die Forschungsgebiete derzeit in zwei wesentliche Gruppen gliedern lassen. Der eine Teil widmet sich der Grundlagenermittlung z.B. im Bereich Kleben, Stabilität oder Festigkeit von Glas (-scheiben). Der andere Teil beschäftigt sich vorrangig mit konkreten Bauarten wie z.B. punktförmig gelagerte oder absturzsichernde Verglasungen. Ziel der meisten Forschungsprojekte aus der zweiten Gruppe ist es dabei, die Basis für Bemessungsregeln zu schaffen. Anerkannte Bemessungsregeln stellen im Bauwesen die wesentliche Basis für effizientes Planen und Konstruieren dar.

Das Thema dieser Arbeit ist grundsätzlich der zweiten Gruppe zuzuordnen, wobei im Projektverlauf zunächst allgemeine Untersuchungen zur Lastein- und -überleitung im Vordergrund standen, jedoch durch die gefundenen Ergebnisse eine einfache Möglichkeit zur Bemessung des Systems entwickelt werden konnte.

Betrachtet wurde eine Fassade, in der die Lasten aus dem Eigengewicht der Scheiben nicht in eine dahinterliegende Struktur wie z.B. eine Pfosten-Riegel-Konstruktion abgeleitet, sondern in der Ebene der Scheibe bzw. der Gebäudehülle selbst nach unten geführt werden sollen. Da eine Lagerung, d.h. Fassung der Scheiben ohnehin erforderlich ist, die dazu verwendeten Profile in der Praxis jedoch selten eine ausreichende Steifigkeit besitzen um Beulen als Versagensform zu erreichen, ist der wesentliche Ansatz dieses Projektes, das Zusammenwirken von Rahmen und Scheibe zu untersuchen, um die optimale Lastabtragung unter Berücksichtigung der mittragenden Wirkung der Scheibe zu erreichen.

Wesentliche Teile dieser Arbeit entstanden im Rahmen eines Forschungsprojektes, das über den Deutschen Ausschuss für Stahlbau DASt von der Allianz Industrie Forschung AIF (vormals Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung) gefördert wurde. Eine wichtige Grundlage des Antrags zu diesem Projekt war der baupraktische Bezug, d.h. eine Betrachtung unter den üblichen Randbedingungen der Praxis. Für dieses Projekt heißt das auch, realistische Annahmen für die Dimensionen der verwendeten Bauteile zu verwenden.

Da wesentliche Ergebnisse mittels Finiter-Element-Modellierung erfolgten, wurde in einem ersten Schritt ein möglichst einfaches und beherrschbares Finite-Element-Modell erstellt. Dabei erfolgte auch eine Validierung und eine ausführliche Verifizierung des Modells anhand elementarer Vergleichslösungen (Beulen, Knicken) sowie weiterer Lösungen aus der Literatur.

In einem zweiten Schritt wurden verschiedene Lagerungssituationen untersucht. Konkret wurde für verschiedene Geometrien die Lasteinleitung direkt in den Randbalken, über die ganze Scheibenkante, über die randnahen Bereiche der Scheibenkante und als kombinierte Lasteinleitung (Scheibe und Randbalken) untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass für die Steifigkeitsbereiche, wie sie für Scheibe und Randbalken angenommen wurden, eine Lasteinleitung in den Randbalken zur größten Tragfähigkeit führt. Dieses Ergebnis war insofern ausschlaggebend, da durch eine Lasteinleitung direkt in den Randbalken und damit auch von Randbalken zu Randbalken die Lasteinleitung ins Glas mit der damit verbundenen Problematik von lokalen Spannungskonzentrationen in den Hintergrund trat. Das Zusammentreffen von größter Tragfähigkeit und der Vermeidung von Spannungsspitzen im Glas macht diese Variante, gerade vor dem Hintergrund der erforderlichen Praxistauglichkeit, zur besten Lösung.

Neben der numerischen Berechnung wurde die Art der Lasteinleitung auch experimentell untersucht. Dazu wurde auf Scheiben unterschiedlicher Geometrie zunächst eine Vorverformung normal zur Scheibenebene aufgebracht und die Scheiben anschließend mit variierender Lasteinleitung vertikal belastet. In den Versuchen bestätigten sich die numerisch erzielten Ergebnisse, zudem konnte anhand der Last-Verformungskurven die numerische Berechnung – zusätzlich – verifiziert werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde in einer Parameterstudie die gegenseitige Abhängigkeit der Einfluss nehmenden Parameter (Geometrie, Steifigkeiten) untersucht. Im Rahmen der Auswertung wurde auch ein Parameter „Effizienz“ untersucht, als Maß für die Mitwirkung der Scheibe am Tragverhalten. Dabei stellte sich heraus, dass die Effizienz des Systems maßgeblich nur vom Ansichtsverhältnis der Scheibe abhängt, d.h. weitgehend unabhängig von den Steifigkeitsverhältnissen von Randbalken und Scheibe ist. In einer weiteren Parameterstudie wurde das Ansichtsverhältnis weiter variiert und weitere Werte für die Effizienz, abhängig von der Scheibengeometrie, ermittelt.

Für die Erarbeitung eines Bemessungskonzeptes wurde die Formulierung der Effizienz in Anlehnung an andere Bemessungsnormen in den Ausdruck „mitwirkende Breite“ überführt. Auf Basis dieser Ergebnisse und unter Ansatz eines Ersatzstabsystems nach Theorie II. Ordnung kann das Last-Verformungsverhalten der in und senkrecht zur Scheibenfläche belasteten Scheibe sehr gut abgebildet werden. Durch die Auswertung der Last-Verformungskurven aller Parameterstudien konnte dann eine Formulierung zur übersichtlichen Ermittlung der in der Scheibe auftretenden Spannungen abhängig vom Lastzustand gefunden werden.

Für das beschriebene System lässt sich mit Hilfe der dargestellten Ergebnisse die Tragfähigkeit und das Last-Verformungsverhalten ohne aufwändige FEM-Simulation für beliebige Geometrien bestimmen. Zudem lässt sich auch das Resttragverhalten für den Fall einer – teilweise oder ganz – gebrochenen Scheibe durch Berücksichtigung der verringerten Steifigkeit abhängig vom anzusetzenden Zerstörungsgrad der Scheibe ermitteln.

## 8.2 Mögliche Weiterentwicklung

Wie schon in Abschnitt 1 angedeutet, sind diese Ergebnisse ein erster Schritt, das System an sich bietet aber weiteres Potenzial. Für die betrachtete Fassade mit den Aussteifungspunkten an den Ecken der Module kann auf die Übertragung von Biegemomenten an den horizontalen Kanten der Scheiben verzichtet werden. Für den Einsatz der Module als Druckelemente sind jedoch auch andere Verwendungsmöglichkeiten als in der Fassade denkbar. Abbildung 8-1 zeigt eine mögliche Weiterentwicklung.

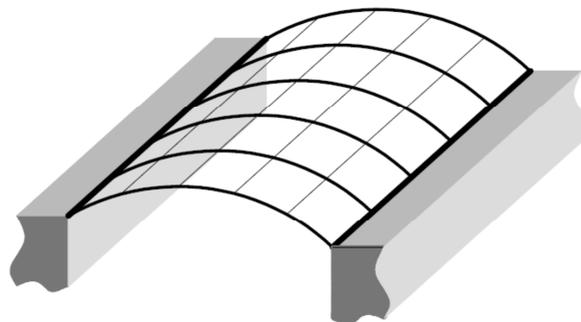


Abbildung 8-1: Mögliche Weiterentwicklung

Für eine Verwendung der Module im Sinne von Abbildung 8-1 ist eine Kopplung der Verdrehung an den Rändern der Scheiben zwingend notwendig. Für eine Weiterentwicklung des Systems in diese Richtung wäre daher eine Untersuchung möglicher Kopplungen notwendig. Ziel sollte es dabei sein, Werte für die

Steifigkeit und die Tragfähigkeit der Verbindung zu finden. In Abbildung 8-2 sind die benötigten Kennwerte dargestellt.

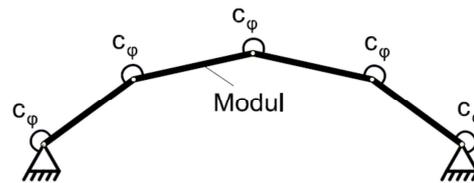


Abbildung 8-2: Verbindung der Module

Mit entsprechenden Ergebnissen lässt sich auch die Anwendung der Module in der Fassade weiterentwickeln, in dem auch hier die Kopplung der Scheiben genutzt wird und zum Teil auf eine Abstützung zur Unterkonstruktion in den Knotenpunkten verzichtet werden kann.

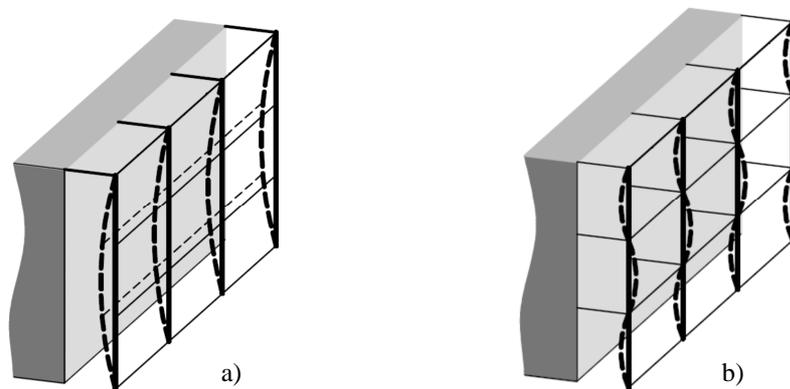


Abbildung 8-3: Gesamtverformung

Dies ist sowohl im Sinne einer Fassade ohne Aussteifungselemente an den Ecken (Abbildung 8-3a), als auch zur Reduzierung der Verformungen in einer Fassade mit entsprechender Aussteifung möglich.

### 8.3 Ausblick

Ein erstrebenswerter nächster Schritt wäre die Anwendung des beschriebenen Systems in der Praxis für einige Referenzbeispiele. Dabei muss es sich nicht notwendiger Weise um eine Verwendung als Fassade handeln. Lastabtragende Verglasungen sind auch in vielen anderen Einsatzbereichen denkbar, z.B. für Wintergärten, Messebau, Carports. Das beschriebene System bietet hier die Möglichkeit einer einfachen Anwendung und einer zuverlässigen Lösung für alle Szenarien der Resttragfähigkeit.

Zum aktuellen Stand wäre eine AbZ für ein System nach dem beschriebenen Prinzip eine geeignete Lösung für eine einfache und baurechtlich einwandfreie Umsetzung tragender Glaswände und -fassaden.

## Quellen

### Literatur

- [ALBRECHT 1967] Albrecht G., *Bemessung*, Dissertation, Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen, 1967
- [ALBRECHTN 2004] Albrecht N., *Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich punktgestützter Glastafeln*, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) 2004
- [AMADIO ET AL. 2011] Amadio C., Bedon C., *Buckling of laminated glass elements in compression*, Journal of Structural Engineering, Volume 137 N° 8/2011, pp. 803-811, Reston 2011
- [BELIS ET AL. 2010] Belis J., Mocibob D. Luible A. Vandebroek M., *On the size and shape of initial out-of-plane curvatures in structural glass components*, Construction and Building Materials - Volume 25, Issue 5, 2011
- [BEYER 2007] Beyer J., *Ein Beitrag zum Bemessungskonzept für punktgestützte Glastafeln*, Dissertation, TU Darmstadt 2007
- [BLANK 1994] Blank K., *Dickenbemessung von vierseitig gelagerten rechteckigen Glasscheiben unter gleichförmiger Flächenlast*, IKG-Forschungsbericht 3/93, Gelsenkirchen 1994
- [BOS 2009] Bos F. P., *Safety Concepts for Structural Glass Engineering – Towards an Integrated Approach*, Dissertation, Delft University of Technology, 2009
- [BRENDLER 2007] Brendler S., *Rechnerisches Bemessungskonzept für absturzsichernde Glastafeln*, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig 2007
- [BT2001] Bautechnik – Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, Heft 10, Verlag Ernst & Sohn, 2001
- [BUCAK ET AL. 2006] Bucak Ö., Schuler Ch., Meißner M., *Verbund im Glasbau – Neues und Bewährtes*, Stahlbau Heft 6, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 2006
- [DIBT2011] *Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen - Zulassungsbereich: Glas im Bauwesen*, Stand: September 2011, veröffentlicht unter [http://www.dibt.de/de/zv/NAT\\_n/zv\\_referat\\_I3/SVA\\_70.htm](http://www.dibt.de/de/zv/NAT_n/zv_referat_I3/SVA_70.htm)
- [DICKINSON 1854] *Dickinson's Comprehensive Pictures of the Great Exhibition of 1851*, London 1854
- [EMONDS ET AL. 2007] Emonds M., Hartmann D., Kroehs P.-H., Barth A, Kaonpää A., *The drilling process – an approach to improvement and better understanding*, Glass performance days – Conference Proceedings”, pp. 664-667, Tampere 2007
- [EEKHOUT ET AL. 2010] Eekhout M., Rotten P., *Development of a super slim façade system for InHolland Polytechnic, Delft*, Challenging Glass 2 – conference proceedings, Delft 2010

- 
- [ENGLHARDT 2007] Enghardt O., *Flächentragwerke aus Glas – Tragverhalten und Stabilität*, Dissertation, Schriftenreihe des Departments Nr. 12 – Dezember 2007, Universität für Bodenkultur Wien, 2007
- [FAHLBUSCH 2007] Fahlbusch M., *Zur Ermittlung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas am Beispiel eines Glasbogens mit Zugstab*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2007
- [FEIRABEND 2010] Feirabend S., *Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht*, Dissertation, Universität Stuttgart 2010
- [FELDMANN ET AL. 2010] Feldmann M., Langosch K., *Knickfestigkeit und einheitliche Knickkurven für scheibenförmige Glasstützen mit Monoglasquerschnitt aus TVG und ESG*, Stahlbau Spezial 2010 – Konstruktiver Glasbau, Ernst & Sohn Verlag 2010
- [GEBBEKEN ET AL. 2010] Gebbeken N., Teich M., Larcher M., *Cable net facades subjected to explosion loads*, ISAAG2010 – conference proceedings, München 2010
- [GOLEMBUS 2011] Golembus M., *Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Stahl-Glas-Elementen*, Bachelorarbeit, Universität der Bundeswehr München 2011
- [GÜSGEN 1998] Güsgen J., *Bemessung tragender Bauteile aus Glas*, Dissertation, Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen, 1998
- [HAESE 2009] Haese A., *Point fixed glazing – materials and processing*, IABSE 2009 – conference proceedings, Chicago 2009
- [HERRMANN 2010] Herrmann T., *Aspects on glass with countersunk fixings*, ISAAG2010 – conference proceedings, München 2010
- [HERRMANN 2012] Herrmann T., *Glazing with countersunk point fixings*, Challenging Glass 3 – conference proceedings, Delft 2012
- [HUVENERS 2009] Huveners E.M.P., *Circumferentially Adhesive Bonded Glass Panes for Bracing Steel Frames in Facades*, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 2009
- [HUVENERS 2009] linear geklebte Elemente und punktförmige S. zur Aussteifung (auf Schub)
- [KASPER 2005] Kasper R., *Tragverhalten von Glasträgern*, Dissertation RWTH Aachen, 2005
- [KOTT 2006] Kott A., *Zum Trag- und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas*, Dissertation, ETH Zürich 2006
- [KUTTERER 2003] Kutterer M., *Verbundglasplatten – Näherungslösungen zur Berücksichtigung von Schubverbund und Membrantragwirkung*, Dissertation, Universität Stuttgart 2003
- [LIESS 2001] Liess J., *Bemessung druckbelasteter Bauteile aus Glas*, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2001

- [LINDNER ET AL. 2006] Lindner J., Holberndt T., *Zum Nachweis von stabilitätsgefährdeten Glasträgern unter Biegebeanspruchung*, Stahlbau Heft 6, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 2006
- [LUIBLE 2004] Luible A., *Stabilität von Tragelementen aus Glas*, Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004
- [MANIATIS 2006] Maniatis I., *Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-Plane Loads*, Technische Universität München, Dissertation 2006
- [MOCIBOB 2008] Mocibob D., *Glass Panel under Shear Loading – Use of Glass Envelopes in Building Stabilization*, Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008
- [MSC-VOLB] *Marc 2010 – Volume B: Element Library*, MSC Software Corporation, Santa Ana, 2010
- [NEUGEBAUER 2005] Neugebauer J., *Gebäudehüllen aus Glas aus der Sicht eines Tragwerksplaners – Erhöhung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas*, Dissertation, Technische Universität Graz, 2005:
- [NIEDERMAIER 2005] Niedermaier P., *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen – Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken*, Dissertation, Technische Universität München, 2005
- [PETERS 2006] Peters S., *Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2006
- [PETERSEN 1982] Petersen Ch., *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen*, 2. Auflage, Vieweg Verlag 1982
- [PILKEY 1994] Pilkey W. D., *Formulas for stress, strain and structural matrices*, John Wiley & Sons, Inc., New York 1994
- [SACKMANN 2008] Sackmann V., *Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit des Schubverbunds in Verbundsicherheitsglas mit unterschiedlichen Folien aus Polyvinylbutyral*, Dissertation, TU München 2008
- [SCHADOW 2006] Schadow T., *Beanspruchungsgerechtes Konstruieren von Klebeverbindungen in Glastragwerken*, Dissertation, TU Dresden 2006
- [SCHNEIDER 2001] Schneider J., *Festigkeit und Bemessung punktgelagerter Gläser und stoßbeanspruchter Gläser*, Technische Universität Darmstadt, Bericht Nr. 26, Dissertation, Darmstadt 2001
- [SEDLACEK ET AL. 2001] Sedlacek G., Mohren R., *Lochleibungsversuche an gebohrtem ESG mit Verspritzungen – Kantendruckversuche an ESG mit Trennhülsen*, Forschungsbericht, RWTH Aachen 2001
- [SEEL ET AL. 2011] Beck E., Beyer J., Kasper R., Maniatis I., Seel M., *AiF-Forschungsbericht 16320 N – Standardlösungen für punktförmig gelagerte Verglasungen – Ermittlung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit*, Düsseldorf 2012

- 
- [SEEL 2012] Seel M., *Analytical solutions for detail problems in structural glazing*, Challenging Glass 3 – conference proceedings, Delft 2012
- [SEICA ET AL. 2010] Seica M., Krynski M., Packer J., *Explicit dynamic modelling of architectural glazing subject to blast loading*, Challenging Glass 2 – conference proceedings, Delft 2010
- [SHEN 1997] Shen X., *Entwicklung eines Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes für den Glasbau*, Fortschrittsberichte VDI – Reihe 4 – Nr. 138, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997
- [SIEBERTB 2005] Siebert B., *Beitrag zur Berechnung punktgehaltener Gläser*, Dissertation, Technische Universität München 2004
- [SIEBERTG 1999] Siebert G., *Beitrag zur Bemessung tragender Bauteile aus Glas*, Dissertation, Technische Universität München, 1999
- [SIEBERT 2001] Siebert G., *Entwurf und Bemessung von Tragenden Bauteilen aus Glas*, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 2001
- [SZILARD 1974] Szilard R. *Theory and Analysis of Plates – Classical and numerical methods*, Civil engineering and engineering mechanics series – Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1974
- [TEICH 2011] Teich M., *Interaktion von Explosionen mit flexiblen Strukturen*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München 2011
- [THIELE ET AL. 1997] Thiele A., Lohse W., *Stahlbau – Teil 2*, Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1997
- [VANIMPE ET AL. 2007] van Impe R., Belis J., Callewaert D., *Glued and preloaded bolted connections for laminated float glass*, Glass performance days – Conference Proceedings, pp. 654-57, Tampere 2007
- [VANIMPE ET AL. 2009] van Impe R., Belis J., Callewaert D., Delincé D., *Temperature-dependent behaviour of glass/ionomer laminates: preliminary test results*, las Performance Days – conference proceedings, Tampere 2009
- [VIDEKHINA 2005] Videkhina I., *Einführung in die Theorie der Platten*, Vorlesungsskript der Universität der Bundeswehr München, 2005
- [WELLER 2009] Weller B., Kothe M., Laborge R., Wunsch J., *Structural Sealants - Uni-Axial Mechanical*, Glass Performance Days 2009 – Conference Proceedings, Tampere 2009
- [WELLERSHOFF 2006] Wellershoff F., *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen*, Dissertation, RWTH Aachen 2006
- [WÖRNER ET AL. 2005] Wörner J.-D., Scheider J., *Abschlußbericht zur experimentellen und rechnerischen Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß*, TU Darmstadt – Institut für Statik, 2005
- [WURM 2007] Wurm, J., *Glas als Tragwerk*, Birkenhäuser Verlag AG, Berlin 2007

### **Normen, Regeln und AbZ**

- [EN1990]            DIN EN 1990: 2001-12 – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [DIN1055-100]     DIN 1055-100: 2001-03 – Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln
- [EN572-9]            DIN EN 572-9: 2005-01 – Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 9: Konformitätsbewertung/Produktnorm
- [EN572-2]            DIN EN 572-2: 2004-09 – Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 2: Floatglas
- [DINEN12150-1]     DIN EN 12150-1: 2000-11 – Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung
- [DIN4426]            DIN 4426: 2001-09 – Einrichtungen zur Instandhaltung baulicher Anlagen - Sicherheitstechnische Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege - Planung und Ausführung
- [EN14449]            DIN EN 14449: 2005-07 – Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Konformitätsbewertung/Produktnorm
- [EN1096-4]            DIN EN 1096-1: 2011-06 – Glas im Bauwesen - Beschichtetes Glas – Teil 1: Definitionen und Klasseneinteilung
- [EN1279]            DIN EN 1279-1: 2004-08 – Glas im Bauwesen - Mehrscheiben-Isolierglas - Teil 1: Allgemeines, Maßtoleranzen und Vorschriften für die Systembeschreibung
- [BRL]                Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C - Ausgabe 2011/1 - DIBt Mitteilungen Sonderheft Nr. 41, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2011
- [TRLV]                TRLV: 2006-08 – Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV);
- [TRAV]                TRAV: 2003-01 – Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV)
- [TRPV]                TRPV 2006-08 – Technische Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen (TRPV)

### **Andere Quellen**

- [GSI 2010]            Photograph: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Geralt Siebert 2010
- [PHD 1851]            Photograph: Philip Henry Delamotte, 1851

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Apple Store in Shanghai [GSI 2010] .....	1
Abbildung 1-2: Palmenhaus in den Bicton Gardens [BT2001] .....	2
Abbildung 1-3: „Crystal Palace“ [DICKINSON 1854] [PHD1851] .....	2
Abbildung 1-4: Leitidee .....	4
Abbildung 1-5: Untersuchtes System.....	4
Abbildung 2-1: Untersuchte Belastungsszenarien .....	11
Abbildung 3-1: Systemkomponenten.....	14
Abbildung 3-2: Lastpfade.....	15
Abbildung 3-3: „Einkammerung“ der Scheibe in das Randprofil.....	16
Abbildung 3-4: Wirkung der Momentenübertragung .....	17
Abbildung 3-5: Versagensform für Vertikallasten auf den Randbalken .....	18
Abbildung 3-6: Teilsystem als „Modul“ .....	20
Abbildung 3-7: Modul mit Randbedingungen .....	20
Abbildung 3-8: System und Belastung – Bezeichnungen und Konventionen .....	22
Abbildung 3-9: Versagensformen für unterschiedliche Randbedingungen .....	23
Abbildung 3-10: Versagensformen für konzentrierte Lasteinleitung.....	23
Abbildung 3-11: Ersatzsystem .....	24
Abbildung 3-12: Bezeichnungen am inkrementellen Element nach [SZILARD 1974].....	24
Abbildung 3-13: Prinzipskizze Verbundprofil .....	26
Abbildung 4-1 - Kraftübertragung zwischen Stahl und Glas .....	29
Abbildung 4-2 – Schema der Kopplung von Randbalken und Glasscheibe .....	29
Abbildung 4-3: Shell-Element 75 [MSC-VOLB] .....	30
Abbildung 4-4: Randbedingungen des Modells.....	31
Abbildung 4-5: Vergleich der Lasthistorien.....	34
Abbildung 4-6: Erste Beulfigur (a) und Verformung durch $q$ (b).....	35
Abbildung 4-7: Änderung der Verformungsfigur mit zunehmender Vertikalkraft.....	36
Abbildung 4-8: Kraft-Verformungsverlauf für Vorbelastung aus Flächenlast .....	36
Abbildung 4-9: Vorverformung durch Einzellasten $P$ in Randbalkenmitte .....	37
Abbildung 4-10: Vergleich der Verformung bei zunehmender Vertikallast.....	38
Abbildung 4-11: Kraft-Verformungsverläufe für den Vergleichsfall .....	38
Abbildung 4-12: Untersuchte Lastaufteilungsvarianten.....	40
Abbildung 4-13: Vergleich der Lasteinleitungsvarianten .....	42

---

Abbildung 4-14: Detail zu Abbildung 4-13.....	42
Abbildung 4-15: Modell mit freiem (a) und gelagertem (b) Querrand .....	46
Abbildung 4-16: Systemparameter.....	48
Abbildung 4-17: Verformungszustände a) q und b) q+V für a = 0,5 .....	49
Abbildung 4-18: Typischer Kraft-Verformungsverlauf für a = 0,5 (PS010) .....	49
Abbildung 4-19: Auszug aus Verformungs-/Spannungs-Kraftverlauf für a = 0,5 (PS010).....	50
Abbildung 4-20: Verformungszustände q (a) und q+V (b) für a = 1 .....	51
Abbildung 4-21: Typischer Kraft-Verformungsverlauf für a = 1 (PS028) .....	51
Abbildung 4-22: Auszug aus Verformungs-/Spannungs-Kraftverlauf für a = 1 (PS028).....	51
Abbildung 4-23: Verformungszustände q (a) und q+V (b) für a = 2 .....	52
Abbildung 4-24: Typischer Kraft-Verformungsverlauf für a = 2 (PS046) .....	52
Abbildung 4-25: Auszug aus Verformungs-/Spannungs-Kraftverlauf für a = 2 (PS046).....	53
Abbildung 4-26: Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für PS010.....	53
Abbildung 4-27: Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für PS028.....	54
Abbildung 4-28: Verteilung der maximalen Hauptzugspannungen für PS046.....	54
Abbildung 4-29: Symmetrische (PS121=PS010) und unsymmetrische(PS301) Belastung für a = 0,5 .....	55
Abbildung 4-30: Symmetrische (PS111=PS028) und unsymmetrische (PS302) Belastung für a = 1 .....	55
Abbildung 4-31: Symmetrische (PS116=PS046) und unsymmetrische (PS303) Belastung für a = 2 .....	56
Abbildung 4-32: Vergleich mit (PS201) und ohne (PS121) Lagerung der Querränder für a= 0,5 ..	56
Abbildung 4-33: Vergleich mit (PS202) und ohne (PS111) Lagerung der Querränder für a = 1 ....	57
Abbildung 4-34: Vergleich mit (PS203) und ohne (PS116) Lagerung der Querränder für a= 2 .....	57
Abbildung 4-35: Effektiver Anteil der Scheibensteifigkeit m und Effizienz e .....	59
Abbildung 4-36: Werte von m und e für weitere Breiten.....	59
Abbildung 5-1: Lasteinleitung a) in den RB und b) in die Glaskante .....	62
Abbildung 5-2: Versuchsaufbau schematisch (a) und im Labor des Instituts (b) .....	63
Abbildung 5-3: Lage der Wegaufnehmer in den Versuchen.....	64
Abbildung 5-4:Hochformat mit Lasteinleitung im Randbalken.....	67
Abbildung 5-5: Hochformat mit Lasteinleitung in die Glaskante .....	67
Abbildung 5-6: Querformat mit Lasteinleitung in die Randbalken.....	69
Abbildung 5-7: Querformat mit Lasteinleitung in die Glaskante.....	69
Abbildung 5-8: Vergleich der Lasteinleitungsvarianten im Versuch.....	70
Abbildung 6-1: Kraft-Weg-Verlauf aus den Versuchen.....	71

---

Abbildung 6-2: Einfeldträger mit Normalkraft mit Linienlast (a) und Vorverformung $w_0$ (b).....	72
Abbildung 6-3: Vergleich der numerischen und analytischen Ergebnisse – Ansatz q mit $b_m = B / 2$ .....	74
Abbildung 6-4: Anfangsverformung in Randbalkenmitte – Vergleich FEM – analytischer Ansatz	74
Abbildung 6-5: Über- bzw. Unterschätzen der Anfangsverformung .....	75
Abbildung 6-6: Vergleich der numerischen und analytischen Ergebnisse – Ansatz q mit $b_m(f_0)$ ....	75
Abbildung 6-7: Vergleich der numerischen und analytischen Ergebnisse – Ansatz $w_0$ .....	76
Abbildung 6-8: Vergleich für PS010 .....	77
Abbildung 6-9:Vergleich für PS046 .....	77
Abbildung 6-10: Mitwirkende Breite aus $N_{ki}$ für die untersuchten Systeme .....	78
Abbildung 6-11: Vergleich FEM mit angepasstem $b_m$ für Modell PS010 .....	79
Abbildung 6-12: Vergleich FEM mit angepasstem $b_m$ für Modell PS028 .....	79
Abbildung 6-13: Vergleich FEM mit angepasstem $b_m$ für Modell PS046 .....	80
Abbildung 6-14: Mitwirkende Breite aus Vergleichskurven für die untersuchten Systeme .....	80
Abbildung 6-15: Mitwirkende Breiten $b_m$ für verschiedene Scheibenbreiten .....	81
Abbildung 6-16: Vergleich der Spannungen für PS121 ( $a = 0,5$ ) .....	83
Abbildung 6-17: Vergleich der Spannungen für PS111 ( $a = 1$ ) .....	83
Abbildung 6-18: Vergleich der Spannungen für PS116 ( $a = 2$ ) .....	84
Abbildung 7-1: Vergleich linearen und nicht linearen Verhaltens.....	88
Abbildung 8-1: Mögliche Weiterentwicklung .....	98
Abbildung 8-2: Verbindung der Module.....	99
Abbildung 8-3: Gesamtverformung .....	99

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Systemparameter.....	21
Tabelle 3-2: Abgeleitete Systemparameter .....	22
Tabelle 4-1: Vergleichslösungen.....	33
Tabelle 4-2: Vergleich der maximalen Tragfähigkeit nach Art der Lasteinleitung.....	41
Tabelle 4-3: Übersicht zur Parameterstudie .....	47
Tabelle 5-1: Übersicht Versuch RS1H.....	66
Tabelle 5-2: Übersicht Versuch RS1Q.....	68
Tabelle 7-1: Grenzabmaße nach [EN572-2].....	91

# Anhang



---

## Übersicht zum Anhang

<b>A1</b>	<b>Parameterstudie PS0</b> .....	<b>A-5</b>
A1.1	Parameterdefinition und Eingangswerte .....	A-5
A1.2	Parameterdefinition und Ergebniswerte .....	A-7
A1.3	Ergebnisdiagramme.....	A-9
<b>A2</b>	<b>Parameterstudie PS1</b> .....	<b>A-63</b>
A2.1	Parameterdefiniton und Eingangswerte.....	A-63
A2.2	Ergebniswerte.....	A-64
A2.3	Ergebnisdiagramme.....	A-65
<b>A3</b>	<b>Parameterstudie PS2</b> .....	<b>A-86</b>
A3.1	Parameterdefinition und Eingangswerte .....	A-86
A3.2	Ergebniswerte.....	A-86
A3.3	Ergebnisdiagramme.....	A-87
<b>A4</b>	<b>Parameterstudie PS3</b> .....	<b>A-88</b>
A4.1	Parameterdefinition und Eingangswerte .....	A-88
A4.2	Ergebniswerte.....	A-88
A4.3	Ergebnisdiagramme.....	A-89



## A1 Parameterstudie PS0

### A1.1 Parameterdefinition und Eingangswerte

ID	H	a	q	w	s	B	t	I <sub>G</sub>	I <sub>RB</sub>	EI <sub>G</sub>	EI <sub>RB</sub>
	mm	-	kN/m <sup>2</sup>	-	-	mm	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>	Nmm <sup>2</sup>	Nmm <sup>2</sup>
	1500	0,5	0,5	0,02	1						
		1	1	0,01	5						
		2	1,5		10						
PS001	1500	0,5	0,5	0,02	1	750	5,73	11771	3924	8,24E+08	8,24E+08
PS002	1500	0,5	0,5	0,02	5	750	5,73	11771	19618	8,24E+08	4,12E+09
PS003	1500	0,5	0,5	0,02	10	750	5,73	11771	39237	8,24E+08	8,24E+09
PS004	1500	0,5	0,5	0,01	1	750	7,22	23542	7847	1,65E+09	1,65E+09
PS005	1500	0,5	0,5	0,01	5	750	7,22	23542	39237	1,65E+09	8,24E+09
PS006	1500	0,5	0,5	0,01	10	750	7,22	23542	78474	1,65E+09	1,65E+10
PS007	1500	0,5	1	0,02	1	750	7,22	23542	7847	1,65E+09	1,65E+09
PS008	1500	0,5	1	0,02	5	750	7,22	23542	39237	1,65E+09	8,24E+09
PS009	1500	0,5	1	0,02	10	750	7,22	23542	78474	1,65E+09	1,65E+10
PS010	1500	0,5	1	0,01	1	750	9,10	47084	15695	3,3E+09	3,3E+09
PS011	1500	0,5	1	0,01	5	750	9,10	47084	78474	3,3E+09	1,65E+10
PS012	1500	0,5	1	0,01	10	750	9,10	47084	156948	3,3E+09	3,3E+10
PS013	1500	0,5	1,5	0,02	1	750	8,27	35313	11771	2,47E+09	2,47E+09
PS014	1500	0,5	1,5	0,02	5	750	8,27	35313	58855	2,47E+09	1,24E+10
PS015	1500	0,5	1,5	0,02	10	750	8,27	35313	117711	2,47E+09	2,47E+10
PS016	1500	0,5	1,5	0,01	1	750	10,42	70626	23542	4,94E+09	4,94E+09
PS017	1500	0,5	1,5	0,01	5	750	10,42	70626	117711	4,94E+09	2,47E+10
PS018	1500	0,5	1,5	0,01	10	750	10,42	70626	235421	4,94E+09	4,94E+10
PS019	1500	1	0,5	0,02	1	1500	5,73	23542	7847	1,65E+09	1,65E+09
PS020	1500	1	0,5	0,02	5	1500	5,73	23542	39237	1,65E+09	8,24E+09
PS021	1500	1	0,5	0,02	10	1500	5,73	23542	78474	1,65E+09	1,65E+10
PS022	1500	1	0,5	0,01	1	1500	7,22	47084	15695	3,3E+09	3,3E+09
PS023	1500	1	0,5	0,01	5	1500	7,22	47084	78474	3,3E+09	1,65E+10
PS024	1500	1	0,5	0,01	10	1500	7,22	47084	156948	3,3E+09	3,3E+10
PS025	1500	1	1	0,02	1	1500	7,22	47084	15695	3,3E+09	3,3E+09
PS026	1500	1	1	0,02	5	1500	7,22	47084	78474	3,3E+09	1,65E+10
PS027	1500	1	1	0,02	10	1500	7,22	47084	156948	3,3E+09	3,3E+10
PS028	1500	1	1	0,01	1	1500	9,10	94169	31390	6,59E+09	6,59E+09
PS029	1500	1	1	0,01	5	1500	9,10	94169	156948	6,59E+09	3,3E+10
PS030	1500	1	1	0,01	10	1500	9,10	94169	313895	6,59E+09	6,59E+10
PS031	1500	1	1,5	0,02	1	1500	8,27	70626	23542	4,94E+09	4,94E+09

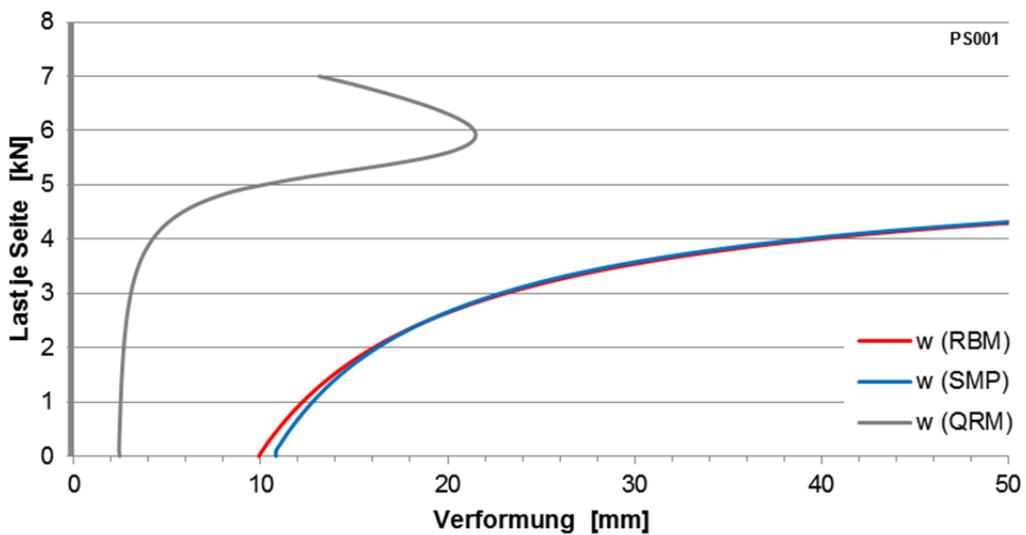
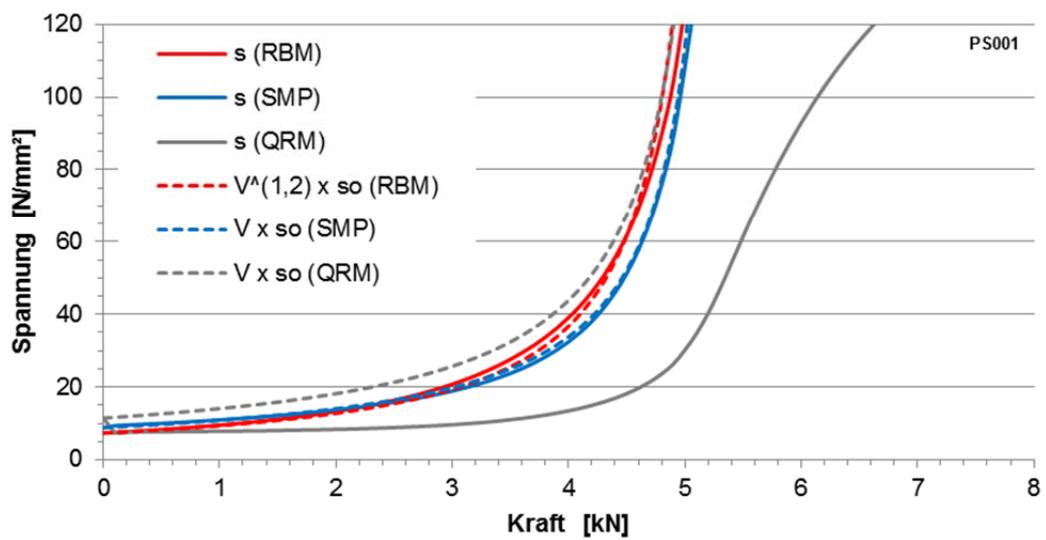
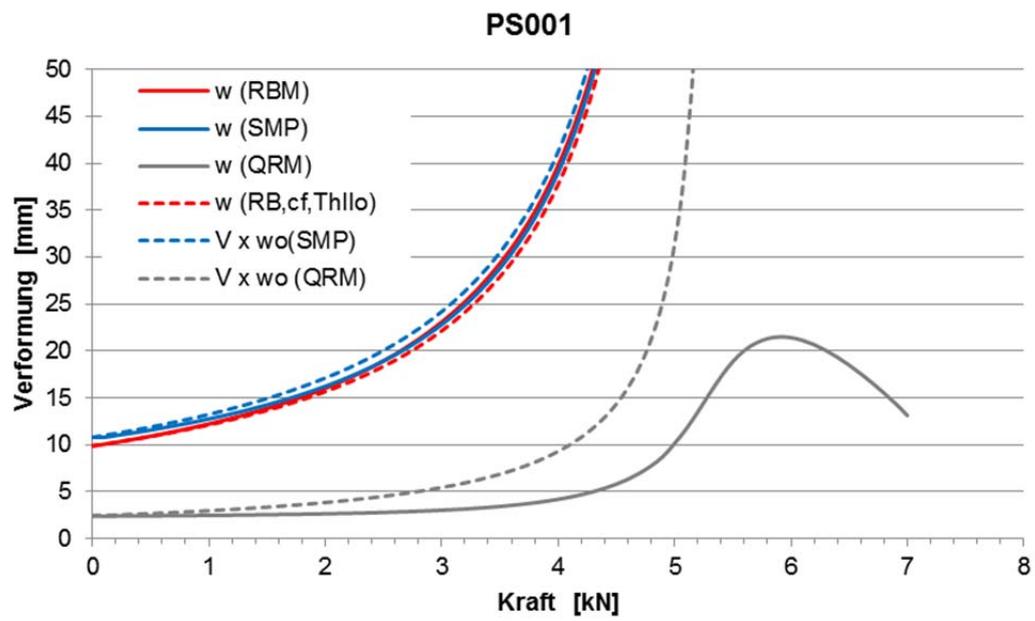
PS032	1500	1	1,5	0,02	5	1500	8,27	70626	117711	4,94E+09	2,47E+10
PS033	1500	1	1,5	0,02	10	1500	8,27	70626	235421	4,94E+09	4,94E+10
PS034	1500	1	1,5	0,01	1	1500	10,42	141253	47084	9,89E+09	9,89E+09
PS035	1500	1	1,5	0,01	5	1500	10,42	141253	235421	9,89E+09	4,94E+10
PS036	1500	1	1,5	0,01	10	1500	10,42	141253	470843	9,89E+09	9,89E+10
PS037	1500	2	0,5	0,02	1	3000	11,46	376674	125558	2,64E+10	2,64E+10
PS038	1500	2	0,5	0,02	5	3000	11,46	376674	627790	2,64E+10	1,32E+11
PS039	1500	2	0,5	0,02	10	3000	11,46	376674	1255580	2,64E+10	2,64E+11
PS040	1500	2	0,5	0,01	1	3000	14,44	753348	251116	5,27E+10	5,27E+10
PS041	1500	2	0,5	0,01	5	3000	14,44	753348	1255580	5,27E+10	2,64E+11
PS042	1500	2	0,5	0,01	10	3000	14,44	753348	2511161	5,27E+10	5,27E+11
PS043	1500	2	1	0,02	1	3000	14,44	753348	251116	5,27E+10	5,27E+10
PS044	1500	2	1	0,02	5	3000	14,44	753348	1255580	5,27E+10	2,64E+11
PS045	1500	2	1	0,02	10	3000	14,44	753348	2511161	5,27E+10	5,27E+11
PS046	1500	2	1	0,01	1	3000	18,20	1506696	502232	1,05E+11	1,05E+11
PS047	1500	2	1	0,01	5	3000	18,20	1506696	2511161	1,05E+11	5,27E+11
PS048	1500	2	1	0,01	10	3000	18,20	1506696	5022321	1,05E+11	1,05E+12
PS049	1500	2	1,5	0,02	1	3000	16,53	1130022	376674	7,91E+10	7,91E+10
PS050	1500	2	1,5	0,02	5	3000	16,53	1130022	1883371	7,91E+10	3,96E+11
PS051	1500	2	1,5	0,02	10	3000	16,53	1130022	3766741	7,91E+10	7,91E+11
PS052	1500	2	1,5	0,01	1	3000	20,83	2260045	753348	1,58E+11	1,58E+11
PS053	1500	2	1,5	0,01	5	3000	20,83	2260045	3766741	1,58E+11	7,91E+11
PS054	1500	2	1,5	0,01	10	3000	20,83	2260045	7533482	1,58E+11	1,58E+12

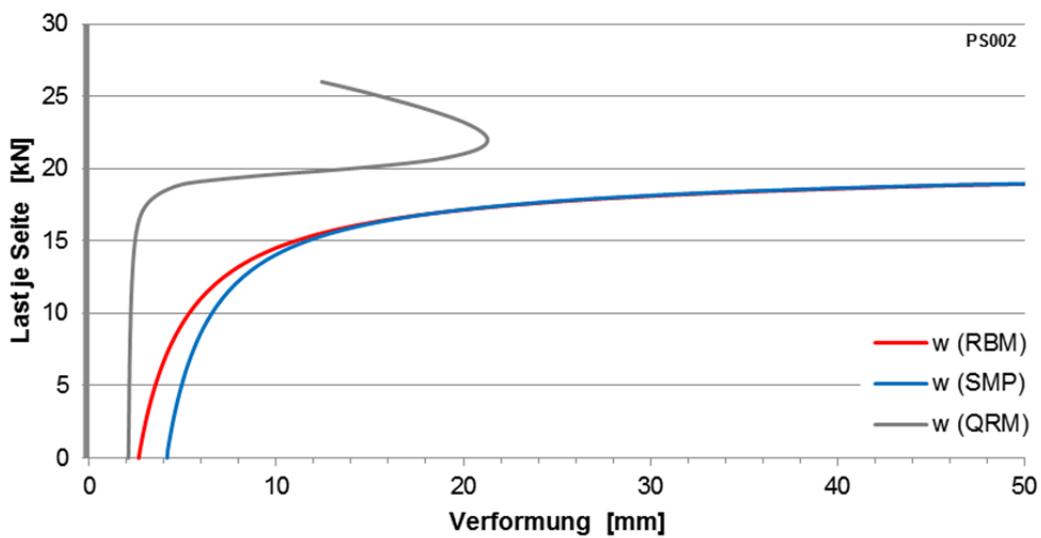
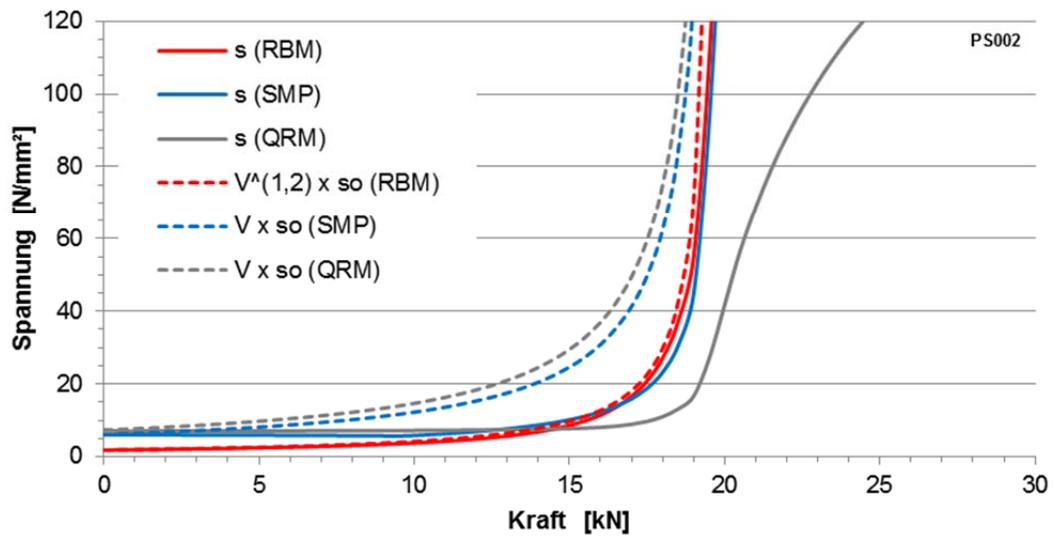
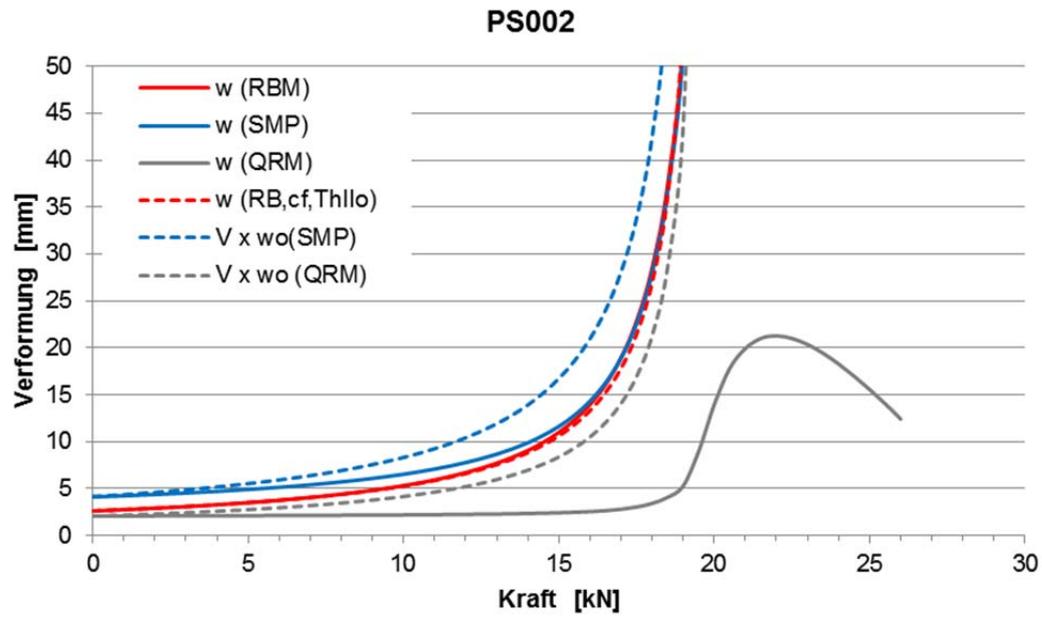
## A1.2 Parameterdefinition und Ergebniswerte

ID	H	a	q	w	s	N <sub>ki, FEM</sub>	b <sub>m, FEM</sub>	b <sub>m, cf</sub>	N <sub>ki, cf</sub>	b <sub>m, FEM/B</sub>	b <sub>m, cf/B</sub>
	mm	-	kN/m <sup>2</sup>	-	-	kN	mm	mm	kN	-	-
	1500	0,5	0,5	0,02	1						
		1	1	0,01	5						
		2	1,5		10						
PS001	1500	0,5	0,5	0,02	1	5,8	443	375	5,4	0,59	0,500
PS002	1500	0,5	0,5	0,02	5	20,2	446	390	20,0	0,59	0,520
PS003	1500	0,5	0,5	0,02	10	38,3	441	380	38,0	0,59	0,507
PS004	1500	0,5	0,5	0,01	1	11,0	391	375	10,8	0,52	0,500
PS005	1500	0,5	0,5	0,01	5	39,9	390	380	39,8	0,52	0,507
PS006	1500	0,5	0,5	0,01	10	75,9	375	390	76,0	0,50	0,520
PS007	1500	0,5	1	0,02	1	11,0	391	370	10,8	0,52	0,493
PS008	1500	0,5	1	0,02	5	39,9	390	360	39,6	0,52	0,480
PS009	1500	0,5	1	0,02	10	75,9	375	365	75,8	0,50	0,487
PS010	1500	0,5	1	0,01	1	21,5	366	365	21,5	0,49	0,487
PS011	1500	0,5	1	0,01	5	83,7	589	375	79,5	0,79	0,500
PS012	1500	0,5	1	0,01	10	155,2	551	370	151,7	0,73	0,493
PS013	1500	0,5	1,5	0,02	1	16,3	375	370	16,2	0,50	0,493
PS014	1500	0,5	1,5	0,02	5	60,1	404	365	59,5	0,54	0,487
PS015	1500	0,5	1,5	0,02	10	117,9	655	370	113,8	0,87	0,493
PS016	1500	0,5	1,5	0,01	1	32,0	357	360	32,1	0,48	0,480
PS017	1500	0,5	1,5	0,01	5	122,8	497	365	119,0	0,66	0,487
PS018	1500	0,5	1,5	0,01	10	229,5	435	375	227,7	0,58	0,500
PS019	1500	1	0,5	0,02	1	10,2	626	550	9,9	0,42	0,367
PS020	1500	1	0,5	0,02	5	39,2	624	570	38,9	0,42	0,380
PS021	1500	1	0,5	0,02	10	75,2	594	590	75,1	0,40	0,393
PS022	1500	1	0,5	0,01	1	20,0	574	540	19,7	0,38	0,360
PS023	1500	1	0,5	0,01	5	77,7	556	560	77,7	0,37	0,373
PS024	1500	1	0,5	0,01	10	153,7	947	565	150,0	0,63	0,377
PS025	1500	1	1	0,02	1	20,0	574	540	19,7	0,38	0,360
PS026	1500	1	1	0,02	5	77,7	556	570	77,8	0,37	0,380
PS027	1500	1	1	0,02	10	149,7	532	600	150,4	0,35	0,400
PS028	1500	1	1	0,01	1	40,0	573	550	39,5	0,38	0,367
PS029	1500	1	1	0,01	5	158,7	733	550	155,2	0,49	0,367
PS030	1500	1	1	0,01	10	300,1	568	565	300,0	0,38	0,377
PS031	1500	1	1,5	0,02	1	29,7	557	550	29,6	0,37	0,367
PS032	1500	1	1,5	0,02	5	117,5	629	590	117,0	0,42	0,393
PS033	1500	1	1,5	0,02	10	224,2	508	600	225,5	0,34	0,400

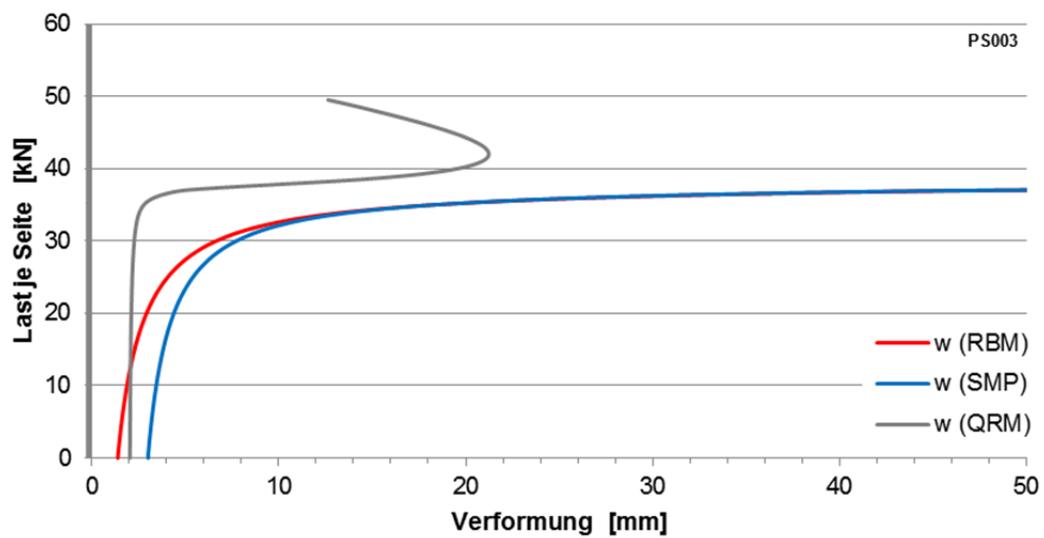
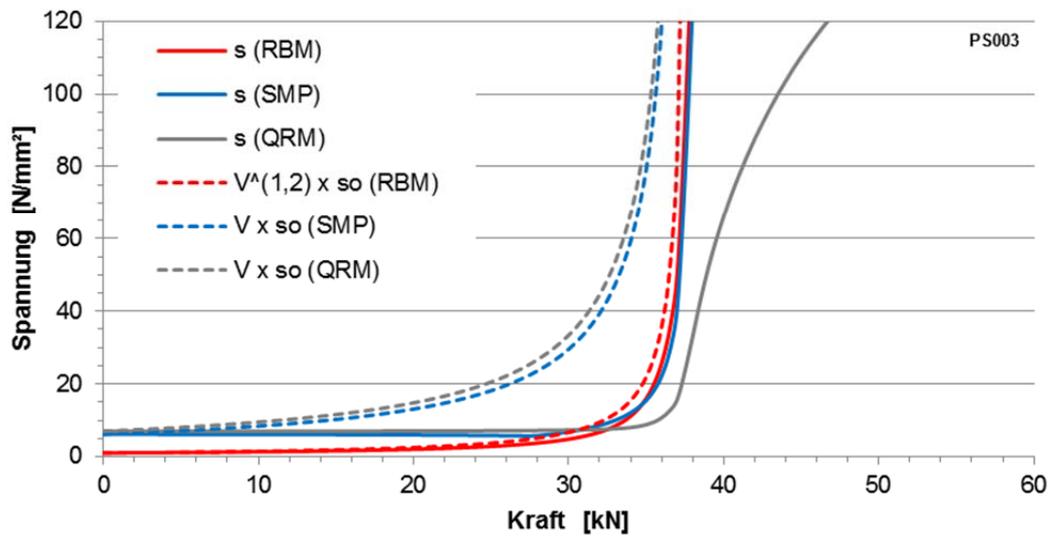
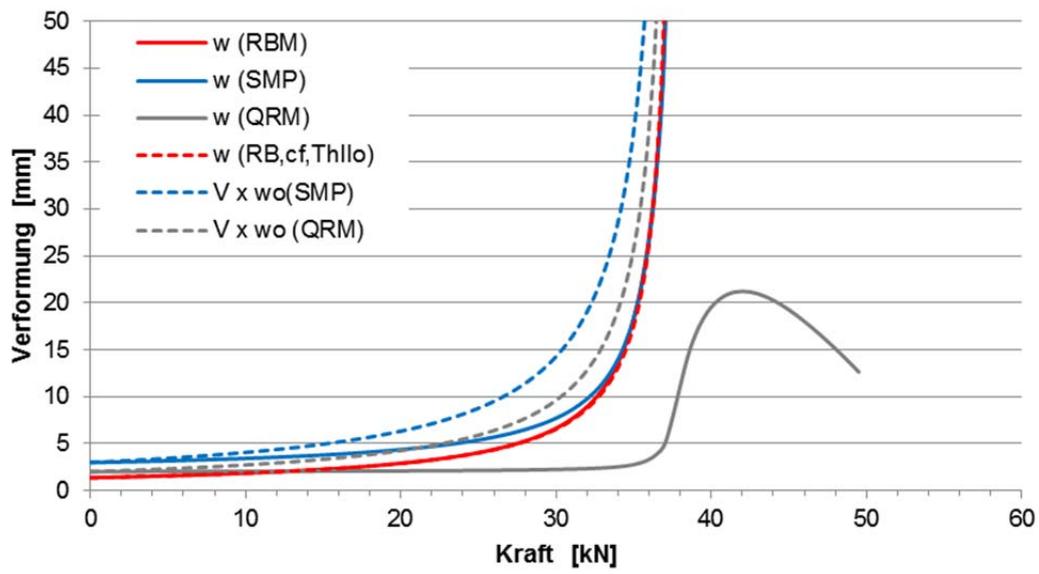
PS034	1500	1	1,5	0,01	1	60,9	607	540	59,0	0,40	0,360
PS035	1500	1	1,5	0,01	5	230,7	479	550	232,8	0,32	0,367
PS036	1500	1	1,5	0,01	10	444,3	364	550	449,6	0,24	0,367
PS037	1500	2	0,5	0,02	1	139,6	621	650	140,7	0,21	0,217
PS038	1500	2	0,5	0,02	5	602,8	636	650	603,4	0,21	0,217
PS039	1500	2	0,5	0,02	10	1176,6	519	700	1183,6	0,17	0,233
PS040	1500	2	0,5	0,01	1	278,6	613	640	280,7	0,20	0,213
PS041	1500	2	0,5	0,01	5	1198,5	543	660	1207,5	0,18	0,220
PS042	1500	2	0,5	0,01	10	2335,0	283	650	2363,3	0,09	0,217
PS043	1500	2	1	0,02	1	278,6	613	650	281,4	0,20	0,217
PS044	1500	2	1	0,02	5	1198,5	543	650	1206,7	0,18	0,217
PS045	1500	2	1	0,02	10	2335,0	283	650	2363,3	0,09	0,217
PS046	1500	2	1	0,01	1	556,0	605	630	559,8	0,20	0,210
PS047	1500	2	1	0,01	5	2381,5	443	645	2412,7	0,15	0,215
PS048	1500	2	1	0,01	10	4612,0	-93	640	4725,1	-0,03	0,213
PS049	1500	2	1,5	0,02	1	417,8	612	650	422,2	0,20	0,217
PS050	1500	2	1,5	0,02	5	1792,0	494	665	1811,8	0,16	0,222
PS051	1500	2	1,5	0,02	10	3481,0	97	650	3545,0	0,03	0,217
PS052	1500	2	1,5	0,01	1	833,0	601	630	839,7	0,20	0,210
PS053	1500	2	1,5	0,01	5	3550,0	347	650	3620,1	0,12	0,217
PS054	1500	2	1,5	0,01	10	6832,0	-465	650	7089,9	-0,16	0,217

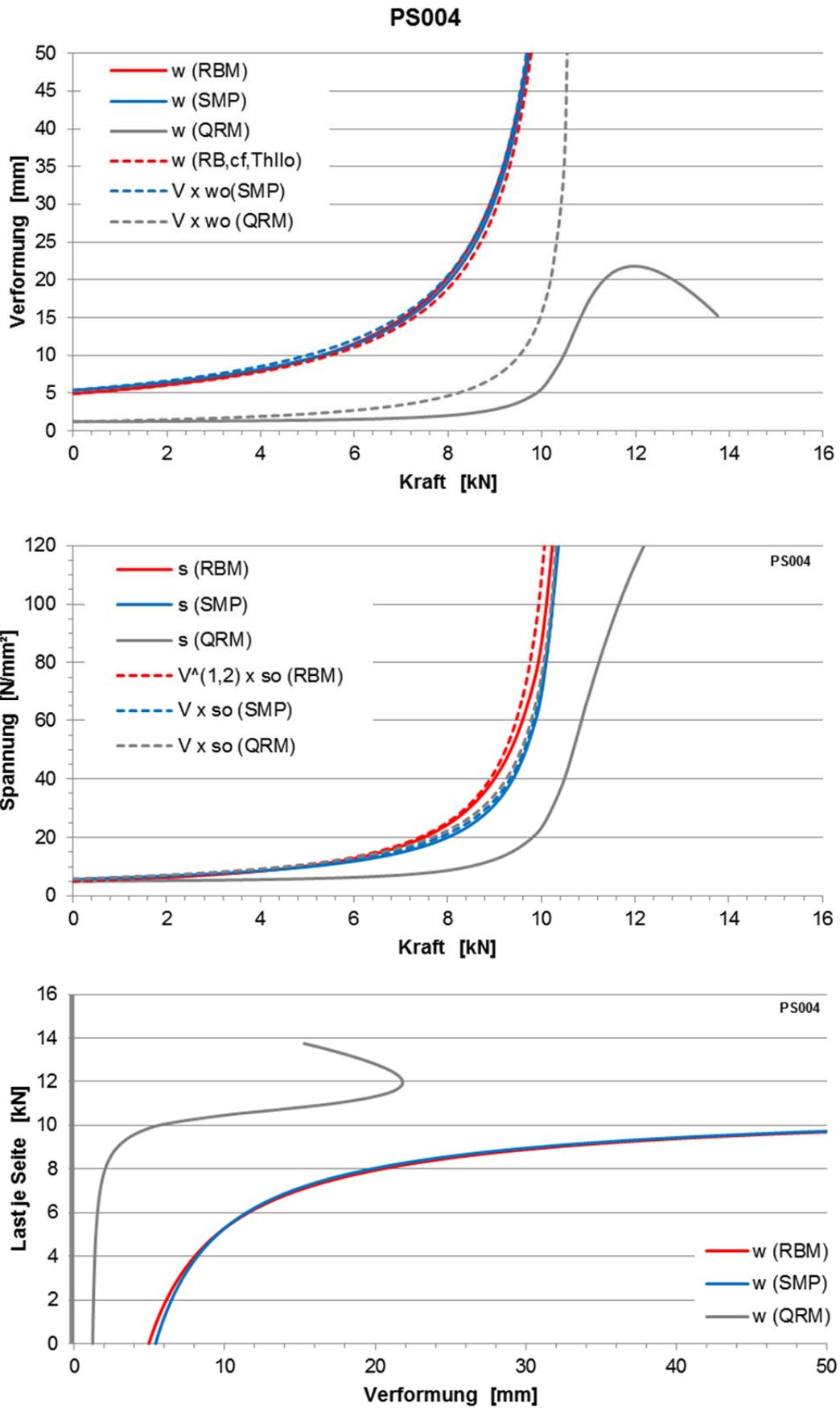
A1.3 Ergebnisdiagramme



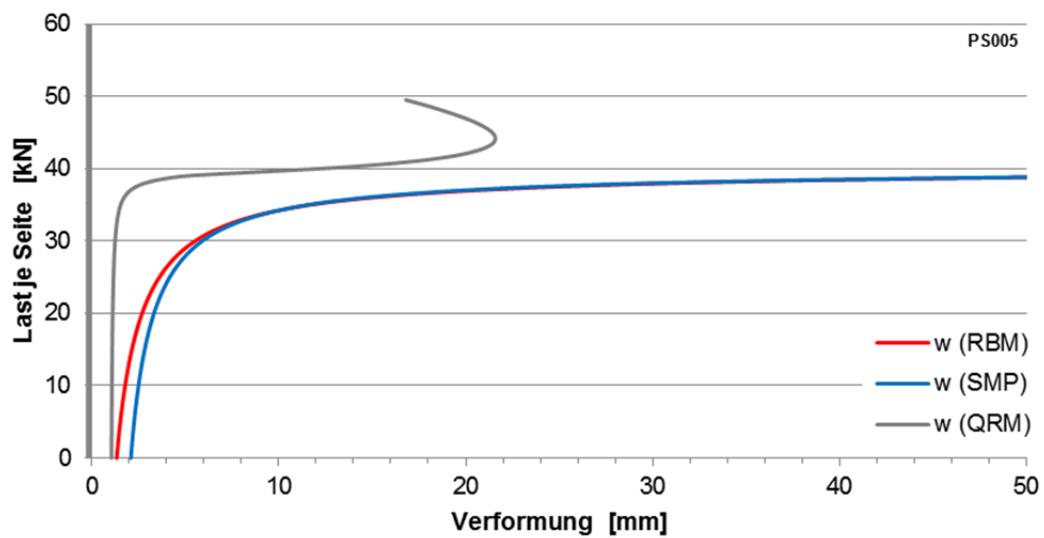
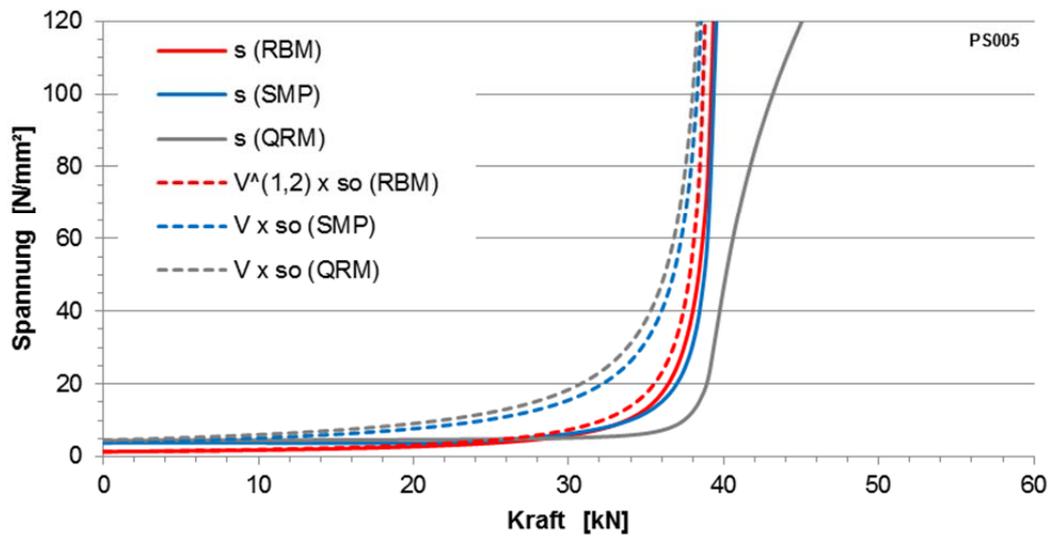
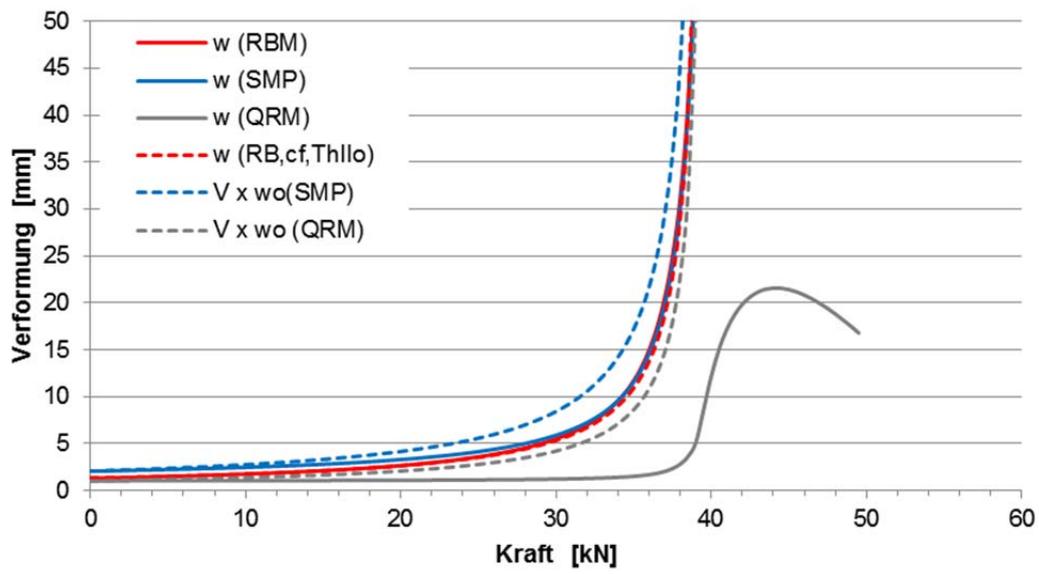


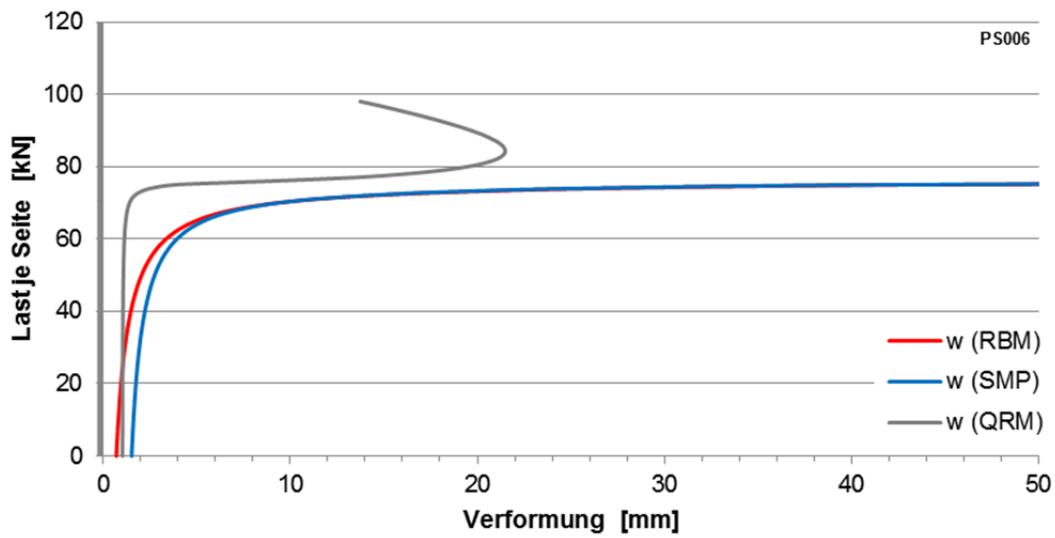
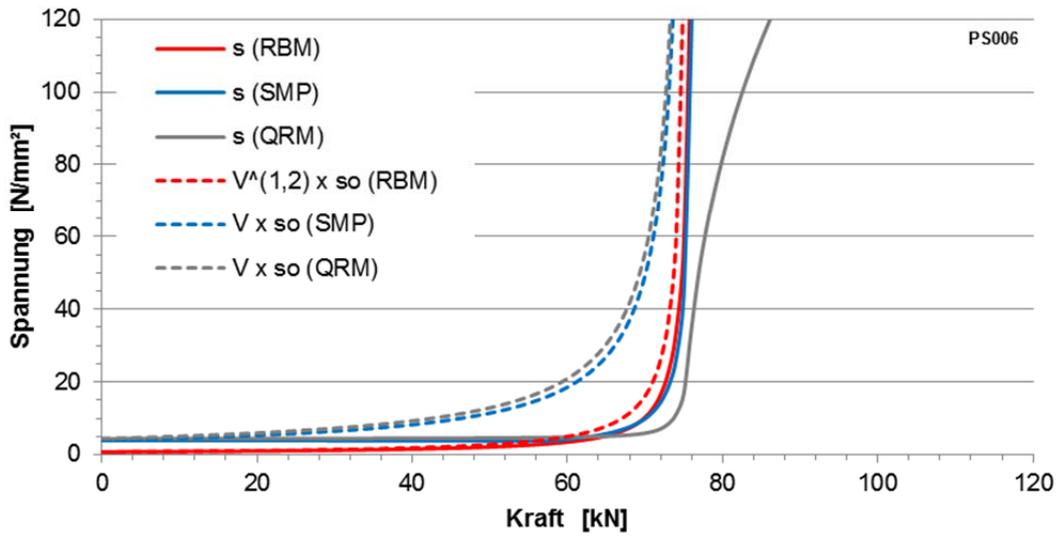
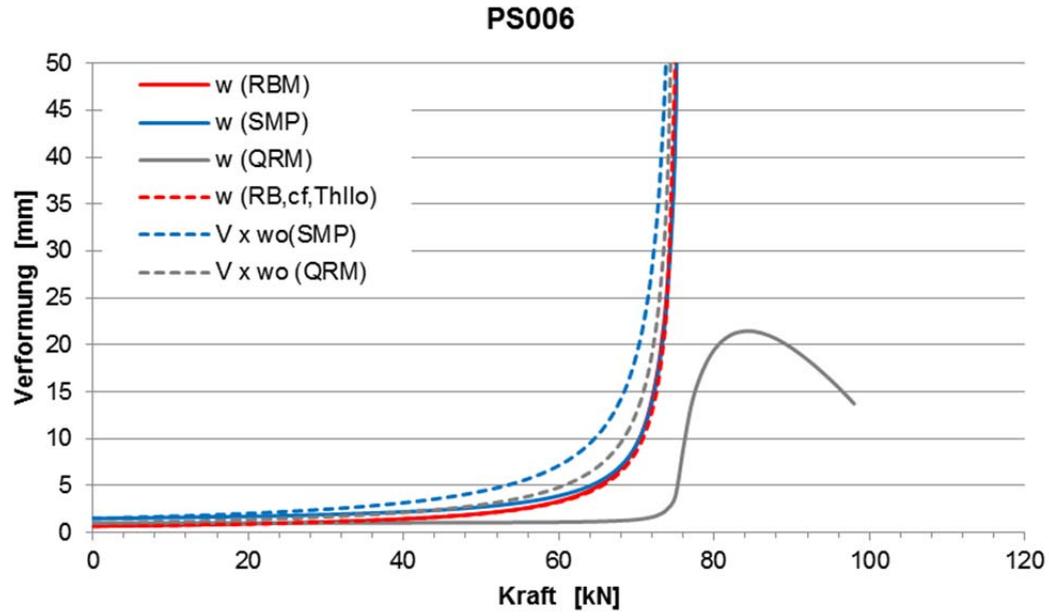
PS003

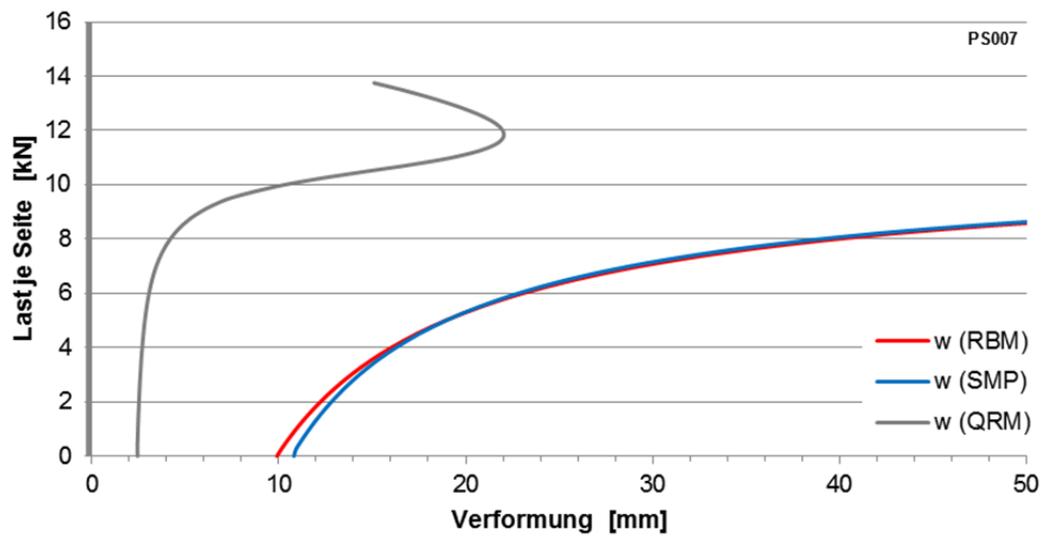
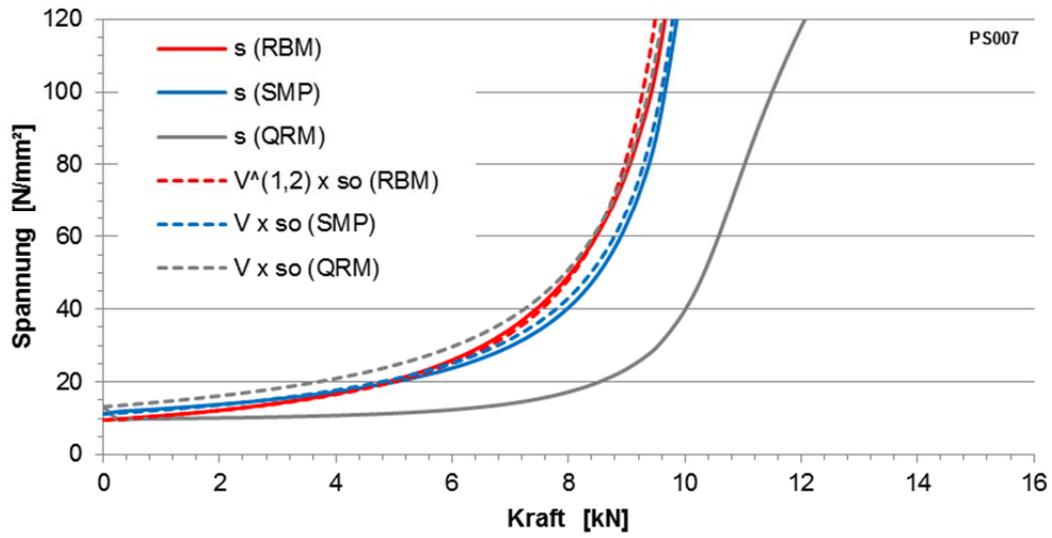
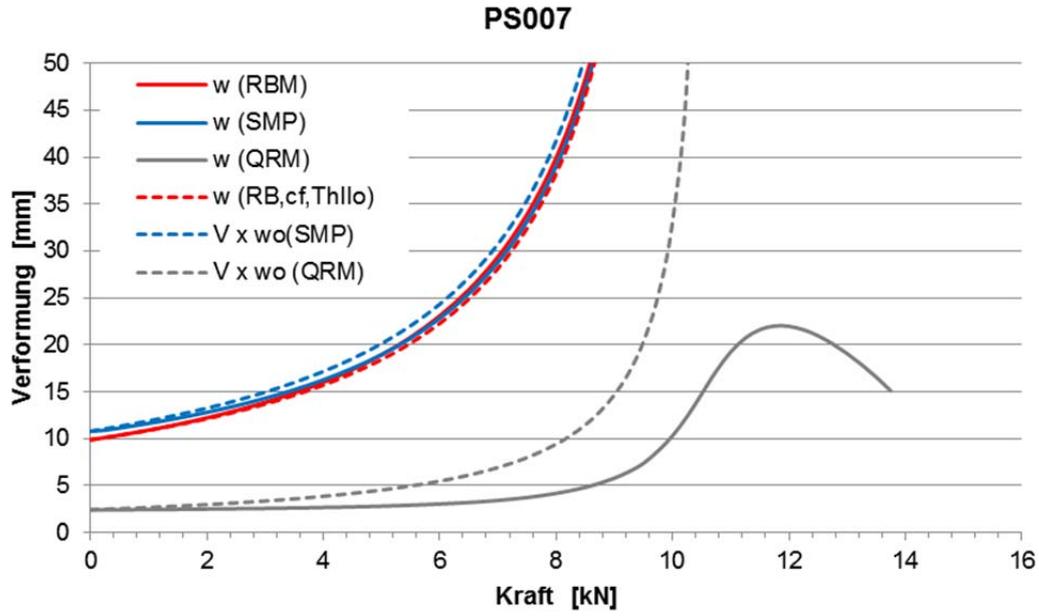


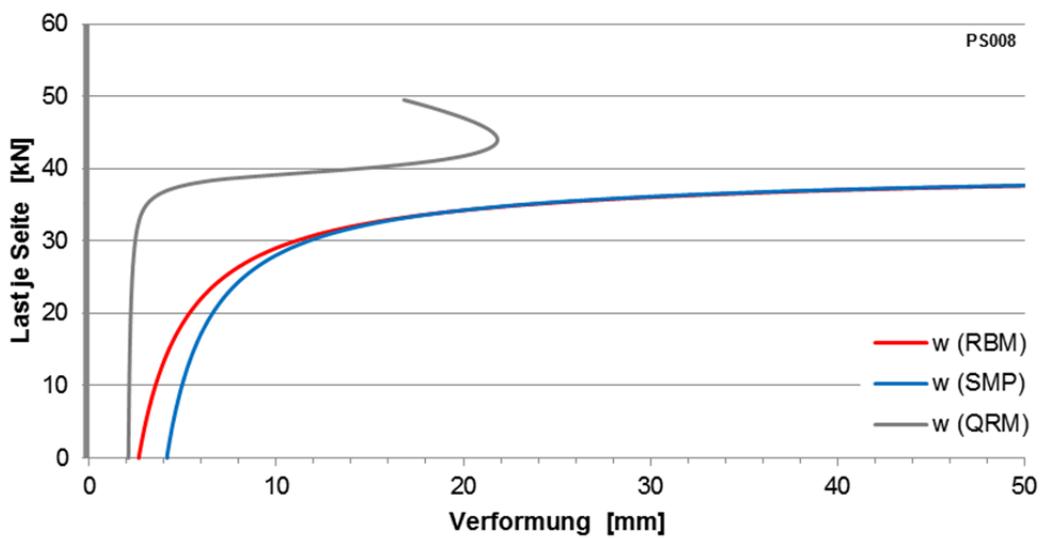
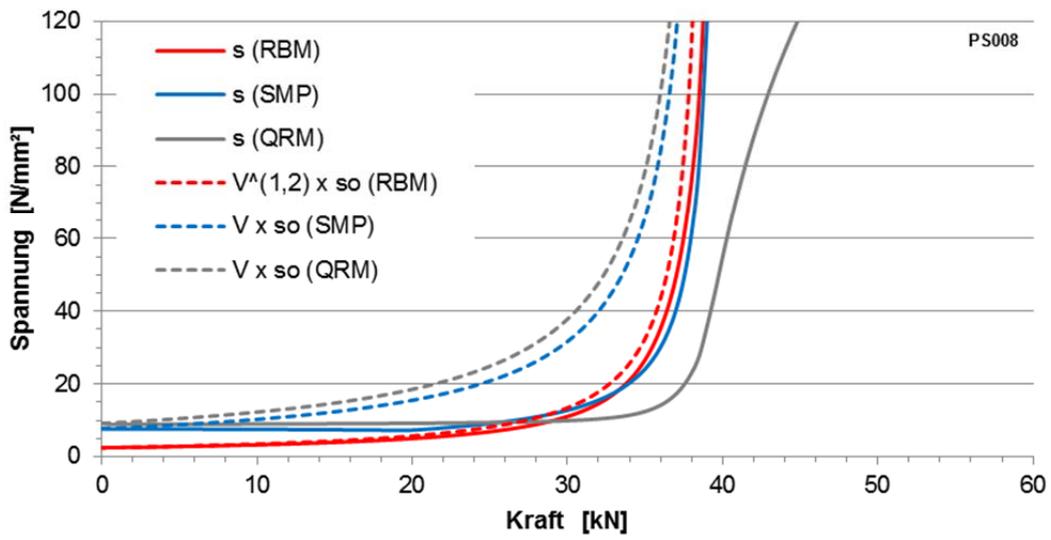
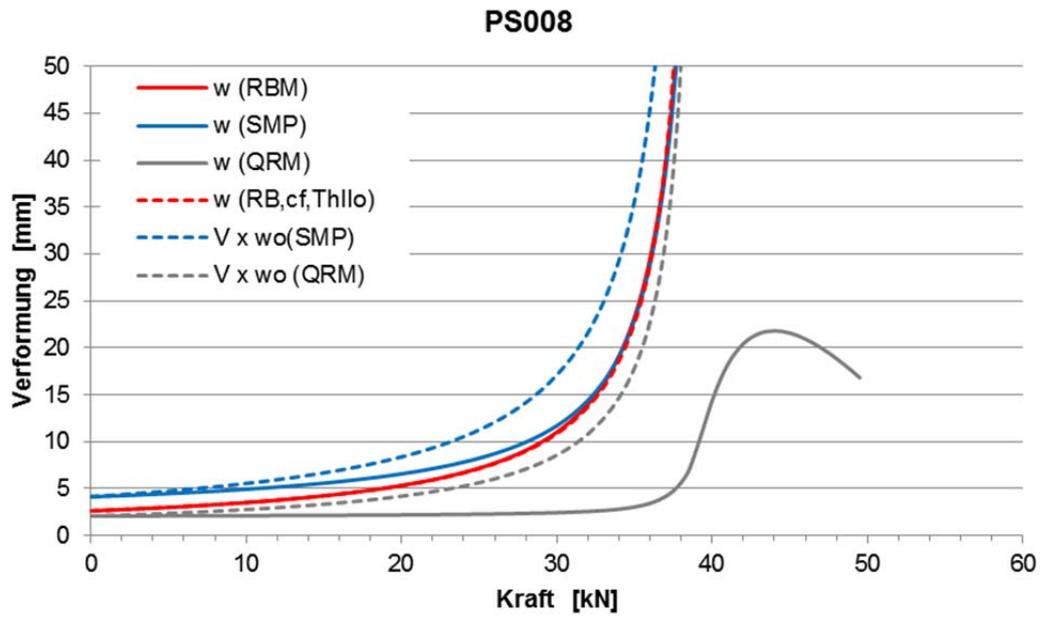


PS005

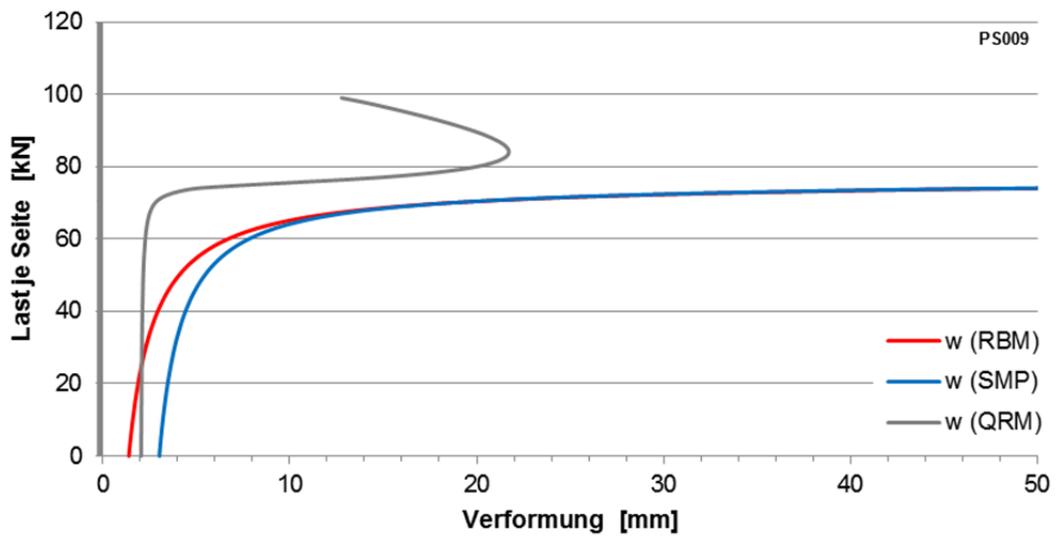
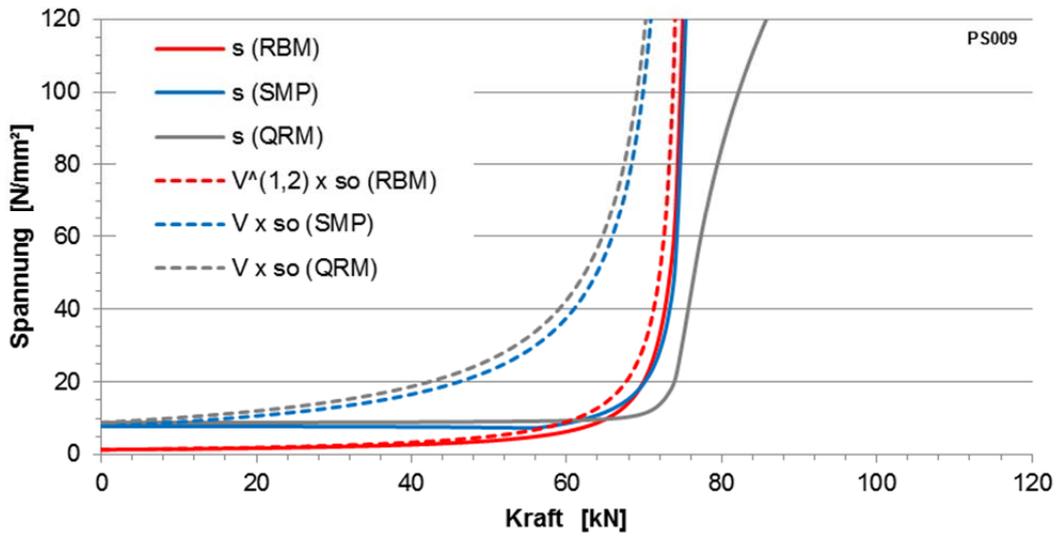
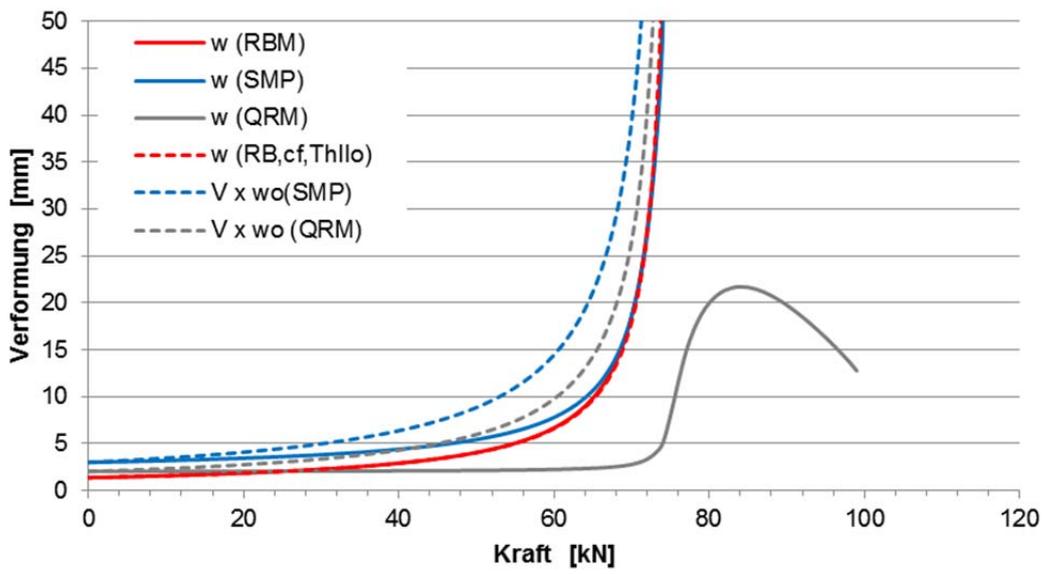


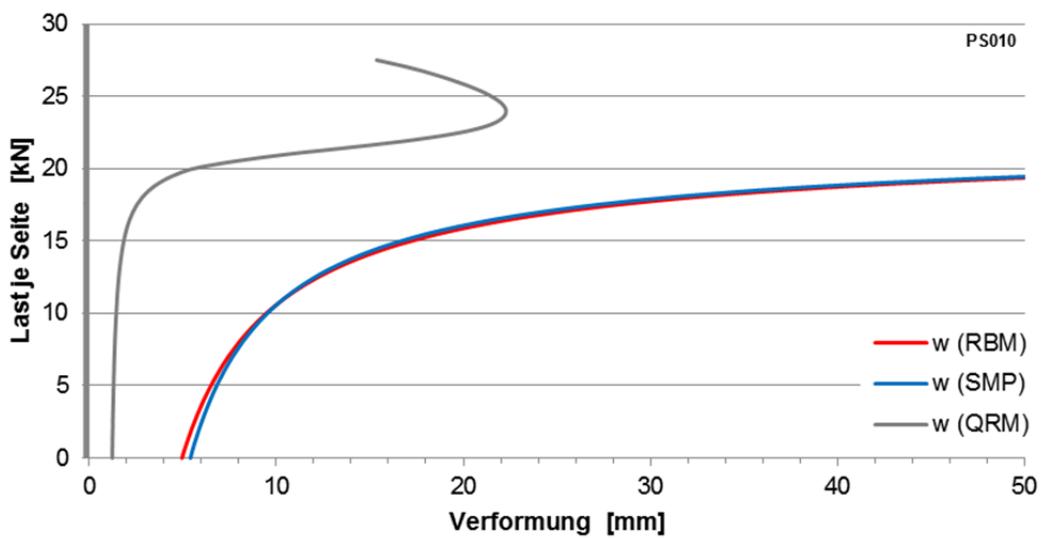
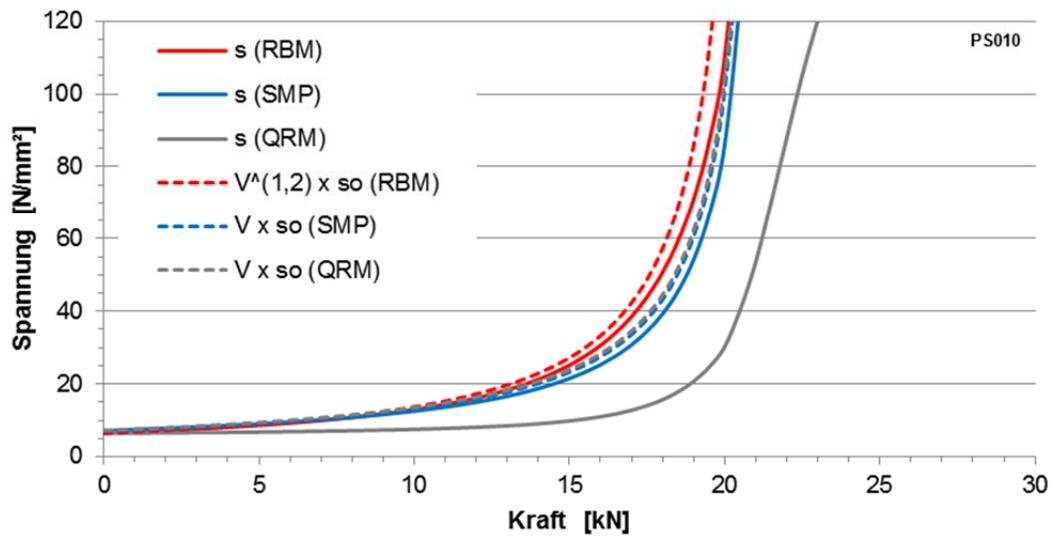
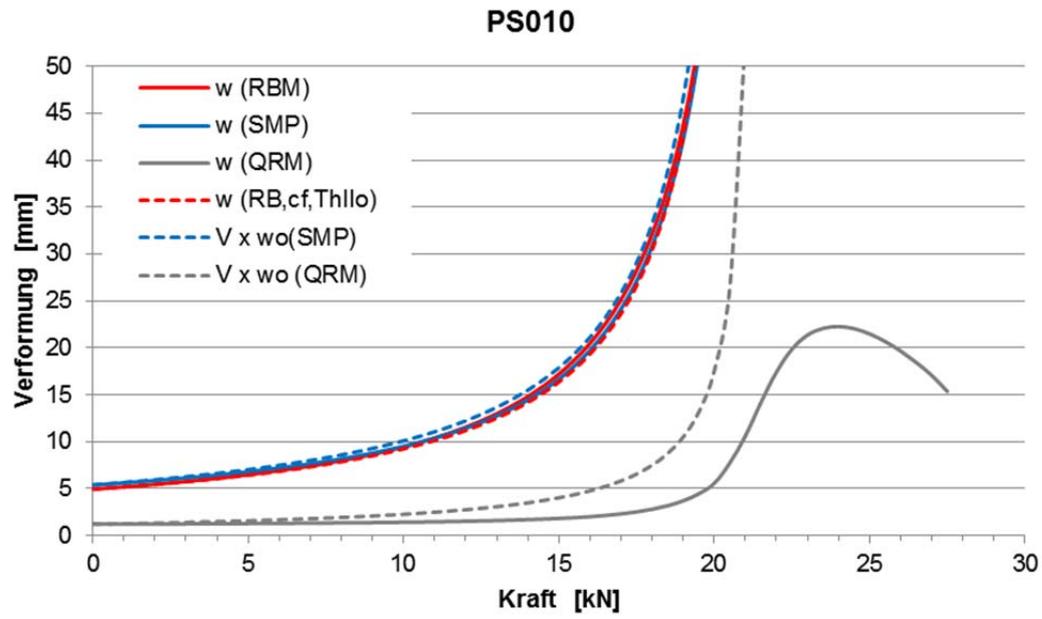




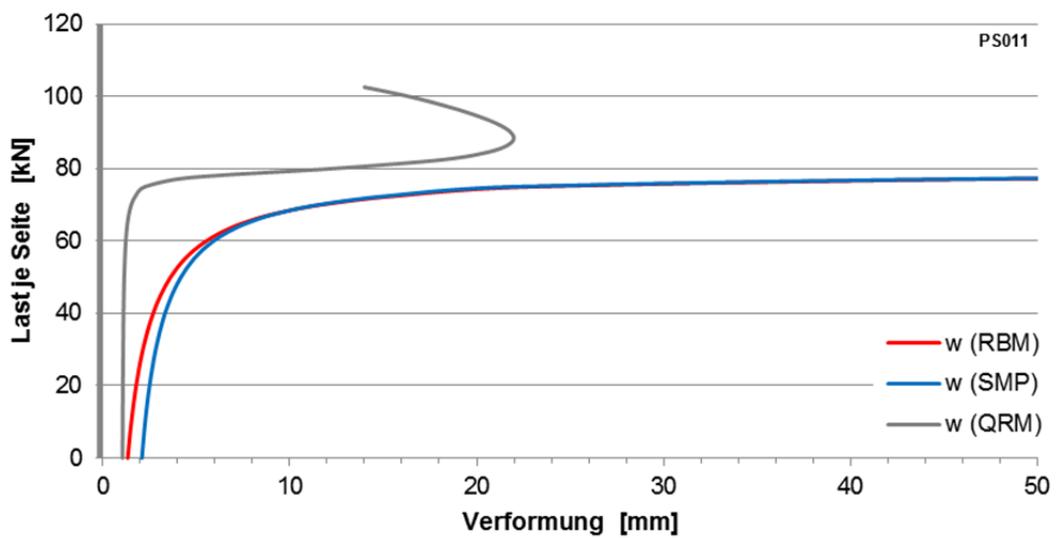
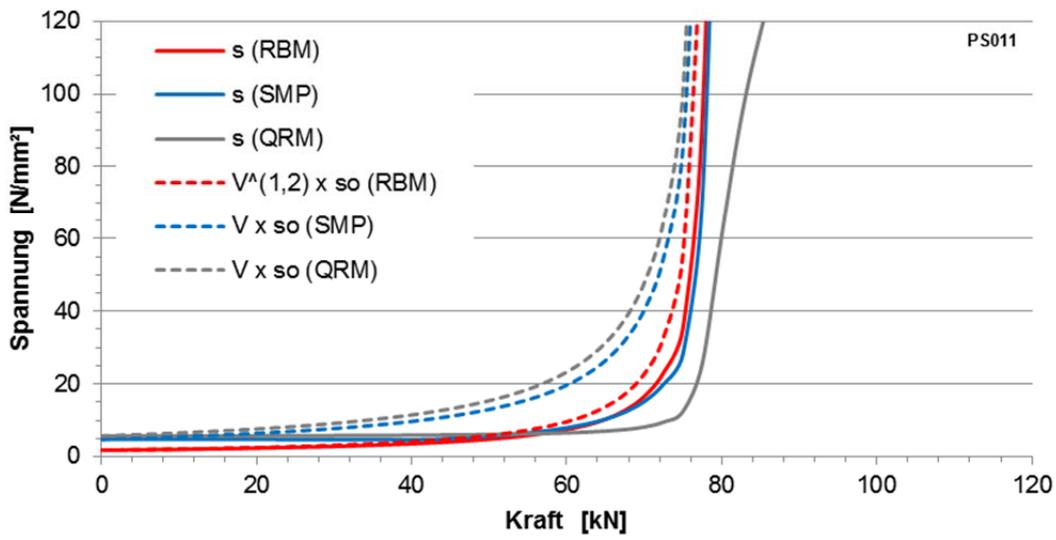
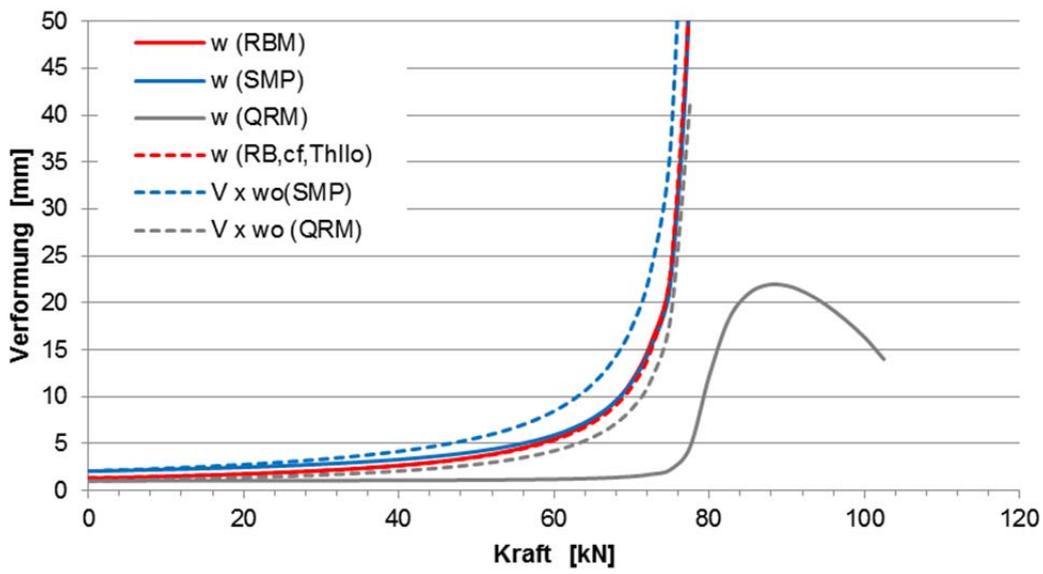


PS009

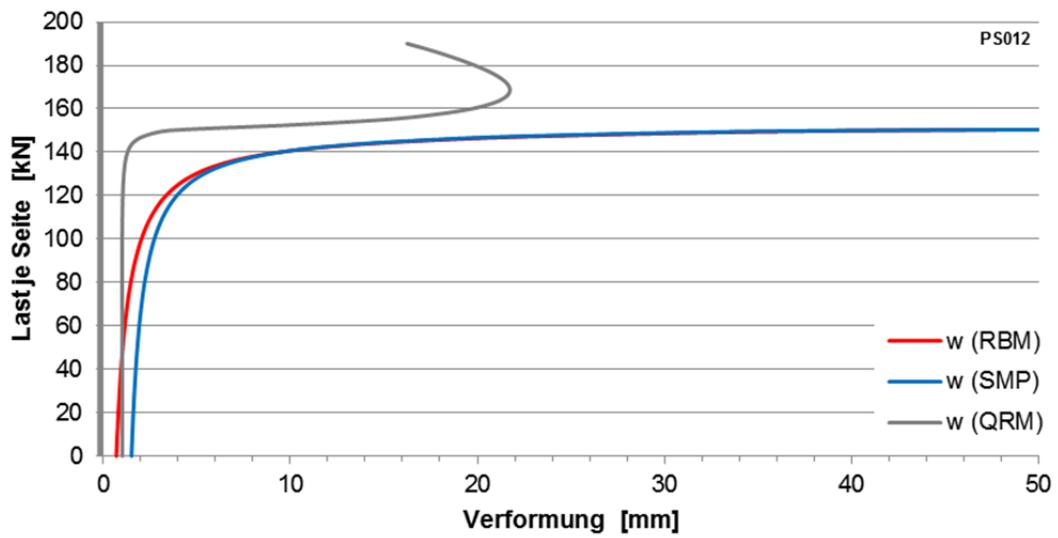
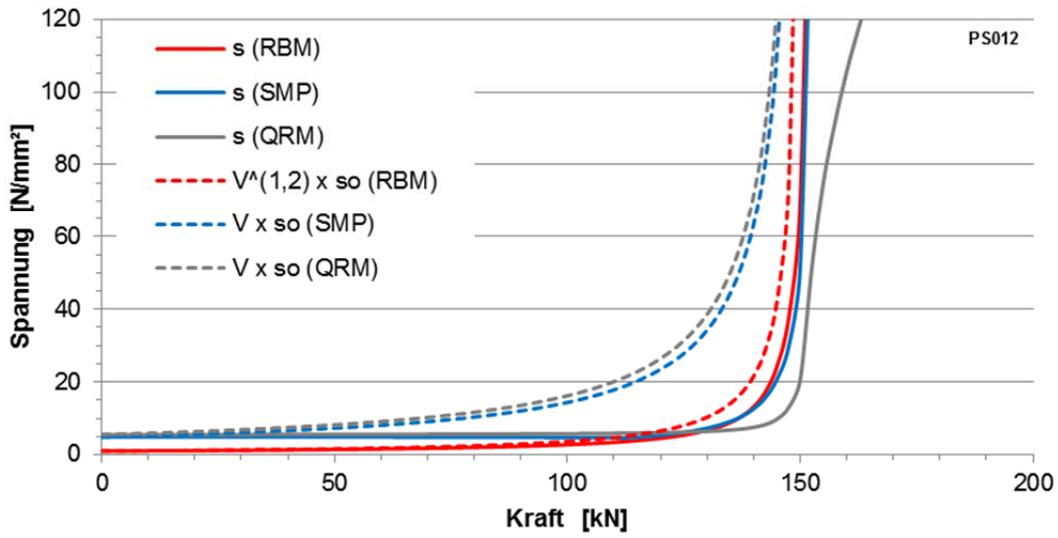
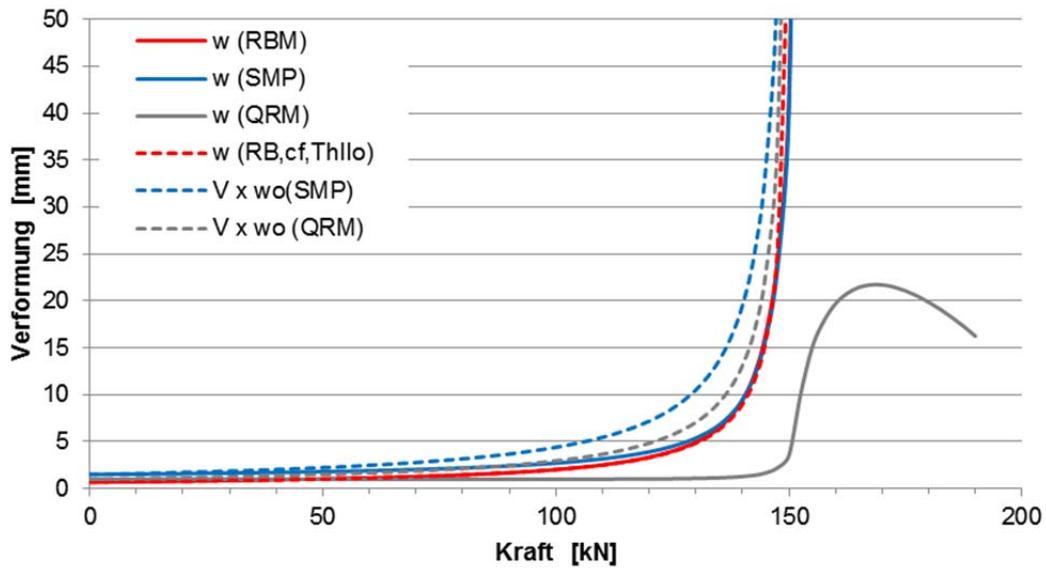


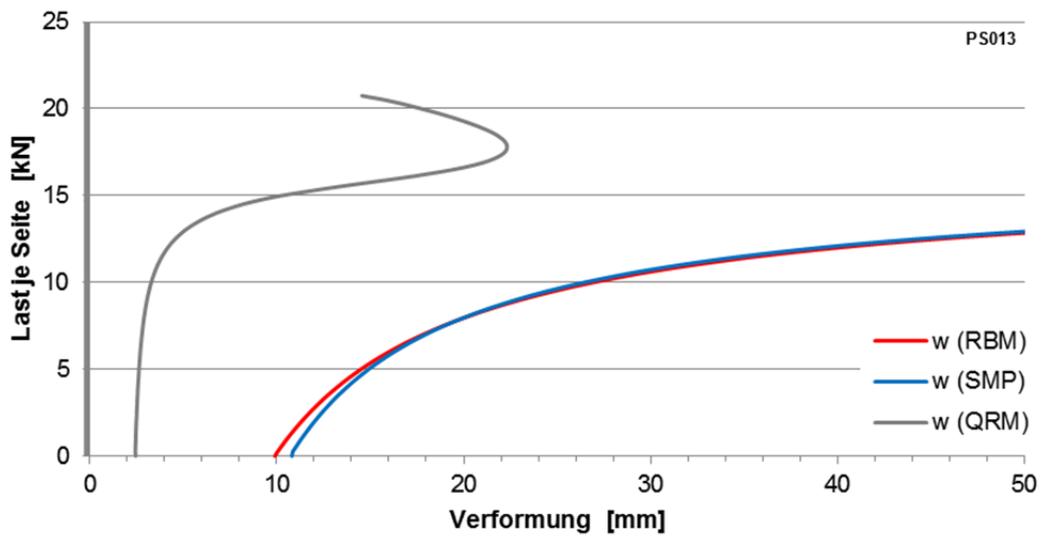
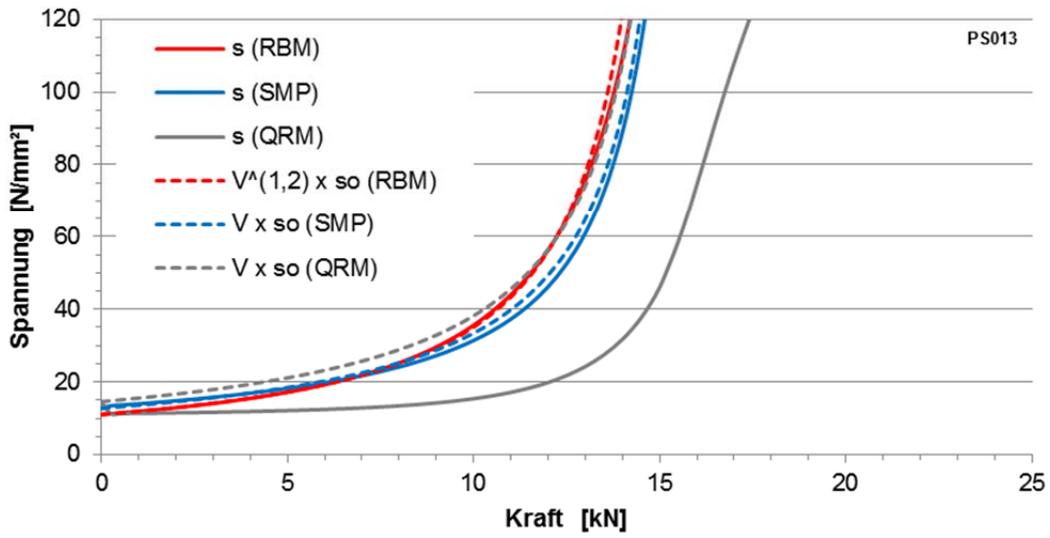
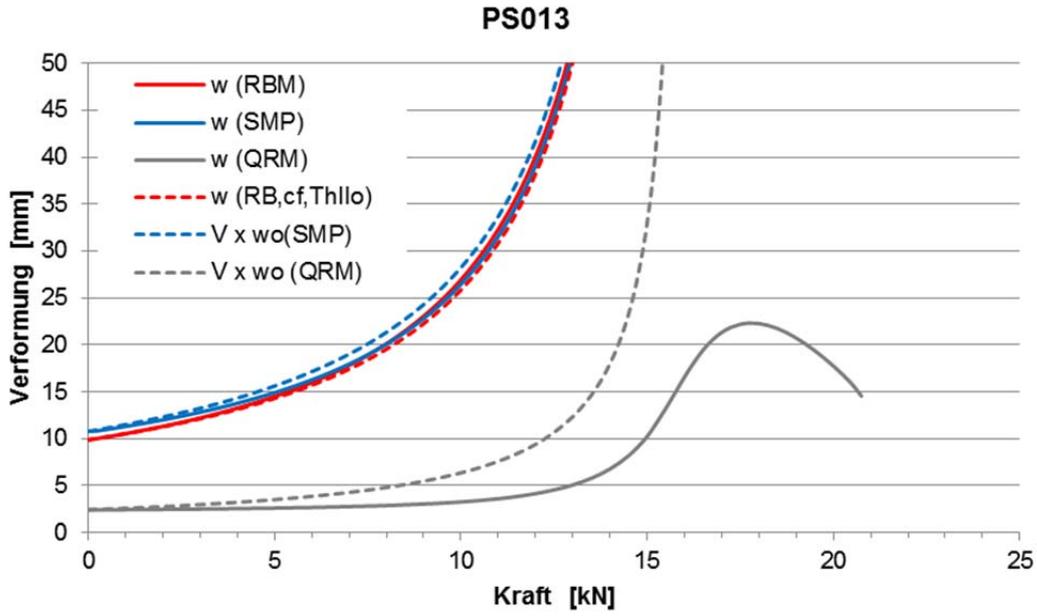


PS011

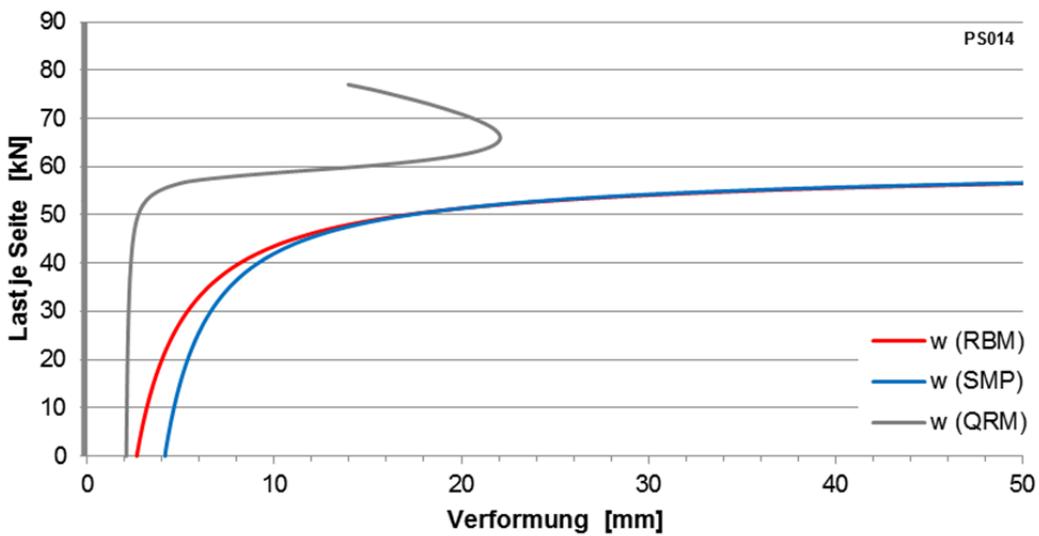
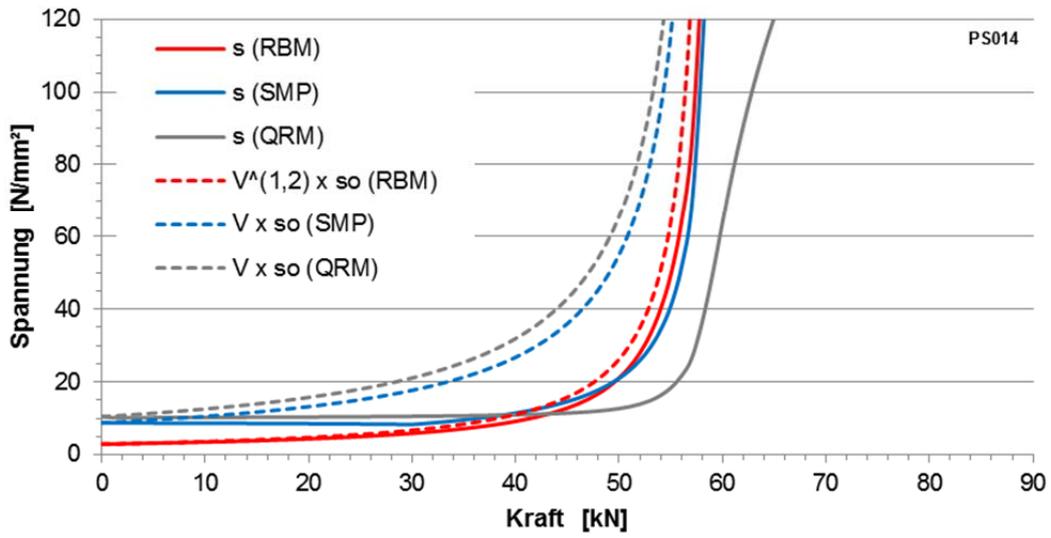
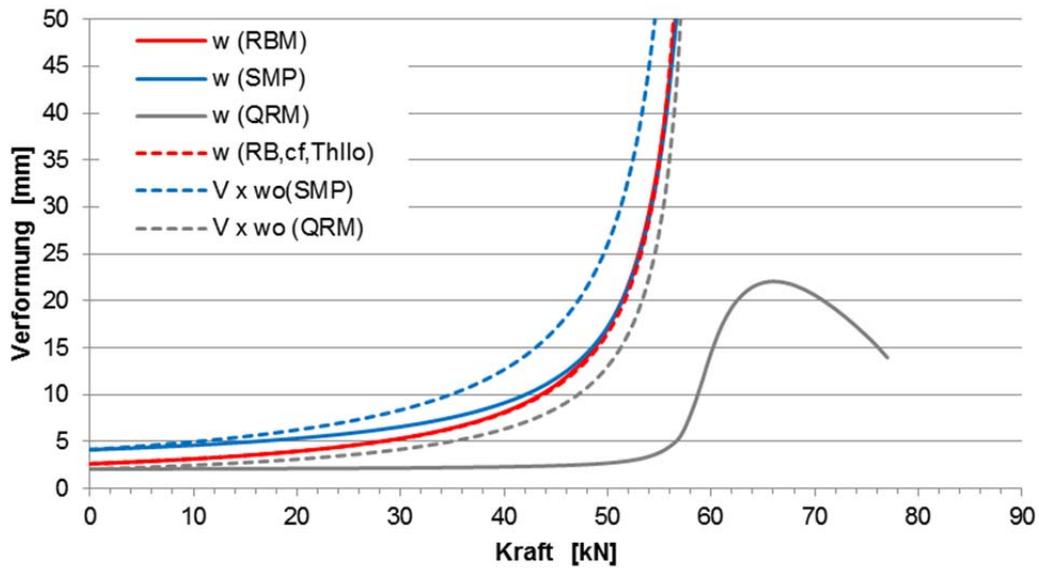


PS012

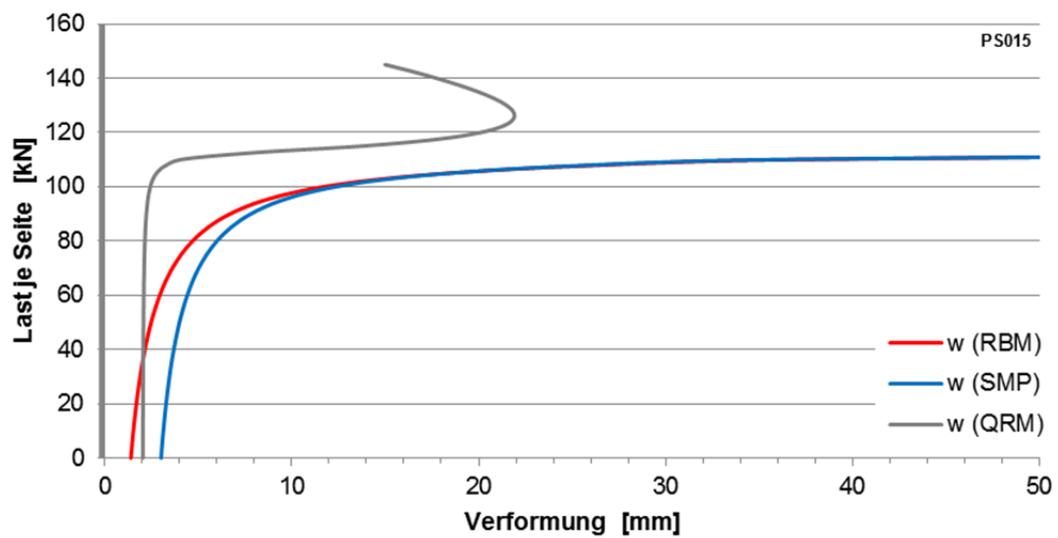
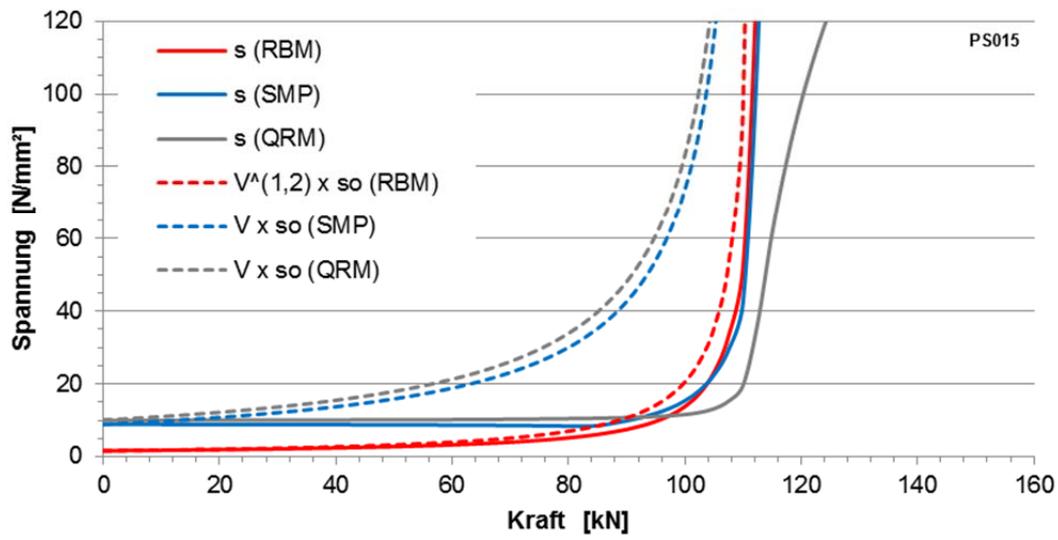
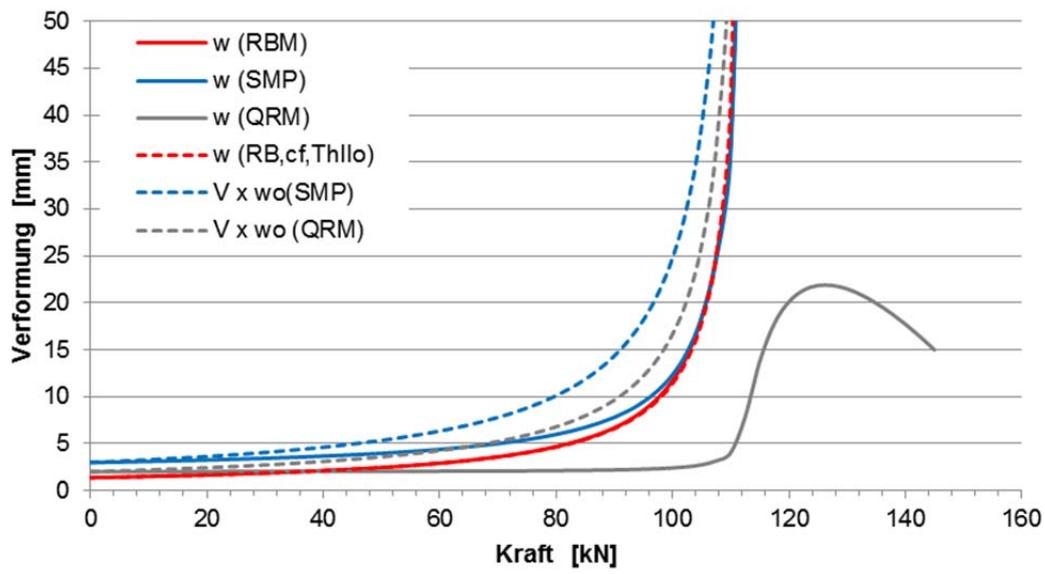


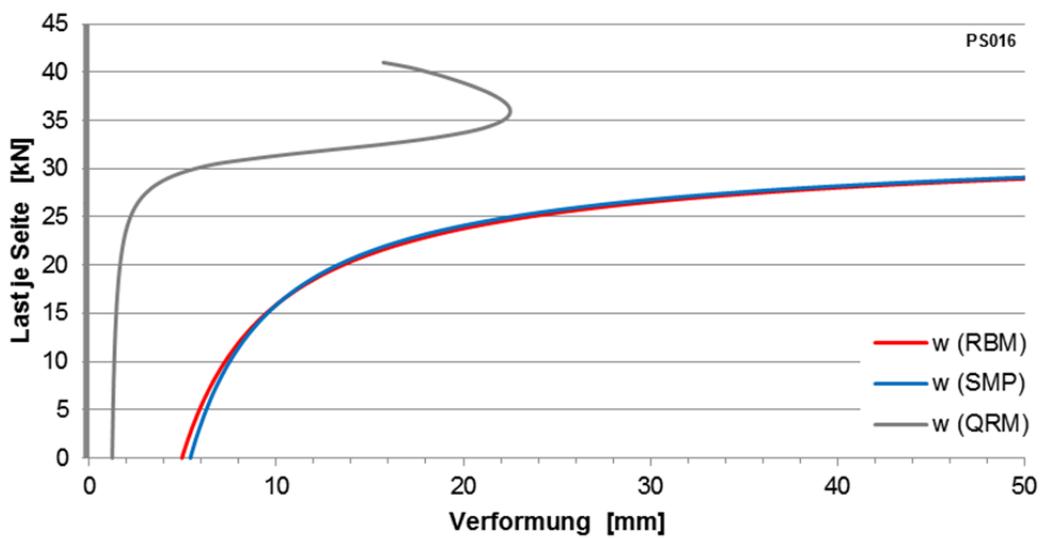
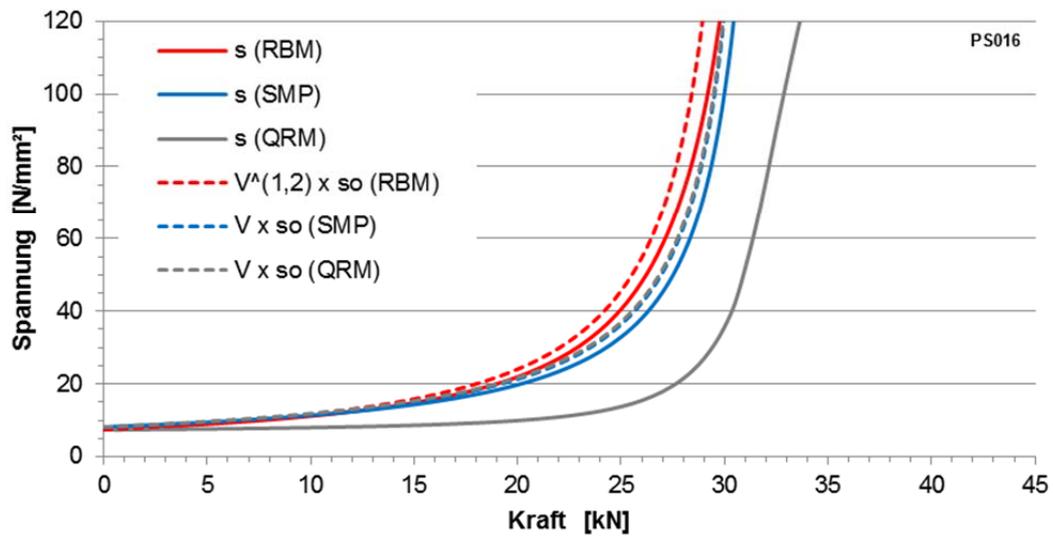
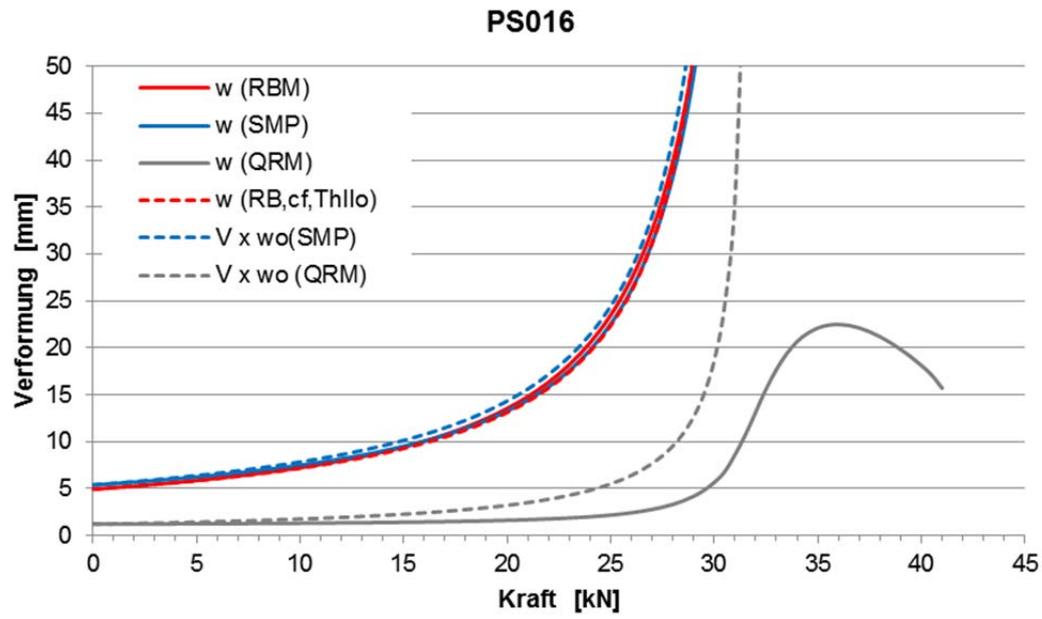


PS014

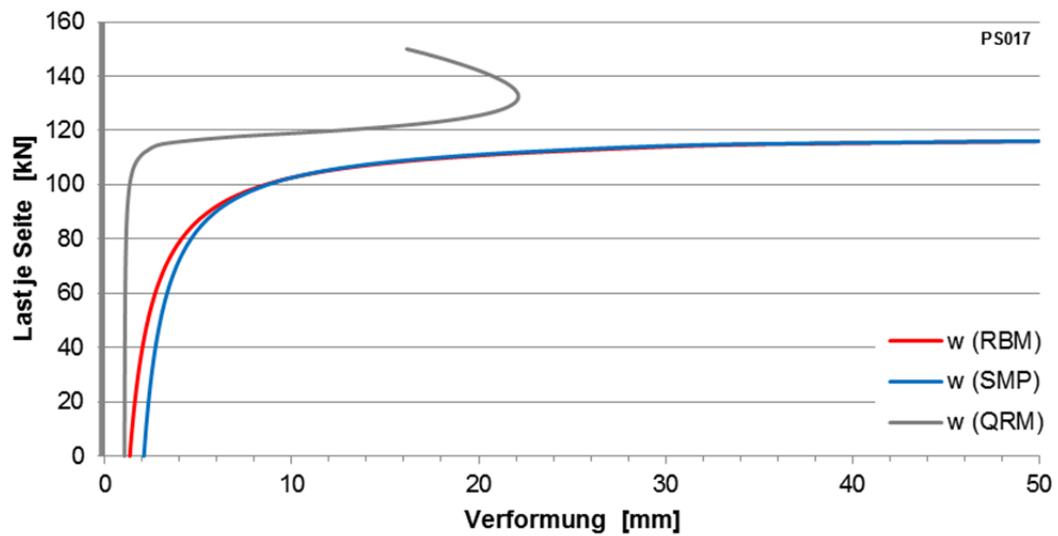
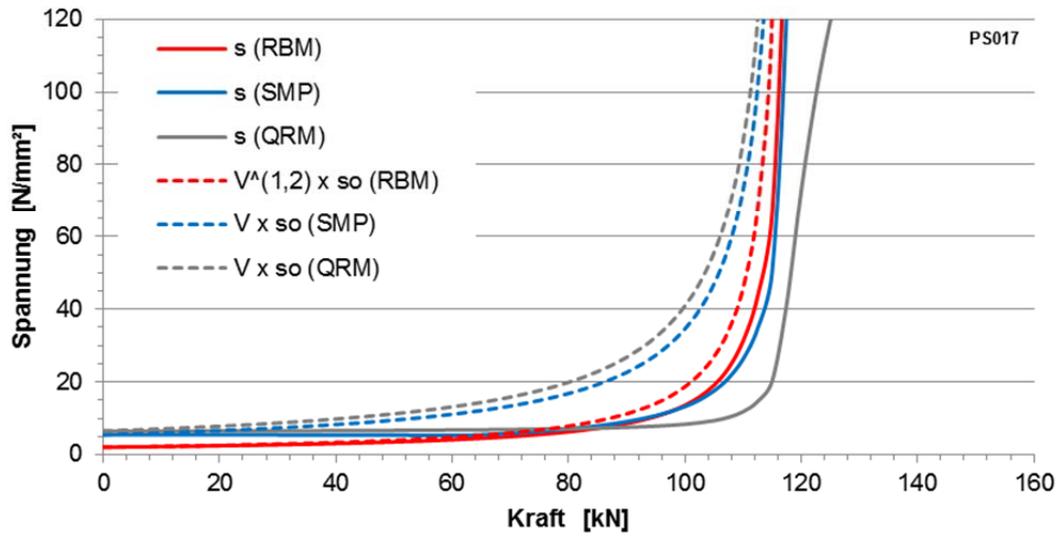
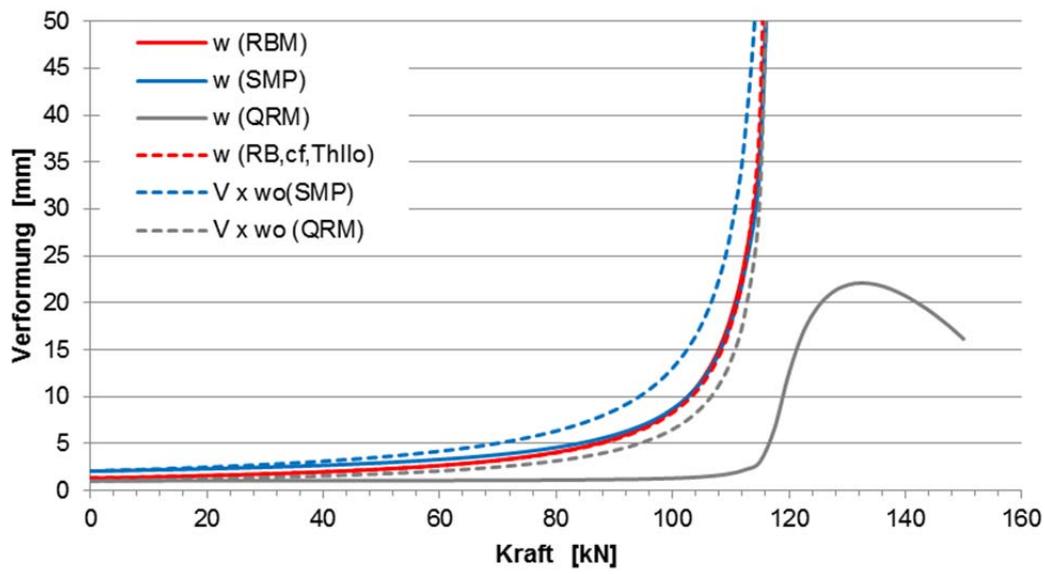


PS015

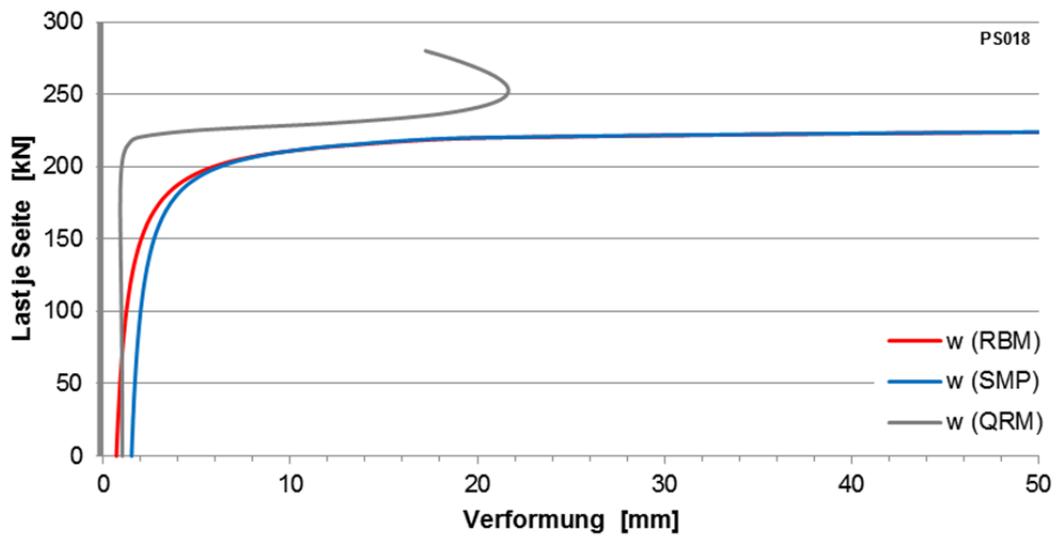
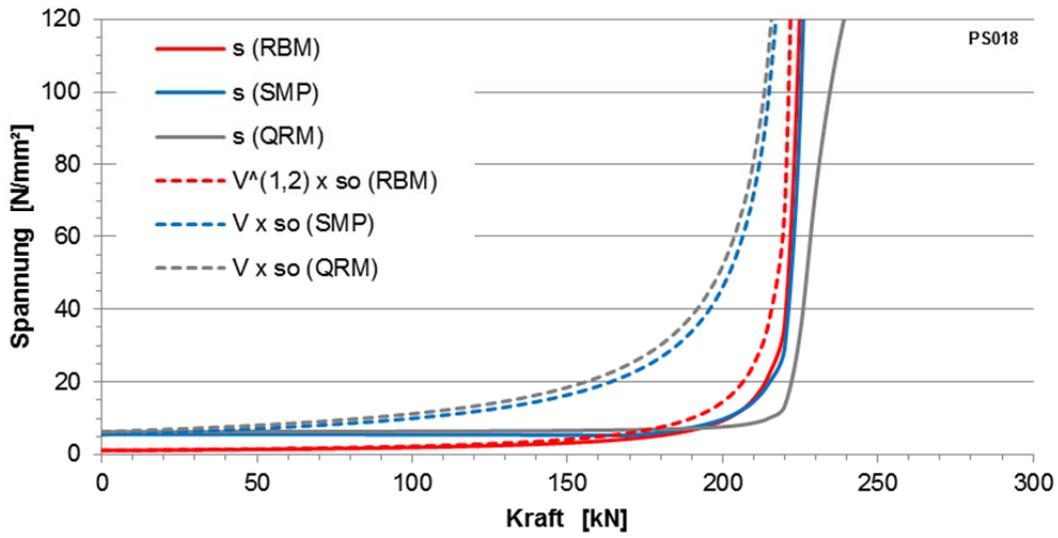
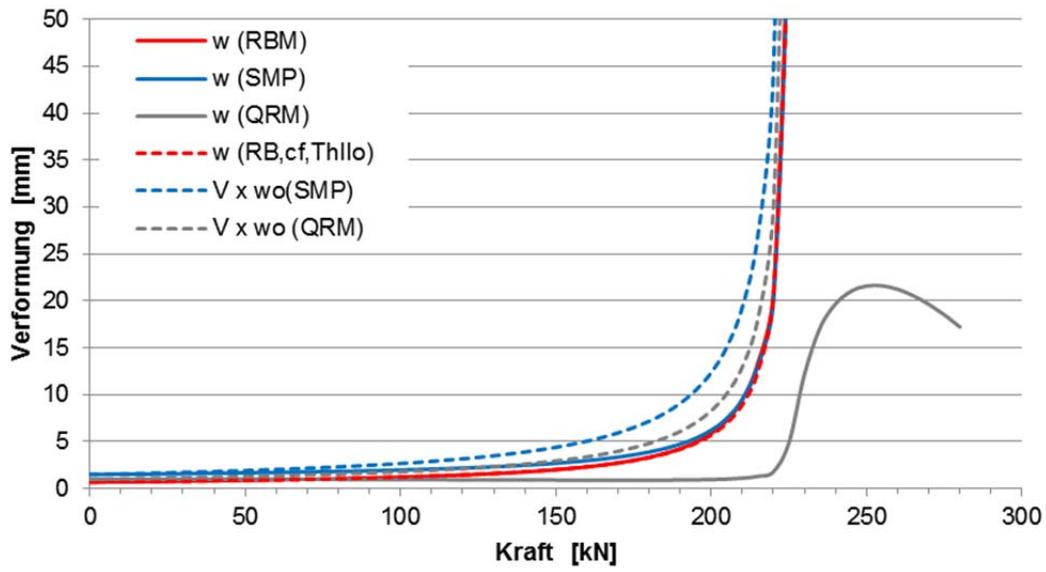


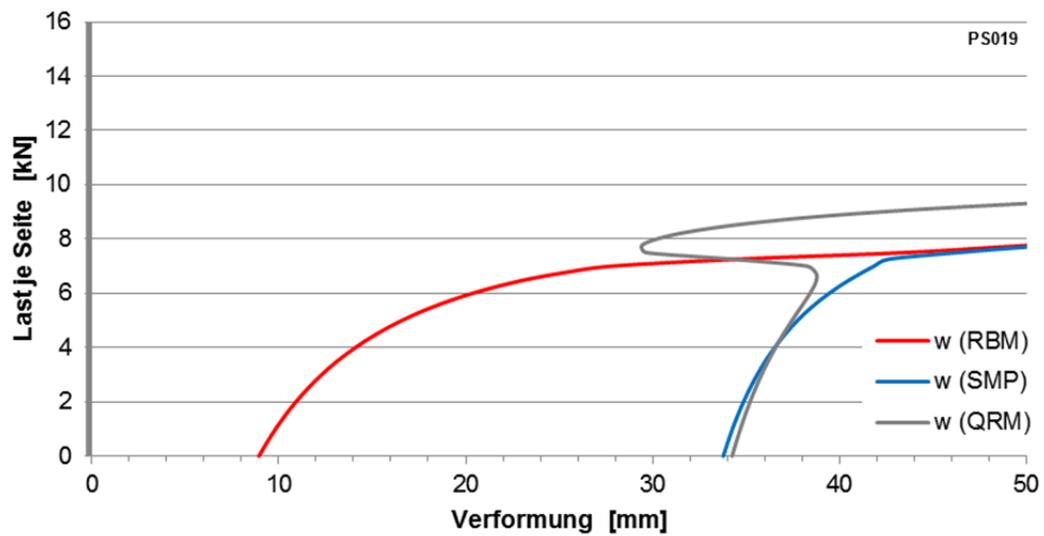
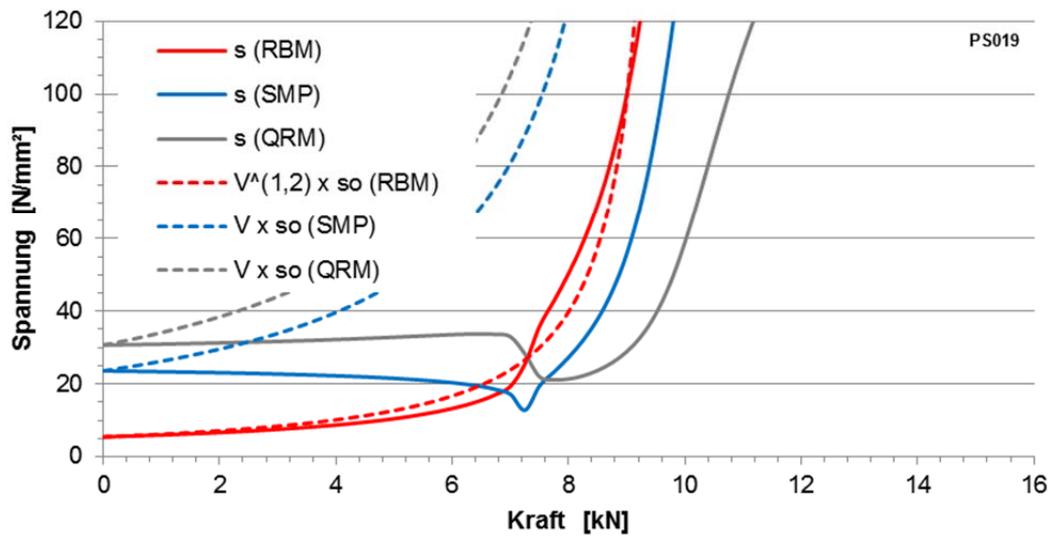
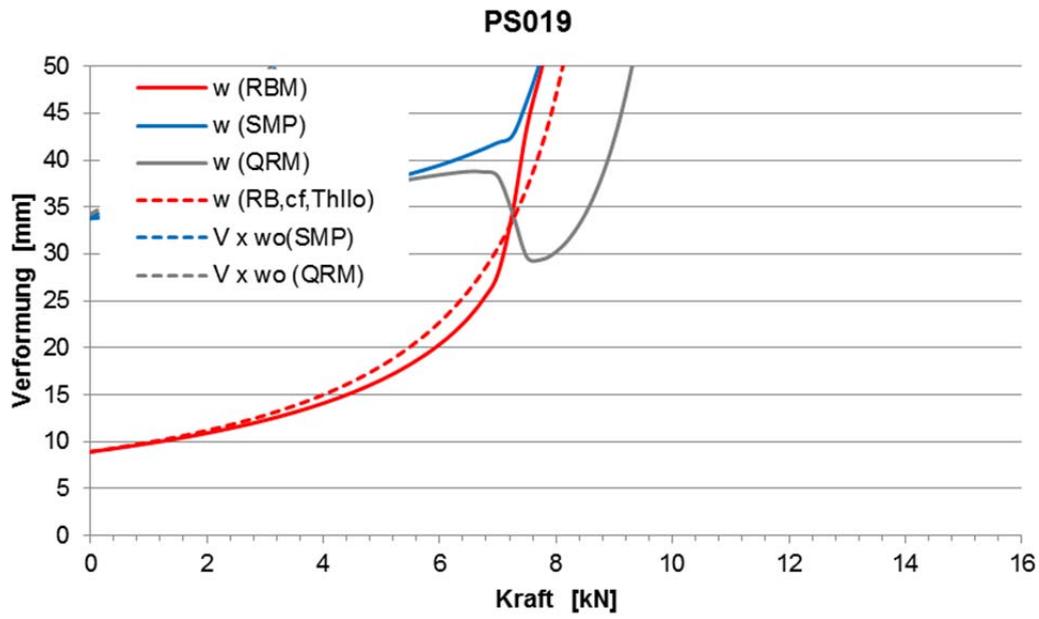


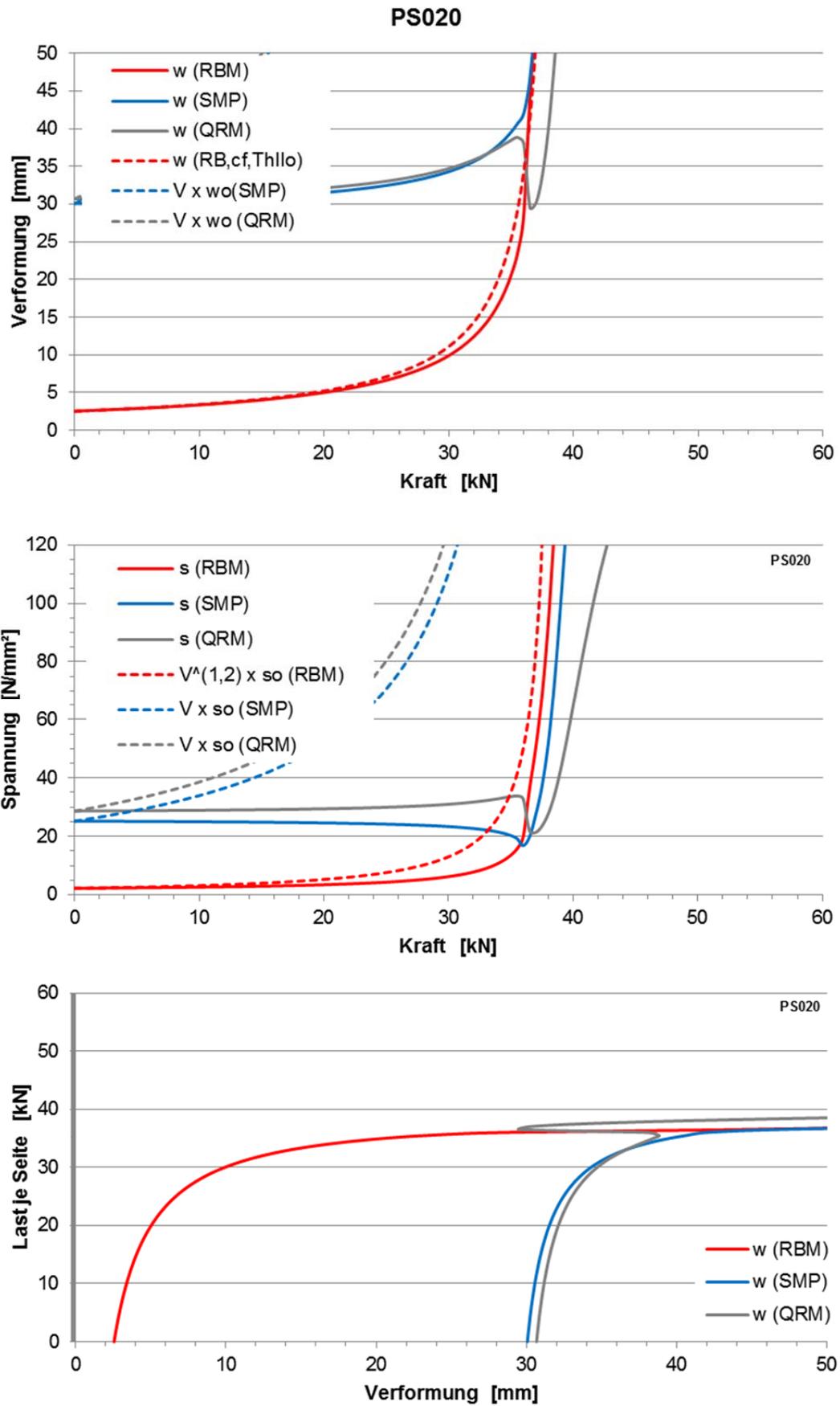
PS017



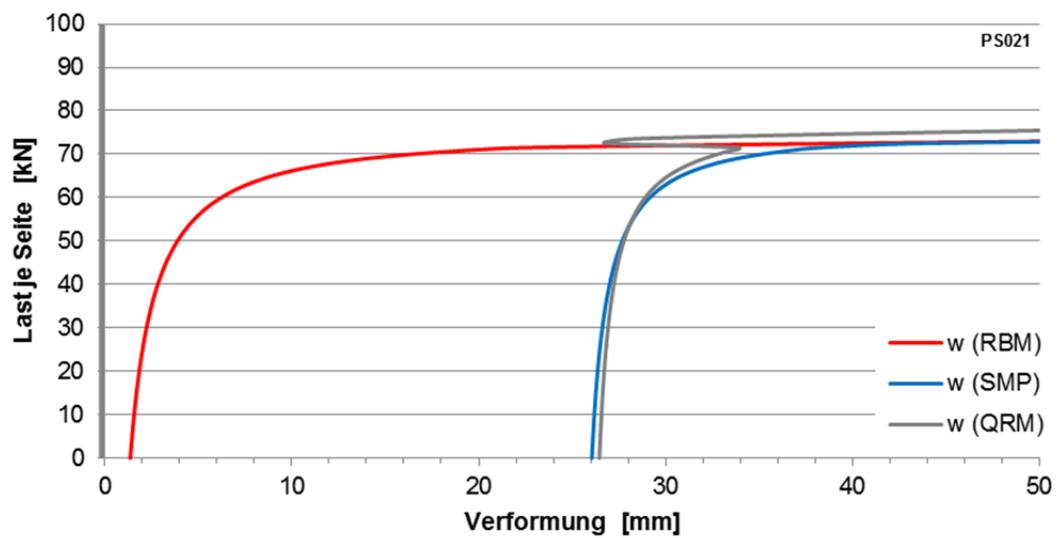
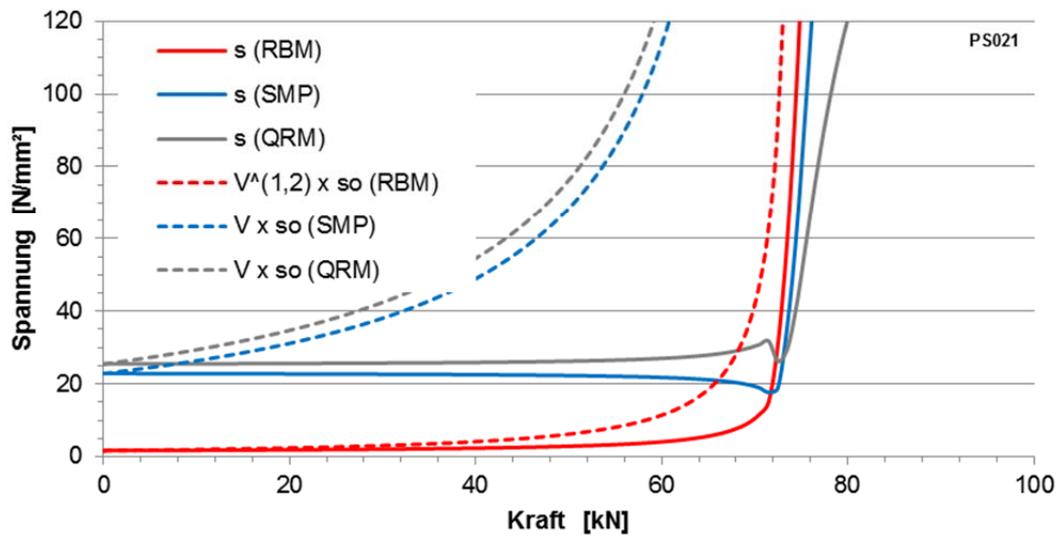
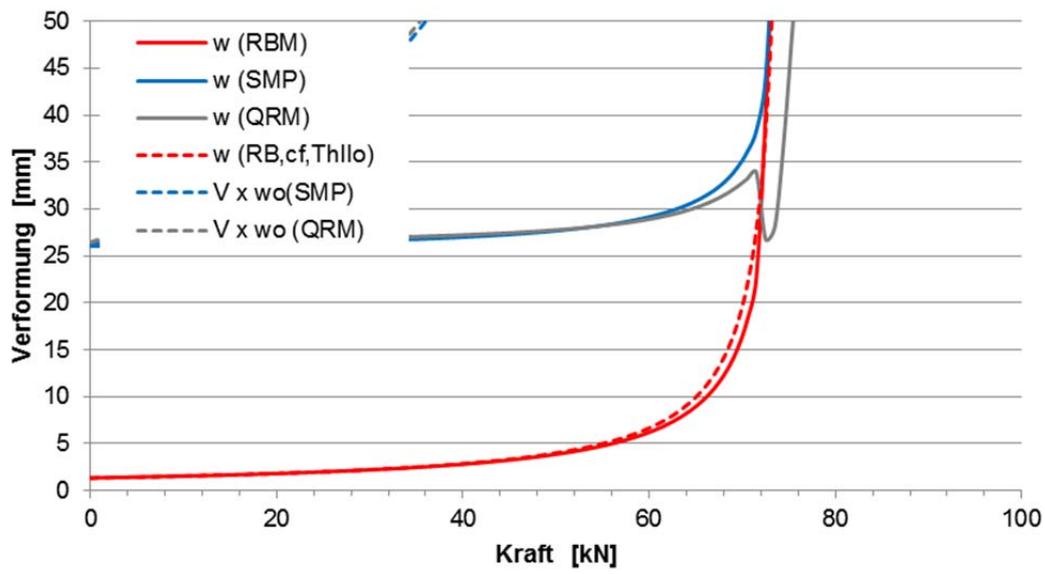
PS018

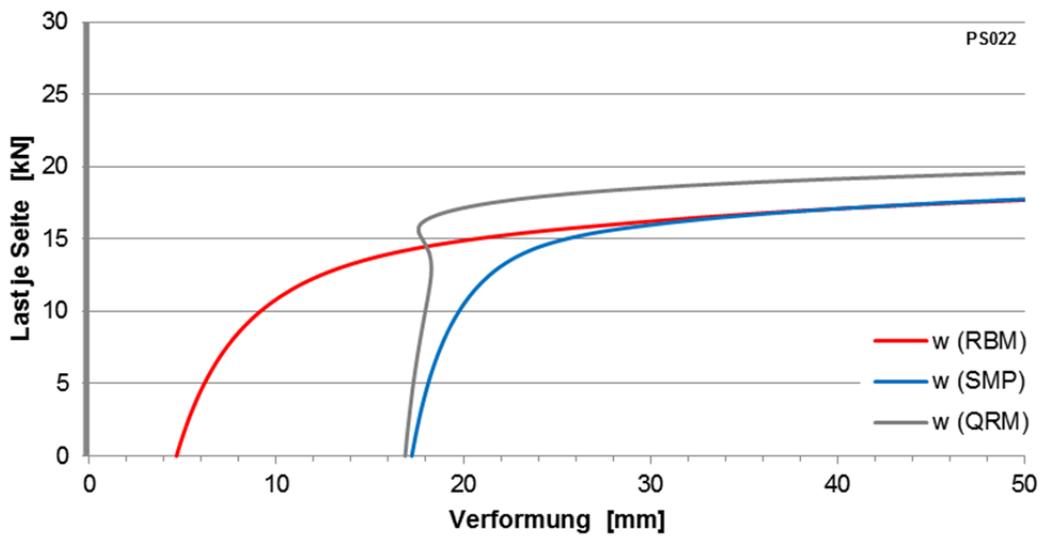
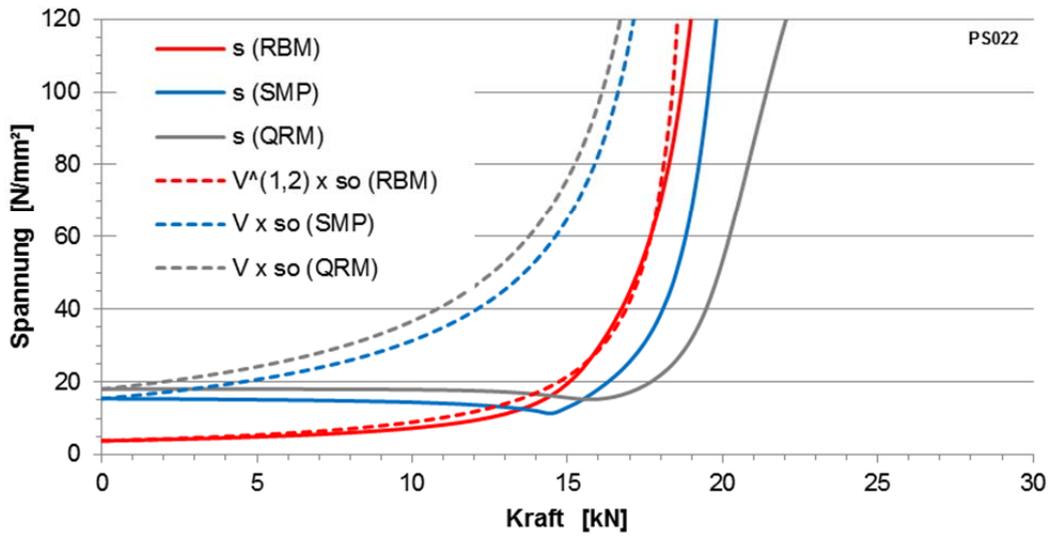
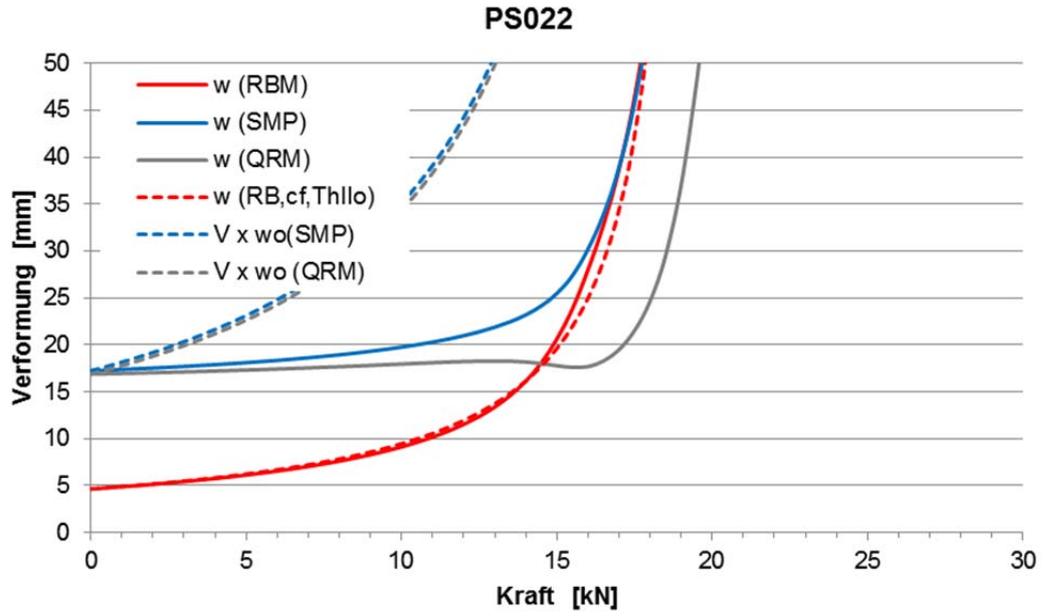


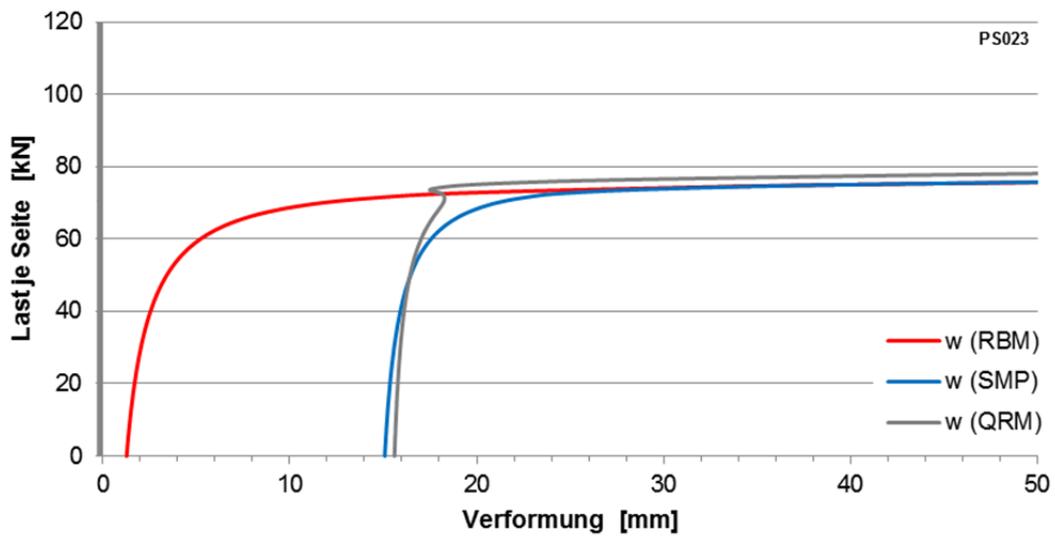
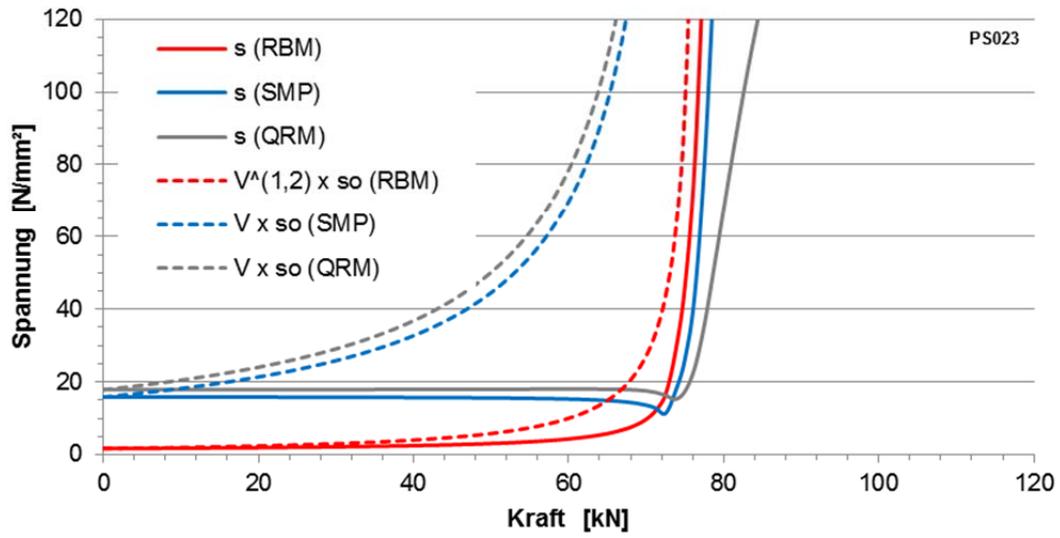
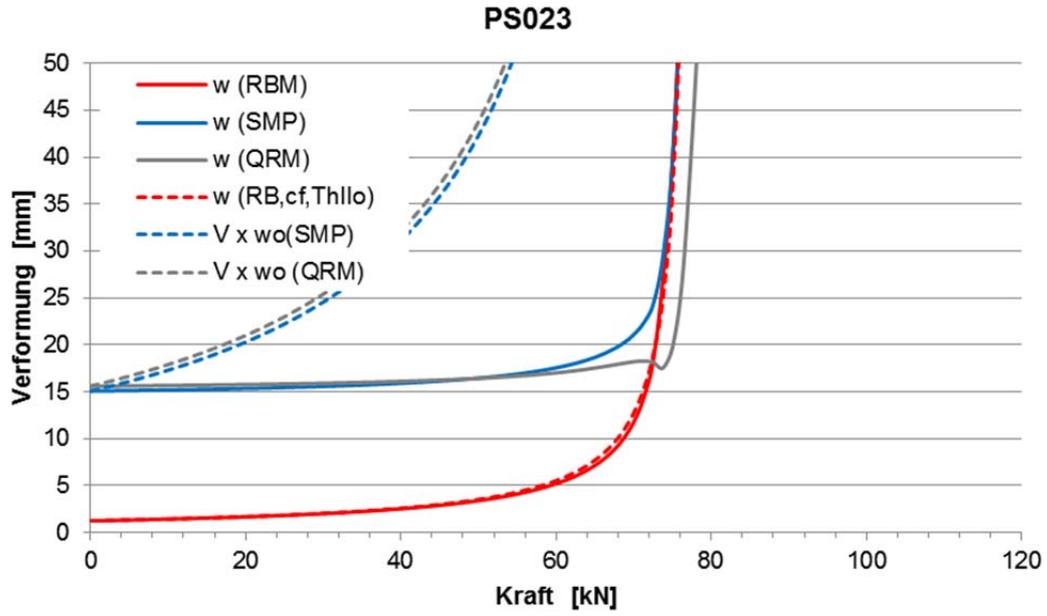


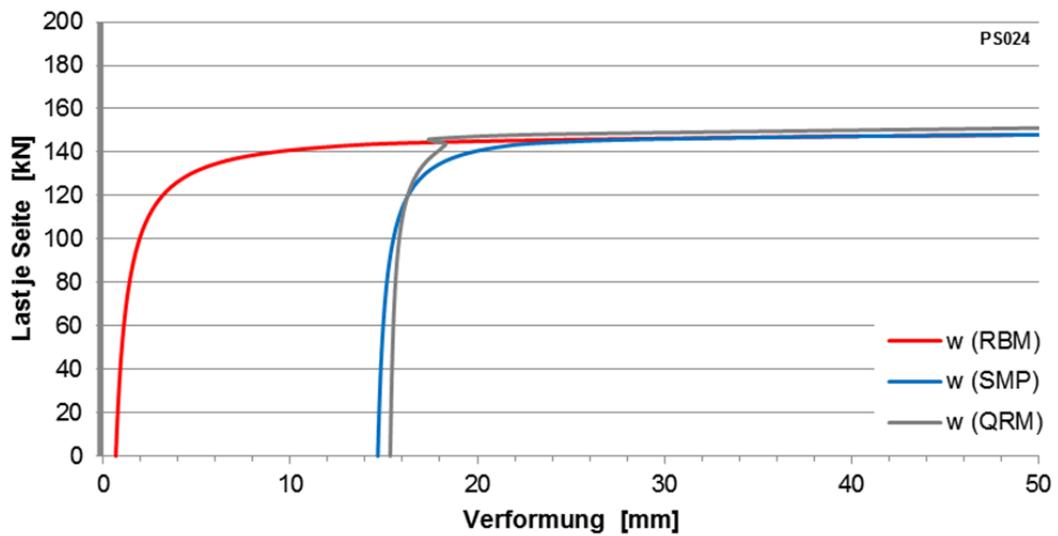
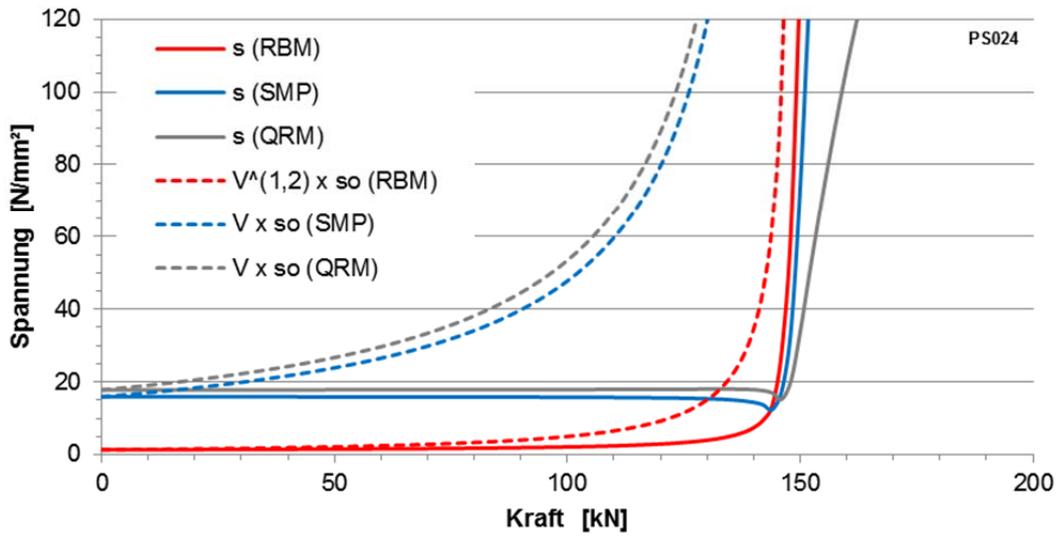
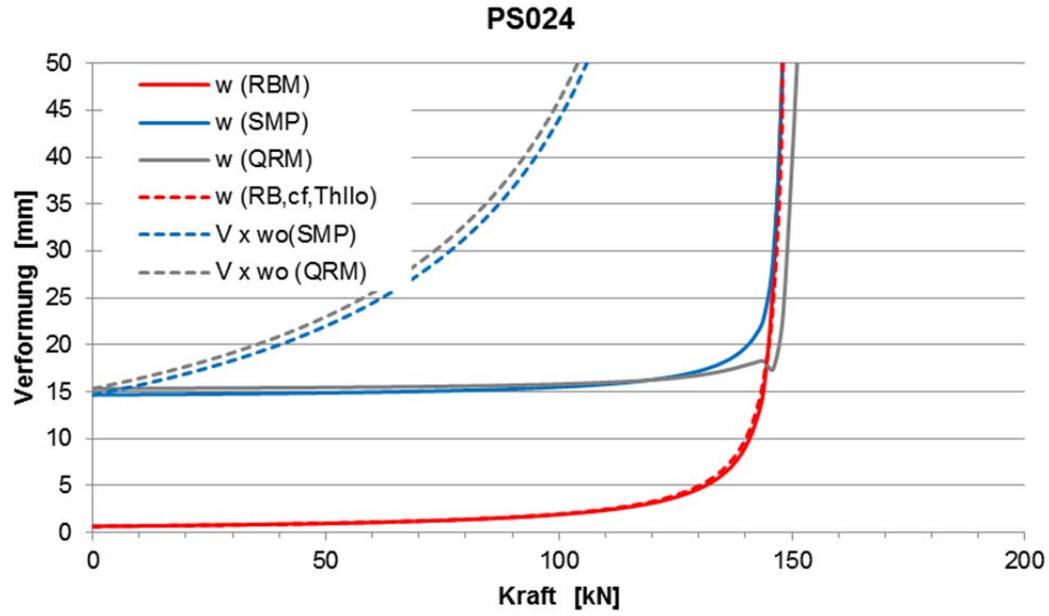


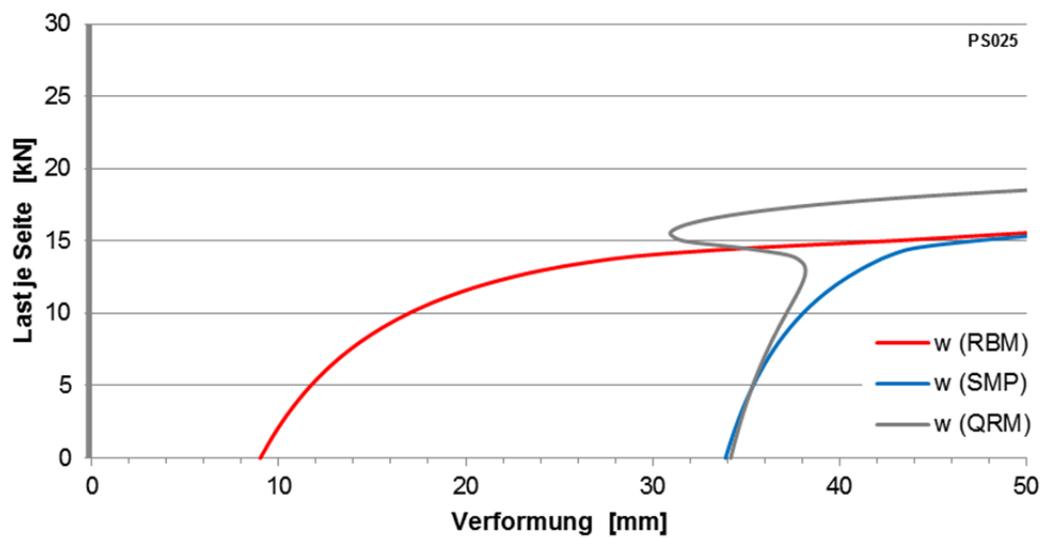
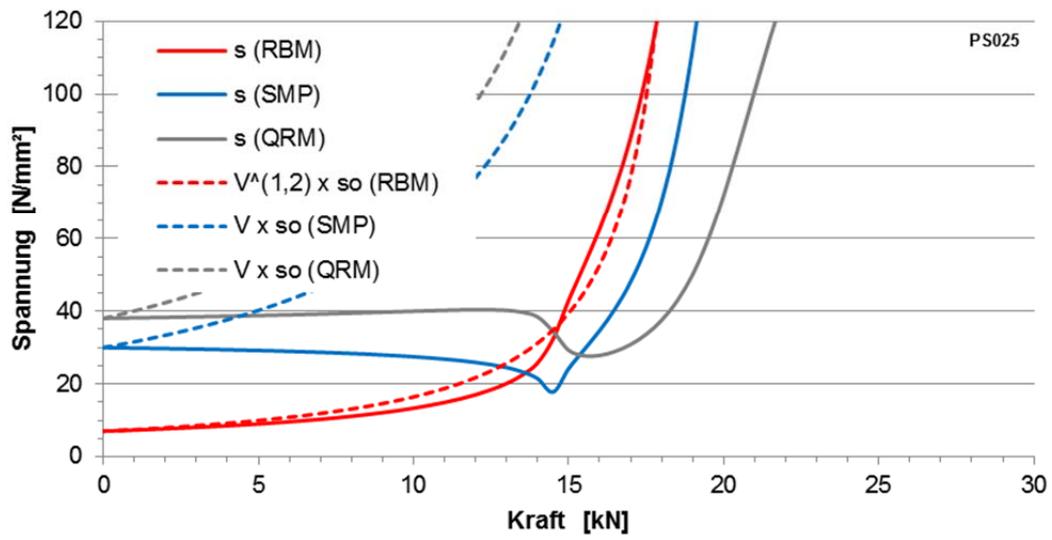
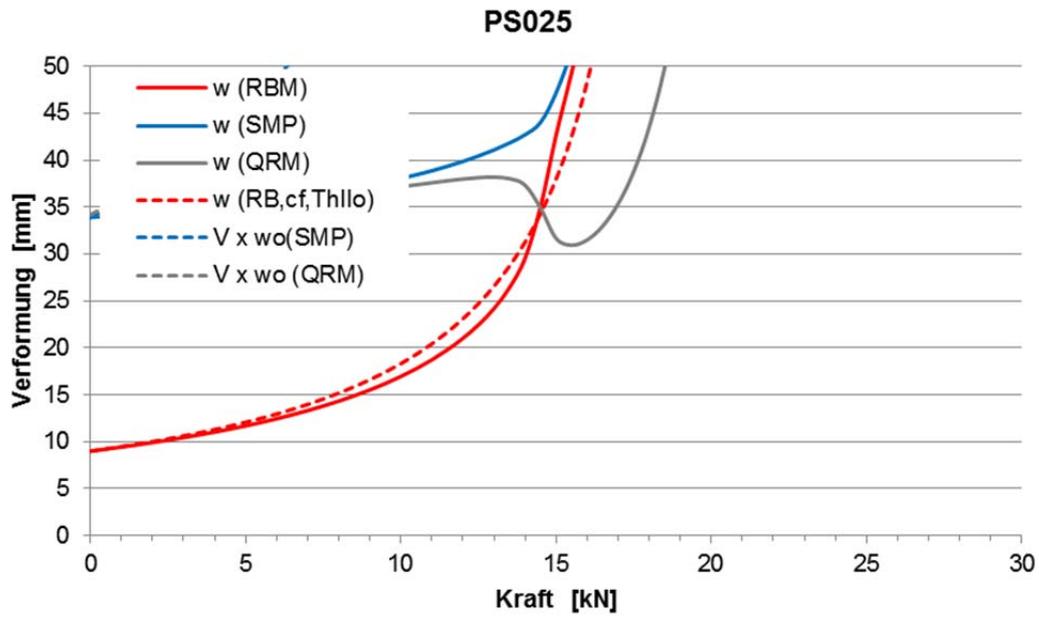
PS021

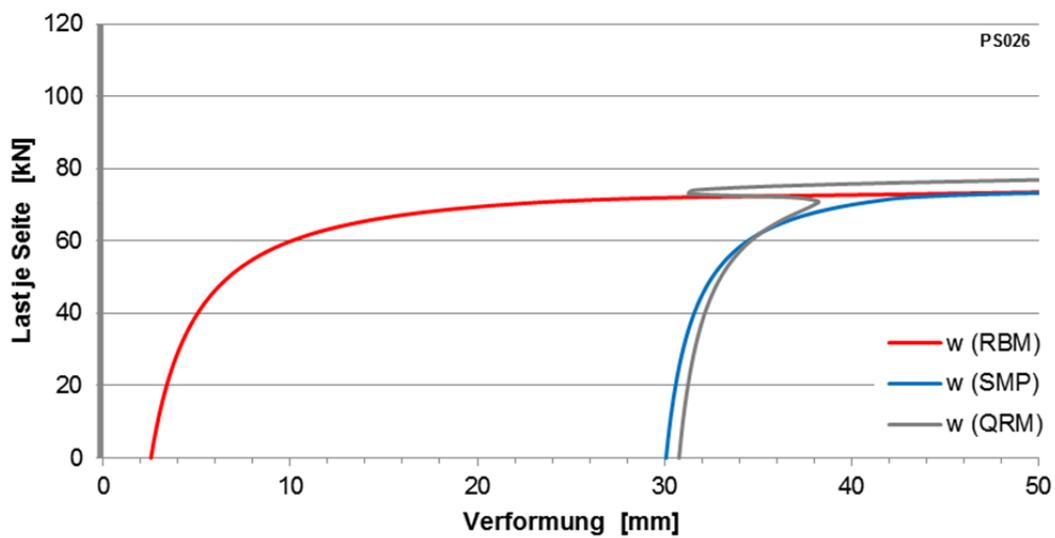
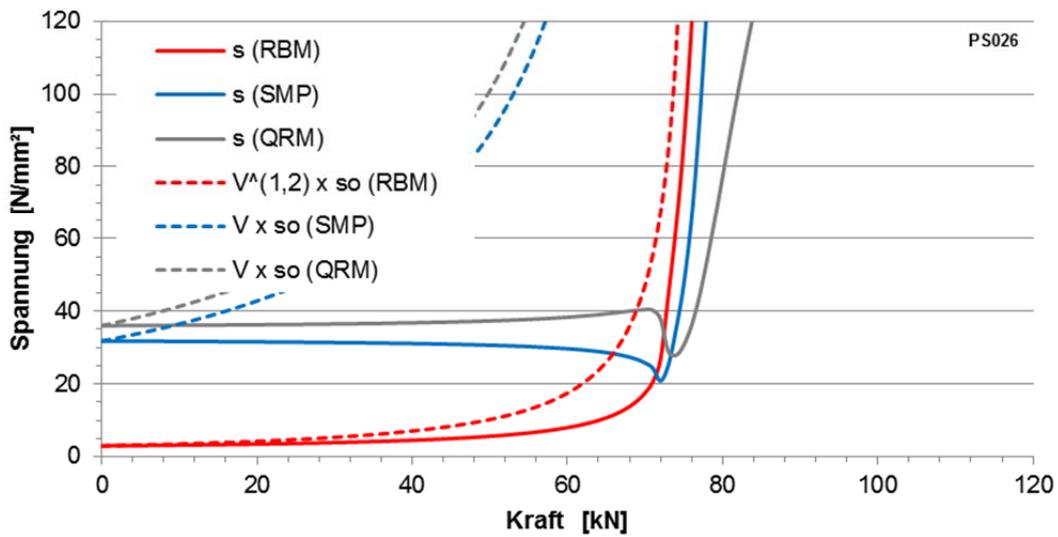
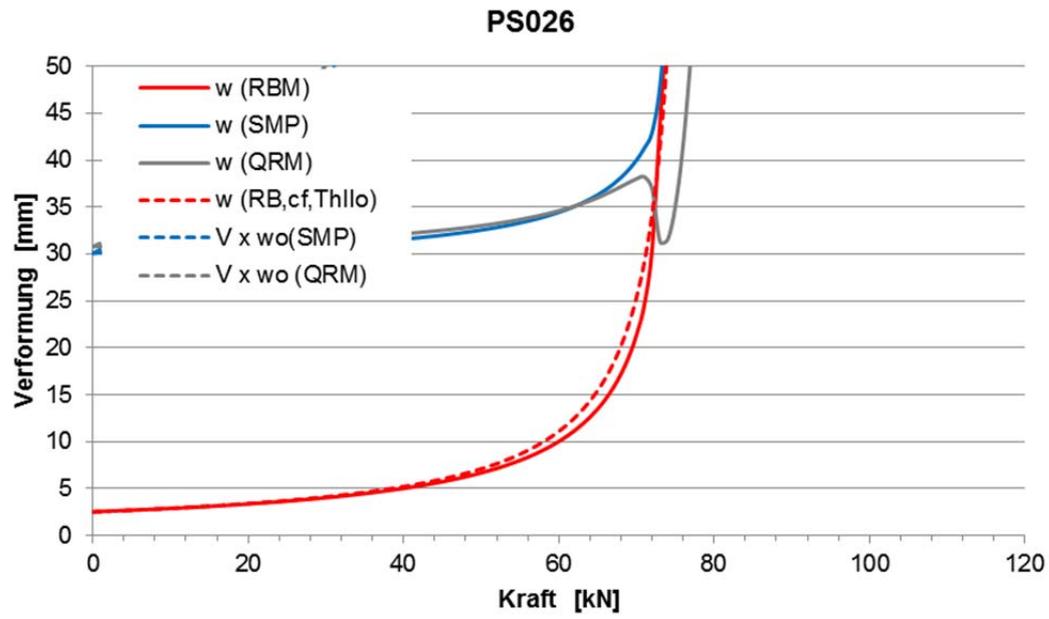




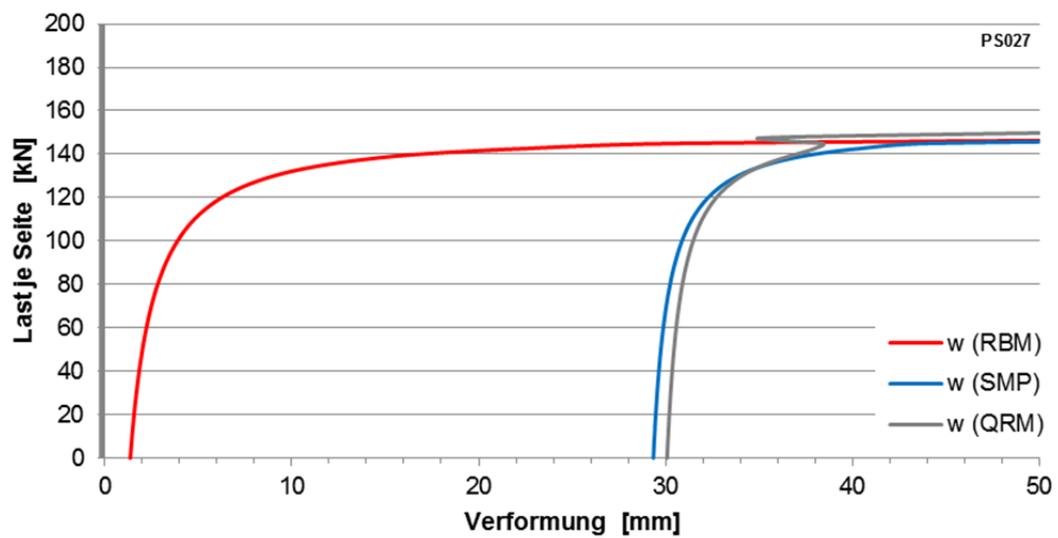
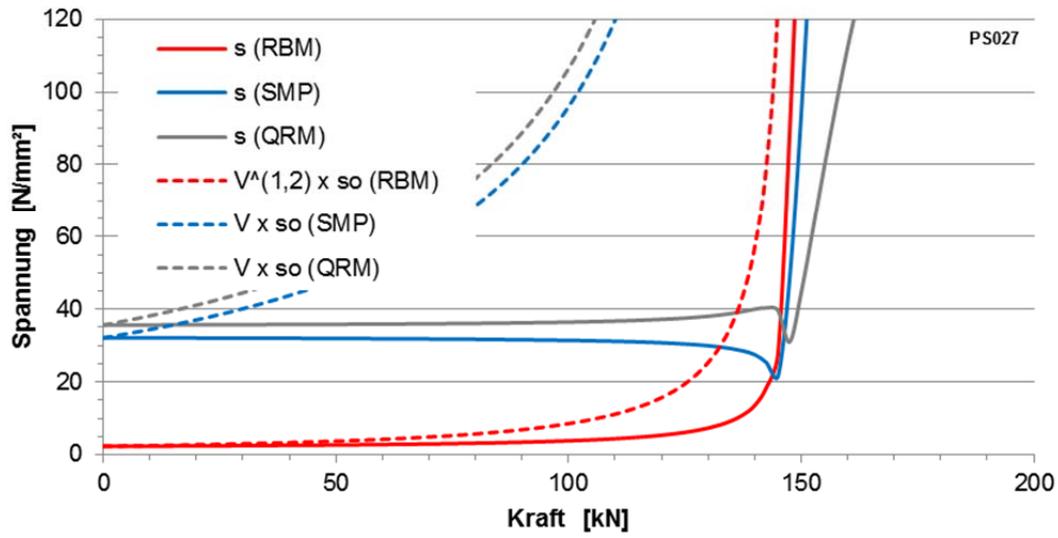
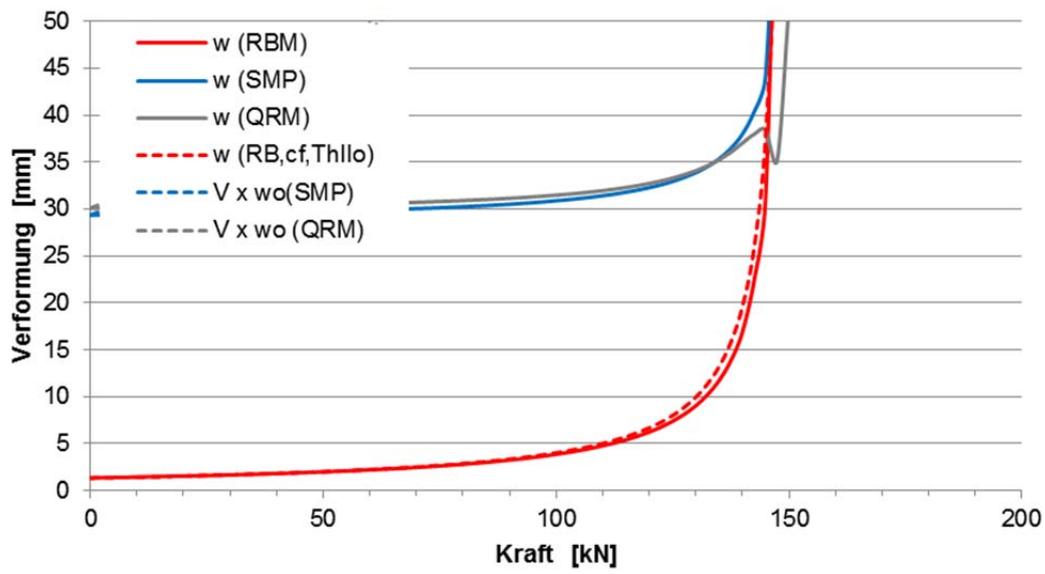


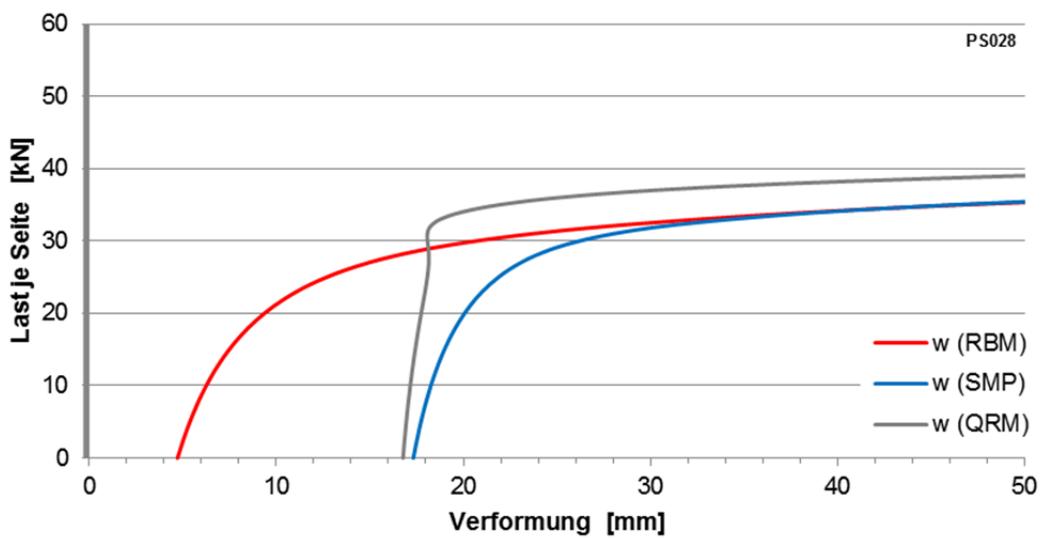
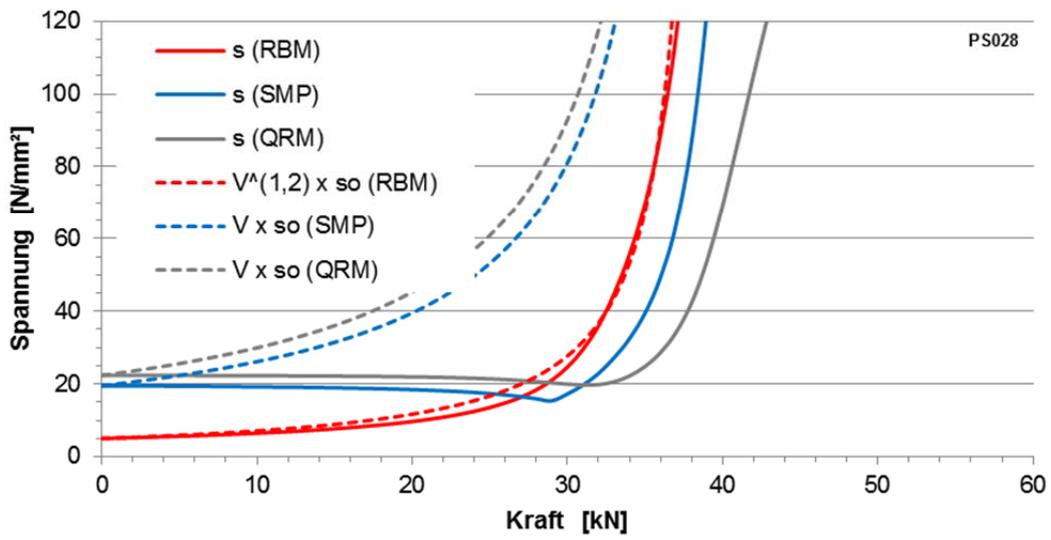
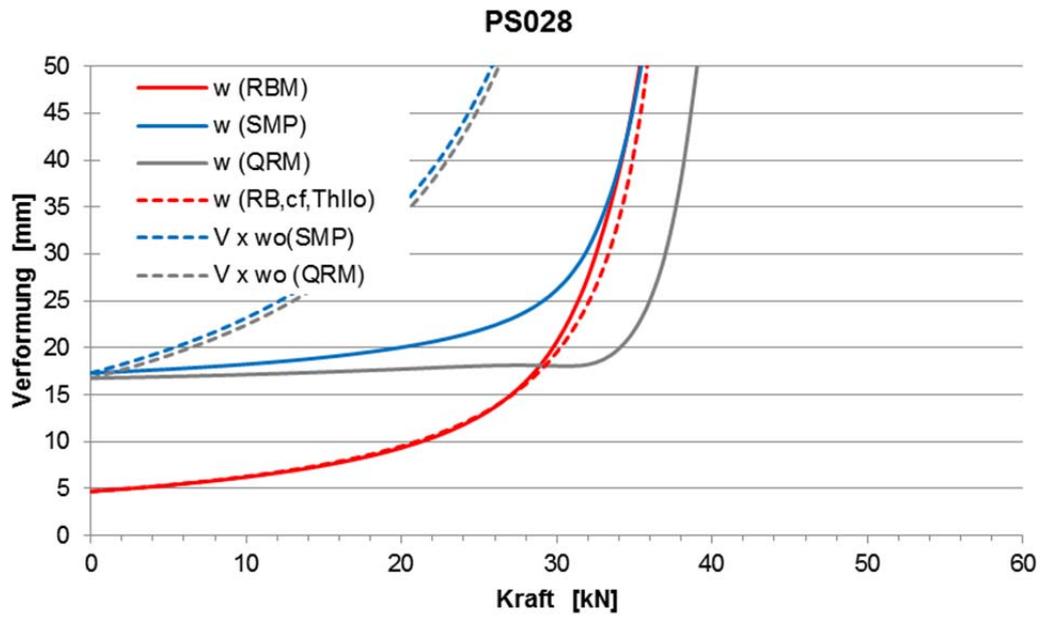


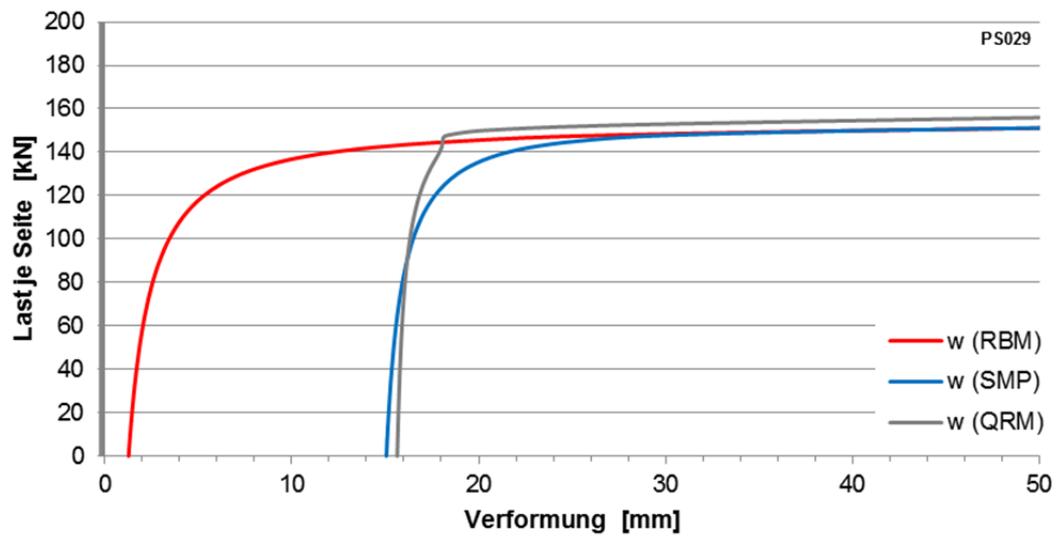
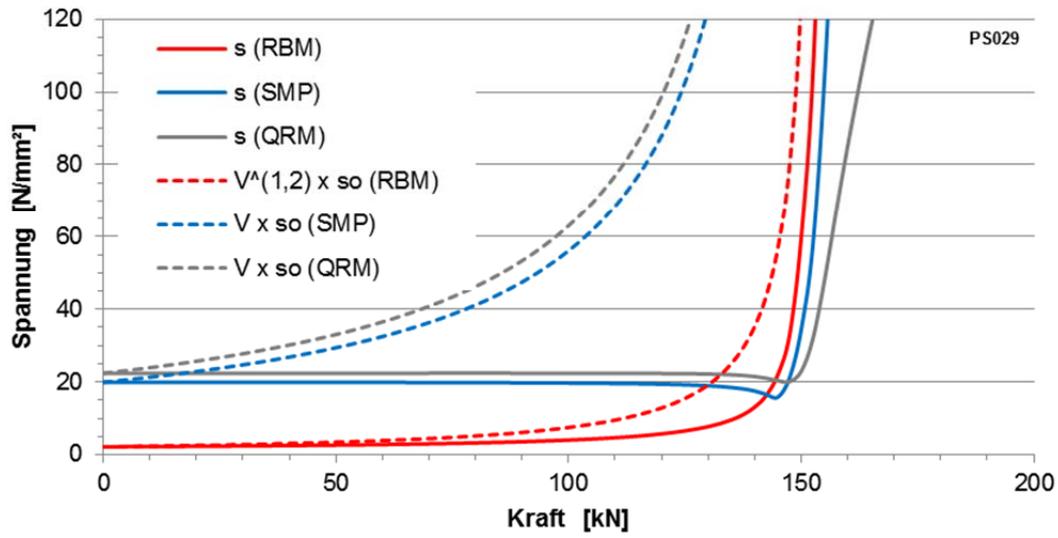
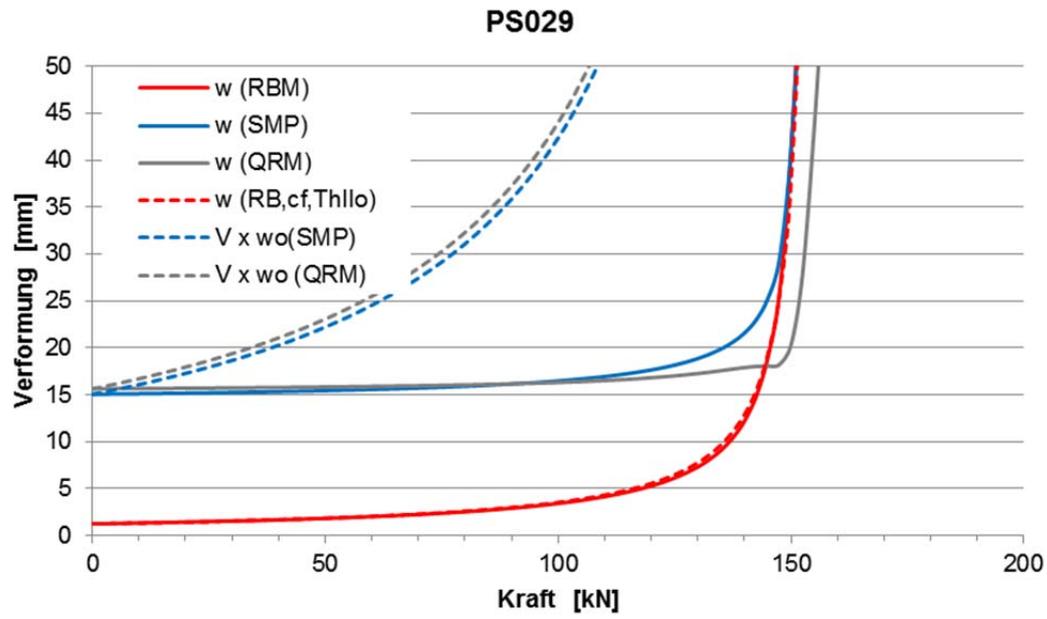


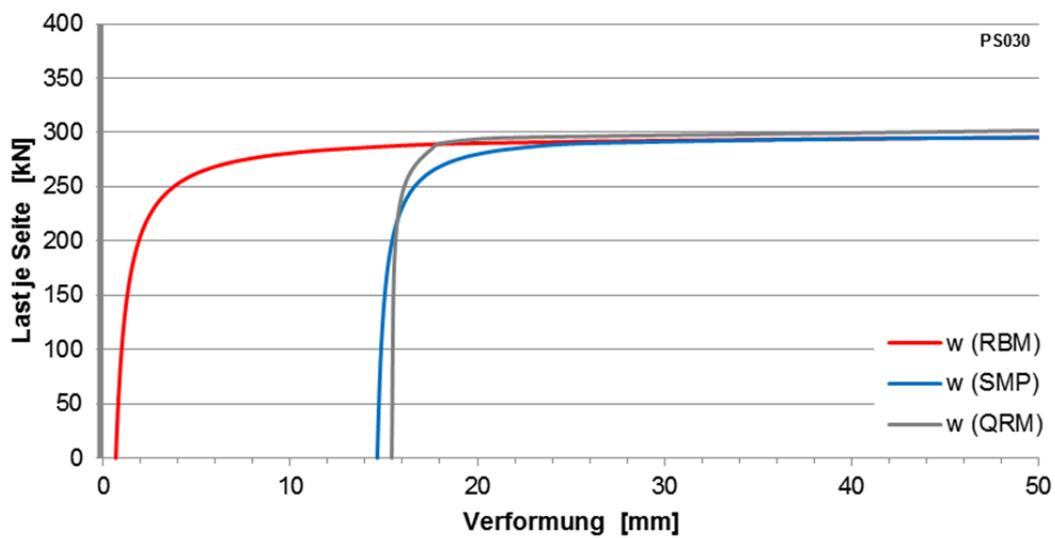
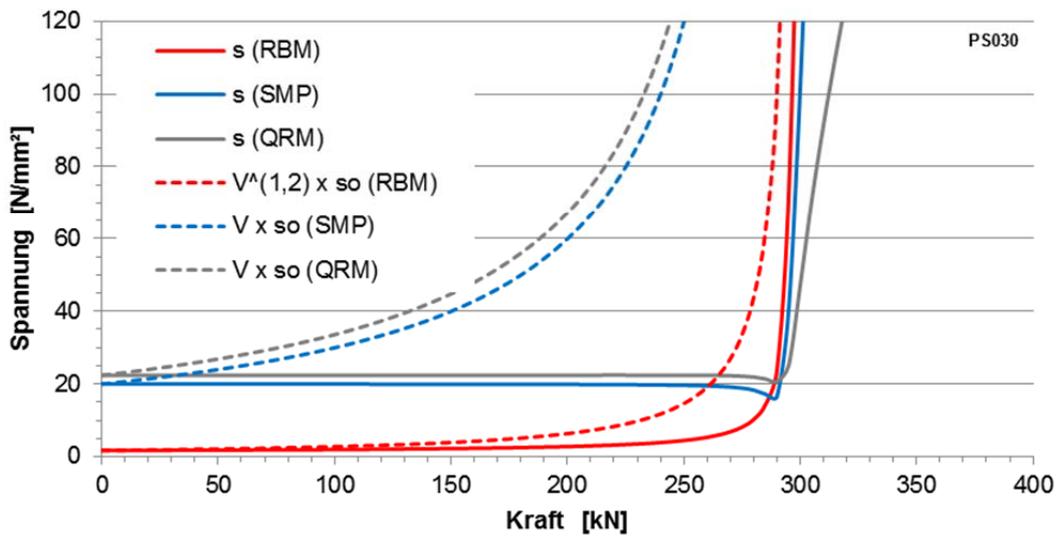
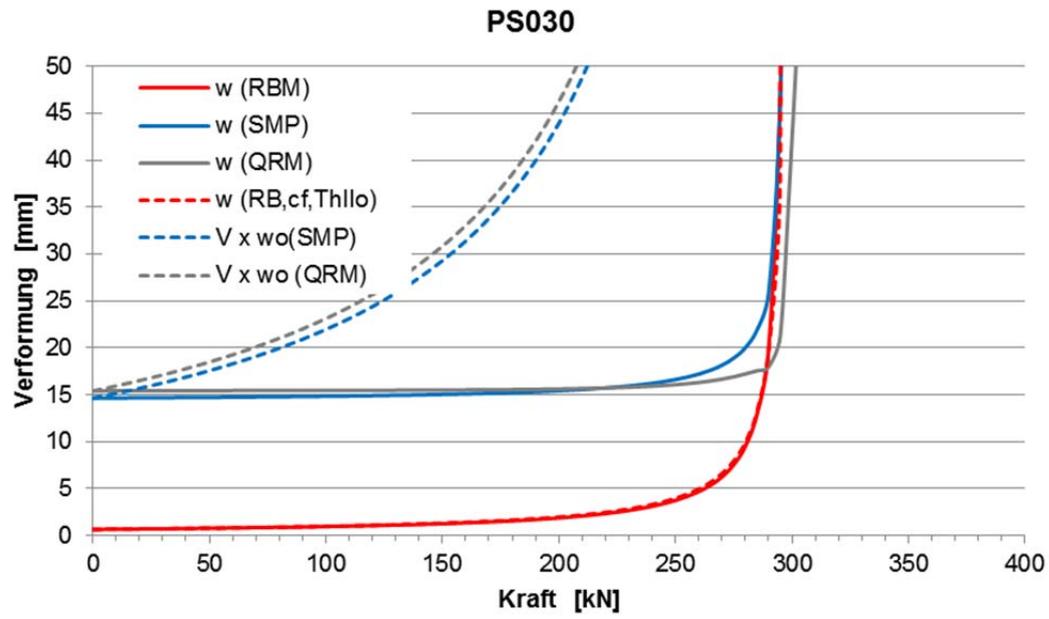


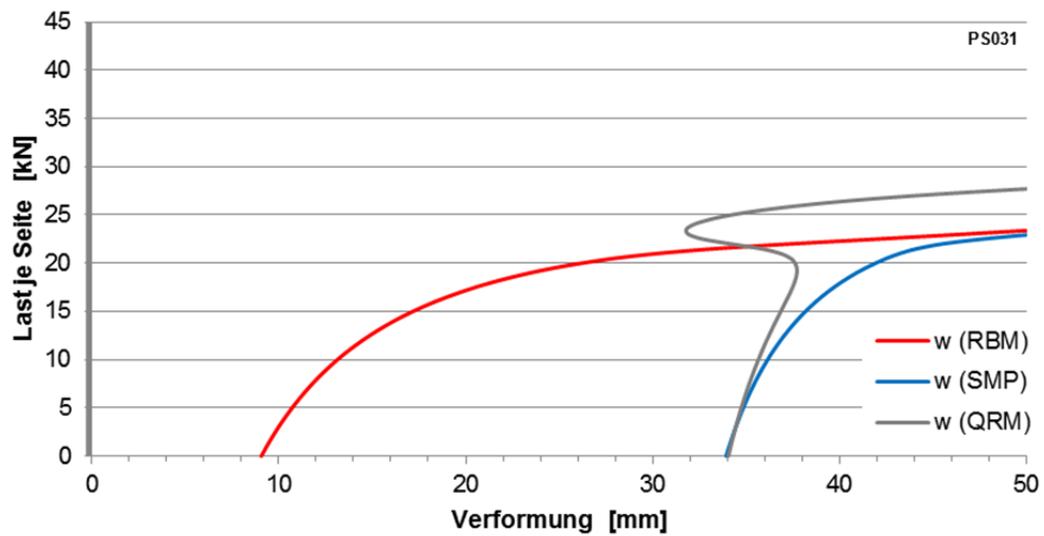
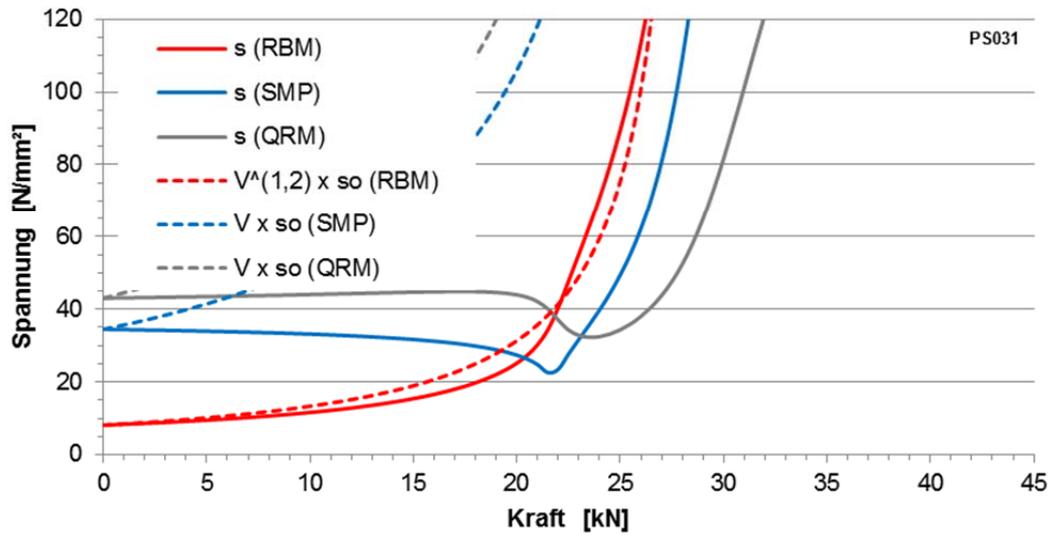
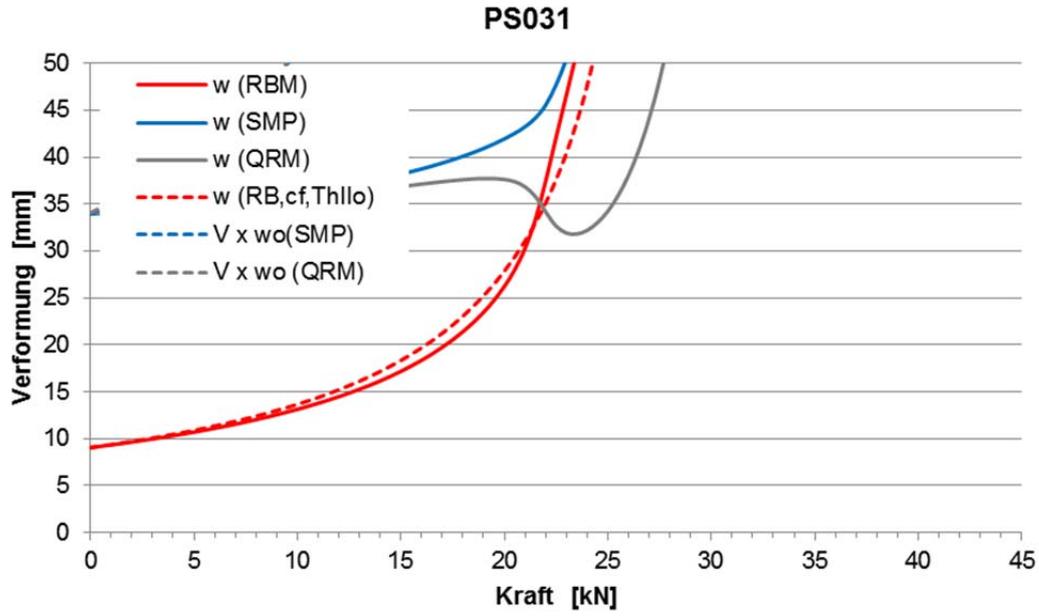
PS027



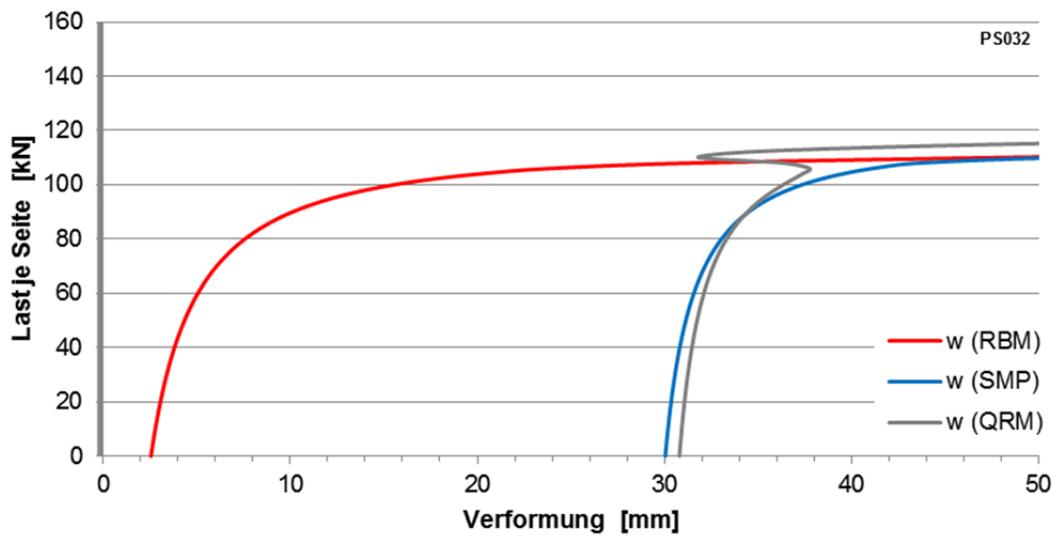
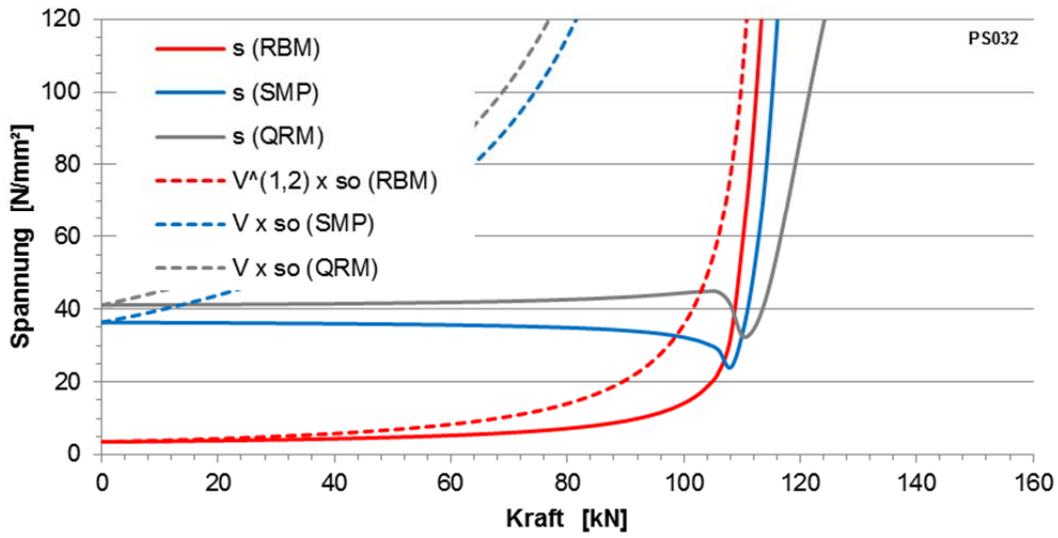
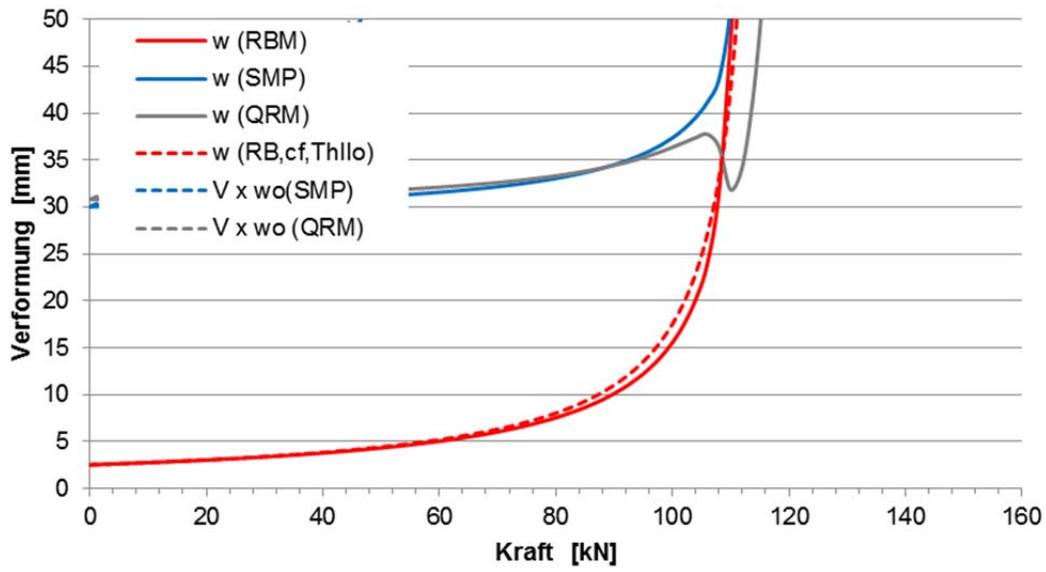




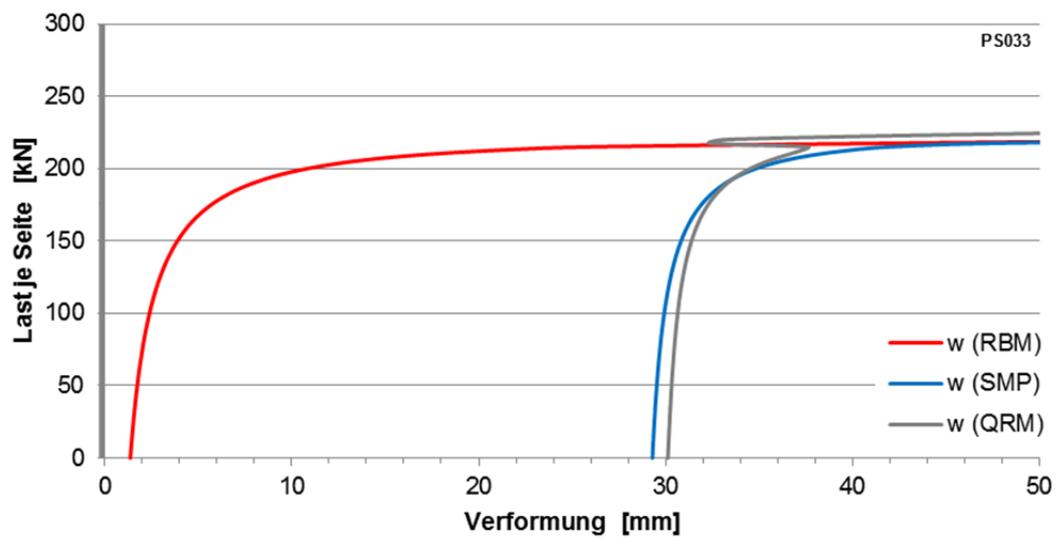
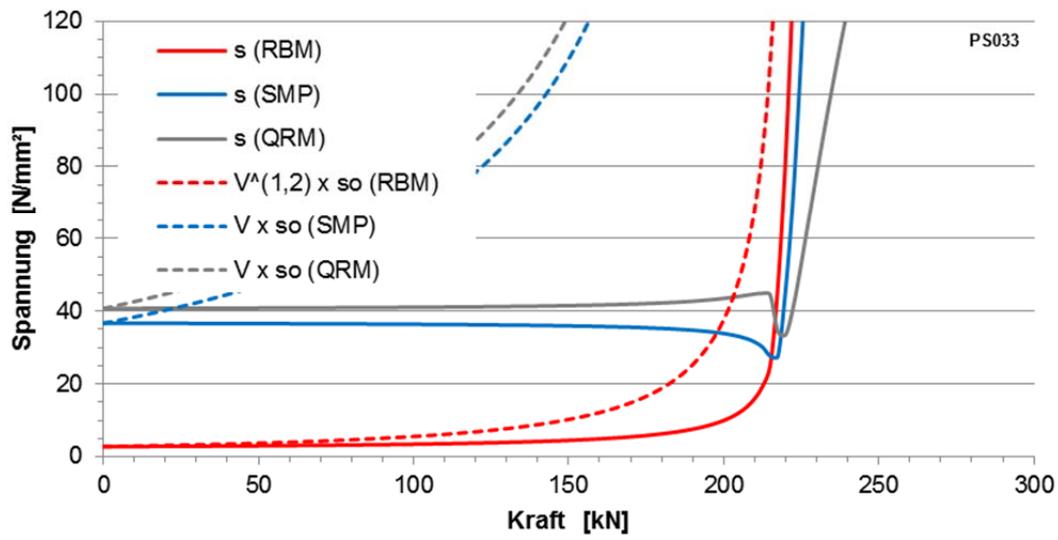
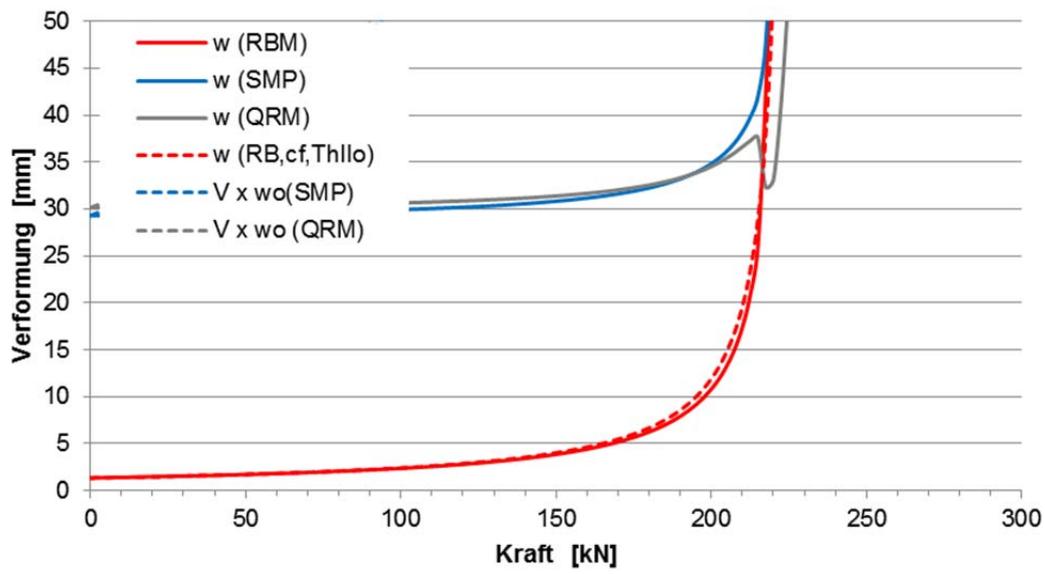


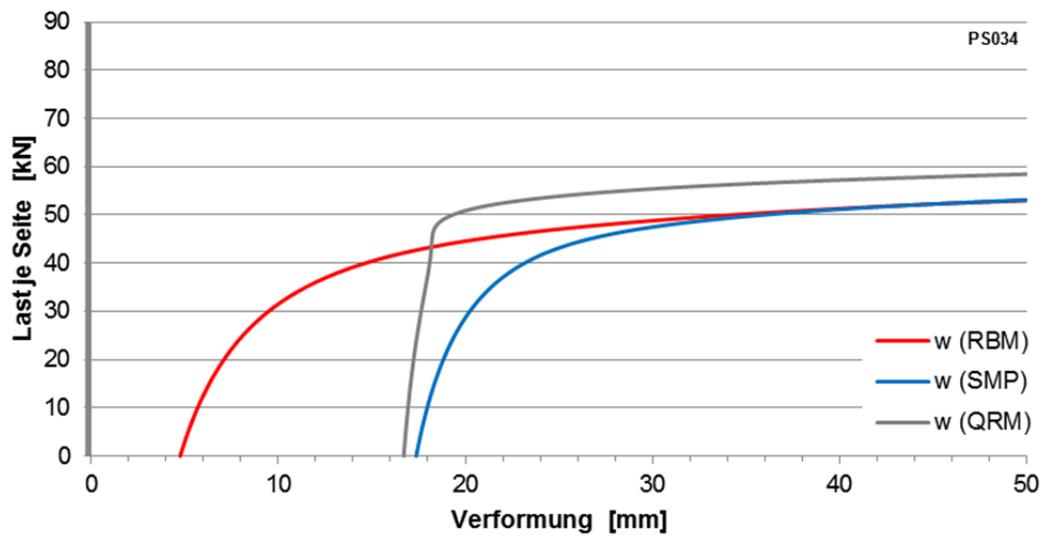
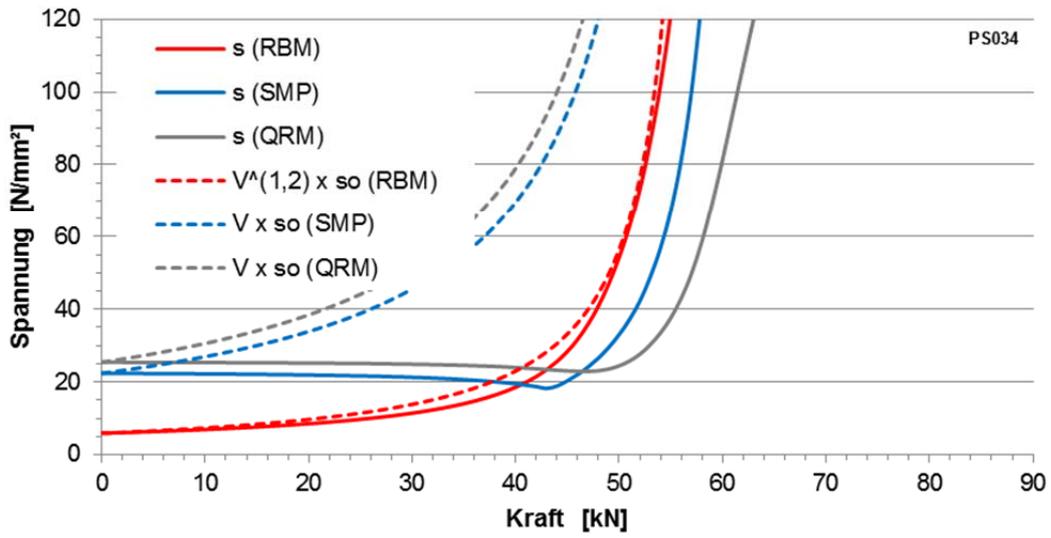
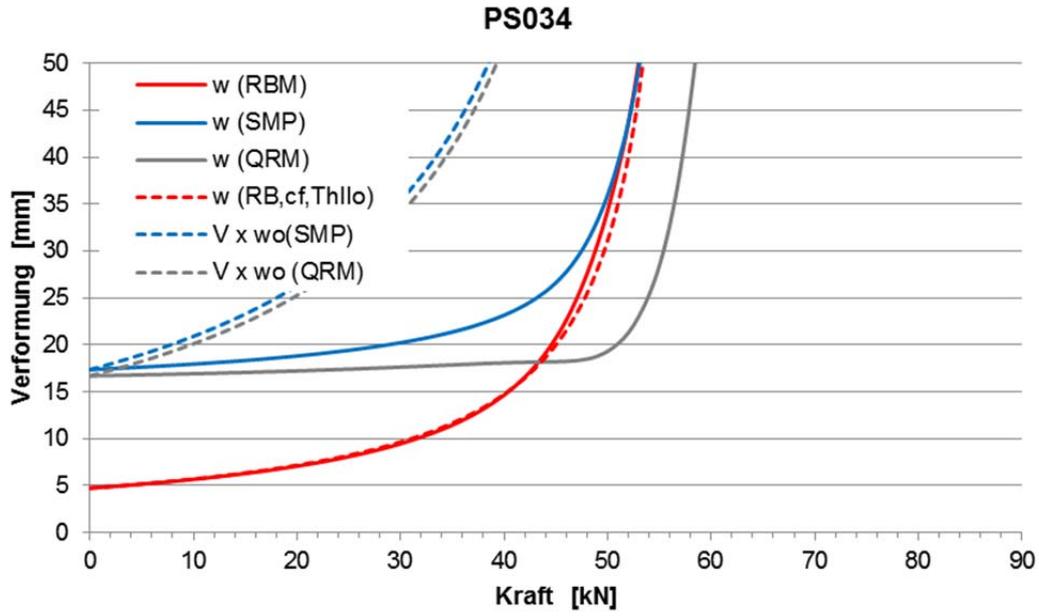


PS032

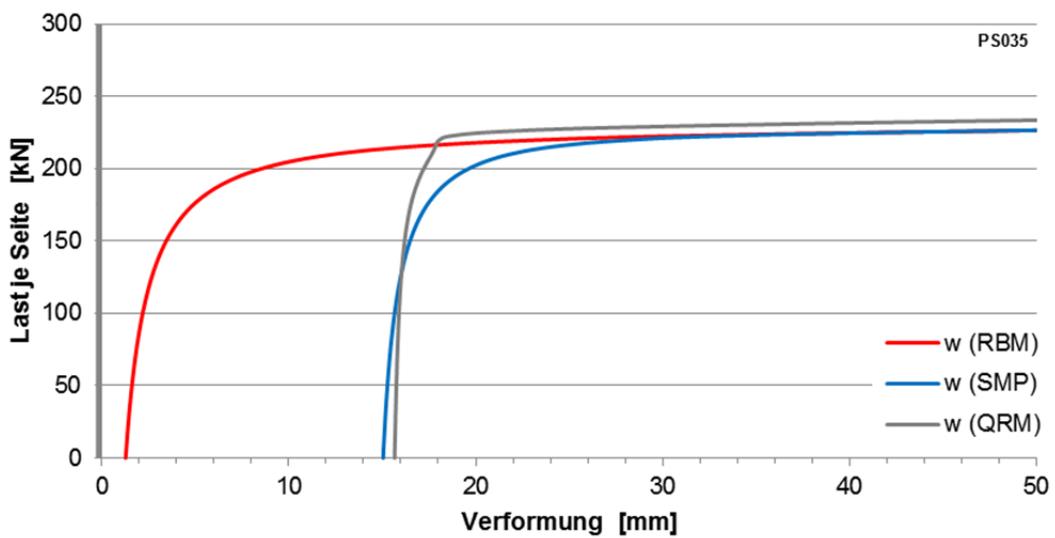
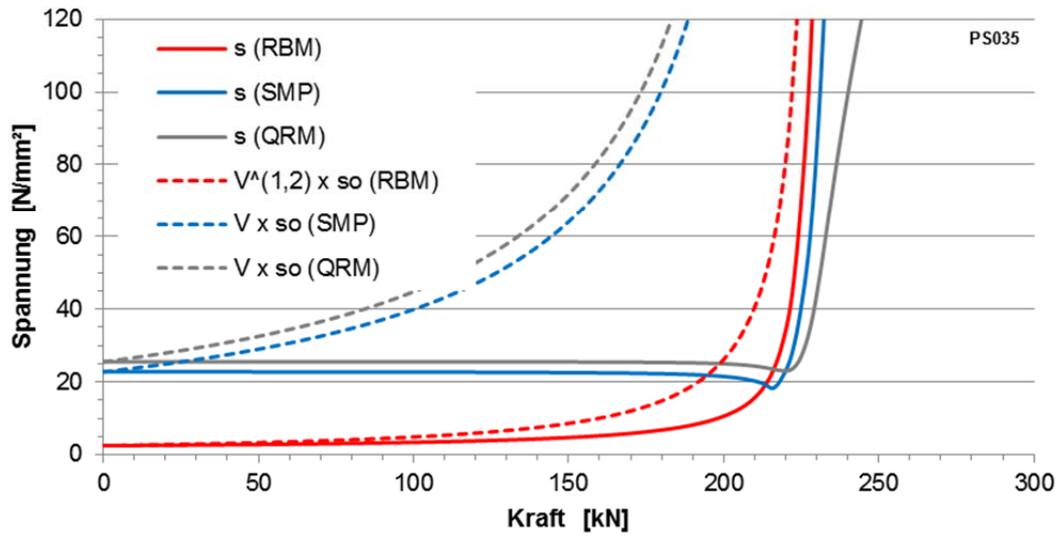
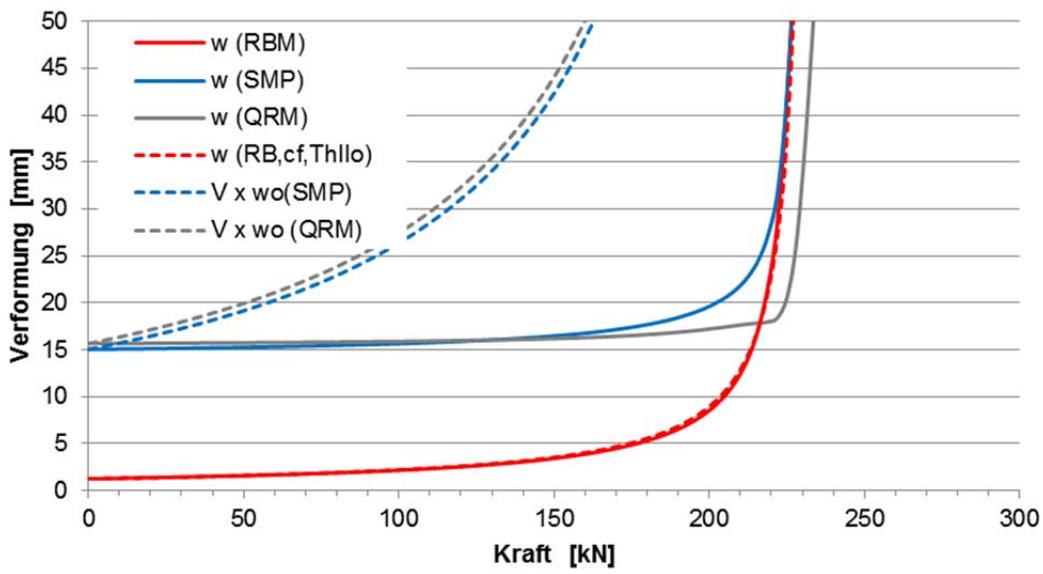


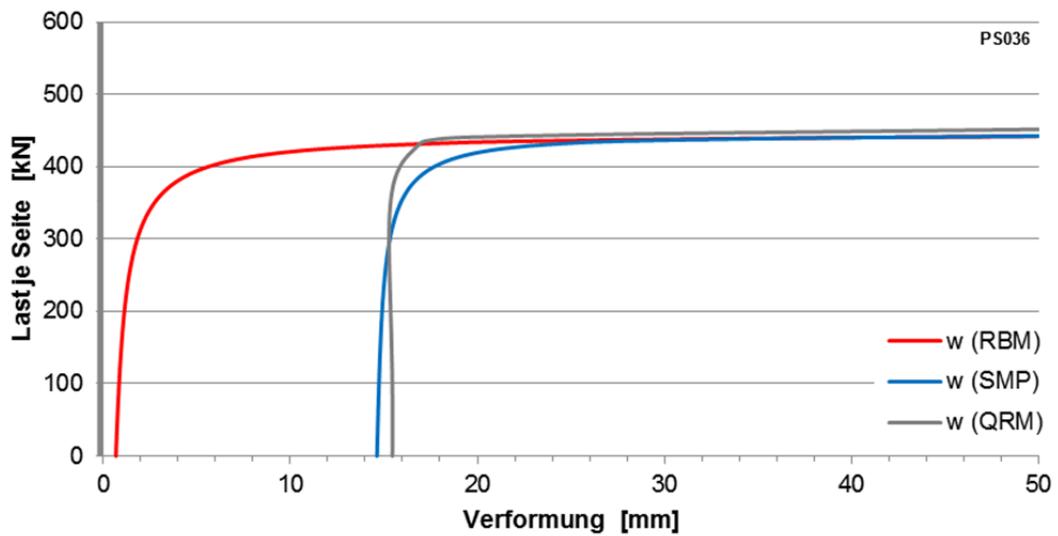
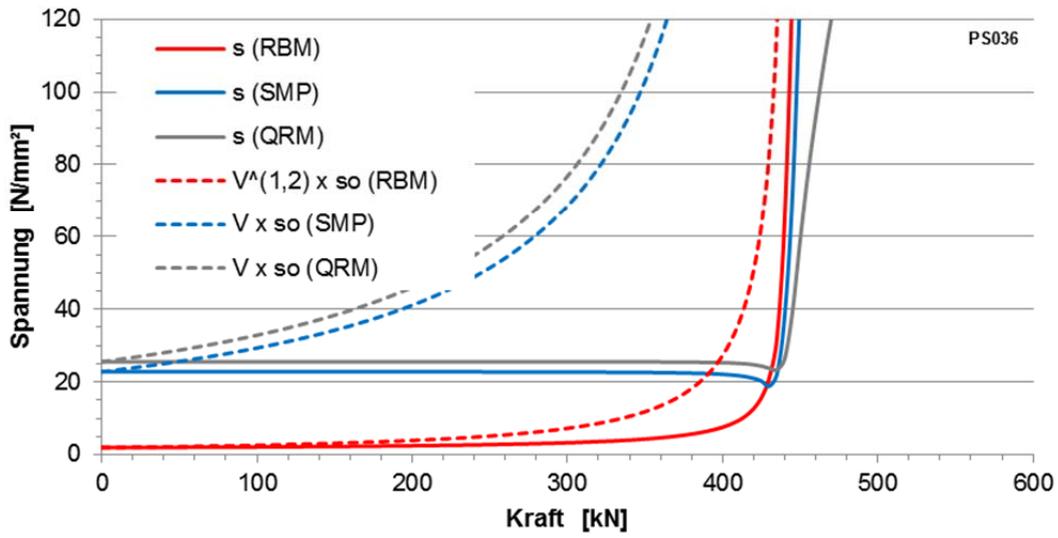
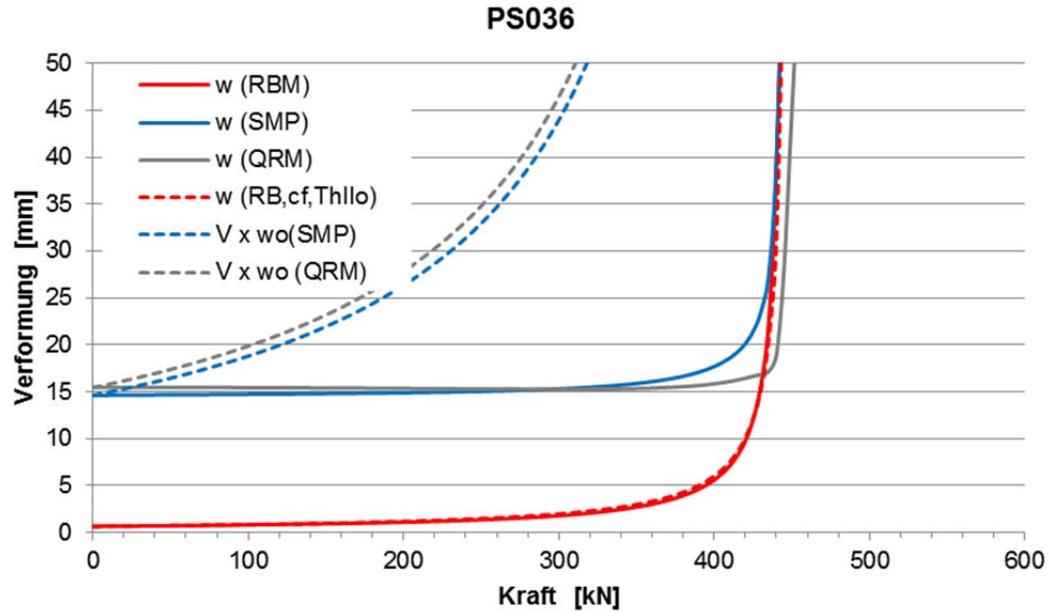
PS033



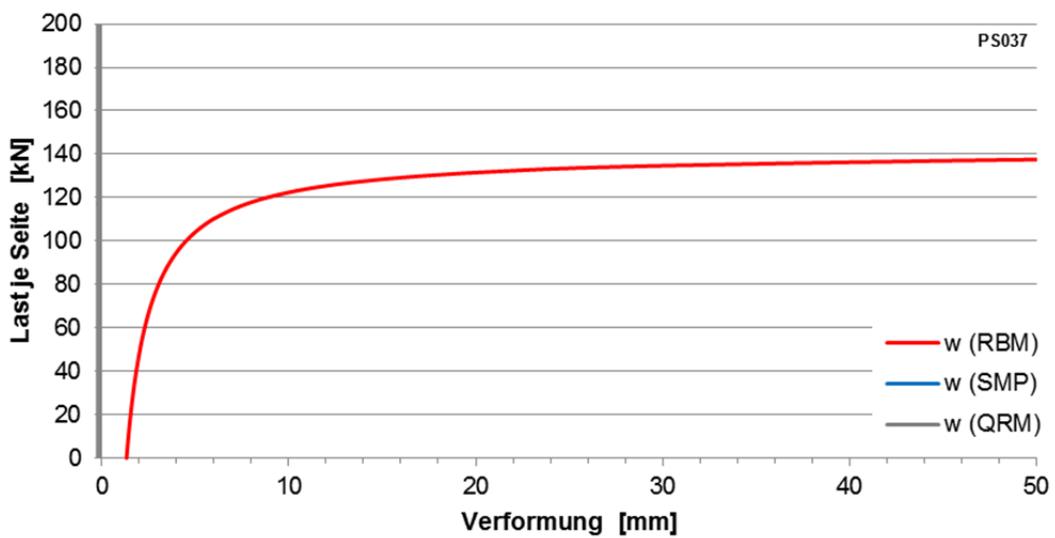
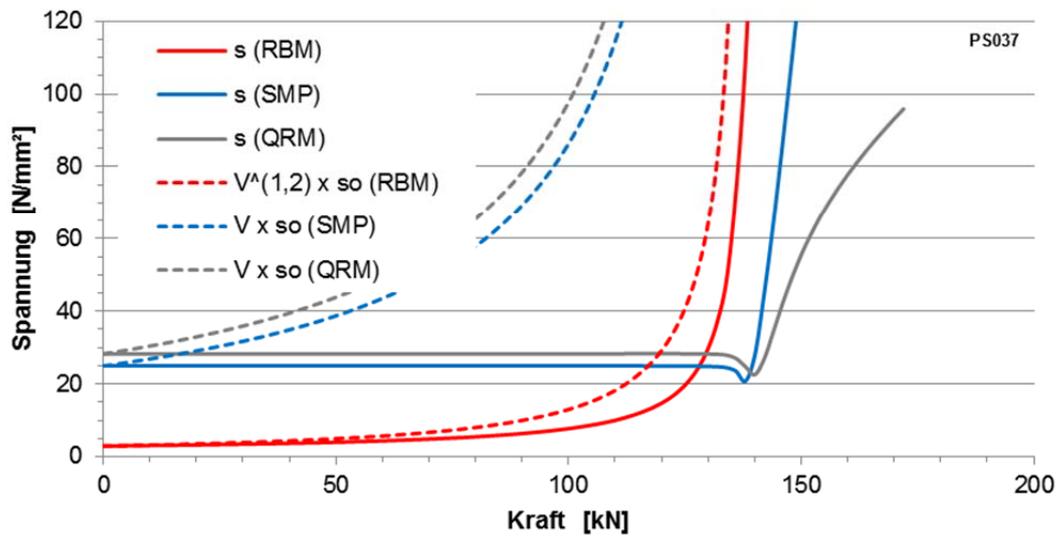
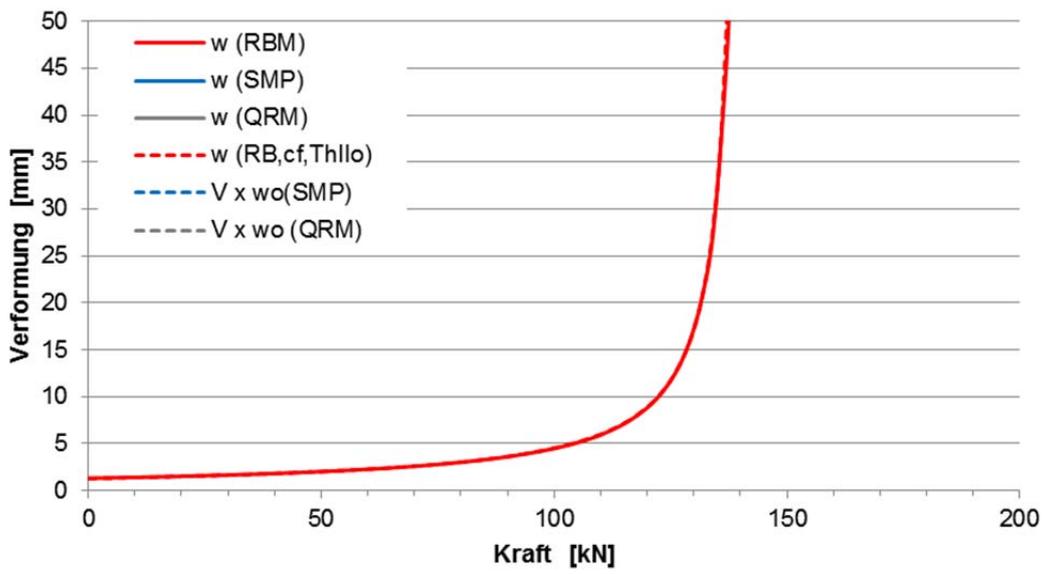


PS035

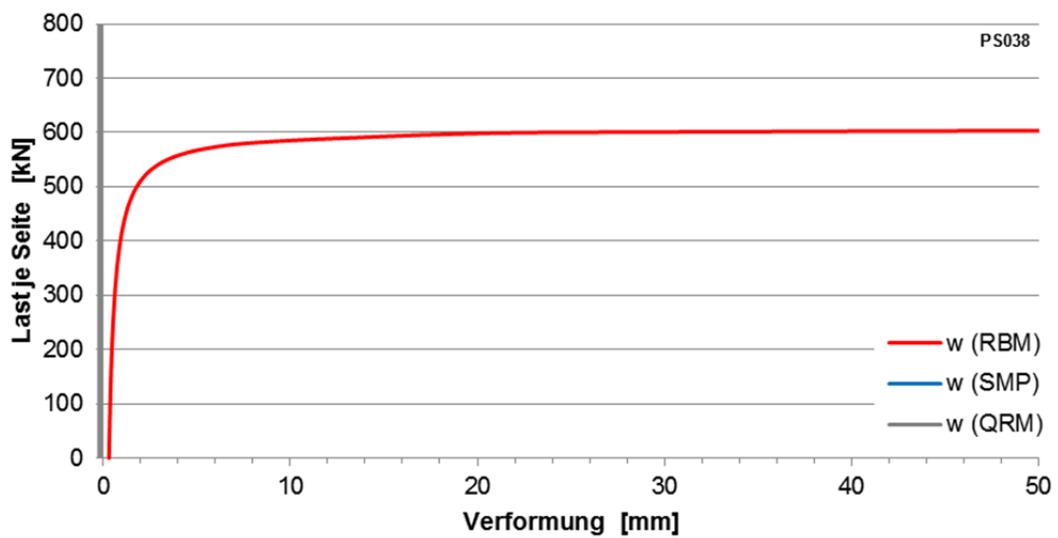
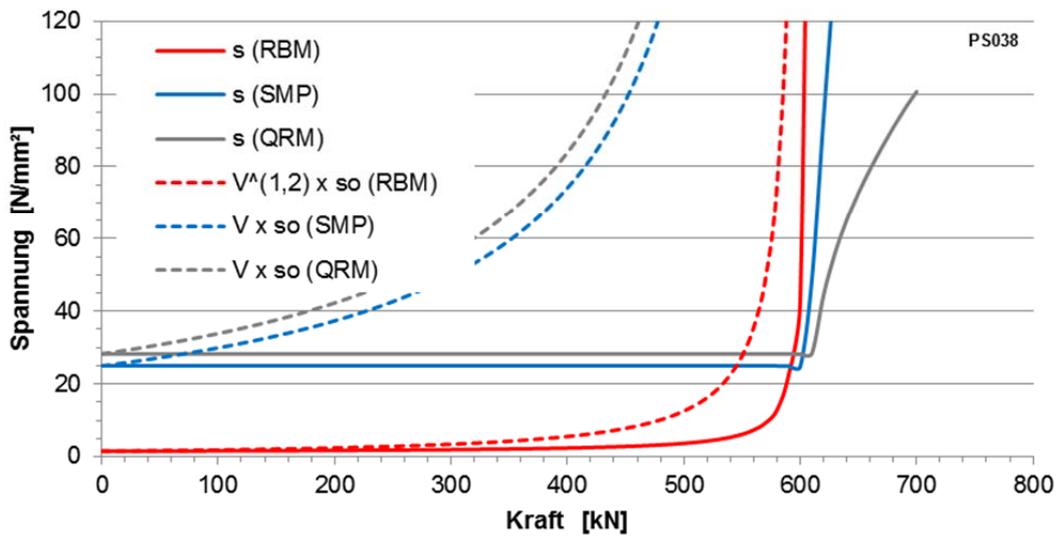
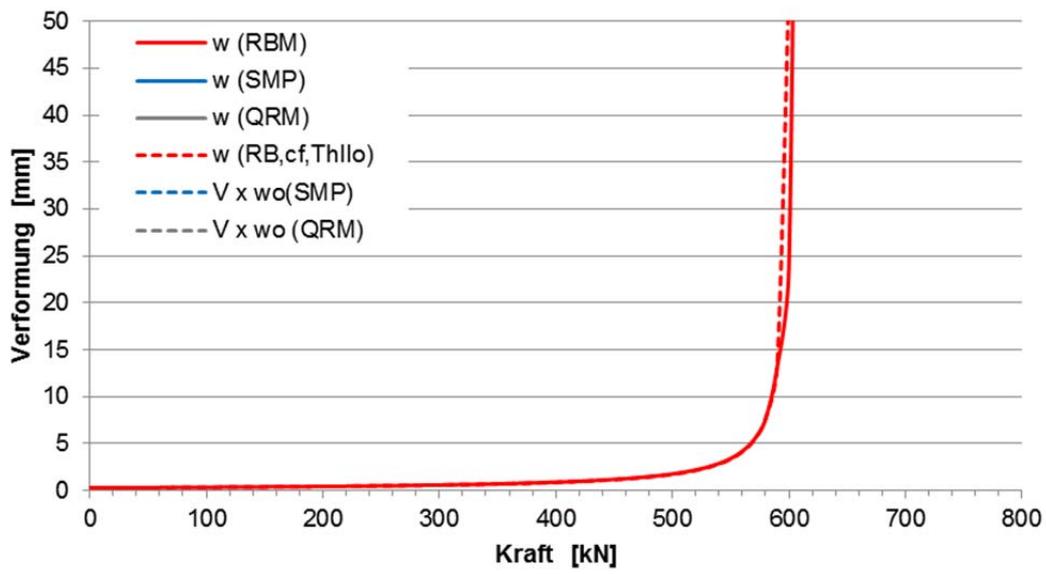




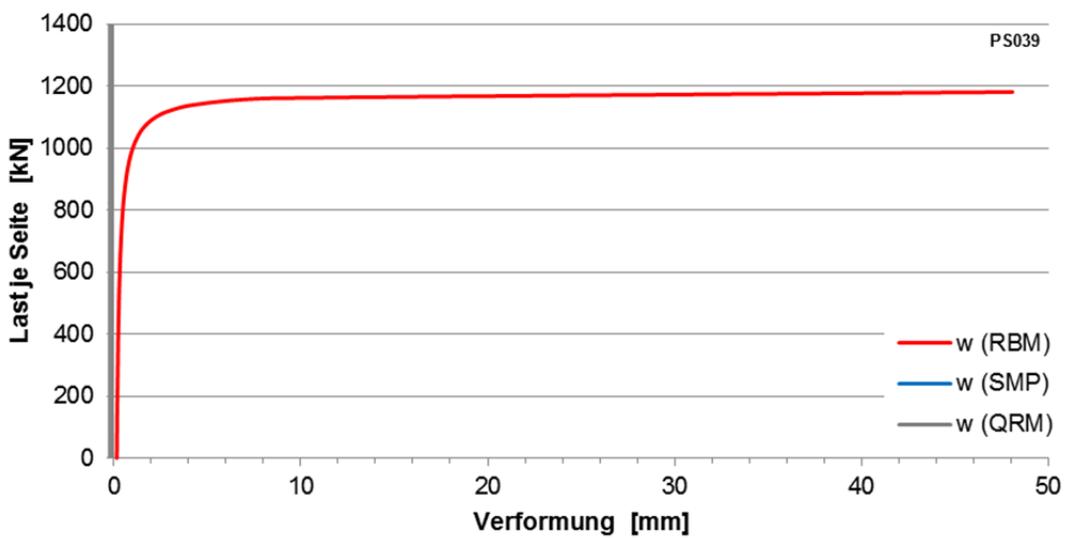
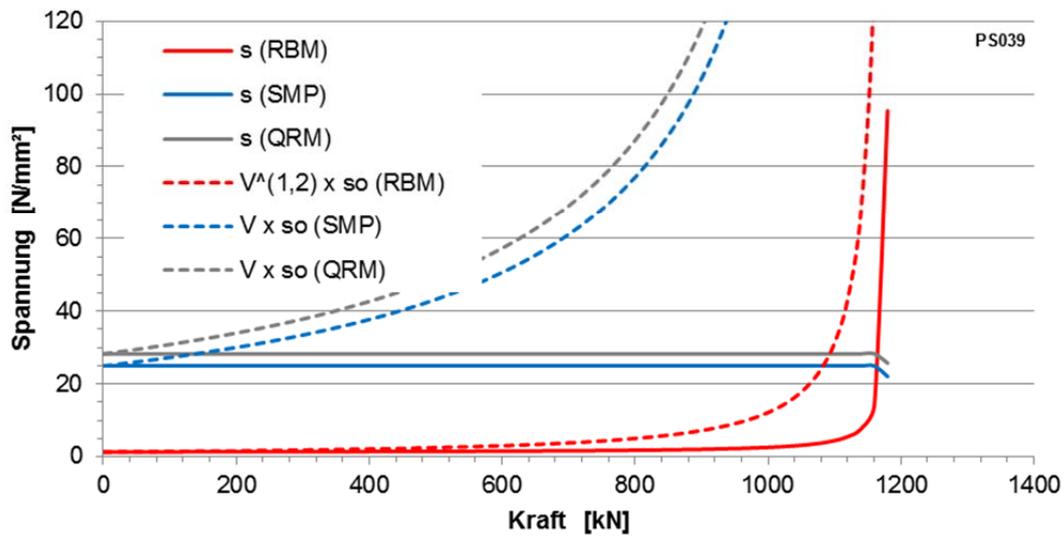
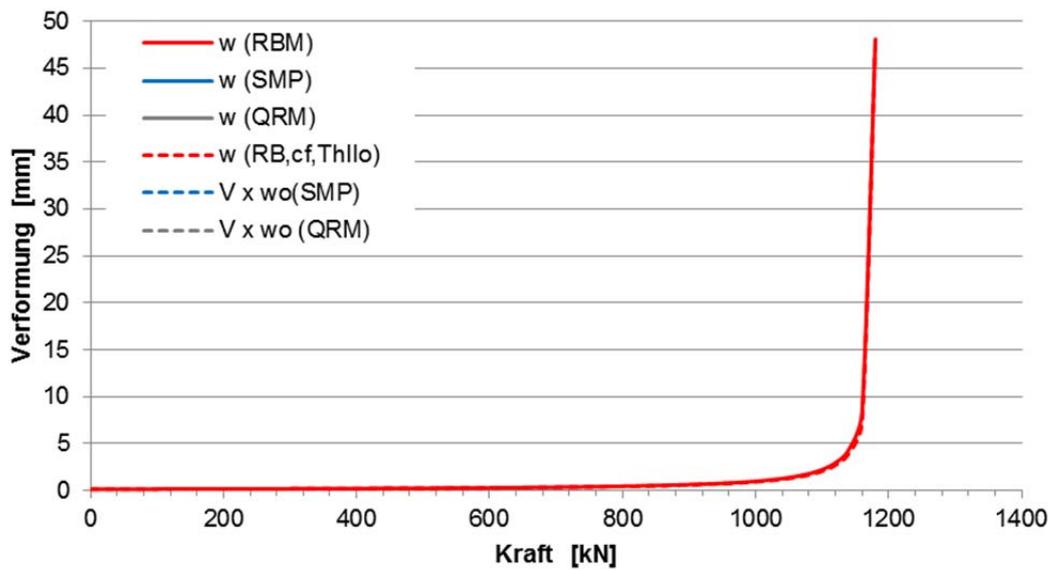
PS037

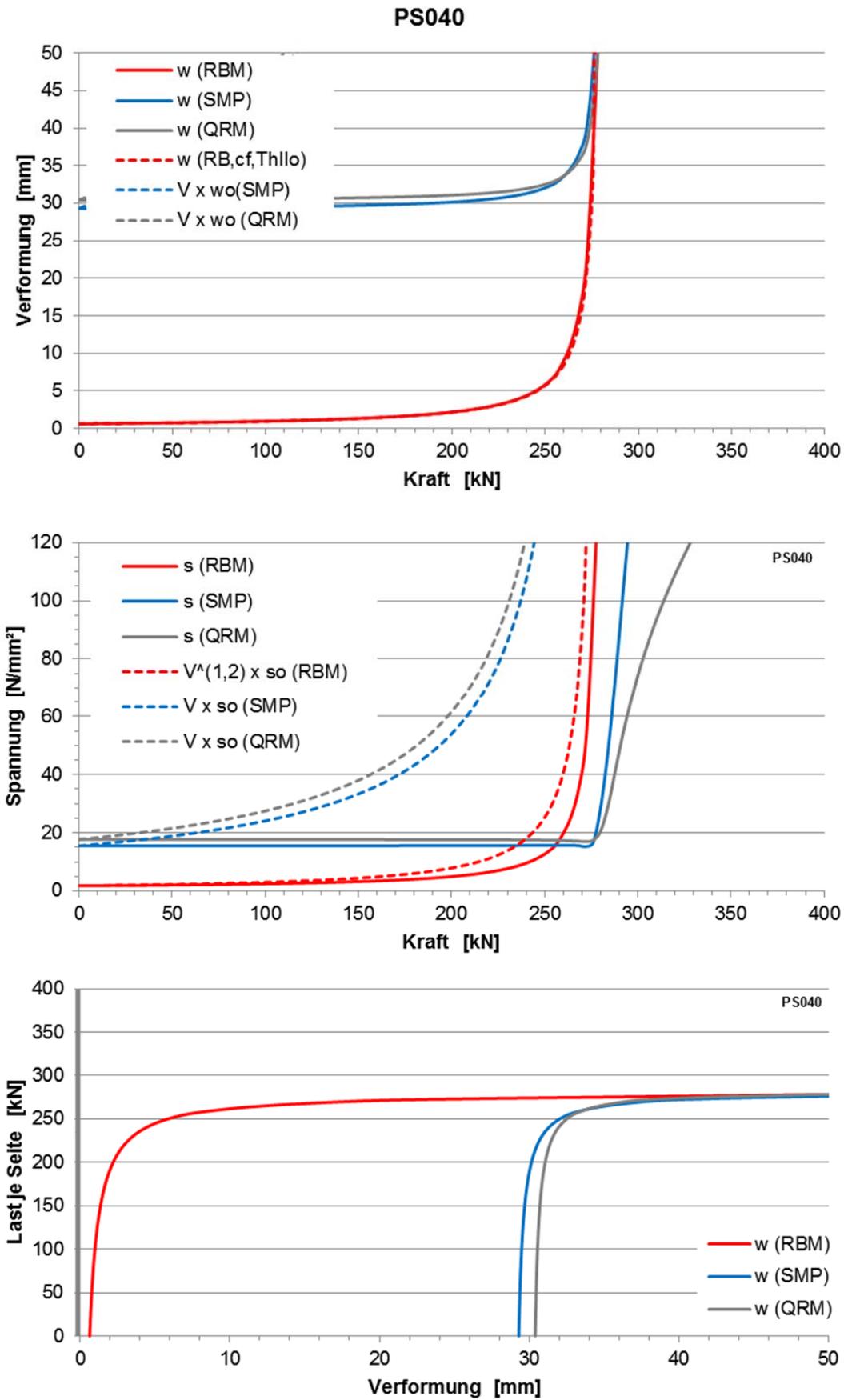


PS038

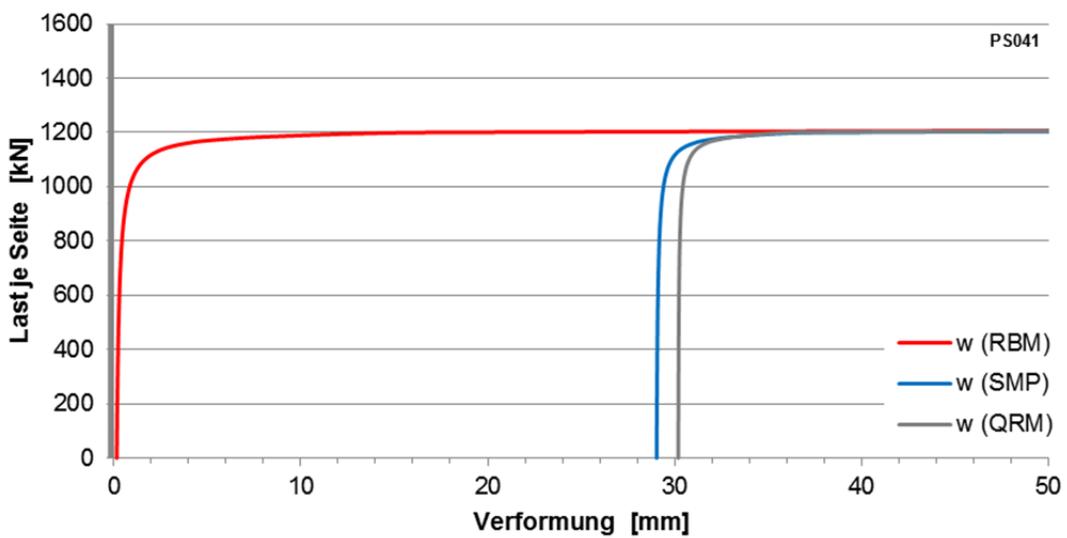
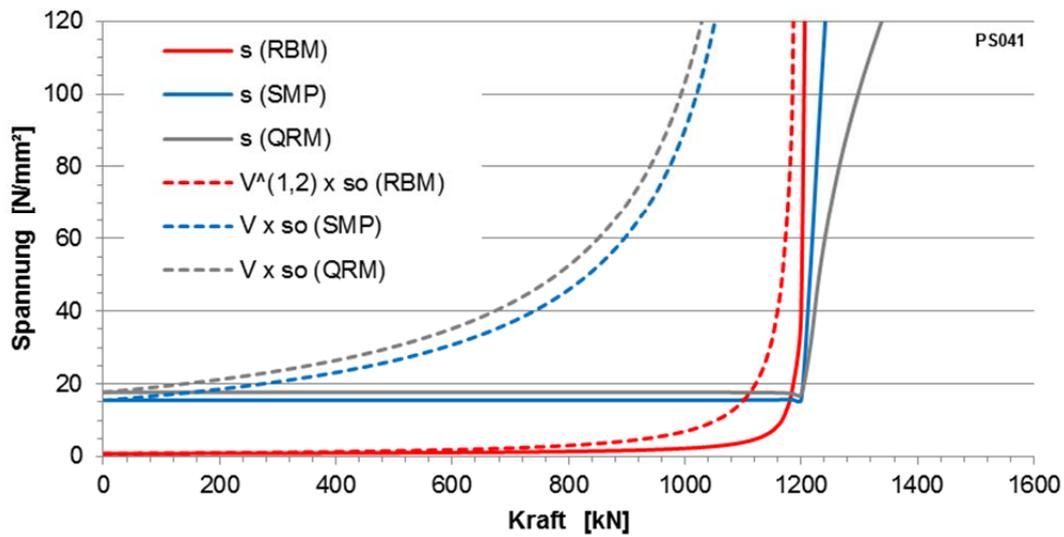
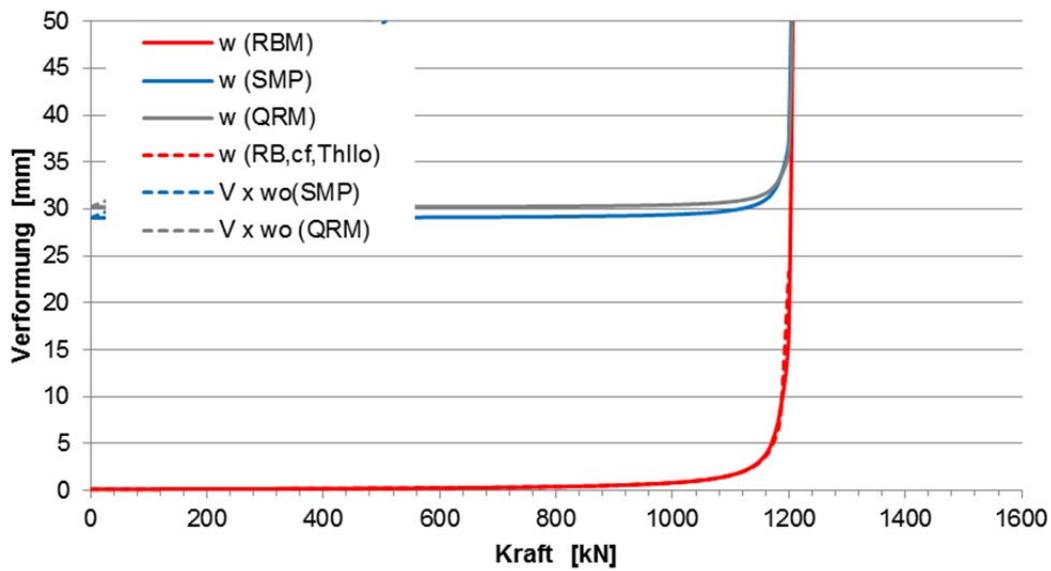


PS039

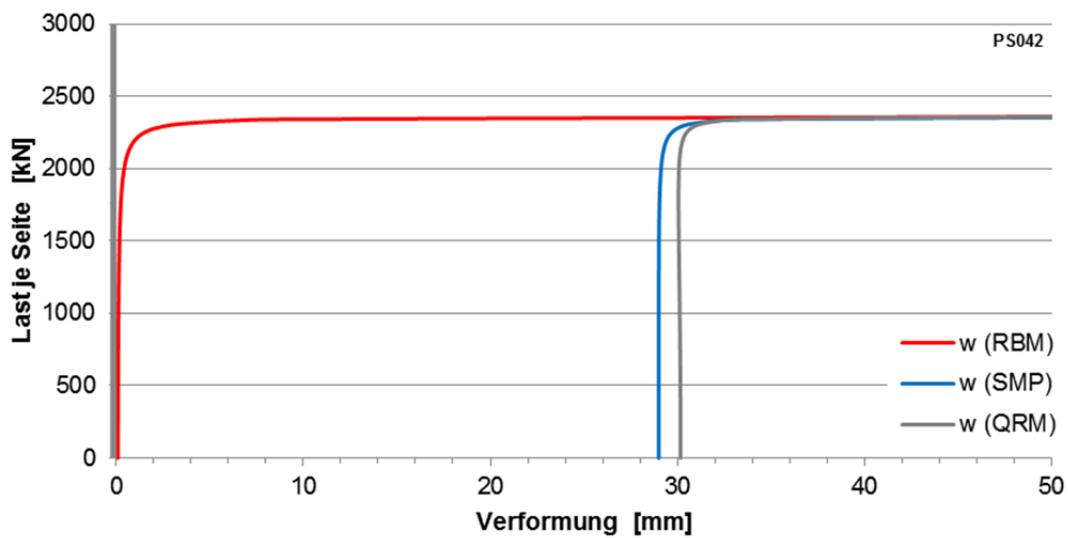
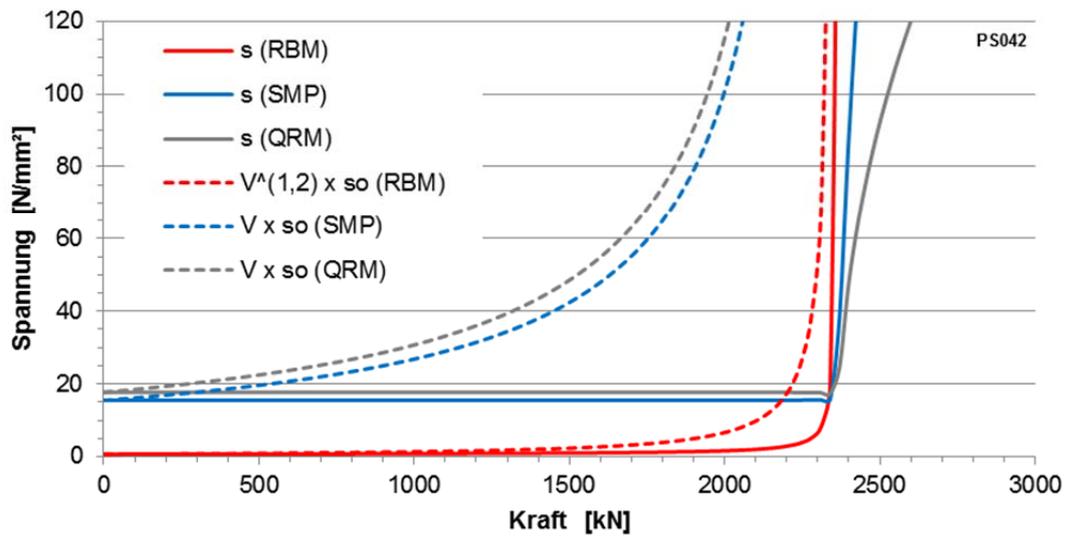
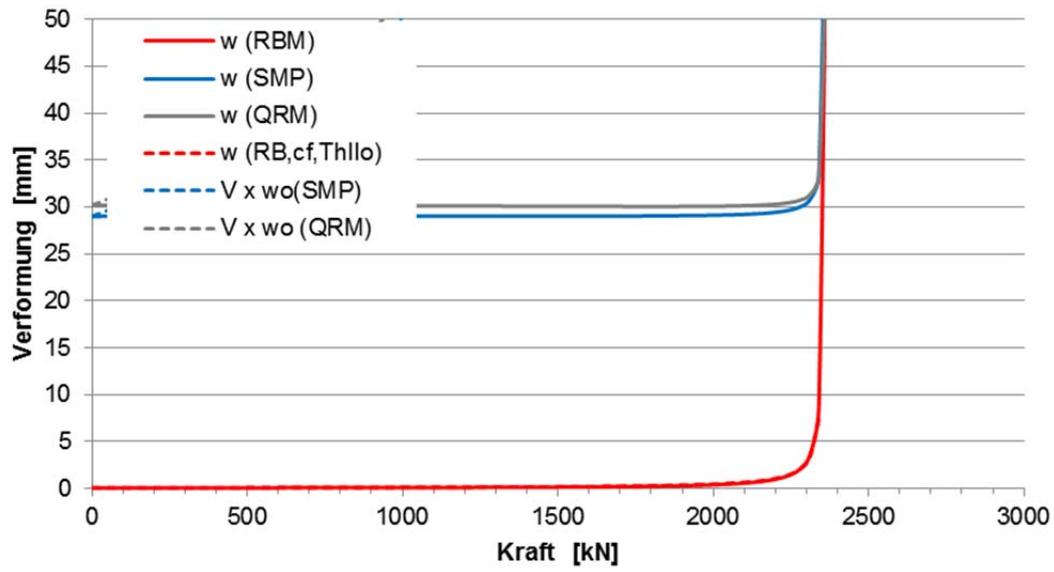




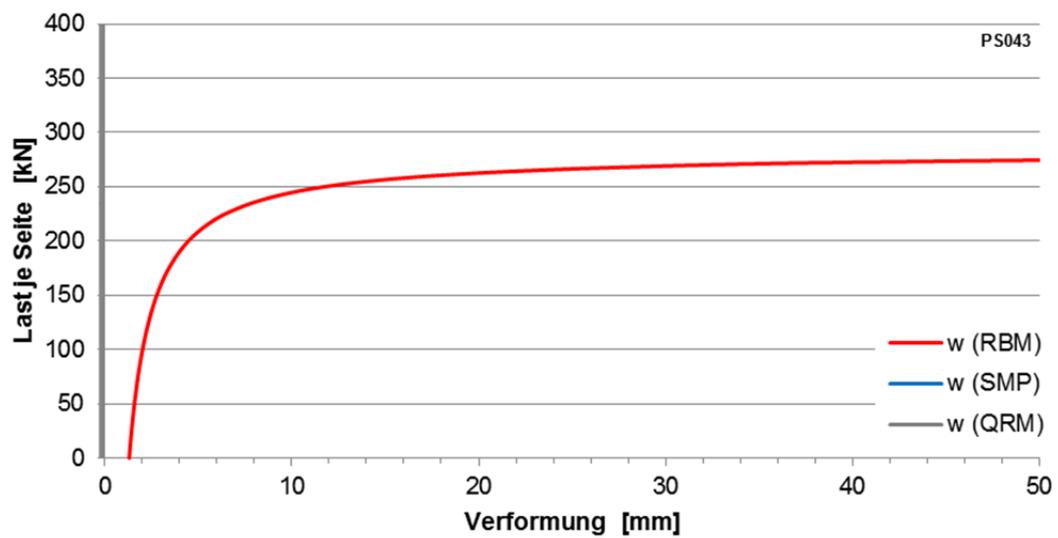
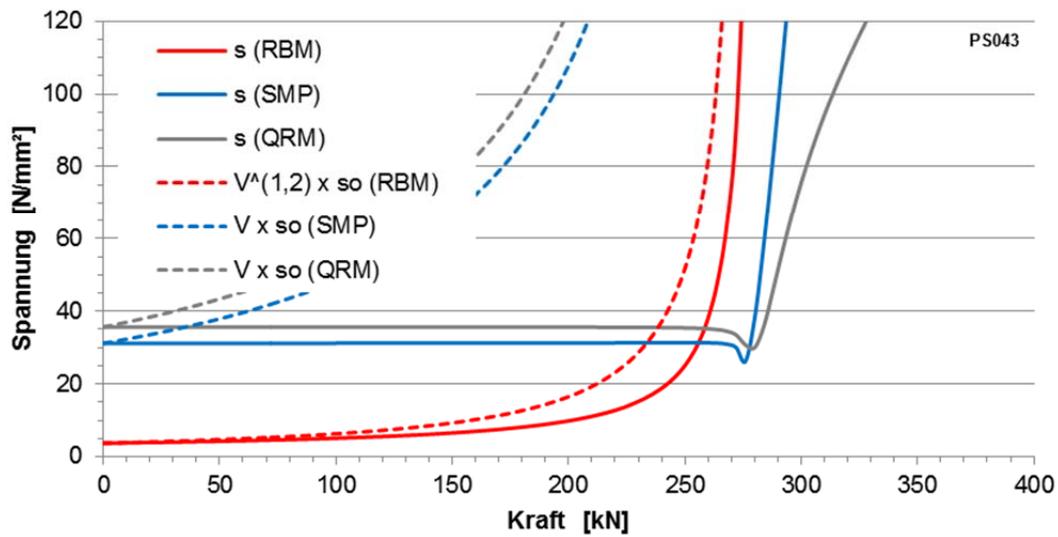
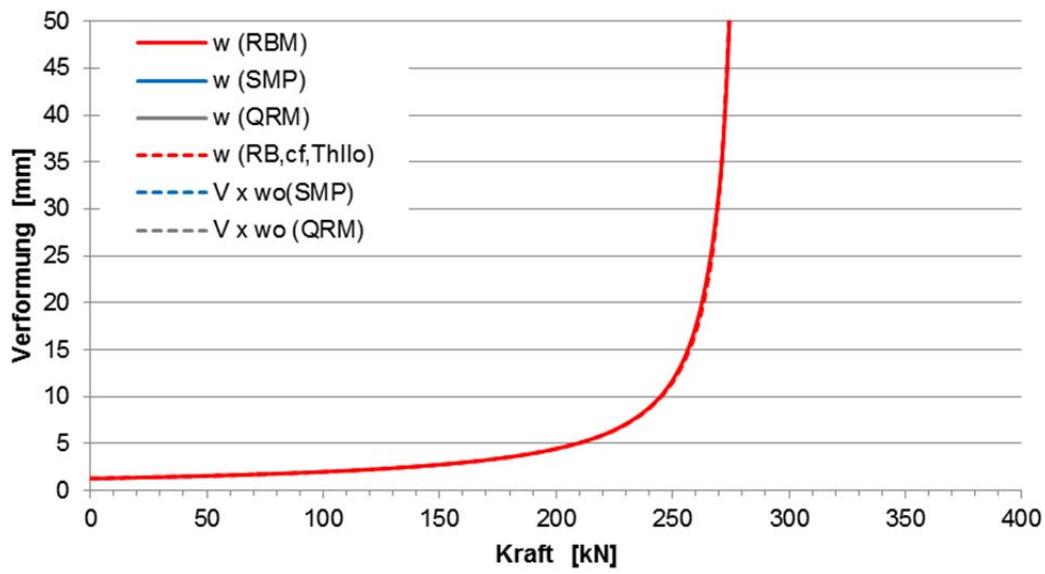
PS041



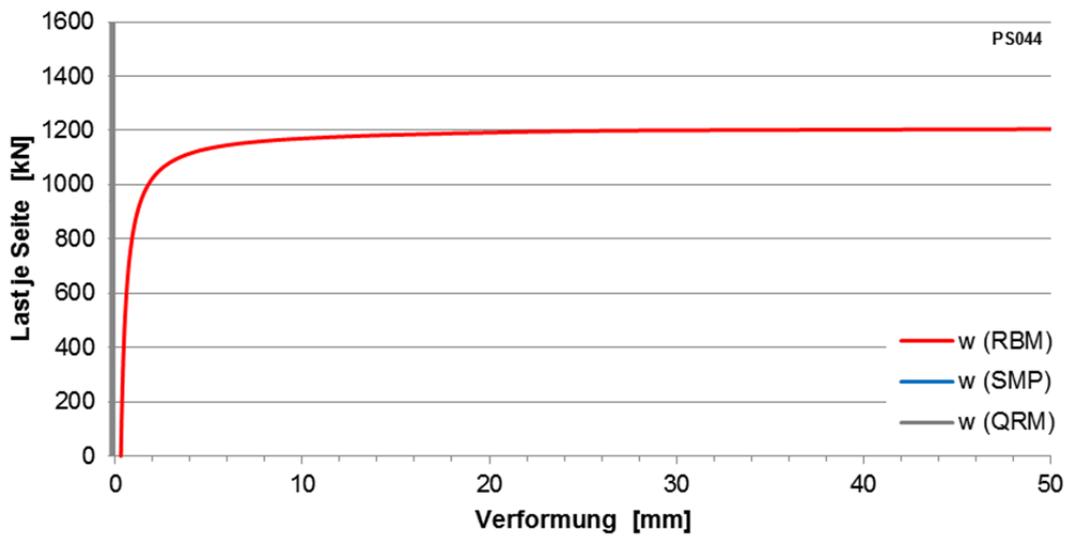
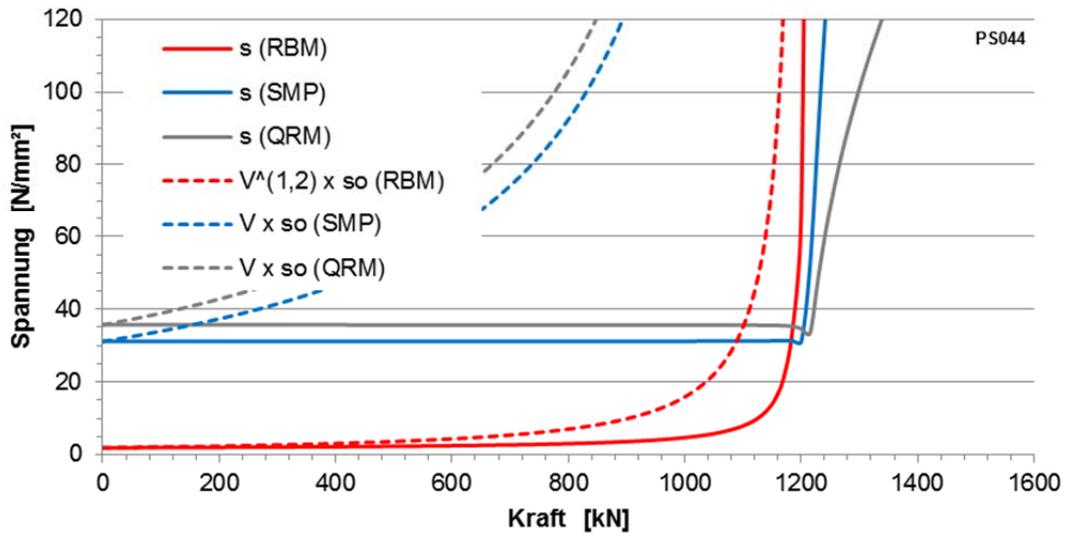
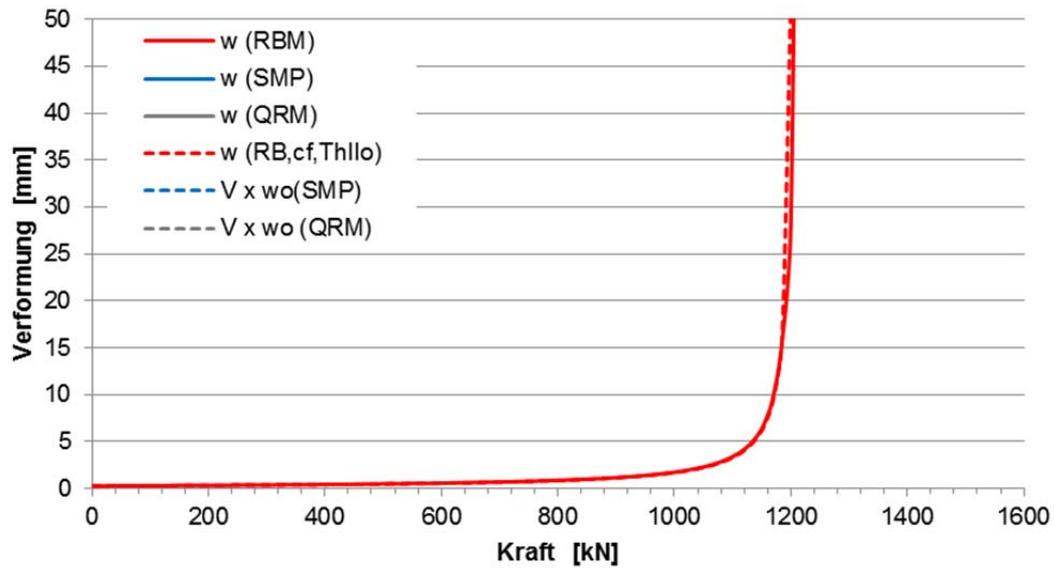
PS042



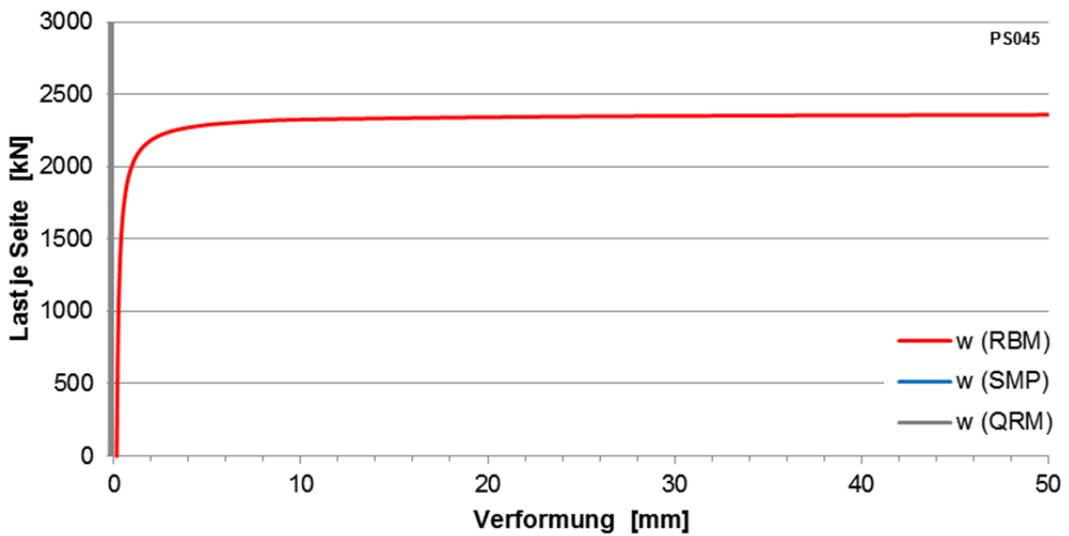
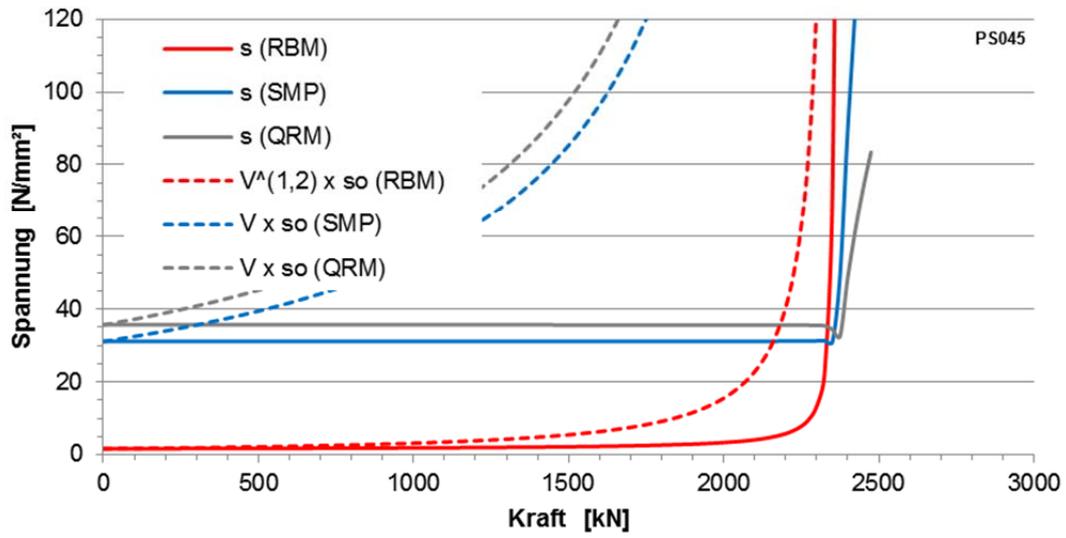
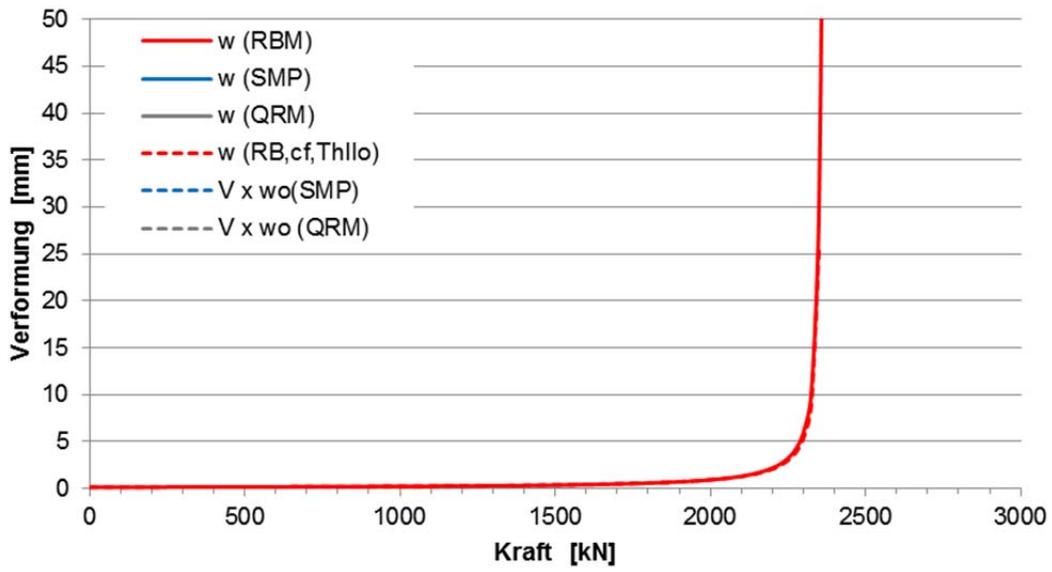
PS043



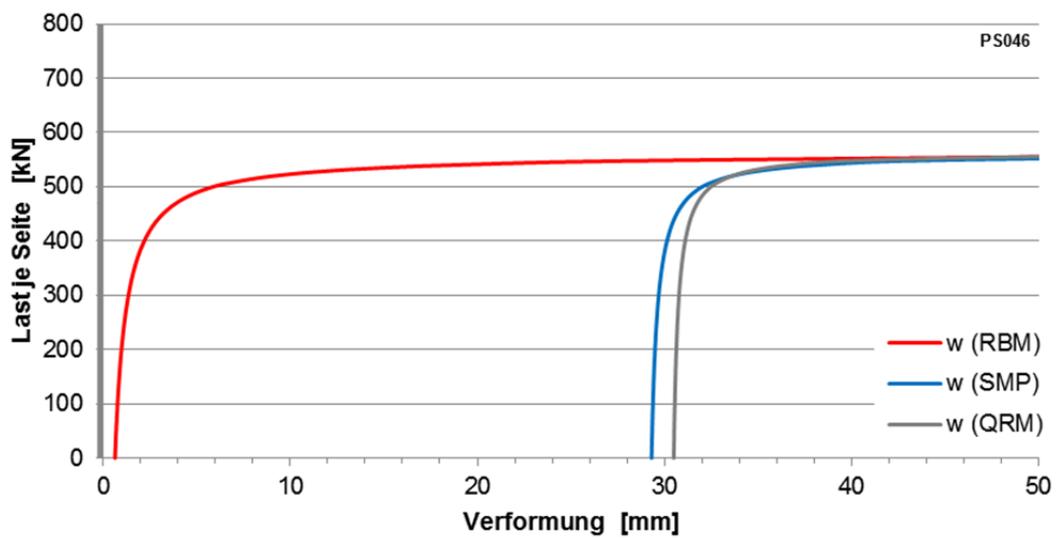
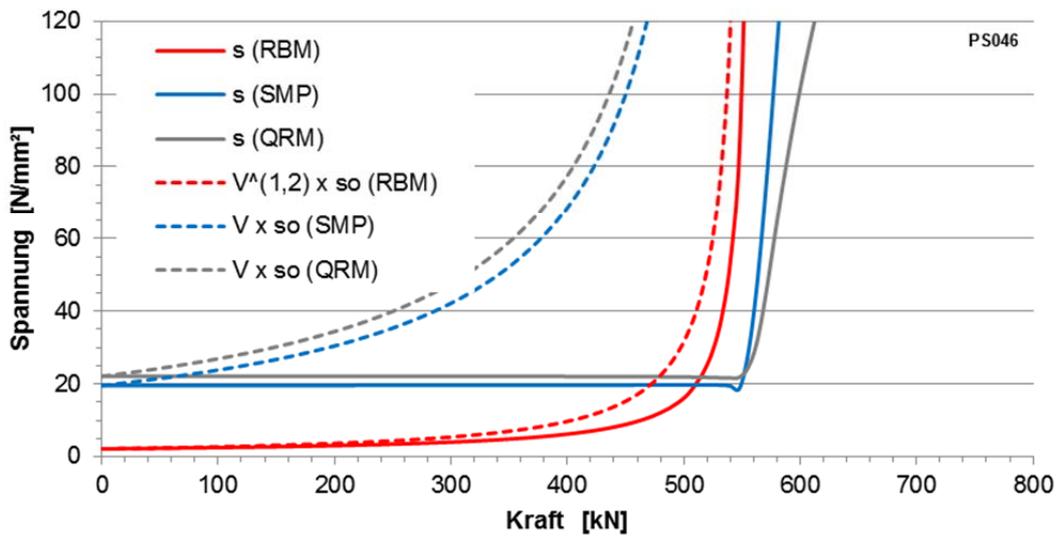
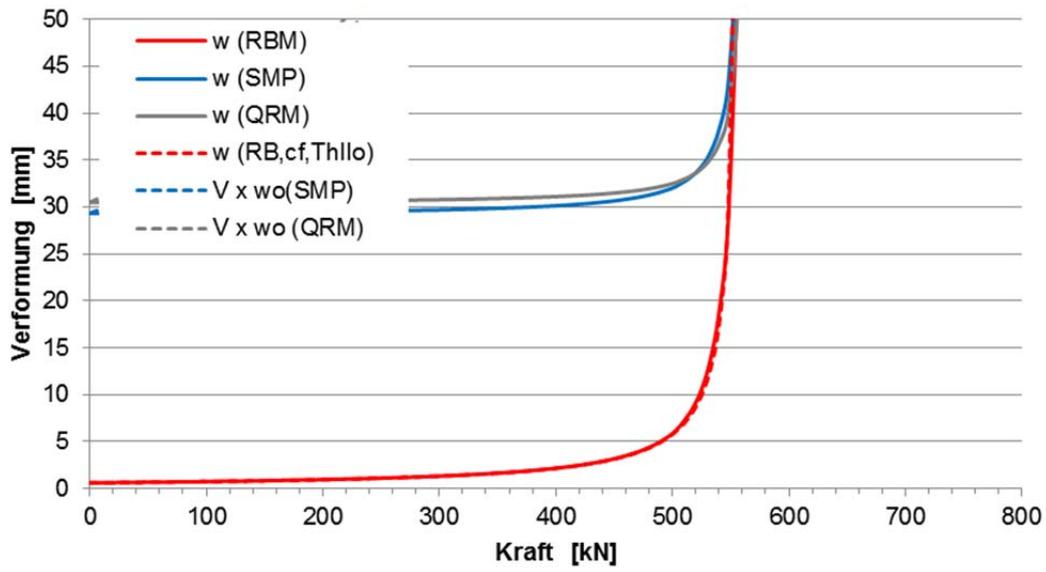
PS044



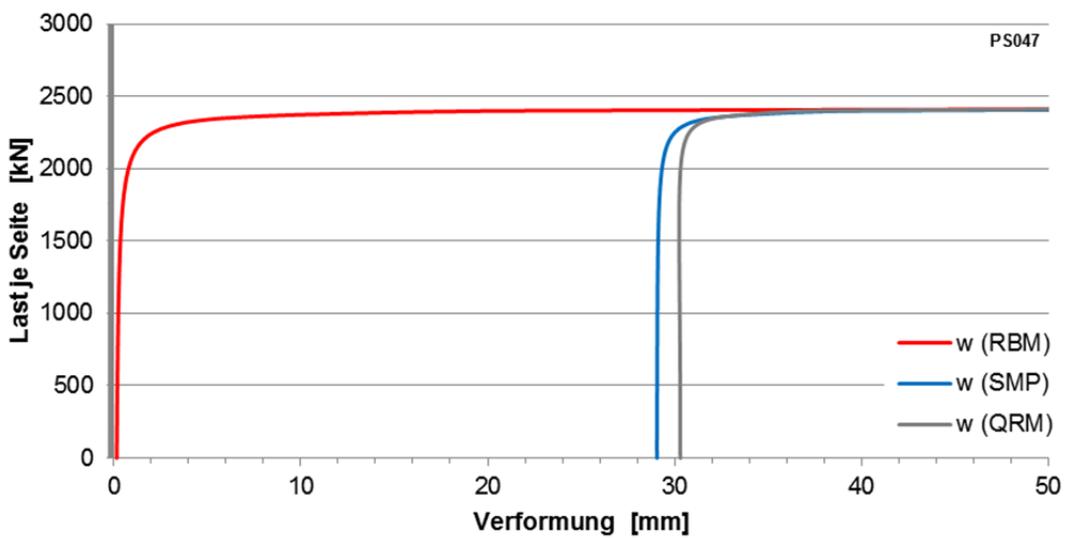
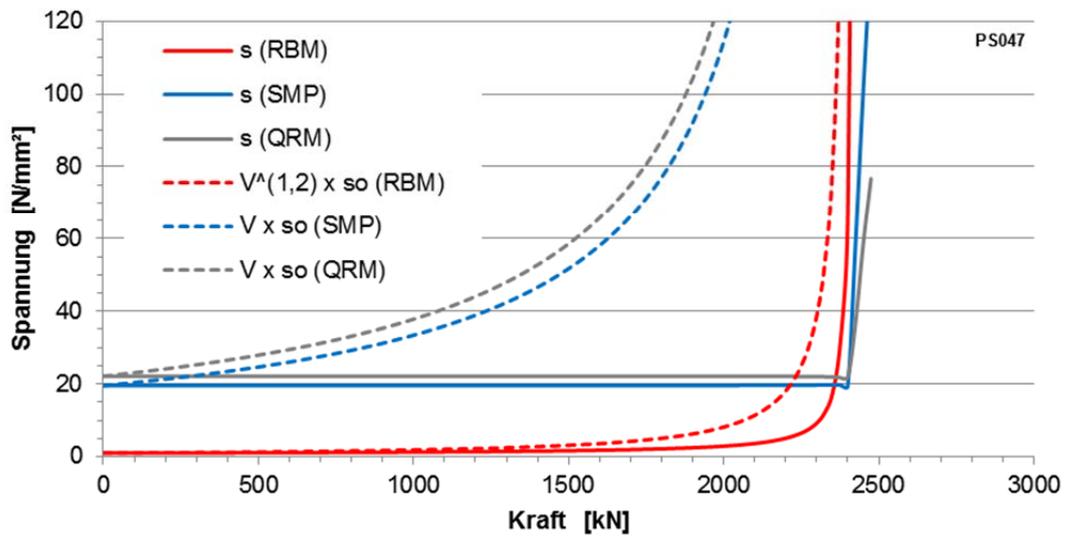
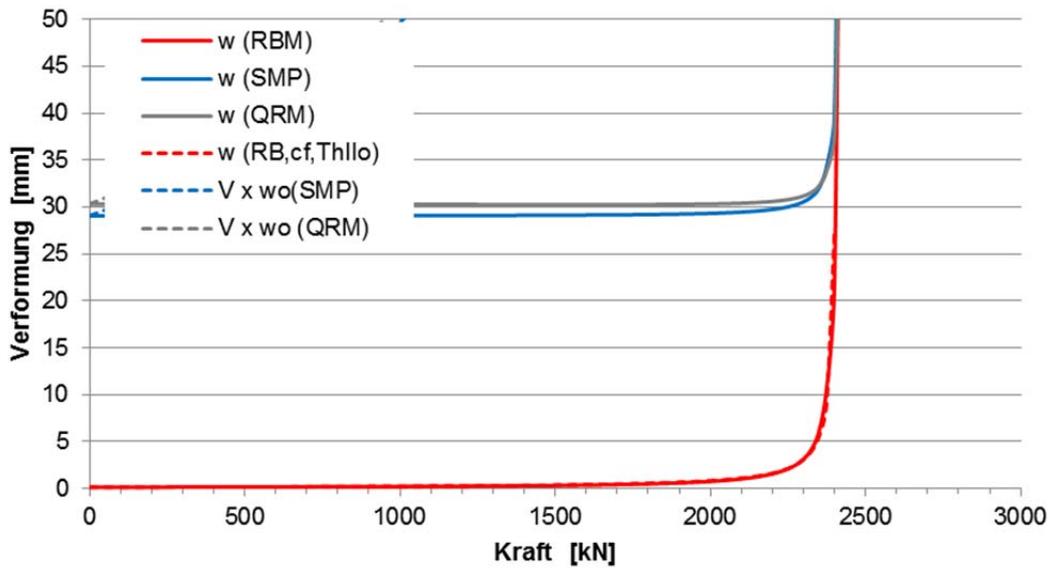
PS045



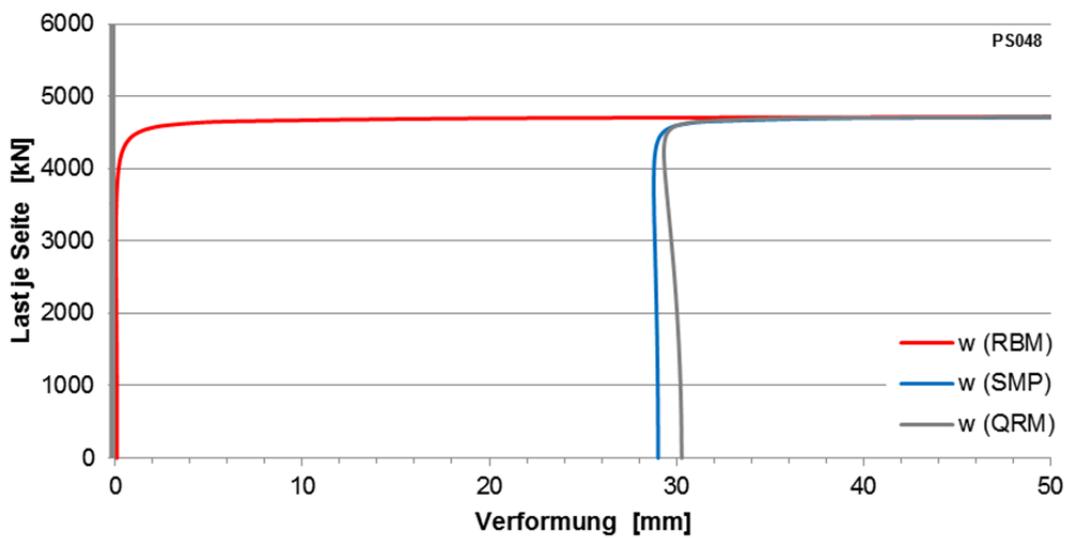
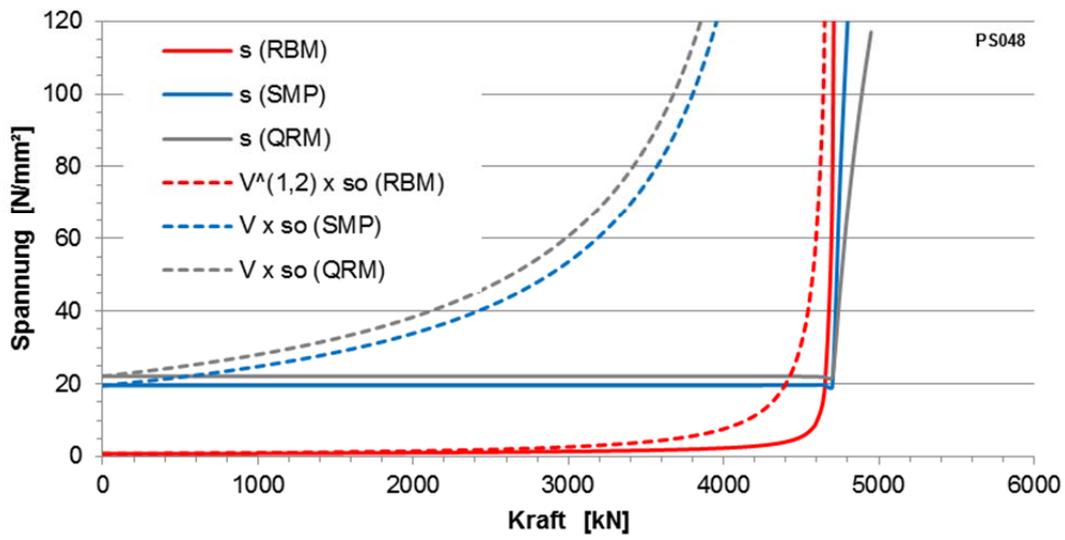
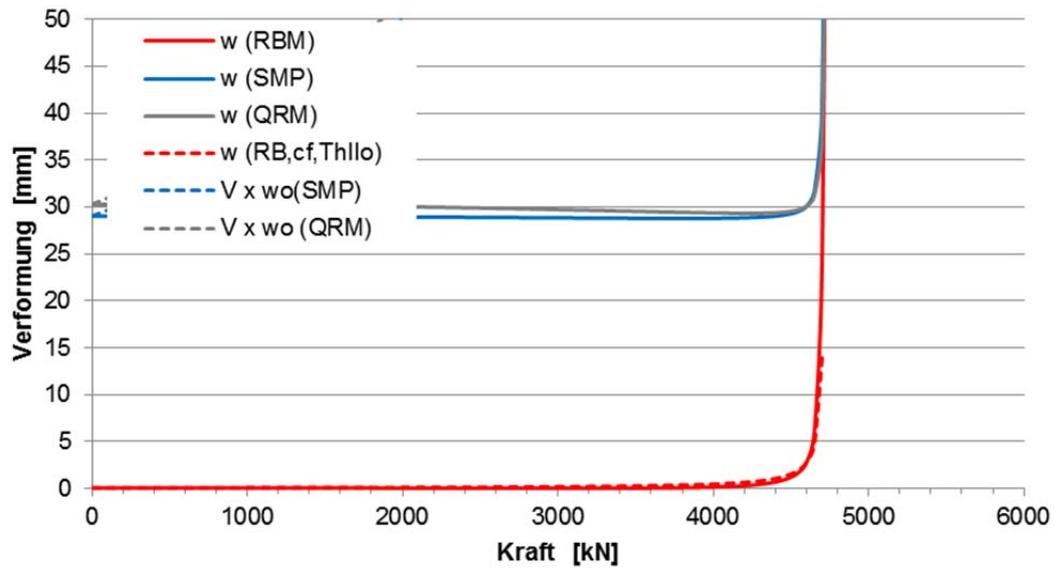
PS046



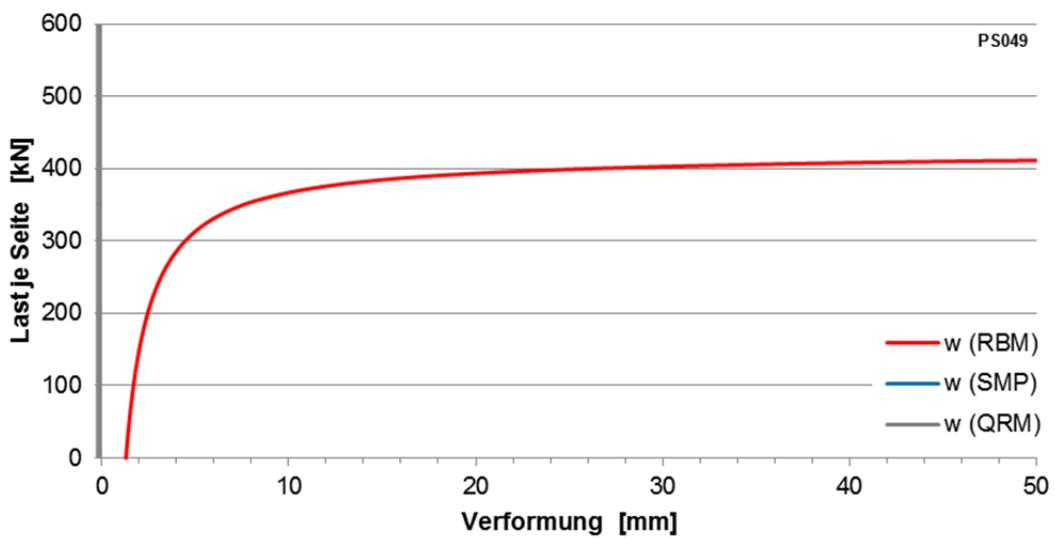
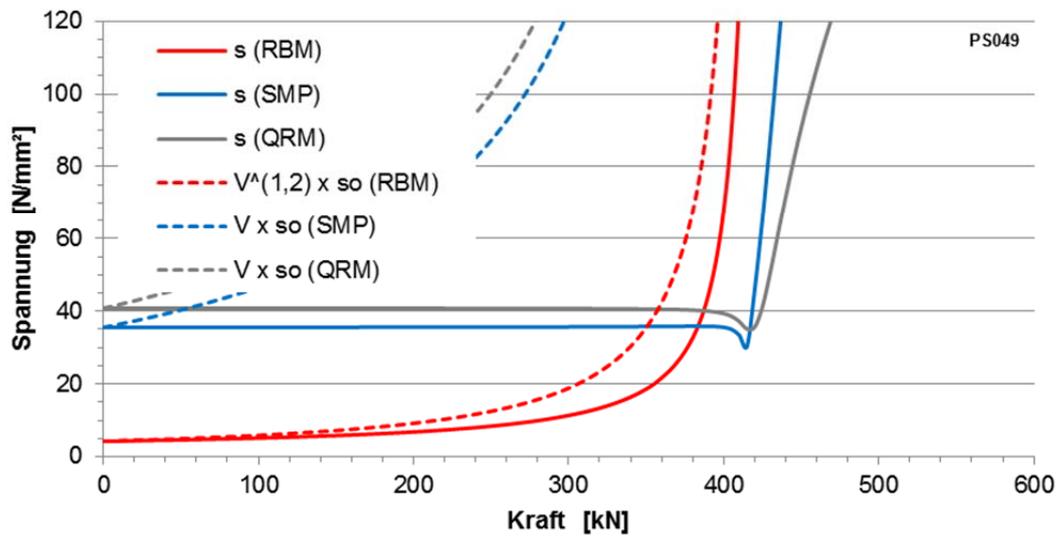
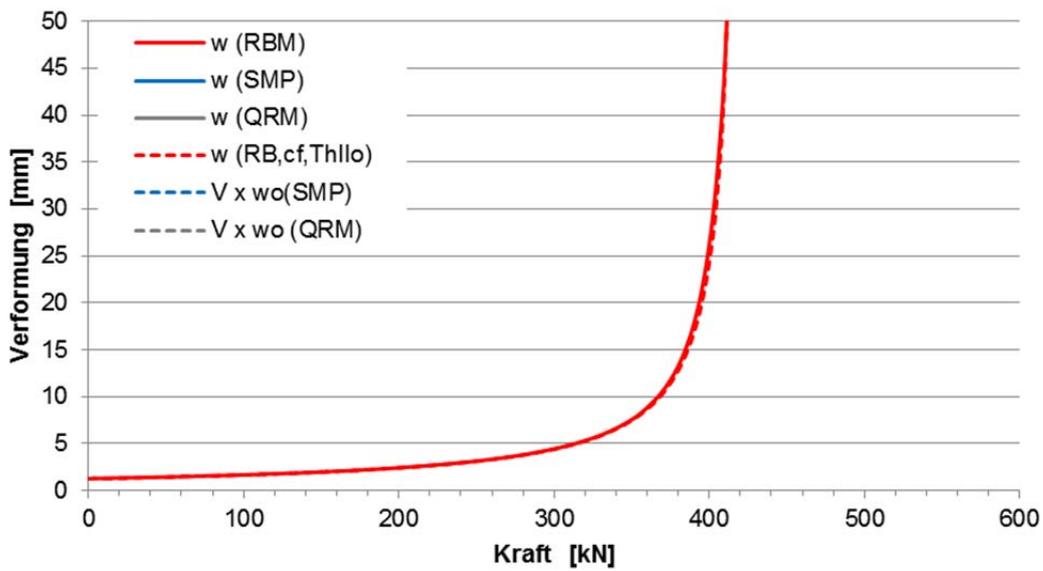
PS047



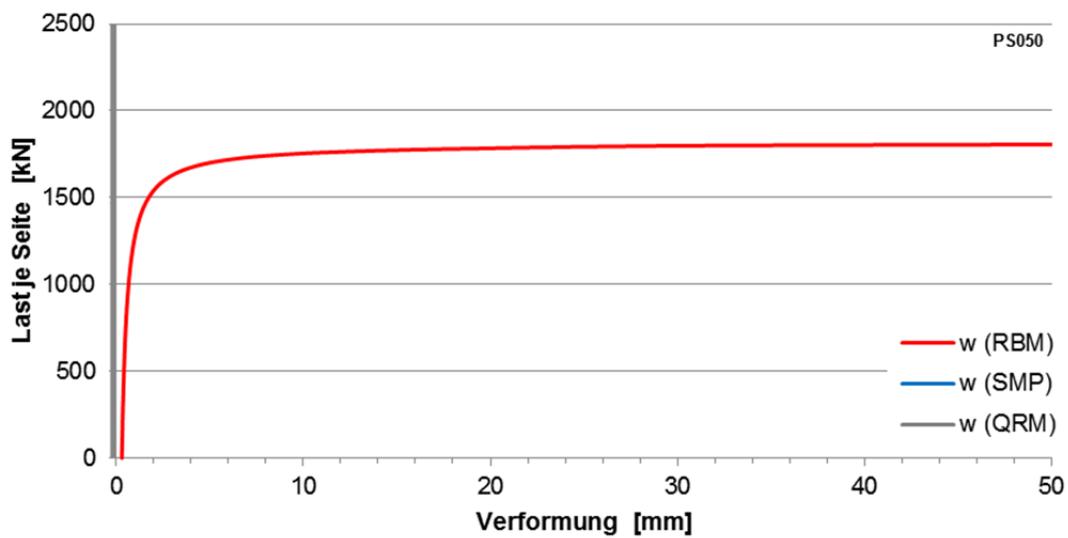
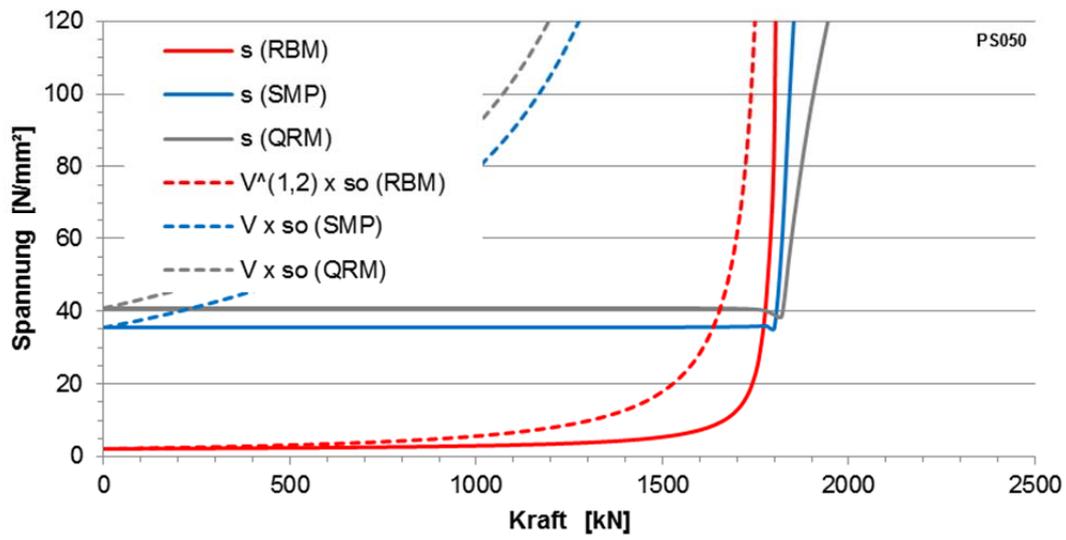
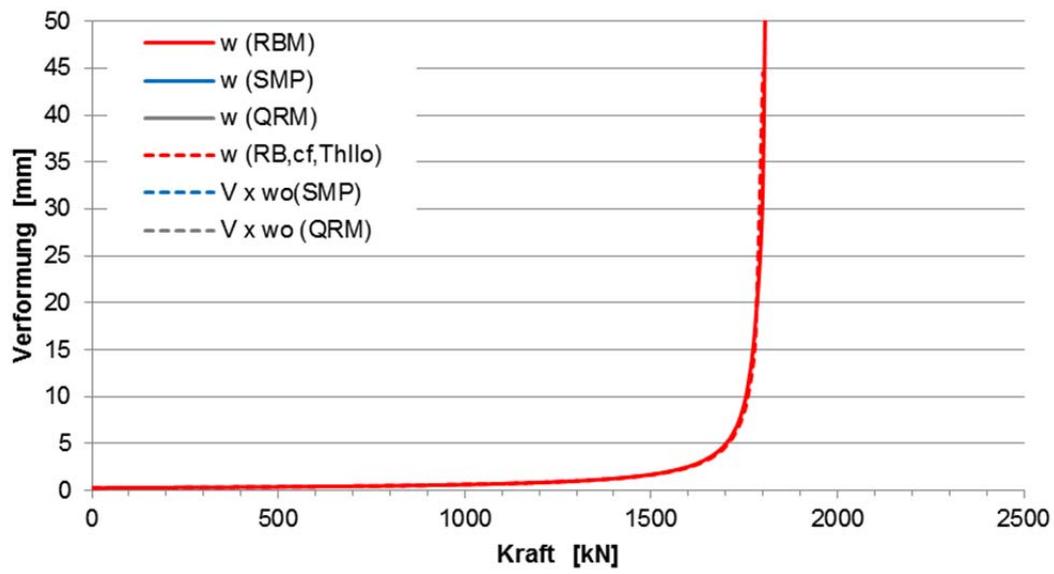
PS048



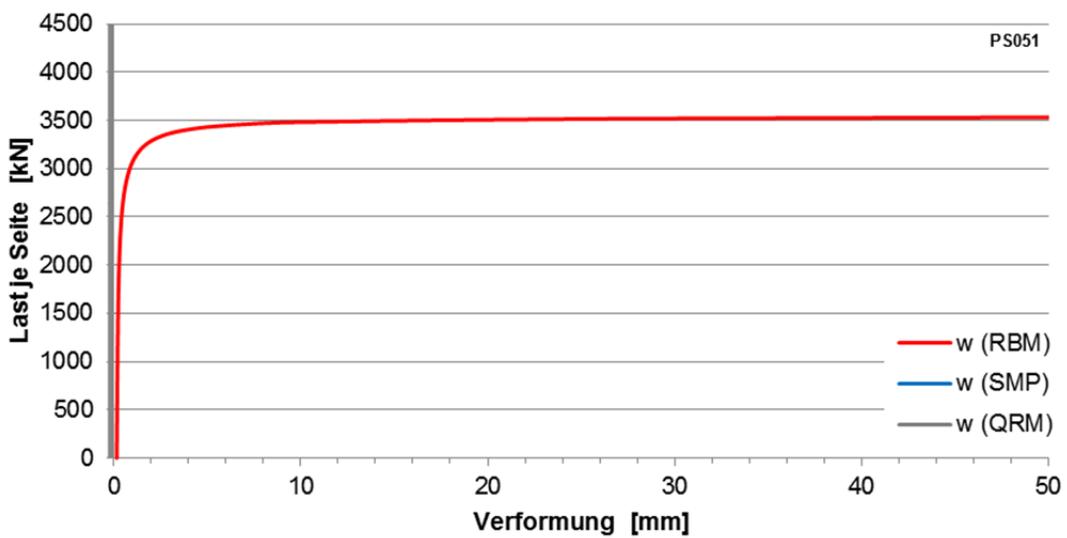
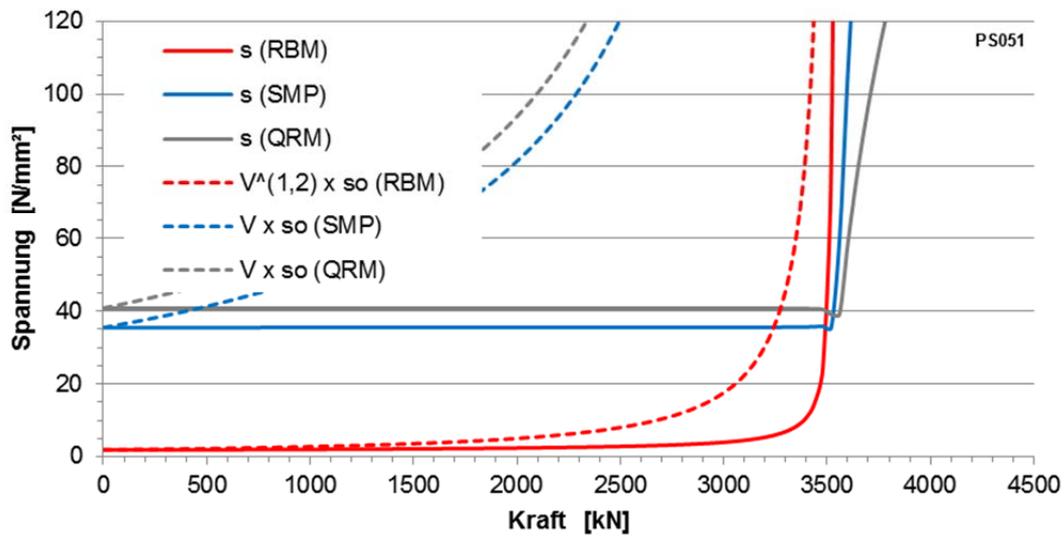
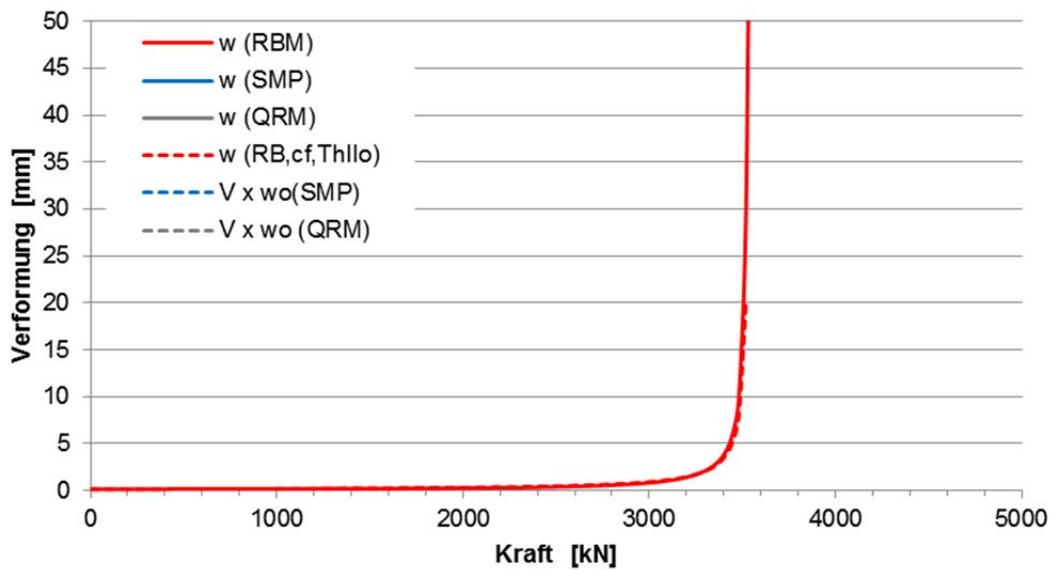
PS049



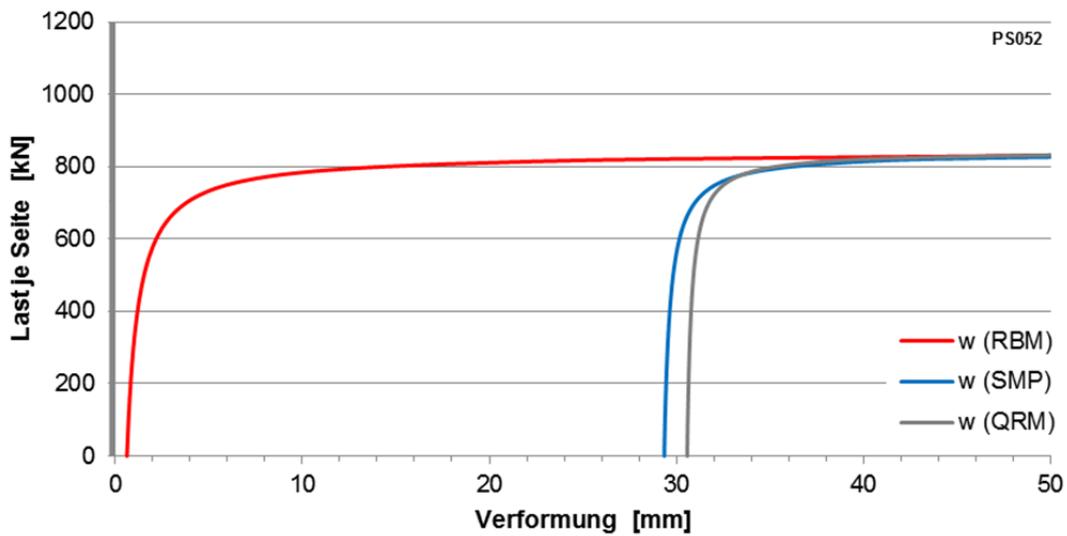
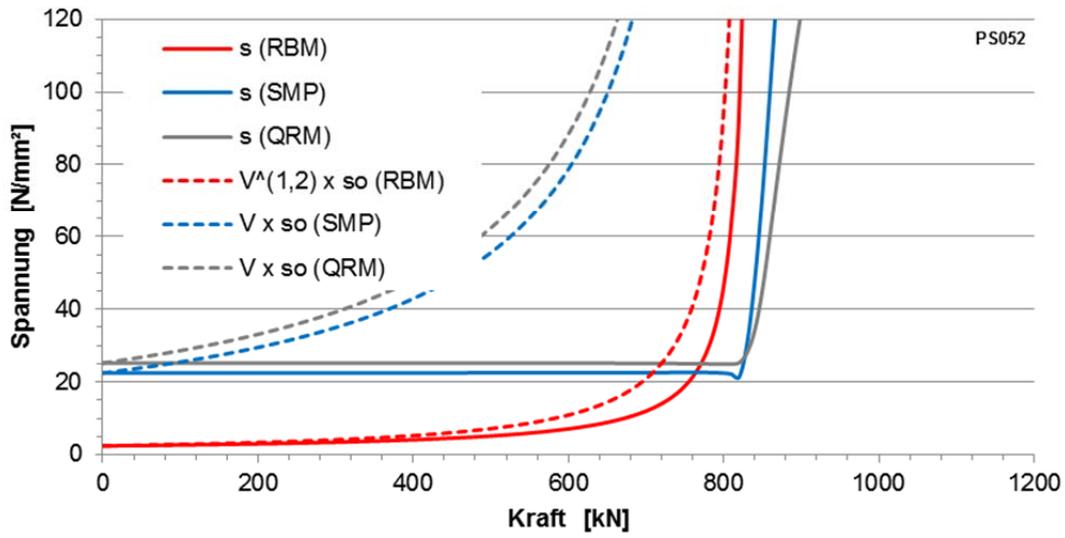
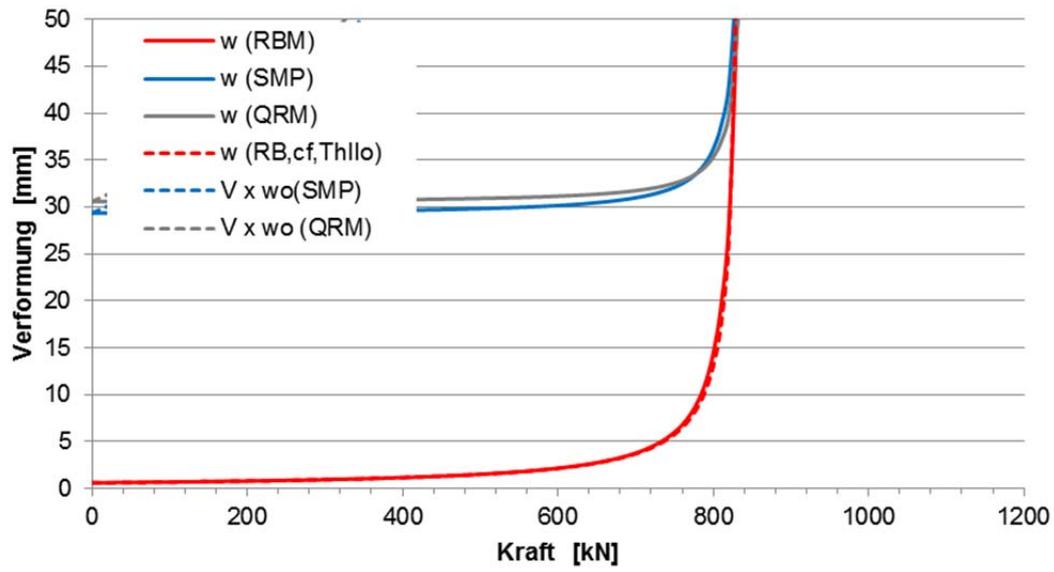
PS050



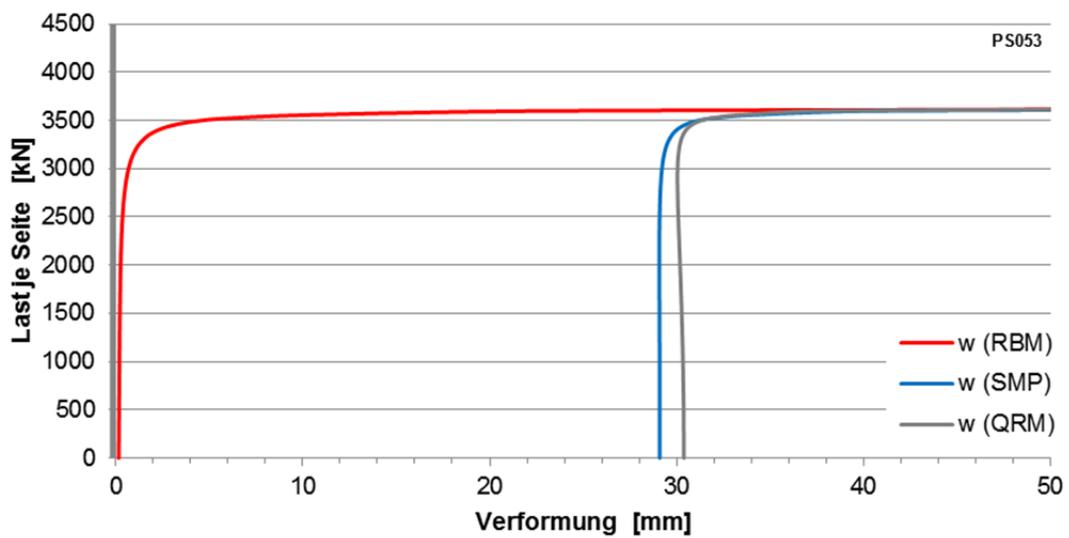
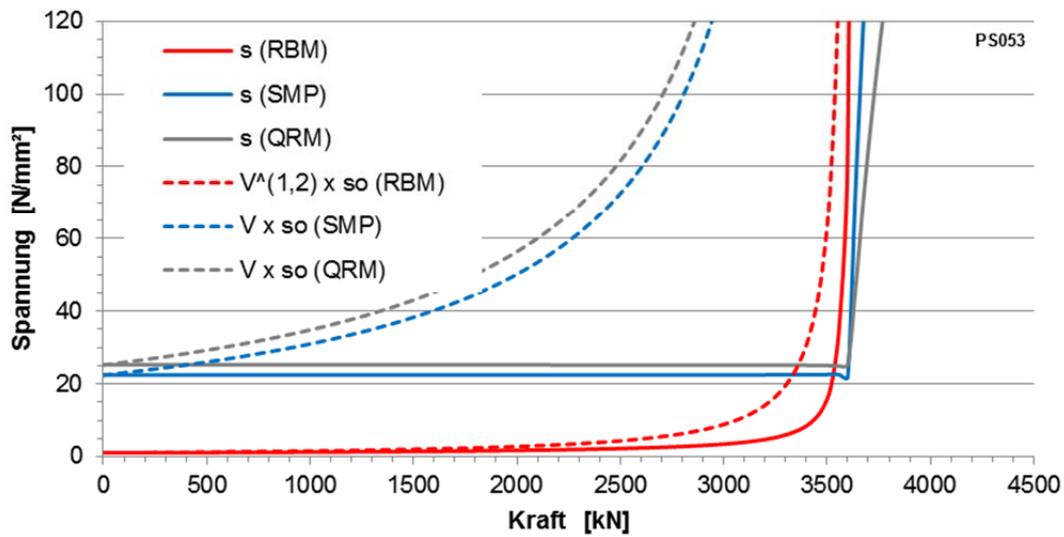
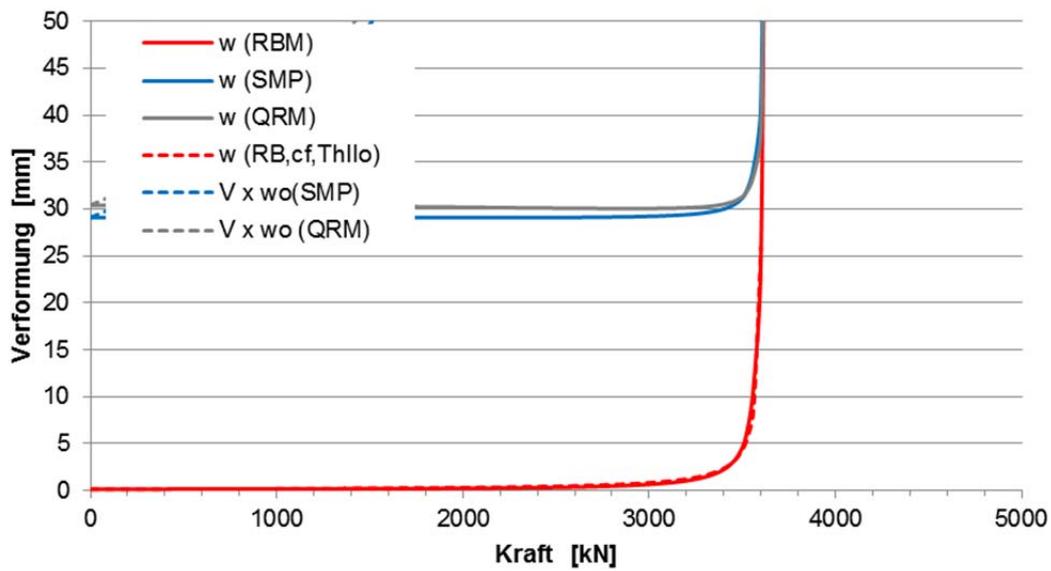
PS051

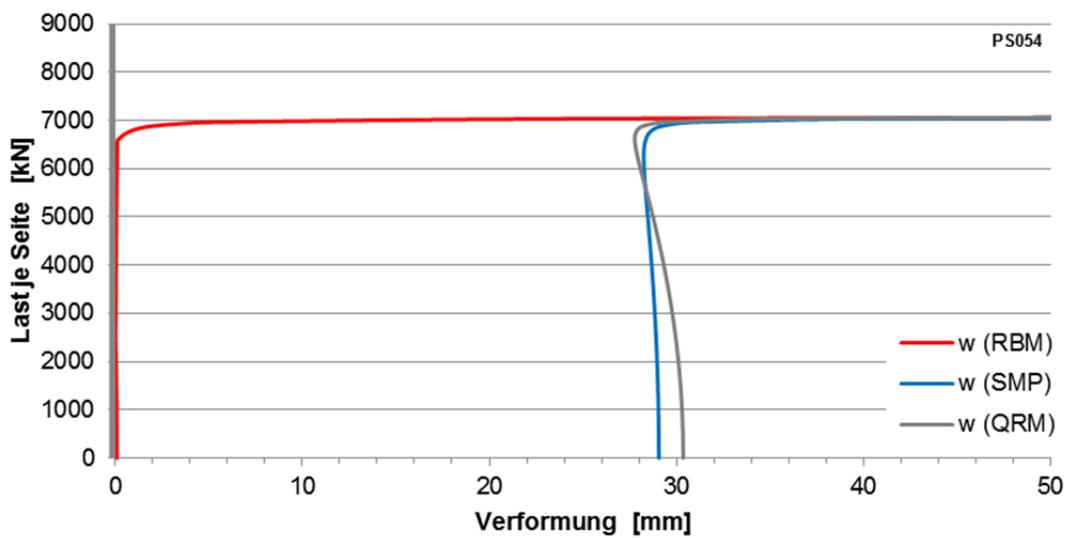
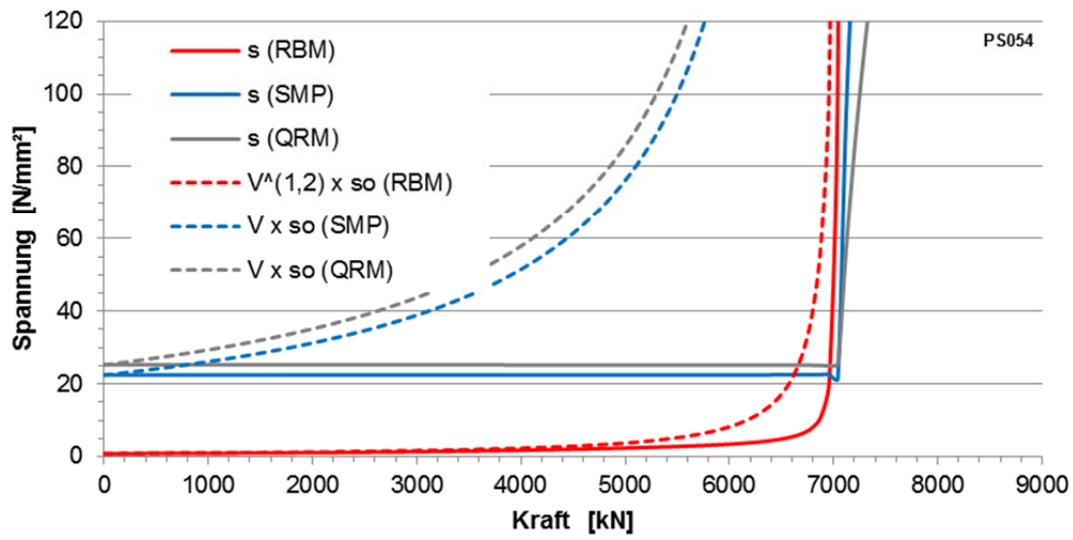
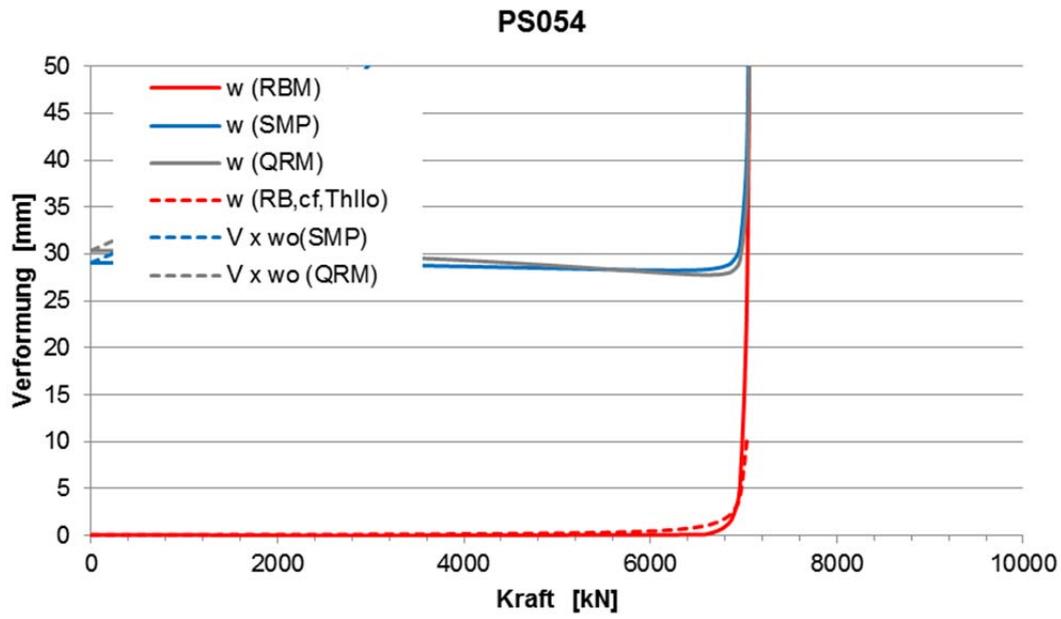


PS052



PS053





## A2 Parameterstudie PS1

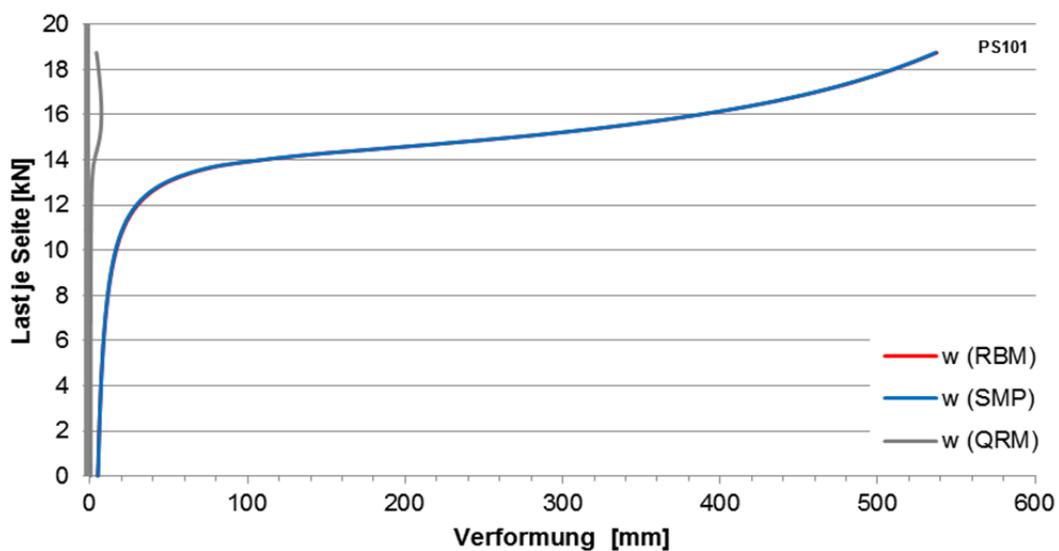
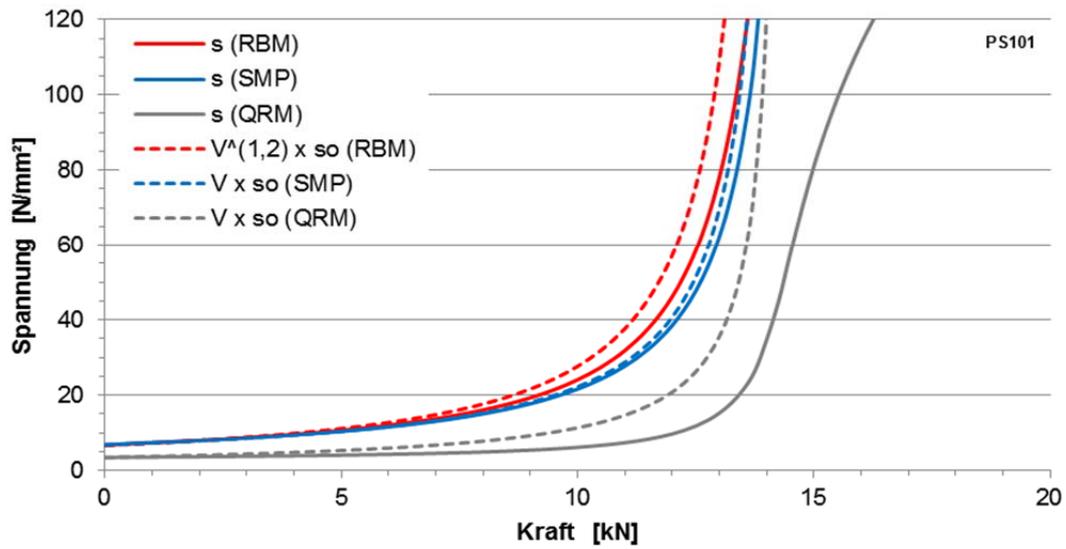
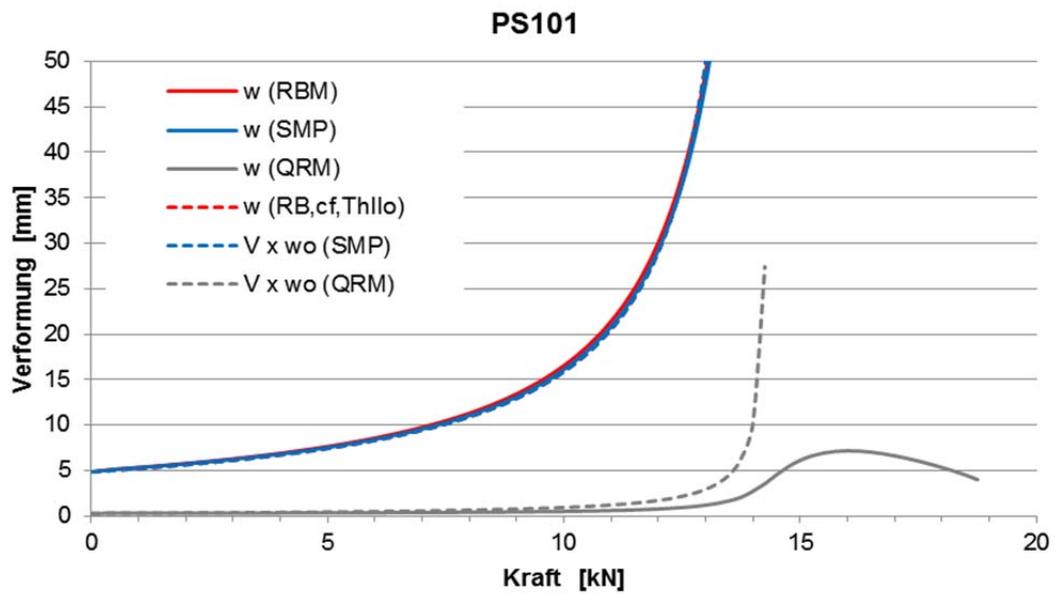
### A2.1 Parameterdefinition und Eingangswerte

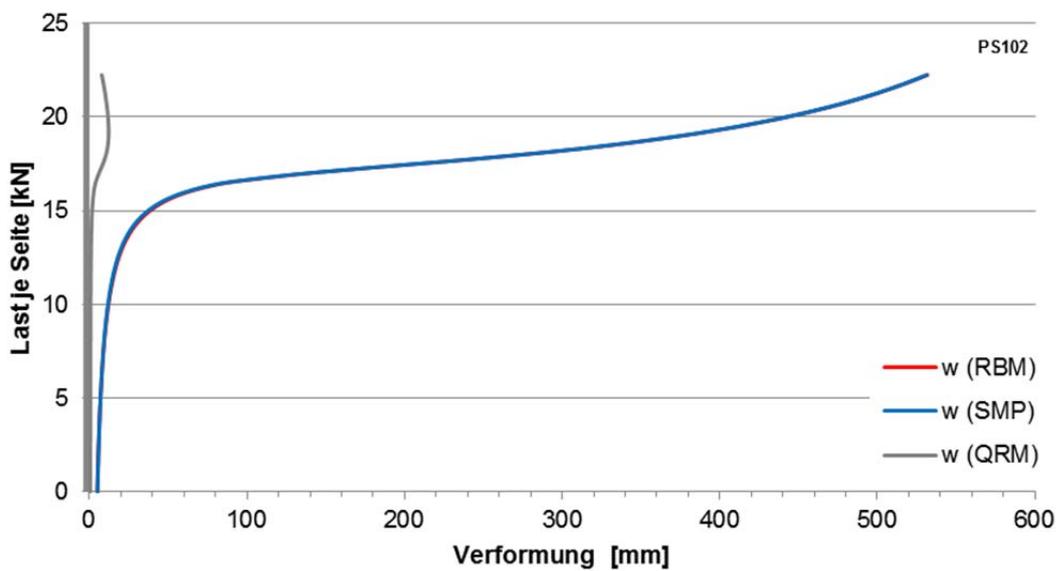
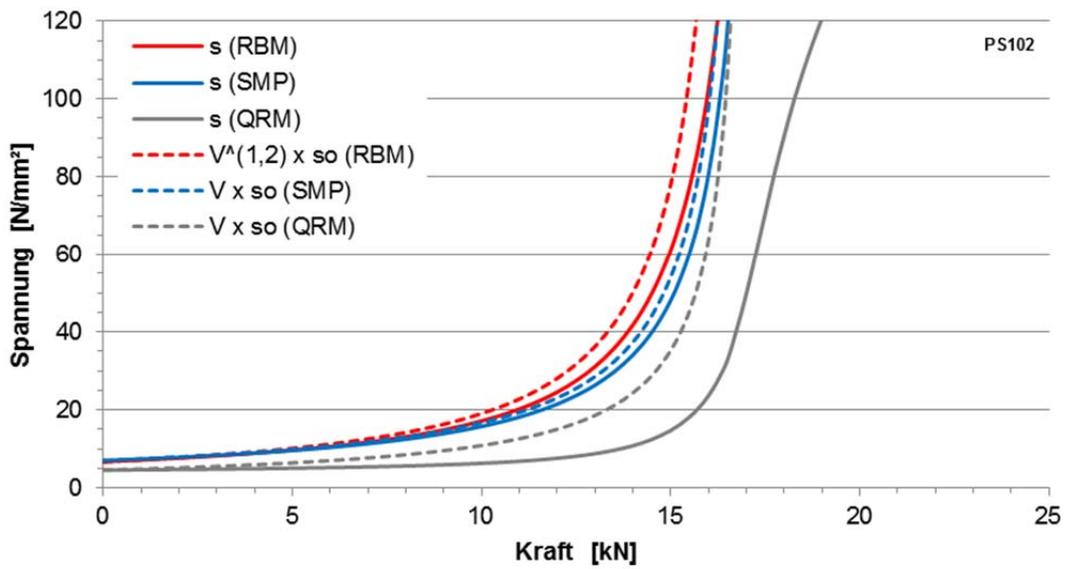
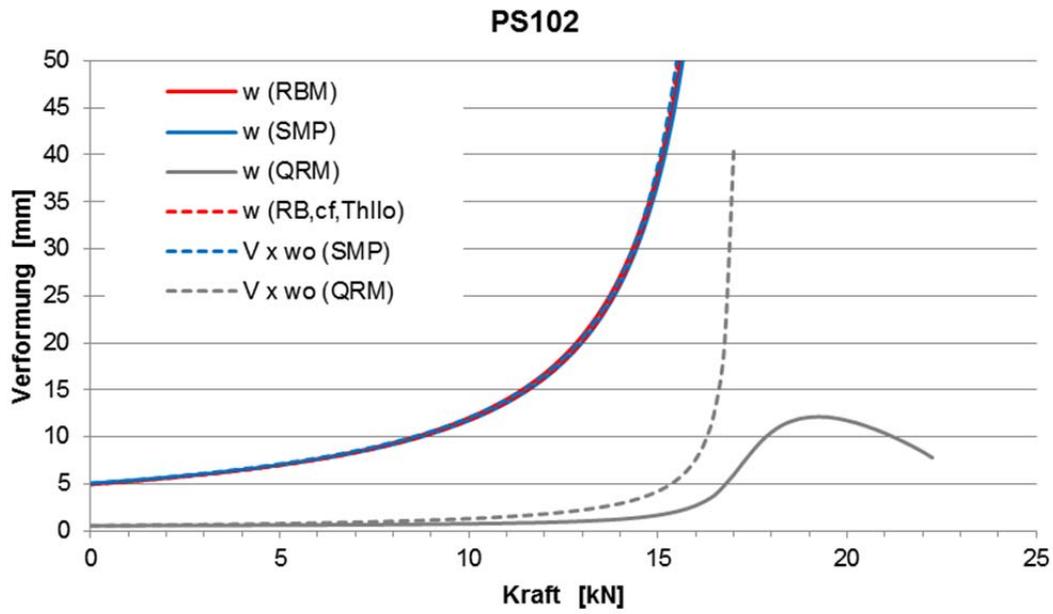
ID	H	a	q	f	s	B	t	I <sub>G</sub>	I <sub>RB</sub>	EI <sub>G</sub>	EI <sub>RB</sub>
	mm	-	kN/m <sup>2</sup>	-	-	mm	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>	Nmm <sup>2</sup>	Nmm <sup>2</sup>
	1500	var	1	0,01	1						
PS101	1500	0,33	1	0,01	1	500	9,10	31390	10463	2,2E+09	2,2E+09
PS102	1500	0,40	1	0,01	1	600	9,10	37667	12556	2,6E+09	2,6E+09
PS103	1500	0,47	1	0,01	1	700	9,10	43945	14648	3,1E+09	3,1E+09
PS104	1500	0,53	1	0,01	1	800	9,10	50223	16741	3,5E+09	3,5E+09
PS105	1500	0,60	1	0,01	1	900	9,10	56501	18834	4E+09	4E+09
PS106	1500	0,67	1	0,01	1	1000	9,10	62779	20926	4,4E+09	4,4E+09
PS107	1500	0,73	1	0,01	1	1100	9,10	69057	23019	4,8E+09	4,8E+09
PS108	1500	0,80	1	0,01	1	1200	9,10	75335	25112	5,3E+09	5,3E+09
PS109	1500	0,87	1	0,01	1	1300	9,10	81613	27204	5,7E+09	5,7E+09
PS110	1500	0,93	1	0,01	1	1400	9,10	87891	29297	6,2E+09	6,2E+09
PS111	1500	1,00	1	0,01	1	1500	9,10	94169	31390	6,6E+09	6,6E+09
PS112	1500	1,17	1	0,01	1	1750	10,62	174459	58153	1,2E+10	1,2E+10
PS113	1500	1,33	1	0,01	1	2000	12,13	297619	99206	2,1E+10	2,1E+10
PS114	1500	1,50	1	0,01	1	2250	13,65	476728	158909	3,3E+10	3,3E+10
PS115	1500	1,67	1	0,01	1	2500	15,17	726609	242203	5,1E+10	5,1E+10
PS116	1500	2,00	1	0,01	1	3000	18,20	1506696	502232	1,1E+11	1,1E+11
PS117	1500	2,33	1	0,01	1	3500	21,23	2791341	930447	2E+11	2E+11
PS118	1500	2,67	1	0,01	1	4000	24,26	4761905	1587302	3,3E+11	3,3E+11
PS119	1500	3,00	1	0,01	1	4500	27,30	7627651	2542550	5,3E+11	5,3E+11
PS120	1500	3,33	1	0,01	1	5000	30,33	11625744	3875248	8,1E+11	8,1E+11
PS121	1500	0,50	1	0,01	1	750	9,10	47084	15695	3,3E+09	3,3E+09

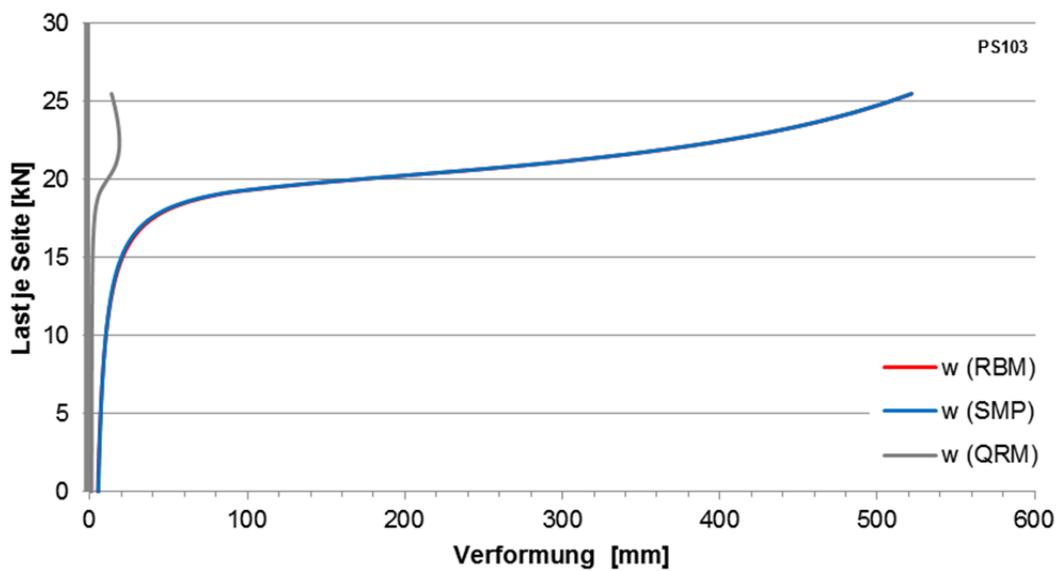
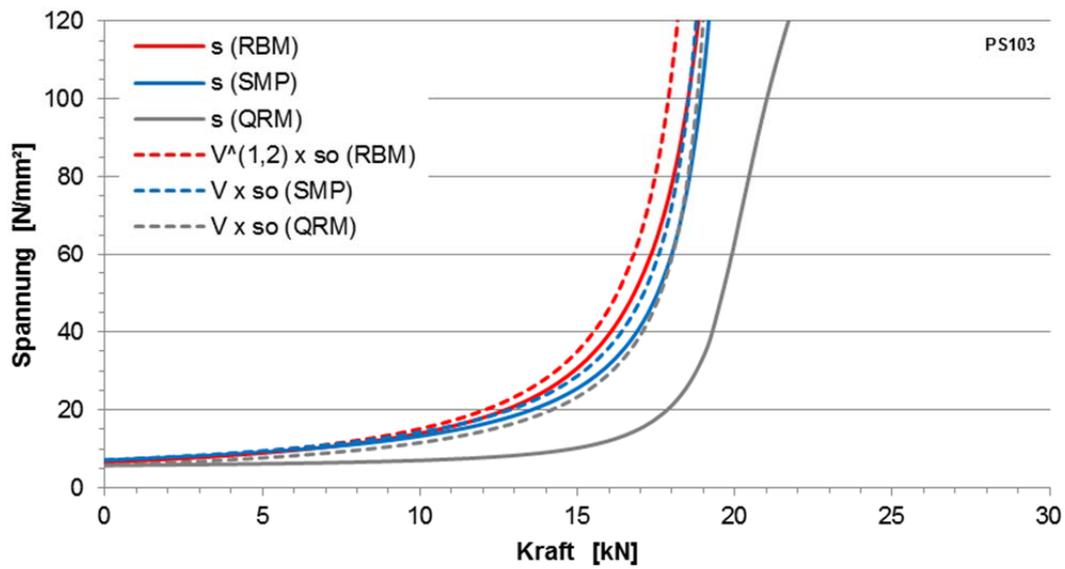
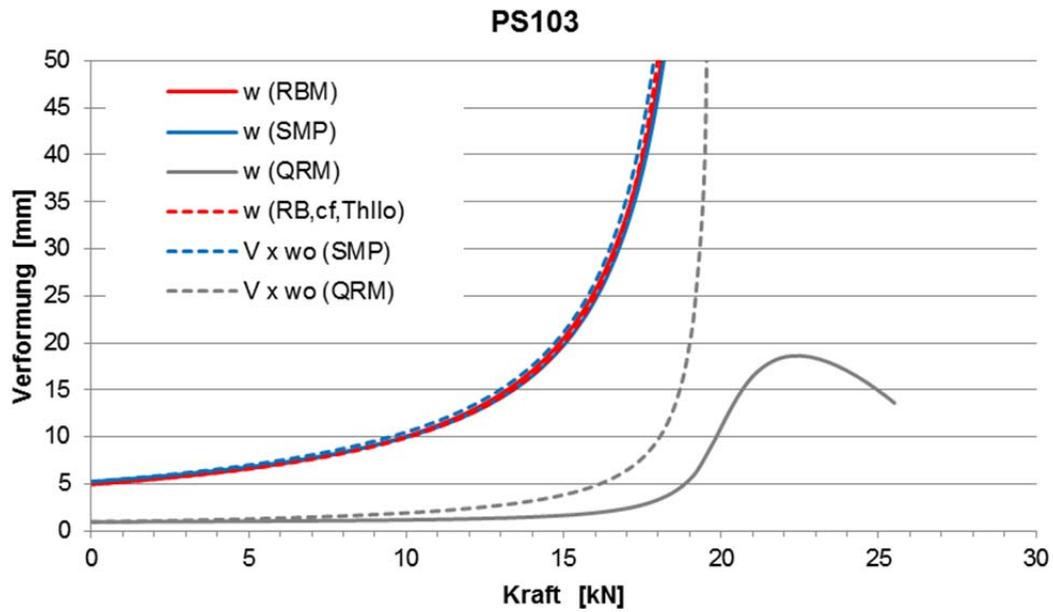
A2.2 Ergebniswerte

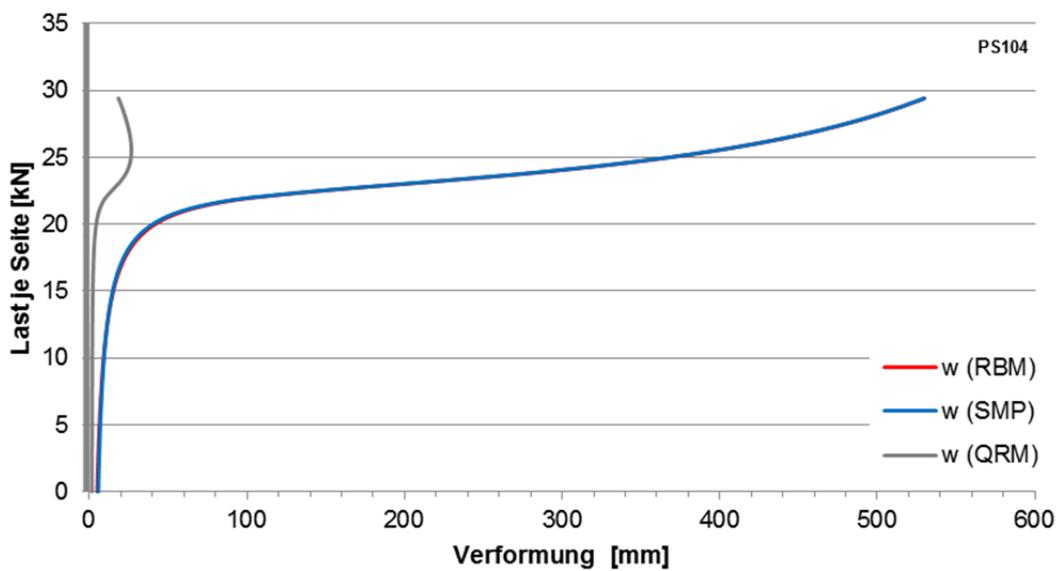
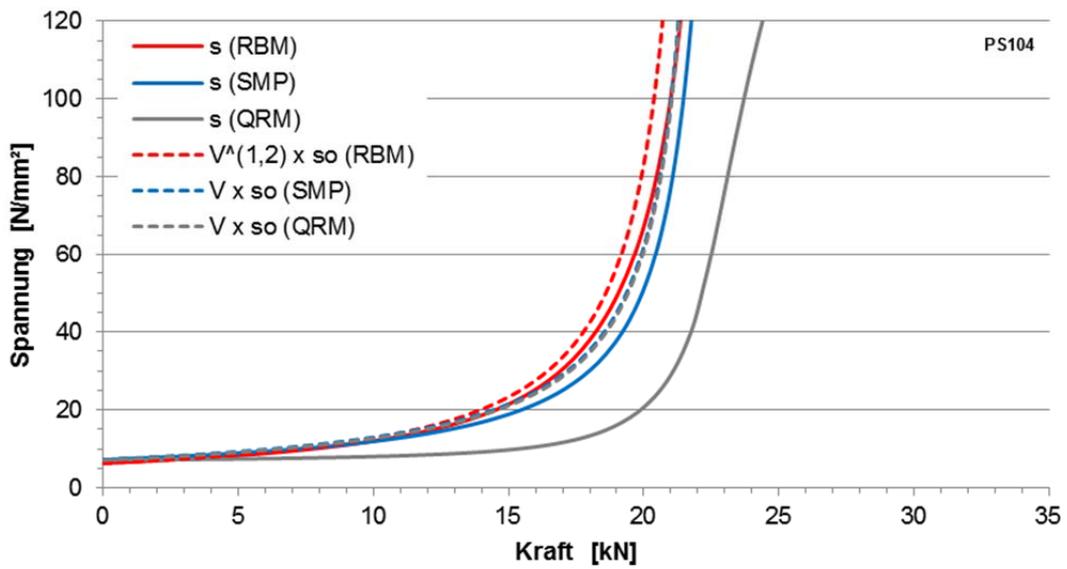
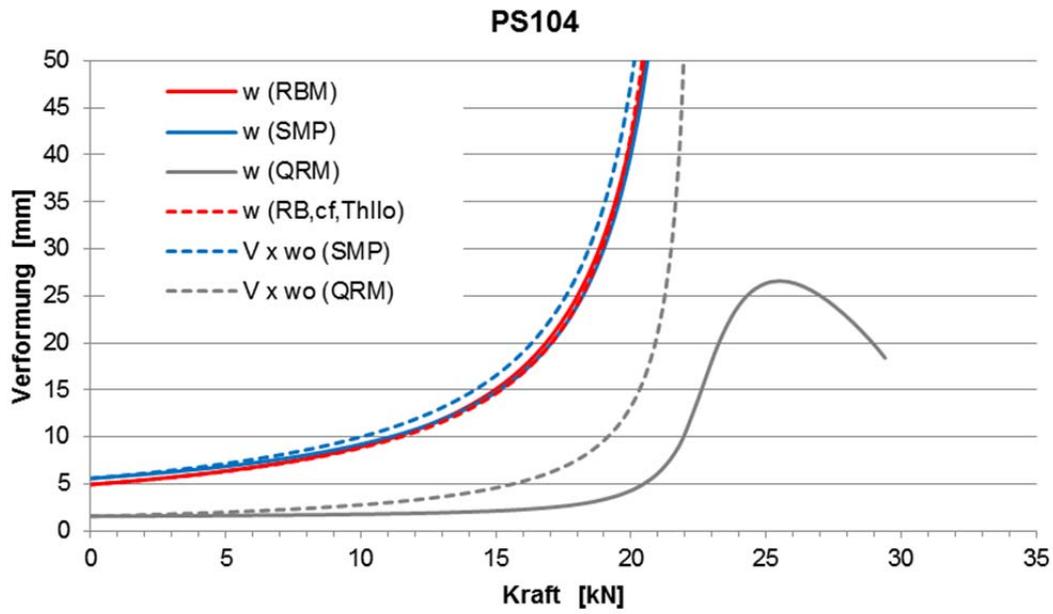
ID	a	$N_{ki, FEM}$	$b_{m, FEM}$	$b_{m, cf}$	$N_{ki, cf}$	$b_{m, FEM}/B$	$b_{m, cf}/B$	$b_{m, FEM}/H$	$b_{m, cf}/H$
	-	kN	mm	mm	kN	-	-	-	-
PS101	0,33	14,5	251	247	14,4	0,50	0,49	0,17	0,16
PS102	0,40	17,2	293	294	17,2	0,49	0,49	0,20	0,20
PS103	0,47	19,9	334	335	20,0	0,48	0,48	0,22	0,22
PS104	0,53	22,6	370	375	22,6	0,46	0,47	0,25	0,25
PS105	0,60	25,2	405	410	25,3	0,45	0,46	0,27	0,27
PS106	0,67	27,7	434	440	27,8	0,43	0,44	0,29	0,29
PS107	0,73	30,2	466	475	30,4	0,42	0,43	0,31	0,32
PS108	0,80	32,6	489	495	32,7	0,41	0,41	0,33	0,33
PS109	0,87	35,0	514	510	34,9	0,40	0,39	0,34	0,34
PS110	0,93	37,2	532	540	37,4	0,38	0,39	0,35	0,36
PS111	1,00	39,5	547	550	39,5	0,36	0,37	0,36	0,37
PS112	1,17	71,3	579	580	71,3	0,33	0,33	0,39	0,39
PS113	1,33	118,5	593	595	118,6	0,30	0,30	0,40	0,40
PS114	1,50	185,1	595	603	185,6	0,26	0,27	0,40	0,40
PS115	1,67	276,8	601	615	278,0	0,24	0,25	0,40	0,41
PS116	2,00	563,0	650	630	559,8	0,22	0,21	0,43	0,42
PS117	2,33	1021,4	671	630	1011,4	0,19	0,18	0,45	0,42
PS118	2,67	1696,2	640	645	1697,9	0,16	0,16	0,43	0,43
PS119	3,00	2672,4	635	655	2683,0	0,14	0,15	0,42	0,44
PS120	3,33	4051,0	674	660	4040,9	0,13	0,13	0,45	0,44
PS121	0,50	21,3	356	360	21,4	0,47	0,48	0,24	0,24

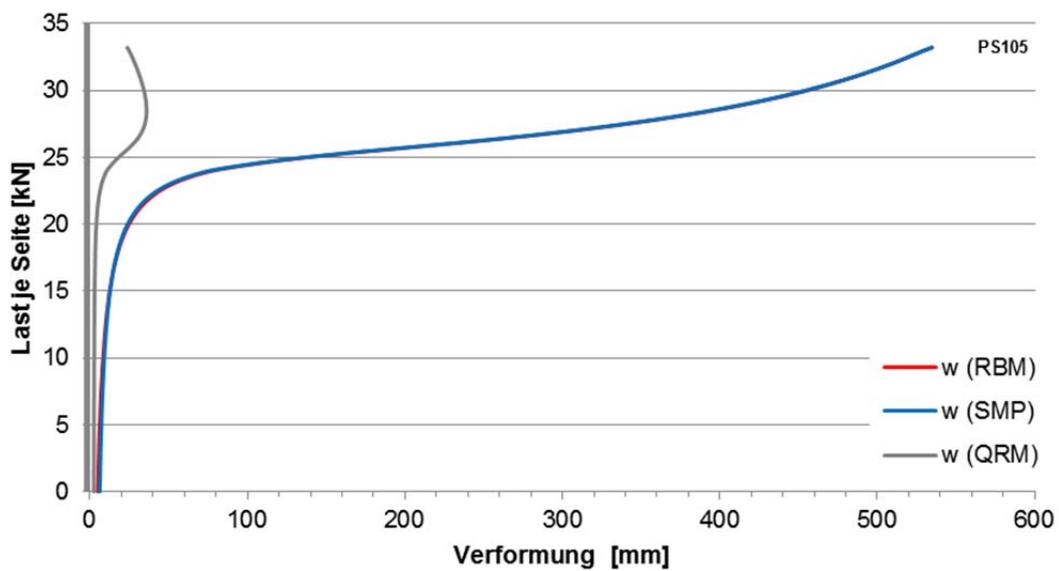
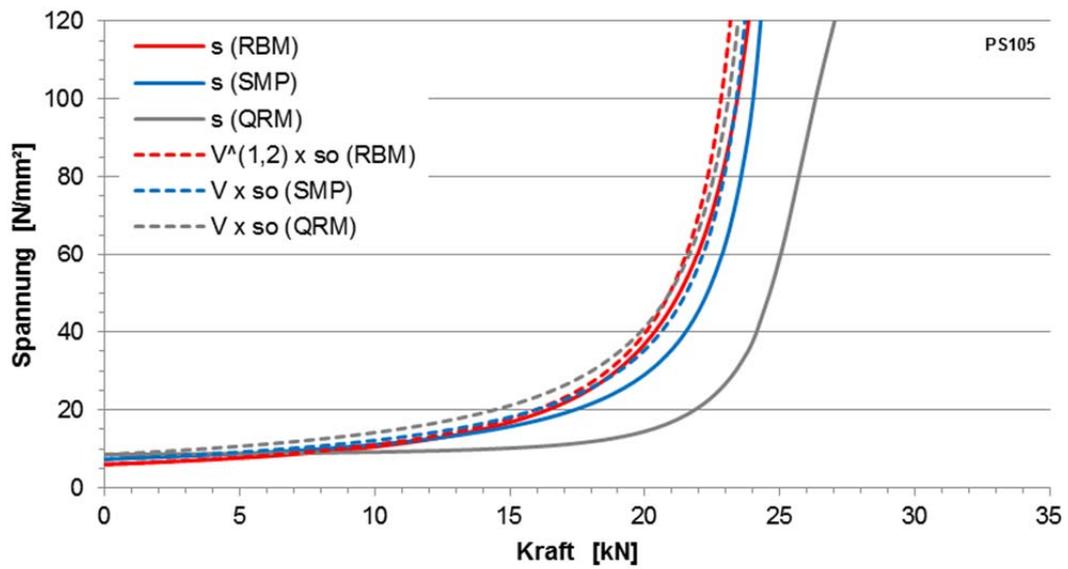
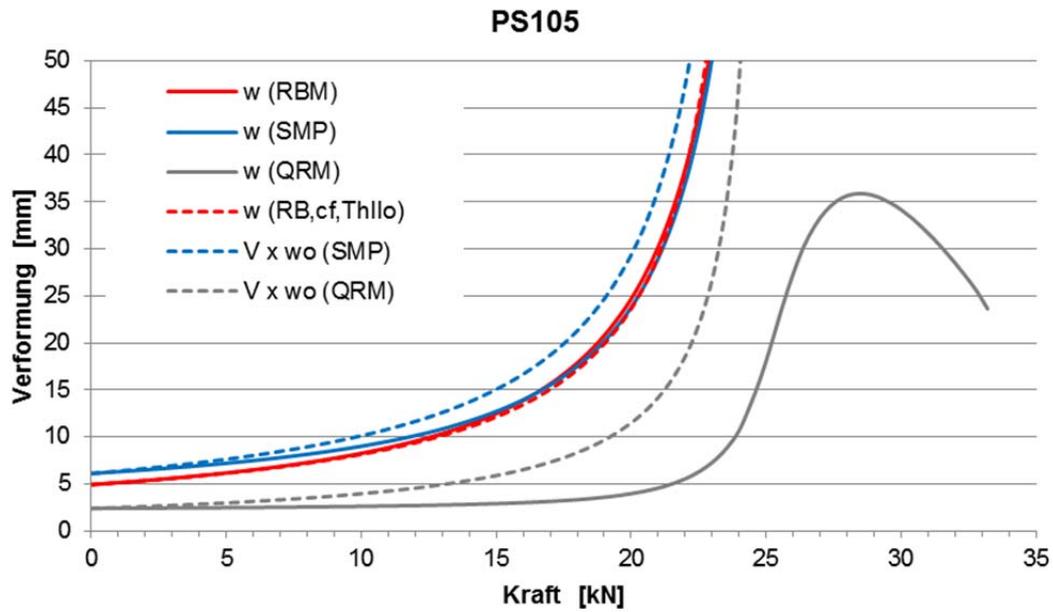
A2.3 Ergebnisdiagramme

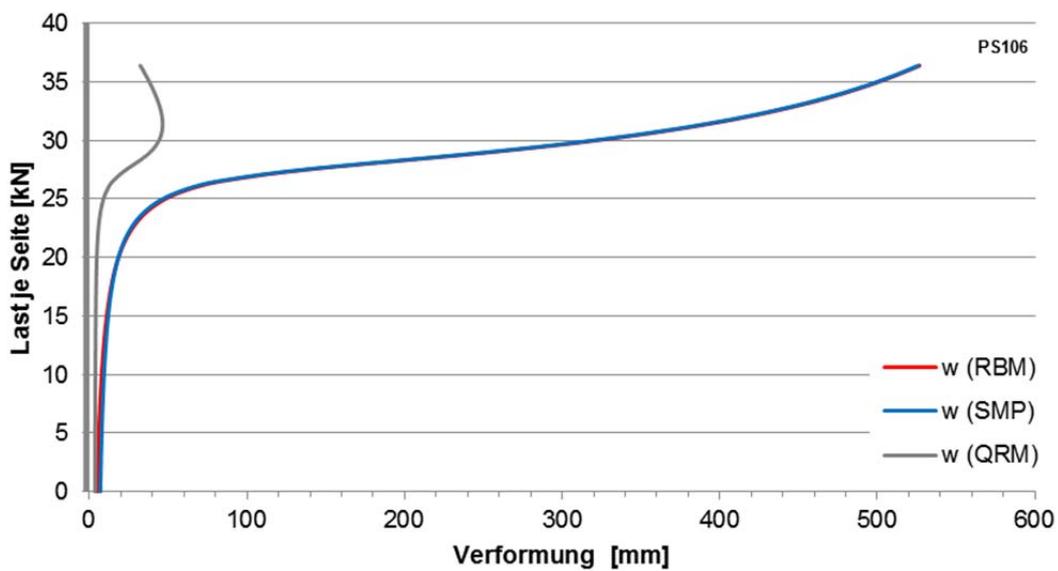
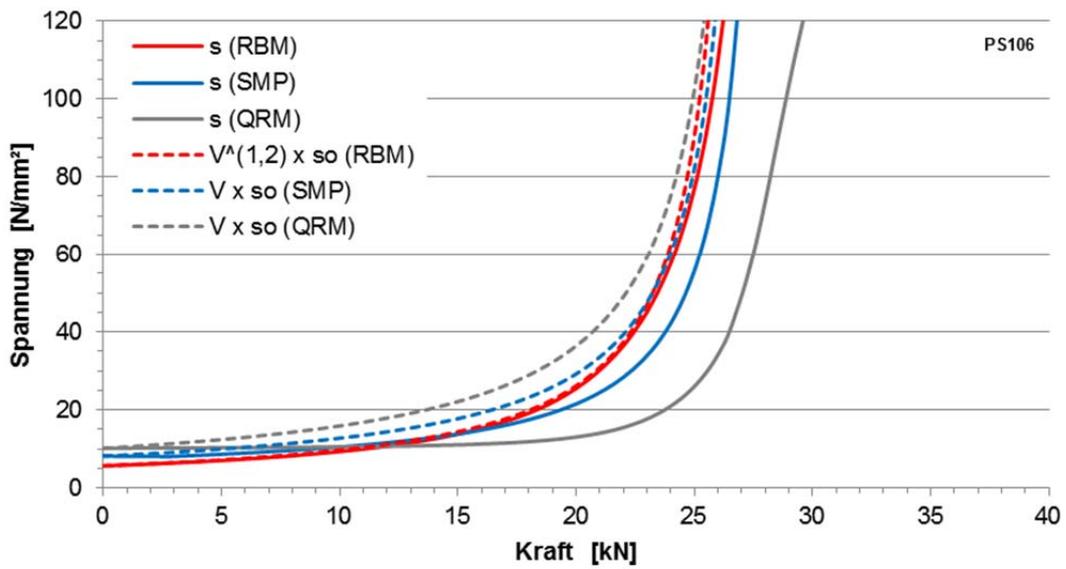
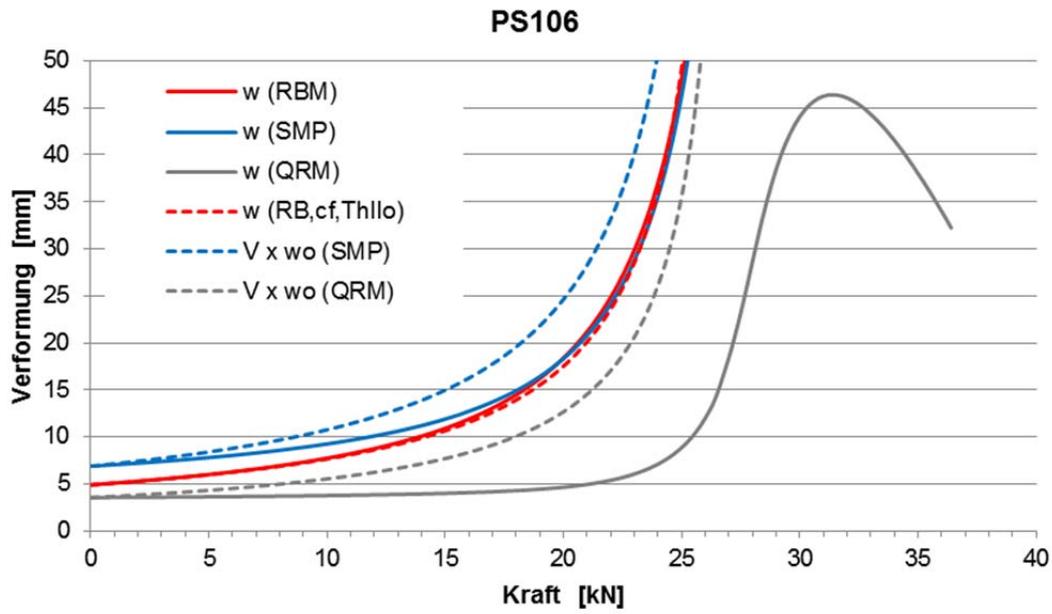


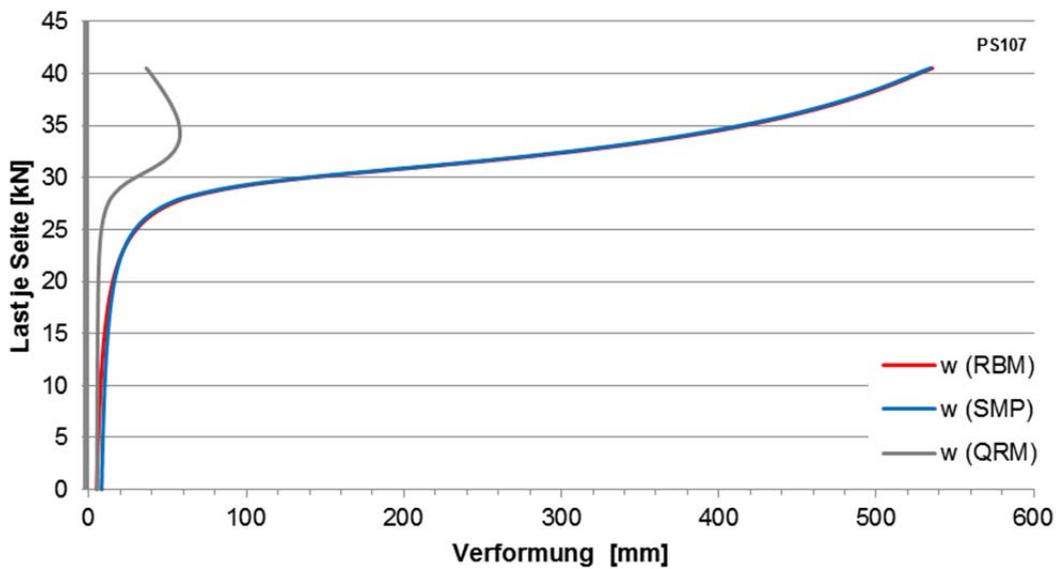
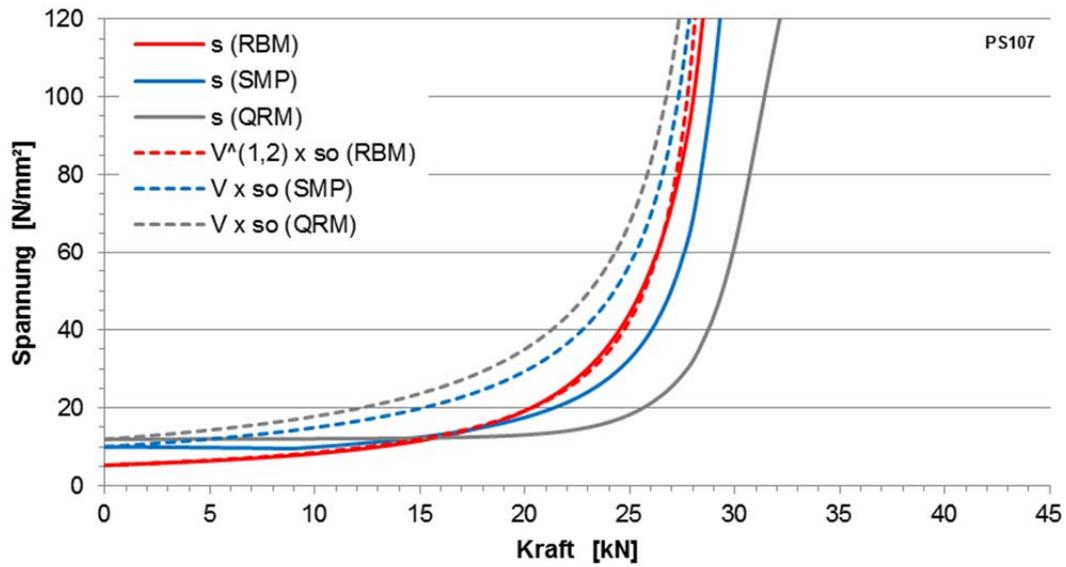
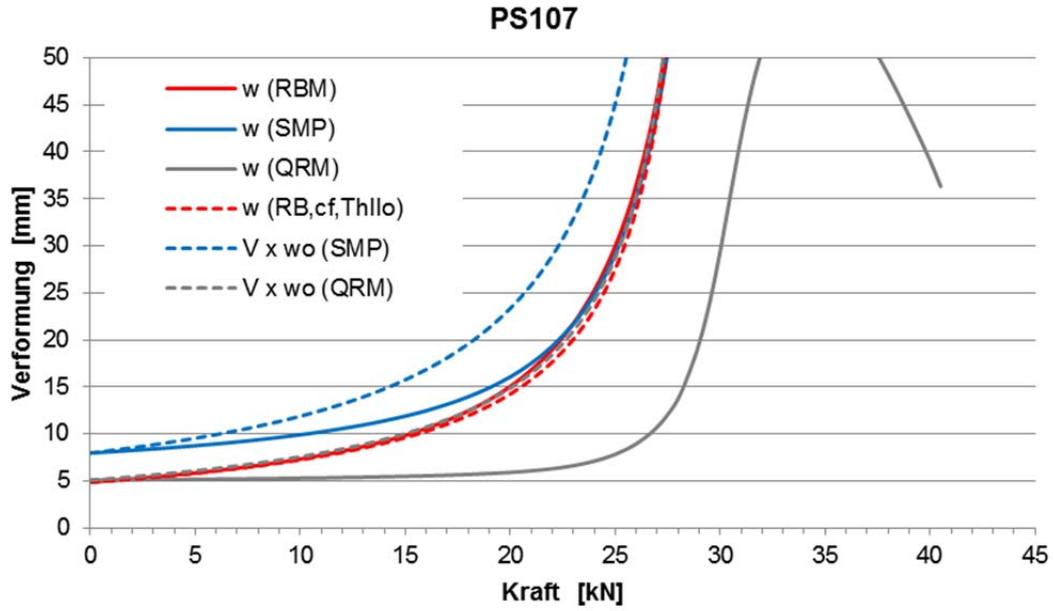


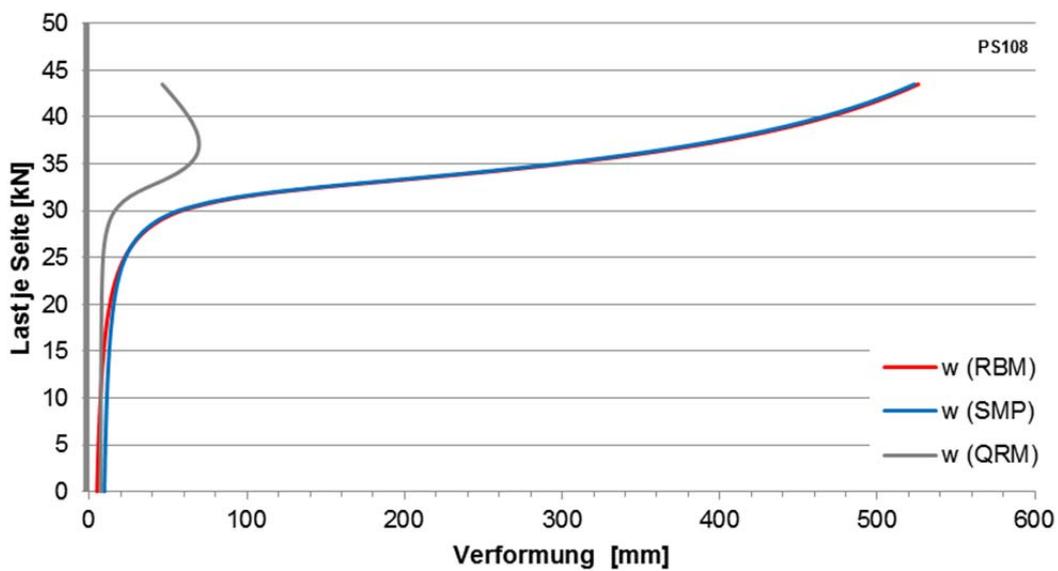
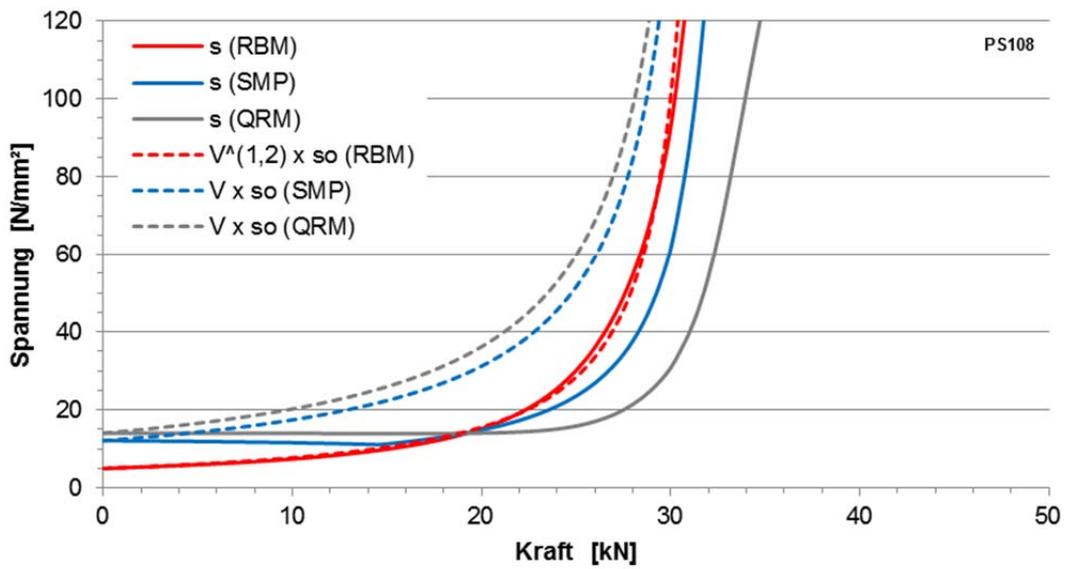
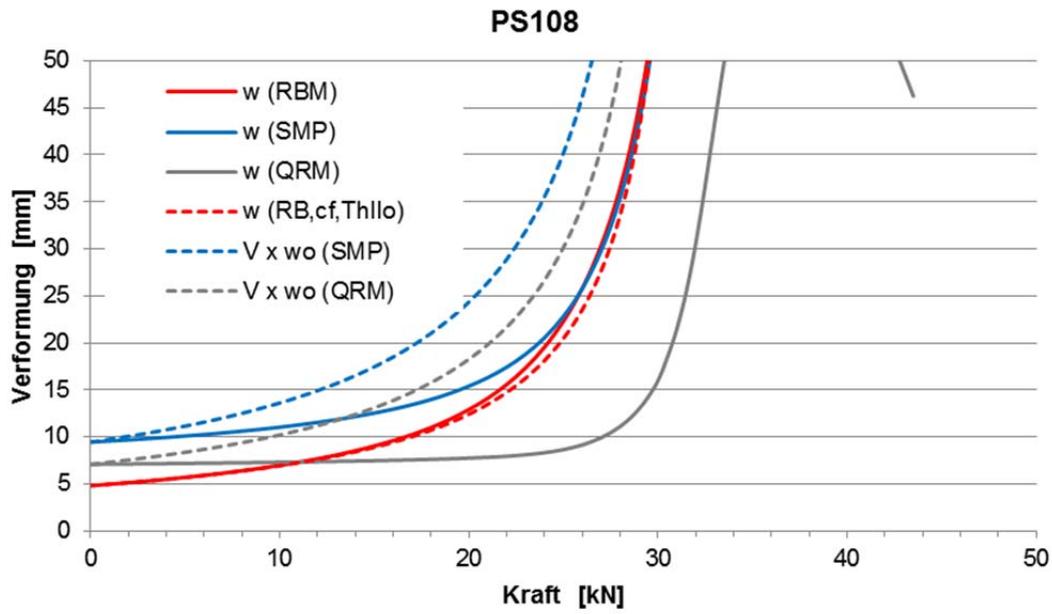


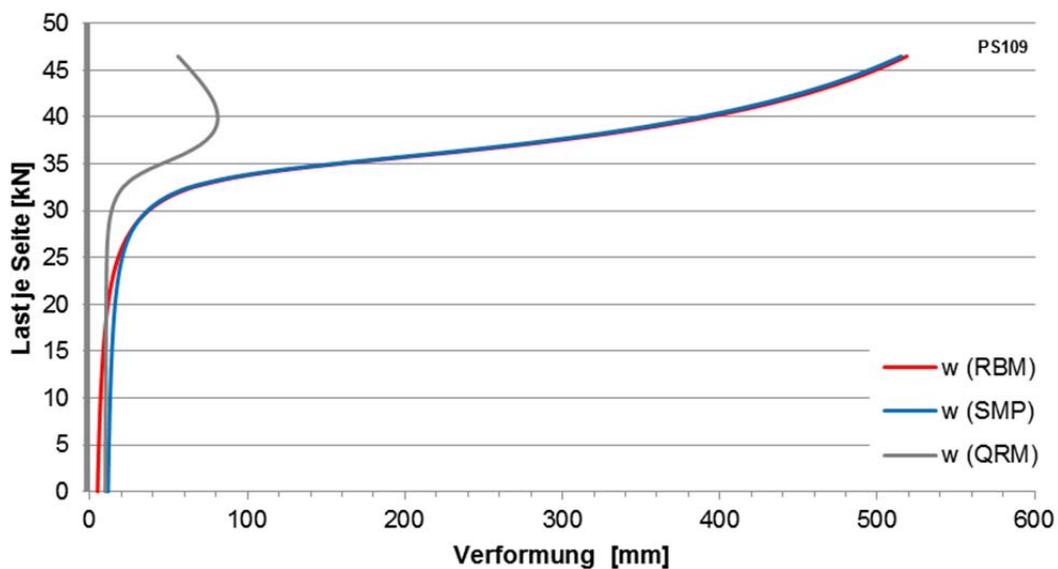
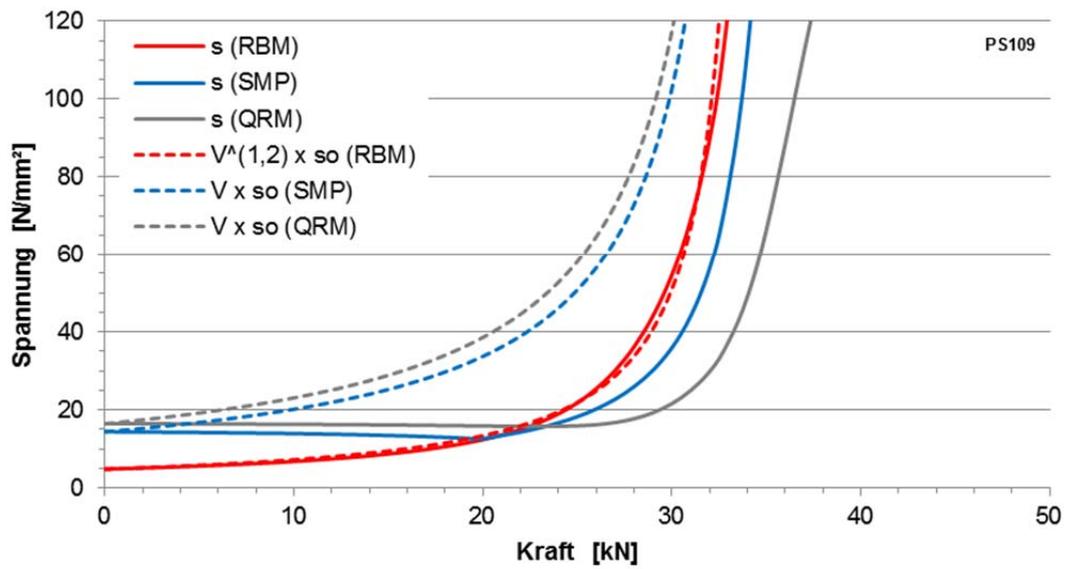
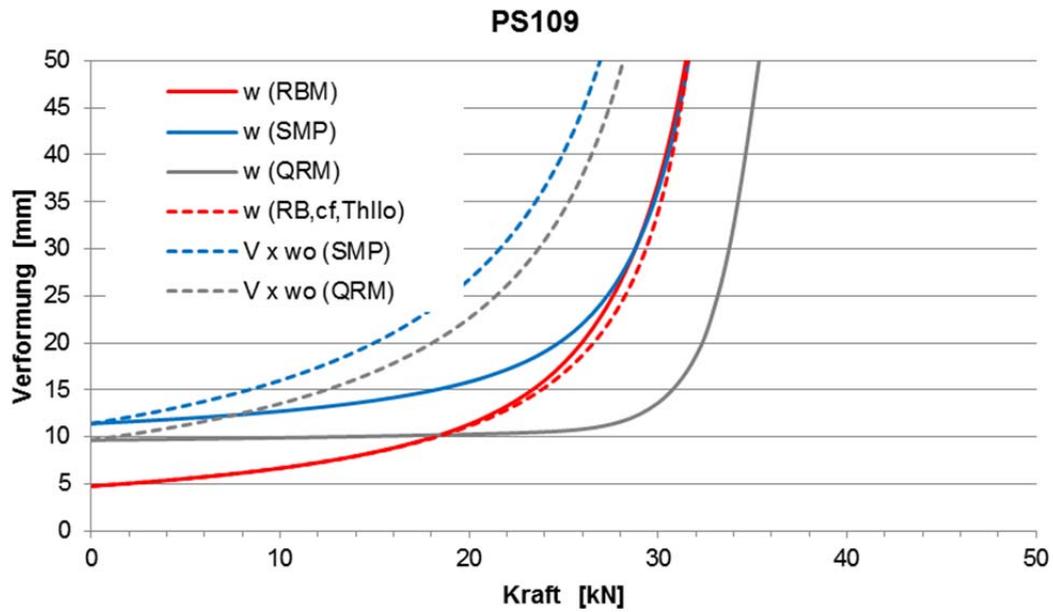


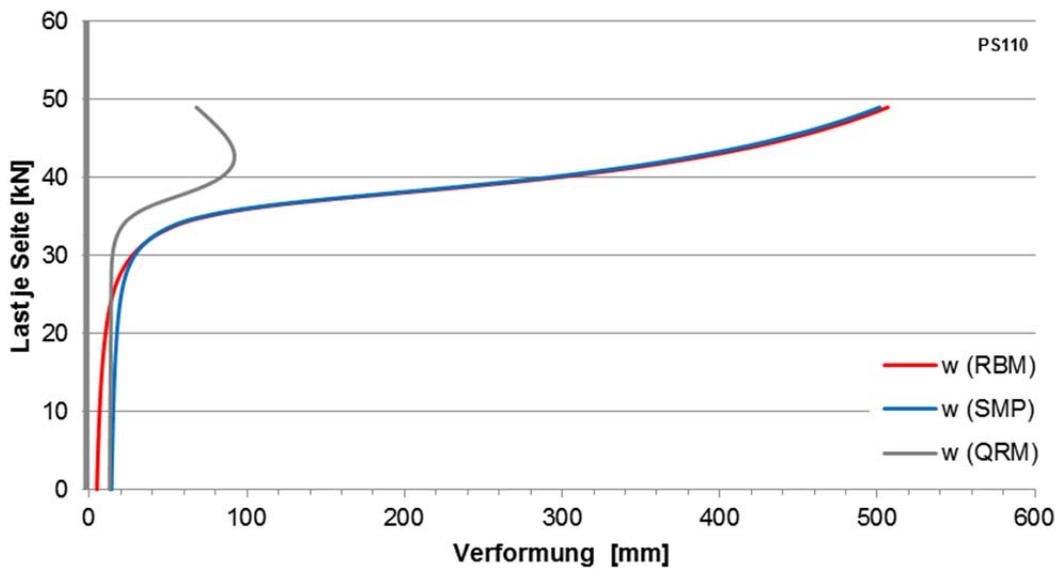
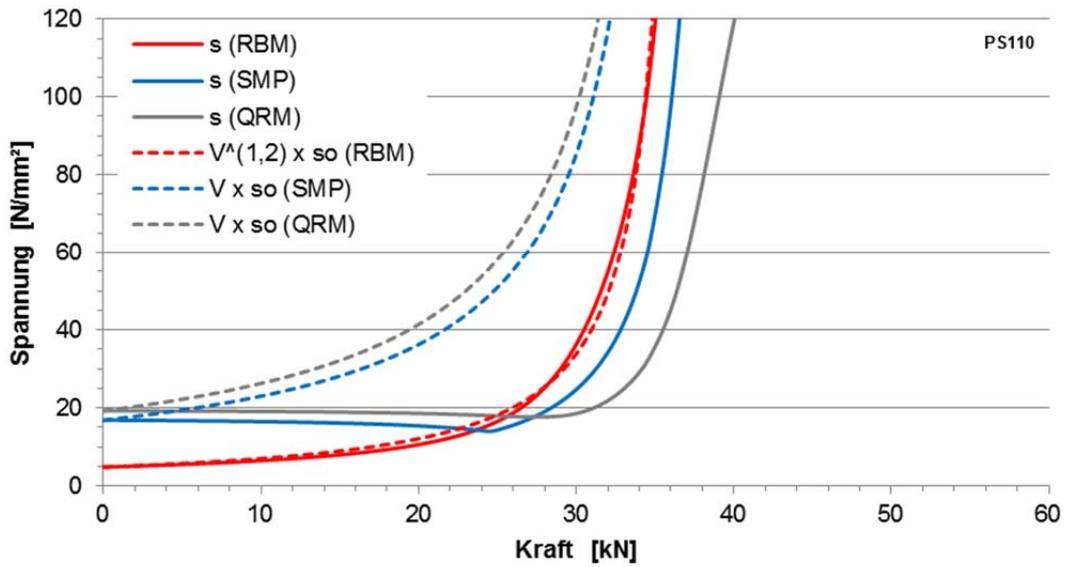
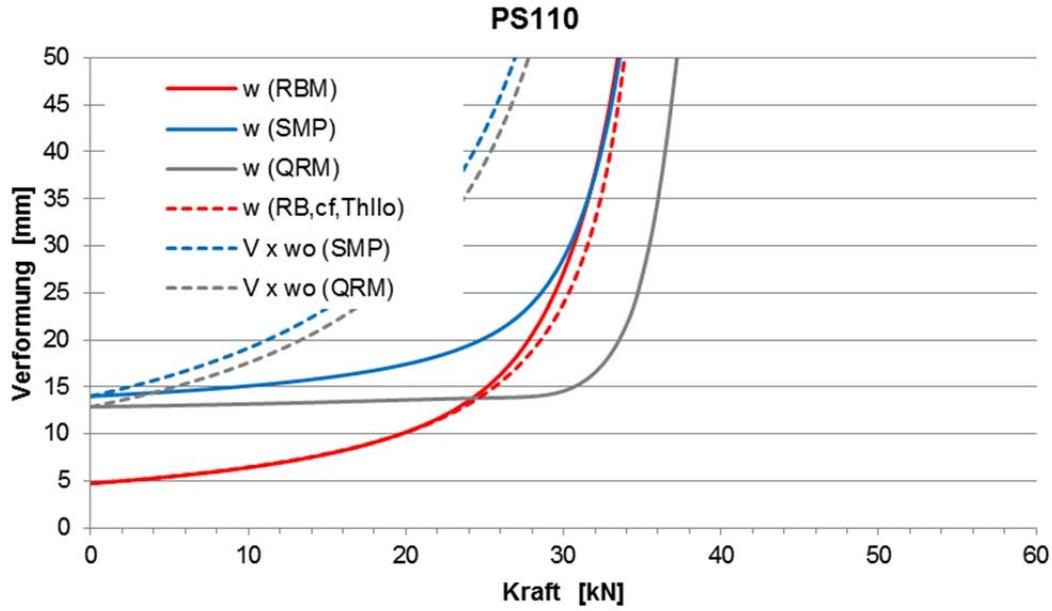


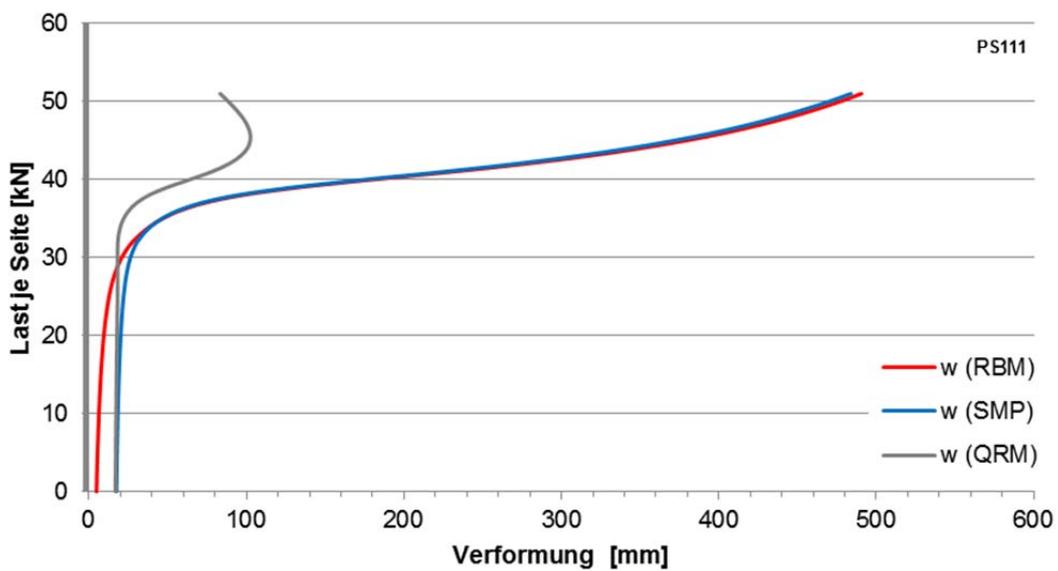
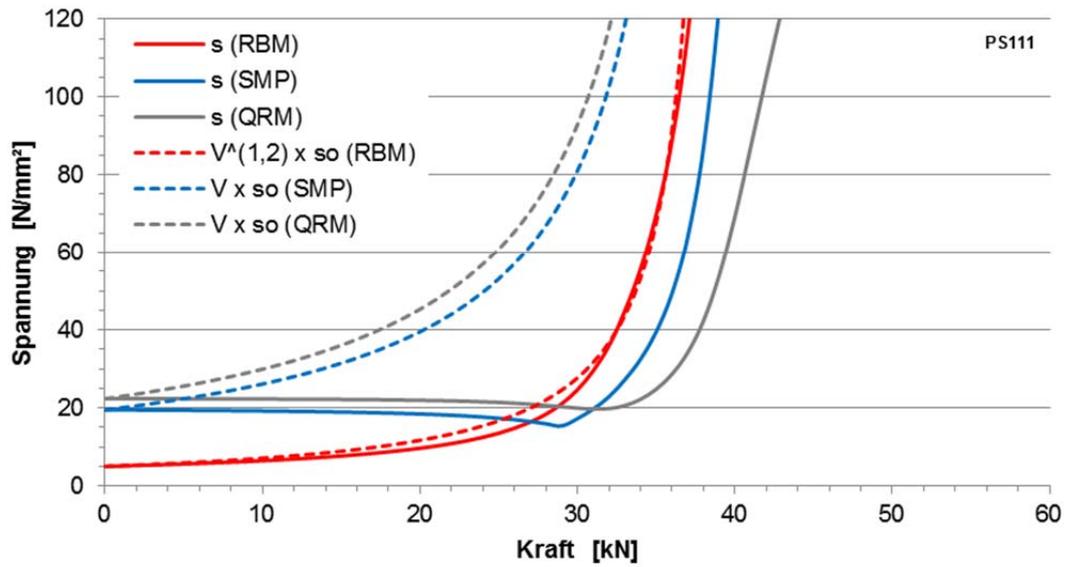
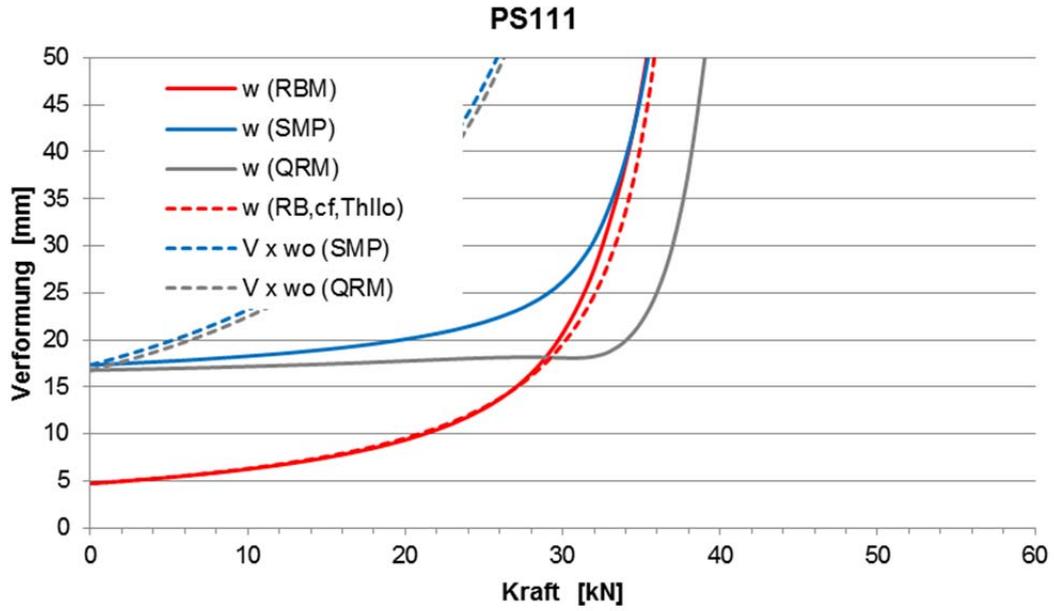


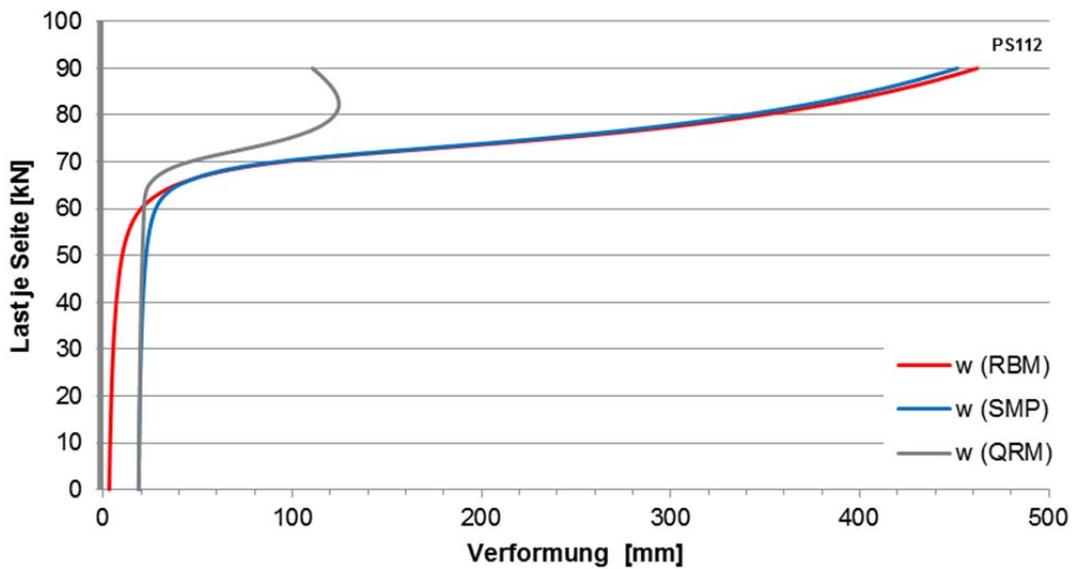
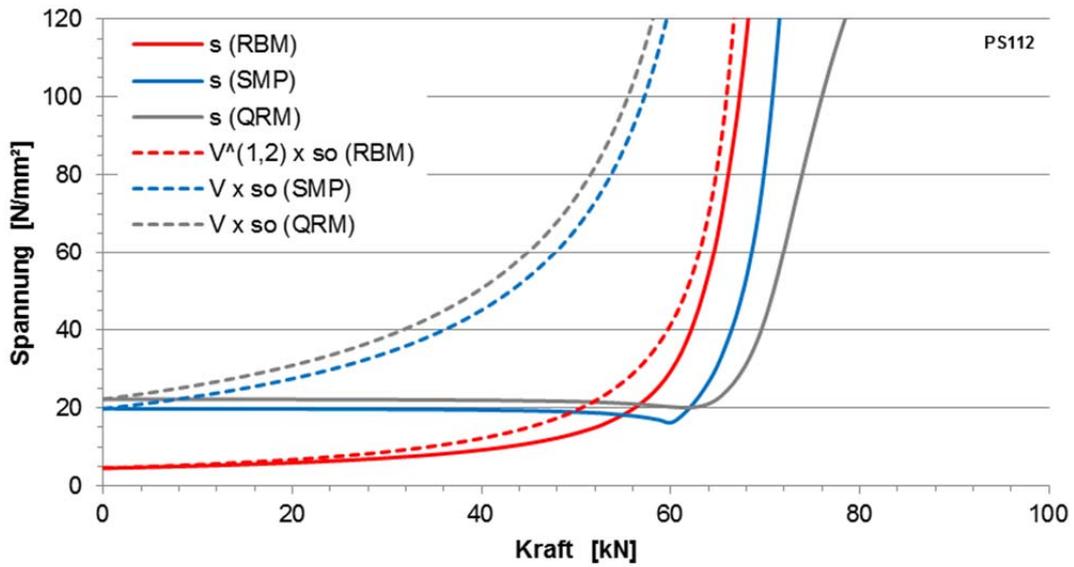
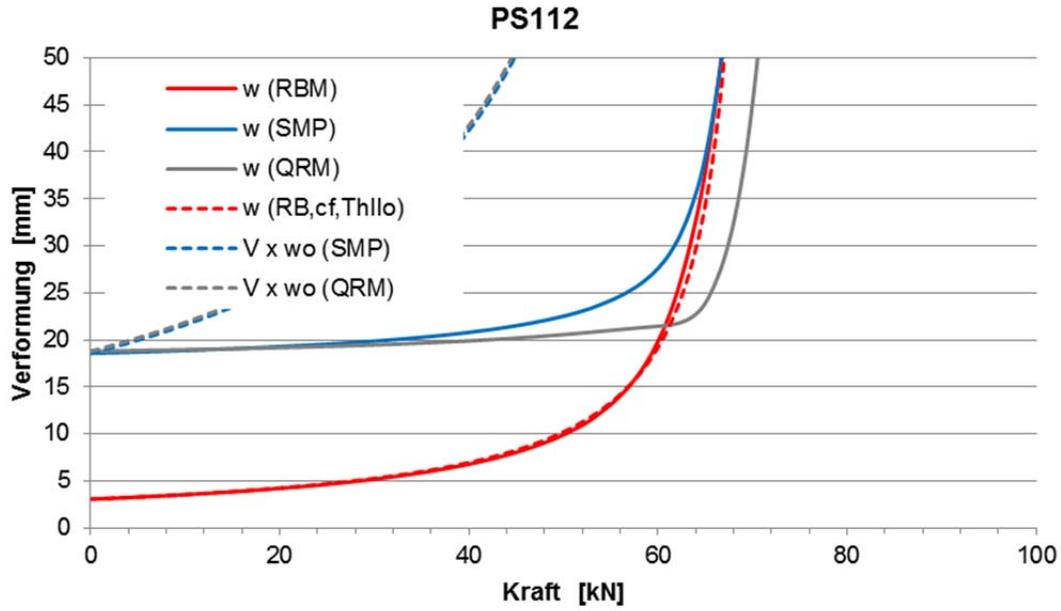


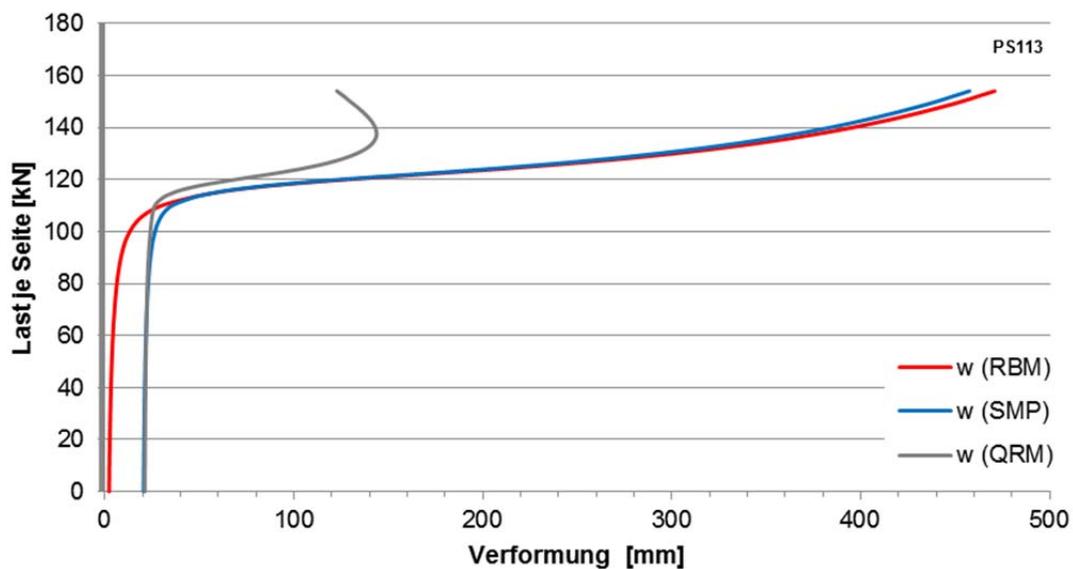
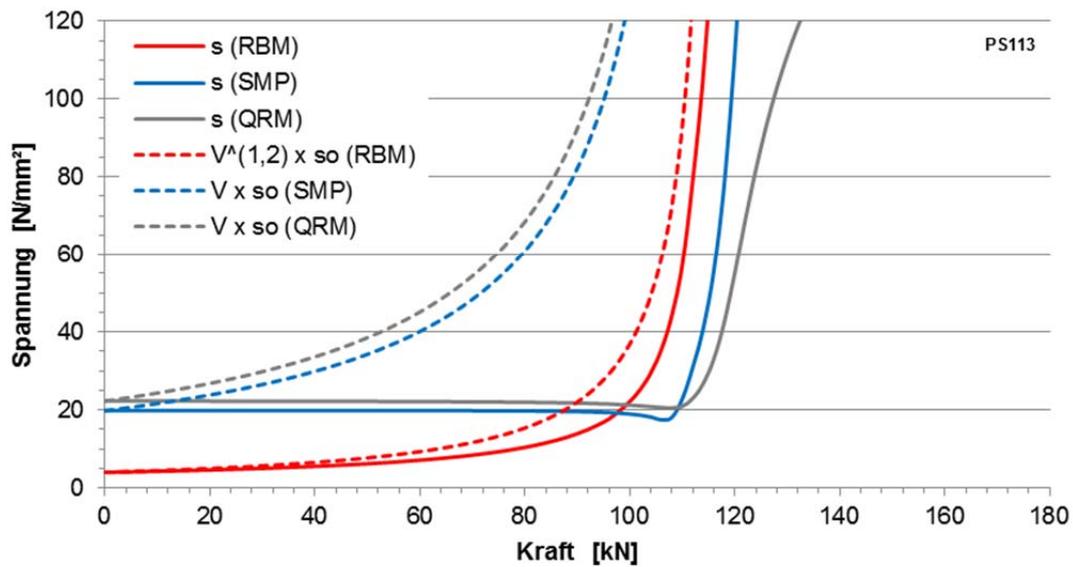
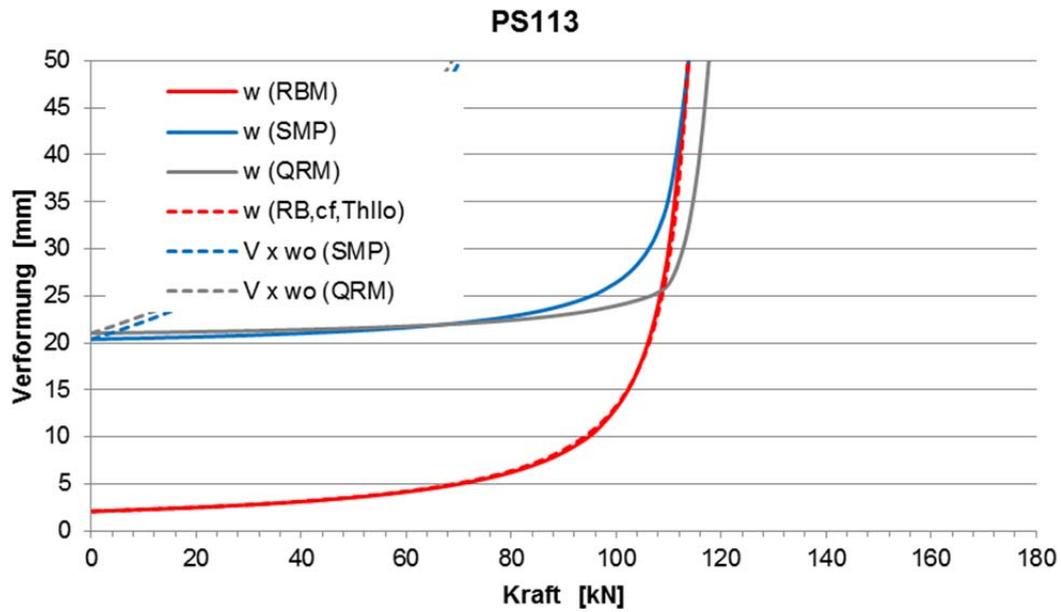


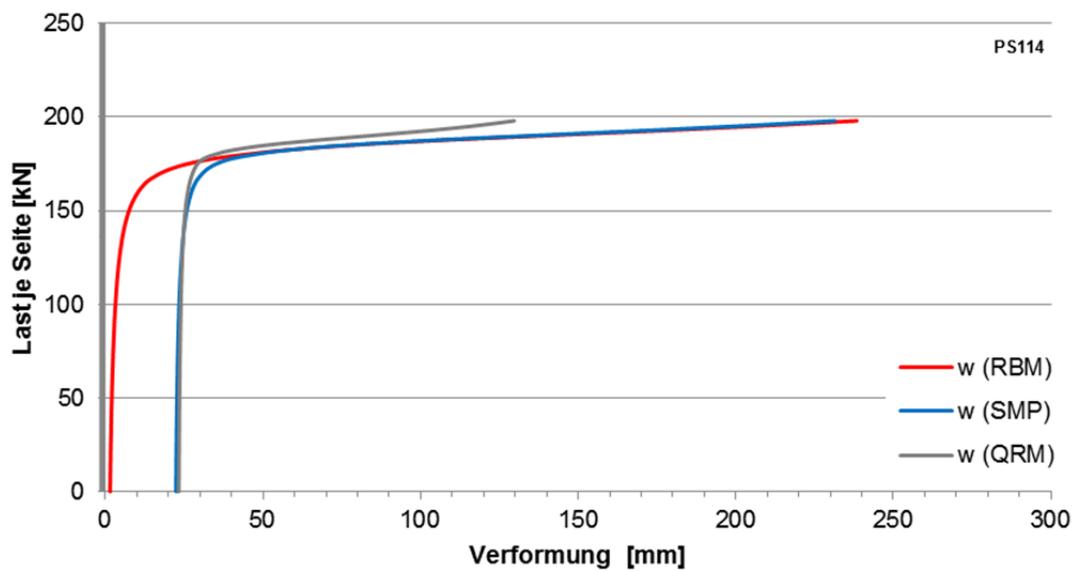
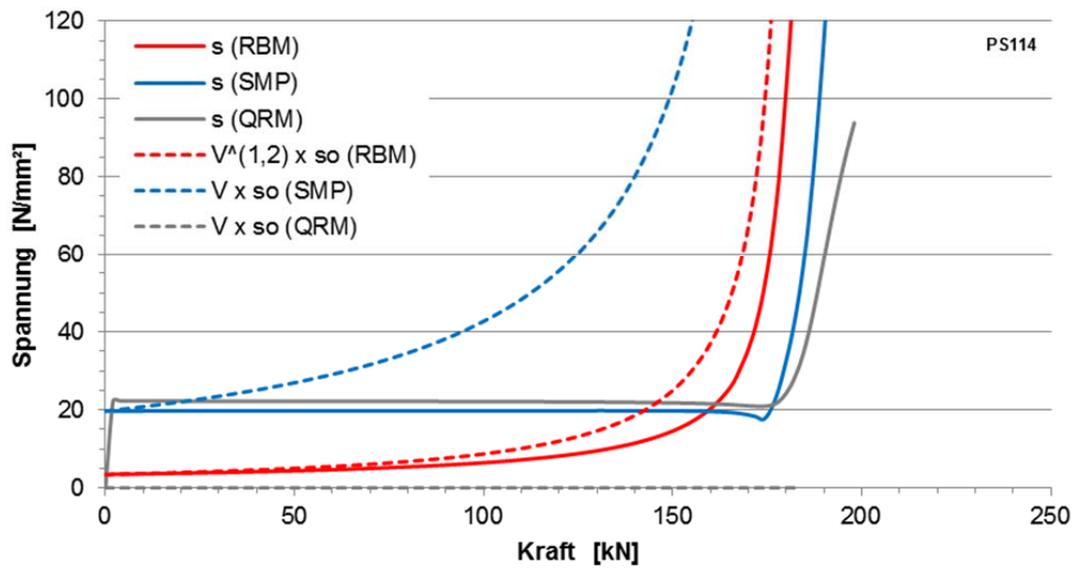
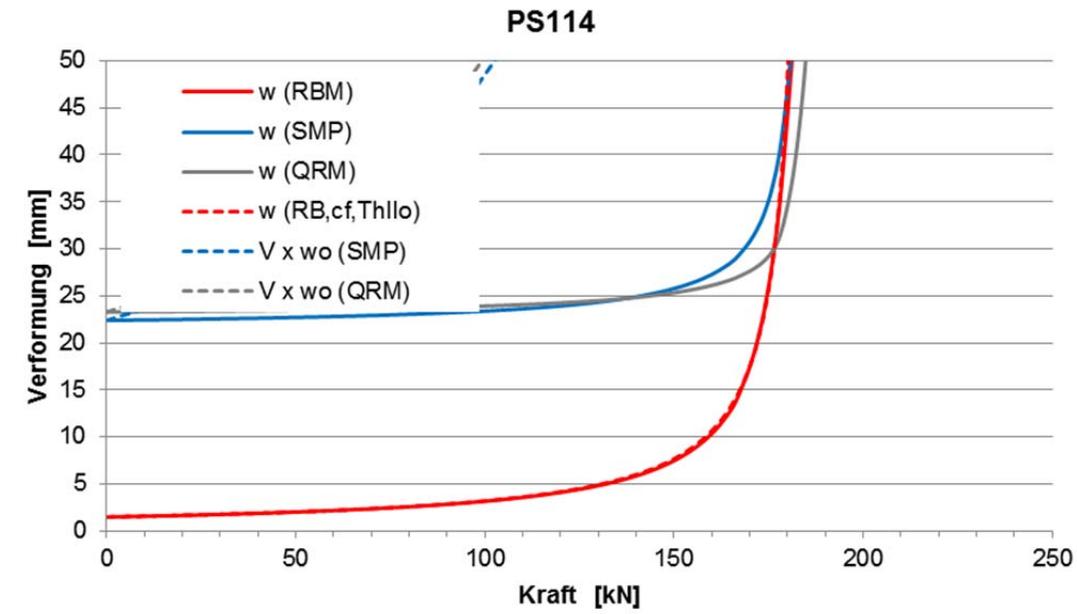


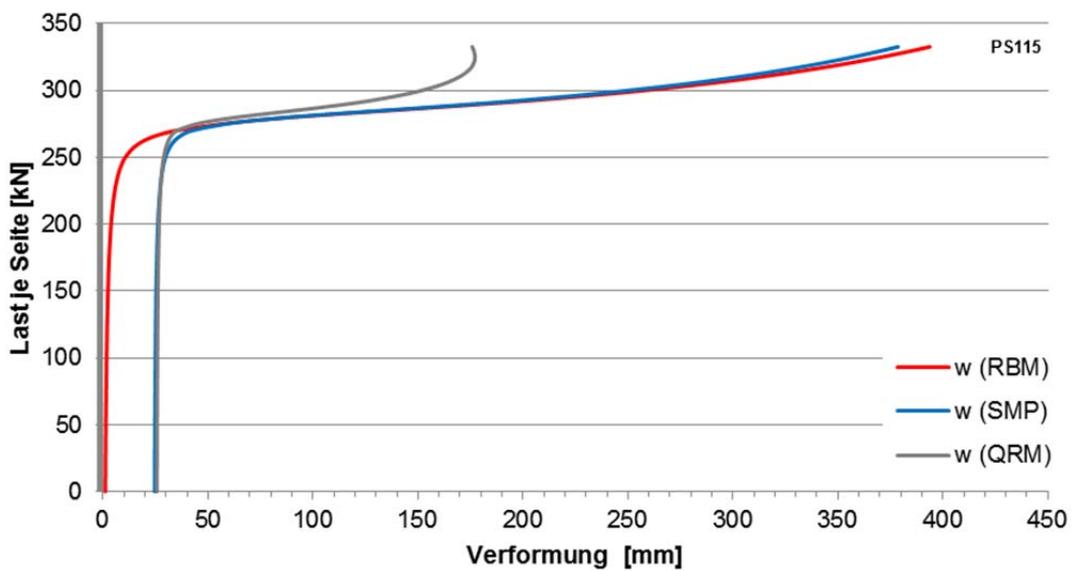
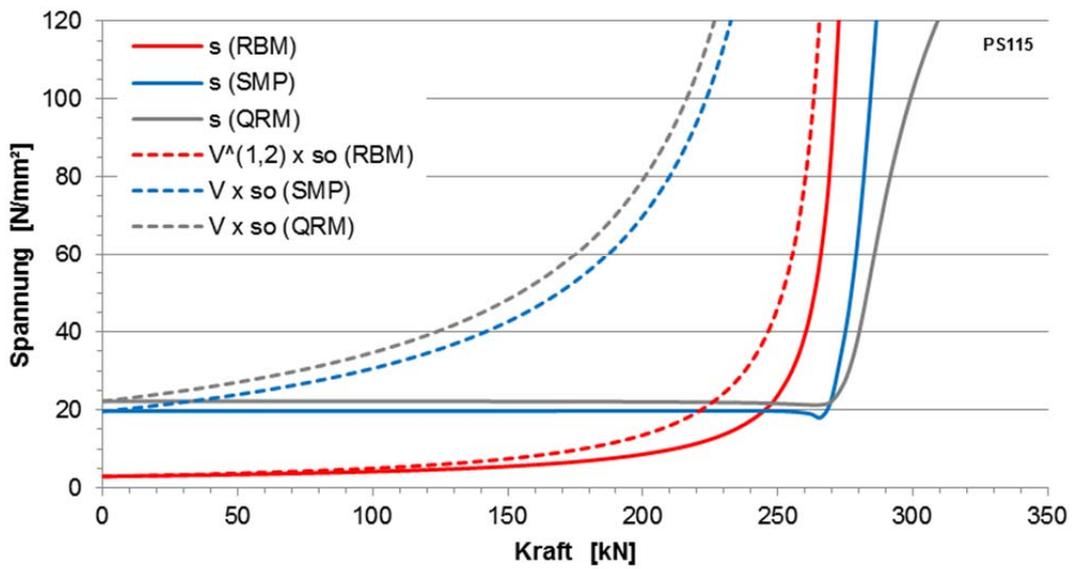
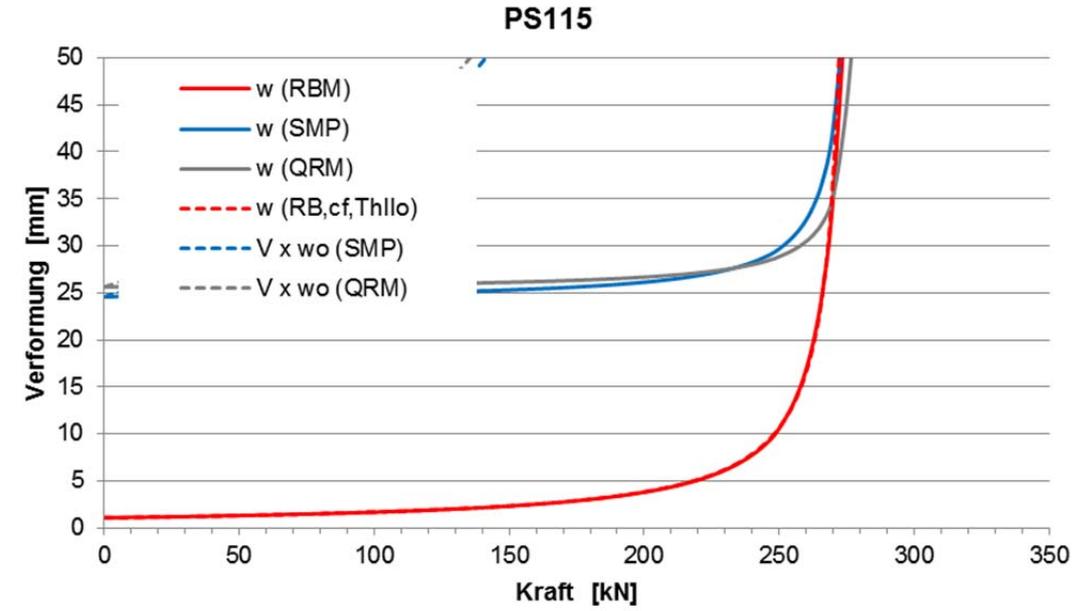


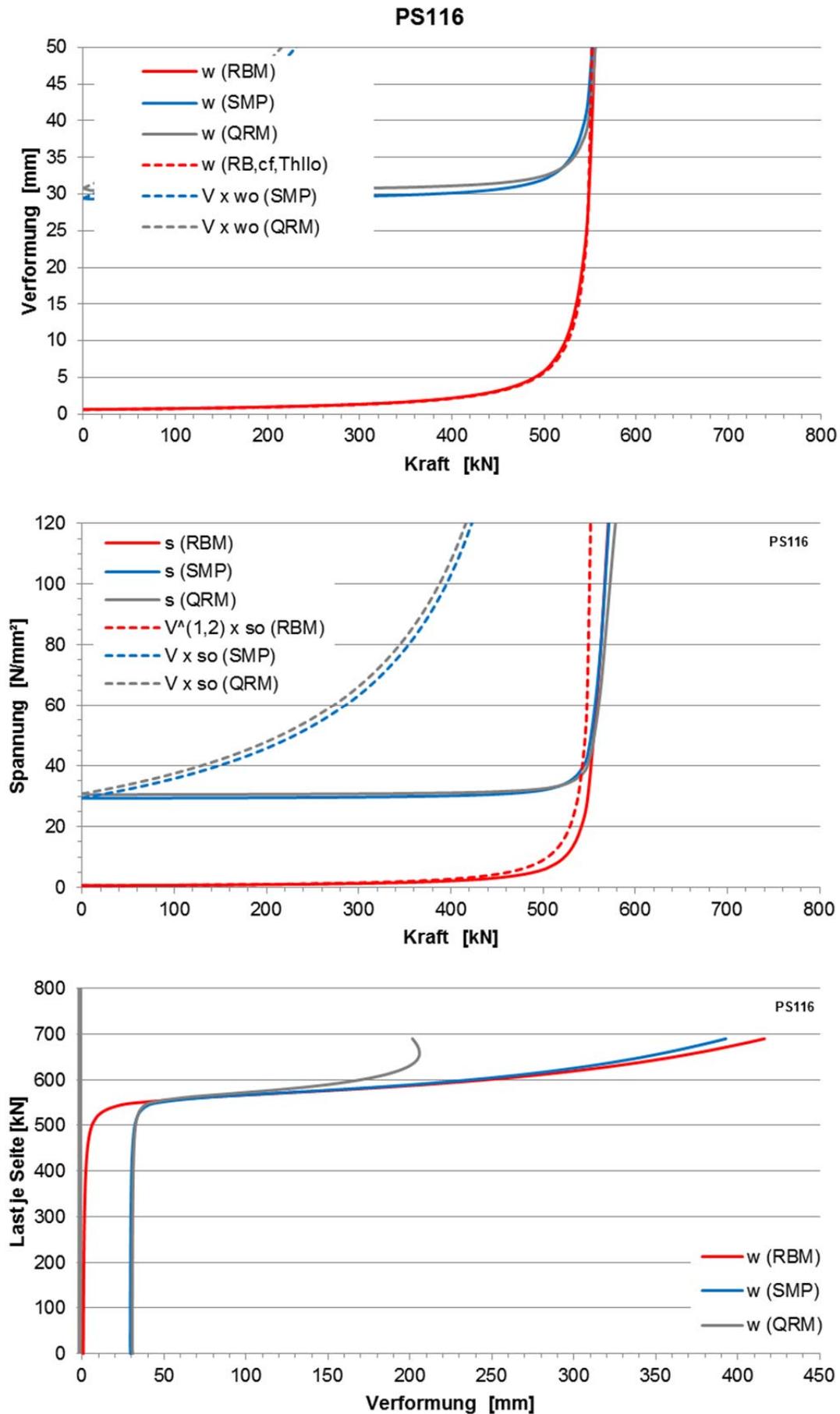




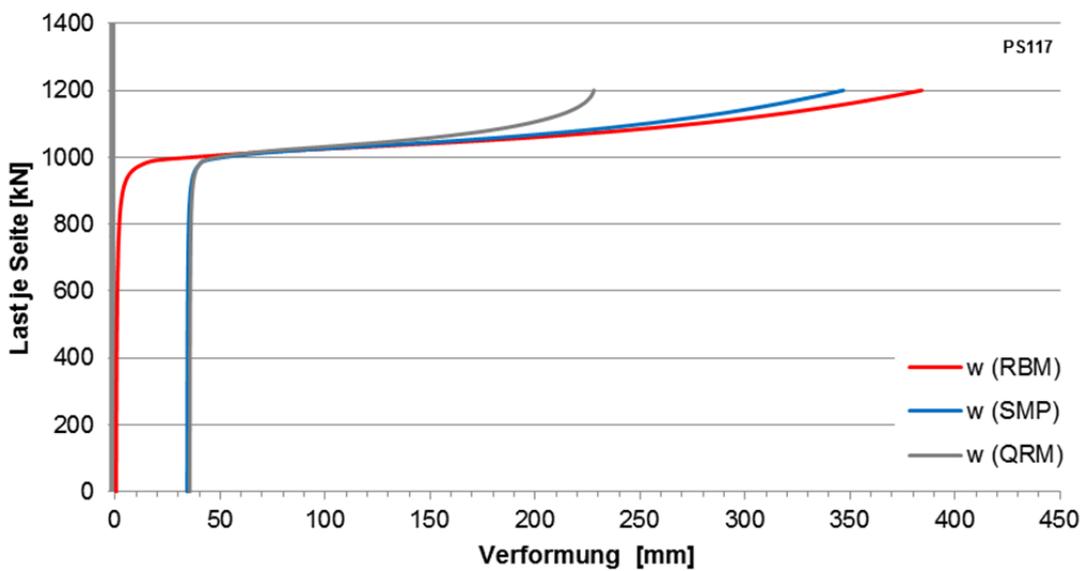
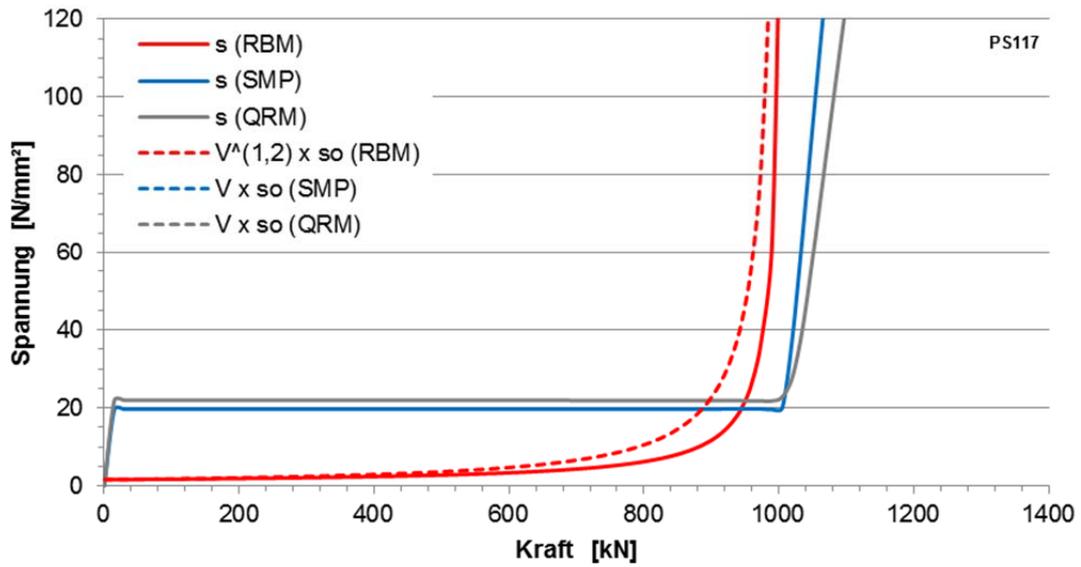
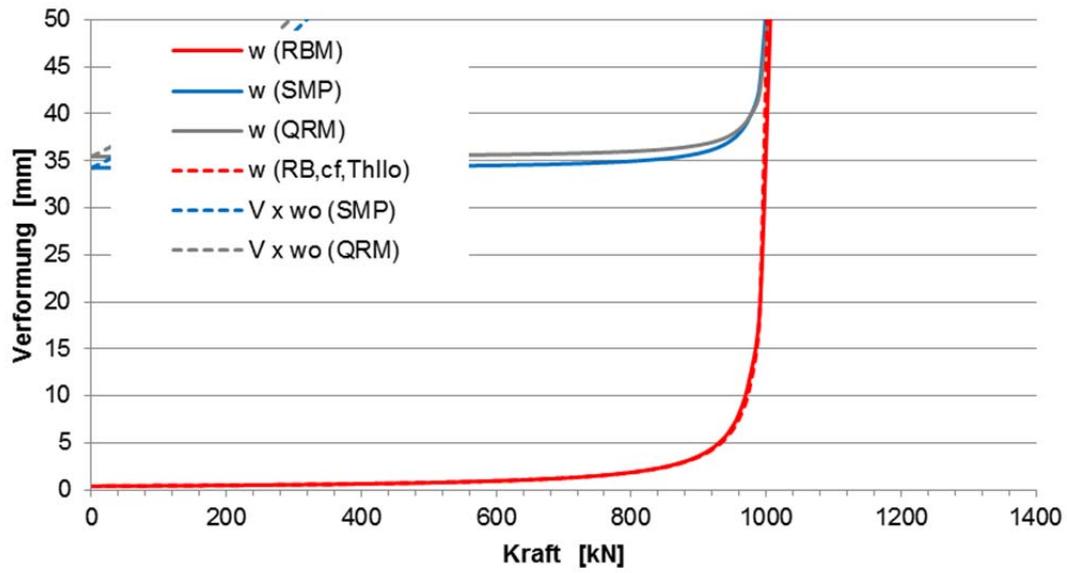


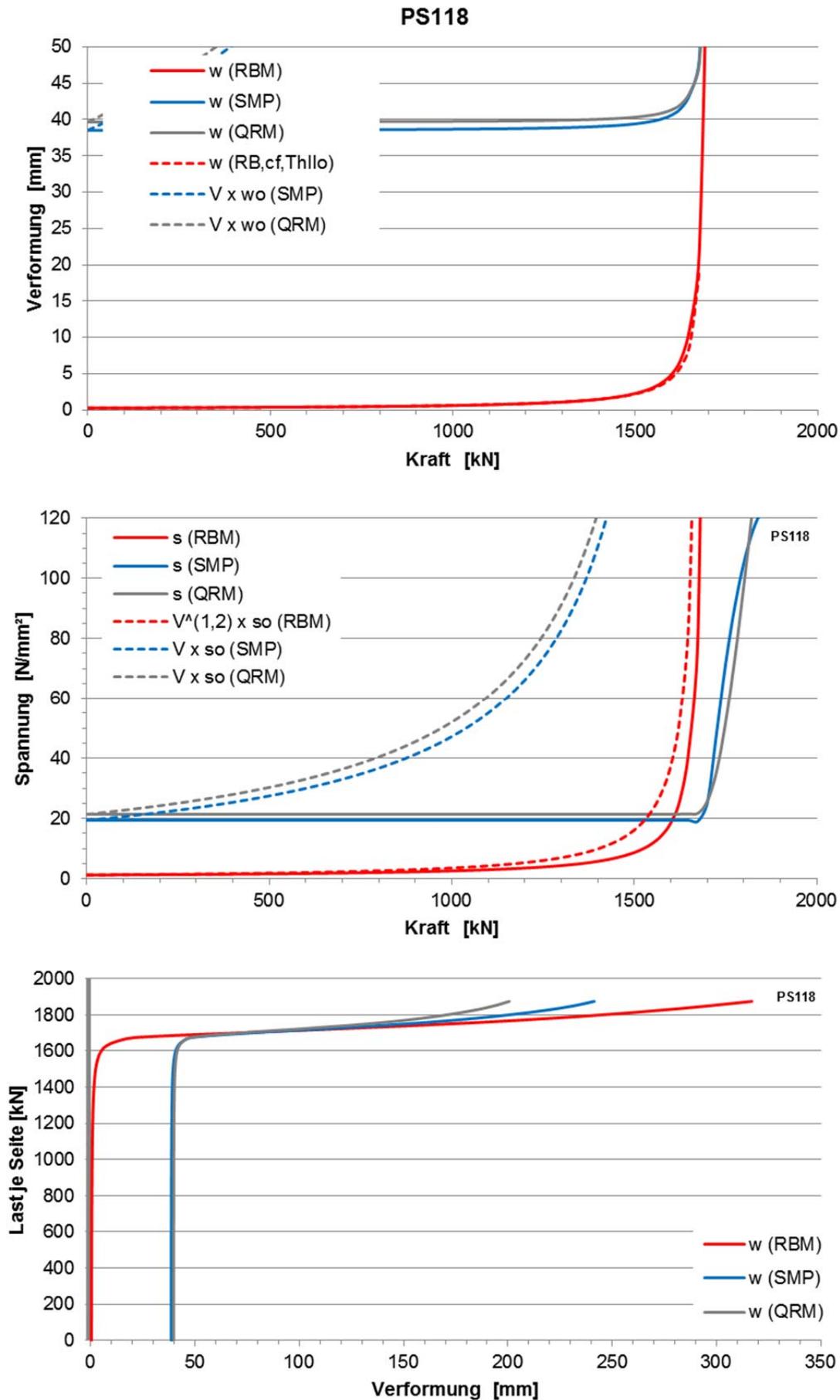


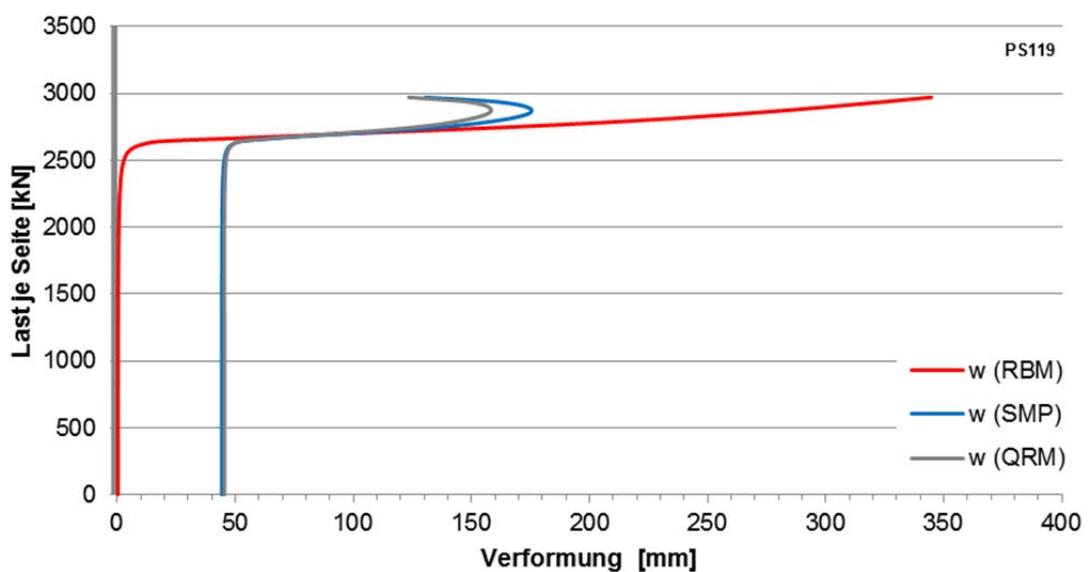
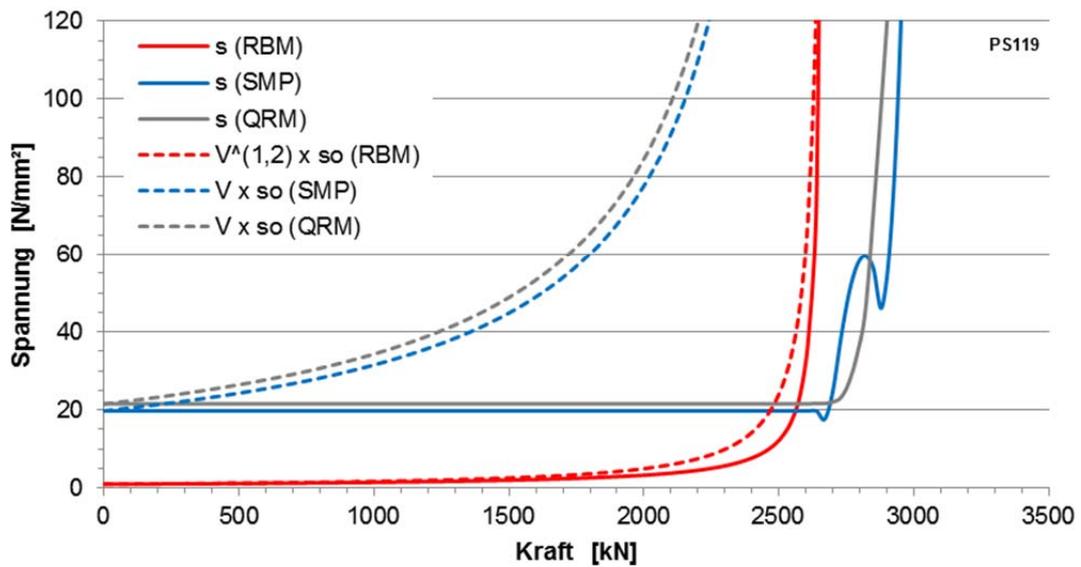
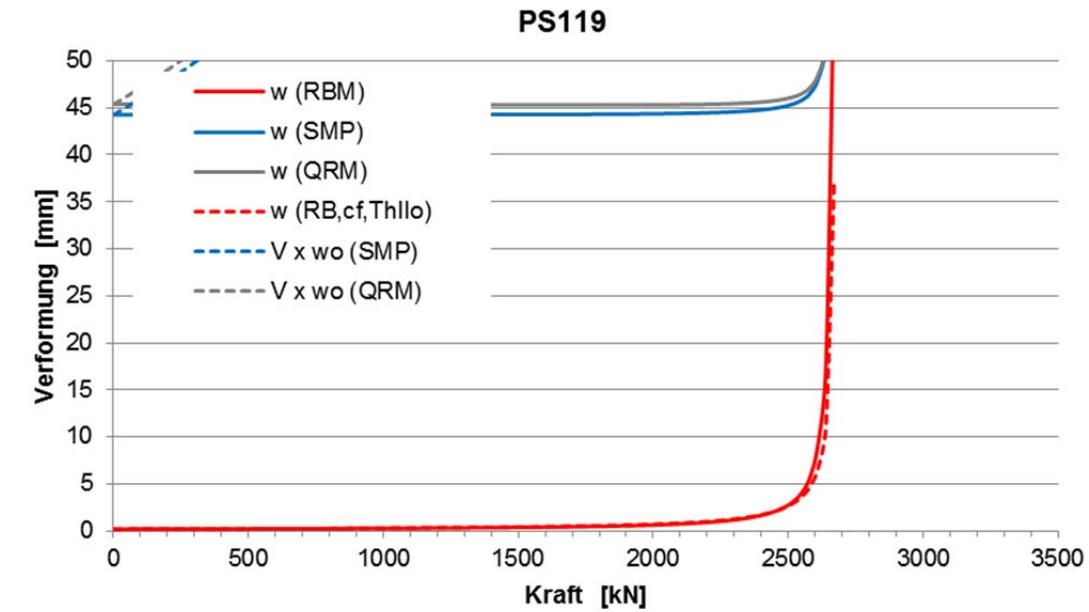


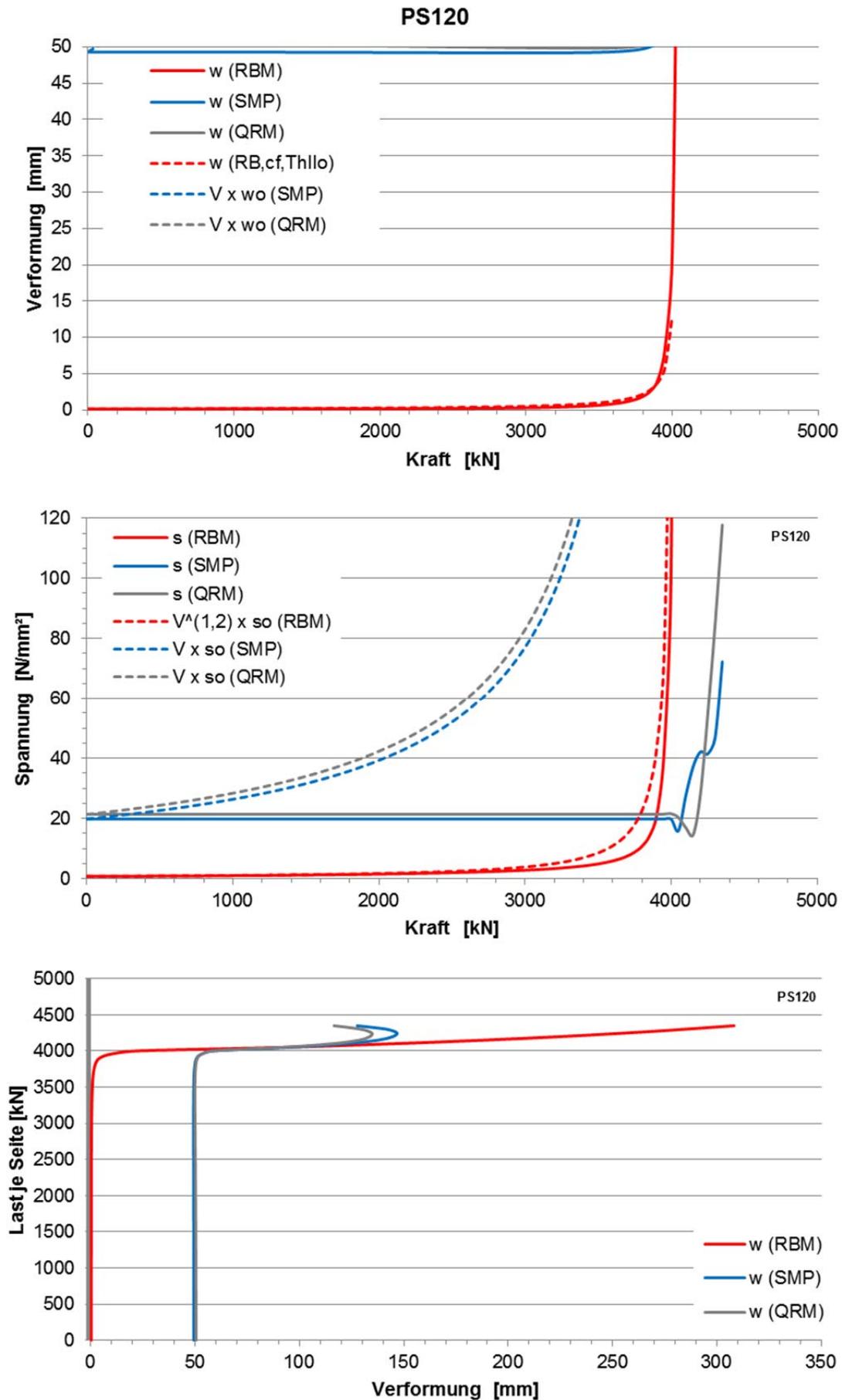


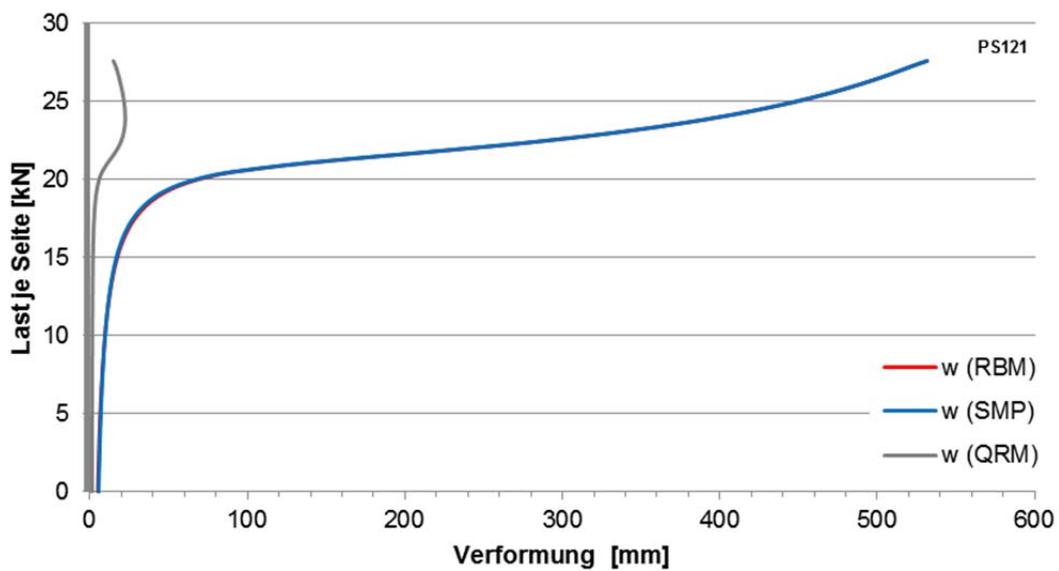
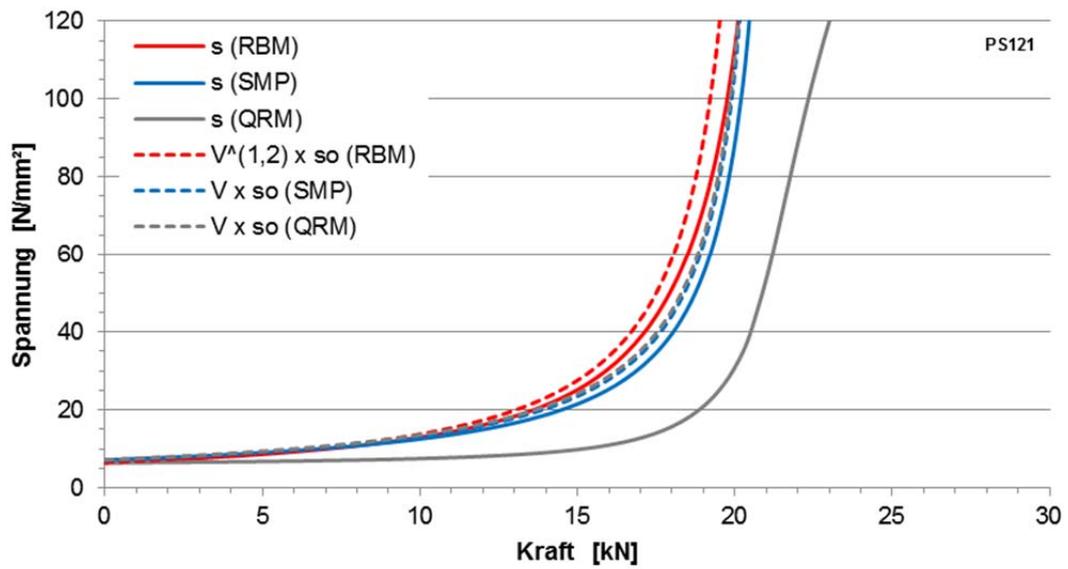
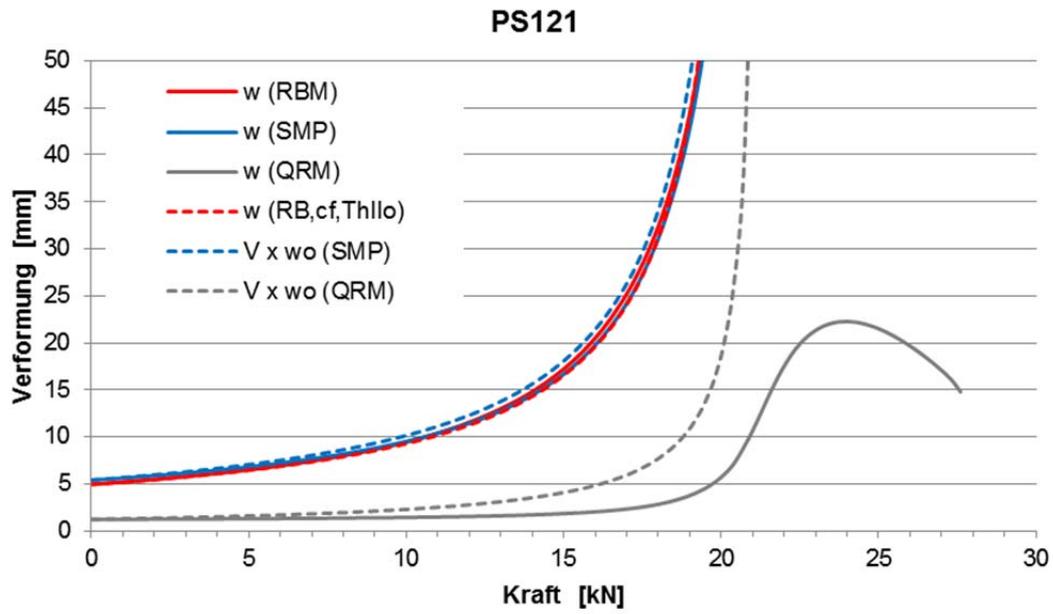
PS117











### A3 Parameterstudie PS2

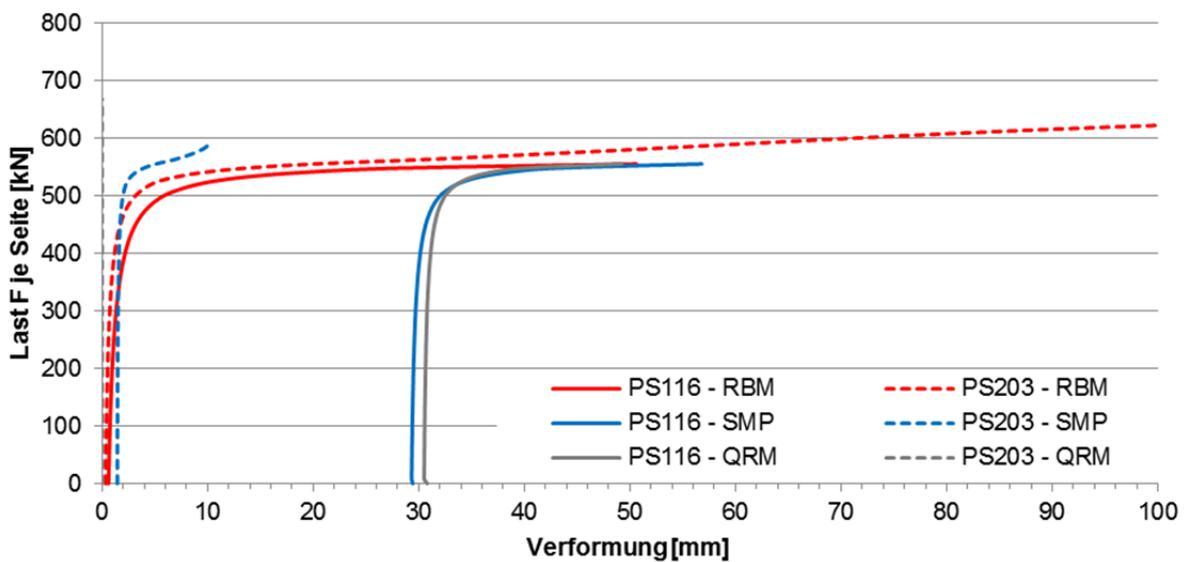
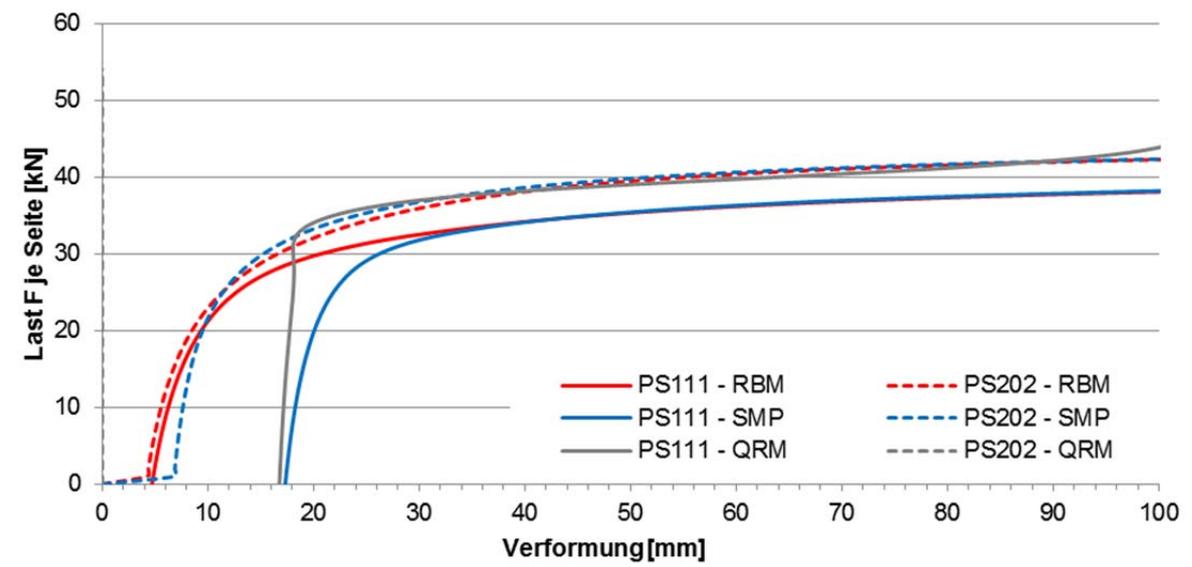
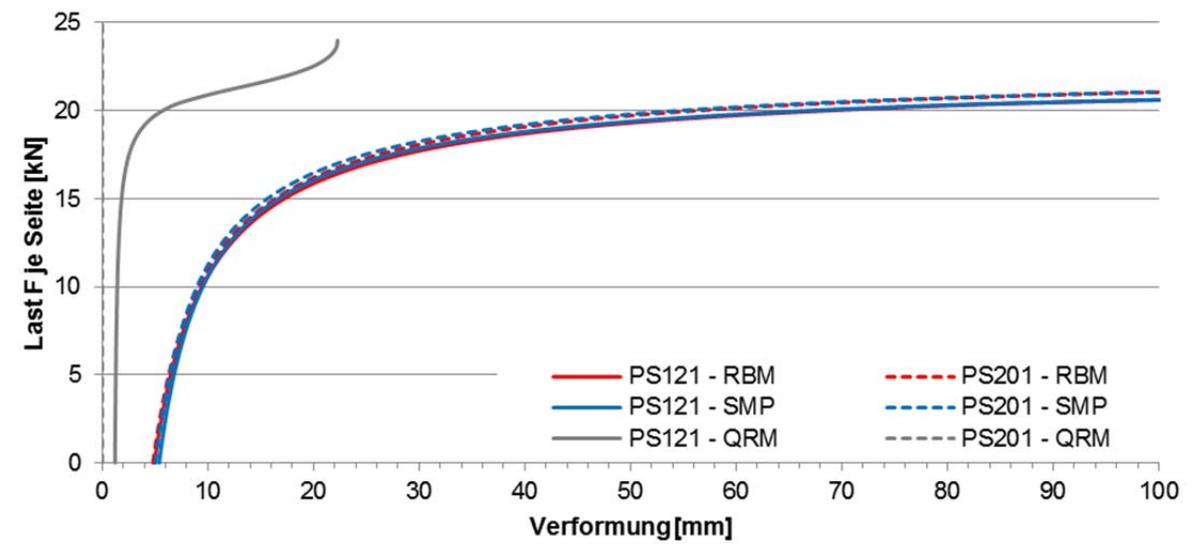
#### A3.1 Parameterdefinition und Eingangswerte

ID	H	a	q	f	s	B	t	I <sub>G</sub>	I <sub>RB</sub>	EI <sub>G</sub>	EI <sub>RB</sub>
	mm	-	kN/m <sup>2</sup>	-	-	mm	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>	Nmm <sup>2</sup>	Nmm <sup>2</sup>
	1500	var	1	0,01	1						
PS201	1500	0,50	1	0,01	1	750	9,10	47084	15695	3,3E+09	3,3E+09
PS202	1500	1,00	1	0,01	1	1500	9,10	94169	31390	6,6E+09	6,6E+09
PS203	1500	2,00	1	0,01	1	3000	18,20	1506696	502232	1,1E+11	1,1E+11

#### A3.2 Ergebniswerte

ID	a	N <sub>ki, FEM</sub>	b <sub>m, FEM</sub>	b <sub>m, cf</sub>	N <sub>ki, cf</sub>	b <sub>m, FEM/B</sub>	b <sub>m, cf/B</sub>	b <sub>m, FEM/H</sub>	b <sub>m, cf/H</sub>
	-	kN	mm	mm	kN	-	-	-	-
PS201	0,50	21,4	361	370	21,6	0,48	0,49	0,24	0,25
PS202	1,00	39,8	565	750	43,4	0,38	0,50	0,38	0,50
PS203	2,00	565,4	666	680	567,5	0,22	0,23	0,44	0,45

A3.3 Ergebnisdiagramme



## A4 Parameterstudie PS3

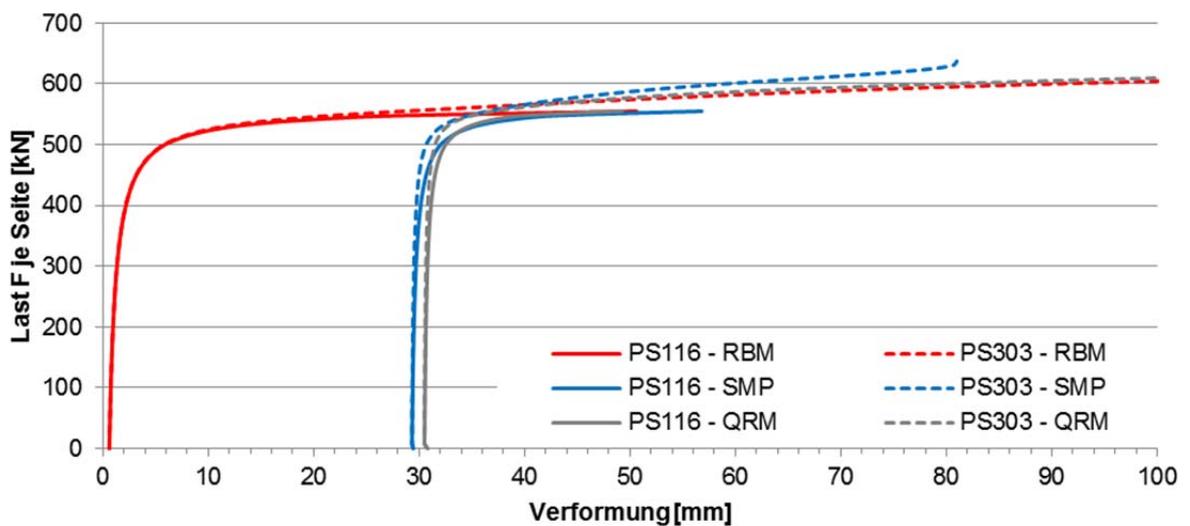
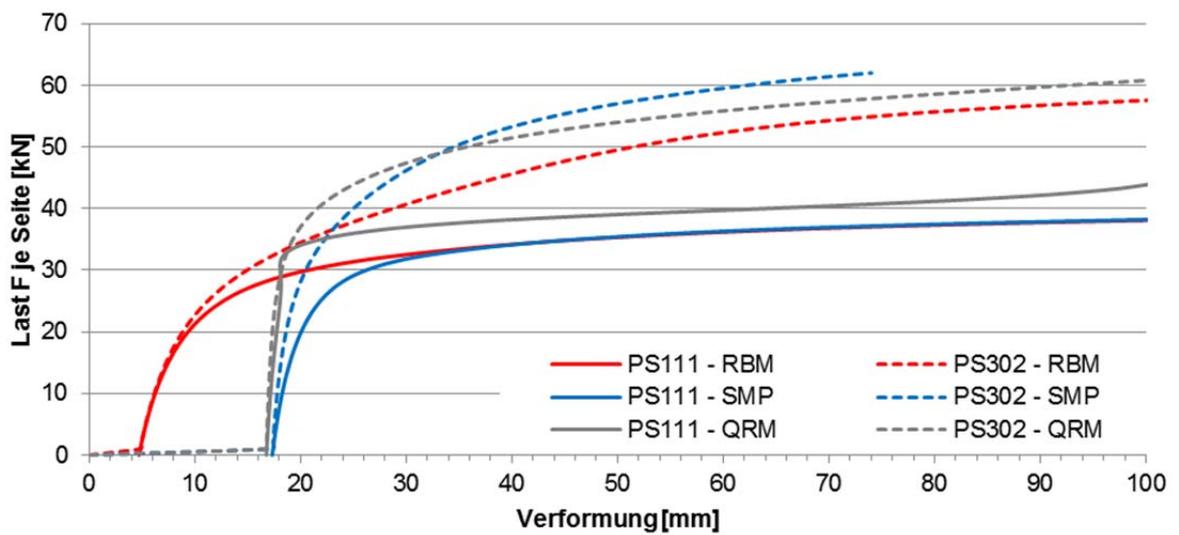
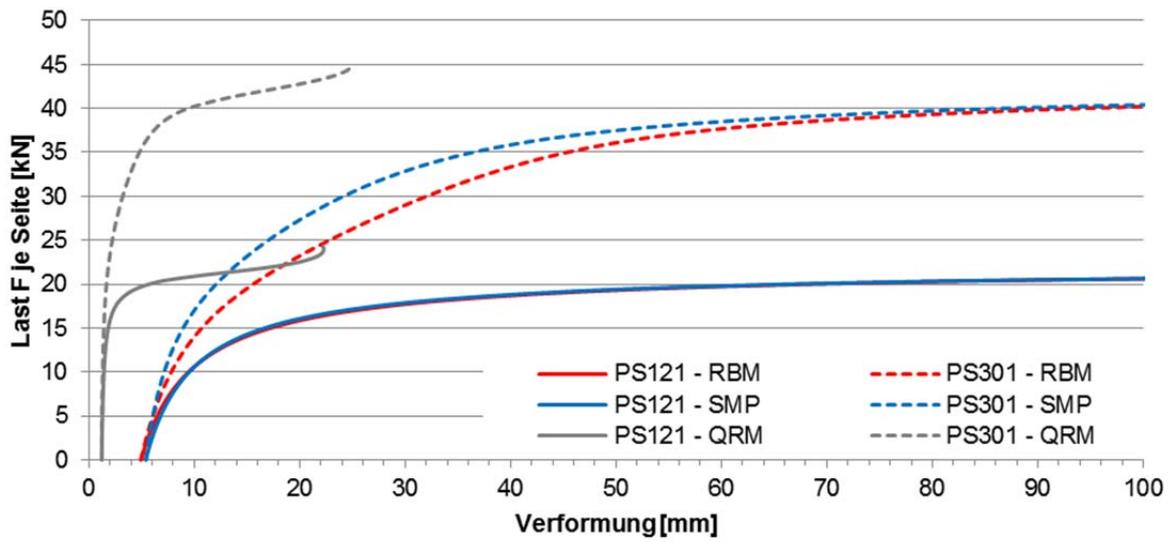
### A4.1 Parameterdefinition und Eingangswerte

ID	H	a	q	f	s	B	t	I <sub>G</sub>	I <sub>RB</sub>	EI <sub>G</sub>	EI <sub>RB</sub>
	mm	-	kN/m <sup>2</sup>	-	-	mm	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>4</sup>	Nmm <sup>2</sup>	Nmm <sup>2</sup>
	1500	var	1	0,01	1						
PS301	1500	0,50	1	0,01	1	750	9,10	47084	15695	3,3E+09	3,3E+09
PS302	1500	1,00	1	0,01	1	1500	9,10	94169	31390	6,6E+09	6,6E+09
PS303	1500	2,00	1	0,01	1	3000	18,20	1506696	502232	1,1E+11	1,1E+11

### A4.2 Ergebniswerte

ID	a	N <sub>ki, FEM</sub>	b <sub>m, FEM</sub>	b <sub>m, cf</sub>	N <sub>ki, cf</sub>	b <sub>m, FEM/B</sub>	b <sub>m, cf/B</sub>	b <sub>m, FEM/H</sub>	b <sub>m, cf/H</sub>
	-	kN	mm	mm	kN	-	-	-	-
PS301	0,50	26,7	635	1200	37,6	0,85	1,60	0,42	0,80
PS302	1,00	41,3	644	1200	52,0	0,43	0,80	0,43	0,80
PS303	2,00	564,2	658	750	578,3	0,22	0,25	0,44	0,50

A4.3 Ergebnisdiagramme





## Verzeichnis der in dieser Schriftenreihe erschienenen Hefte

- 96/1 Gebbeken, N.:** *Zur Untersuchung des linearen Tragverhaltens von Faser-verbundkonstruktionen mittels numerischer Methoden*
- 97/1 Rötzer, J.:** *Ein Beitrag zur Berechnung von Stahlbetontragwerken unter hohen Dehnungsgeschwindigkeiten und hohen Drücken*
- 97/2 Gebbeken, N.; Wanzek, T.; Petersen, C.:** *„Semi-rigid“ Verbindungen – Versuche an „T-stubs“. Versuchsbericht*
- 97/3 Jian, Y.:** *Tragverhalten dünner rechteckiger Stahlplatten mit großen Verformungen unter Berücksichtigung der Membranwirkung*
- 97/4 Reif, F.:** *Mittels geregelter harmonischer Endpunktverschiebung induzierte räumliche Seil-schwingungen.*
- 97/5 Wei, Y.:** *Influences of Creep, Shrinkage and Steel Relaxation on Structural Behaviour.*
- 97/6 Wurzer, O.:** *Zur Tragfähigkeit von Betondübeln.*
- 97/7 Wanzek, T.:** *Zu Theorie, Numerik und Versuchen verformbarer Anschlusskonstruktionen.*
- 97/8 Gebbeken, N.; Rothert, H.; Wanzek, T.:** *Zur Theorie und Finite-Element-Berechnung des Tragverhaltens von verformbaren (semi-rigid) Anschlusskonstruktionen im Stahlbau.*
- 99/1 Böge, G.:** *MAKROS – Pre- und Postprozessing für Finite Elemente – AutoCAD-Erweiterung zur Generierung von FE-Modellen.*
- 00/1 Gebbeken, N.:** *Beiträge zur Begabungs-, Bildungs- und Hochschulpolitik.*
- 00/2 Bettin, I.; Urrutia Galicia, J.C.; Gebbeken, N.:** *On the analysis of vertical circular cylindrical tanks under earthquake excitation at its base.*
- 00/3 Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch.*
- 00/4 Ruppert, M.:** *Zur numerischen Simulation von hochdynamisch beanspruchten Betonstrukturen.*
- 00/5 Sauer, M.:** *Adaptive Kopplung des netzfreien SPH-Verfahrens mit finiten Elementen zur Berechnung von Impaktvorgängen.*
- 01/1 Zapfe, C.:** *Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte.*
- 01/2 Urrutia-Galicia, J. L.:** *Contributions to Applied Mathematics in Engineering*
- 01/3 Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch ergänzte und überarbeitete 2. Auflage*
- 02/1 Matias León, J.C. .:** *Ein Beitrag zur Wirkung von Wellen und Schockwellen in Tragwerken*
- 02/2 Bosl, R.:** *Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandscheiben aus Brettlagenholz*
- 02/3 Fischer, O.; Heinen, A.H.; Thalheim, J.-U.:** *Nichtlineare räumliche Seil-schwingungen*

- 02/4 Paulke, S.:** *Ein Beitrag zur Herleitung und Lösung nichtlinearer, thermomechanisch gekoppelter Grundgleichungen für Schalentragerwerke*
- 02/5 Mangerig, I.; Zapfe, C.:** *Nachweisverfahren und Sanierungsmöglichkeiten für Stahlträgerdecken mit Betonausfachung*
- 03/1 Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch erheblich ergänzte Auflage, 3. Auflage*
- 03/2 Urrutia-Galicia, J.L.:** *„The Best Manifold Theory“, In Frequency Interpretation of Time Dependent Functions, An Application To Seismic Engineering.*
- 03/3 Gebbeken, N.; Bletzinger, K.-U.; Rothert, H.:** *Hrsg. Aktuelle Beiträge aus Baustatik und Computational Mechanics*
- 03/4 Gebbeken, N.; Dittrich, G.; Mueller-Hagen, S.:** *Zur Verwendung und Berechnung von Fahnenblechanschlüssen*
- 04/1 Weiß, J.:** *Vereinfachte Integration von Fachwissen in Computerprogramme am Beispiel eines Planungssystems für die Bauindustrie*
- 04/2 Thalheim, J.-U.:** *Nichtlineare Seilschwingungen und Stabilitätsanalysen für Seilbewegungen*
- 04/3 Gebbeken, N.:** *Wörterbuch Bauwesen Englisch-Deutsch Deutsch-Englisch ergänzte Auflage, 4. Auflage*
- 04/4 Greulich, S.:** *Zur numerischen Simulation von Stahlbeton- und Faserbetonstrukturen unter Detonationsbeanspruchung.*
- 04/5 Ehrlich, I.:** *Impactverhalten schwach gekrümmter Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen*
- 05/1 Lichte, U.:** *Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken*
- 05/2 Petersen, C.:** *Studien zum Einsatz von Erdbebenschutzsystemen*
- 06/1 Kustermann, A.; Keuser, M.; Zimbelmann R. K.; Grimm, R.:** *Hochfeste Bindemittel und Zuschlagstoffe für hochfeste Betone unterschiedlicher Güte“ für Schutzanlagen der militärischen Sonderinfrastruktur*
- 06/2 Bludau, Ch.; Keuser, M.; Kustermann, A.; Thienel K.-Ch.:** *Schutzplatten aus hochfestem Beton (Abschlussbericht)*
- 06/3 Purainer, R.; Keuser, M.:** *Versuche an Stahlbetonscheiben und –platten unter Zugbeanspruchung*
- 06/4 Gebbeken, N.; Keuser, M.; Klaus, M.; Mangerig, I.; Thoma, K. (Hrsg.):** *2. Workshop „BAU-PROTECT“ Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 07/1 Gollwitzer, T.:** *Finite Stabelemente für mehrteilige nachgiebige Verbundquerschnitte zur Berechnung von Brettrippenschalen*
- 08/1 Urrutia-Galicia, J.L.:** *Contributions to Applied Mathematics in Engineering*
- 08/2 Gebbeken, N.; Thoma, K. (Hrsg.):** *3. Workshop „BAU-PROTECT“ Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 09/1 Hartmann, T.:** *Zur mesomechanischen Modellierung von Beton und ihrer Anwendung zur makromechanischen Modellbildung*

- 10/1 Baumhauer, A.:** *Beurteilung geschädigter Brückenbauwerke unter Berücksichtigung unscharfer Tragwerksparameter*
- 10/2 Bierbrauer, K.:** *Ein Beitrag zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit bestehender Stahlbetonbrücken unbekannter Eigenschaften*
- 10/3 Rüdiger, L.:** *Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Berücksichtigung der Steifigkeitsänderung im gerissenen Zustand*
- 10/4 Fuchs, M.:** *Stahlbetonbauteile nach außergewöhnlichen Einwirkungen – Schadensquantifizierung und Instandsetzung*
- 10/5 Braml, T.:** *Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk*
- 10/6 Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig**
- 10/7 Seel, U.:** *Der konzeptionelle Entwicklungswandel von Flughafenterminalgebäuden in der Gegenüberstellung zur Entstehungsgeschichte des Flughafens München*
- 11/1 Retze, U.:** *Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke*
- 11/2 Burger, S.:** *Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Betondübeln im Verbundbau*
- 11/3 Kroyer, R.:** *Instationäres Temperatur- und Strukturverhalten von Stabwerkstrukturen*
- 11/4 Urrutia-Galicia, J. L.:** *Contributions to Applied Mathematics in Engineering III*
- 11/5 Köck, B.:** *Barocke Dachwerke: Konstruktion und Tragverhalten*
- 12/1 Teich, M.:** *Interaktionen von Explosionen mit flexiblen Strukturen*
- 12/2 Beucher, S.:** *Zur aktiven Temperierung von Brückenfahrbahnen*
- 12/3 Döge, T.:** *Zur Reflexion von Luftstoßwellen an nachgiebigen Materialien und Baustrukturen*
- 12/4 Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser**
- 12/5 Gebbeken, N.; Klaus, M.; Thoma, K. (Hrsg.):** *5. Workshop „BAU-PROTECT“ Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*
- 12/6 Linse, T.:** *Materialmodelle für Mörtel und Ziegel für die diskrete Modellierung von Mauerwerk unter dynamischen Einwirkungen*