

**Einfluss periodischer Überlasten auf die Ermüdungsrissausbreitung
in einer hochfesten Aluminiumknetlegierung
unter Berücksichtigung des Kurz- und Langrisswachstums**

Gero Wilhelm

**Einfluss periodischer Überlasten auf die Ermüdungsrissausbreitung
in einer hochfesten Aluminiumknetlegierung
unter Berücksichtigung des Kurz- und Langrisswachstums**

Gero Wilhelm

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender des Promotionsausschusses:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Lion

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Gudladt

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

Die Dissertation wurde am 23.02.2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 25.02.2015 angenommen.

Die mündliche Prüfung fand am 23.11.2015 statt.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München.

Mein Dank gilt allen, die zum Gelingen beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gudladt als Leiter des Instituts für Werkstoffkunde (IWK) und Betreuer der Dissertation danke ich besonderem Maße, da er mir sieben Jahre nach meinem Diplom wieder wissenschaftliches Arbeiten ermöglicht hat, stets neugierig Zwischenergebnisse interpretierte, mich mit Ideen und Anregungen versorgte und weitergehende Überlegungen einforderte.

Ich bedanke mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. I. Mangerig für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Lion danke ich für die Leitung des Promotionsausschusses.

Mein spezieller Dank gilt dem Oberassistenten des Institutes, Herrn Dr. Jürgen Bär. Ich konnte stets auf die praktischen Erfahrungen mit der Versuchstechnik, das umfangreiche Detailwissen sowie Rat und Tat in vielen Lebenslagen zurückgreifen. Hierfür war ich gerne Dein „Vorzimmermajor“ und „Hausmeistergehilfe“!

Bei meinem Vorgänger, Herrn Dr. Rolf Brucksch bedanke ich mich auch für einen nicht unwesentlichen Anteil daran, dass ich die zweite schöne Zeit an der Universität verbringen durfte. Sowohl auf seinem Versuchsaufbau als auch auf den Ergebnissen seiner Arbeit konnte ich aufbauen und mich bei Fragen stets an ihn wenden. Ebenfalls für die aufmunternden und anspornenden Worte noch einmal DANKE!

Meinen Mitstreitern Dr. Thomas Felsner, Dr. Stephan Frömmel und Dipl.-Ing. Christine Winter danke ich für das gemeinsame Anpacken sowie das anregende Arbeitsumfeld.

Für die Beratung bezüglich metallographischer Fragestellungen danke ich Herrn Christoph Kröber, für die gewissenhafte Probenfertigung danke ich dem Werkstattmeister des IWK, Herrn Dietmar Krause.

Ebenfalls möchte ich Frau Waltraut Müller dankend erwähnen, die sich gewissenhaft um die administrativen Belange des Institutes kümmerte.

Für die drei Jahre in sehr angenehmer Atmosphäre waren zusätzlich zu den bereits genannten IWK-Mitgliedern Herr Thomas Kaspar, Frau Edda Friebe und Herr Georg Semmelmann verantwortlich. Danke hierfür!

Weiterhin möchte ich mich bei allen Studenten bedanken, aus deren betreuten Arbeiten Ergebnisse in diese Dissertation eingeflossen sind.

(Nur in der Aufzählung) Zuletzt geht ein besonders herzlich gemeinter Dank an meine Familie, die sich sehr in Geduld üben musste; an meine Frau Susanne, die mir stets den Rücken freigehalten hat und an unsere Kinder, für die sich jede Bemühung lohnt.

Gero Wilhelm, im Dezember 2015

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Begriffsklärung Ermüdung	3
2.2	Beschreibung von Ermüdungsrissausbreitung mit LEBM.....	5
2.3	Technischer Anriss	9
2.4	Markerloads.....	9
2.5	Untersuchung von Überlasten.....	10
2.5.1	Untersuchungsergebnisse für einzelne Überlasten	12
2.5.2	Untersuchungsergebnisse für periodische Überlasten.....	13
3	Versuchsdurchführung.....	15
3.1	Verwendeter Werkstoff.....	15
3.1.1	Chemische Zusammensetzung.....	15
3.1.2	Behandlungszustand und Werkstoffkennwerte	15
3.2	Beschreibung der Probengeometrien	16
3.2.1	CCT-Proben.....	16
3.2.2	SEN-Proben.....	17
3.3	Überlastexperimente.....	17
3.3.1	Versuchsführung	18
3.3.2	Versuche zur Untersuchung des Anrissverhaltens.....	20
3.4	Versuchsaufbau	20
3.4.1	Prüfraumen	21
3.4.2	Gleichstrompotenzialsonde	23
3.4.3	Verwendung der Gleichstrompotenzialsonde	27
4	Ergebnisse	31
4.1	Lebensdauer bei einstufigen Versuchen	31
4.2	Lebensdauer bei Überlast.....	32
4.3	Risswachstum unter Überlasteinfluss	36
4.3.1	Korrelation von Lebensdauer und Risslänge.....	36
4.3.2	Übergang zwischen stabiler und instabiler Rissausbreitung.....	38
4.3.3	Allgemeine Rissentwicklung.....	40
4.3.4	Rissgeschwindigkeiten bei langen Rissen.....	49
4.3.5	Rissgeschwindigkeiten bei kurzen Rissen an Kerben	51

4.4	Wirkung von Überlasten auf die Rissausbreitung	62
4.4.1	Interaktion von Überlasten	62
4.4.2	Überlastwirkung auf die Rissausbreitung unter Grundlastbeanspruchung.....	66
5	Diskussion der Ergebnisse	73
5.1	Beeinflusste Lebensdauern	73
5.2	Verändertes Risswachstum	75
5.2.1	Endriszlängen	76
5.2.2	Rissgeschwindigkeiten bei langen Rissen.....	77
5.2.3	Wirkung von Überlasten auf die Rissausbreitung	78
5.2.4	Interferenz für $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und Verzögerung	81
5.2.5	Folgerung für Versuche unter Betriebsbeanspruchung.....	82
5.3	Rechnerische Lebensdauerabschätzung	83
5.3.1	Lebensdauerabschätzung mittels Schadensakkumulation	83
5.3.2	Lebensdauerabschätzung über Rissfortschrittsrechnung.....	84
5.3.3	Parameter für die Lebensdauerabschätzung über Rissausbreitung	84
5.3.4	Berechnungen mit Programm Rissausbreitung	85
5.4	Beschreibung des Kurzrisswachstums an Kerben	89
5.4.1	Rissgeschwindigkeiten von kurzen Rissen an Kerben	89
5.4.2	Spannungsintensität für kurze Risse an Kerben.....	91
5.4.3	Technischer Anriss.....	94
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	95
7	Anhang	97
8	Literaturverzeichnis	98
9	verwendete Parameter für Rissfortschrittsrechnung.....	103
10	Formel- und Abkürzungsverzeichnis	104
11	Abbildungsverzeichnis.....	107
12	Tabellenverzeichnis	109

1 Einleitung

Durch gestiegene Anforderungen an Bauteile im Bereich der Luftfahrt sowie zunehmend auch in anderen Industriezweigen besteht weiterhin ein hoher Informationsbedarf bezüglich der Eigenschaften eingesetzter Materialien. Während auf der einen Seite versucht wird, metallische Werkstoffe und Materialverbunde entsprechend des gewünschten Einsatzes zu ertüchtigen, kann die Forschung auf der anderen Seite durch verbesserte Methoden Daten für eine optimierte Ausnutzung der Werkstoffe bereitstellen.

Gründe für den Wunsch eines möglichst effektiven Materialeinsatzes liegen hauptsächlich in den Forderungen nach besserer Effizienz von Maschinen (z.B. aufgrund knapper werdender Ressourcen) und höherer Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Sicherstellung eines dauerhaft ausfallfreien Betriebes mit bestmöglichem Komfort.

Konkret auf ein Luftfahrzeug bezogen müssen tragende Strukturen nicht nur wechselnden mechanischen Beanspruchungen und Umwelteinflüssen wie Temperaturschwankungen oder korrosiven Medien standhalten, sondern auch eine möglichst geringe Masse aufweisen. Die geforderte Lebensdauer kann bei einzelnen Bauteilen mindestens eine definierte Anzahl an Flugstunden zwischen zwei Inspektionen umfassen, Primärstrukturen hingegen sollen in der Regel einen sicheren Betrieb des Luftfahrzeuges über die gesamte Nutzungsdauer ermöglichen.

Zur Lebensdauervorhersage betriebsbeanspruchter Bauteile wurden zahlreiche Konzepte mit unterschiedlichen Ansätzen entwickelt. Hierbei ist die Grundlagenforschung zur Untersuchung der Materialeigenschaften von praxisorientierten Testreihen zu unterscheiden, welche auf dem konkreten Einsatzbezug eines Bauteils basieren.

Allen Konzepten gemein ist die Spezifikation einer Schädigung, welche als lebensdauerbestimmend (oder zumindest lebensdauerbeschreibend) angenommen wird. Die Lebensdauer selbst wird durch lokale Spannungskonzentrationen bestimmt, die zur beschleunigten Rissbildung beitragen. Der Riss wächst unter entsprechender Belastung bis das Bauteil bzw. die Probe versagt.

Mit Verbesserungen in der Messtechnik sowie in den -verfahren bietet sich die Risslänge als experimentell immer besser detektierbare Größe zur Lebensdauerbestimmung an.

Nicht abschließend geklärt ist die Frage, ob der dominante Teil der Lebensdauer, hervorgerufen durch frühes Risswachstum rechnerisch nachvollzogen bzw. mittels geeigneter Schädigungskonzepte abgeschätzt werden kann.

Um die Bedeutung von rissbasierten Schädigungskonzepten herauszustellen gilt es also, Risse im frühen Stadium der Ermüdung zu detektieren und anhand der Rissentwicklung zu beschreiben.

Trotz einer Vielzahl an Untersuchungen und immer besserer Versuchstechnik werden sich auf absehbare Zeit Ausfälle nicht gänzlich vermeiden lassen. Bereits vorhandene Schäden wie z.B. Materialfehler oder Bearbeitungsspuren sowie im Einsatz entstehende Risse durch extreme Belastungen oder Fehlbedienungen können die Ursache für katastrophale Unglücksfälle sein.

Die Aussicht auf bessere Lebensdauerprognosen und eine höhere Effizienz beim Einsatz von Luftfahrtmaterialien war die Motivation für die Untersuchungen.

Es soll ein Aspekt aus dem Bereich der Ermüdung von metallischen Werkstoffen am Beispiel einer hochfesten Aluminiumknetlegierung dargestellt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Beschreibung des Wachstums langer Risse unter dem Einfluss periodischer Überlasten zu verbessern und somit die Lebensdauerabschätzung in der klassischen Rissfortschrittsphase zu optimieren. Zusätzlich soll die verwendete Gleichstrompotenzialsonde hinsichtlich der Detektionsmöglichkeit von Bildung sowie Ausbreitung kurzer Risse bewertet werden.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsklärung Ermüdung

Wer sich der Thematik Betriebs- oder auch Ermüdungsfestigkeit nähert, trifft auf eine ständig wachsende und kaum überschaubare Auswahl an Aufsätzen, Publikationen, Konferenzbänden und Fachbüchern. Hierdurch wird einerseits deutlich, dass die Thematik mit hohem Interesse verfolgt wird, andererseits zeigt sich, dass noch immer viele Fragestellungen einer Lösung bedürfen. Stellvertretend sei an dieser Stelle auf die Werke von *Suresh* (Suresh, 1998), *Christ* (Christ, 2009), *Schwalbe* (Schwalbe, 1980), *Haibach* (Haibach, 2006) sowie *Radaj* und *Vormwald* (Radaj, et al., 2007) verwiesen.

Die Ermüdung im materialwissenschaftlichen Verständnis ist eine Reaktion des verwendeten Werkstoffes auf einen zeitabhängigen Spannungs- und Dehnungsverlauf.

Im einfachsten Fall kann die Beanspruchung durch eine sinusförmige Schwingung wie in Abbildung 2-1 dargestellt werden.

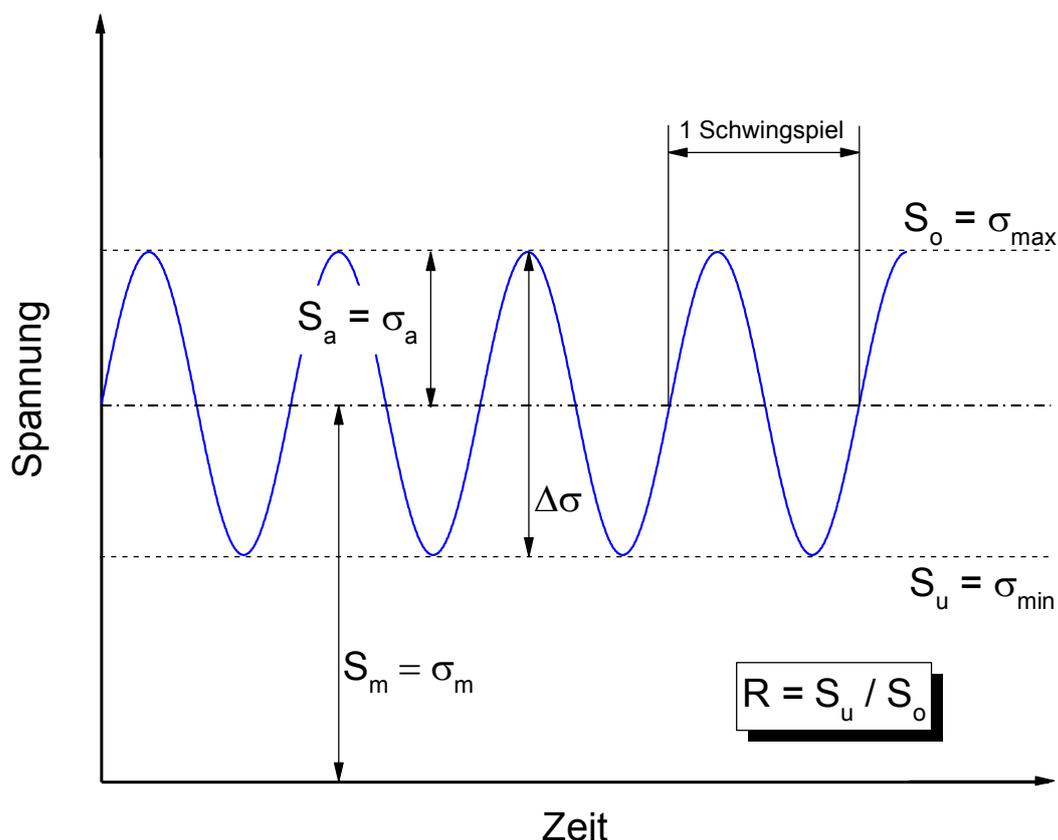


Abbildung 2-1: Kenngrößen zyklischer Beanspruchung

Die Abbildung 2-1 verdeutlicht zudem wichtige Kenngrößen zur Beschreibung zyklischer Lastfolgen.

S_o bzw. σ_{\max} bezeichnet die maximale Spannung, S_u bzw. σ_{\min} die minimale Spannung.

Aus dem Verhältnis von Ober- und Unterspannung ergeben sich weitere Kenngrößen:

- das Spannungsverhältnis R:

$$R = \frac{S_U}{S_O} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

- die Mittelspannung S_m :

$$S_m = \frac{S_O + S_U}{2}$$

- die Spannungsamplitude S_a :

$$S_a = \frac{S_O - S_U}{2}$$

- sowie die Schwingbreite $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = S_O - S_U$$

Als Ergebnis der Belastung finden im Material Versetzungsbewegungen statt. Es bilden sich mikroskopische und makroskopische zyklische plastische Verformungen. Eine ausreichend hohe Belastung führt zu einer Rissinitiierung, d.h. zu einer Neubildung von Rissen.

In Bauteilen muss davon ausgegangen werden, dass durch Werkstoffinhomogenitäten oder fertigungsbedingt bereits Risse vorhanden sind. Durch eine Ermüdungsbeanspruchung wird das Wachstum dieser Risse angeregt.

Abhängig von der Belastungshöhe folgt eine mehr oder weniger ausgeprägte Phase stabilen Risswachstums, die durch den Rest- bzw. Gewaltbruch beendet wird. Der Gewaltbruch selbst läuft mit instabilem Risswachstum ab.

Die Anzahl an ertragenen Schwingspielen, welche einzelnen Abschnitten oder auch der Summe mehrerer Phasen zugeordnet werden, wird als Lebensdauer bezeichnet.

Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht dieser Zuordnung (Richard, et al., 2009).

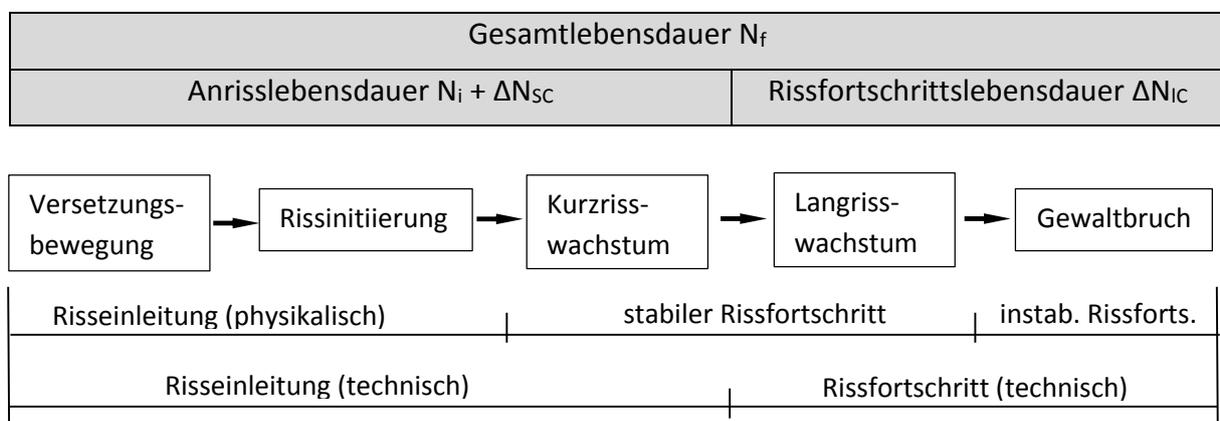


Abbildung 2-2: Phasen der Rissausbreitung (Radaj, et al., 2007), (Richard, et al., 2009)

Der Begriff Ermüdung umfasst somit sowohl die Risseinleitung, das Risswachstum als auch den Restbruch.

Radaj und Vormwald (Radaj, et al., 2007) beziehen sich in ihrem Übersichtswerk auf die Ergebnisse zahlreicher Autoren und zeigen die Abhängigkeit der Materialermüdung von mehreren Faktoren:

Werkstoff, Beanspruchungsmehrachsigkeit, Probengröße, Oberflächenverfestigung, Eigenspannungen, Oberflächenrauigkeit, Korrosion und Temperatur.

Die Ermüdung zeigt sich somit als ein nicht entkoppelbares Vielparameterproblem. Die Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit sind hierbei in den einzelnen Abschnitten der Lebensdauer unterschiedlich stark.

2.2 Beschreibung von Ermüdungsrissausbreitung mit LEBM

Die Basis der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM) lieferte *Griffith* mit dem im Jahr 1921 formulierten Spröbruchkriterium in Form eines Energiekonzepts.

Er betrachtete hierbei die Trennung von Atomlagen für ein elliptisches Loch in einer unendlich ausgedehnten Platte. Eine Verringerung der kleinen Ellipsenhalbachse führt zu einem Riss der Länge $2a$.

Sneddon 1946, *Irwin* 1957 und *Williams* 1957 vereinfachten die von *Westergaard* 1939 für eine unendlich schmale Ellipse in einem elastischen Kontinuum angegebenen Spannungsgleichungen für einen unendlich scharfen Riss (Schwalbe, 1980).

Die mathematische Beschreibung des Spannungsfeldes vor der Risspitze (vgl. Abbildung 2-3) betrachtet die unmittelbare Rissspitzenumgebung, d.h. $r/a \ll 1$ und vernachlässigt Terme höherer Ordnung.

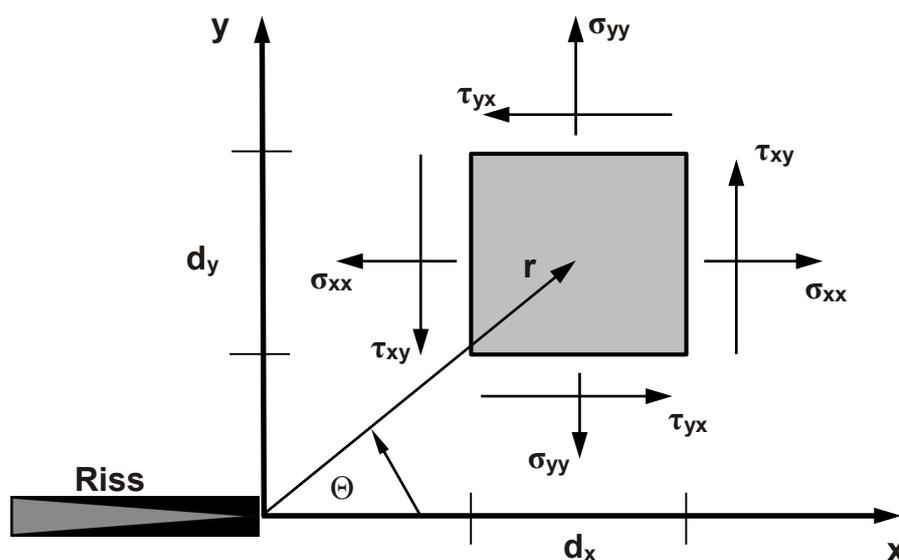


Abbildung 2-3: Spannungsfeld vor der Risspitze

Abhängig von der anliegenden Belastung werden die drei in Abbildung 2-4 dargestellten Rissöffnungsarten unterschieden (Broek, 1982). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente und Berechnungen beschränkten sich auf die Modus-I-Belastung.

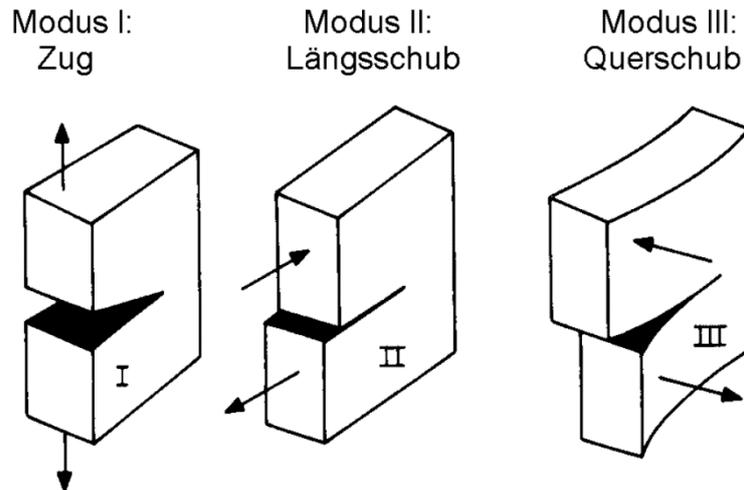


Abbildung 2-4: Rissöffnungsarten [nach (Broek, 1982)]

Der Belastungszustand vor der Risspitze lässt sich nunmehr mit Hilfe des von Irwin eingeführten Spannungsintensitätsfaktors K beschreiben, der mit der mechanischen Spannung die äußere Belastung beinhaltet und zudem von der Risslänge sowie der Bauteilgeometrie abhängig ist.

Für den Modus I (reine Zugbeanspruchung) ergibt sich der Spannungszustand vor der Risspitze zu:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3}{2} \cdot \theta\right) \\ 1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3}{2} \cdot \theta\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{3}{2} \cdot \theta\right) \end{pmatrix}$$

Auf dem Ligament ($\theta = 0$) entsprechen sich die Spannungskomponenten σ_x und σ_y . Der Spannungsintensitätsfaktor kann somit über:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

berechnet werden. Die Angabe erfolgt in $MPa\sqrt{m}$.

Der dimensionslose Korrekturterm $f\left(\frac{a}{W}\right)$ berücksichtigt die Bauteilgeometrie. Eine Aufstellung zahlreicher Varianten bietet u.a. *Murakami* (Murakami, 1987).

Die vorstehenden Ausführungen bzgl. des Spannungsintensitätsfaktors gelten nur für den linear-elastischen Bereich. Bei der Anwendung auf technische Werkstoffe muss daher sichergestellt werden, dass die infolge nichtlinearen Werkstoffverhaltens auftretenden Plastifizierungen im Bereich der Rissspitze klein gegenüber den sonstigen Abmessungen sind (Heckel, 1991).

Werden Rissfortschrittsraten $\frac{da}{dN}$ unter schwingender Beanspruchung mit konstantem Spannungsverhältnis R experimentell ermittelt und über der Spannungsintensität K aufgetragen, ergeben sich S-förmige Kurven (Haibach, 2006). Darstellungen über den Maximalwerten K_{\max} oder über der zyklischen Spannungsintensität ΔK sind hierbei üblich.

Abbildung 2-5 zeigt eine schematische Rissausbreitungskurve. Wird der Schwellenwert K_{th} überschritten, beginnen vorhandene Risse zu wachsen. Der Bereich I wird daher auch als Schwellenwertbereich bezeichnet.

Der Bereich II ist von stabiler Rissausbreitung gekennzeichnet, die mit der erstmalig von Paris veröffentlichten Beziehung:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n$$

beschrieben werden kann (Paris, 1960).

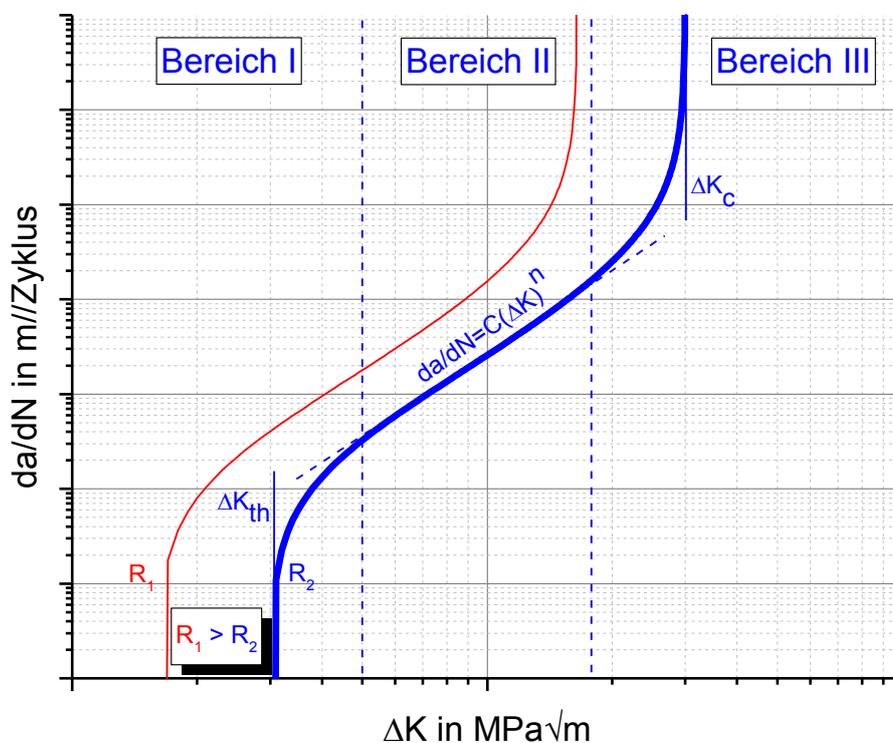


Abbildung 2-5: schematische Rissausbreitungskurve

Im Bereich III erfolgt der Übergang zu einem zügigen Bruchverhalten, die Beschreibung mit LEBM ist nicht mehr möglich. Durch Überschreiten der kritischen Spannungsintensität K_c erfolgt eine instabile Rissausbreitung mit maximaler Geschwindigkeit.

Abbildung 2-5 verdeutlicht ebenfalls die Abhängigkeit der Rissausbreitung vom Spannungsverhältnis R . Ein veränderter R -Wert bewirkt im Bereich II eine parallele Verschiebung der Kurve.

Für eine geschlossene Beschreibung der technisch relevanten Bereiche I und II wurde die von Paris vorgestellte Beschreibung weiterentwickelt. Zu erwähnen ist hier der Ansatz von *Klesnil* und *Lukáš* (Klesnil, 1972):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K^n - \Delta K_{th}^n)$$

Steinbock (Steinbock, et al., 2011) zeigte, basierend auf den Arbeiten von *Klesnil-Lukáš* und *Rödling* (Rödling, 2003), dass mit wenigen Experimenten die einstufige Rissausbreitung über einen großen Bereich unterschiedlicher Spannungsverhältnisse beschrieben werden kann. Abbildung 2-6 zeigt eine entsprechende Darstellung am Beispiel eines Stahls.

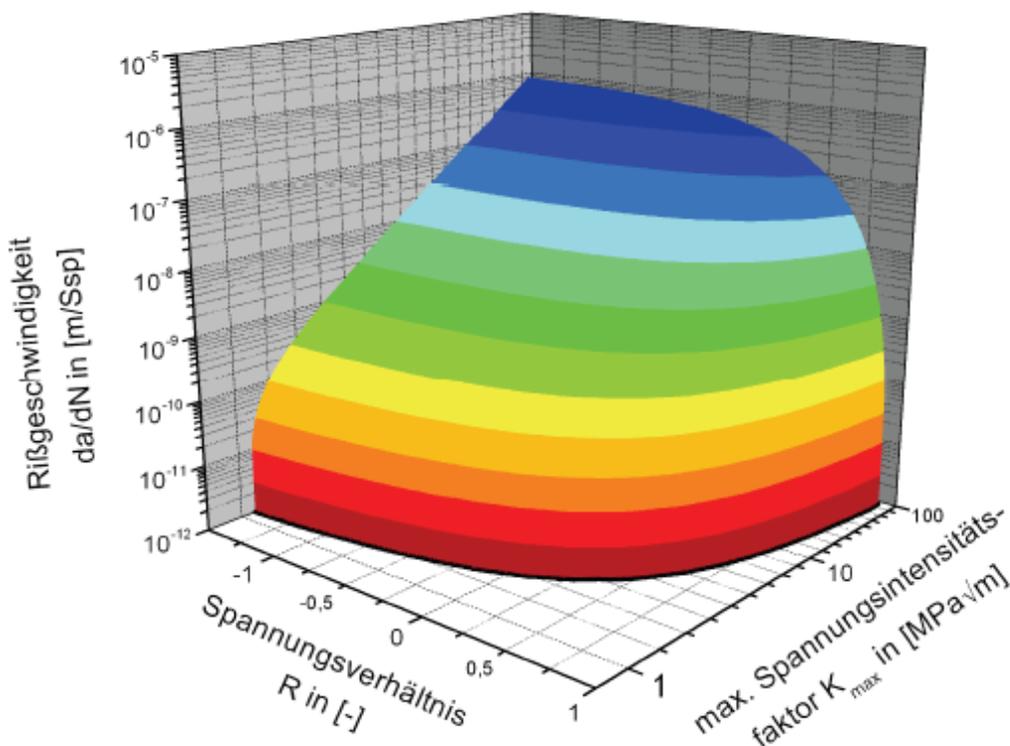


Abbildung 2-6: Darstellung mehrdimensionale Rissausbreitungskurve [nach (Steinbock, 2008)]

In Kombination mit den Ergebnissen der Überlastexperimente von *Broll* (Broll, 2006), *Rödling* und *Steinbock* konnte *Brucksch* (Brucksch, 2009) eine Vielzahl von Lastverläufen mit dem von ihm am Institut für Werkstoffkunde (IWK) entwickelten Programm „Rissausbreitung“ betrachten.

2.3 Technischer Anriss

In der Praxis erfolgt oftmals eine Orientierung an einer definierten Risslänge a_{tech} , die als technischer Anriss bezeichnet wird (Heckel, 1991). Die Größe liegt üblicherweise bei einer Tiefe von 0,5 mm und soll dem Ingenieur als Ausgangsgröße für die Beurteilung der Restlebensdauer dienen (Radaj, et al., 2007).

In den Phasen der Rissausbreitung (vgl. Abbildung 2-2) grenzt der technische Anriss die Risseinleitung vom beschreibbaren Rissfortschritt ab. Die Feststellung, wann ein Risswachstum vorliegt, ist abhängig vom Detektionsverfahren.

Entsprechend der gewählten Methode können sich daher unterschiedliche technische Risslängen ergeben.

Brucksch verwendete in seiner Arbeit Flachproben mit Mittelloch sowie eine Gleichstrompotenzialsonde zur Messung des Risswachstums. Er postulierte eine sichere Auflösung gemittelter Risslängen von 250 μm , ohne Aussagen über die Geometrie der Risskontur zu treffen (Brucksch, 2009). Die von *Felsner* (Felsner, 2012) mit vergleichbarem Versuchsaufbau durchgeführten Untersuchungen an geschweißten Flachproben zeigten eine erschwerte Detektion von Anrissen.

2.4 Markerloads

Durch Ermüdungsrissausbreitung erzeugte Bruchflächen besitzen ein charakteristisches Aussehen und lassen sich vom Gewaltbruch gut unterscheiden. Mittels fraktographischer Verfahren sind z.T. durch einzelne Schwingspiele erzeugte Schwingungstreifen auf der Bruchfläche nachweisbar. Geänderte Spannungsverhältnisse, Unter- und Überlasten sowie auch der Einfluss von Umgebungsmedien beeinflussen das Erscheinungsbild von Ermüdungsbruchflächen maßgeblich.

Insbesondere in der Untersuchung von Schadensfällen spielt die Ermittlung der Auslöser des Bauteilversagens eine entscheidende Rolle.

In vielen Fällen kann die Belastungshistorie über die unterschiedlich gestalteten Abschnitte der Ermüdungsbruchfläche nachvollzogen werden.

Bei gezielt geänderten Belastungen zur Erzeugung identifizierbarer Bruchflächenabschnitte handelt es sich um sogenannte Markerloads. Sie können u.a. zur Kalibrierung indirekter Risslängenmessungen (z.B. Gleichstrompotenzialsonde) oder zur Bestimmung von Rissfrontgeometrien und Rissfortschrittsraten verwendet werden (Willard, 1997).

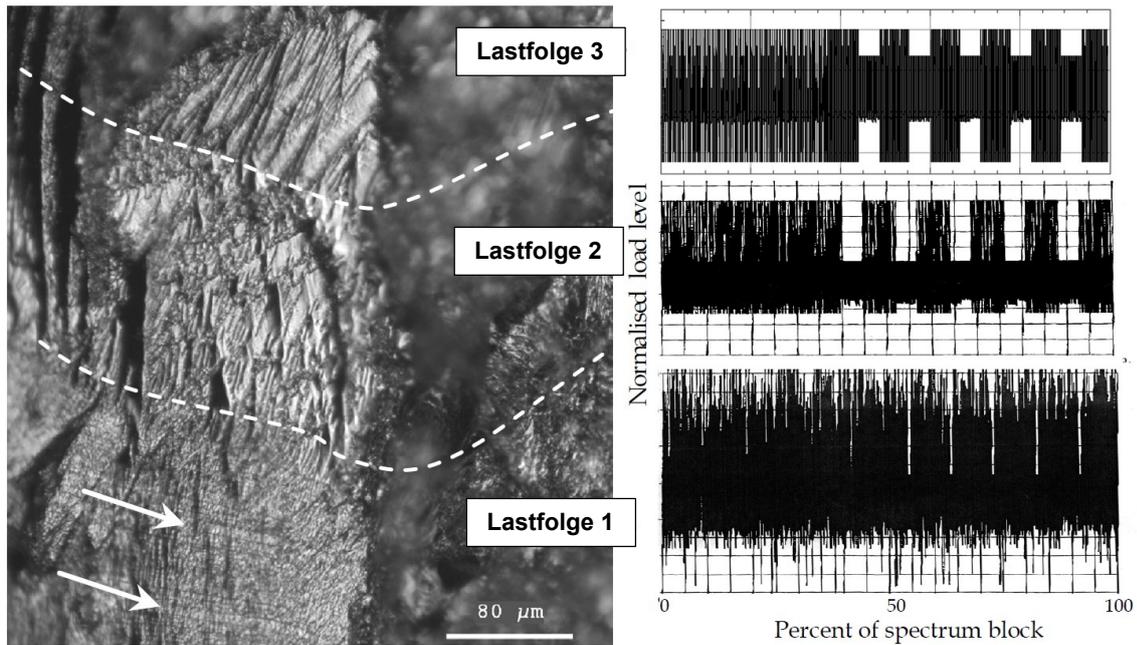


Abbildung 2-7: Ermüdungsbruchfläche und zugehörige Lastfolgen (Barter, et al., 2008)

Abbildung 2-7 zeigt die optische Aufnahme der Bruchfläche einer Aluminiumlegierung (Barter, et al., 2008). Während des Versuches wurden drei unterschiedliche Lastfolgen getestet, wodurch verschiedene Oberflächentopographien erzeugt wurden. Die Pfeile kennzeichnen sichtbare Wiederholungen der ersten Lastfolge.

2.5 Untersuchung von Überlasten

In der Untersuchung von Ermüdungsrissausbreitung dienen Überlasten nicht nur als Markerloads, sondern können auch zur vereinfachten Simulation von Betriebslastfolgen genutzt werden. Entscheidend sind hierbei neben materialspezifischen Parametern Einflüsse aus veränderter Mittelspannung, Höhe der Überlast, Belastungshistorie und somit erzeugtem Spannungszustand vor der Risspitze.

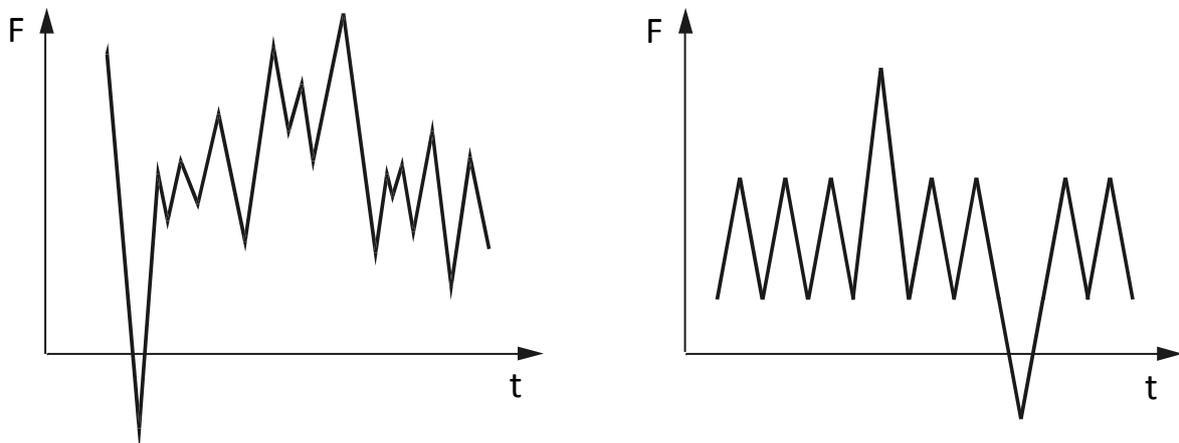


Abbildung 2-8: Betriebslast (links) und experimentelle Simulation [nach (Richard, et al., 2009)]

Abbildung 2-8 verdeutlicht das prinzipielle Vorgehen, einen beliebigen, nicht-periodisch ablaufenden Belastungsvorgang in eine weitgehend periodische Grundbelastung mit Über- und Unterlasten zu überführen (Richard, et al., 2009).

Vereinfachte Lastfolgen und Betriebslasten werden zur Erprobung von Bauteilen bzw. zur Ermittlung von Materialkennwerten eingesetzt. Ein Schema der technisch interessanten Variationsmöglichkeiten zeigt Abbildung 2-9. Die Kategorie der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche ist markiert.

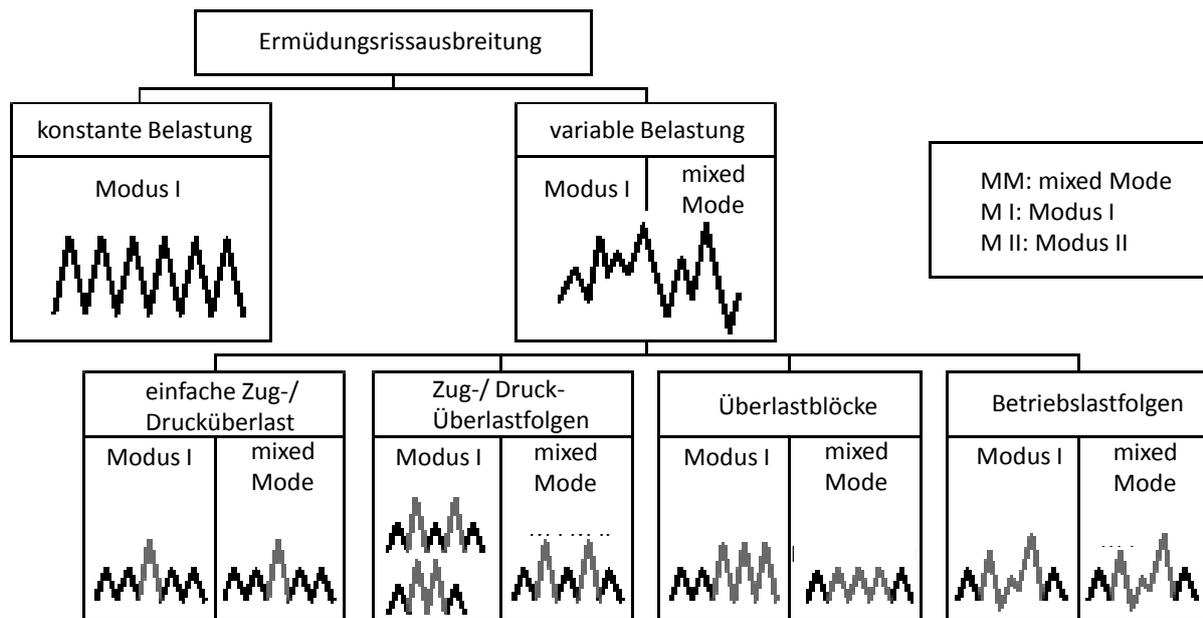


Abbildung 2-9: Variationsmöglichkeiten mechanischer Lastfolgen nach Sander (Sander, et al., 2006)

Bisherige Forschungsergebnisse zeigen teilweise sehr detailliert die Auswirkungen einfacher Zug-, Druck- und Zug/Drucküberlasten [u.a. (Rödling, 2003), (Broll, 2006), (Steinbock, 2008)].

Auch in anwendungsorientierten Versuchsreihen wird seit mehreren Jahrzehnten verstärkt Reihenfolgeeffekten Rechnung getragen [u.a. (Wheeler, 1972), (Führung, et al., 1984)].

Überhöhte Belastungen treten im laufenden Betrieb von Maschinen und Anlagen immer wieder auf. Teils werden sie durch Bedienungsfehler verursacht, teils sind äußere Einflüsse für die Entstehung verantwortlich. Verzögerungen und Beschleunigungen des Risswachstums treten bei Betriebsbelastungen in großer Zahl auf, durch die Überlagerung entstehen komplizierte Wechselwirkungen. Die veränderte Rissfortschrittsrate nach Überlasten war und bleibt daher im Fokus gegenwärtiger Untersuchungen, wobei vielfach Materialien für aktuelle technische Entwicklungen (z.B. Gusseisen für Windkraftanlagen, Faserverbundwerkstoffe) oder das Testen von Baugruppen bzw. ganzer Prototypen von besonderem Interesse sind.

Haibach verweist darauf, dass die rechnerische Quantifizierung der Ermüdungsrissausbreitung, obwohl seit vielen Jahren bekannt und für typische Fälle experimentell studiert, bis heute nicht allgemeingültig gelöste Probleme aufwirft. Die entscheidende Ursache für Reihenfolgeeffekte ist nach seiner Ansicht im elastisch-plastischen Verhalten realer Werkstoffe zu sehen, weil sich im Bereich der Rissspitze eine plastisch beanspruchte Zone ausbildet und eine Spannungsumlagerung vollzieht (Haibach, 2006).

Für existierende Risse erfolgten am IWK durch *Bazios* (Bazios, 1999) und *Brucksch* (Brucksch, 2009) Modellierungen des Einflusses einzelner Überlasten auf das Ermüdungsverhalten. Auf den Ergebnissen aufbauend werden in dieser Arbeit die Auswirkungen periodisch auftretender Überlasten untersucht.

2.5.1 Untersuchungsergebnisse für einzelne Überlasten

Gegenüber der Rissausbreitung unter einstufiger Schwingbelastung bewirken einzelne Überlasten eine deutliche Änderung der Rissgeschwindigkeit.

Abbildung 2-10 zeigt schematisch diesen Einfluss. Zum einen erfolgt während der Überlast eine beschleunigte Rissausbreitung, woran sich ein Bereich signifikanter Verzögerung anschließt. Während der auf die Überlast folgenden Schwingspiele breiten sich Risse mit einer geringeren Geschwindigkeit als unter einstufiger zyklischer Belastung aus. Nach einer bestimmten Anzahl an Schwingspielen wird die für die konstante Belastungsamplitude typische Geschwindigkeit wieder erreicht [(Suresh, 1993); (Schijve, et al., 2004), zitiert in (Heidemann, 2008)].

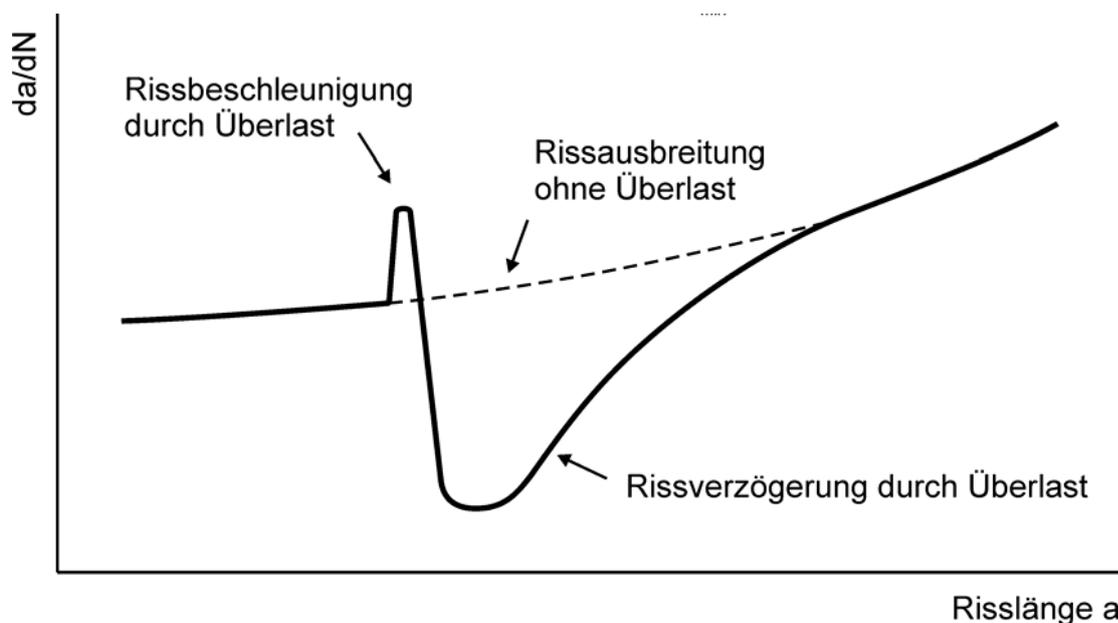


Abbildung 2-10: Auswirkung einer einzelnen Überlast auf die Rissausbreitungsgeschwindigkeit (Heidemann, 2008)

Das Verzögerungsverhalten wird häufig über die Anzahl der Schwingspiele mit verminderter Rissgeschwindigkeit quantifiziert (Richard, et al., 2009).

Die Stärke der Verzögerung wird durch das Verhältnis zwischen Grund- und Überlast

bestimmt und kann sogar bis zum Rissstopp führen. Als Ursache für den Verzögerungseffekt wird neben der Abstumpfung der Rissspitze, einer lokalen Rissverzweigung und Rissablenkung hauptsächlich der durch die Überlast erzeugte Eigenspannungszustand vor der Rissspitze angesehen (Rödling, 2003).

Wie auch *Steinbock* aufzeigt, wurde die Verzögerung nach Überlasten häufiger und intensiver als die beschleunigenden Effekte dokumentiert. Dies begründet sich in der signifikanten Verzögerungswirkung, welche bereits mit älteren Messtechniken erfasst werden konnte (Steinbock, 2008).

2.5.2 Untersuchungsergebnisse für periodische Überlasten

Bereits frühzeitig wurde mit der Untersuchung periodisch in eine Grundlast eingestreuter Überlasten begonnen. Vereinfachte Lastreihenfolgen stellten hierbei typische Belastungen, vornehmlich aus der Luftfahrt, nach.

Schijve lieferte bereits 1972 erste Hinweise auf die unterschiedlichen Auswirkungen der zahlreichen Kombinations- und Variationsmöglichkeiten von Überlasten.

Abbildung 2-11 zeigt die abweichenden Verzögerungswirkungen nach periodischen Zug- bzw. Zug-Druck-Überlasten.

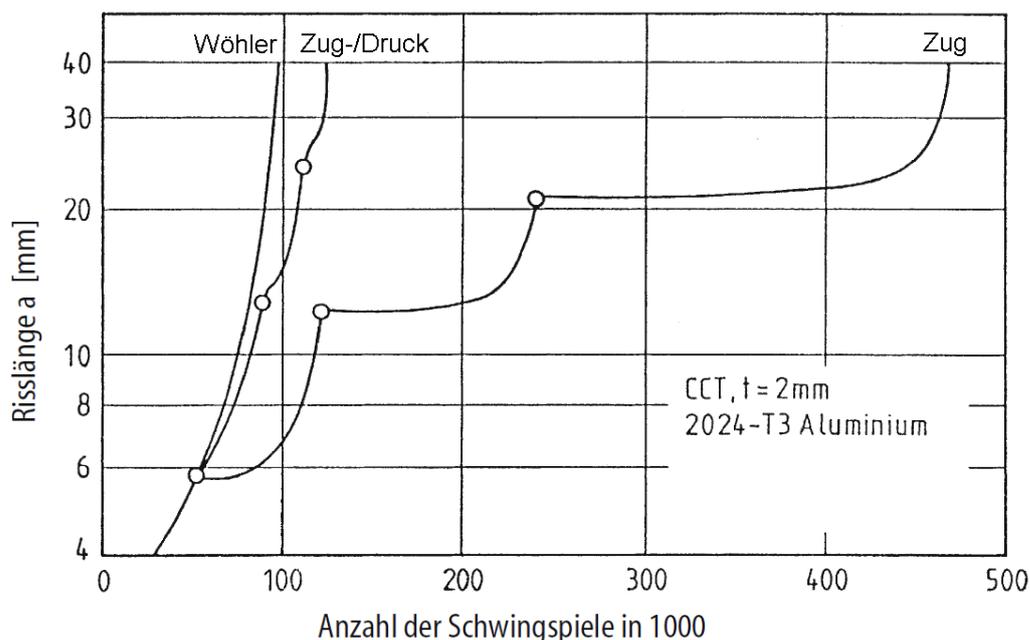


Abbildung 2-11: Vergleich der Auswirkungen von Zug und Zug-Drucküberlasten nach *Schijve* (Schijve, 1972)

Im Folgenden wurden zahlreiche Versuche an verschiedenen Materialien durchgeführt. Abhängig vom Zeitpunkt des Auftretens, der Reihenfolge und der Stärke der Überlasten wurde neben unterschiedlich starken Verzögerungen im Risswachstum auch beschleunigte Rissausbreitung dokumentiert [z.B. (Skorupa, 1998), (Sander, et al., 2006)].

Weitere Untersuchungen beschäftigten sich mit verstärkter bzw. maximaler Verzögerungswirkung durch wiederholt aufgebrachte Überlasten bei variierten Abständen [z.B. (Celik, et al., 2004)].

Die verringerte Rissgeschwindigkeit wurde hierbei üblicherweise über die Anzahl folgender Schwingspiele beschrieben, während einige Arbeiten korrekterweise auch das Durchschreiten der plastischen Zone mit dem Verzögerungseffekt in Beziehung setzen [z.B. (Petit, et al., 1988), (Rödling, 2003)].

Neben materialspezifischen Abweichungen zeigten sich auch Veränderungen bei unterschiedlichen Auslagerungszuständen sowie ein Einfluss des Umgebungsmediums [z.B. (Petit, et al., 1988), (Peters, et al., 1998), (Heidemann, 2008)]

Während die Rissbeschleunigung bei einzelnen Überlasten i.d.R. ermittelt und dokumentiert wurde, trat sie bei Versuchen mit periodischen Überlasten zumeist in den Hintergrund.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Verwendeter Werkstoff

Als Probenmaterial wurde das Blech einer in der Luftfahrtindustrie gebräuchlichen Legierung verwendet. Bei der aushärtbaren Aluminiumknetlegierung AlZn5.5 MgCu handelt es sich um eine hochfeste Legierung, die vor allem in stark beanspruchten dünnwandigen Strukturen wie Rippen und Stringern sowie als Beplankung von Flugzeugrümpfen und Tragflügeln Verwendung findet. Die unter der Bezeichnung EN AW 7475 erhältliche Legierung ist eine Entwicklung der Firma ALCOA und soll Anwendungen gerecht werden, die neben hoher Festigkeit auch eine sehr gute Beständigkeit bezüglich Ermüdungserscheinungen erfordern. Das Datenblatt der Firma verweist zudem auf die gegenüber vielen anderen im Luftfahrtbereich eingesetzten hochfesten Aluminiumlegierungen (wie z.B. EN AW 7075, 7050 und 2024) verbesserte Korrosionsbeständigkeit bei vergleichbaren Festigkeitswerten. Gegenüber der bewährten Legierung EN AW 7075 zeigt EN AW 7475 bei gleichem Behandlungszustand eine um ca. 40% höhere Bruchzähigkeit. Um die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse weiter zu optimieren, werden die Bleche vom Hersteller mit einer zusätzlichen Plattierschicht aus EN AW 7072 versehen. Hierbei handelt es sich um eine Aluminiumlegierung, die ein Gewichtsprozent Zinn enthält. Weitere Legierungselemente sind in geringer Konzentration vertreten.

3.1.1 Chemische Zusammensetzung

Die in Tabelle 3-1 aufgeführten Bestandteile sind ebenfalls dem Datenblatt der Firma ALCOA (ALCOA) entnommen und zeigen die unterschiedliche Zusammensetzung von Grund- sowie Plattiermaterial. Soweit kein Bereich angegeben ist, handelt es sich um Maximalwerte.

Angaben in Gew.-%	Legierungselemente								sonstige		Al
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	einzel	gesamt	
Grundmaterial AW 7475	0,1	0,12	1,2	0,06	1,9	0,18	5,2	0,06	0,05	0,15	Rest
							
			1,9		2,6	0,25	6,2				
Plattierschicht AW 7072	0,09	0,17	0,01	0,01	0,06	-	1,06				Rest

Tabelle 3-1: chemische Zusammensetzung von Grundmaterial und Plattierschicht

3.1.2 Behandlungszustand und Werkstoffkennwerte

Mittels spezieller Warmaushärtung können die Eigenschaften der Legierung EN AW 7475 für den jeweils vorgesehenen Einsatz optimiert werden.

Das verwendete Probenmaterial lag im Behandlungszustand T 761 vor, der eine überalterte Auslagerung mit definierten Glüh- und Abschreckbedingungen bezeichnet, welche in der DIN EN 515 (Deutsches Institut für Normung, 1993) umrissen sind. Im überalterten Zustand weisen AlMgZnCu-Legierungen eine höhere Korrosionsresistenz als bei maximaler Aushärtung auf (Niegel, 1986).

Als Resultat der Wärmebehandlung ergeben sich die in Tabelle 3-2 angegebenen Materialkennwerte.

Quelle	Zugfestigkeit in MPa	0,2 %-Dehngrenze in MPa	Bruchdehnung in %	E-Modul in GPa	Bruchzähigkeit in MPa√m
(ASM, 2007)	517	448	12	70	-
Lieferblatt ALCOA	498	437	9	-	86
Experiment	500	447	11	69	

Tabelle 3-2: Werkstoffkennwerte EN AW 7475 T761

3.2 Beschreibung der Probengeometrien

Die Versuche wurden an zwei unterschiedlichen Probengeometrien durchgeführt. Die Fertigung erfolgte aus Blechen, welche durch die Firma ALCOA bereitgestellt wurden. Die gewalzten Bleche lagen in einer Länge von 2,50 m und einer Breite von 1,20 m vor. Die Blechstärke von 2,88 mm beinhaltet eine beidseitige, jeweils ca. 80 µm starke Plattierschicht.

Zunächst erfolgte der Grobzuschnitt mittels einer Bandsäge bzw. auf einer Wasserstrahlschneidanlage. Dabei wurde sichergestellt, dass die Längsrichtung der Proben der Walzrichtung des Bleches entspricht. Anschließend wurden die Proben auf ihr Endmaß gefräst sowie mit den entsprechenden Bohrungen und Kerben versehen. Alle Kanten wurden mit einer Fase versehen, um eine Rissbildung in diesem Bereich zu vermeiden. Zur Rissdetektion mittels Potenzialsonde wurden beiderseits des zu erwartenden Anrissortes Steckerstifte in das Blech gepresst. Durch diese Art der Herstellung konnten die ursprünglichen Eigenschaften des handelsüblichen Bleches nahezu unverändert mit den gefertigten Flachproben abgebildet werden.

3.2.1 CCT-Proben

Die Geometrie der verwendeten CCT-Proben (Center-Cracked Tension) ist an die ASTM E466-96 (ASTM International, 1996) angelehnt. Die Taillierung, die auch für die umgangssprachliche Bezeichnung „Uhrglas-Proben“ verantwortlich ist, ermöglicht eine Konzentration der maximalen Spannungen im engsten Querschnitt. Durch die Probenform kann eine reine Zug- bzw. Druckbeanspruchung ermöglicht werden. Im untersuchten Spannungsbereich wurde auch bei erhöhter Druckbelastung kein Ausknicken der Probe beobachtet.

Eine Bohrung im engsten Querschnitt erzeugt eine zusätzliche Spannungsüberhöhung und diente somit als Starterkerbe. Durch eine FE-Simulation mit dem Programm ANSYS Workbench 13.0 konnte der Kerbfaktor im linear-elastischen Fall zu $K_t \approx 2,2$ bestimmt werden.

Die Bohrungen für die Potenzialsondenabgriffe befinden sich bei der vorgenommenen Krafteinleitung in Probenlängsrichtung im Kerbschatten der Bohrung und beeinflussen die Anrissbildung bzw. die Rissentwicklung nicht, was ebenfalls mittels einer FE-Simulation nachgewiesen wurde (Brucksch, 2009).

Die genauen Abmessungen der verwendeten CCT-Proben können Abbildung 3-1 entnommen werden.

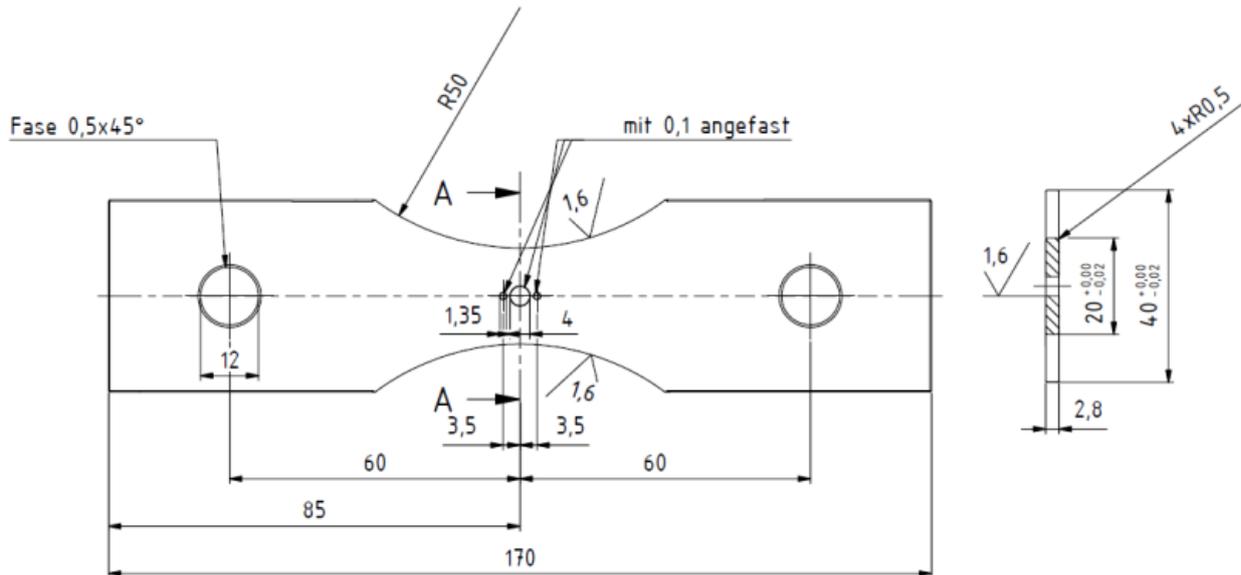


Abbildung 3-1: Geometrie CCT-Proben

3.2.2 SEN-Proben

Neben den bereits beschriebenen CCT-Proben konnte auf eine weitere Probenform zurückgegriffen werden. In mehreren vorangegangenen Arbeiten am IWK [(Bazios, 1999) (Bär, 2001) (Rödling, 2003) (Broll, 2006)] erfolgten Rissausbreitungsexperimente an einseitig gekerbten Flachproben (single edge notched – SEN), wobei an unterschiedlichen Materialien Rissfortschrittskurven mit Schwellenwerten ermittelt sowie Auswirkungen von Überlasten untersucht wurden.

Die auf die Einspannung der Versuchsanlage angepassten Flachproben besitzen eine Länge von 80 mm bei einer Probenbreite von 12 mm. Da die Blechoberflächen nicht bearbeitet wurden, stimmte die Probendicke mit der Blechstärke von 2,88 mm überein. Mit einem Fräser (Radius 0,5 mm) wurden die 1 mm tiefen Starterkerben eingebracht.

Die Applikation der Abgriffe für die Potenzialsonde wurde dahingehend verändert, dass die Stifte direkt in stirnseitige Bohrungen beiderseits der Kerbe gepresst wurden. Ein bei aufgeschobenen Abgriffen notwendiges Vermessen des Abstandes zur Kerbmitte bzw. zur Rissebene (Rödling, 2003) war somit nicht mehr erforderlich.

Die mit ANSYS durchgeführte FE-Simulation ergab für die U-förmigen Kerbe einen elastischen Kerbfaktor von $K_t \approx 3,7$ im Kerbgrund.

3.3 Überlastexperimente

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Experimente erfolgten kraftgesteuert. Von Versuchsbeginn an wurden Überlasten periodisch in eine zyklisch konstante Grundlast eingestreut. Hierdurch konnte einerseits eine einfache Gestaltung der Experimente und andererseits eine Betrachtung der Überlasteinflüsse über die gesamte Lebensdauer vorgenommen werden.

Durch die konstanten Kraftamplituden ergab sich mit zunehmender Risslänge eine steigende

Spannungsintensität, so dass die Überlastwirkungen bei unterschiedlichen Werten untersucht werden konnten.

Während des jeweiligen Versuchs wurde die Anzahl an Schwingspielen zwischen den Überlasten konstant gehalten und die Wechselwirkung zwischen ihnen analysiert. Neben einstufigen Experimenten ohne Überlasten, die als Referenz für unbeeinflusste Rissausbreitung mit entsprechenden Lebensdauern dienen, wurden Intervalle von 100, 1.000 sowie 10.000 Grundlastwechseln zwischen jeweils zwei Überlasten untersucht. Je Überlastintervall und betrachtetem Lastniveau wurden mindestens drei Proben getestet, von denen jeweils eine repräsentative Ergebniskurve für weitere Auswertungen und Vergleiche zugrunde gelegt wurde.

3.3.1 Versuchsführung

Alle Versuche wurden auf eine maximale Dauer von 10^7 Schwingspielen begrenzt. Als Frequenz für die Grundbelastung wurde $f_{GL} = 20$ Hz gewählt, so dass Experimente, welche die gewählte Obergrenze von 10^7 Schwingspielen erreichten, innerhalb von ca. 6 Tagen durchgeführt werden konnten.

Die Höhe der Überlasten ($\ddot{U}L$) lässt sich im Vergleich zur zyklischen Grundlast (GL) zum einen durch den Überhöhungsfaktor α :

$$K_{max,\ddot{U}L} = \alpha \cdot K_{max,GL}$$

und zum anderen durch die Überlasthöhe:

$$\text{Überlasthöhe in \%} = (\alpha - 1) \cdot 100 \%$$

definieren.

Der Belastungsverlauf wechselbeanspruchter Proben kann schematisch Abbildung 3-2 entnommen werden.

Dargestellt sind die zyklische Grundlast mit der Höhe der Spannungsamplitude $S_{a,GL}$, die Spannungsamplitude der Überlast $S_{a,\ddot{U}L}$ sowie das Intervall zwischen zwei Überlasten.

Die Anzahl an Grundlastschwingspielen zwischen zwei Überlasten wird als Überlastintervall bezeichnet und im Folgenden mit dem Buchstaben „I“ versehen.

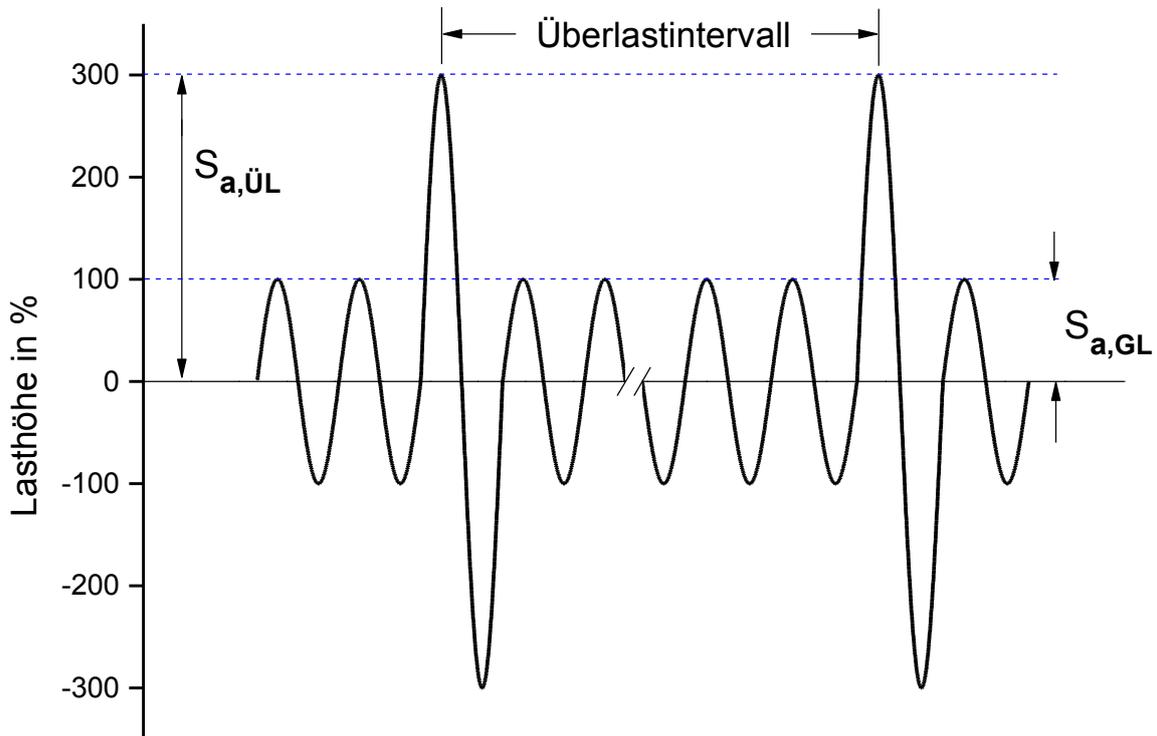


Abbildung 3-2: Versuchsführung $R = -1$ mit Überlasten ($\alpha = 3$)

Für alle Überlastversuche mit einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ wurde die Amplitude der Lastüberhöhung so gewählt, dass sie der dreifachen Grundlastamplitude entsprach. Somit ergab sich ein Überhöhungsfaktor von $\alpha = 3$ bzw. eine Überlasthöhe von 200 %. Untersucht wurden die Grundlastniveaus mit einer Spannungsamplitude $S_a = 70, 80, 90$ und 100 MPa. Alle Überlasten wurden als symmetrische Zug-Druck-Überlasten ausgeführt.

Die mit einer Oberspannung von $S_o = 70$ MPa niedrigste Grundlast wurde gewählt, um bei einer einstufigen Beanspruchung ohne Überlasten eine Lebensdauer von mehr als 10^7 Schwingspielen zu erreichen und eine hohe Wechselfestigkeit zu definieren. Das höchste experimentell untersuchte Grundlastniveau mit einer Amplitude von 100 MPa ergab für die Überlasten kombiniert mit der Überhöhung durch die Kerbe maximale Spannungen im Bereich der Fließspannung der verwendeten Aluminiumlegierung.

Das gesamte Lastkollektiv der zweiten Versuchsreihe wies ein Spannungsverhältnis von $R = 0$ auf. Abbildung 3-3 zeigt den schematischen Beanspruchungsverlauf.

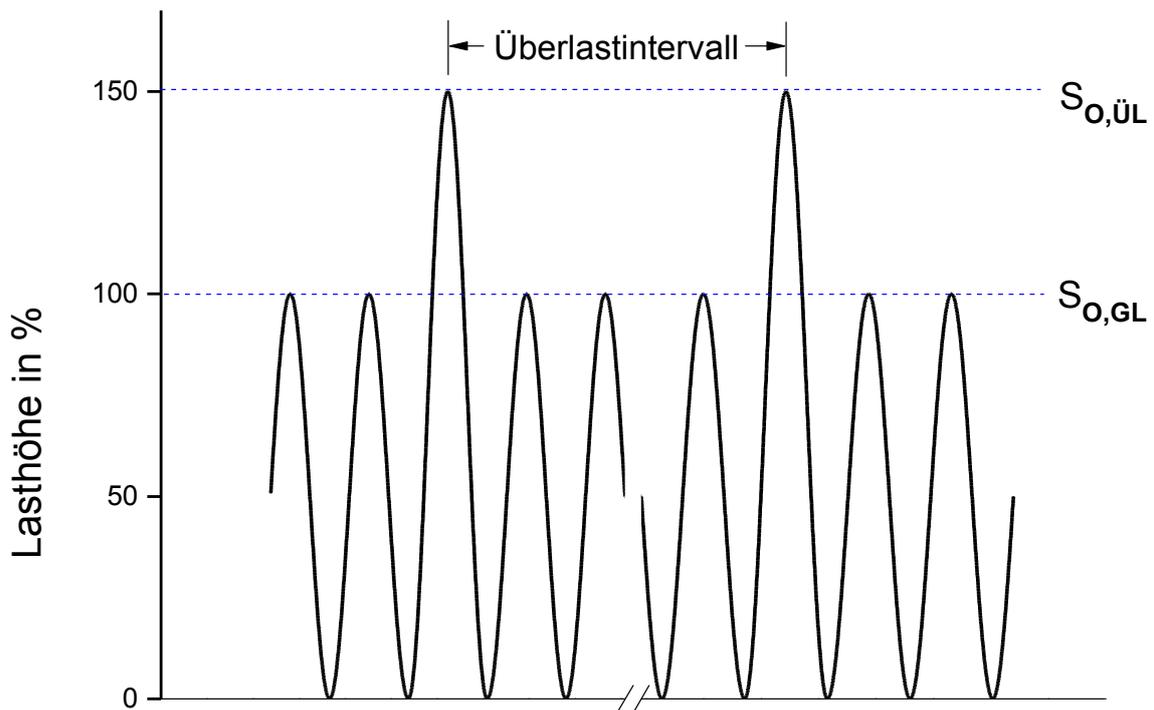


Abbildung 3-3: Versuchsführung $R=0$ mit Überlasten ($\alpha=1,5$)

Hier wurden zweistufige Lastkollektive mit einer Überlasthöhe von 50 % ($\alpha=1,5$) getestet. Das geänderte Verhältnis zwischen Grund- und Überlast entstand hierbei durch eine Verschiebung der Grundlastamplituden in den Zugschwellbereich. Die Schwingbreite der Grundlast wurde konstant gehalten. Die Überlasten wurden ohne Druckanteil ausgeführt. Trotz der geänderten Mittelspannung konnten durch das verringerte Überlastverhältnis nahezu die gleichen Grundlastamplituden wie in der Versuchsreihe mit $R=-1$ verwendet werden.

3.3.2 Versuche zur Untersuchung des Anrissverhaltens

Zur Untersuchung, ob auch geringe Risslängen mit der Potenzialsonde ausreichend genau bestimmt werden können, wurden gesonderte Versuche zur Beschreibung des Anrissverhaltens durchgeführt. Hierzu wurden weitere SEN-Proben in allen Variationen der untersuchten Spannungsverhältnisse, Lastniveaus sowie Überlastintervalle getestet. Um den Umfang der Bruchflächenuntersuchung zu begrenzen und Überlastlinien besser identifizieren zu können, wurden die Proben nicht bis zum Versagen ermüdet. Ausgehend von der zu erwartenden Rissentwicklung erfolgte eine Beanspruchung mit maximal 30 Lastintervallen, jeweils bestehend aus den Grundlastzyklen von 100, 1.000 oder 10.000 Schwingspielen und einer Überlast.

3.4 Versuchsaufbau

Alle Experimente wurden mit servohydraulischen Prüfmaschinen durchgeführt, zur Rissfortschrittsmessung wurde eine Gleichstrompotenzialsonde genutzt. Sowohl Grund- als auch Überlastzyklen wurden in abzuarbeitenden Programmzeilen definiert, welche als

Schleife bis zum Überschreiten einer Weggrenze (Probenversagen) oder Erreichen von 10^7 Schwingspielen abgearbeitet wurden. Die nach jedem Grundlastintervall gesetzten Überlasten wurden mit einer verringerten Frequenz von $f_{\text{ÜL}} = 1$ Hz aufgebracht, um einerseits ein exaktes Ausregeln des Kraftverlaufes zu erreichen und andererseits mehr Datenpunkte für die Auswertung zu erhalten. Beim Grundlastintervall, welches mindestens 100 Schwingspiele umfasste, ermöglichte eine Spitzenwertregelung die geforderte Lasthöhe auch bei der verwendeten Frequenz von 20 Hz.

Den prinzipiellen Aufbau beider verwendeter Versuchsanlagen zeigt Abbildung 3-4.

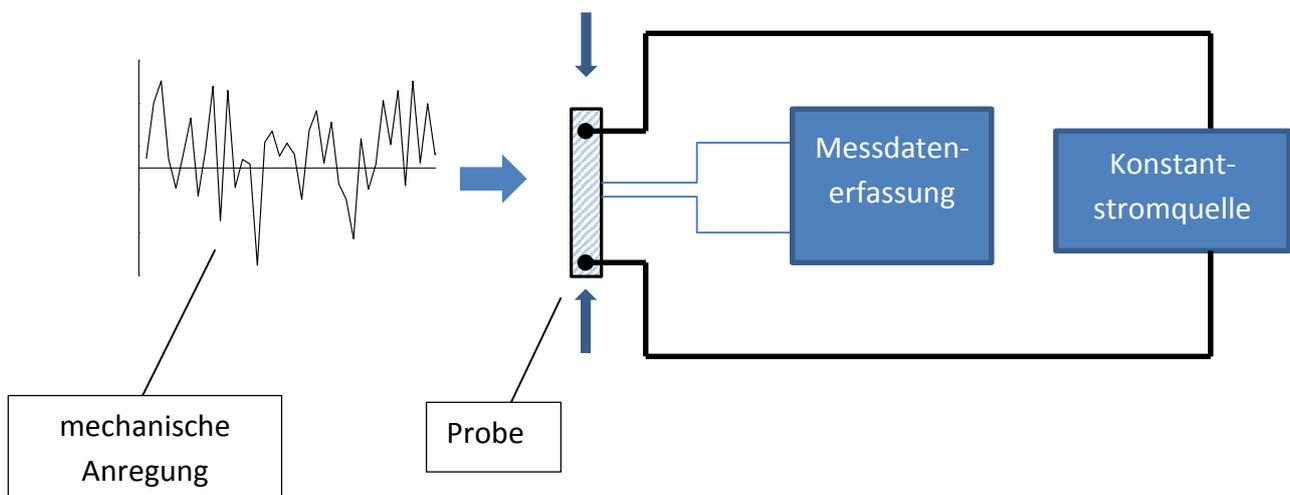


Abbildung 3-4: Versuchsaufbau schematisch

Die mechanische Anregung erfolgte durch die Hydraulikzylinder der Prüfraumen und wurde über die Einspannungen auf die Proben übertragen. Gleichzeitig wurde durch die Probe ein Gleichstrom geleitet, welcher zur Erfassung von Messdaten der Rissausbreitung diente.

3.4.1 Prüfraumen

Die CCT-Proben wurden mittels eines passgenauen Spannzeuges in einem Prüfraumen PSB 63 der Firma SCHENK fixiert und ermüdet. Eine zusätzlich auf dem Rahmen installierte Plexiglasskammer ermöglichte hierbei durch einen integrierten Lüfter eine um $\pm 0,3$ °C konstante Proben temperatur. Die Kammer sowie das verwendete Spannzeug sind in Abbildung 3-5 zu sehen und wurden durch *Brucksch* (Brucksch, 2009) ausführlich beschrieben.

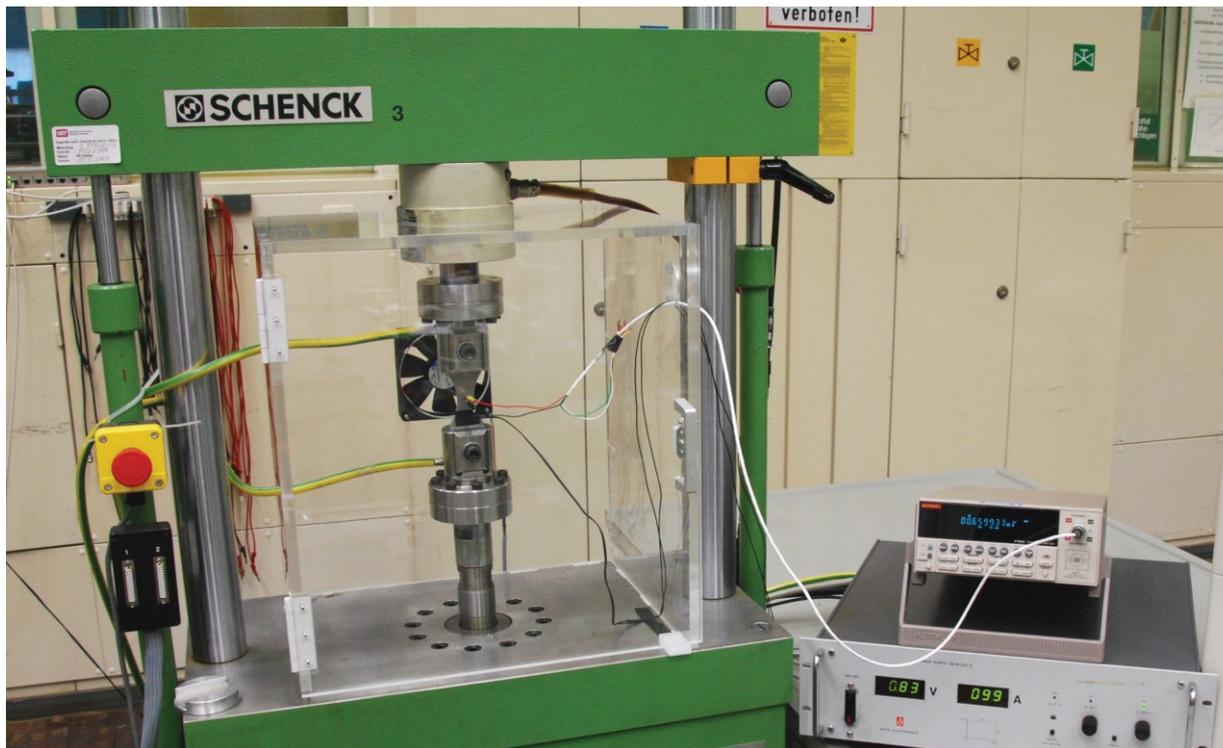


Abbildung 3-5: Probenkammer und Spannzeug für CCT-Proben (Brucksch, 2009)

Mittels einer Steuerelektronik vom Typ IST 8800 der Firma Instron und zugehöriger Software konnten die Lastkollektive kraftgeregelt erzeugt werden. Durch einen Schwingenspielzähler des Computerprogramms wurde die Gesamtlebensdauer aufgezeichnet und mit der Zyklenzahl aus dem Messdatenerfassungsprogramm abgeglichen.

Alle Experimente mit SEN-Proben wurden in einer ursprünglich für Untersuchungen von Ermüdungsrissausbreitung in korrosiven Atmosphären (ERIKA) entwickelten Versuchsanlage durchgeführt. Die Anlage verfügt über eine Probenkammer, in welche die parallel geführten Einspannungen sowie die Zuleitungen für diverse Aufnehmer integriert sind. Eine in die Kammer eingebaute Probe ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

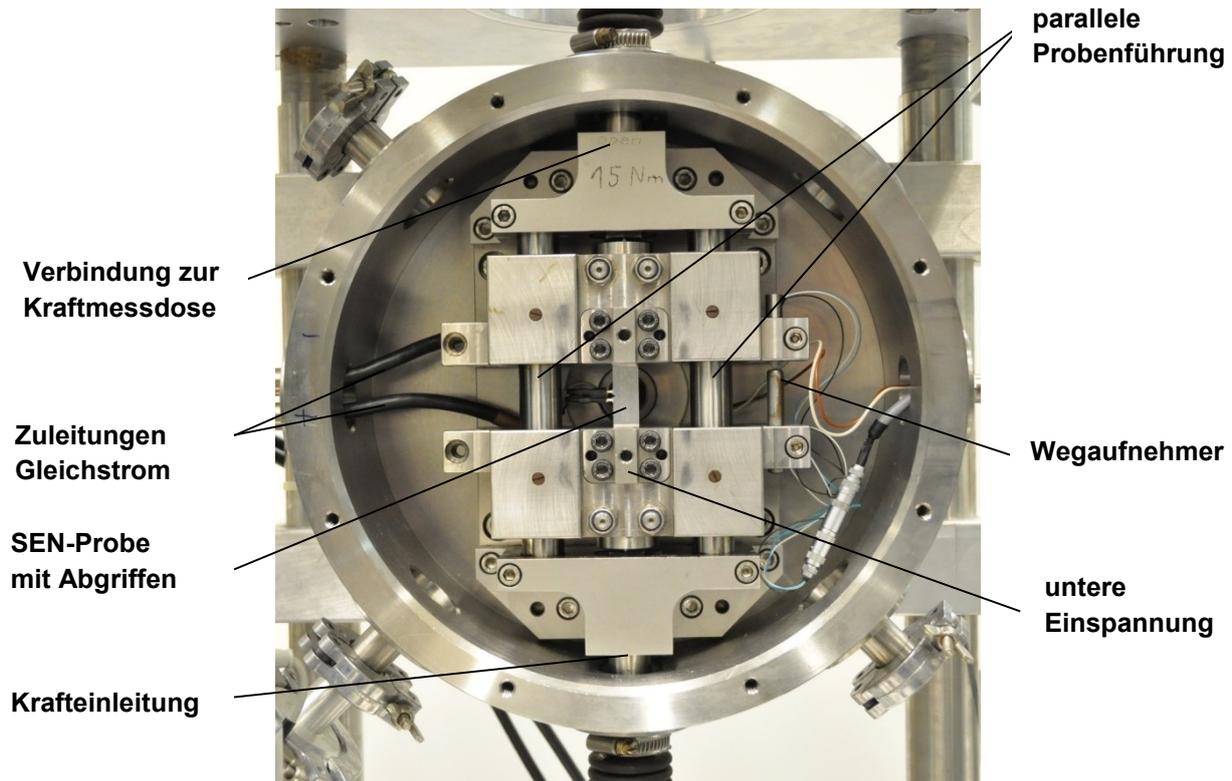


Abbildung 3-6: Versuchsanlage ERIKA, parallel geführte Einspannungen mit SEN-Probe

Weiterführende Beschreibungen der Anlage sind in zurückliegenden Arbeiten am IWK [(Bär, 2001), (Rödling, 2003), (Broll, 2006) und (Steinbock, 2008)] zu finden.

Der Prüfrahm PSA 10 der Firma SCHENK mit maximalen dynamischen Lasten von ± 8 kN konnte im Zuge einer Modernisierung mit einer EDC 580 Steuerelektronik der Firma DOLI aufgerüstet werden.

Mit dem DOLI-Softwarepaket „Test & Motion“ ist neben den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten mehrstufigen Lastfolgen unter anderem eine automatische Ermittlung von Rissausbreitungskurven möglich. Eine Programmerweiterung für Experimente mit Betriebslastfolgen ist vorgesehen.

3.4.2 Gleichstrompotenzialsonde

Für die Risslängenbestimmung hat sich die Messung mittels Gleichstrompotenzialsonde bewährt, da sie gegenüber anderen Methoden wie optischer Rissverfolgung oder auch Betrachtungen der Nachgiebigkeit (Compliance-Methode) entscheidende Vorteile besitzt [z.B. (Bazios, 1999), (Bär, 2001), zusammengefasst u.a. in (Richard, et al., 2009)].

Das Messverfahren ist automatisierbar und ermöglicht eine unterbrechungsfreie Verfolgung der Rissausbreitung. Das Signal der Potenzialsonde kann zur Regelung der Anlage verwendet werden, so dass z.B. das Abschalten bei einer definierten Risslänge oder die Versuchsführung über eine in situ errechnete Spannungsintensität möglich ist (Gangloff, et al., 1992), (Bazios, 1999). Die seitdem angewachsene Leistungsfähigkeit von Datenverarbeitungsanlagen ermöglicht mittlerweile eine umfassende und direkte Speicherung der Messwerte.

Die grundsätzliche Funktionsweise beruht auf dem Prinzip, dass sich in einem stromdurchflossenen metallischen Bauteil eine elektrische Potenzialverteilung einstellt. Eine simulierte Darstellung für eine SEN-Probe zeigt Abbildung 3-7.

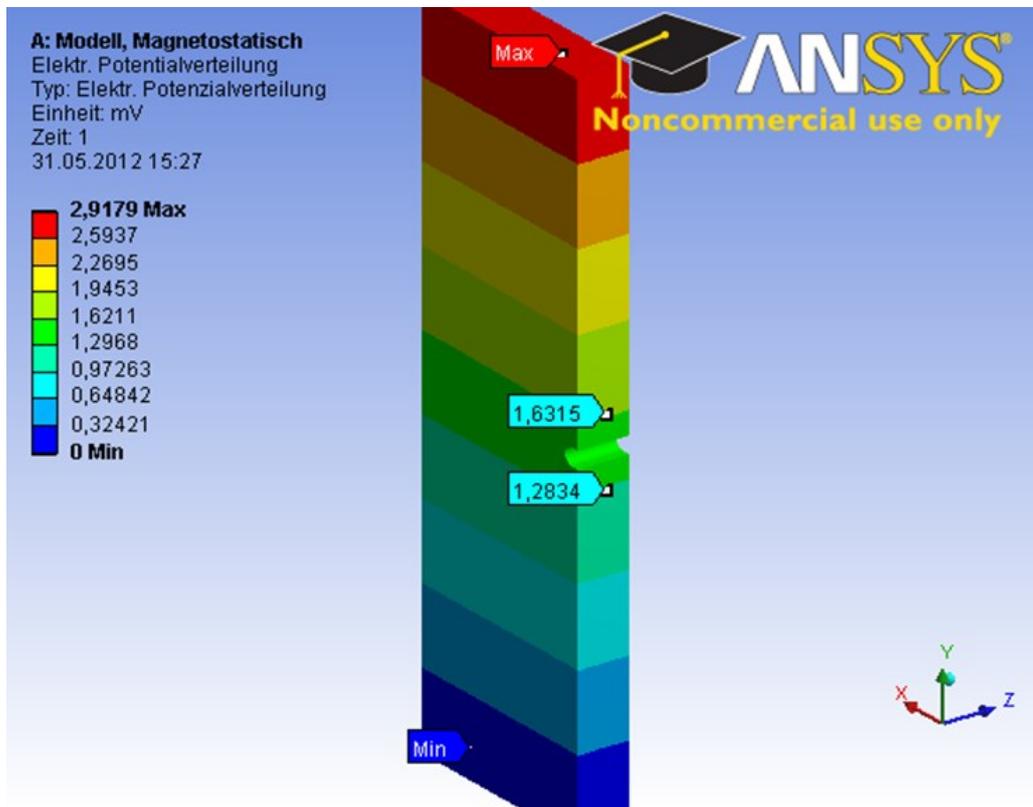


Abbildung 3-7: Simulation der elektrischen Potenzialverteilung SEN-Probe

Die farbliche Abstufung verdeutlicht die Spannungsverteilung in Probenlängsrichtung. Die Marker ober- und unterhalb der Kerbe kennzeichnen die Werte an den Positionen der Abgriffe, aus deren Differenz die Ausgangsspannung U_0 sowie das aktuelle Potenzial U_i bestimmt werden.

Wird beim Potenzialsondenverfahren ein konstanter Gleichstrom verwendet, bewirkt eine Rissverlängerung neben einer Verringerung des Querschnittes auch eine Verdichtung der Potenzialfeldlinien vor der Risspitze. Die resultierende Spannungsdifferenz an der Kerbe bzw. dem Riss kann durch ein ausreichend empfindliches Messgerät ermittelt und aufgezeichnet werden. Die Zunahme der Spannungsdifferenz U_i zwischen den Potenzialabgriffen kann rechnerisch mit der Risslänge korreliert werden.

Hierbei ist zu beachten, dass die Messergebnisse zumindest an ausgewählten Proben mit den tatsächlichen Risslängen auf den Bruchflächen überprüft werden müssen. In der ASTM E 647 (ASTM International, 2013) sind für diverse Probenformen Kalibrierfunktionen angegeben. Für andere Probentypen ist die Kalibrierung experimentell oder numerisch möglich (Richard, et al., 2009).

Risslängenmessungen mittels einer Potenzialsonde wurden bereits vor einigen Jahrzehnten publiziert (ASTM International, 1965). Das Verfahren konnte in diversen Arbeiten am IWK erfolgreich angewendet werden [(Bär, 2001), (Rödling, 2003), (Broll, 2006), (Steinbock, 2008), (Brucksch, 2009)]. Als vorteilhaft hat sich neben der bereits erwähnten Möglichkeit der automatischen Erfassung während laufender Experimente die integrale

Risslängenermittlung (somit Bestimmung einer mittleren Risslänge unabhängig von der tatsächlichen Geometrie der Rissfront) herausgestellt. Spannungsintensitätsgeregelte Versuche konnten ebenfalls realisiert werden.

Für den Versuchsaufbau an den 63 kN-Prüfrahmen zur Ermüdung der CCT-Proben kamen eine Konstantstromquelle SM 15-200D der Firma Delta Elektronika sowie ein Nanovoltmeter 2182 der Firma Keithley zum Einsatz. Die Stromquelle lieferte einen konstanten Gleichstrom mit ca. 50 A, wodurch sich ein zwischen den Abgriffen gemessenes Ausgangspotenzial U_0 von $\approx 0,3$ mV einstellte. Da das verwendete Spannungsmessgerät in diesem Bereich bereits eine hohe Genauigkeit liefert, musste die Stromstärke trotz der sehr guten Leitfähigkeit des Probenmaterials nicht weiter erhöht werden. Das Nanovoltmeter wurde durch ein am Institut entwickeltes Programm zur Messdatenerfassung (Brucksch, 2009) angesteuert und ausgelesen.

Ebenfalls wurde der Forderung Rechnung getragen, dass gemäß ASTM 647-08 (ASTM International, 2013) bei der Risslängenmessung ein Kontakt der Rissflanken vermieden werden soll (Richard, et al., 2009).

An der Versuchsanlage ERIKA, in welcher die Untersuchung der SEN-Proben stattfand, wurde die Konstantstromquelle GENH6 100-750W der Firma TDK-Lambda eingesetzt. Mit einer Stromstärke ca. 45 A ergab sich ebenfalls ein Ausgangspotenzial von ca. 0,3 mV. Das vor der Modernisierung benötigte Nanovoltmeter wurde durch eine Einsteckkarte in der digitalen Regelung vom Typ EDC580 der Firma DOLI ersetzt. Mit dem auf der Steckkarte enthaltenen 4FAD Trägerfrequenzmessverstärker konnte bei Vergleichsmessungen ohne Filterung der Daten eine um den Faktor 10 verbesserte Genauigkeit nachgewiesen werden.

Verschiedene Messdaten inklusive des Potenzialsondensignals können synchron erfasst werden, ohne dass ein zusätzlicher Abgleich erforderlich ist. (DOLI, 2012)

Neben der verbesserten Messgenauigkeit, konnte auf dieser Anlage auch auf eine erheblich gesteigerte Datenerfassungsrate zurückgegriffen werden. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen betrug die Frequenz der Datenerfassung 500 Hz, womit sich bei einer Grundlastfrequenz von 20 Hz je Lastspielzyklus 25 Messpunkte ergaben. Zusätzlich zu den Signalen der Kraftmessdose und der Gleichstrompotenzialsonde wurden der Traversenweg, die Versuchszeit sowie die Zyklenzahl aufgezeichnet und abgespeichert.

Zur Bestimmung der Risslänge a aus den Messwerten der Potenzialsondenmessung wurde die sogenannte Johnson-Formel verwendet. Bei dieser Formel handelt es sich um die analytische Lösung der Laplace'schen Potenzialgleichung. Johnson entwickelte 1965 (Johnson, 1965) eine Gleichung für eine Scheibe mit symmetrischem Mittelriss, welche für die CCT-Proben verwendet werden kann. Die Lösung kann auch auf den Fall einer einseitig angerissenen Scheibe erweitert werden und liefert somit eine Möglichkeit zur Berechnung der Risslängen in SEN-Proben, wenn die Rissfront gerade verläuft und sich der Riss in die Tiefe der Probe (im Folgenden: x-Richtung) ausbreitet.

$$a_{ges} = \frac{2 \cdot W}{\pi} \cdot \arccos \left[\frac{\cosh \frac{\pi \cdot y_0}{2 \cdot W}}{\cosh \left[\frac{U_i}{U_0} \operatorname{arcosh} \frac{\cosh \frac{\pi \cdot y_0}{2 \cdot W}}{\cosh \frac{\pi \cdot a_K}{2 \cdot W}} \right]} \right]$$

a_{ges} : gesamte Risslänge

a_K : Kerbtiefe

W : Probenbreite

y_0 : halber Abstand der Potentialabgriffe

U_i : aktuelles Potenzial

U_0 : Anfangspotenzial

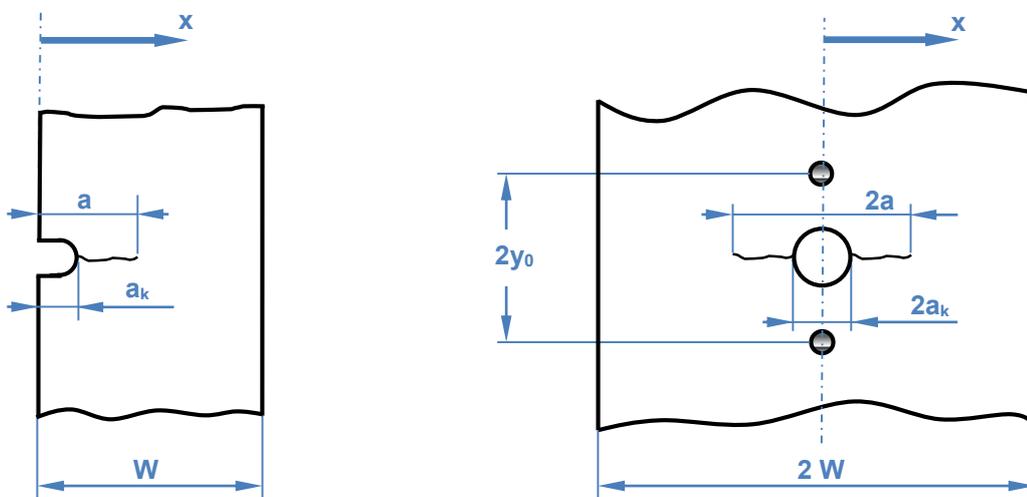


Abbildung 3-8: Bezeichnungen zur Risslängenberechnung

In der Gleichung bezeichnet a_{ges} die aktuelle Gesamtrisslänge inklusive der Kerbtiefe a_K bzw. des Radius der Bohrung, y_0 den halben Abstand zwischen den Potentialabgriffen, U_0 das Ausgangspotenzial und U_i den aktuellen Spannungswert der Potentialsonde. Mit der Probenbreite W geht auch eine Bauteildimension in die Rechnung ein. Im Fall der Scheibe mit Mittelriss weisen die Angabe der Probenbreite mit $2W$ sowie der Gesamtrisslänge mit $2a$ darauf hin, dass für die Rissentwicklung von beidseitig gleichmäßigem Wachstum in x -Richtung ausgegangen wird. Die Betrachtung einer Probenhälfte ist daher ausreichend. Um die aktuelle Risslänge im laufenden Versuch möglichst genau bestimmen zu können, müssen das Anfangspotenzial und ggf. die Ausgangsrisslänge sowie der Abgriffabstand sorgfältig ermittelt werden. Bei steigendem Verhältnis von Risslänge zur Probenbreite (a/W) wird das Verfahren sensitiver. Zusätzlich verringert sich der Einfluss von abweichend bestimmten Eingangsgrößen auf die Gesamtrisslänge.

In vorausgehenden Arbeiten am Institut konnte für lange Risse eine Genauigkeit von ± 1 bis $\pm 5 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden (Rödling, 2003), (Broll, 2006), (Steinbock, 2008).

3.4.3 Verwendung der Gleichstrompotenzialsonde

Um die rechnerischen Ergebnisse quantitativ mit den Messungen auf den Bruchflächen vergleichen zu können, erfolgte die Kalibrierung über einen angepassten Abgriffabstand y_0 . Für die Berechnung wurde der Wert so variiert, dass die mittels Potenzialsonde ermittelte Risslänge mit optisch vermessenen Markerloadlinien sowie erkennbaren Übergängen zwischen Ermüdungs- und Gewaltbruchflächen bei Testproben übereinstimmten. Weitere Überprüfungen bestätigten, dass die Anpassung auch die weiteren Versuchsergebnisse mit guter Genauigkeit abbilden konnte. Nach durchgeführter Kalibrierung konnte das Risswachstum in situ verfolgt werden.

Für die auf dem Prüfraumen PSB 63 ermüdeten CCT-Proben konnten vorangegangene Kalibrierungsergebnisse genutzt werden. *Brucksch* verwendete in seinen Auswertungen einen rechnerischen Kalibrierabstand von $y_0 = 5$ mm und erreichte durchschnittliche Abweichungen der ermittelten Gesamtrisslänge von weniger als 10% (*Brucksch*, 2009). Bei allen unter Wechselbeanspruchung getesteten CCT-Proben wurden die fraktographisch bestimmten und gemittelten Längen der Ermüdungsrissse bei Probenversagen mit den aus dem Potenzialsondensignal berechneten Endrisslängen verglichen. Nur in wenigen Fällen zeigte sich zwischen beiden Werten eine Abweichung von mehr als 10%. Die Daten dieser Proben wurden nicht für die vergleichende Auswertung verwendet.

Als Beispiel für eine automatisierte Risslängenmessung über die Versuchsdauer dient Abbildung 3-9. Sie zeigt den Ausschnitt einer typischen Bruchfläche mit weiß hervorgehobenen Überlastlinien. Weiterhin ist in einem Diagramm die mittels Potenzialsonde ermittelte Risslänge über der jeweiligen Schwingspielzahl abgebildet.

Anhand der Zyklenzahl lassen sich die Überlastlinien eindeutig Punkten auf der Risslängenkurve zuordnen. Weiterhin zeigt die Rissentwicklung charakteristische Stufen, anhand derer die periodischen Überlasten ebenfalls identifiziert werden können.

Da es sich bei der Risslängenmessung mit der Potenzialsonde wie bereits gezeigt um ein integrales Verfahren handelt, kann aus dem Spannungssignal nur die gemittelte Risslänge bestimmt werden. Diese Risslänge macht keine Aussage über die Risskontur und ermöglicht somit nur eine eindimensionale Betrachtung der Rissentwicklung.

Zudem ist zu erkennen, dass sich mit zunehmender Risslänge die Übereinstimmung zwischen den fraktographisch und den mittels Potenzialsonde ermittelten Werten stark verbessert.

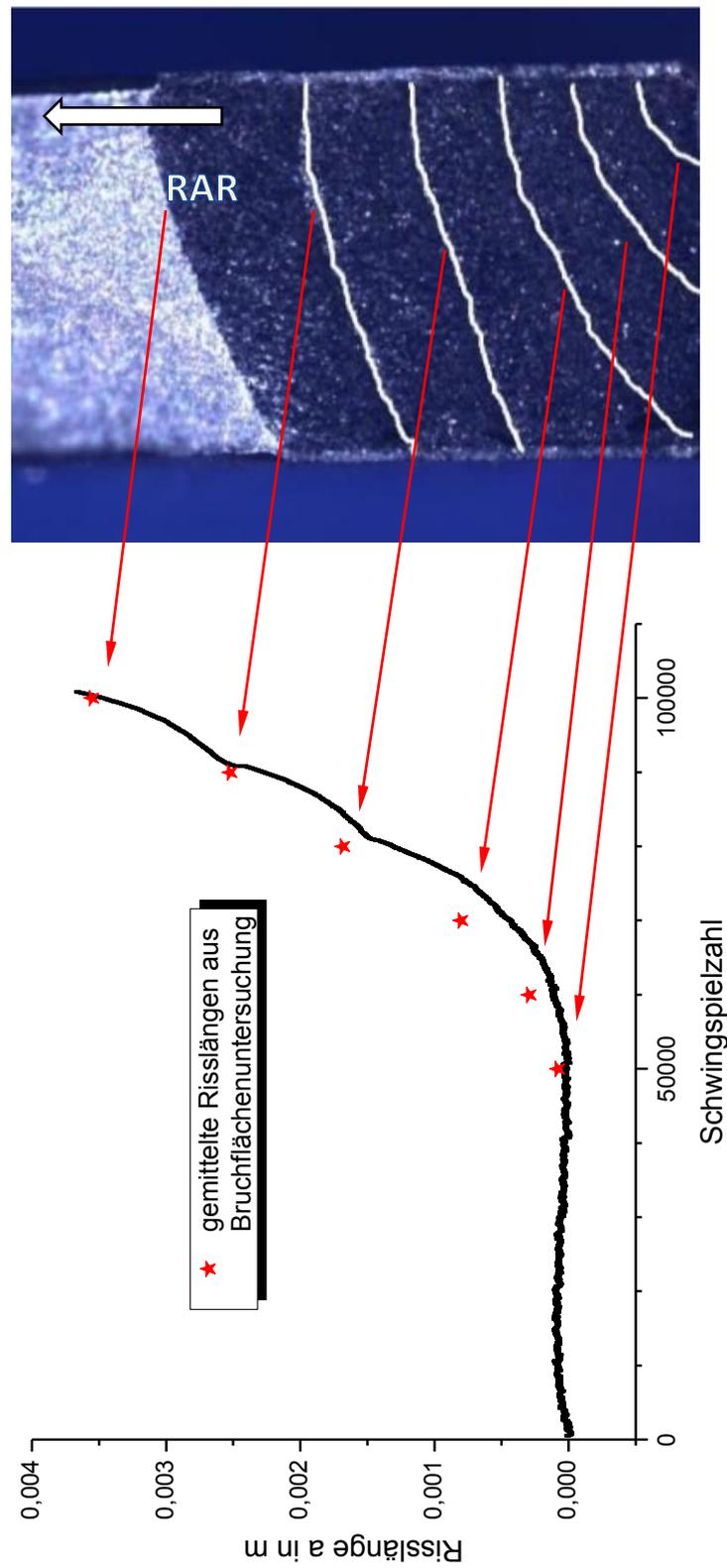


Abbildung 3-9: Vergleich in-situ Risslängenmessung mit Fraktographie

Nach der Neuinstallation von Regel- und Messtechnik an der Versuchsanlage ERIKA wurden auch hier Kalibrierversuche mit SEN-Proben durchgeführt. Dabei wurden wie in Abbildung 3-10 erkennbare Überlastlinien verwendet, um fraktographisch und mittels Potenzialsonde bestimmte Risslängen zu vergleichen.

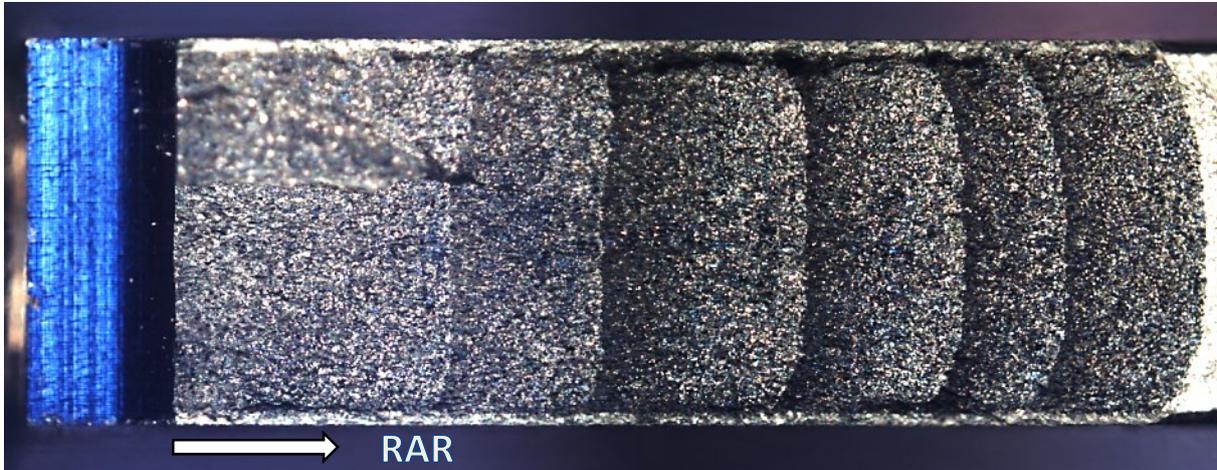


Abbildung 3-10: Bruchfläche einer SEN-Probe zur Kalibrierung

Durch die rechnerische Anpassung des Abgriffabstandes auf einen Wert von $y_0 = 2,55$ mm konnten bei der Umrechnung von Potenzialsondensignal in eine Risslänge die besten Übereinstimmungen erzielt werden. Das Diagramm in Abbildung 3-11 verdeutlicht den Kalibriervorgang. Die Messpunkte repräsentieren die Werte mehrerer Proben.

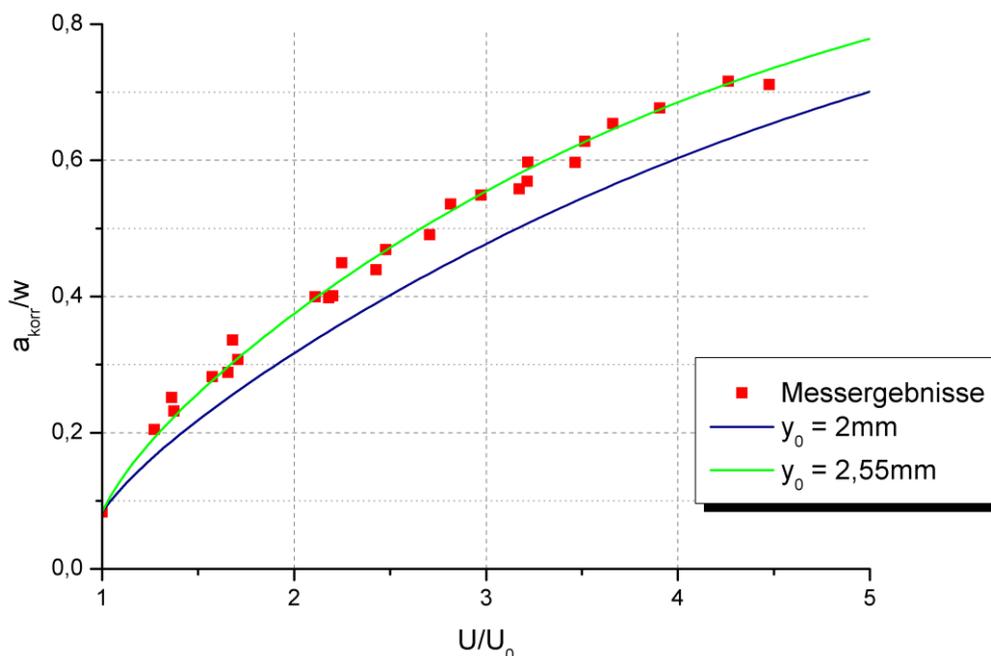


Abbildung 3-11: Kalibrierung der Potenzialsonde

Aufgrund der signifikant verringerten Streuung konnte auf eine zusätzliche Filterung der Daten verzichtet werden. Weiterhin bietet die Software *Test & Motion* die Möglichkeit, Hüllkurven aller gemessenen Signale aufzuzeichnen, d.h. für jedes Schwingenspiel können sowohl der Maximal- als auch der Minimalwert erfasst werden. Beim Signal der

Gleichstrompotenzialsonde zeigte sich während der Grundlastschwingspiele nur ein geringer Unterschied zwischen den Extremwerten, der sich mit zunehmender Risslänge weiter verringerte.

Für die Auswertung der Rissentwicklung über eine größere Schwingspielzahl wurde der Maximalwert der Potenzialspannung verwendet.

Bei der verwendeten Messdatenrate von 500 Hz wurde auch mit einer Versuchsfrequenz von 20 Hz die programmtechnische Begrenzung von 10^6 speicherbaren Messwerten schnell überschritten. Daher erfolgte die Speicherung bei Versuchen mit einer hohen Lebensdauer nur sequentiell mit voller Datenrate. Für die Hüllkurvendatei ist ein Maximum von $2 \cdot 10^6$ Datenpunkten vorgegeben, so dass hier bis zu 10^6 Schwingspiele abgebildet werden konnten.

In Vorbereitung der Überlastexperimente wurde neben der Stabilität des gemessenen Potenzials auch die Veränderung bei Erwärmung der Versuchsanlage untersucht. Für den Dauertest bei minimaler zyklischer Beanspruchung ergab sich eine Schwankung von $\pm 1 \mu\text{V}$, wobei aufgrund der geringen Belastung Rissbildung bzw. Plastifizierungen in der Probe ausgeschlossen werden konnten. Für die Experimente wurde aufgrund der sensiblen Messanordnung und der beabsichtigten Untersuchung früher Stadien jedem Versuch eine Art „Warmlaufphase“ vorgeschaltet. In dieser Phase wurden die Proben mit einer geringen Kraftamplitude sinusförmig wechselbeansprucht, bis das gemessene Potenzial ein stabiles Niveau erreichte. Erst nach der Stabilisierung wurde mit dem eigentlichen Experiment begonnen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Gleichstrompotenzialsonde auch zur Abgrenzung kurzer von langen Rissen verwendet.

Im Folgenden werden Risse mit einer gemittelten Länge $\geq 250 \mu\text{m}$ als lange Risse bezeichnet. Vorausgesetzt wird hierbei, dass sich eine durchgängige Rissfront gebildet hat, welche sich über die gesamte Probenbreite erstreckt. Risse geringerer Abmessungen werden als kurze Risse definiert.

Grundsätzlich soll davon ausgegangen werden, dass sich lange Risse gemäß LEBM ausbreiten, für kurze Risse jedoch eine gesonderte Beschreibung notwendig ist.

4 Ergebnisse

4.1 Lebensdauer bei einstufigen Versuchen

Die Angabe der Bruchspielzahl aus Ermüdungsexperimenten bildet bis heute die übliche Grundlage für eine Lebensdauervorhersage mit linearer Schadensakkumulation. Eine Definition der Lebensdauer in Jahren, Belastungszyklen wie z.B. Flügen, Betriebsstunden oder ähnlichem ist anwendungsbezogen ebenfalls gebräuchlich.

Bei Ermüdungsexperimenten können die Schwingspiele bis zum Versagen automatisiert ermittelt werden.

Zunächst wurden die Lebensdauern der CCT-Proben auf unterschiedlichen Lasthorizonten ermittelt. Abbildung 4-1 stellt die ermittelten Lebensdauern für die Spannungsverhältnisse $R = -1$ und $R = 0$ dar (Brucksch, 2009).

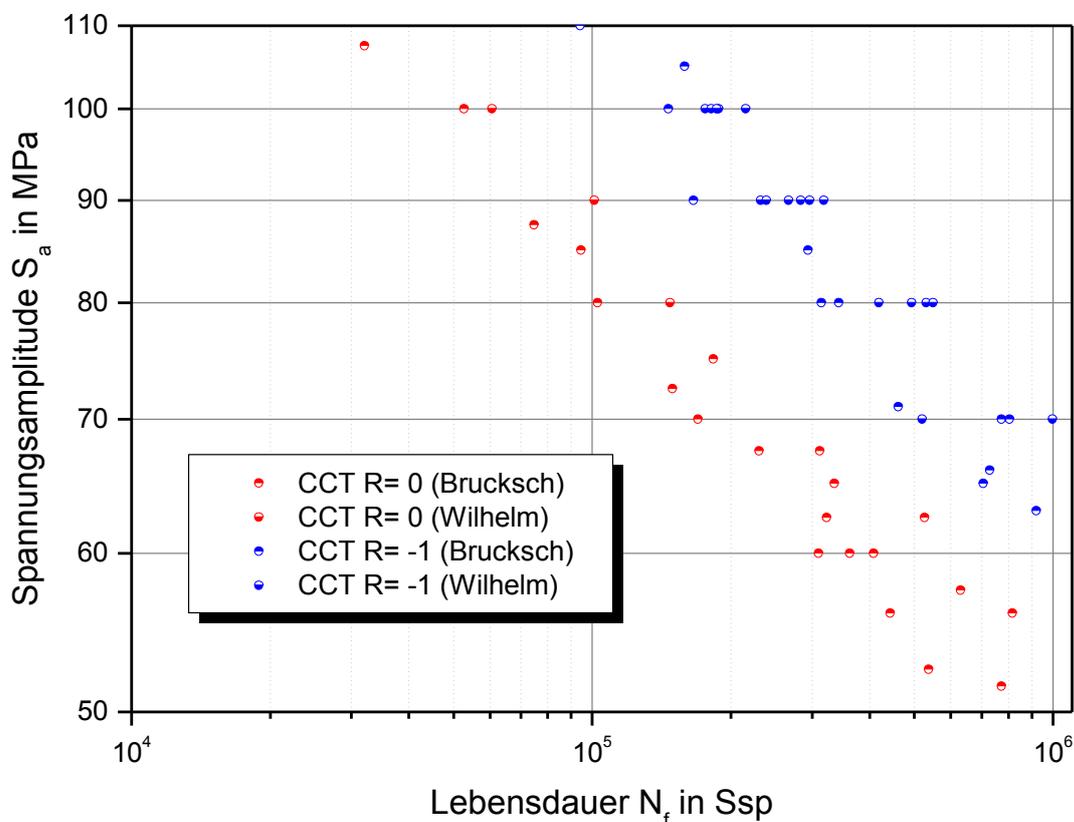


Abbildung 4-1: Proben-Wöhlerlinien CCT-Proben $R = -1$ und $R = 0$, nach (Brucksch, 2009)

Die Lebensdauern unter Zugschwellbeanspruchung ($R=0$) sind geringer, da bei gleicher Amplitude höhere Maximalspannungen erreicht werden, welche sich z.T. an Fließgrenze und Zugfestigkeit des Materials annähern können. Es zeigt sich die bereits durch *Schütz* (Schütz, 1965) beschriebene Mittelspannungsempfindlichkeit von Aluminiumknetlegierungen.

Auch für die SEN-Proben wurden einstufige Versuche mit den entsprechenden Spannungsamplituden und –verhältnissen durchgeführt. Dazu zeigt Abbildung 4-2 die auf den untersuchten Bereich der Zeitfestigkeit reduzierten Lebensdauerlinien.

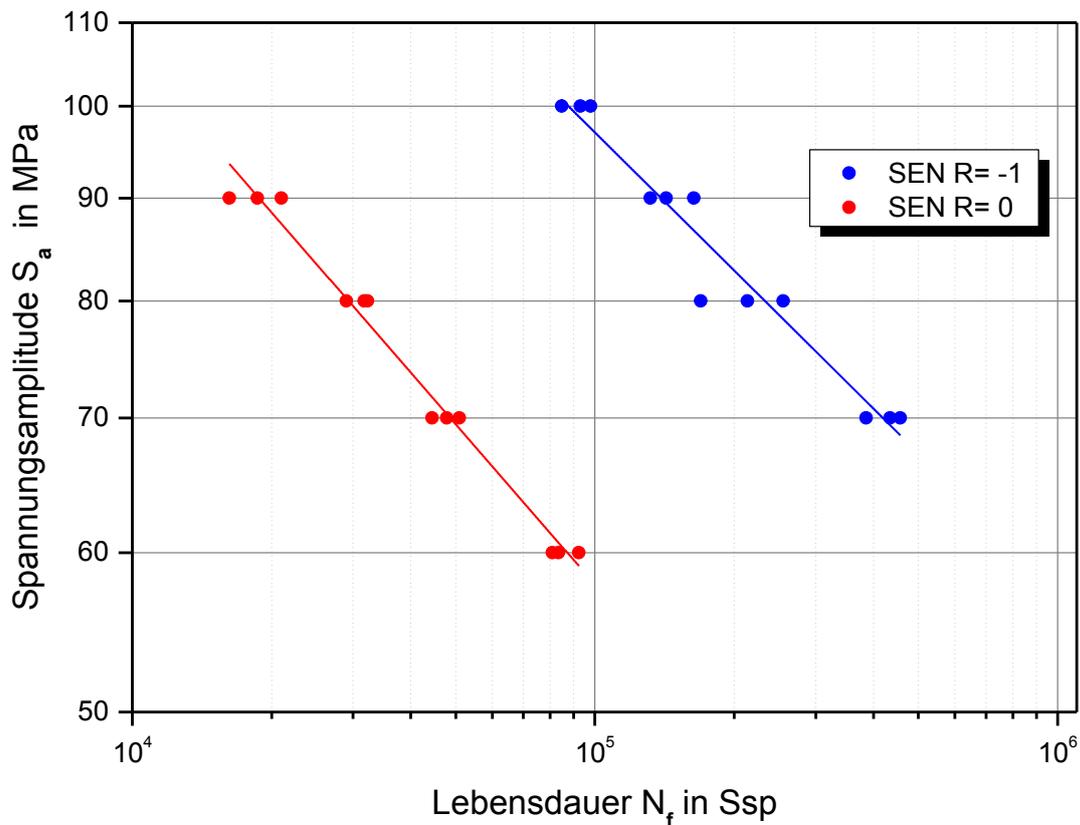


Abbildung 4-2: Proben-Wöhlerlinien SEN-Proben R= -1 und R= 0

Im Vergleich beider Probenarten wiesen die CCT-Proben wie erwartet aufgrund des geringeren Kerbfaktors höhere Lebensdauern bei jeweils gleicher Spannungsamplitude auf.

4.2 Lebensdauer bei Überlast

Bei periodisch eingebrachten Überlasten in Intervallen von 100, 1.000 bzw.

10.000 Schwingspielen zeigte sich eine signifikante Änderung der Lebensdauer.

Zunächst erfolgt die Darstellung der mittelspannungsfrei (R= -1) durchgeführten Versuche.

Abbildung 4-3 zeigt die veränderten Lebensdauern von CCT-Proben, wenn periodische Überlasten eingefügt werden. Folgen die Überlasten alle 100 Schwingspiele, werden die Lebensdauern gegenüber einstufigen Versuchen verkürzt. Bei größeren Überlastintervallen ergeben sich mit den einstufigen Versuchen vergleichbare Werte bzw. die Probenlebensdauer wird sogar verlängert.

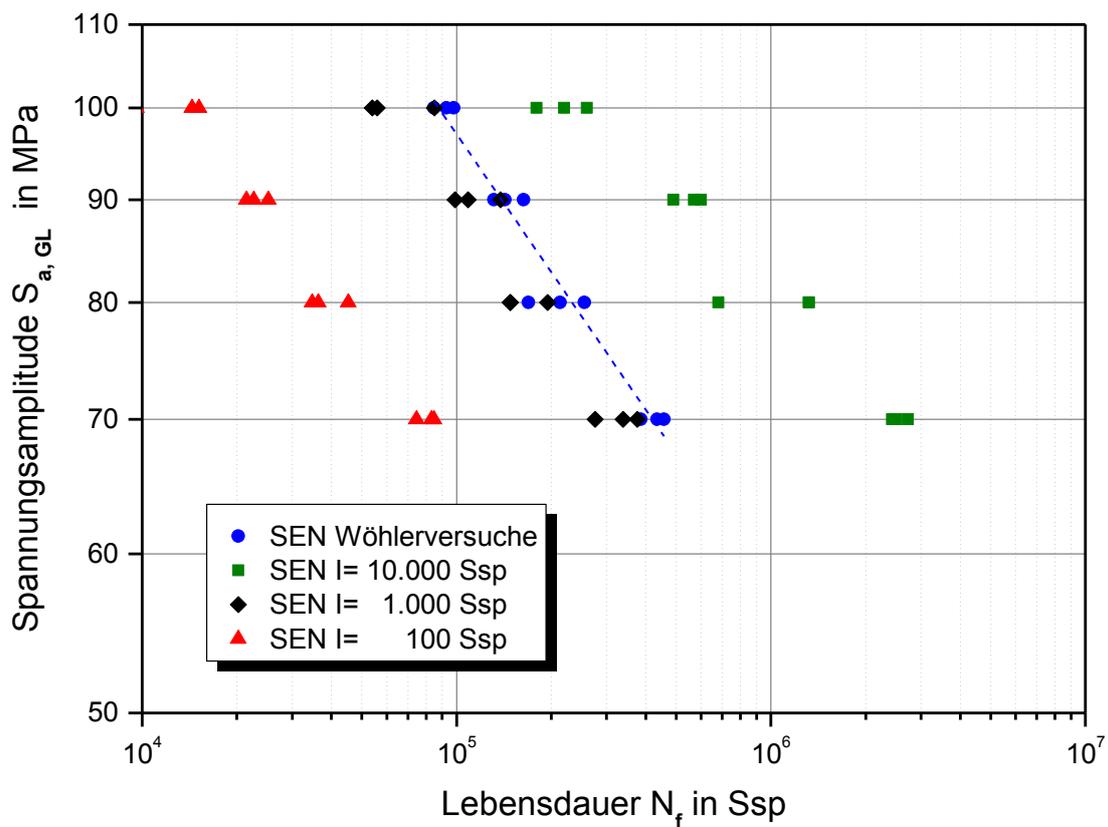


Abbildung 4-4: Ergebnisübersicht SEN-Proben R= -1

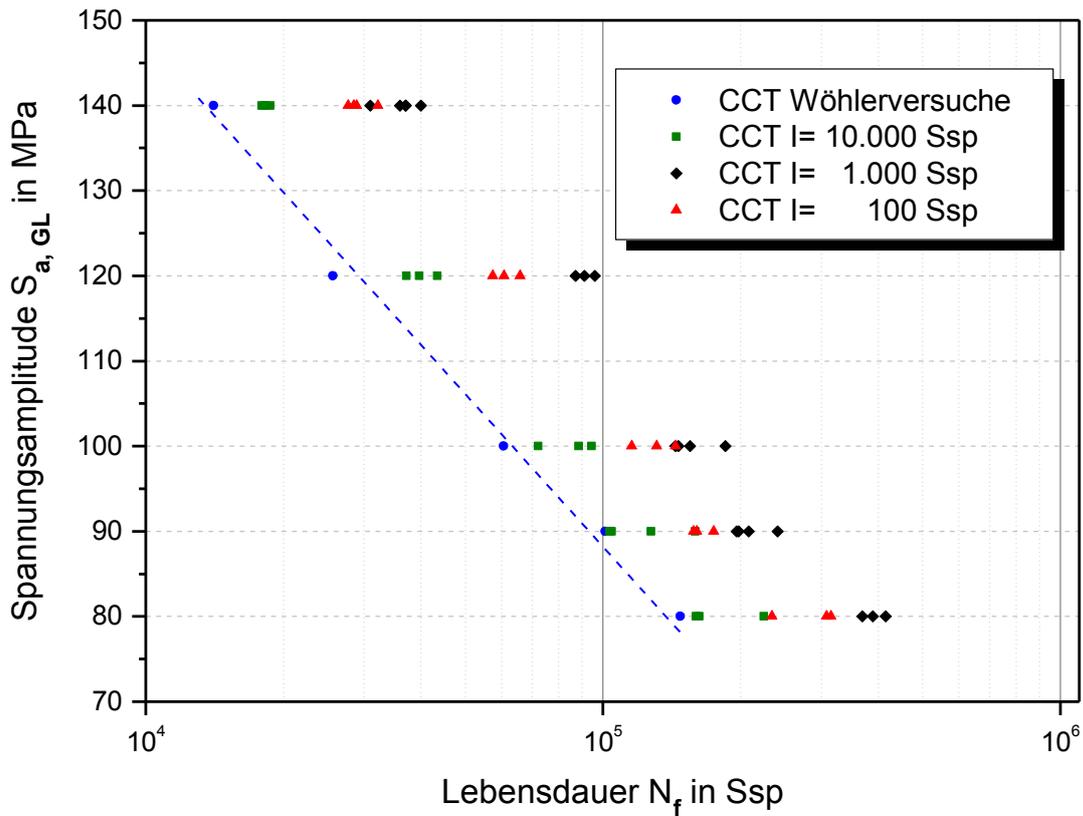


Abbildung 4-5: Ergebnisübersicht CCT-Proben R= 0

Für Ermüdungsexperimente mit positiven Mittelspannungen, d.h. $R = 0$ können die Lebensdauern der CCT-Proben aus Abbildung 4-5 entnommen werden.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit $R = -1$ bewirkten periodisch eingestreute Überlasten ($I = 100$ Ssp) im Zugschwellbereich eine signifikante Lebensdauererlängerung. Bei einem Überlastintervall von 10.000 Schwingspielen zeigten sich nur geringe erhöhte Bruchspielzahlen. Mit Intervallen von 1.000 Schwingspielen ergaben sich die höchsten ermittelten Lebensdauern. An den CCT-Proben konnte dieses Verhalten auch für Grundlast-Spannungsamplituden bis zu einer Höhe von 140 MPa bestätigt werden.

Ein steigendes Grundlastniveau bewirkte in allen untersuchten Fällen eine Reduzierung der Bruchspielzahl.

Während der fraktographischen Untersuchung zeigten sich Schwingungstreifen / -linien auf der Bruchfläche. Durch Rückzählen vom Übergang zum Gewaltbruch konnten die Überlastlinien den jeweiligen Schwingungszahlen und entsprechenden Risslängen zugeordnet werden. Somit erfolgte neben der indirekten Risslängenmessung mittels Potenzialsonde eine direkte Bestimmung der Risslänge über die Markerloadtechnik.

Abbildung 4-7 zeigt die Bruchfläche einer SEN-Probe, welche bei $R = -1$ mit einer Grundlastamplitude von $S_{a, GL} = 100$ MPa ermüdet wurde. Die Überlasten mit einer Amplitudenhöhe von 300 MPa erfolgten in einem Abstand von 10.000 Schwingungen. An der zum unteren Bildrand parallelen Kerbe sind die Startpunkte zweier dominanter Eckanrisse durch grüne Pfeile gekennzeichnet. Diese kurzen Risse verlaufen nur über einen Teil der Bruchfläche und breiteten sich zweidimensional in x- und z-Richtung aus. Innerhalb von mehreren Überlastintervallen (d.h. mehreren 10.000 Schwingungen) erfolgten ein viertelkreisförmiges Wachstum und anschließend durch ein Zusammenwachsen die Bildung des durchgängigen, langen Risses.

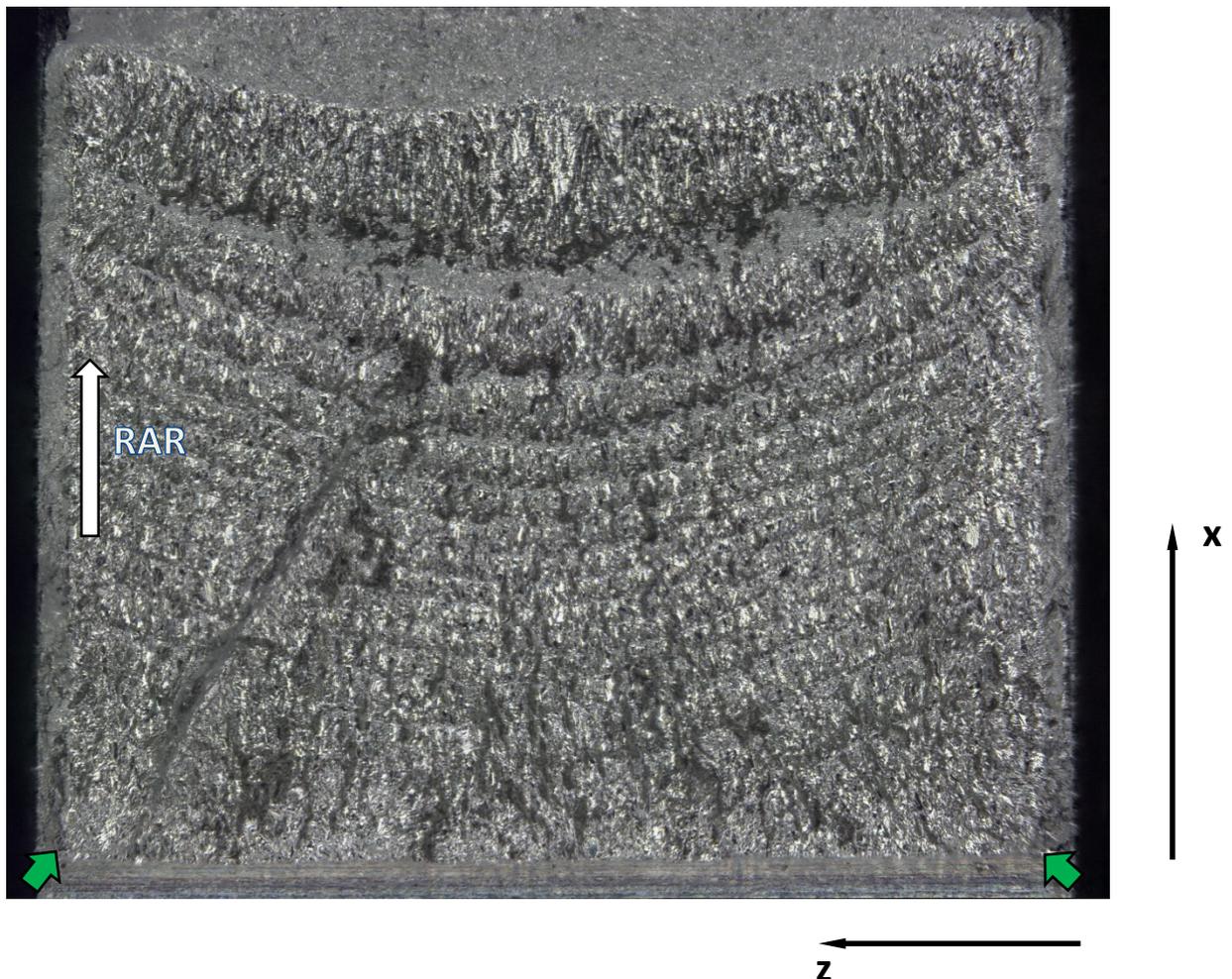


Abbildung 4-7: Bruchfläche SEN-Probe $R = -1$, $S_a = 100$ MPa, $I = 10.000$

Die Ausbreitungsrichtung des langen Risses (Rissausbreitungsrichtung = RAR) ist zusätzlich durch einen weißen Pfeil markiert. Die Front des langen Risses verläuft über die gesamte Probenbreite und die Ausbreitung kann eindimensional (d.h. in x-Richtung) über die LEBM

beschrieben werden. Die weitere Ausbreitung kann anhand der Überlastlinien verfolgt werden. Der zunehmende Abstand zwischen diesen Linien in der oberen Bildhälfte weist auf eine steigende Rissgeschwindigkeit hin, welche aufgrund der zunehmenden Spannungsintensität erwartet werden konnte.

4.3.2 Übergang zwischen stabiler und instabiler Rissausbreitung

Bei den Ermüdungsexperimenten zeigten sich i.d.R. deutliche Übergänge zwischen stabiler Rissausbreitung und Gewaltbruch. Diese bei Probenversagen entstandenen Rissfronten wurden fraktographisch bestimmt und in gemittelte Risslängen a_f überführt, welche folgend als Endrisslängen bezeichnet werden.

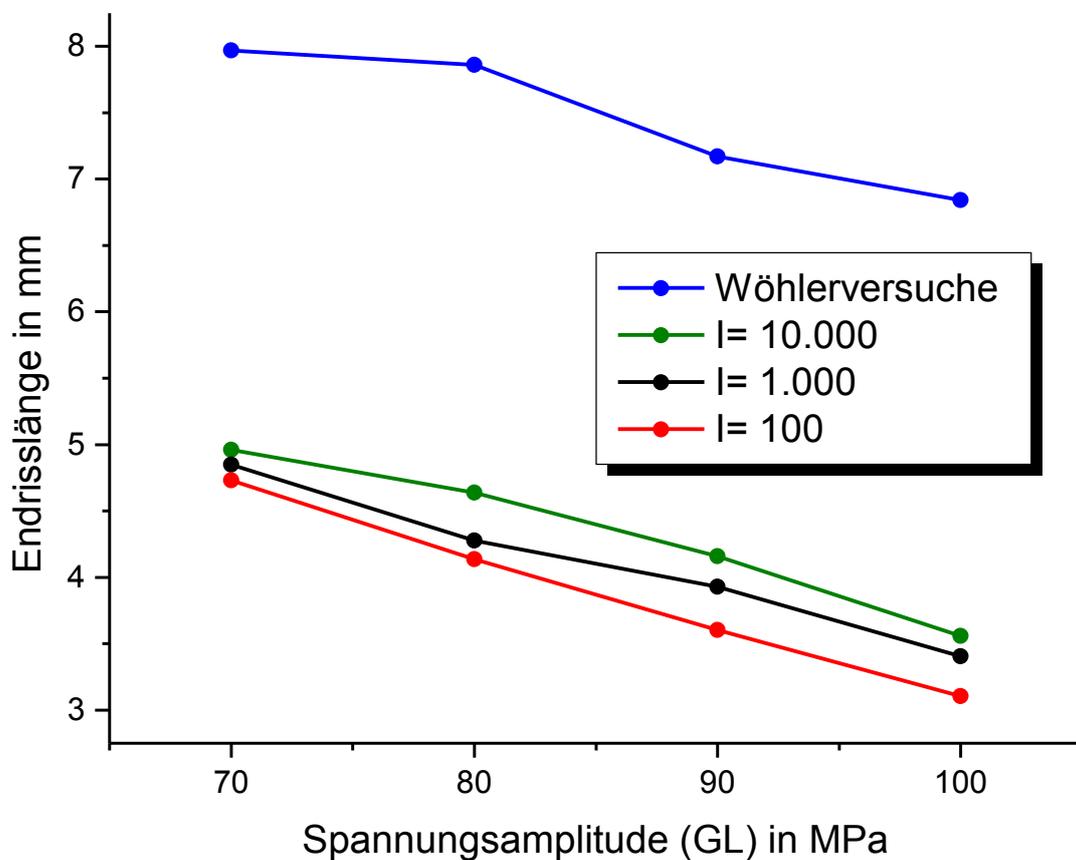


Abbildung 4-8: Endrisslängen CCT-Proben, R= -1

Abbildung 4-8 zeigt die Endrisslängen für mittelspannungsfrei ermüdete CCT-Proben.

Die erkennbare Verringerung der Endrisslänge a_f bei höherer Spannungsamplitude ist über die Betrachtung der Spannungsintensität nachvollziehbar. Das Versagen der Proben trat bei Werten von 24 bis 28 $MPa\sqrt{m}$ ein, welche mit höherer Spannungsamplitude bei geringeren Risslängen erreicht wurden.

Im Zuge der Überlasten erfolgte eine weitere Erhöhung der Spannungsintensität, was sich im Vergleich zu den einstufigen Versuchen in einer um jeweils ca. 3 mm geringeren Risslänge bei Probenversagen widerspiegelte.

Weiterhin zeigte sich ein Einfluss des Überlastintervalls. Mit nach 100 Schwingspielen eingestreuten Überlasten wurden (neben den geringsten Lebensdauern) die kleinsten Endrisslängen hervorgerufen.

Mit einem Intervall von 10.000 Schwingspielen wurden die größten Risslängen unter Überlasteinwirkung erreicht. Da bei diesem Intervall auch die höchsten Lebensdauern festgestellt wurden, muss die durchschnittliche Rissfortschrittsrate $\frac{da}{aN}$ geringer als unter einstufiger Belastung sein. Dies gilt auch bei einem Überlastintervall von 1.000 Schwingspielen. Dass die durchschnittliche Rissgeschwindigkeit unter dem Einfluss von Überlasten abgemindert wird, bestätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen [z.B. (Schijve, 1972), (Rödling, 2003), (Broll, 2006), (Heidemann, 2008)].

Die Ergebnisse zugschwellbeanspruchter SEN-Proben ($R=0$) sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

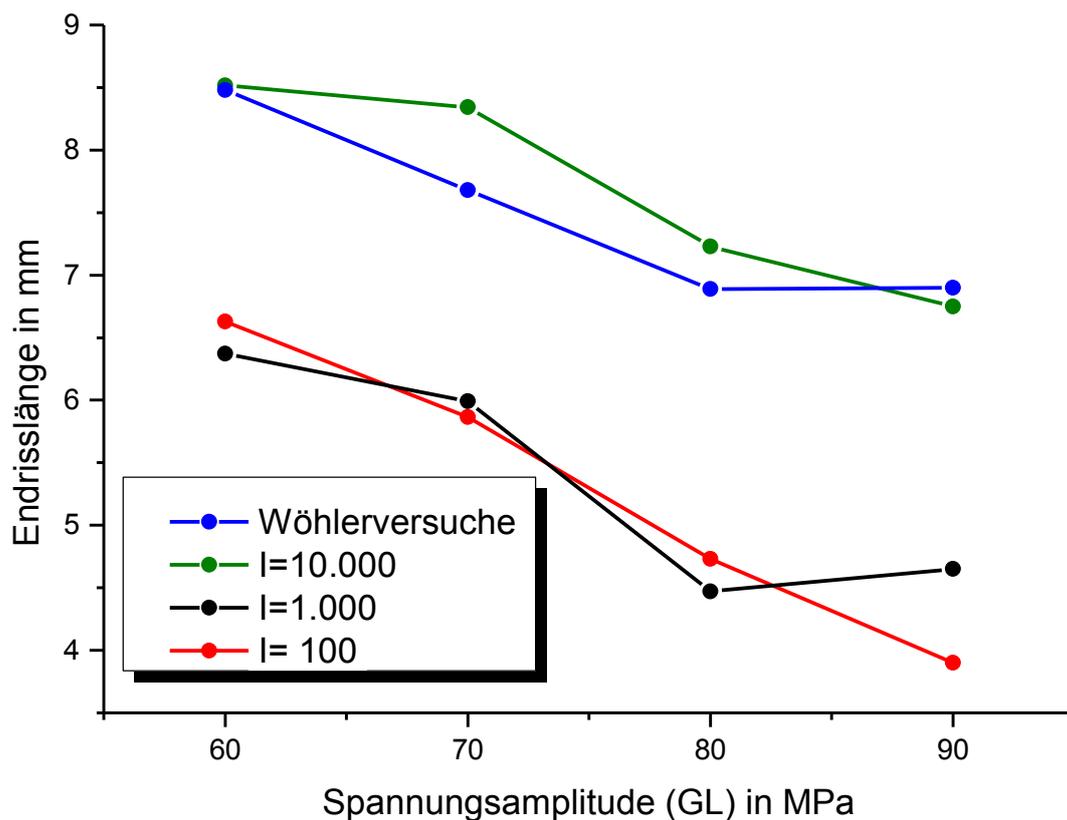


Abbildung 4-9: Endrisslängen SEN-Proben $R=0$

Alle mit Überlastintervallen von 100 und 1.000 Schwingspielen beanspruchten Proben versagten während eines Überlastzyklus. Die Spannungsintensität erhöhte sich entsprechend dem Überlastfaktor auf das 1,5-fache, wodurch sich um ca. 2 mm geringere

Endrisslängen als im Wöhlerversuch ergaben. Gleichzeitig wurden bei diesen Versuchen unter periodischem Überlasteinfluss höhere Lebensdauern erreicht. Somit lag für Überlastintervalle von 100 und 1.000 Schwingspielen unter Zugschwellbeanspruchung eine geringere mittlere Rissgeschwindigkeit als bei den entsprechenden Wöhlerversuchen vor.

Beim Überlastintervall von 10.000 Schwingspielen konnte in einigen Fällen ein Probenversagen während der Grundlast beobachtet werden. Daher waren die Endrisslängen mit denen der Wöhlerversuche vergleichbar. Da sich auch die Lebensdauern bei einstufiger Belastung und maximalem Überlastintervall ähnelten, heben sich für das Intervall von 10.000 Schwingspielen die Effekte der Rissbeschleunigung in der Überlast sowie die nachfolgende Rissverzögerung offensichtlich auf und können vernachlässigt werden.

4.3.3 Allgemeine Rissentwicklung

Für eine genaue Beschreibung der Schädigungsgröße Risslänge, wurde die in situ mittels Potenzialsonde erfasste Rissausbreitung über der Schwingspielzahl dargestellt. Daraus erfolgt im späteren Teil der Arbeit eine Bestimmung der Rissfortschrittsraten sowie von Einzeleffekten im Risswachstum.

Bei der Darstellung der Risslänge über der Schwingspielzahl in Abbildung 4-10 ist das durch Überlasteinfluss veränderte Risswachstum deutlich erkennbar. Charakteristisch für die durchgeführten Versuche sind die im Graph vorhandenen Stufen, die durch Überlasten (hier alle 10.000 Schwingspiele) hervorgerufen wurden. Im gezeigten Beispiel sind 48 Stufen sichtbar.

Wenige Überlastintervalle vor Probenversagen zeigen sich markante, senkrecht verlaufende Abschnitte, die das Risswachstum während des Überlastzyklus erkennen lassen.

Eine Risslänge von 250 μm wurde mit der dargestellten Probe nach ca. 75.000 Schwingspielen (inkl. 7 Überlasten) erreicht, was 15 % der Lebensdauer entspricht. Die Stufen bei Risslängen von weniger als 250 μm lassen eine Anrissbildung bereits innerhalb der ersten 10.000 Schwingspiele und somit in den ersten zwei Prozent der Lebensdauer vermuten.

Bei dieser Versuchsführung besitzt die Potenzialsonde offensichtlich eine ausreichende Empfindlichkeit zur Detektion früher Anrisse.

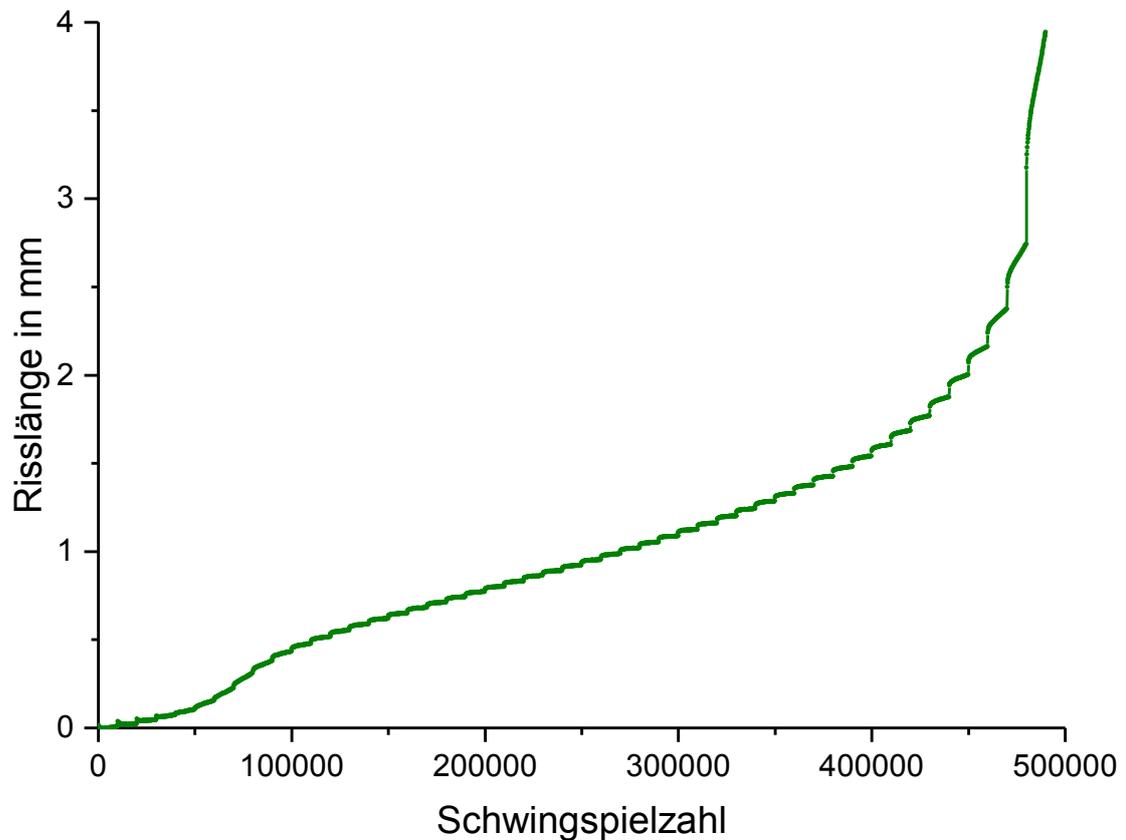


Abbildung 4-10: Überlastexperiment $S_a = 90 \text{ MPa}$, $I = 10.000$, $R = -1$, SEN-Probe

Bei den Versuchen mit Überlastintervallen von 100, 1.000 und 10.000 Schwingspielen und einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ konnte spätestens bei Erreichen von 40 % der Gesamtlebensdauer eine Rissentwicklung detektiert werden.

Die bei $R = -1$ durch ein unterschiedlich hohes Lastniveau hervorgerufenen Veränderungen im Risswachstum werden in Abbildung 4-11 aufgezeigt. Dargestellt ist die Rissverlängerung in verschiedenen wechselbeanspruchten CCT-Proben, die mit einem Überlastintervall von 1.000 Schwingspielen bei unterschiedlichen Grundlastamplituden beansprucht wurden.

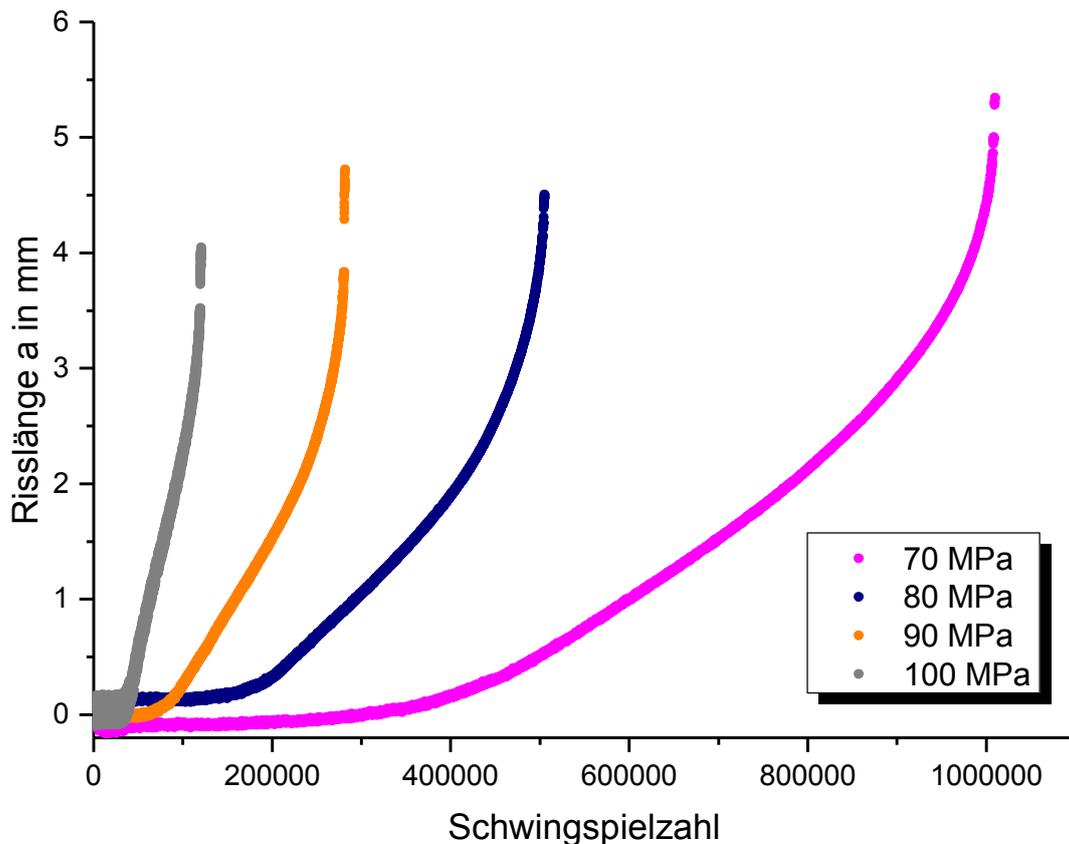


Abbildung 4-11: Vergleich Risswachstum für $I= 1.000$ CCT-Proben $R= -1$

Bei den Überlastversuchen zeigte sich erwartungsgemäß eine mit der Höhe der Spannungsamplitude steigende Rissfortschrittsrate, welche eine Verringerung der Lebensdauer bewirkte. Gleichzeitig lässt sich die mit höherem Lastniveau abnehmende Endrisslänge erkennen.

Abbildung 4-12 zeigt den Einfluss der Überlastintervalle $I= 100$, $I= 1.000$ und $I= 10.000$ Schwingspiele auf die Lebensdauer bei gleichem Lastniveau. Beispielhaft sind Versuchsdaten von CCT-Proben dargestellt, die auf gleichem Grund- und Überlastniveau ($S_a= 90$ MPa; $\alpha= 3$; $R= -1$) ermüdet wurden.

Die dargestellte Rissentwicklung verdeutlicht die in Abbildung 4-3 gezeigte Lebensdauerzunahme bei größerem Überlastintervall sowie die geringeren Endrisslängen bei zweistufigen Versuchen gegenüber dem einstufigen Versuch (vgl. Abbildung 4-8).

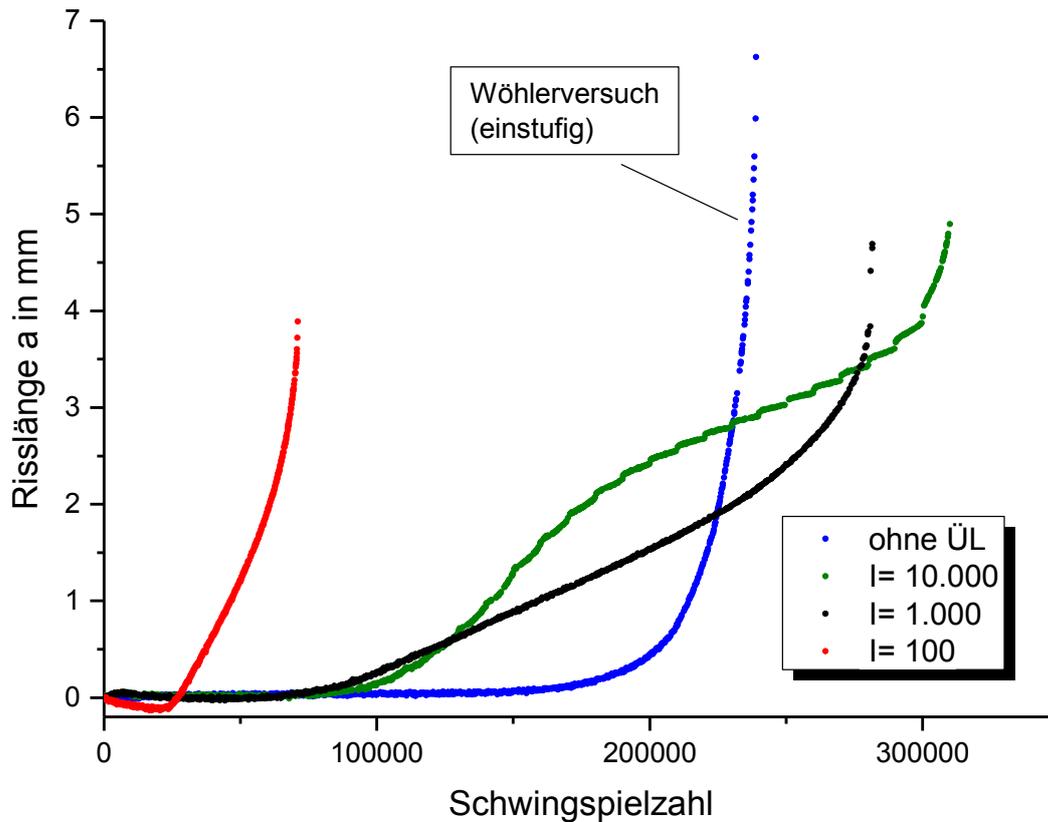


Abbildung 4-12: Vergleich Rissentwicklung $S_a = 90$ MPa, CCT-Proben $R = -1$

Im Vergleich zur einstufigen Beanspruchung (blaue Kurve) war bei allen Überlastversuchen mit $R = -1$ ein frühzeitiger Anstieg der Risslänge zu verzeichnen.

Bei den Intervallen von 1.000 und 10.000 Schwingspielen zeigten sich durch die Überlasten verursachte, ausgeprägte Rissverlängerungen und anschließend Bereiche mit verzögertem Risswachstum. Die resultierende Lebensdauer war höher als im Einstufenversuch.

Abbildung 4-13 zeigt eine auf die Lebensdauer bzw. Bruchspielzahl normierte Darstellung von Abbildung 4-12. Beginnendes Risswachstum bei Überlastversuchen ist bei 30-40% der Gesamtlebensdauer deutlich zu erkennen. Die Rissfortschrittsphase war in diesen Fällen größer als die Anrissphase und muss somit in einer Lebensdauerabschätzung zwingend betrachtet werden.

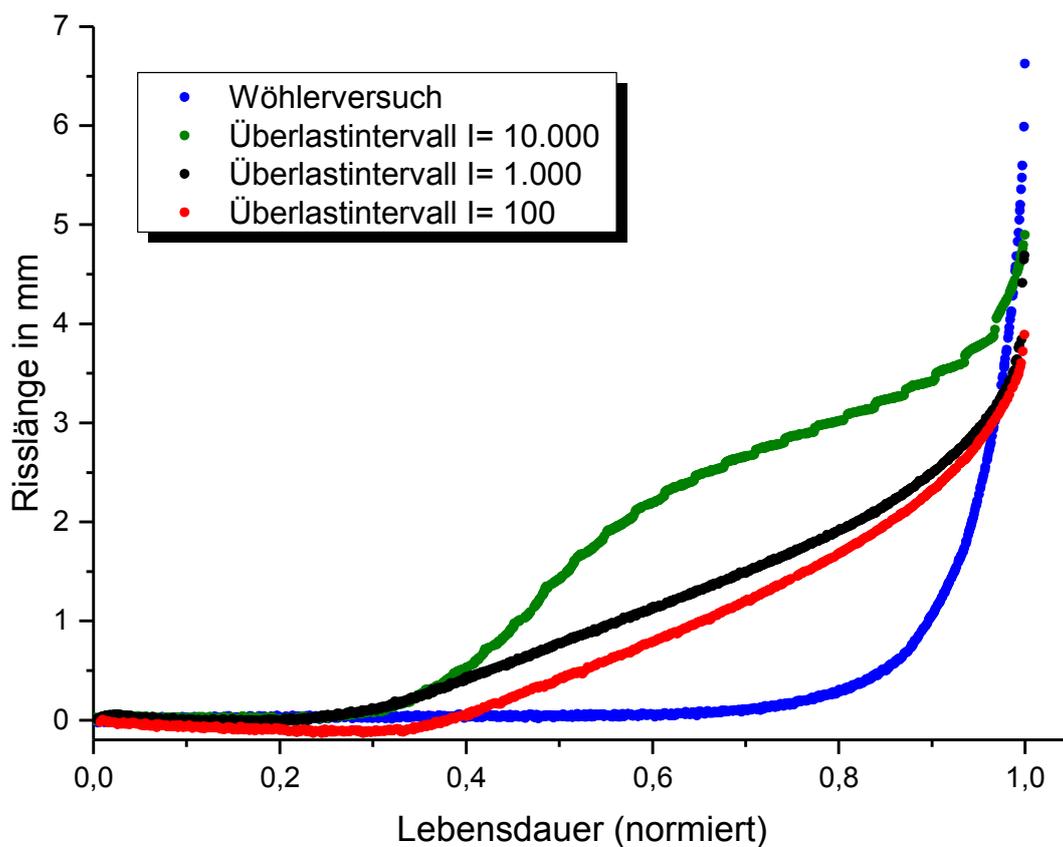


Abbildung 4-13: Vergleich Rissentwicklung über normierter Lebensdauer $S_a = 90$ MPa CCT-Proben $R = -1$

Bei einstufiger Belastung hingegen ist ein Anriss erst nach 70-80 % der Lebensdauer mit der Potenzialsonde detektierbar. In diesem Fall bildet die Anrissphase den dominanten Anteil für eine Lebensdauerabschätzung.

Für das Spannungsverhältnis $R=0$ zeigt Abbildung 4-14 ein typisches Beispiel der anhand einer SEN-Probe während eines Überlastexperimentes ermittelten Risslänge.

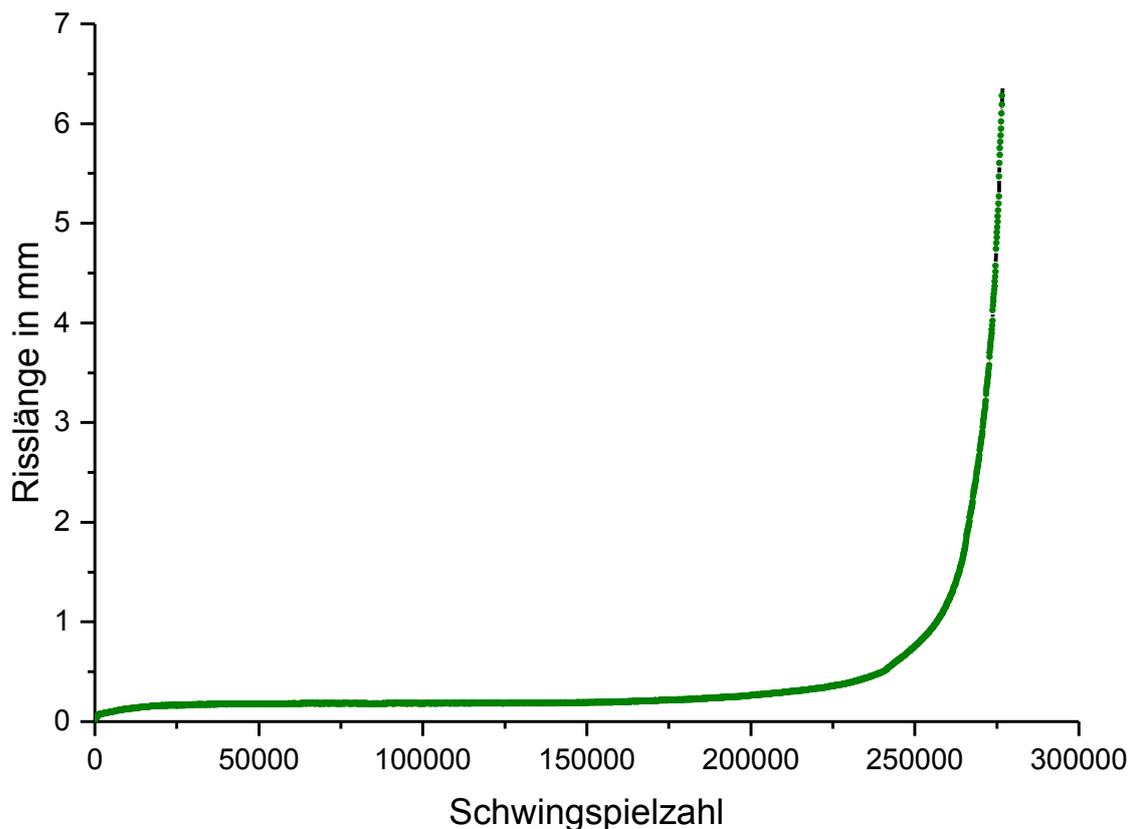


Abbildung 4-14: Überlastexperiment $S_a = 60 \text{ MPa}$, $I = 1.000$, $R = 0$ SEN-Probe

Nach einem geringen Anstieg der Risslänge direkt zu Beginn des Experimentes war im weiteren Verlauf der $a(N)$ -Kurve zunächst keine Rissverlängerung mittels Potenzialsonde messbar. Wenige Überlastintervalle vor Probenversagen zeichneten sich durch Überlasten hervorgerufene Rissverlängerungen ab.

Während mit $R = -1$ ermüdete CCT-Proben die erwartete gleichmäßige Rissentwicklung auf beiden Seiten der Bohrung zeigten, ergab sich bei ca. 50% der im Zugschwellbereich ($R = 0$) belasteten CCT-Proben ein asymmetrisches Risswachstum. Um Abweichungen in der Bestimmung von Risslänge und Rissfortschrittsrate mittels Potenzialsonde zu vermeiden, wurden die Verläufe zunächst nur einseitig angerissener CCT-Proben nicht in die vergleichende Betrachtung einbezogen.

Die normierte Abbildung 4-15 verdeutlicht, dass bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ die Anrissbildung für alle Intervalle erst im letzten Abschnitt der Gesamtlebensdauer erfolgte.

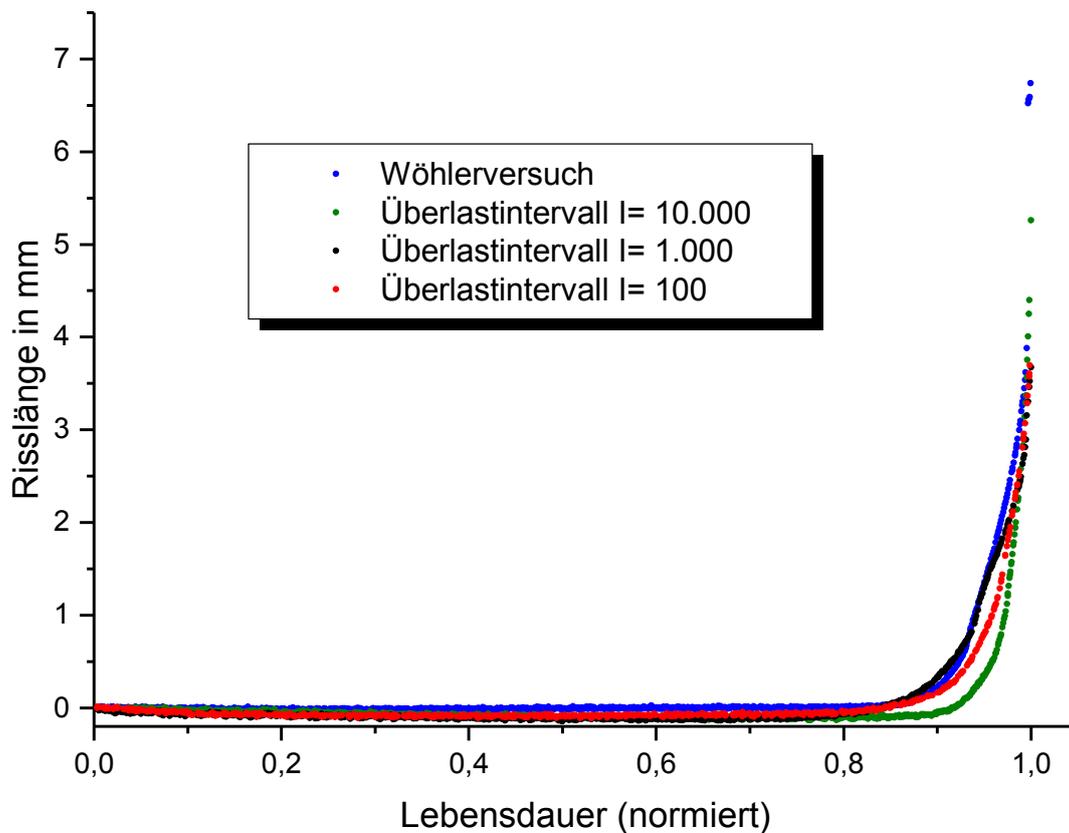


Abbildung 4-15: Vergleich Rissentwicklung über normierter Lebensdauer $S_a = 90$ MPa CCT-Proben $R = 0$

Das Ende der Anrissphase konnte durch die Gleichstrompotenzialsonde erst nach ca. 80-90 % der Lebensdauer detektiert werden.

Um die Anrissbildung genauer zu verifizieren, erfolgte die Untersuchung einzelner Proben mittels REM. Abbildung 4-16 zeigt eine CCT-Probe, die bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ mit einer Grundlastamplitude von 100 MPa belastet wurde. Das Überlastintervall betrug 1.000 Schwingspiele und die Gesamtlebensdauer ca. 100.000 Schwingspiele. In der Aufnahme ist der Rand der angefasten Bohrung nach 10 Überlastintervallen (d.h. nach 10.000 Schwingspielen bzw. 10 % der Lebensdauer) bei 50-facher Vergrößerung zu sehen, die Anrisse sind durch rote Pfeile markiert.

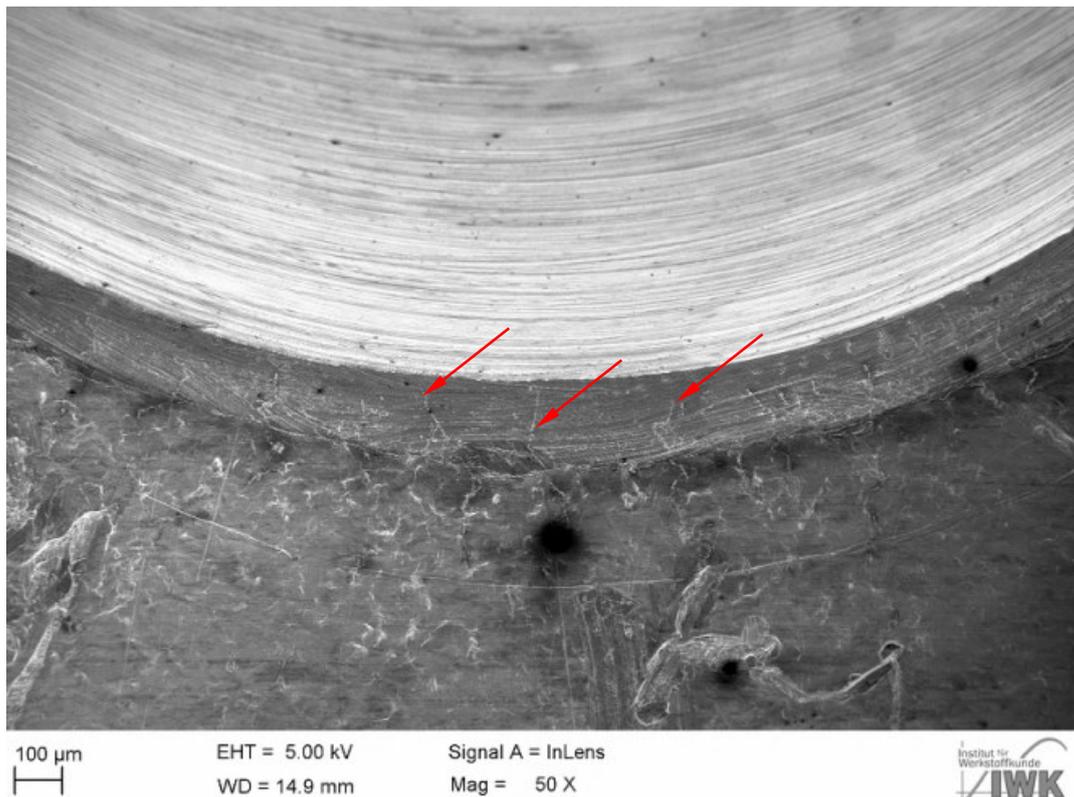


Abbildung 4-16: Anrisse im Kerbgrund, CCT-Probe R= 0; I= 10.000 (Aebi, 2011)

Mittels REM konnten nachträglich fraktographisch Überlastlinien und somit Rissausbreitung bereits in einer frühen Phase des Experimentes festgestellt werden, während durch die Potenzialsonde Risswachstum erst ab 80-90 % der Lebensdauer nachweisbar war.

In Abbildung 4-17 sind die Überlastlinien auf der Bruchfläche einer weiteren CCT-Probe dargestellt, welche in der Grundlast mit einer Spannungsamplitude von 140 MPa und im Abstand von 1.000 Schwingspielen mit Überlasten beansprucht wurden (Bär, et al., 2012). Ein etwa 20 x 30 µm großes Partikel wirkte als Auslöser für die Ausbreitung eines halbelliptischen Risses. Durch Rückzählen der Überlastlinien von der Endrisslänge erfolgte eine Zuordnung zu den Schwingspielzahlen. In der Abbildung kennzeichnen rote Pfeile die 10. Überlastlinie. Auf der linken Seite des Partikels kann bis zur dritten Überlast zurückgezählt werden.

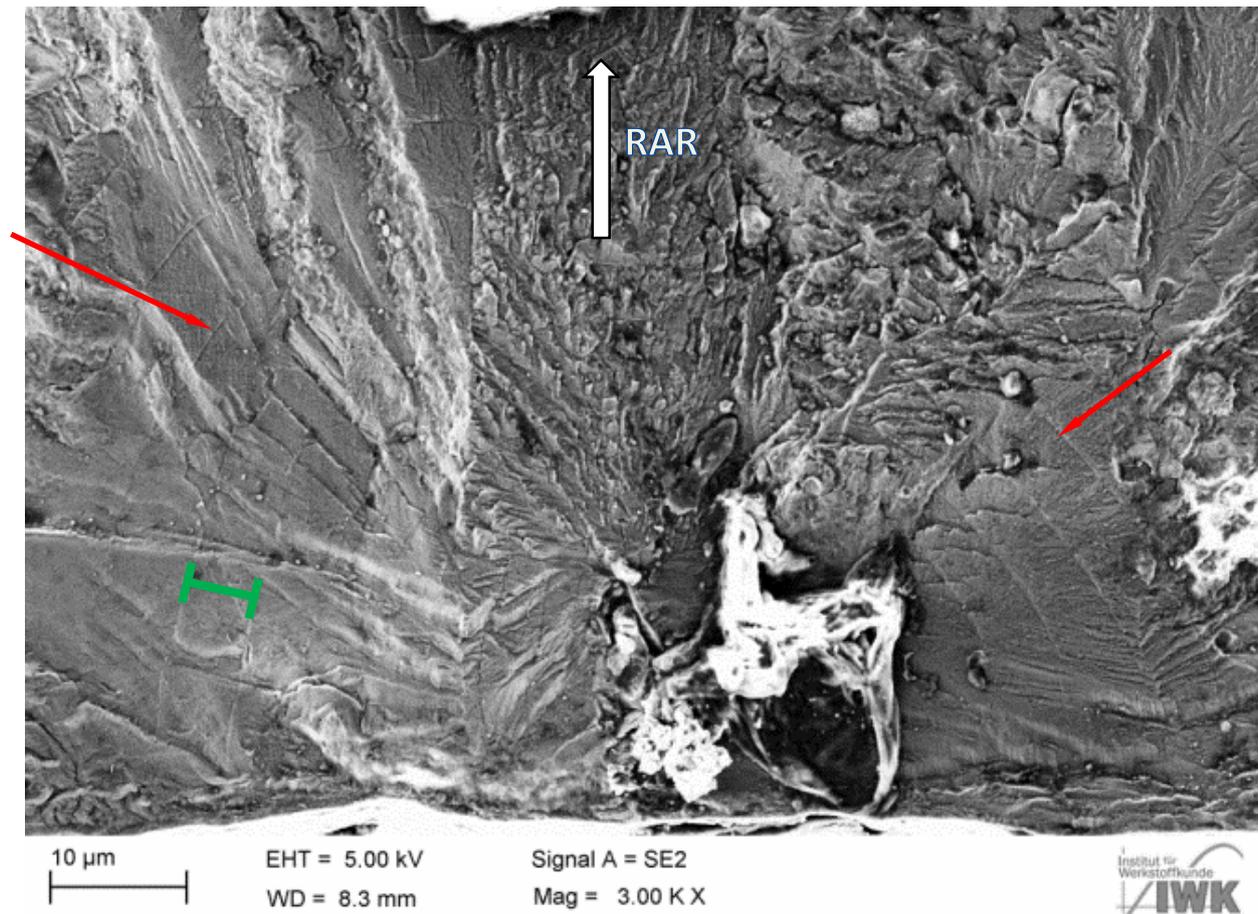


Abbildung 4-17: REM-Aufnahme halbelliptischer Anriss (3000-fache Vergrößerung, CCT-Probe, R=0; I=1.000)

Die Ergebnisse der REM-Untersuchungen zeigen die Entstehung von Anrissen bevor sie mittels Potenzialsonde detektiert werden können. Auch in diesem Fall (vgl. Abbildung 4-7) breitete sich der kurze Riss zweidimensional aus.

Unter Berücksichtigung, dass bei R=0 periodische Überlasten immer eine Verlängerung der Lebensdauer bewirkten (vgl. Abbildung 4-5), Risse sich frühzeitig bilden, Risswachstum jedoch erst ab ca. 80% dieser Lebensdauer detektiert wurde (vgl. Abbildung 4-15), können auch bei kurzen Rissen Verzögerungseffekte vermutet werden. Eine durchschnittliche (lokale) Geschwindigkeit kurzer Risse kann hier fraktographisch ermittelt werden, indem der Abstand zwischen zwei Überlastlinien (grün eingezeichnet) durch die Schwingspiele des Überlastintervalls geteilt wird:

$$\left[\frac{\Delta a}{\Delta N} \right]_{loc} \approx \frac{7,5 \cdot 10^{-6} m}{1.000 Ssp} = 7,5 \cdot 10^{-9} m/Zyklus$$

Abbildung 4-17 lässt weiterhin erkennen, dass der Abstand zwischen zwei Überlastlinien mehrere Mikrometer beträgt, die Linien selbst jedoch signifikant dünner sind. Der dominante Anteil der Rissausbreitung wird daher auch bei kurzen Rissen durch die Grundlast hervorgerufen.

4.3.4 Rissgeschwindigkeiten bei langen Rissen

Grundsätzlich wurde die Veränderung der Potenzialspannung während der gesamten Versuchsdauer aufgezeichnet. *Brucksch* (Brucksch, 2009) konnte nachweisen, dass die Risslänge verlässlich aus den Daten der Potenzialsonde errechnet werden kann, wenn die gemittelte Gesamtlänge mehr als 250 μm beträgt. Aus den Rissverlängerungen Δa der $a(N)$ -Kurve lassen sich die mittleren Rissgeschwindigkeiten $\frac{\Delta a}{\Delta N}$ berechnen.

Für ΔN kann das jeweilige Überlastintervall von 100, 1.000 bzw. 10.000 Schwingspielen verwendet werden. Für die optische Bestimmung der Risslängeninkremente wurden die Abstände der Überlastlinien genutzt.

In Abbildung 4-18 wurden die für $R = -1$ an SEN-Proben ermittelten Rissfortschrittsraten gegen die zyklische Spannungsintensität der Grundlast aufgetragen. Erhöhte Geschwindigkeiten durch die Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ sowie die verzögerte Rissausbreitung nach Überlasten werden hierbei nicht deutlich.

Während die Werte für den einstufigen Versuch gesondert ermittelt wurden, handelt es sich bei den drei weiteren Kurven um aus Überlastexperimenten bestimmte Fortschrittsraten. Die erhöhten Rissgeschwindigkeiten bei geringen Spannungsintensitäten (d.h. auch geringen Risslängen) lassen einen Kerbeinfluss vermuten. Die Bestimmung der Spannungsintensität ist daher in diesem Bereich zu überprüfen.

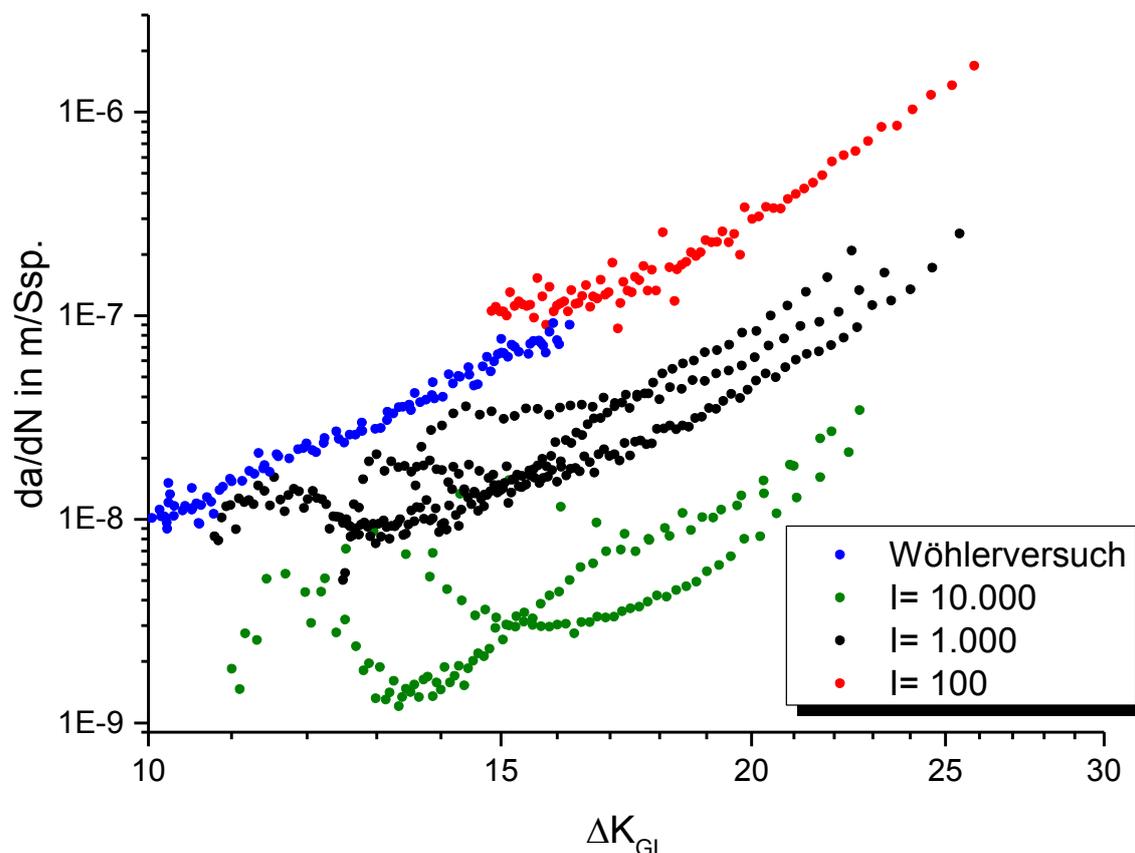


Abbildung 4-18: Rissfortschrittsraten für SEN-Proben $R = -1$

Bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ und einer Überlasthöhe von 200 % zeigte sich für das maximale Intervall von 10.000 Schwingspielen die geringste Rissfortschrittsrate. Bei einer Verringerung des Intervalls auf 1.000 Schwingspiele stieg die mittlere Rissgeschwindigkeit auf den 5-10 fachen Wert. Wurde das Überlastintervall auf 100 Schwingspiele reduziert, ergab sich eine nochmals um den Faktor 5-10 gesteigerte Rissfortschrittsrate.

Die geringste Rissgeschwindigkeit beim größten Überlastintervall lässt darauf schließen, dass hier ein maximal wirksamer Retardationseffekt für die Rissausbreitung vorhanden war.

Die gemittelten Rissfortschrittsraten für SEN-Proben unter Zugschwellbeanspruchung ($R = 0$) zeigt Abbildung 4-19.

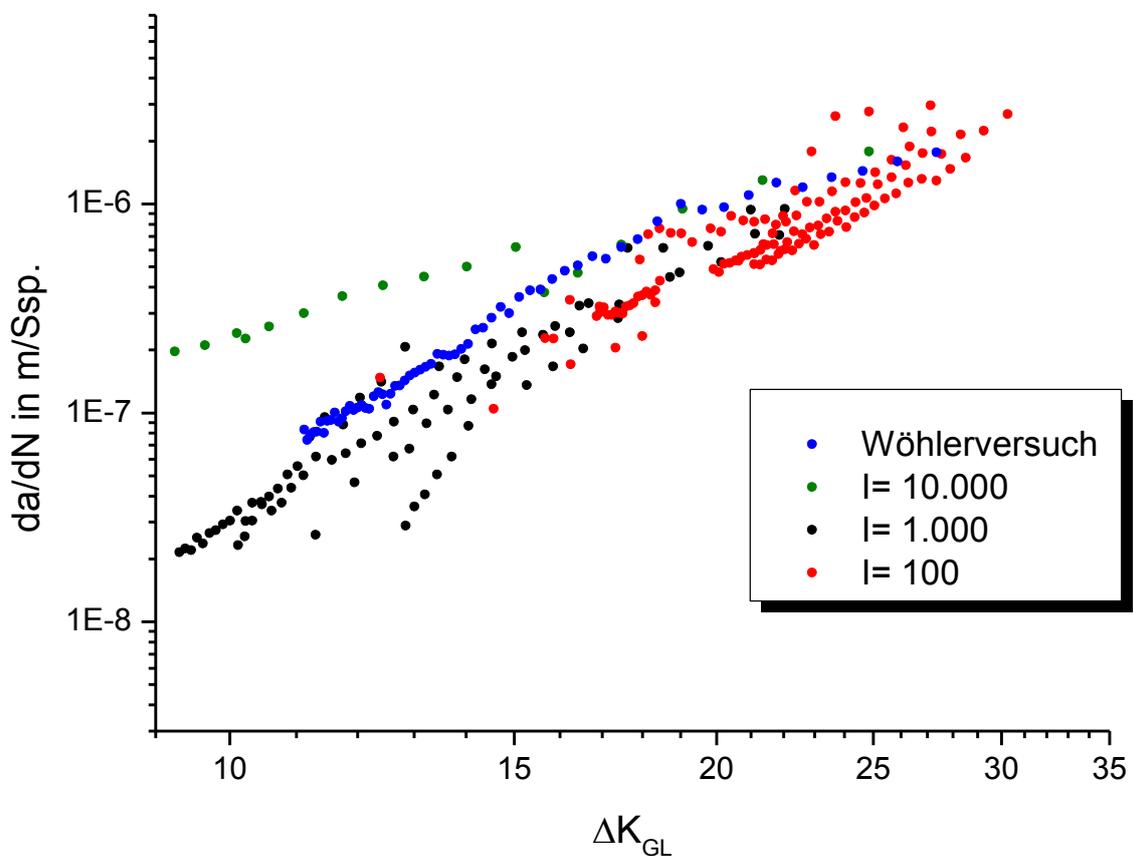


Abbildung 4-19: Rissfortschrittsraten für SEN-Proben $R = 0$

Bei Überlastintervallen von 100 und 1.000 Schwingspielen ergaben sich vergleichbare Rissgeschwindigkeiten, so dass auch ähnliche Lebensdauern zu erwarten wären. Trotz einer ebenfalls vergleichbaren Endrisslänge (vgl. Abbildung 4-9) zeigte sich für $l = 1.000$ Schwingspiele eine bis zu doppelt so hohe Lebensdauer (vgl. Abbildung 4-6). Für das Intervall von 10.000 Schwingspielen waren nur wenige Überlasten auf der Bruchfläche erkennbar, weshalb für die Bestimmung der Rissgeschwindigkeiten ausschließlich mittels Potenzialsonde ermittelte Risslängen im Abstand von 500 Schwingspielen verwendet wurden. Die höhere Rissfortschrittsrate bei geringen

Spannungsintensitäten bewirkte in diesem Fall eine Verringerung der Lebensdauer. Für hohe Spannungsintensitäten ($R=0$) lassen sich die Rissfortschrittsraten aller untersuchten Überlastintervalle mit einem gemeinsamen Streuband beschreiben. Da somit bei $R=0$ das Wachstum langer Risse keine wesentlichen Unterschiede in der Lebensdauer verursacht, müssen die Abweichungen über die Anrissbildung und das vorliegende Kurzrissswachstum bewirkt werden.

4.3.5 Rissgeschwindigkeiten bei kurzen Rissen an Kerben

Für lange Rissen konnten die Überlasteffekte mit der Potenzialsonde erfasst und darüber hinaus mittels Bruchflächenanalyse verifiziert werden. Für Risslängen von weniger als $250\ \mu\text{m}$ war bei CCT-Proben nur eine fraktographische Untersuchung möglich.

Für eine genauere Untersuchung der Rissgeschwindigkeit der kurzen Risse wurden SEN-Proben auf der Versuchsanordnung ERIKA (siehe Kap 3.4.1 und 3.4.2) verwendet. Hier konnten auch bei geringen Risslängen Überlastlinien auf der Bruchfläche den Änderungen der Potenzialspannung zugeordnet werden.

Bereits im Zuge vorangegangener Ermüdungsexperimente konnten mit SEN-Proben Potenzialänderungen gemessen werden, welche in der Berechnung Risslängen von weniger als $100\ \mu\text{m}$ ergaben. Daher wurden gesonderte Proben getestet, die nicht bis zum Versagen ermüdet wurden. Die Versuche wurden auf 20 – 30 Überlasten begrenzt, wodurch Risslängen von max. $1000\ \mu\text{m}$ erzeugt wurden.

Anschließend wurden die Probenhälften getrennt. Zur optischen Verifikation der Potenzialsondenmessung erfolgte eine Untersuchung der Bruchflächen mittels REM.

Abbildung 4-20 zeigt beispielhaft die Bruchfläche einer Probe, welche bei $R=-1$ mit einer Grundlastamplitude von $70\ \text{MPa}$ und insgesamt 30 Überlasten im Abstand von 10.000 Schwingspielen belastet wurde. Auf der Bruchfläche sind mehrere Anrisse gut nachweisbar. Sie starten aus der $1000\ \mu\text{m}$ tiefen, U-förmigen Kerbe der SEN-Probe. In der Teilaufnahme ist am rechten Kerbrand einer der beiden Eckanrisse zu erkennen, dessen Wachstum sich viertelkreisförmig durch Überlastlinien abzeichnet. Die Linien konnten den entsprechenden Schwingspielzahlen zugeordnet werden. Damit war es möglich, das Risswachstum in x- und z-Richtung zu bestimmen.

Nach 10 Überlasten ($\cong 100.000$ Schwingspielen) entstand ein kleiner halb elliptischer Oberflächenriss, der sich nach wenigen weiteren Überlasten mit dem gewachsenen Eckanriss vereinigte. Gleichzeitig bildeten sich in der Probenmitte weitere halb elliptische Anrisse, welche sich in der angegebenen Richtung ausbreiteten und nach einigen Überlasten mit den Eckanrissen zu einem gemeinsamen, durchgängigen Riss zusammenwuchsen. Die rot markierte Linie mit dem maximalen Abstand zur Kerbe wurde durch die 30. Überlast, d.h. bei 300.000 Schwingspielen erzeugt. Die erkennbare wabenförmige Gewaltbruchstruktur entstand durch Trennung der Probe nach Versuchsende.

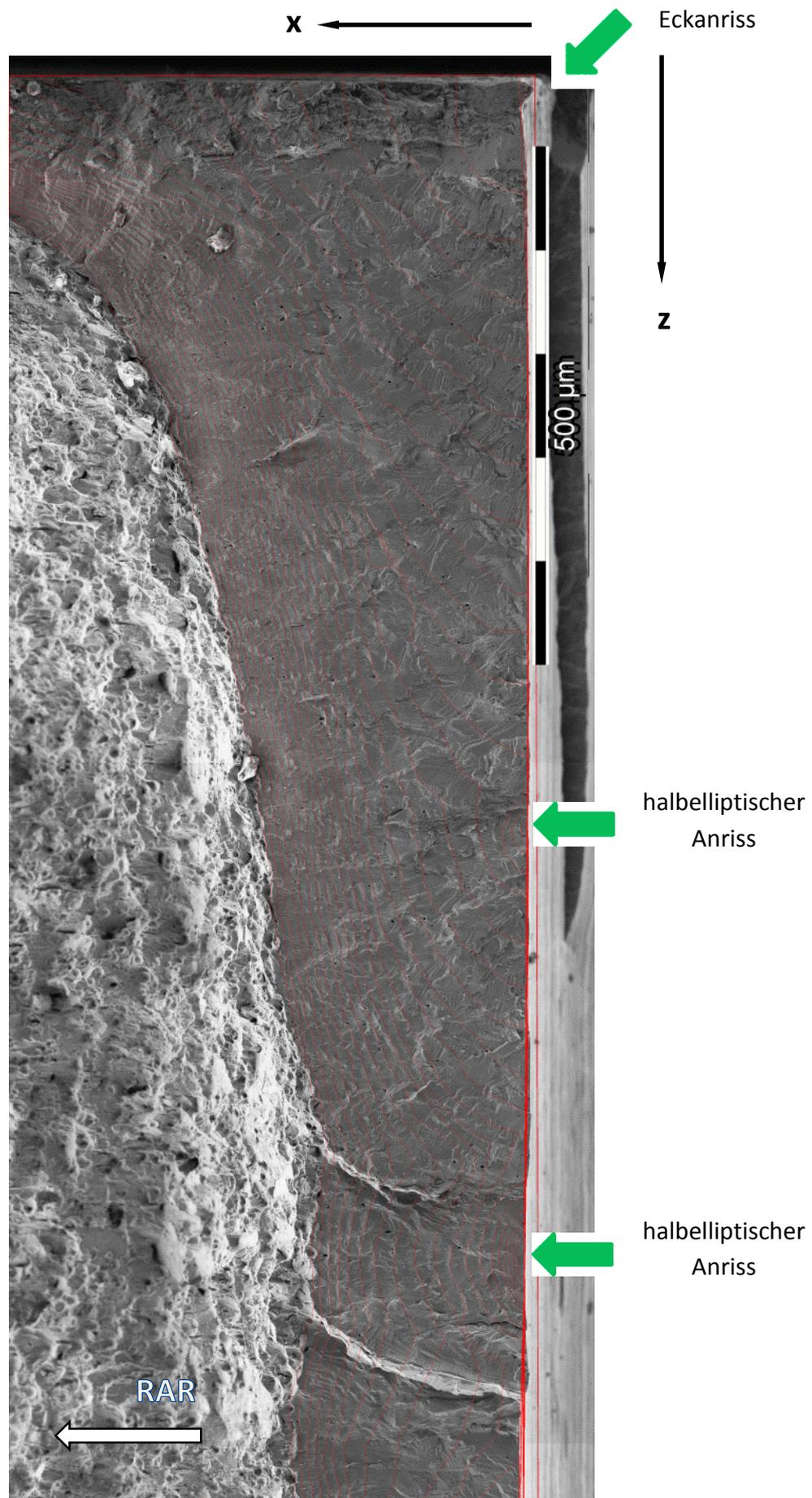


Abbildung 4-20: (Teil)Bruchfläche einer Anrissprobe (II.55)

Die beschriebene Rissbildung sowie das anschließend zweidimensionale Wachstum war bei allen wechselbeanspruchten Anrissproben zu beobachten und sehr gut nachvollziehbar. Senkrecht zur gefrästen Kerbe bildeten sich zuerst Eckanrisse an den Rändern und danach einige halbelliptische Anrisse im Kerbgrund in der Probenmitte.

In einigen Fällen konnten wie im abgebildeten Beispiel die Markierungen aller eingebrachten Überlasten identifiziert werden. D.h. erste auf der Bruchfläche nachweisbare Risse entstanden zum Teil vor dem Auftreten der ersten Überlast und somit innerhalb von weniger als 10.000 Schwingspielen. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Bruchspielzahl von ca. 3.000.000 Schwingspielen (vgl. Abbildung 4-4) erfolgte die Anrissbildung somit schon nach wenigen Prozent der Gesamtlebensdauer.

Das bisher mit dem Erreichen einer Risslänge von 250 μm definierte „Ende der Anrissphase“ (auch Anrisslebensdauer) ist somit neu festzulegen.

Weiterhin konnte durch den deutlichen Abstand zwischen zwei benachbarten Überlastlinien nachgewiesen werden, dass die Rissausbreitung bereits im frühen Stadium nicht nur durch die Überlasten, sondern im Wesentlichen durch die Lastwechsel der Grundlast hervorgerufen wurde.

In Abbildung 4-21 ist die Bruchfläche einer Probe dargestellt, die in der Grundlast mit einer Spannungsamplitude von 90 MPa und einem Überlastintervall von 10.000 Schwingspielen ermüdet wurde. Nach 20 Überlasten (und somit 200.000 Schwingspielen) wurde der Versuch beendet, was bei diesem Lastkollektiv ca. einem Drittel der durchschnittlichen Lebensdauer entspricht (vgl. Abbildung 4-4). Alle 20 durch Überlastwirkung erzeugten Linien sind fraktographisch nachweisbar. In diesem Fall erfolgte eine Anrissbildung innerhalb der ersten 10.000 Schwingspiele und bei ca. 1,6 % der Gesamtlebensdauer.

Um die Entwicklung kurzer Risse im Kerbgrund analysieren zu können, wurden alle Überlastlinien mittels Bildverarbeitung mit dem Programm *analySiS pro* rot markiert. In die Aufnahme wurden vier grün dargestellte Risspfade eingezeichnet, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

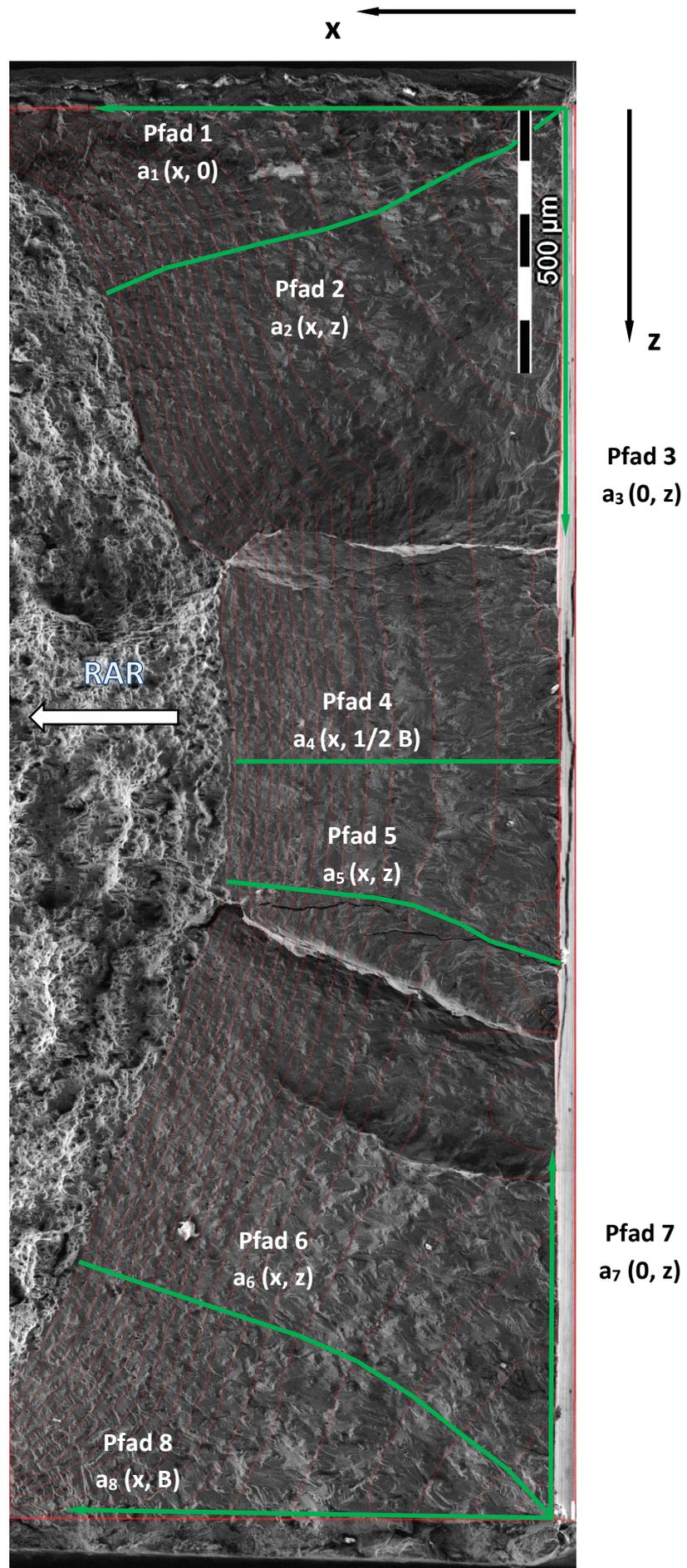


Abbildung 4-21: Bruchfläche einer SEN-Probe (II.9) mit markierten Überlastlinien (rot) und Risspfaden (grün)

An beiden Seiten der Kerbe sind Eckanrisse zu erkennen, die sich zunächst viertelkreisförmig ausgebreitet haben. Nach 5-6 Überlastintervallen erfolgte die Vereinigung mit den zwischenzeitlich entstandenen halbelliptischen Anrissen und damit die Bildung einer durchgängigen Rissfront über die gesamte Probenbreite. In Rissausbreitungsrichtung weisen immer enger zusammenliegende Linien auf eine Verlangsamung der Rissausbreitung hin.

Die Untersuchung der zweidimensionalen Rissausbreitung erfordert eine exakte Definition der betrachteten Risslänge und der sich daraus ergebenden Rissgeschwindigkeit.

Optische Vermessung von Risslängen an Probenoberflächen stellt die klassische Variante dar (hier: *Pfad 1* und *Pfad 8*). Sie ist auch in situ möglich, gibt jedoch keinen genauen Aufschluss über die Geometrie der Rissfront. Die Risslängen an Probenoberflächen werden im Weiteren als *optische* Risslängen bezeichnet und sind durch *Pfad 1* und *Pfad 3* sowie *Pfad 7* und *Pfad 8* veranschaulicht. In Abbildung 4-22 ist das Risswachstum entlang dieser Pfade dargestellt.

Der linke Eckanriss war schon ab der ersten Überlast nachweisbar, der rechte Eckanriss erst ab der dritten. Das Wachstum entlang des Kerbgrundes (*Pfad 3* und *Pfad 7*) erfolgte zunächst schneller als in die Tiefe der Probe. Die Risse wuchsen nun mit weiteren halbelliptischen Oberflächenrissen zusammen und lassen sich nur noch als langer Riss (*Pfad 1* und *Pfad 8*) erfassen, wie Abbildung 4-22 zeigt.

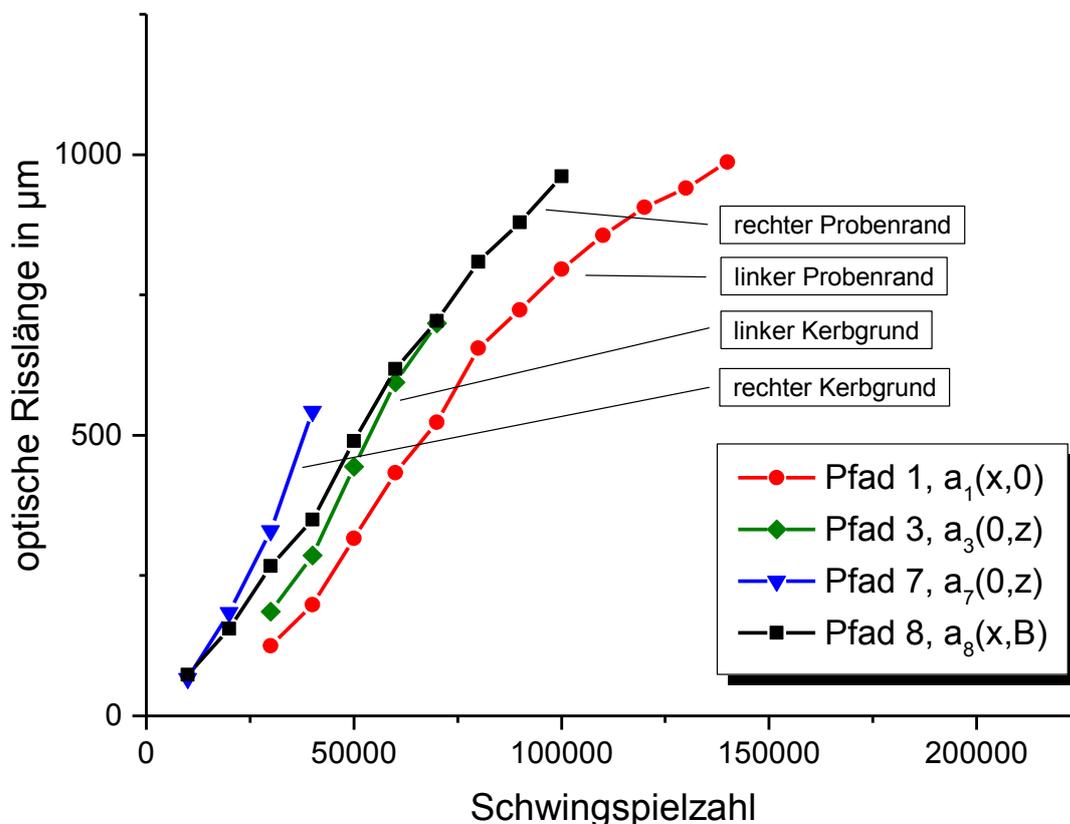


Abbildung 4-22 optische Risslängen SEN-Anrissprobe ($R = -1$; $I = 10.000$)

Die zweidimensionale Ausbreitung der kurzen Risse kann grundsätzlich mittels eines Risspfades vektoriell definiert werden. Der entsprechende Vektor steht hierbei senkrecht auf

der Rissausbreitungsfront. Die *vektoriellen* Risslängen an den Rändern der Rissfront liegen an der Probenoberfläche und entsprechen daher den *optischen* Risslängen. Bei einer Betrachtung der Vektoren in der Mitte der jeweiligen Rissfront lassen sich die in Abbildung 4-21 dargestellten Pfade 2, 4, 5 und 6 erzeugen. Entsprechend der Rissentwicklung und dem rechten Winkel zwischen Überlastlinie und Ausbreitungsvektor weisen die Pfade 2, 5 und 6 in Abbildung 4-21 Krümmungen auf.

Das Risswachstum entlang der gewählten Pfade wird in Abbildung 4-23 gezeigt. Auch hier ist die frühe Entstehung des linken Eckanrisses (Pfad 6), gefolgt vom rechten Eckanriss (Pfad 2), klar erkennbar. Pfad 5 startete aus einem halb elliptischen Anriss heraus, während das Risswachstum entlang von Pfad 4 (auf Probenmitte) ohne einen zuvor erkennbaren Anriss begann. Auf den Pfaden 2, 5 und 6 waren anfänglich ähnliche Rissgeschwindigkeiten zu beobachten, auf Pfad 4 erfolgte zu Beginn ein „Nacheilen“ der aus verschiedenen Anrissen entstandenen Überlastlinien. Ab der 10. Überlast entwickelte sich das Risswachstum entlang aller Pfade mit einer Geschwindigkeit von $3 \cdot 10^{-9}$ m/Ssp.

Während die *optischen* Risslängen bereits nach 100.000 Schwingspielen 1.000 μm betragen (vgl. Abbildung 4-22), wurde dieser Wert entlang der Pfade 2 und 6 erst nach der doppelten Anzahl an Lastwechseln erreicht. Bei weiterer Ausbreitung konnte daher *optisch* der Eindruck entstehen, dass der Riss stark bremst bzw. kurzzeitig stoppt, während mit einer *vektoriellen* Betrachtung durchaus ein Wachstum nachweisbar war.

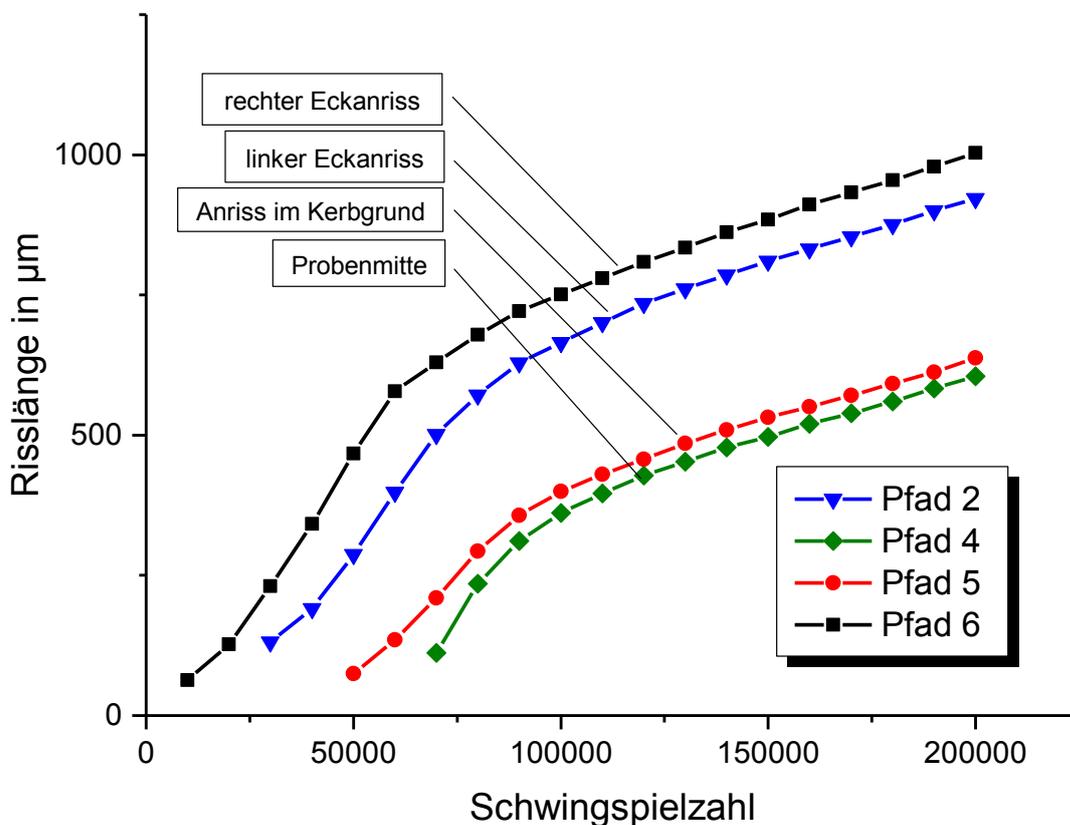
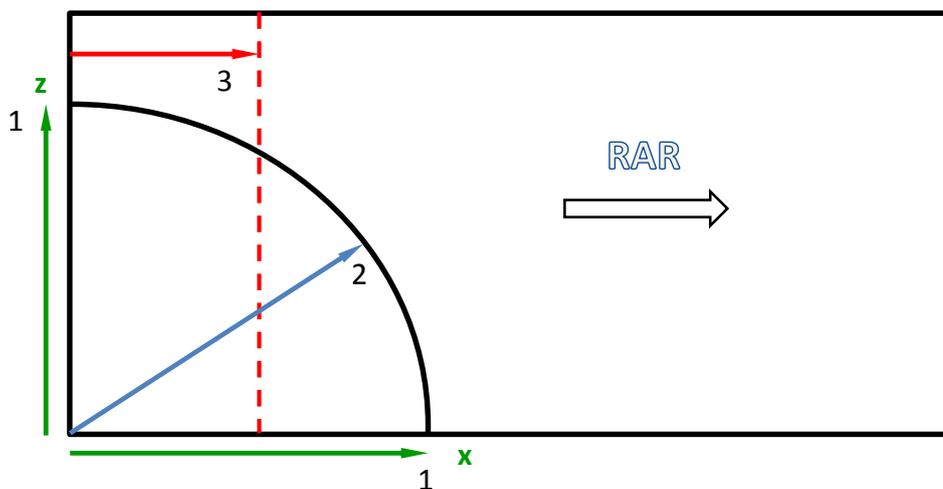


Abbildung 4-23: vektorielle Risslängen

Für die Bestimmung der gemittelten Risslänge wurde eine Gesamtfläche aus den bis zur Rissfront der jeweiligen Überlast entstandenen Teilflächen errechnet. Wird diese Fläche ΔA_{Riss} durch die Probenbreite B geteilt, ergibt sich daraus eine *äquivalente* Risslänge $\Delta a_{\text{äqui}}$. Diese entspricht der eindimensionalen Länge eines flächengleichen Risses mit durchgängiger, kerbparalleler Rissfront.

$$\Delta a_{\text{äqui}} = \frac{\Delta A_{\text{Riss}}}{B}$$

Abbildung 4-24 zeigt schematisch den Vergleich zwischen *optischer*, *vektorieller* und *äquivalenter* Risslänge.



- 1 optische Risslängen (grün)
- 2 vektorielle Risslänge (blau)
- 3 äquivalente Risslänge (rot)

Abbildung 4-24: Betrachtung von Risslängen (schematisch)

Die integrale Ermittlung der *äquivalenten* Risslänge ähnelt dem Verfahren mittels Potenzialsonde, da unabhängig von Anzahl und Geometrie der zweidimensionalen Risse ebenfalls in eine eindimensionale Beschreibung der Ausbreitung umgerechnet wird.

In Abbildung 4-25 sind sowohl die mittels Gleichstrompotenzialsonde (GSPS) als auch die fraktographisch bestimmte *äquivalente* Risslänge der Probe aus Abbildung 4-21 dargestellt. Die Auftragung veranschaulicht, dass sich die Werte ab der 6. Überlast annäherten und ab der 8. Überlast in guter Übereinstimmung verliefen. Für die beschriebene Beispielprobe stimmt dieser Übergang mit der Entstehung einer zusammenhängenden Rissfront bei einer *äquivalenten* Risslänge von etwa 250 μm überein.

Auch bei geringeren Risslängen erfolgte eine Potenzialänderung, die jedoch Abweichungen von den fraktographisch ermittelten Werten zeigt.

Die Abweichungen unterhalb einer äquivalenten Risslänge von 200 μm wurden auf allen drei untersuchten Lastniveaus beobachtet. Sie zeigen die Grenzen des Messverfahrens bzw. der verwendeten rechnerischen Risslängenbestimmung auf.

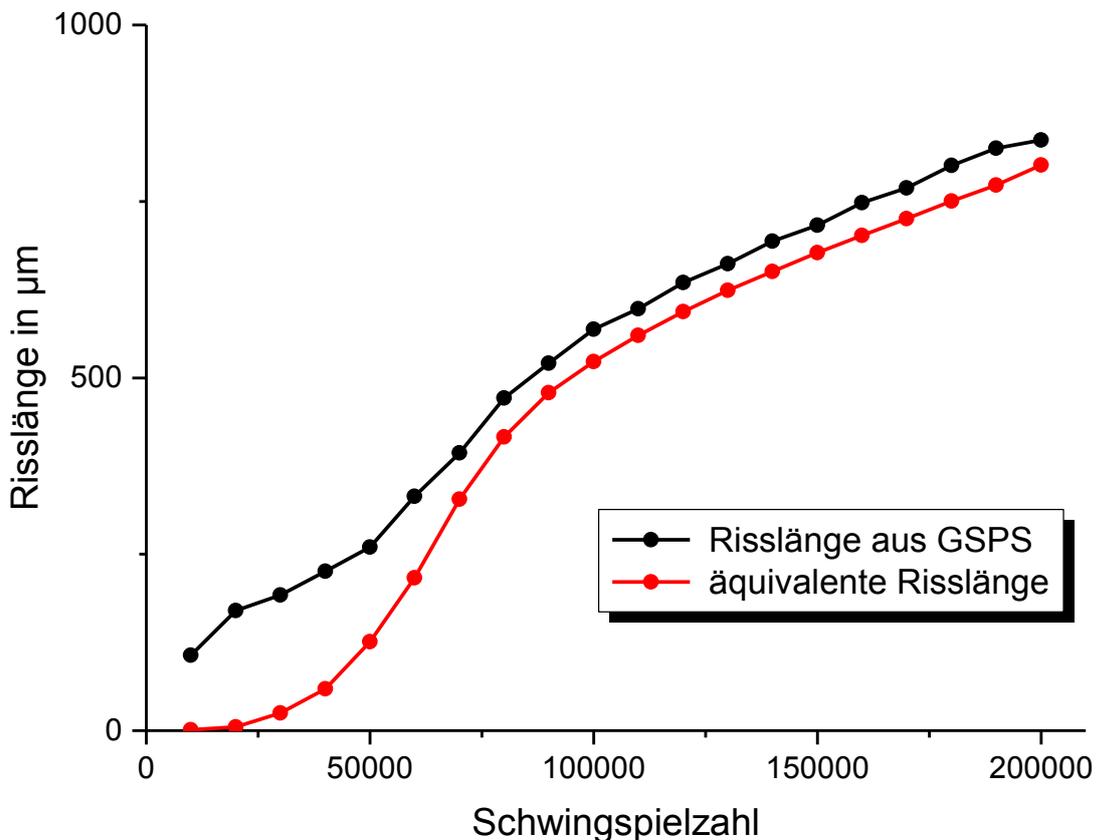


Abbildung 4-25: Vergleich von fraktographisch und mittels Potenzialsonde bestimmten Risslängen

Trotz der qualitativen Abweichungen konnten erkennbare Änderungen des Potentials schon im Rissbildungsbereich aufgebrachten Überlasten zugeordnet werden. Die verwendete Potenzialsonde verfügt somit über eine Detektionsgrenze, mit der auch Anrisse / kurze Risse bei *äquivalenten* Risslängen unterhalb 200 µm erfasst werden können.

Die vorgestellten drei verschiedenen Risslängen gem. Abbildung 4-24 ergeben somit auch drei unterschiedliche Rissfortschrittsraten. Die *optischen* und *vektoriellen* Rissgeschwindigkeiten sowie die *äquivalente* Rissfortschrittsrate sind in Abbildung 4-26 über der Schwingspielzahl aufgetragen.

Das Diagramm zeigt, dass die *optische* Geschwindigkeit anfangs die höchsten Werte $\frac{da}{dN}$ annahm, da die Ränder der Eckanrisse an den Probenoberflächen zunächst der übrigen Rissfront vorauseilten.

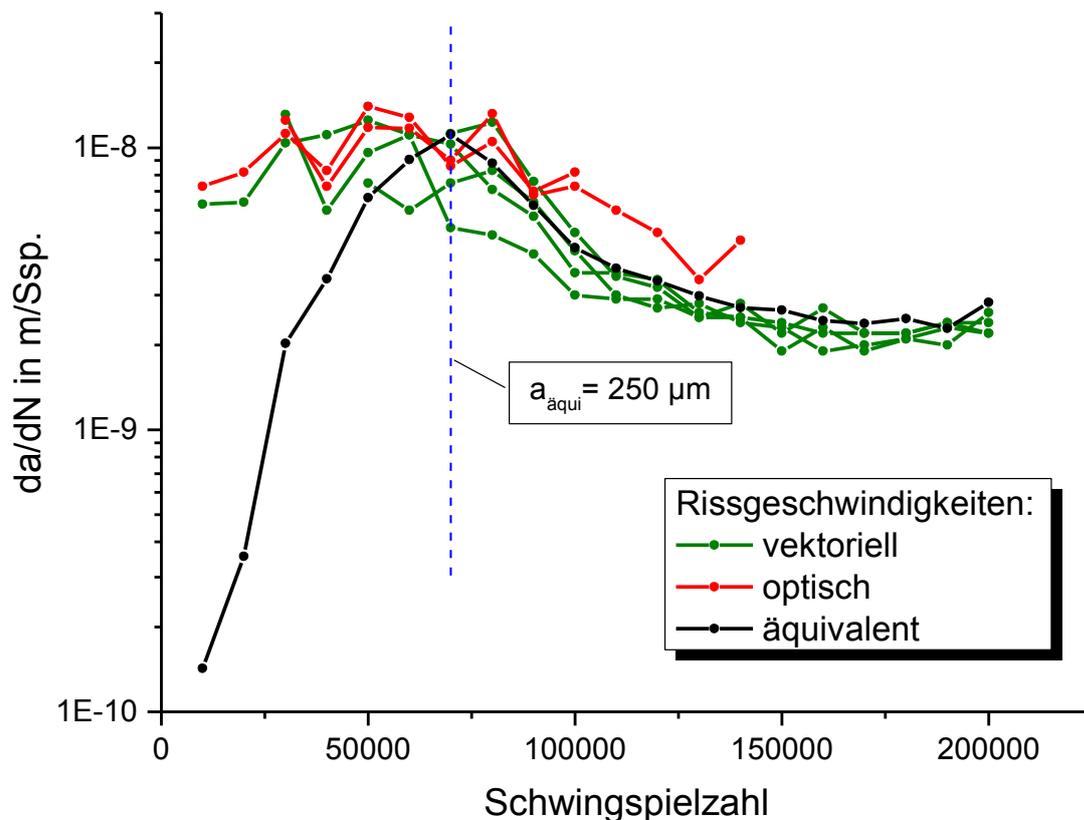


Abbildung 4-26: Rissgeschwindigkeiten Anrissprobe R= -1

Die deutliche Abweichung der *äquivalenten* Rissfortschrittsrate von den optischen bzw. vektoriellen Messwerten bis zu einer Lebensdauer von ca. 50.000 Schwingspielen wurde durch die zunächst zweidimensionale Rissausbreitung verursacht.

Da die Rissflächen zur Ermittlung der äquivalenten Risslänge mit der Probenbreite ins Verhältnis gesetzt werden, entsteht für kurze, nicht durchgehende Risse ein entsprechend geringer *äquivalenter* Längenzuwachs.

Gegenüber der *optischen* und *vektoriellen* Rissgeschwindigkeit waren daher bis zur Bildung eines durchgehenden Risses deutlich geringere *äquivalente* Rissfortschrittsraten zu verzeichnen.

$$\frac{da_{\text{äqui}}}{dN} = \frac{dA_{\text{Riss}}}{dN \cdot B}$$

Die von der Geometrie der Probe (Probenbreite) abhängige *äquivalente* Risslänge wurde zudem auch von der Anzahl der Anrisse beeinflusst.

Nach 10 Überlastintervallen ($\cong 100.000$ Schwingspielen) hatte sich eine durchgängige Rissfront gebildet, so dass beim weiteren, eindimensional beschreibbaren Rissfortschritt *optische*, *vektorielle* und *äquivalente* Rissfortschrittsrate einander entsprachen.

Ab diesem Zeitpunkt lieferte auch die verwendete Potenzialsonde übereinstimmende Daten für eine Bestimmung von Risslänge und –geschwindigkeit (vgl. Abbildung 4-25).

Alle in Abbildung 4-26 betrachteten Rissgeschwindigkeiten nahmen mit wachsender Risslänge ab. Da die Nennspannung konstant blieb, weist es auf eine sinkende effektive Spannungsintensität und einen abnehmenden Kerbeinflusses hin. Wie bei den langen Rissen gezeigt (vgl. Abbildung 4-18), stiegen die Rissgeschwindigkeiten anschließend wieder an.

Bei CCT-Proben konnten nach Ermüdungsversuchen auf hohem Grundlastniveau ($R=0$) vereinzelt ebenfalls Überlastlinien identifiziert werden. Die detaillierte Untersuchung des Kurzrisswachstums erfolgte wiederum in der Versuchsanlage ERIKA.

Auf den Bruchflächen ermüdeter SEN-Proben waren die entsprechenden Überlastlinien nach Zugschwellbeanspruchung mittels Fotomakroskop (20-fache Vergrößerung) nur zu finden, wenn die *äquivalente* Risslänge bereits mehr als 700 μm betrug.

Daher wurden auch in diesem Fall Bruchflächen von Proben nach einer Ermüdung mit maximal 30 Überlastintervallen im REM analysiert.

Die in Abbildung 4-27 dargestellte Teilbruchfläche wies nach einer Belastung mit einer Grundlastspannungsamplitude von 90 MPa und insgesamt 25 Überlasten mit einem Intervall von 1.000 Schwingspielen im REM erkennbare Ermüdungsbruchanteile auf. Somit hatte nach etwa 1/5 der Gesamtlebensdauer (vergleichbar belasteter Proben) eine Anrissbildung stattgefunden. Die Rissausbreitung bei $R=0$ war deutlich geringer als bei mit $R=-1$ belasteten Proben.

Eine Auswertung der Überlastlinien war aufgrund der starken Strukturierung der ermüdeten Fläche und vergleichsweise sehr geringer Abmessungen nur unzureichend möglich.

Die in der Abbildung sichtbare Gewaltbruchfläche sowie die Anrisse in der Kerbe entstanden bei der Trennung der Probe für die fraktographische Untersuchung.

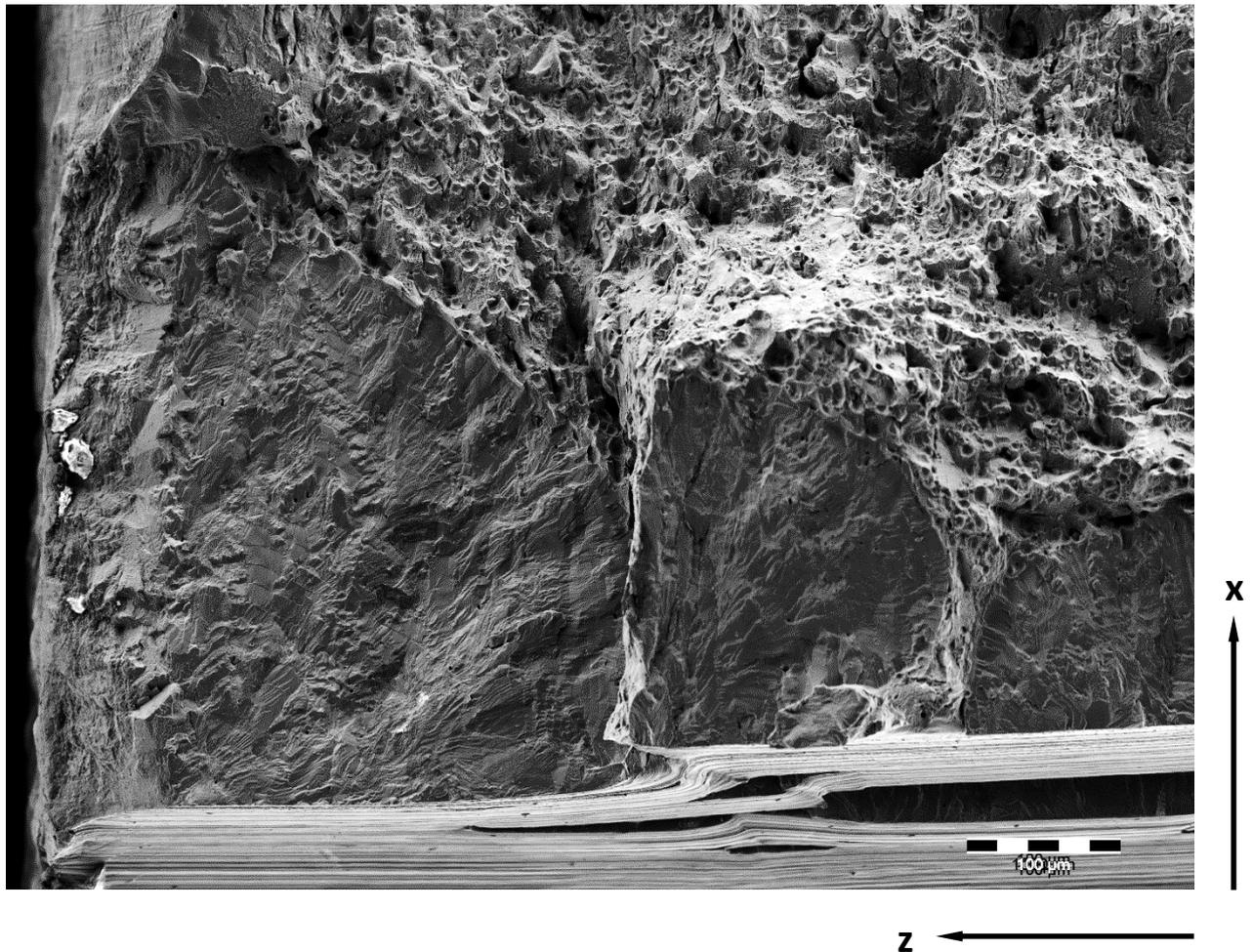


Abbildung 4-27: Eckanriss SEN-Probe nach 25 Überlasten (R= 0)

Unabhängig vom tatsächlichen, sehr geringen Rissfortschritt waren bei den Versuchen zur Untersuchung des Anrissverhaltens mit $R=0$ deutliche Ausschläge im Potenzialsignal zu beobachten. Fraktographisch konnte diesen Signalschwankungen allerdings keine Rissentwicklung zugeordnet werden.

Die gemessenen Potenzialveränderungen betragen zwischen $-50 \mu\text{V}$ und $+30 \mu\text{V}$. Bei einer Umrechnung über die Johnson-Formel (siehe Kap. 3.4.2) würden diese Schwankungen *äquivalenten* Risslängenänderungen von $-800 \mu\text{m}$ und $+650 \mu\text{m}$ entsprechen.

Für das Risswachstum unter Überlasteinfluss ließ sich somit festhalten:

- Die Ermüdungsrissse waren detektierbar und bildeten sich bereits frühzeitig.
- Überlasten konnten grundsätzlich fraktographisch und über die Potenzialsonde nachgewiesen werden.
- Durchschnittliche Rissgeschwindigkeiten konnten ermittelt werden.
- Die bruchmechanische Berechnung kurzer Risse ist problematisch, da die lokalen Spannungsintensitätswerte aufgrund fehlender Größen derzeit nicht bestimmt werden können (Einfluss Kerbspannungsfeld, Risslängendefinition).

4.4 Wirkung von Überlasten auf die Rissausbreitung

In den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5 wurde dargestellt, dass Überlastlinien auf der Bruchfläche bestimmt und die Abstände zueinander optisch untersucht werden können. Die Überlasten konnten weiterhin mittels Potenzialsonde detektiert, jedoch nur bei langen Rissen quantitativ analysiert werden.

Um die Wirkung periodischer Überlasten detailliert zu analysieren, erfolgte zunächst eine Auswertung des Anteils Risswachstum während der Überlastzyklen. Der gegenüber Rissausbreitung bei einstufigen Versuchen abweichende Rissfortschritt nach Überlasten wurde anschließend dargestellt.

4.4.1 Interaktion von Überlasten

Bei stark erhöhter Spannungsintensität (letzte Überlasten vor Probenversagen) zeichneten sich gewaltbruchähnliche Strukturen innerhalb der zunehmend breiter werdenden Überlastlinien ab. Die Breite ließ sich aus dem Bruchflächenbild ermitteln und ist in Abbildung 4-28 farblich markiert. Diese Risserweiterungszonen wurden für die fraktographische Verifikation von während der Überlastzyklen mittels Potenzialsonde gemessenen Rissverlängerungen verwendet. Der Zuwachs wurde als *äquivalente* Risslänge bestimmt (vgl. Abbildung 4-24)

Im Folgenden wird die Rissverlängerung während eines Überlastzyklus als $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bezeichnet.

Abbildung 4-28 zeigt beispielhaft das Vorgehen zur Zuordnung der Rissflächen zum Verlauf der Rissentwicklung aus der Potenzialsondenmessung.

Ein Ausschnitt der mittels Potenzialsonde ermittelten Risslänge ist über der Schwingungszahl graphisch dargestellt. Die Aufnahme einer Bruchfläche der zugehörigen SEN-Probe ergänzt die Abbildung.

Die Probe wurde bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ mit einer Grundlastamplitude von 70 MPa belastet. Das Überlastintervall ($\alpha = 3$) betrug 10.000 Schwingspiele.

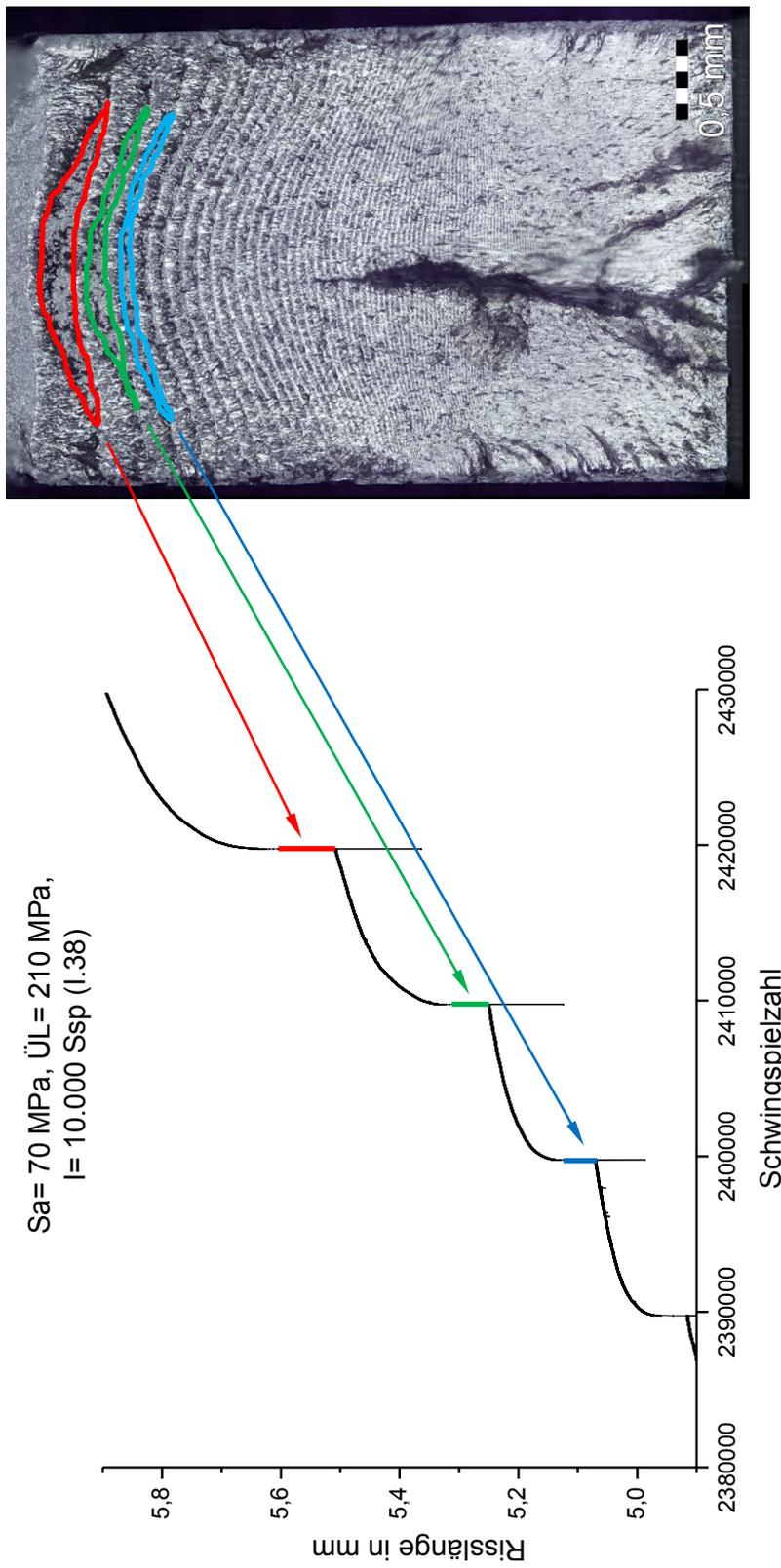


Abbildung 4-28: Abgleich $\Delta a_{\dot{U}_L}$ zwischen Bruchfläche und ermittelter Risslänge (SEN-Probe)

Quantitative und qualitative Untersuchungen des Risswachstums während Grund- und Überlast konnten kurz vor dem Probenversagen mit höchster Genauigkeit durchgeführt werden. Z.B. erzeugten die letzten drei Überlasten sichelförmige Verformungszonen, welche in Abbildung 4-28 farblich markiert wurden. In der Risslängenkurve (erzeugt mittels Potenzialsonde) zeigen sich alle 10.000 Schwingspiele senkrechte Abschnitte, welche durch die Rissverlängerung im Zuge der jeweiligen Überlast entstanden. Die entsprechenden Überlasttrissflächen wurden vermessen und in eine *äquivalente* Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ umgerechnet. Die farbliche Kennzeichnung ordnet die Rissverlängerungen den Bereichen auf der Bruchfläche zu.

Die Risslängenbestimmungen über die Potenzialsonde und mittels Bruchflächenanalyse zeigten eine gute Übereinstimmung.

Deshalb wurde bei kleineren Gesamtrisslängen die Bestimmung der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ mittels Potenzialsondenmessung durchgeführt, auch ohne dass fraktographisch verifizierbare Verformungszonen vorhanden waren.

In Abbildung 4-28 ist weiterhin das Ansteigen der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ mit zunehmender Gesamtrisslänge und somit aufgrund steigender Spannungsintensität zu erkennen. $\Delta a_{\text{ÜL}}$ selbst ist in der Risslängenkurve als ausgeprägte Zunahme der Rissverlängerung während eines einzelnen Schwingspiels erkennbar. Die im Überlastintervall folgenden Schwingspiele der Grundlast erzeugten signifikant geringere Rissverlängerungen Δa .

Am Beispiel der Versuche mit Grundlastamplituden von 100 MPa ist der Einfluss des Überlastintervalls gut darstellbar. Abbildung 4-29 zeigt die Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ für die drei untersuchten Überlastintervalle mit 100, 1.000 und 10.000 Schwingspielen.

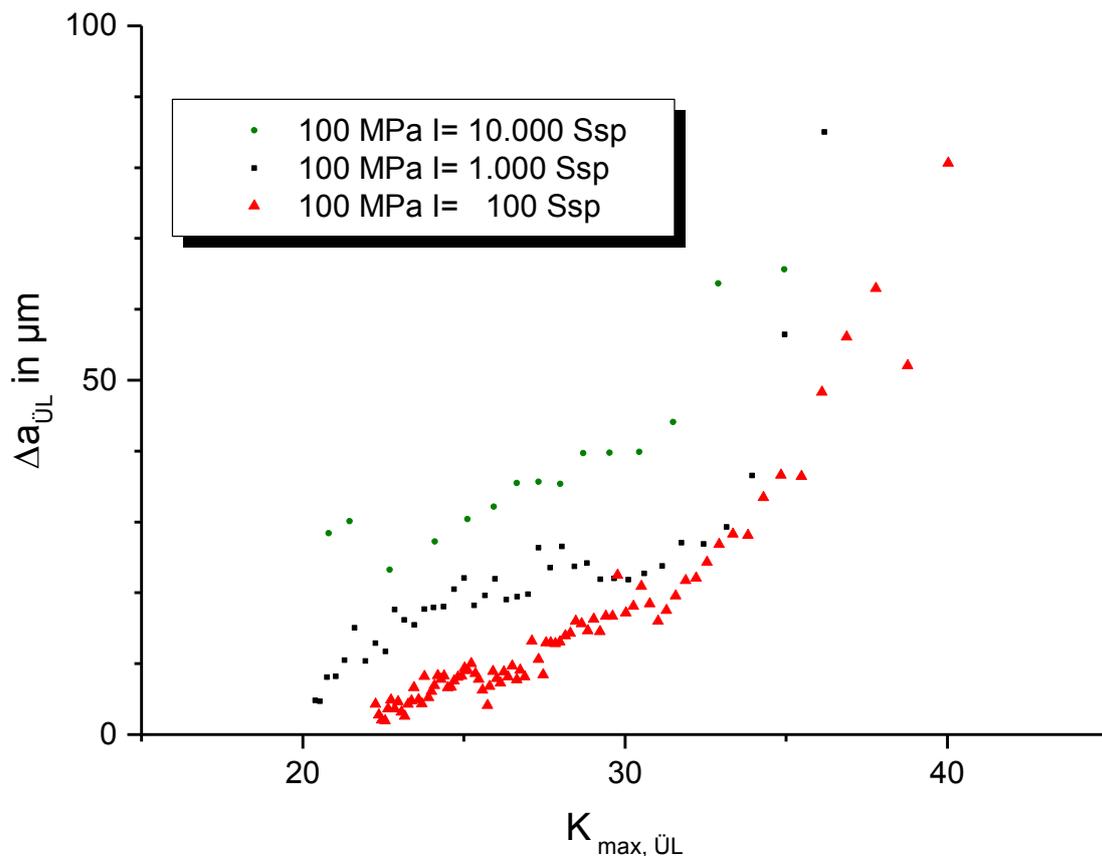


Abbildung 4-29: Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei unterschiedlichen ÜL-Intervallen, $R = -1$

Mit einem Überlastintervall von 10.000 Schwingspielen wurde eine fast doppelt so hohe spontane Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ wie mit einem Überlastintervall von 1.000 Schwingspielen erzeugt. Wurde das Intervall auf 100 Schwingspiele verringert, bewirkten die Überlasten nur etwa 10 bis 20 % der beim Intervall mit 10.000 Schwingspielen gemessenen Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$.

Es zeigte sich eine Interaktion von aufeinanderfolgenden Überlasten, wenn eine bestimmte Anzahl an Grundlastschwingspielen zwischen ihnen unterschritten wurde. Da sich beim Intervall von 10.000 Schwingspielen die Rissausbreitung nach einer Überlast wieder stabilisierte (vgl. Abbildung 4-28), kann auch von einer unbeeinflussten „neuen“ Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei der folgenden Überlast ausgegangen werden. Bei den beiden untersuchten kleineren Intervallen wurde deutlich, dass die vorangegangene Überlast „nachwirkte“ und nicht die volle Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ erreicht wurde.

Versuchsergebnisse, die bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ mit den Überlastintervallen $I = 100$ und 1.000 Schwingspielen ermittelt wurden, sind in Abbildung 4-30 dargestellt.

Auch in dieser Darstellung wird deutlich, dass beim kleineren Intervall wesentlich geringere Rissverlängerungen durch die Überlasten erzeugt wurden. Die alle 1.000 Schwingspiele aufgetragenen Überlasten bewirkten deutlich größere Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ als Überlasten in einem Abstand von 100 Schwingspielen.

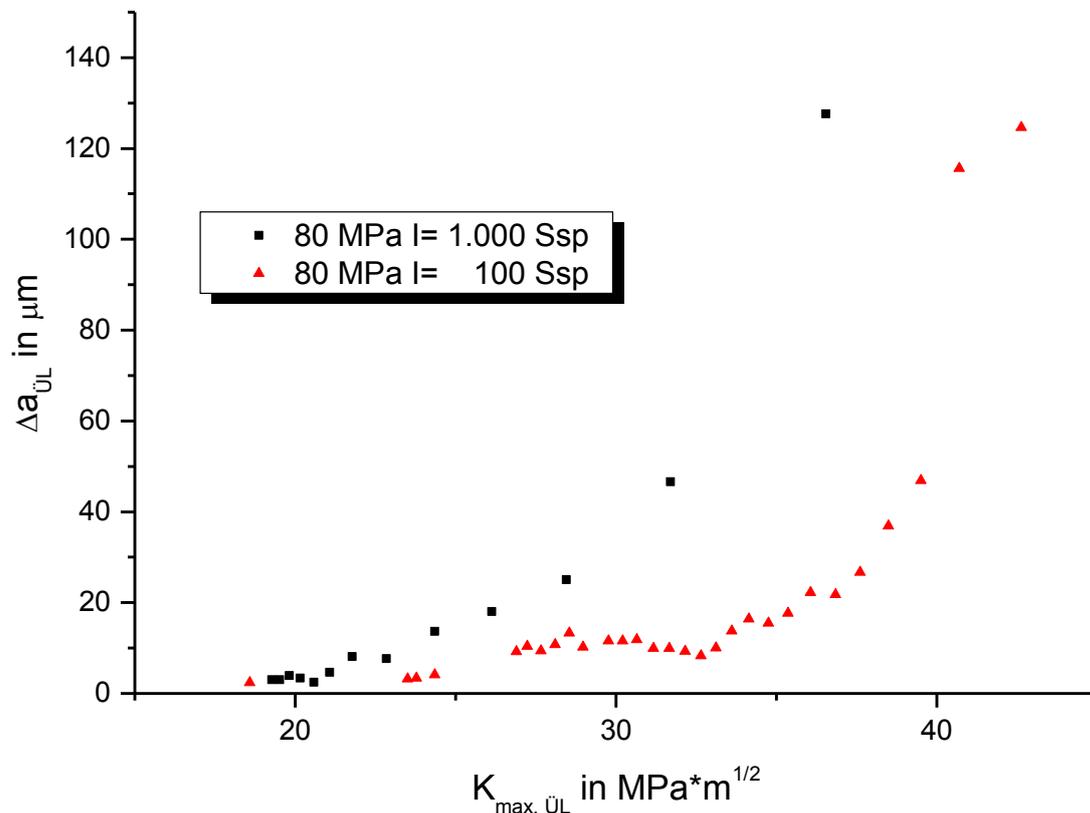


Abbildung 4-30: Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei unterschiedlichen ÜL-Intervallen, $R=0$ (Krischker, 2012)

Die im Intervall mit 10.000 Schwingspielen aufgetretenen Überlasten erzeugten keine nachweisbaren Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ in der Risswachstumskurve und konnten daher nicht in den Vergleich einbezogen werden.

4.4.2 Überlastwirkung auf die Rissausbreitung unter Grundlastbeanspruchung

Trotz der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen, ausgeprägten Rissverlängerungen unter Überlast wurden Lebensdauererlängerungen bei den Ermüdungsversuchen festgestellt (siehe Kap. 4.2). Auch die Rissausbreitungskurven der Überlastversuche (siehe Kap. 4.3.3) zeigen neben spontanen Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ eine gegenüber der einstufigen Belastung veränderte Rissfortschrittsrate. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben (vgl. Abbildung 4-28), erfährt die Rissausbreitung durch die Überlast eine Beschleunigung. Nach der spontanen Rissverlängerung sinkt die Rissgeschwindigkeit wieder.

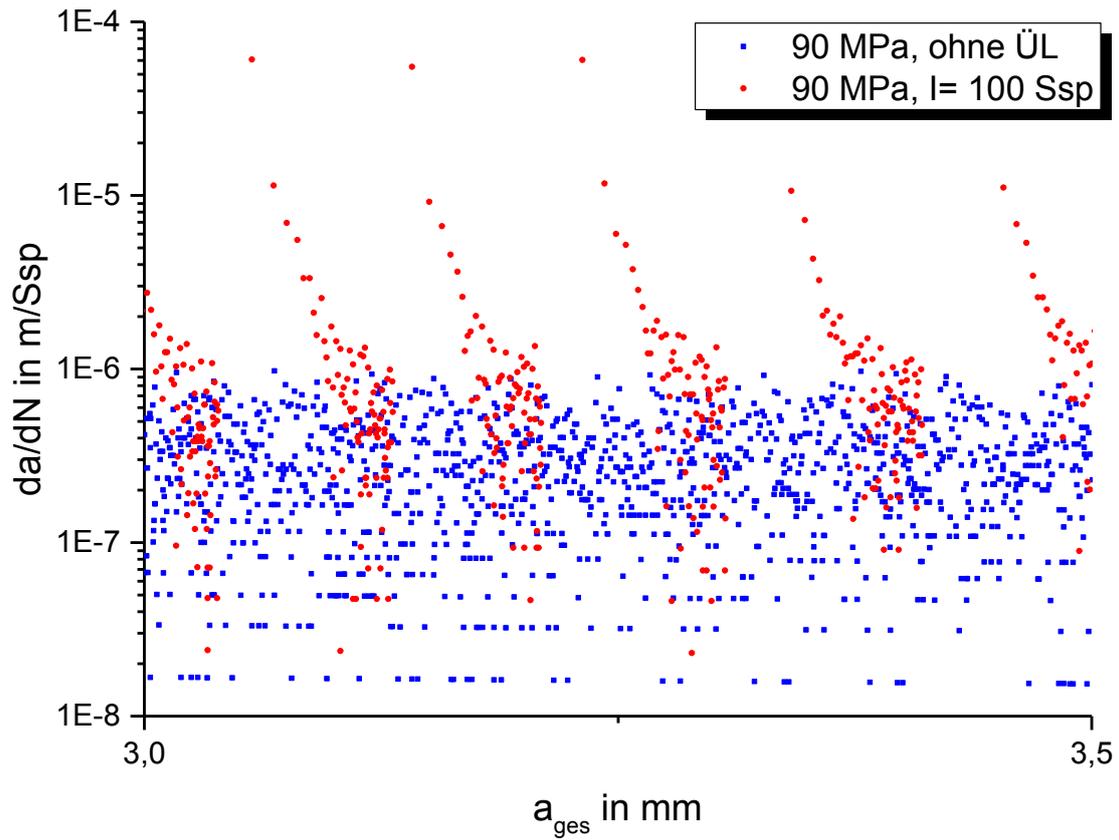


Abbildung 4-31: beeinflusste Rissausbreitung SEN, I= 100, R= -1

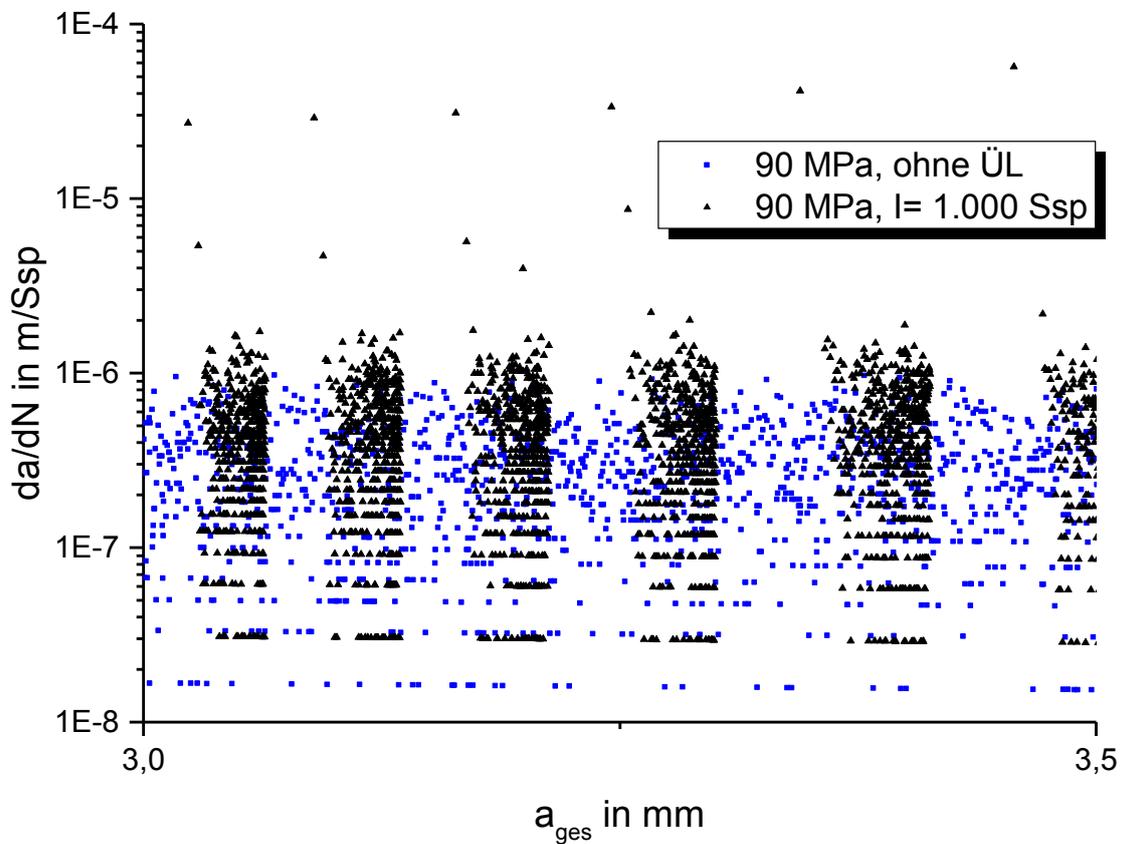


Abbildung 4-32: beeinflusste Rissausbreitung SEN, I= 1.000, R= -1

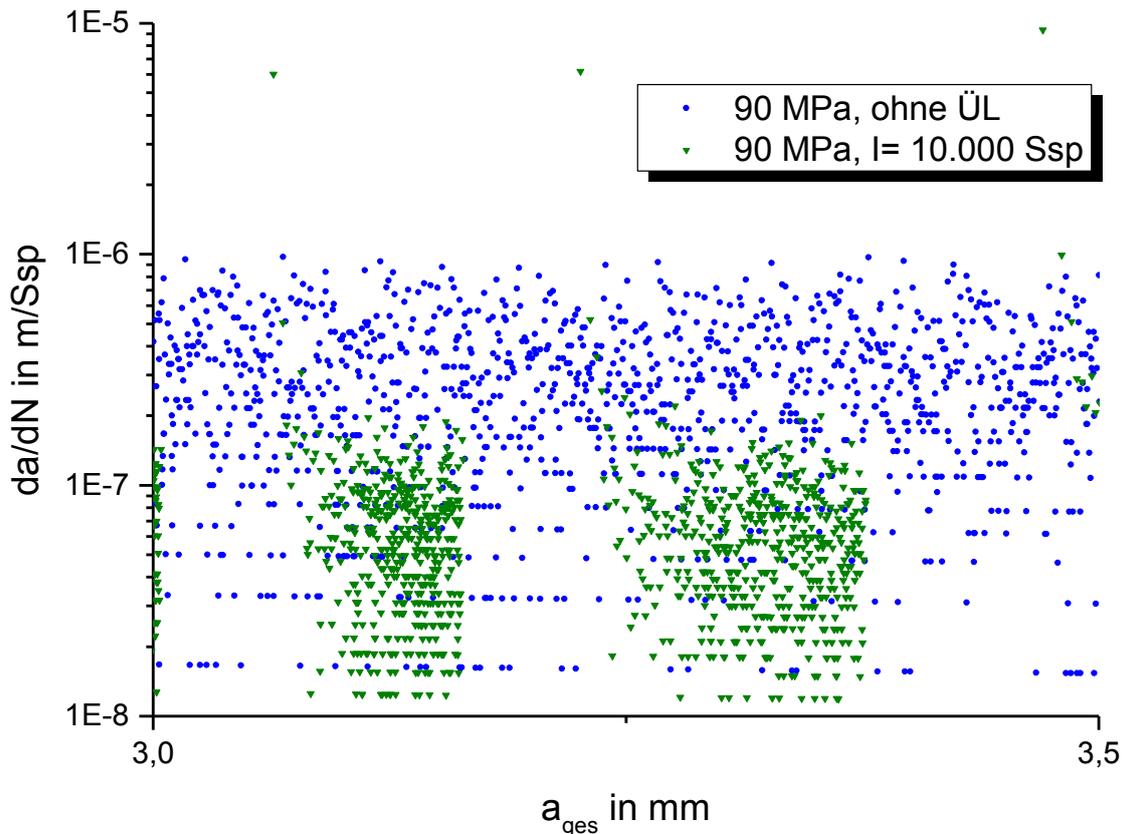


Abbildung 4-33: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I= 10.000$, $R= -1$

Die Abbildungen 4-31, 4-32 und 4-33 zeigen die mittels Potenzialsonde bestimmten Rissgeschwindigkeiten aus Versuchen wechselbeanspruchter SEN-Proben, die mit einer Grundlastamplitude von 90 MPa belastet wurden. Die Rissfortschrittsraten, welche sich infolge der unterschiedlichen Überlastintervalle ergaben, wurden über Gesamtrisslängen von 3 bis 3,5 mm aufgetragen. Zum Vergleich wurde die Rissgeschwindigkeit eines einstufigen Versuches abgebildet. Die höchsten Punkte stellen jeweils die Geschwindigkeiten während der Überlasten dar.

Es ist zu erkennen, dass die Rissfortschrittsrate für $I= 10.000$ Schwingspiele fast ausschließlich unterhalb der im einstufigen Versuch erreichten Rissgeschwindigkeit lag. Während der Überlasten erfolgte eine deutliche Beschleunigung mit einer anschließenden, ausgeprägten Retardation. Auch nach der Stabilisierung der Geschwindigkeit wurde das Niveau des einstufigen Versuches nicht erreicht.

Die detaillierte Betrachtung bestätigt die in Abbildung 4-18 dargestellten durchschnittlichen Rissfortschrittsraten. Die geringe mittlere Rissgeschwindigkeit des Überlastintervalls mit 10.000 Schwingspielen setzt sich aus der ausgeprägten Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und der in diesem Fall dominanten Verzögerungswirkung zusammen. Im Ergebnis zeigt sich für bei

R= -1 ermüdete SEN-Proben eine entsprechende Lebensdauererlängerung (vgl. Abbildung 4-4).

Beim Intervall $I= 100$ Schwingspiele war die Rissgeschwindigkeit höher als beim einstufigen Versuch. Bevor die Verzögerungswirkung vollständig einsetzen konnte, wurde die Geschwindigkeit durch die folgende Überlast wieder angehoben.

Die aus Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und anschließend verzögerter Rissausbreitung resultierende Rissfortschrittsrate führte in Verbindung mit der frühzeitigen Anrissbildung (vgl. Abbildung 4-12) und der geringeren Endrisslänge (vgl. Abbildung 4-8) zu einer Lebensdauerverkürzung (vgl. Abbildung 4-4).

Für Versuche mit R= 0 zeigte sich ebenfalls eine signifikante Beschleunigung der Rissausbreitung durch die Überlasten. Aufgrund des geringeren Überlastfaktors war sie jedoch weniger stark ausgeprägt als bei wechselbeanspruchten Proben.

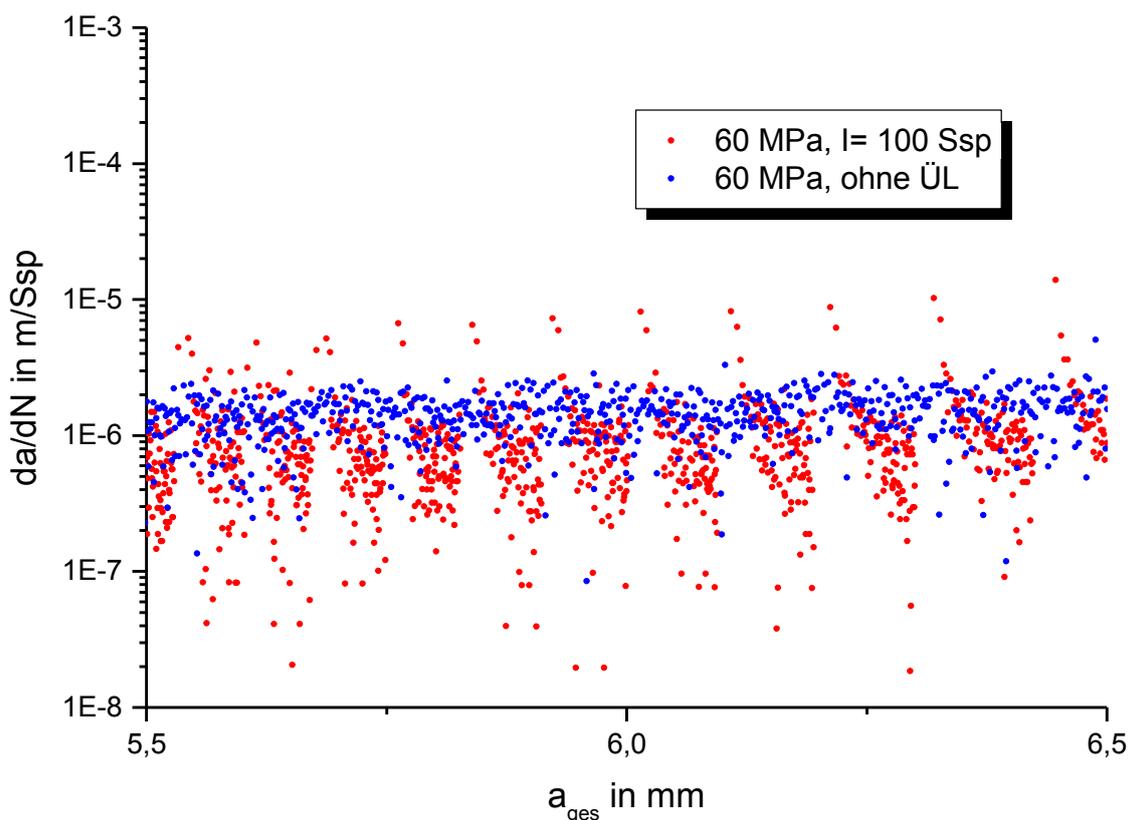


Abbildung 4-34: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I= 100$, $R= 0$

Die nach den Überlasten zunächst noch beschleunigte Rissfortschrittsrate wird bei Grundlastwechseln stark abgebremst und fällt wie in Abbildung 4-34 ersichtlich unter die Rissgeschwindigkeit des einstufigen Versuches.

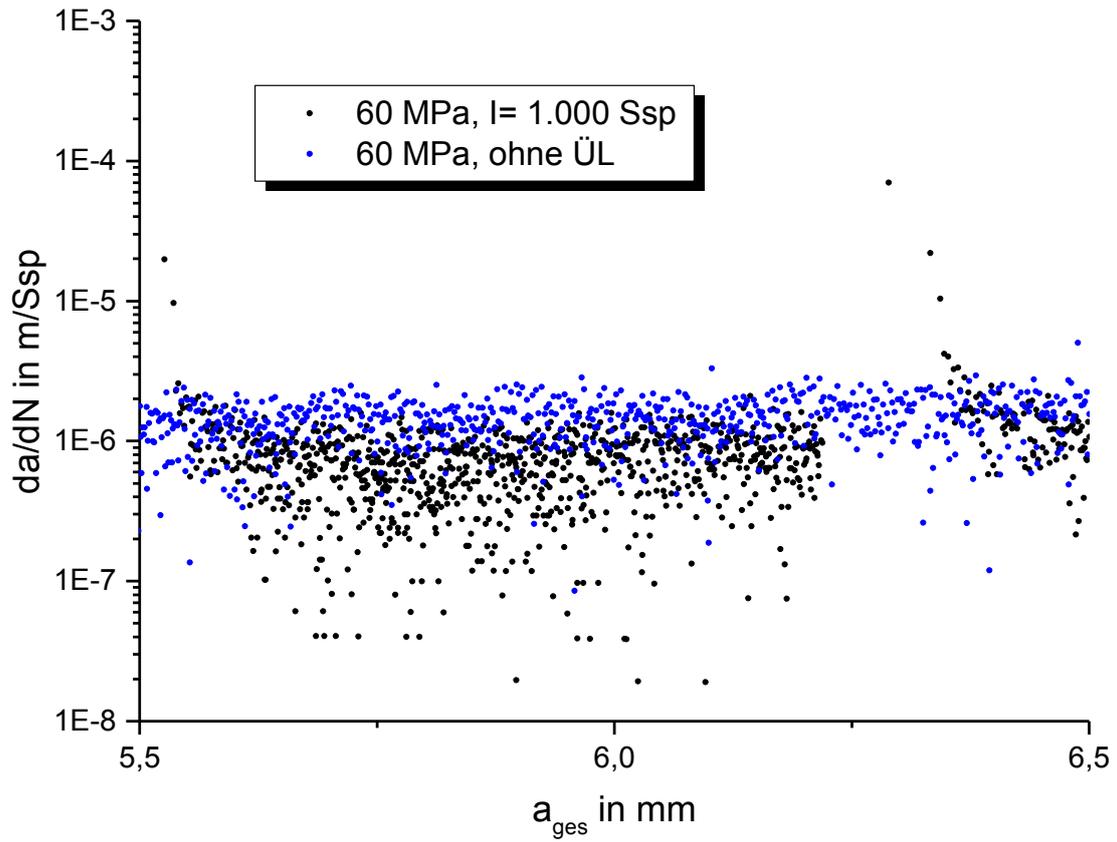


Abbildung 4-35: beeinflusste Rissausbreitung SEN, I= 1.000, R= 0

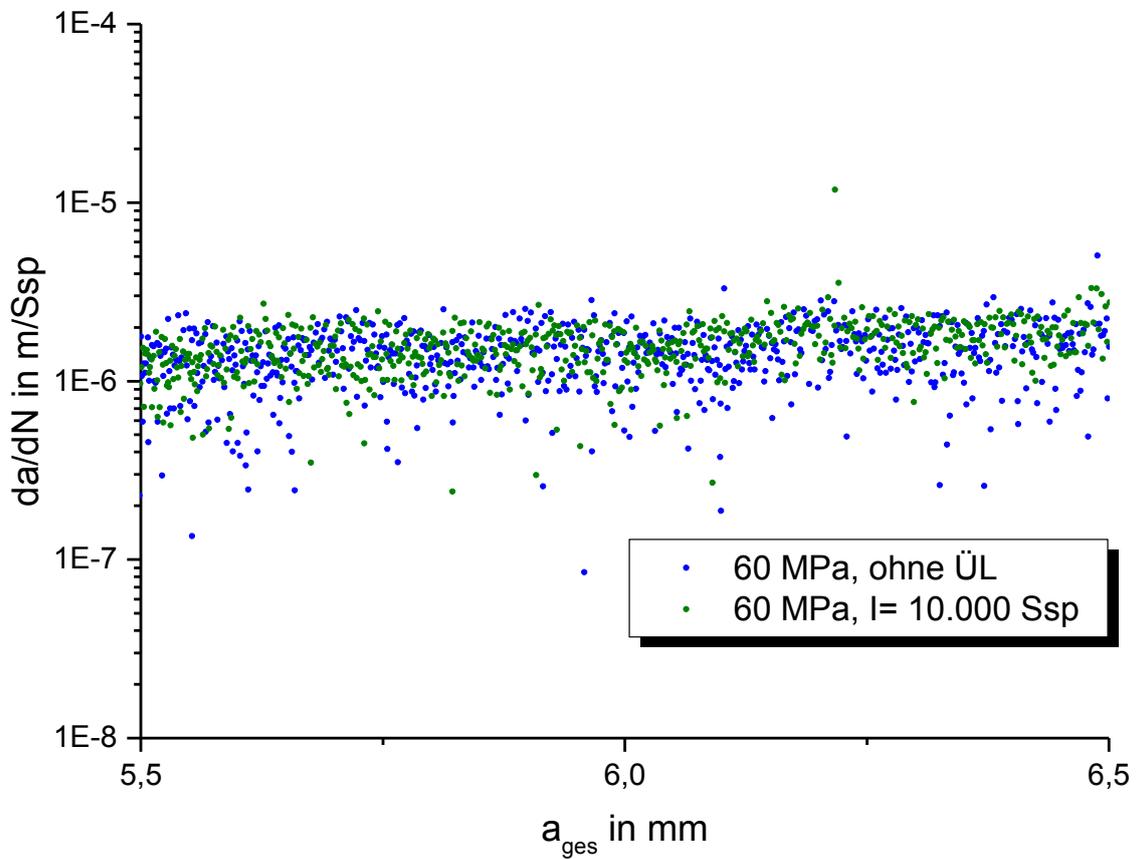


Abbildung 4-36: beeinflusste Rissausbreitung SEN, I= 10.000, R= 0

Die Darstellung der Rissfortschrittsraten bei gleicher Gesamtrisslänge in Abbildung 4-34 und Abbildung 4-35 bestätigt die deutlich größere spontane Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei einem ausgedehnteren Überlastintervall. Durch die alle 1.000 Zyklen aufgebrauchten Überlasten konnte eine ausgeprägte Phase verringerten Risswachstums nachgewiesen werden. Der Riss breitete sich bis zur nächsten Überlast langsamer als bei einstufiger Beanspruchung aus. Folgte die Lasterhöhung periodisch nach weniger Schwingspielen, zeigte sich ebenfalls eine vergleichbare Phase mit stärkerem, aber schrittweise abgebremstem Risswachstum (15-20 Schwingspiele). Die Verzögerungswirkung auf die Rissausbreitung während der Grundlast wurde von der folgenden Überlast unterbrochen.

Bei Zugschwellbeanspruchung war die Rissgeschwindigkeit nur während und wenige Schwingspiele nach einer Überlast erhöht, im Durchschnitt jedoch geringer als im einstufigen Versuch.

In Abbildung 4-36 wird deutlich, dass sich Überlasten mit sehr großem Abstand zueinander kaum auf die mittlere Rissgeschwindigkeit ausgewirkt haben, was sich auch in den vergleichbaren Lebensdauern zeigt (vgl. Abbildung 4-6).

5 Diskussion der Ergebnisse

Um die Ausfallsicherheit von Bauteilen gewährleisten zu können, muss das Verhalten unter Betriebsbeanspruchung bekannt sein.

Die Betrachtung von Lebensdauern beantwortet die Frage, ob das Versagen nach einer definierten Zeit bzw. Anzahl an Lastwechseln zu erwarten ist.

Eine messbare Schädigungsgröße liefert zusätzliche Informationen, wie der Bauteil- bzw. Probenbruch erreicht wird.

Die Lebensdauerabschätzung wird daher umso exakter, je genauer die Beschreibung des Materialverhaltens anhand der Schädigungsgröße erfolgen kann. Zusätzlich wird angestrebt, einen möglichst großen Anteil der Lebensdauer deterministisch zu beschreiben.

Im Folgenden wird daher zunächst die Beeinflussung der Bruchspielzahlen durch periodische Überlasten diskutiert. Anschließend erfolgt eine Betrachtung, wie die Ursachen unterschiedlicher Lebensdauern mit der Schädigungsgröße Risslänge beschrieben werden können. Über ein Rechenprogramm zur Rissausbreitung erfolgt eine rechnerische Lebensdauerabschätzung für zweistufige Ermüdungsversuche. Mit dem experimentell ermittelten Zusammenhang für eine vom Überlastintervall beeinflusste Rissverlängerung Δa_{UL} wird die Berechnung optimiert.

Um den Bereich der abschätzbaren Lebensdauer um einen oftmals dominanten Anteil zu erweitern, schließt die Diskussion mit Überlegungen zur Beschreibung und rechnerischen Behandlung der Ausbreitung kurzer Risse.

5.1 Beeinflusste Lebensdauern

Der augenfälligste Einfluss einer geänderten Belastung besteht in der daraus resultierend abweichenden Lebensdauer einer Probe bzw. eines Bauteils. Die Lebensdauer kann durch zusätzliche, erhöhte Belastung verkürzt oder sogar verlängert werden. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass eine höhere Beanspruchung eine entsprechend höhere Schädigung verursacht und somit lebensdauerverkürzend wirken sollte. Bei den durchgeführten Experimenten zeigte sich ein differenziertes Bild, welches die Ergebnisse früherer Untersuchungen bestätigte [u.a. (Schijve, 1972), (Rödling, 2003), (Broll, 2006), (Heidemann, 2008)].

Im Fall zweistufiger Beanspruchung mit Grund- und Überlast war die bei Probenversagen erreichte Schwingenspielzahl von mehreren Einflüssen abhängig. Sie wich aufgrund von Reihenfolge- und Interaktionseffekten von der generellen Annahme einer Lebensdauerverkürzung bei höherer Belastung ab. Die Ergebnisse lassen sich mit Veröffentlichungen vieler Autoren, welche sich mit Rissausbreitung bei variablen Belastungen auseinandergesetzt haben, in Übereinstimmung bringen. So werden abhängig von der Abfolge und Kombination von Überlasten sowohl Lebensdauerverlängerungen als auch -verkürzungen beschrieben [z.B. (Skorupa, 1998), (Sander, et al., 2006), (Rödling, 2003)].

Darüber hinaus wird die Lebensdauer von der Mittelspannung beeinflusst.

Wie die eigenen Ergebnisse zeigen, können die bei einem Intervall von 10.000 Schwingspielen als isoliert auftretend anzunehmenden Überlasten für $R = -1$ eine maximale Lebensdauerverlängerung bewirken, während für $R = 0$ die Gesamtlebensdauern kaum von einstufigen Versuchen abweichen.

Die Bestätigung der Ergebnisse von u.a. *Schijve* (Schijve, 1972) und *Sander / Richard* (Richard, et al., 2009) zeigt die Notwendigkeit einer nachvollziehbaren Schädigungsgröße, welche alle relevanten Effekte berücksichtigt.

Mit der als Schädigungsgröße verwendeten Risslänge konnte diese Forderung erfüllt werden. Durch zusätzliche Kriterien, wie z.B. das Erreichen einer detektierbaren Risslänge a_{tech} , kann zwischen der Anriss- und Rissfortschrittsphase unterschieden werden.

Wenn Risse wie in dieser Arbeit frühzeitig detektiert werden können, reduziert sich die Anrissphase und der überwiegende Anteil der Lebensdauer ist über den Rissfortschritt beschreibbar.

Bereits beim Vergleich der Wöhlerlinien der untersuchten CCT und SEN-Proben muss die grundsätzliche Annahme, dass ein Risswachstum erst sehr spät einsetzt, in Frage gestellt werden.

Unter der Voraussetzung, dass sich ausbreitungsfähige Risse erst nach 80-90% der Lebensdauer bilden, müsste die Anrissphase dominant sein. Da sie im Wesentlichen von der Kerbwirkung am Entstehungsort der Risse abhängig ist, kann somit in grober Näherung von der Kerbschärfe auf die Lebensdauer geschlossen werden.

Für die CCT-Proben wurde ein elastischer Kerbfaktor $k_{t,CCT}$ von 2,2 und für die SEN-Proben ein Faktor $k_{t,SEN}$ von 3,7 ermittelt. Somit ergibt sich ein Verhältnis von:

$$\frac{k_{t,SEN}}{k_{t,CCT}} = 1,68$$

Abbildung 5-1 zeigt die ermittelten Wöhlerlinien beider Probenformen. Unter der Voraussetzung, dass die Kerbwirkung die Lebensdauer entscheidend beeinflusst, muss dieser Zusammenhang für eine definierte Schwingspielzahl $N = \text{konstant}$ aus der S-N-Kurve ableiten lassen.

Es ergeben sich:

$$\text{für } R = -1: \quad \frac{\sigma_{CCT}}{\sigma_{SEN}} \sim 1,4 \quad \text{und}$$

$$\text{für } R = 0: \quad \frac{\sigma_{CCT}}{\sigma_{SEN}} \sim 1,2 .$$

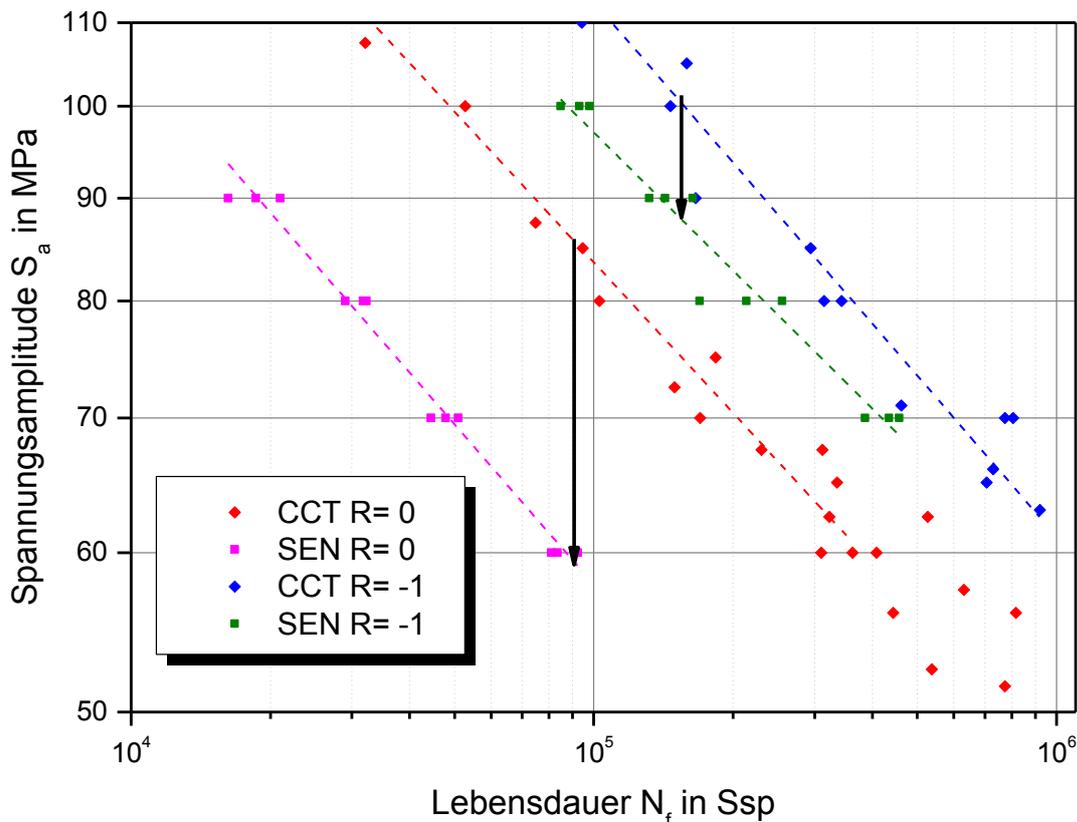


Abbildung 5-1: Vergleich Wöhlerlinien CCT- und SEN-Proben

Unter Zugschwellbelastung ($R=0$) wirkt sich der höhere Kerbfaktor der SEN-Proben deutlich stärker aus als unter Wechselbeanspruchung ($R=-1$). Wie die Betrachtung der Rissentwicklung zeigte, dominierte bei Überlastexperimenten mit $R=0$ die Anrisslebensdauer. Bei den hier vorliegenden 10 bis 20 % Rissfortschritt (ähnlich einstufigen Versuchen) führen Abschätzungen wie das Kerbspannungskonzept von *Neuber* (Neuber, 1985) somit zu guten Ergebnissen.

Der geringe Einfluss der Kerbschärfe auf das Verhältnis der Lebensdauern wechselbeanspruchter Proben ($R=-1$) steht im Widerspruch zum Kerbspannungskonzept und lässt sich ohne Kenntnis der Rissentwicklung nicht verstehen.

5.2 Verändertes Risswachstum

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Entwicklung der Risslänge unter äußerer Belastung als Schädigungsgröße verwendet, um schlüssige Lebensdauervorhersagen zu erhalten.

Die betrachtete Risslänge $a(N)$ entwickelte sich unter einstufiger Belastung nichtlinear, wobei der klassische Übergang vom Anriss zum Rissfortschritt dem Übergang vom Kurzriss- zum Langrisswachstum entspricht. Bei einstufigen Ermüdungsversuchen konnte dieser Übergang mit der verwendeten Gleichstrompotenzialsonde erst nach ca. 80-90% der Lebensdauer detektiert werden. Die Beschreibung der Schädigungsentwicklung über die

Risslänge im Sinne der LEBM beschränkt sich in diesem Fall nur auf die letzten 10-20 % der Lebensdauer.

Unter dem Einfluss von Überlasten konnte die Anrissphase genauer erfasst und analysiert werden. Zu Beginn der Lebensdauer führten Überlasten insbesondere bei $R = -1$ zu einer frühzeitigen Bildung von Anrissen und zu einer durchschnittlich geringeren Rissgeschwindigkeit als bei einstufigen Versuchen. Für einen mittels Potenzialsonde nach 30-40 % der Lebensdauer feststellbaren Anriss muss also mehr als die Hälfte der Lebensdauer über den Fortschritt kurzer und langer Risse beschrieben werden.

Die fraktographischen Untersuchungen zeigten, dass sich die Rissausbreitung in den geprüften Fällen sogar auf mehr als 90 % der Lebensdauer erstreckte (Kap 4.3.5).

Über die Untersuchung der Bruchflächen konnten Anrisse z.T. bereits vor der ersten Überlast nachgewiesen werden. Eine frühzeitig einsetzende Rissbildung ist daher auch ohne Überlasten und somit auch bei einstufigen Versuchen möglich. Die in der verwendeten technischen Aluminiumlegierung enthaltenen Dispersoide bzw. inkohärente Ausscheidungen können die Anrissbildung begünstigen.

Während der gesamten Rissfortschrittsphase wurden durch Überlasten Reihenfolge- und Interaktionseffekte verursacht, die sich unterschiedlich stark auf die Rissgeschwindigkeit und damit auf die Lebensdauer auswirkten.

5.2.1 Endrisslängen

Das Probenversagen während eines Überlastzyklus (und somit i.d.R. bei geringeren Gesamtrisslängen als im einstufigen Versuch) lieferte ein zusätzliches Argument gegen eine vereinfachte Betrachtung der Schädigung anhand von Lebensdauern. Durch höhere Spannungsintensität während einer Überlast wurde die Bruchzähigkeit des Materials bereits bei geringeren Risslängen überschritten, was einen direkten Einfluss auf die Dauer der Rissausbreitung und somit auf die Lebensdauer haben sollte. Wie in Kapitel 4 (z.B. Abbildung 4-8) gezeigt, ist die entsprechende Endrisslänge a_f jedoch kein Indiz für die Lebensdauer. Dies ist mit linearer Schadensakkumulation nicht zu verstehen.

In erster Näherung lässt die Betrachtung von Endrisslänge und erreichter Bruchspielzahl eine Aussage über die durchschnittliche Rissgeschwindigkeit zu.

$$\overline{\frac{da}{dN}} \approx \frac{a_f}{N_f}$$

Eine Unterscheidung zwischen Anriss- und Rissfortschrittsphase wird hierbei noch nicht getroffen. Erst mit Betrachtung des Wachstums langer und kurzer Risse kann die Geschwindigkeit bestimmt werden. Da in die Abschätzung über Endrisslänge und Bruchspielzahl alle Schwingspiele der Anrissbildung (in welcher kein Risswachstum detektiert werden kann) einfließen, ist diese Rissgeschwindigkeit geringer als die tatsächlichen Werte aus der Rissfortschrittsuntersuchung. Wie Abbildung 5-2 schematisch darstellt, ist das Erreichen des Übergangs vom Ermüdungs- zum Gewaltbruch auch von der aktuellen Risslänge bei Auftreten der vorletzten Überlast abhängig. Wird an diesem Punkt die

Bruchzähigkeit noch nicht erreicht, ergeben sich abhängig von Überlastintervall unterschiedliche Endrisslängen.

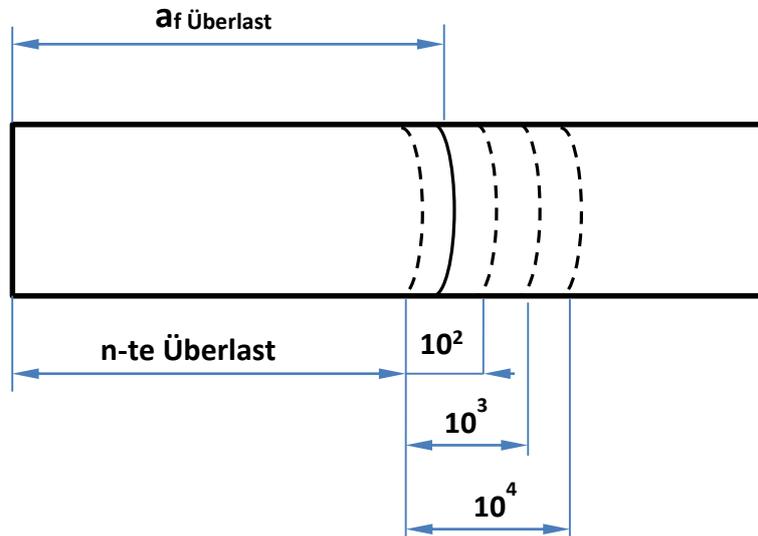


Abbildung 5-2: Risslänge bei Probenversagen (schematisch)

Nach der vorletzten Überlast wird die weitere Rissausbreitung durch die Schwingspiele der Grundlast bestimmt. Je größer das Überlastintervall ist, umso länger kann der Riss wachsen, bis die folgende Überlast das Probenversagen hervorruft.

Durch die begrenzte Anzahl an Überlasten sowie ein mit $\alpha = 1,5$ deutlich geringeres Überlastverhältnis zeigten die Überlasten bei $R = 0$ weniger starke Auswirkungen auf die Endrisslänge (vgl. Abbildung 4-9) als für $R = -1$ mit $\alpha = 3$.

Dass in einzelnen Fällen ($R = 0$) sogar die kritische Risslänge $a_{f, GL}$ (Endrisslänge der Grundlast) bei einstufiger Beanspruchung übertroffen wurde, spricht für eine nach Überlasten verminderte wirksame Spannungsintensität. Für isolierte Überlasten wurden entsprechende Spannungsumlagerungen vor der Risspitze als mögliche Ursache für die Retardation der Rissgeschwindigkeit postuliert [z.B. (Rödling, 2003), (Steinbock, 2008)].

5.2.2 Rissgeschwindigkeiten bei langen Rissen

Rissfortschrittsraten werden i.d.R. über Risslängenänderungen ermittelt, die durch eine größere Anzahl an Lastwechseln hervorgerufen wurden. Auch der Einfluss von Belastungsverläufen mit variablen Amplituden kann so auf einfache Weise beschrieben werden, was als globale Analyse bezeichnet wird (Richard, et al., 2009).

Die durchschnittliche Rissfortschrittsrate kann bei eindimensional beschreibbarer Ausbreitung langer Risse mit vergleichsweise geringem experimentellem Aufwand ermittelt werden. In der Regel wird der *optische* Risslängenzuwachs gemessen.

Heidemann (Heidemann, 2008) untersuchte Zugüberlasten ($R = 0,1$) mit einer Überlasthöhe von 50 % bzw. einem Überhöhungsfaktor $\alpha = 1,5$ an der Aluminiumlegierung EN AW 7349,

fürte die Versuche jedoch im Vakuum durch. Die durchschnittlichen Rissfortschrittsraten wurden im Sekantenverfahren ermittelt.

Im Vergleich mit einstufigen Versuchen fand *Heidemann* für Überlastintervalle von 100 Schwingspielen höhere, bei einem Überlastintervall von 10.000 Schwingspielen vergleichbare Rissgeschwindigkeiten.

Da die eigenen Untersuchungen für $R=0$ für die Überlastintervalle von 100 und 1.000 Schwingspielen geringere durchschnittlichen Rissfortschrittsraten als bei einstufigen Versuchen ergaben, zeigt sich hier eine deutliche Abweichung zwischen EN AW 7349 im Vakuum und EN AW 7475 in Laborluft.

Insgesamt wurde deutlich, dass die Verwendung gemittelter Rissgeschwindigkeiten eine Übertragung auf andere Überlastverhältnisse oder –intervalle erschwert. Ohne eine Berücksichtigung von unterschiedlich stark beschleunigter bzw. verzögerter Rissausbreitung wird das Ergebnis verfälscht.

5.2.3 Wirkung von Überlasten auf die Rissausbreitung

Für lange Risse liegen mittlerweile diverse Arbeiten unterschiedlicher Autoren vor, die z.T. eine detaillierte Betrachtung der Rissausbreitung während einzelner Lastwechsel ermöglichen. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden in dieser Arbeit für zweistufige Versuche mitbetrachtet.

Da eine verzögerte Rissausbreitung nach periodischen Überlasten bereits mehrfach nachgewiesen wurde [u.a. (Schijve, 1972), (Heidemann, 2008)] lag das besondere Augenmerk auf dem beschleunigten Rissfortschritt und somit der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ in Abhängigkeit von der Spannungsintensität.

In dieser Arbeit konnte eine Abhängigkeit der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ von der Höhe und der Intervallgröße periodischer Überlasten nachgewiesen werden. Je höher die Spannungsintensität und die Überlastintervalle gewählt wurden, umso größer waren die erzeugten Rissverlängerungen.

Im Rahmen ihrer Rissausbreitungsuntersuchungen nach einzelnen Überlasten griff *Steinbock* (Steinbock, 2008) auf Betrachtungen des crack tip opening displacement (CTOD) zurück [(Laird, et al., 1967), (Lardner, 1967); zitiert von *Suresh* (Suresh, 1998) und *Weertmann* (Weertman, 2007)]. Die monotone und zyklische Rissverlängerung wurden hierbei mit der Rissöffnungsverschiebung δ_t an der Risspitze in Beziehung gesetzt.

Aus der linear elastischen Rissöffnungsverschiebung δ_e bei kontinuierlichem Risswachstum:

$$\delta_e = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{K^2}{E} \cdot \frac{1}{\sigma_{ys}}$$

wird die zyklische Rissöffnungsverschiebung $\Delta\delta_t$ abgeleitet (Heckel, 1991):

$$\Delta\delta_t = \beta'' \cdot \frac{\Delta K^2}{E} \cdot \frac{1}{\sigma_{ys}}$$

Hierbei ist β'' so zu wählen, dass $\Delta\delta_t$ der Rissverlängerung Δa entspricht.

Die Betrachtung kontinuierlichen Risswachstums mit zyklischer Rissverlängerung beschreibt einstufige Versuche. Auf das in dieser Arbeit definierte Überlastintervall bezogen, stellt dies den Fall $I=0$ Schwingspiele dar, d.h. zwischen den Überlasten liegen keine Schwingspiele der Grundlast.

Für einzeln auftretende Überlasten (Einzel-Überlast = EÜL) wurde durch *Steinbock* an Stählen nachgewiesen, dass die Risserweiterung δ_t CTOD-kontrolliert und proportional zur Rissverlängerung $\Delta a_{EÜL}$ ist.

$$\Delta a_{EÜL} = \beta' \cdot \delta_t$$

Wenn keine Wechselwirkungen zwischen periodischen Überlasten (PÜL) vorliegen, müsste der Vorfaktor β' auch bei diesen Versuchen konstant und unabhängig vom Überlastintervall sein.

Bei eintretender Interaktion wird die neue Überlast durch die vorangegangene beeinflusst. Die Überlastwirkung kann sich nicht mehr ungestört entfalten und die Rissverlängerung $\Delta a_{PÜL}$ fällt geringer aus.

In Abbildung 5-3 ist genau dieses Verhalten zu erkennen. Das Diagramm zeigt das in dieser Arbeit ermittelte Verhältnis von Rissverlängerung $\Delta a_{PÜL}$ und Spannungsintensität. Bei einem Intervall von 10^4 Schwingspielen ist von einer unbeeinflussten Überlastwirkung auszugehen, während bei kleineren Überlastintervallen die Höhe von $\Delta a_{PÜL}$ vermindert wurde.

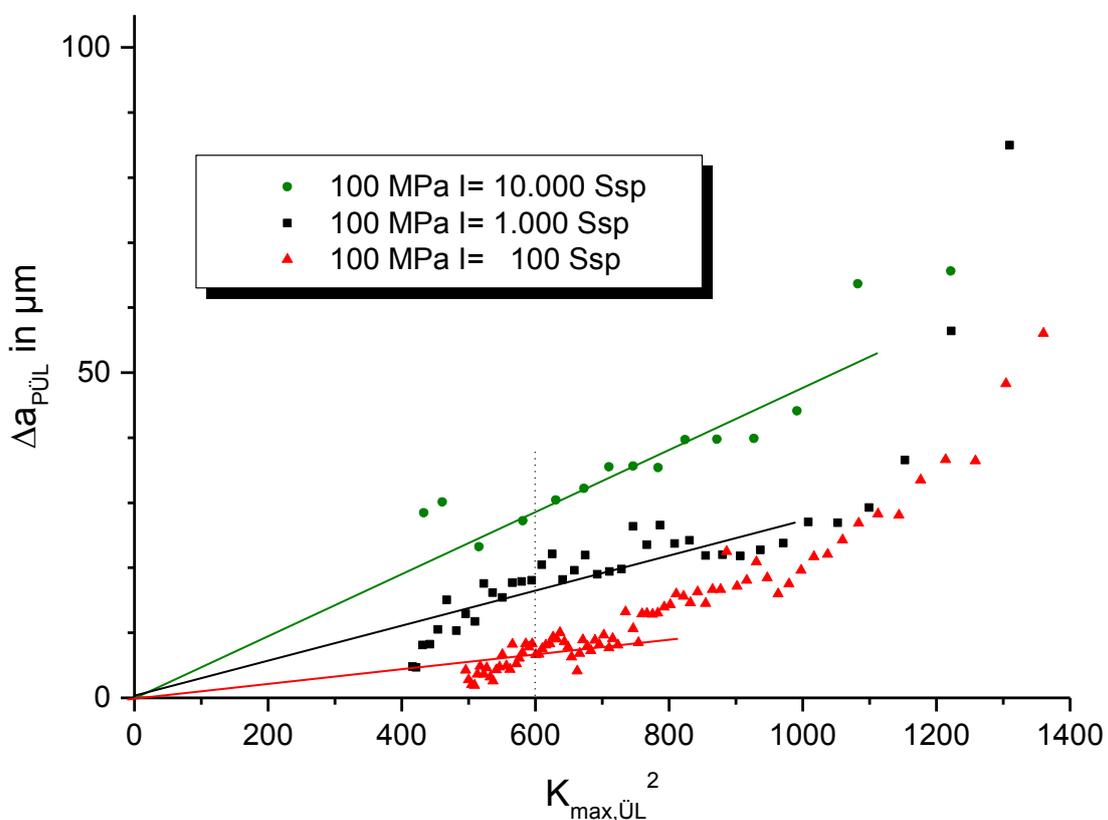


Abbildung 5-3: Überlastrißwachstum SEN-Proben, $R= -1$

Wie nach dem CTOD-Konzept zu erwarten, besteht für alle Überlastexperimente aus Abbildung 5-3 eine Proportionalität zwischen $\Delta a_{p\ddot{U}L}$ und K^2 . Dem Einfluss wird im Weiteren Rechnung getragen, indem β' durch eine vom Überlastintervall abhängige Funktion $f(I)$ ersetzt wird:

$$\Delta a_{p\ddot{U}L} = f(I) \cdot \delta_t$$

Die Abweichungen vom linearen Zusammenhang zwischen $\Delta a_{\ddot{U}L}$ und K^2 bei großen Risslängen und Spannungsintensitäten nahe der Bruchzähigkeit sind auf zunehmende Plastifizierungen zurückzuführen. Hier zeigen sich eindeutig die Grenzen einer Beschreibung mittels LEBM.

Je nach Höhe des Überlastintervalls ergaben sich am Beispiel $R = -1$ unterschiedliche Verhältnisse für $f(I)$. Die Funktion nahm für $I = 10.000$ Schwingspiele den maximalen Wert an, da die Überlasten sich nicht gegenseitig beeinflussten. Ohne Schwingspiele zwischen den Überlasten ($I = 0$) handelt es sich um einen einstufigen Versuch auf Höhe des Überlastniveaus.

Für die Versuche mit den Überlastintervallen von 100 und 1.000 Schwingspielen wird eine Beeinflussung der Rissverlängerung $\Delta a_{p\ddot{U}L}$ durch die Belastungshistorie deutlich.

Tabelle 5-1 verdeutlicht das ermittelte Verhältnis am Beispiel $K_{\max}^2 = 600 \text{ MPa}^2\text{m}$. Der Wert für den einstufigen Versuch wurde über zyklische Rissöffnungsverschiebung abgeschätzt.

Überlastintervall in Ssp.	$\Delta a_{p\ddot{U}L}$ in μm ($K_{\max}^2 = 600 \text{ MPa}^2\text{m}$)	$f(I)$
10^4	30	1
10^3	16	0,53
10^2	5	0,17
einstufiger Versuch	$\Delta a \approx 0,15$	„ $5 \cdot 10^{-3}$ “

Tabelle 5-1: Rissverlängerungen $\Delta a_{p\ddot{U}L}$ für $R = -1$

Der Funktionswert für den einstufigen Versuch ergibt sich nach *Weertmann* (Weertman, 2007) und *Steinbock* (Steinbock, 2008) durch:

$$\frac{da}{dN} = \text{const} \cdot \left(\frac{K}{E}\right)^2$$

Für Ermüdungsrissausbreitung soll gelten:

$$\text{const} = 1$$

und somit für die Rissverlängerung pro Schwingspiel:

$$\Delta a = \left(\frac{K}{E}\right)^2 = f(I) \cdot \beta' \cdot \frac{K^2}{E} \cdot \frac{1}{\sigma_{ys}}$$

sowie:

$$f(I) \cdot \beta' = \frac{\sigma_{ys}}{E}$$

Neben der im Schwerpunkt untersuchten spontanen Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ rufen Überlasten auch Beschleunigungen und Verzögerungen in der folgenden Rissentwicklung hervor, welche sich je nach Zeitpunkt des Auftretens, Art und Kombination lebensdauererlängernd oder -verkürzend auswirken können.

Die nach Überlasten als beschleunigt bezeichnete Rissgeschwindigkeit ist zunächst noch deutlich höher als bei einstufiger Beanspruchung. Bei genauer Betrachtung muss sie jedoch als eine schrittweise stark abgebremste „Nachwirkung“ der Überlast angesehen werden.

5.2.4 Interferenz für $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und Verzögerung

Die Abhängigkeit der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ vom Überlastintervall konnte in den Versuchen nachgewiesen werden. Bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ zeigte sich die maximale Risserweiterung, wenn die Überlasten in einem Abstand von 10.000 Schwingspielen der Grundlast aufeinander folgten. Im Vergleich riefen die untersuchten Überlastintervalle mit 100 und 1.000 Schwingspielen eine signifikante Abnahme von $\Delta a_{\text{ÜL}}$ hervor, wie aus Abbildung 5-3 und Tabelle 5-1 nachvollzogen werden kann.

Um diese Wechselwirkung zwischen den Überlasten im Rahmen einer Lebensdauer vorhersage zu beschreiben, lassen sich die Verhältnisse vereinfacht mit der folgenden Funktion darstellen:

$$f(I) = 1 - \exp \left[- \frac{N_{\text{ÜL}} - N_{\text{ÜL}-1}}{1000} \right]$$

$N_{\text{ÜL}}$ bezeichnet die Schwingspielzahl der aktuellen und $N_{\text{ÜL}-1}$ die Schwingspielzahl der vorherigen Überlast im Kollektiv, so dass die Differenz das Überlastintervall ergibt. Eine grafische Darstellung dieser Funktion bietet Abbildung 5-4, die Stützstellen befinden sich bei den Intervallen mit $I = 100, 1.000$ sowie 10.000 Grundlastschwingspielen.

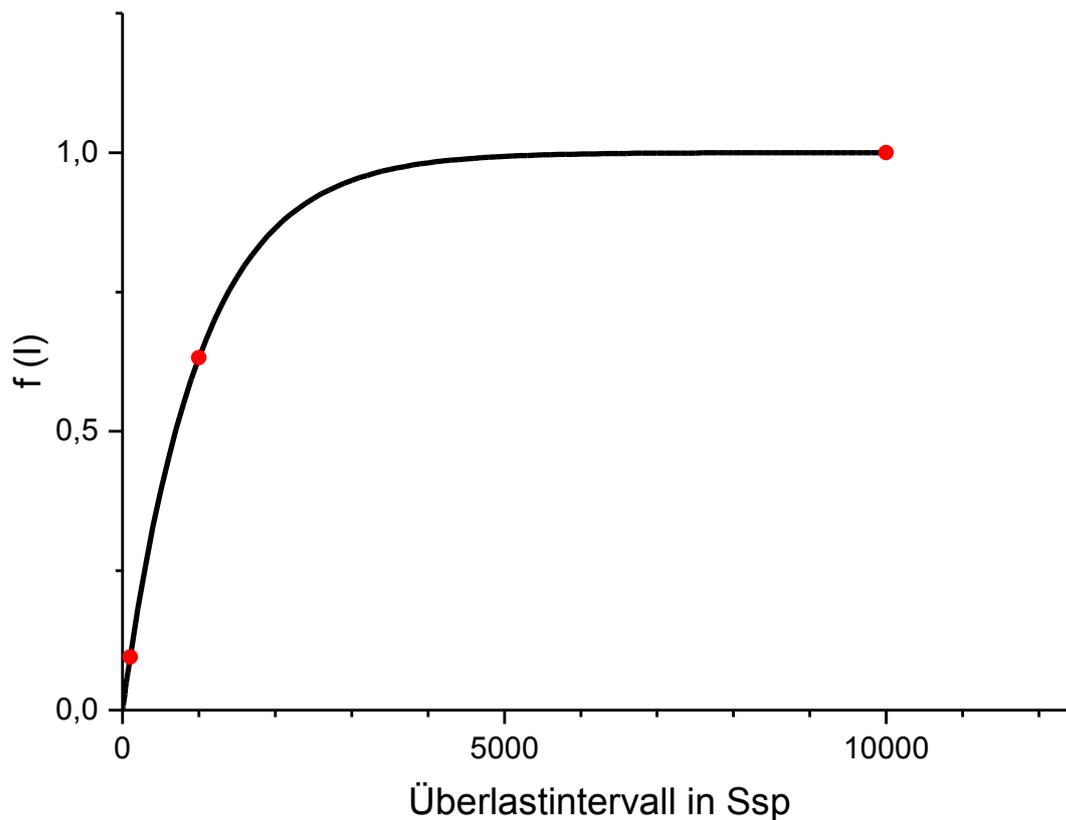


Abbildung 5-4: Interferenzfunktion für $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei $R = -1$

Mit der Funktion lässt sich bei $R = -1$ für Überlastintervalle mit mehr als einem Grundlast-Schwingspiel die Anpassung $f(I)$ bestimmen, so dass die zu erwartende Rissverlängerung $\Delta a_{\text{PÜL}}(I)$ ermittelt werden kann.

Es ist zu beachten, dass die dargestellte Beziehung zwischen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und dem Überlastintervall nur für die untersuchten zweistufigen Versuche nachgewiesen wurde.

Rödling (Rödling, 2003) gab für von ihm untersuchte Überlasten eine Verzögerungswirkung während der folgenden ca. 6.000 Grundlastschwingspiele an. *Sander & Richard* (Richard, et al., 2009) verwiesen hingegen abhängig vom R -Verhältnis im Lastblock auf z.T. deutlich höhere Verzögerungslastwechselzahlen.

Mit den eigenen Ergebnissen wurde keine Abhängigkeit der verzögerten Rissausbreitung vom Überlastintervall festgestellt. Nachgewiesen wurde, dass bei einem ausreichend geringen Intervall die Verzögerungswirkung der vorherigen Überlast beendet wird.

5.2.5 Folgerung für Versuche unter Betriebsbeanspruchung

In den zweistufigen Ermüdungsversuchen konnten die Reihenfolge- und Interaktionseffekte klar nachgewiesen werden, welche auch bei Betriebslastfolgen zu berücksichtigen sind.

Unter anderen verweist *Haibach* (Haibach, 2006) auf den Umstand, dass ein Eliminieren von vielen kleinen und kaum schädigenden Zwischenschwingungen in einem Ermüdungsversuch wünschenswert sei (Omission). Gleichzeitig ist der Forderung gerecht zu werden, dass

Omission die Lebensdauer des Bauteils gegenüber dem Original-Lastablauf (abzüglich der bewusst entfernten Lastspiele) nicht allzu stark ändert.

Wie die Experimente zeigen, ist die Entwicklung der Schädigungsgröße Risslänge abhängig von Anzahl und Abstand der Überlasten im Kollektiv.

Sobald sich ein Riss ausbreitet, kann ein Beschränken der Überlastenintervalle im Extremfall zu einer Unterbrechung der Verzögerungswirkung und somit auch zu einer geringeren Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ durch die nachfolgende Überlast führen.

Die Bruchflächenuntersuchungen ergaben weiterhin, dass die Rissentwicklung zum überwiegenden Teil durch die Grundlast und somit durch die „kleinen Zwischenschwingungen“ erfolgte. Da in der Rissfortschrittsphase alle Schwingspiele zum Risswachstum beitragen, führt Omission hier unweigerlich zu fehlerhaften Ergebnissen.

Eine entsprechende Vereinfachung von Lastabläufen ist daher nur zulässig, wenn sich noch kein Riss ausbreitet und somit Reihenfolge- sowie Interaktionseffekte keinen Einfluss auf die Lebensdauer haben.

Die Untersuchungen zeigten, dass eine Anrissbildung bereits frühzeitig erfolgen kann. Die von Omission unbeeinträchtigte Anrissphase hat in diesen Fällen nur einen geringen Anteil an der Gesamtlebensdauer. Für das folgende Risswachstum ist das Verhältnis zwischen Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und wirksamer Verzögerung entscheidend, welches durch das Überlastintervall bestimmt wird. Eine Unterdrückung von Schwingspielen mit geringer Spannungsamplitude ist daher nicht zielführend.

5.3 Rechnerische Lebensdauerabschätzung

Die rechnerische Lebensdauerabschätzung beschreibt das Vorgehen zur Ermittlung von Anriss- und Rissfortschrittslebensdauer. Bereits frühzeitig wurde erkannt, dass die gesonderte Berücksichtigung einer aufgrund von Reihenfolgeeffekten veränderten Rissfortschrittsrate notwendig sein kann, um realistische Abschätzungen treffen zu können [z.B. (Schijve, 1972), (Schütz, 1976), (Führung, et al., 1984) zusammengefasst in (Haibach, 2006)].

Während Informationen über Überlastwirkungen in vorausgehenden Arbeiten [(Rödling, 2003), (Broll, 2006), (Steinbock, 2008), (Brucksch, 2009)] bei relativ großen Risslängen ($a/W \approx 0,3 \dots 0,7$) gewonnen wurden, waren in dieser Arbeit quantitative Untersuchungen bei sehr kleinen Risslängen ($a/W < 0,1$) möglich.

Mit den Ergebnissen der Überlastexperimente konnte das CTOD-Konzept für die Berechnung der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ angewendet werden.

5.3.1 Lebensdauerabschätzung mittels Schadensakkumulation

Die lineare Schadensakkumulation nach *Miner* (Miner, 1945) ordnet bei einstufiger Belastung jedem Schwingspiel den gleichen Betrag an Schädigung zu. Mehrstufige Belastungen werden anteilig aufsummiert, wobei sich die Teilschädigungen aus den Lebensdauern von Wöhlerversuchen auf dem jeweiligen Lastniveau ergeben.

$$\Delta D = \frac{\Delta N}{N_f} \quad D = \sum \Delta D$$

Das Erreichen von $D=1$ wird mit Probenversagen gleichgesetzt. Reihenfolge- bzw. Interaktionseffekte sind nicht vorgesehen. Daher können nur in ausgewählten Fällen mit der linearen Schadensakkumulationshypothese in originaler Form gute Vorhersageergebnisse erzielt werden.

Mit den durchgeführten Überlastexperimenten kann die o.a. Forderung nicht erfüllt werden, da die Überlasten nachweislich mit der Grundlast und auch miteinander interagieren. Der Zeitpunkt einer auftretenden Überlast beeinflusst die Entwicklung der Schädigungsgröße Risslänge zusätzlich.

Der wesentliche Kritikpunkt ist, dass in der linearen Schadensakkumulation der Schädigung keine reale Größe zugeordnet wird.

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wurde das Probenversagen durch einen oder mehrere Risse eingeleitet. Die Rissverlängerung als Schädigungsgröße kann linear akkumuliert werden, auch wenn das Risswachstum $a(N)$ nichtlinear erfolgt.

5.3.2 Lebensdauerabschätzung über Rissfortschrittsrechnung

Die Auswertung der Ermüdungsversuche zeigt, dass für lange Risse jedes Schwingspiel zur Rissentwicklung beitrug. Der jeweilige Beitrag hing von der äußeren Belastung und der bis zu diesem Zeitpunkt erreichten Risslänge ab.

In erster Näherung können die ermittelten durchschnittlichen Rissgeschwindigkeiten (inklusive der Überlasten) abschnittsweise aufsummiert werden, um eine quasilineare Akkumulation zu erreichen.

Für eine detailliertere Betrachtung ist anhand der Ergebnisse die Berechnung einzelner Lastschritte möglich. Die untersuchte Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ kann inklusive der Wechselwirkung zwischen den Überlasten gut erklärt und vorhergesagt werden. Die Rissentwicklung während der Grundlastschwingspiele lässt sich als lineare Akkumulation von nicht-linearen Rissinkrementen betrachten. Somit können auch die Einzeleffekte wie beschleunigte und verzögerte Rissentwicklung berücksichtigt werden.

Erfolgt eine rechnerische Lebensdauerabschätzung über die Schädigungsgröße Risslänge, ist das Erreichen der Endrisslänge als Abbruchkriterium zu verwenden.

5.3.3 Parameter für die Lebensdauerabschätzung über Rissausbreitung

Um die Fortentwicklung gegenüber bisherigen Rechnungen darstellen zu können, wurde auf die durch *Rödling* (Rödling, 2003), *Steinbock* (Steinbock, 2008) und *Brucksch* (Brucksch, 2009) verwendeten Parameter bezüglich Rissfortschrittsraten und Überlastwirkungen zurückgegriffen. Eine Übersicht der bei Bedarf ergänzten bzw. modifizierten Parameter befindet sich im Abschnitt 9.

Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft die für $R = -1$ ermittelte Rissausbreitungskurve.

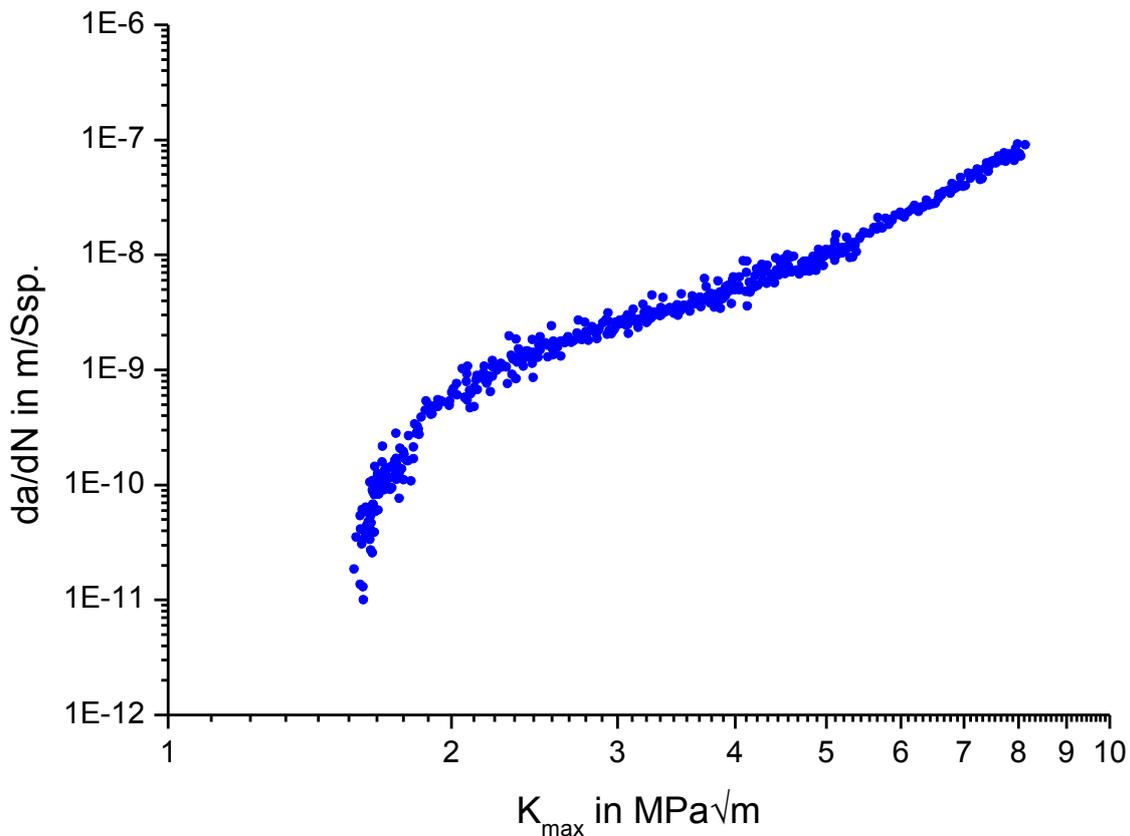


Abbildung 5-5: Rissfortschrittsraten aus einstufiger Belastung $R = -1$

5.3.4 Berechnungen mit Programm Rissausbreitung

In dem von Brucksch am IWK entwickelten Programm „Rissausbreitung“ (Brucksch, 2009) erfolgt die rechnerische Abschätzung der Lebensdauer über eine Betrachtung der Auswirkungen einzelner Schwingspiele auf die Entwicklung der Risslänge.

Ausgangspunkt ist eine Anfangsrisslänge a_0 , für die mit der gewählten Probengeometrie (CCT- oder SEN-Probe) und dem eingelesenen Lastkollektiv bereits für das erste Schwingspiel eine Spannungsintensität errechnet werden kann. Anhand der Spannungsintensität erfolgt über das ausgewählte Rissausbreitungsmodell (RA-Modell) eine Bestimmung der Rissfortschrittsrate $\frac{da}{dN}$, welche für ein einzelnes Schwingspiel der Rissverlängerung Δa entspricht. Neben der einfachen Betrachtung nach Paris kann die Berechnung auch mit Modellen erfolgen, die auf den Rissausbreitungsgesetzen nach Klesnil-Lukáš bzw. Forman und Mettu basieren, wobei wahlweise Anpassungen an experimentell ermittelte Rissausbreitungskurven nach Rödling, Volpp und Steinbock Berücksichtigung finden. So können z.B. Übergänge im Schwellenwertbereich, Steigungsunterschiede in den Rissausbreitungskurven untersuchter Materialien sowie der Einfluss des während des Lastwechsels wirkenden Spannungsverhältnisses berücksichtigt werden.

Um Auswirkungen variabler Belastungen in die Berechnung einzubeziehen, kann zwischen

verschiedenen Lastinteraktionsmodellen (LI-Modellen) gewählt werden. Hierbei erfolgt in Abhängigkeit von der Belastungshistorie eine zusätzliche Veränderung der

Rissfortschrittsrate $\frac{da}{dN}$. Die für das einzelne Schwingenspiel berechnete Rissverlängerung Δa

kann somit auch größer oder kleiner als durch das RA-Modell vorgegeben ausfallen. Im Programm „Rissausbreitung“ sind Reihenfolgeeffekte nach den Vorschlägen von *Wheeler* und *Willenborg* (Verzögerungseffekte nach Überlasten) sowie Modifikationen implementiert, welche zusätzlich die veränderte Rissverlängerung während der Überlast $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und die sich anschließende Beschleunigungsphase berücksichtigen.

Nach dem Aufaddieren der aktuellen Rissverlängerung Δa auf die bisherige Risslänge ergibt sich die neue Gesamtrisslänge a_{ges} , welche zur Ausgangsgröße der Berechnung des nächsten Lastschrittes wird. Das gewählte Lastkollektiv wird schwingenspielweise wiederholt abgearbeitet, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird.

Die Rechnung endet, wenn die Gesamtrisslänge der Probentiefe entspricht, aufgrund von Verzögerungseffekten für kein Schwingenspiel des eingelesenen Kollektivs Risswachstum erfolgt oder wenn die angegebene Bruchzähigkeit überschritten wird.

Brucksch selbst leitete aus den Ergebnissen von *Rödling*, *Broll* und *Steinbock* ein empirisches LI-Modell ab, das folgend in seinen wesentlichen Zügen dargestellt werden soll.

Nach der Bestimmung von Spannungsverhältnis und –intensität findet eine Prüfung statt, ob es sich um eine Überlast handelt. Zugrunde gelegt wird das Versuchsergebnis, dass die bereits beschriebenen Auswirkungen (erhöhte Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$, folgend beschleunigte und anschließend verzögerte Rissausbreitung) ab einem Verhältnis $K_{\text{max, ÜL}} / K_{\text{max, GL}} > 1,25$ nachweisbar sind. Wenn die Prüfung positiv ausfällt, wird für dieses Schwingenspiel statt der Rissverlängerung Δa gemäß der hinterlegten $\frac{da}{dN}$ vs. K – Kurve der Risszuwachs $\Delta a_{\text{ÜL}}$ berechnet und zur bisherigen Risslänge addiert. Gleichzeitig wird die Ausdehnung der durch die Überlast erzeugten plastischen Zone bestimmt, welche dem Bereich beeinflusster und verminderter Rissgeschwindigkeit entspricht.

Berücksichtigt wird das Abbremsen der Rissgeschwindigkeit bis zu einem lokalen Minimum $da/dN|_{\text{min, rel}}$, welches einer folgend zu erreichenden Risslänge zugeordnet wird.

Über Anpassungsparameter kann der Abstand des Punktes minimaler Rissgeschwindigkeit von der Risslänge bei Auftreten der Überlast variiert werden.

In den Rechenschritten der auf eine Überlast folgenden Schwingenspiele (welche selbst keine Überlasten sind) wird die Rissgeschwindigkeit der ungestörten Rissausbreitung mit einem Beeinflussungsfaktor multipliziert, um die Verzögerungseffekte darzustellen.

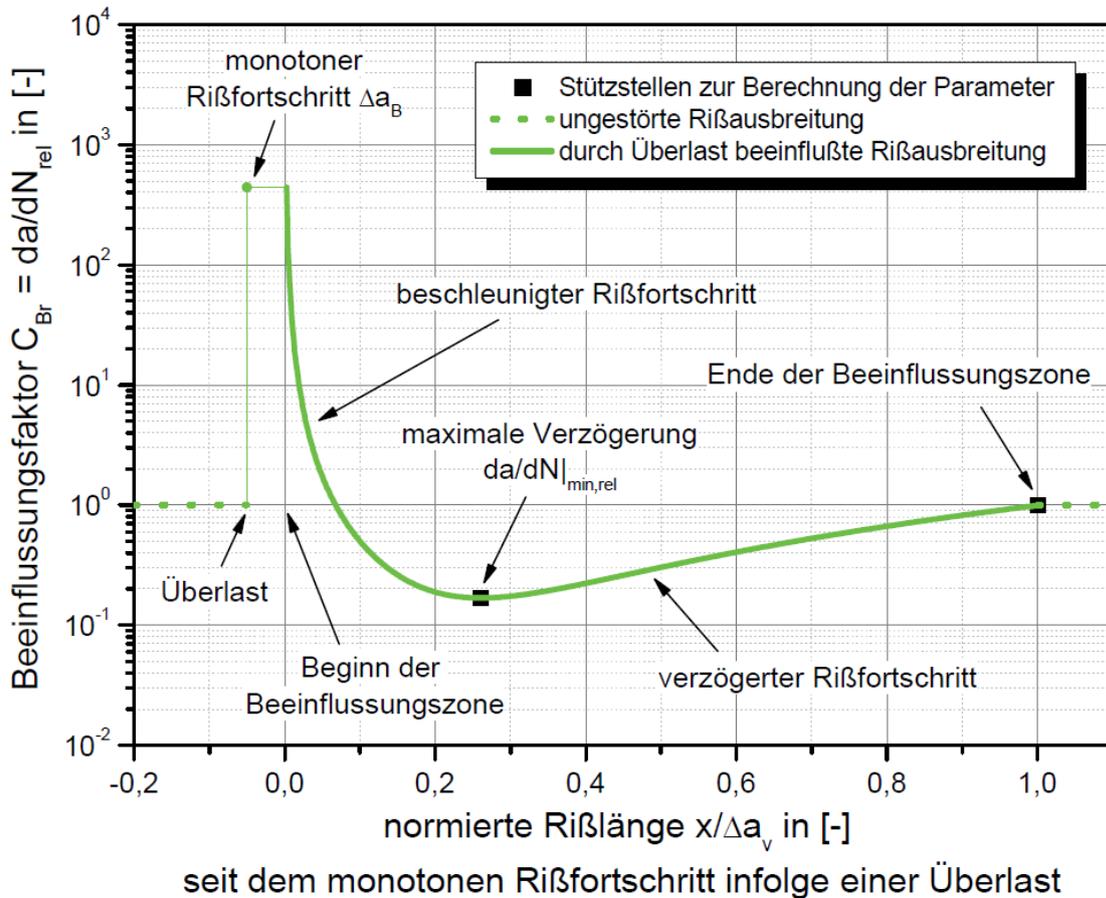


Abbildung 5-6: Verlauf des Beeinflussungsfaktors (Brucksch, 2009)

Abbildung 5-6 zeigt den grundsätzlichen Verlauf des von *Brucksch* gewählten Beeinflussungsfaktors (Brucksch, 2009).

Die Berechnung mit diesem LI-Modell zeigte für mehrstufige Betriebslastfolgen nach Variation der Anpassungsparameter sehr gute Ergebnisse.

Speziell bei im Abstand von mehreren Schwingspielen folgenden Überlasten zeigte sich nachträglich eine zu hohe Berechnung der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$.

Durch die im Abschnitt 5.2.4 beschriebene Gewichtungsfunktion konnte die Berechnung der Rissverlängerung unter Überlast verbessert werden. Die Interferenzfunktion wurde in das LI-Modell nach Brucksch implementiert. Der Funktionswert beträgt maximal 1 für Überlasten, die in einem Abstand von mehr als 10.000 Schwingspielen aufeinander folgen. Die Zyklenzahl seit der vorangehenden Überlast wird durch einen zusätzlichen Zähler im Programm bestimmt.

Den Einfluss des zusätzlichen Faktors für die Überlastwirkung zeigen Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8.

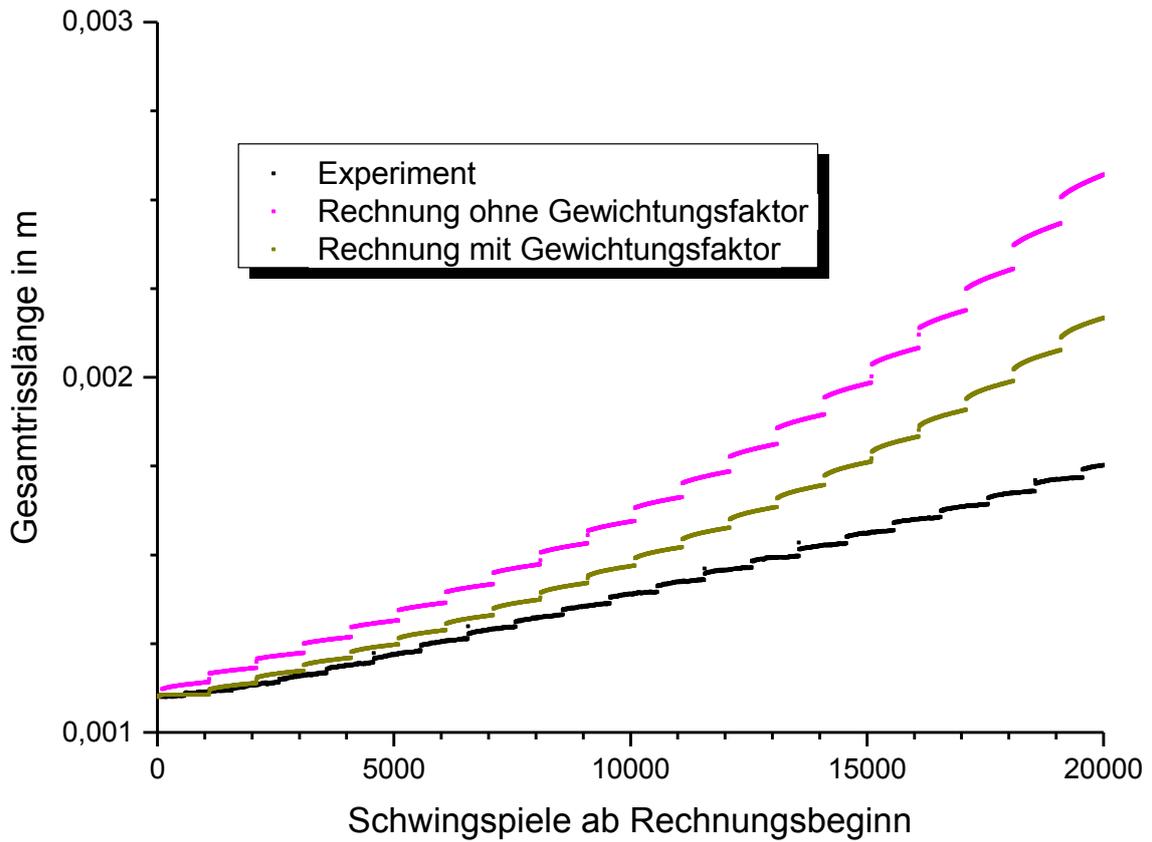


Abbildung 5-7: Einfluss des Gewichtungsfaktors, Beispielrechnung für $I= 1.000$ Ssp

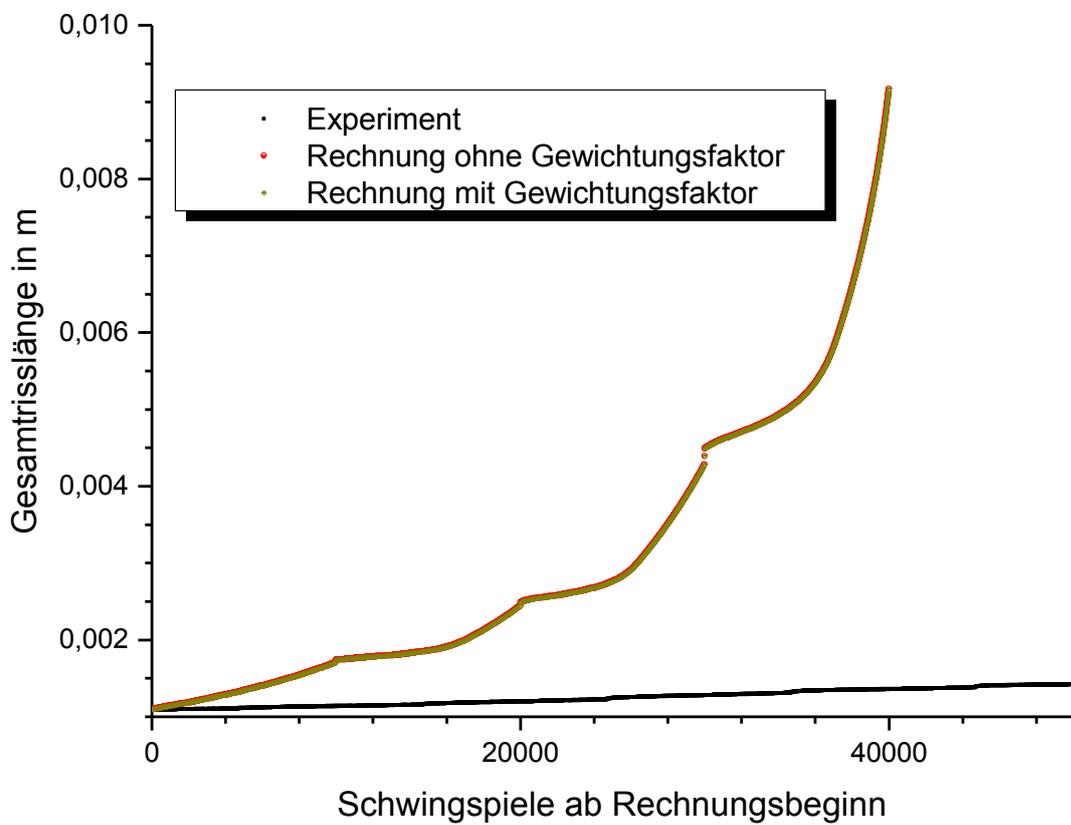


Abbildung 5-8: Einfluss des Gewichtungsfaktors, Beispielrechnung für $I= 10.000$ Ssp

In Abbildung 5-7 wurden die Rissentwicklung einer SEN-Probe, die bei $R = -1$ mit einer Spannungsamplitude von 100 MPa ermüdet wurde, den Berechnungen mit dem Programm „Rissausbreitung“ gegenübergestellt. Das Überlastintervall betrug 1.000 Schwingspiele. Es zeigt sich eine deutlich verringerte Abweichung vom experimentell ermittelten Risswachstum.

Abbildung 5-8 zeigt diesen Vergleich für eine weitere SEN-Probe, die bei einem Überlastintervall von 10.000 Schwingspielen mit einer Grundlastamplitude von 90 MPa beansprucht wurde. Die Gewichtungsfunktion beeinflusst die ursprüngliche Rechnung nicht und lässt weiteren Optimierungsbedarf über eine Variation der Anpassungsparameter erkennen.

Wie die eigenen Versuchsergebnisse zeigen, führten die gewählten Überlastintervalle zu unterschiedlichen Kombinationen aus Rissbeschleunigung und –verzögerung. Eine Verbesserung einzelner Aspekte der Abschätzung wirkt sich somit für Betriebslastfolgen unterschiedlich stark aus.

5.4 Beschreibung des Kurzrissswachstums an Kerben

Ein detaillierter Nachweis zur Überlastwirkung in der Phase zweidimensionaler Rissausbreitung konnte aufgrund der Beschränkungen bei der Potenzialsondenmessung nicht erbracht werden. Zum einen konnten die Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ und Verzögerungsbereiche nicht im Potenzialsondensignal identifiziert werden, da das auch durch *Broll* beschriebene verstärkte Rauschen bei abnehmender Risslänge (Broll, 2006) eine Auflösung der geringen Unterschiede verhinderten. Zum anderen konnten aufgrund der geringen Ausdehnungen der Überlastlinien keine flächenhaften Segmente der jeweiligen Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ zugeordnet werden.

Die fraktographische Untersuchung der Ausbreitung kurzer Risse zeigte starke Ähnlichkeiten mit den Strukturen durchgehender, langer Risse. Das Entstehen von Überlastlinien und den dazwischen befindlichen Ermüdungsbereichen (hervorgerufen durch Grundlastzyklen) rechtfertigen die grundsätzliche Annahme, dass das Wachstum kurzer Risse ähnlich der Ausbreitung langer Risse erfolgen kann. Wie in dieser Arbeit gezeigt, ist das Kurzrissswachstum zweidimensional zu beschreiben (siehe Kap. 4.3.5). Für vergleichende Betrachtungen zwischen langen und kurzen Rissen kann die vorgestellte *vektorielle* Risslänge genutzt werden.

5.4.1 Rissgeschwindigkeiten von kurzen Rissen an Kerben

Im Rahmen der Versuchsreihen zeigten sich bereits nach den ersten Überlasten mikroskopische Anrisse im Kerbgrund ermüdeten Proben. Bei Bruchflächenuntersuchungen wurde Risswachstum ab der ersten Überlast und in einigen Fällen bereits vor der ersten Überlast nachgewiesen.

Tritt eine ausreichend hohe Belastung frühzeitig in einem beliebigen Betriebslastkollektiv auf, muss folgend von einem ausbreitungsfähigen Anriss ausgegangen werden. Die Überlast wirkt somit zu diesem Zeitpunkt lebensdauerverkürzend.

Gleichzeitig konnte für die durchgeführten Überlastversuche festgestellt werden, dass die

Rissausbreitung gegenüber der Anrissbildung dominierte.

In der Anrissphase muss demnach zum einen die Anrissbildung und folgend das Kurzrissswachstum bis zum Erreichen des definierten technischen Anrisses von 250 µm Gesamtrisslänge betrachtet werden. Mit einer geeigneten Korrektur- bzw. Geometriefunktion ist das Wachstum kurzer Risse abschätzbar.

Bei Lastkollektiven mit $R=0$ war trotz frühzeitig vorhandener Anrisse eine hohe Anzahl an Überlastintervallen notwendig, bis ein Risswachstum über die Gleichstrompotenzialsonde detektiert werden konnte. Möglicherweise wirkten die Zugüberlasten bereits in der Anrissphase stark verzögernd und trugen somit zu einer signifikanten Verlängerung der Lebensdauer bei.

Während bei den Überlastexperimenten Rissfortschrittsraten über den Abstand von Überlastlinien ermittelt werden konnten, waren die entsprechenden Risslängen bei einstufiger Belastung fraktographisch nicht nachvollziehbar. Ein Vergleich der Rissgeschwindigkeiten konnte hier für Risslängen unterhalb von 200 µm nicht vorgenommen werden.

Beim Vergleich mit Literaturdaten [z.B. (Miller, 1982), (de los Rios, et al., 1992)] ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse mit optischen Messungen auf der Probenoberfläche gewonnen wurden. Es erfolgt daher keine Unterscheidung zwischen *äquivalenter* und *vektorieller* Rissfortschrittsrate.

Wie in Abbildung 4-26 dargestellt, können die Abweichungen zwischen *äquivalenter* und *vektorieller* Betrachtungsweise zwei Größenordnungen betragen. Eine durchgängige Beschreibung des Rissausbreitungsverhaltens über die gesamte Lebensdauer ist mittels beider Darstellungen möglich.

Die *äquivalente* Rissgeschwindigkeit ist für kurze Risse von der Bauteil- / Probengeometrie abhängig. Hierbei ist zu beachten, dass bei Eck- und halbelliptischen Anrissen keine über die gesamte Probenbreite durchgängige Rissfront besteht. Die aus der Summe aller Rissflächen ermittelte *äquivalente* Risslänge kann daher gerade für kurze Risse zu einer Fortschrittsrate führen, welche geringer als der Atomabstand des Materials ist (d.h. $\frac{da}{dN} < 3 \cdot 10^{-10} \text{ m/Ssp.}$).

Tritt dieser Fall ein, wird i.d.R. ein Rissstopp vermutet und bei einem nur phasenweise detektierbaren Risswachstum die Kontinuität desselben in Frage gestellt.

Die Annahme diskontinuierlichen Risswachstums kann in diesem Fall ebenso ungerechtfertigt sein wie bei *optischen* Verfahren, mit denen nur die *vektorielle* Rissgeschwindigkeit des äußeren Punktes einer Rissfront an der Probenoberfläche betrachtet wird.

Somit erscheint es zweckmäßig, das Kurzrissswachstum mindestens bis zur Risskoaleszenz mit *vektoriellen* Geschwindigkeiten zu beschreiben, um die geometrischen Randbedingungen zu berücksichtigen.

Die Herausforderung besteht in der Auswahl eines repräsentativen Risspfades und der Bestimmung der Rissgeschwindigkeit, welche im Rahmen dieser Arbeit erst nach Probenversagen ermittelt werden konnten.

Die in den Überlastversuchen festgestellte, prinzipielle Entwicklung der Rissgeschwindigkeit kurzer Risse an Kerben zeigt Abbildung 5-9. Im ersten Abschnitt haben sich Anrisse gebildet, die einzeln bis zur Vereinigung weiterwachsen. Bis zur Bildung eines durchgehenden Risses unterscheiden sich *äquivalente* und *vektorielle* Rissgeschwindigkeit. Über den technischen Anriss hinaus nimmt die Rissgeschwindigkeit bis zu einem Minimum ab, um anschließend wieder anzusteigen. Die Risslänge bei Erreichen der minimalen Geschwindigkeit stellt den Rand des Einflussbereiches der Kerbe dar.

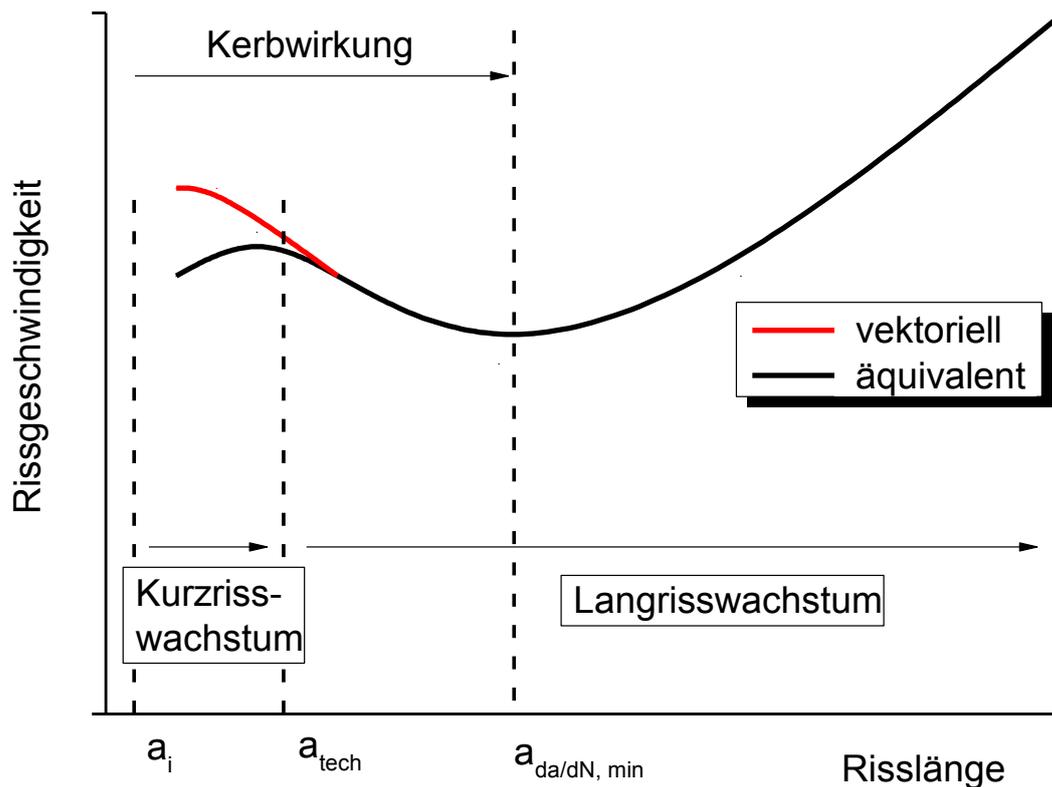


Abbildung 5-9: Entwicklung der Rissgeschwindigkeit (schematisch)

5.4.2 Spannungsintensität für kurze Risse an Kerben

Die in den Versuchen erzeugten Überlastlinien ermöglichen neben der Ermittlung der Rissgeschwindigkeit auch einen Rückschluss auf die vorliegende Spannungsintensität. Diese kann für die Beschreibung kurzer Risse ebenfalls *vektoriell* oder *äquivalent* betrachtet werden.

Solange sich an der Probe mit der Kerbe a_k kein durchgängiger und der LEBM entsprechend wachsender Riss gebildet hat, ist die Berechnung der Spannungsintensität über:

$$\Delta K = \sigma_{nenn} \cdot \sqrt{\pi \cdot (a_i + a_k)}$$

als obere Grenze zu betrachten. Hierbei gilt: $a_k \gg a_i$.

Sowohl die unterschiedliche Beschreibungsmöglichkeit im Anfangsstadium als auch die Rissentwicklung im Einflussbereich der Kerbe erschweren die rechnerische Ermittlung der Spannungsintensität. Wenn gleiche Rissgeschwindigkeiten jedoch gleichen Spannungsintensitäten zugeordnet werden, kann die *vektorielle* Spannungsintensität kurzer Risse über die Abstände zwischen den Überlastlinien ermittelt werden. Das Verhältnis zwischen Rissgeschwindigkeiten und Spannungsintensität langer (eindimensional zu beschreibender) Risse wird hierzu auf kurze Risse übertragen.

Abbildung 5-10 veranschaulicht das Vorgehen. Aus einem Bereich mit bekannten Spannungsintensitäten werden die Rissgeschwindigkeiten gleichen Werten im Bereich unbestimmter Spannungsintensitäten zugeordnet.

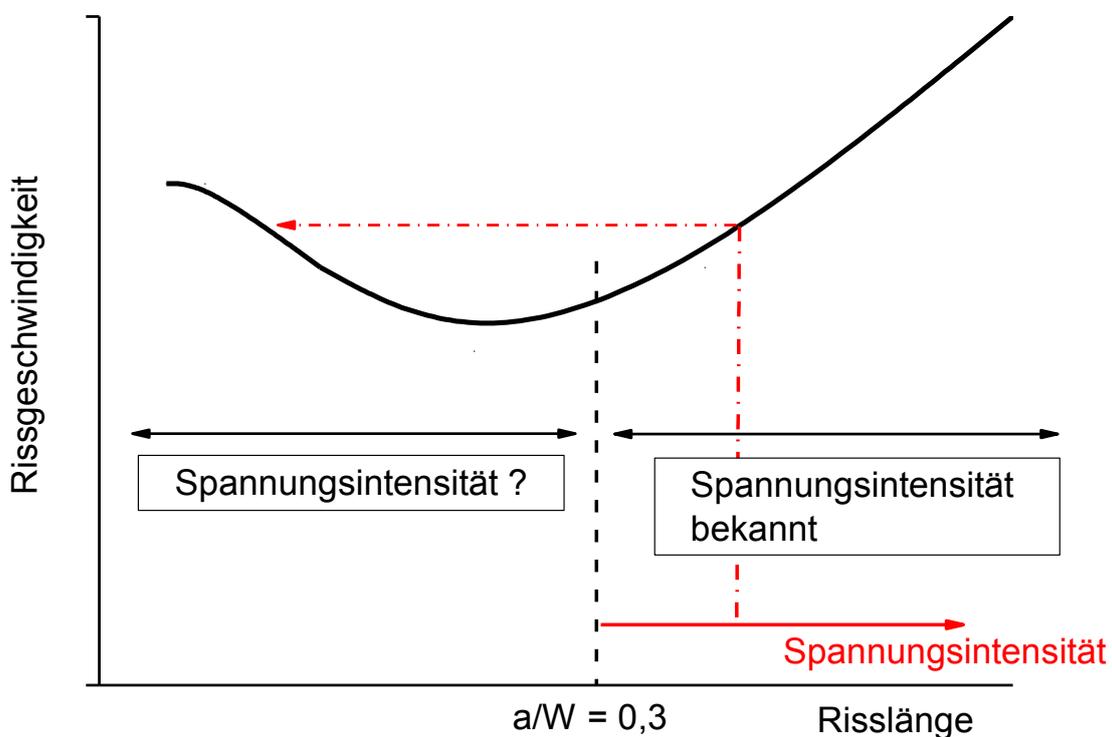


Abbildung 5-10: Ermittlung der Spannungsintensität kurzer Risse

Bei der vorgestellten Methode ist zu beachten, dass der Rissgeschwindigkeitsvergleich nur aufgrund der als Markerloads wirkenden Überlasten möglich war. Die Rissfortschrittsraten waren aufgrund der Überlasten durch Rissbeschleunigungen sowie ausgeprägte Verzögerungen beeinflusst. Da eine detaillierte Auflösung im Kurzrissbereich nicht möglich war, konnten nur durchschnittliche Geschwindigkeiten verglichen werden. Die Zuordnung von Spannungsintensitäten im Kurzrissbereich basiert somit nicht auf einer in einstufigen Versuchen ermittelten Rissausbreitungskurve (vgl. Abbildung 5-5).

Der im Abschnitt 5.4.1 gezeigte Kerbeinfluss auf die Rissgeschwindigkeit spiegelt sich auch in der Spannungsintensität wider.

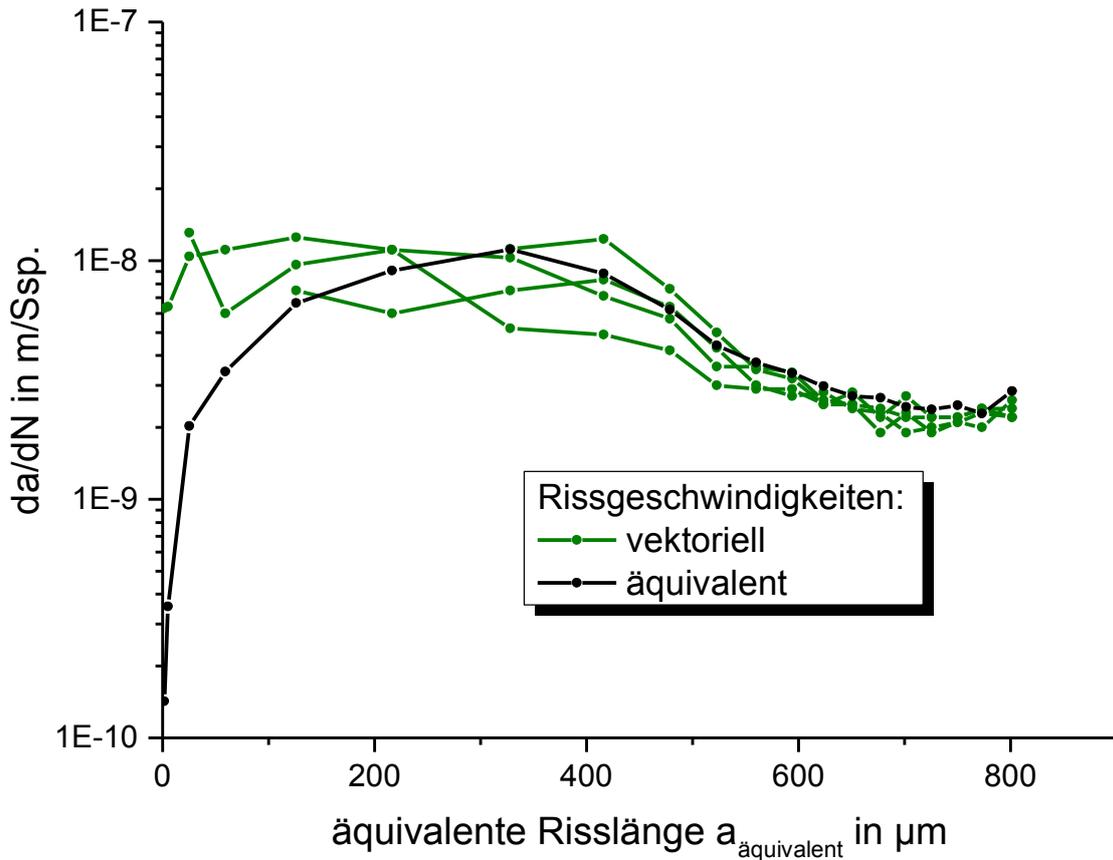


Abbildung 5-11: durch Kerbwirkung beeinflusste Rissgeschwindigkeiten

Abbildung 5-11 stellt exemplarisch den Einflussbereich der Kerbe bei den verwendeten SEN-Proben dar. Sie entspricht der Abbildung 4-26 und zeigt, dass bis zu einer *äquivalenten* Risslänge von ca. 700 µm die Rissgeschwindigkeit kerbbedingt erhöht war. Die Geschwindigkeit nahm bis hierher ab und stieg anschließend der LEBM entsprechend wieder an.

Das Risswachstum wird durch ein lokales Spannungsfeld beeinflusst, das durch die Kerbe mitbestimmt wird. Die Spannungsintensität ist somit ebenfalls lokal zu ermitteln:

$$\Delta K(x)_{loc} \approx \sigma_{nenn} \cdot k_t(x) \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{vekt}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Der lokale Kerbfaktor $k_t(x)$ kann über die Zuordnung der Rissgeschwindigkeit da/dN zur Rissausbreitungskurve (mit entsprechendem Überlastintervall) bestimmt werden und ergibt sich zu:

$$k_t(x) = \frac{\Delta K(x)}{\Delta K}$$

Außerhalb des Kerbspaltungsfeldes stimmen lokale Spannungsintensität ΔK_{loc} und „globale“ Spannungsintensität ΔK überein, d.h.:

$$k_t\left(x > a_{\frac{da}{dN},min}\right) = 1$$

Als weitere Verfeinerung ist nach Ermittlung lokaler Spannungsintensitäten ΔK_{loc} eine Beschreibung des Kerbspannungsfeldes $\sigma(x, y)$ möglich.

Auch eine *äquivalente* Spannungsintensität kann durch eine Übertragung der Verhältnisse bei langen Rissen auf kurze Risse erfolgen. Das Ergebnis ist in diesem Fall eine globale Betrachtung mit Spannungsintensitäten, welche zu Beginn des Risswachstums unter dem Schwellenwert langer Risse liegen.

Abhängig von einer *äquivalenten* oder *vektoriellen* Betrachtung der Spannungsintensität können entsprechende Geometrie- bzw. Korrekturfunktionen ermittelt werden.

Der Vorteil der vorgestellten Betrachtung liegt in der durchgängigen Beschreibung des Risswachstums über die gesamte Lebensdauer. Kurze Risse können genauso wie lange Risse beschrieben werden, wobei sich die Unterschiede durch den äußeren Geometrieinfluss ergeben.

5.4.3 Technischer Anriss

Wird der Technische Anriss rein über die Detektionsgrenze des Messverfahrens definiert, liegt er für die verwendete Versuchsanordnung zwischen 100 und 200 μm Gesamtrisslänge. Fraktographisch konnte jedoch ein kontinuierliches Risswachstum unterhalb dieser Risslängen nachgewiesen werden. Die Entwicklung dieser kurzen Risse war nur über Überlastlinien erfassbar, über die dann gemittelte Rissgeschwindigkeiten bestimmt wurden. Für den in dieser Arbeit beschriebenen Fall konnte die Rissausbreitung schon ab der ersten Überlast beschrieben werden.

Die zwei Eckanrisse in Abbildung 4-21 weisen in diesem Stadium einen Radius von jeweils ca. 100 μm auf, was einer *äquivalenten* Gesamtrisslänge von 5,5 μm entspricht.

Um das Risswachstum unterhalb der Detektionsgrenze auch für andere Lastfolgen beschreiben zu können, muss die Übertragung einer beschreibbaren Rissentwicklung auf diese Belastung möglich sein. Ausgehend von einer 200 μm Detektionsgrenze und abweichenden durchschnittlichen Rissgeschwindigkeiten bei einstufigen Versuchen (vgl. Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19), lassen sich die Schwingspiele des Kurzrisswachstums N_{SC} auch hier abschätzen. Die restlichen Schwingspiele N_i stellen die statistisch zu ermittelnde Anrissphase dar.

$$N_{200 \mu\text{m}} - N_{SC} = N_i$$

Die Festlegung des Technischen Anrisses auf einem festen Zahlenwert ist nachteilig, da dieser Wert abhängig von Proben- bzw. Bauteilform variieren kann. Bezogen auf eine Lebensdauervorhersage muss die Technische Risslänge den Punkt bezeichnen, ab dem die Rissausbreitung rechnerisch beschrieben werden kann.

Auch bei Lebensdaueruntersuchungen ohne ausgeprägte Überlasten wird zunehmend die bisherige Betrachtung der Anrissphase in Frage gestellt (Zerbst, et al., 2012). Mit einer Rissfortschrittsrechnung auch bei kurzen Rissen kann der überwiegende Teil der Lebensdauer vorhergesagt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für eine optimale Lebensdauerabschätzung betriebsbeanspruchter Bauteile sind fundierte Kenntnisse des Materialverhaltens, der Bauteilgeometrie sowie der tatsächlichen Beanspruchung des Bauteils erforderlich.

Aufgrund begrenzter technischer und experimenteller Möglichkeiten erfolgten die Untersuchungen des Materialverhaltens bisher im Schwerpunkt für lange Risse, was sich auch in einer hohen Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen wiederfindet.

Bei zyklischen einstufigen Belastungen lässt sich Ermüdungsrisswachstum mit den verbreiteten Verfahren und der auf lange Risse eingeschränkten Betrachtungsmöglichkeit nur für die letzten 10 bis 20 % der Lebensdauer sicher erfassen und beschreiben. Dennoch bilden diese Erkenntnisse die Grundlage für Untersuchungen der restlichen Lebensdauer, welche durch Anrissbildung und Kurzrisswachstum geprägt ist.

Somit bleibt es das erklärte Ziel, die Eigenschaften von Werkstoffen wie der verwendeten Aluminiumlegierung immer besser zu beschreiben, die verursachenden Mechanismen zu verstehen und den vorhersagbaren Bereich weiter auszudehnen.

Auch in der vorliegenden Arbeit konnte mit zweistufigen Lastkollektiven die abweichende Rissentwicklung unter realen Bedingungen angedeutet werden. Können mehr als 50 % der Lebensdauer eines Bauteils durch Rissfortschritt beschrieben werden, treten statistische Aspekte zur Lebensdauerabschätzung (abgesehen von der material- und herstellungsspezifischen Streuung) in den Hintergrund.

In konkreten Fällen konnte bei den durchgeführten Versuchen eine Rissausbreitung während mehr als 80 % der Lebensdauer detektiert werden. Dieser Umstand unterstützt aktuelle Bestrebungen, Lebensdauervorhersagen vollständig auf Rissfortschrittsrechnungen basieren zu lassen [(Zerbst, et al., 2012), (Wu, et al., 2003), (Kocanda, et al., 2012)].

Bei der Untersuchung des Langrisswachstums lag das Hauptinteresse auf der Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei periodisch auftretenden Überlasten. Hierzu konnten die Potenzialsondenmessungen entsprechender einzelner Schwingspiele fraktographisch verifiziert werden.

Die gegenüber dem Ermüdungsrisswachstum bei Grundlast deutlich erhöhten Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ wurden bei ausgewählten Überlastintervallen ($I= 100, 1.000$ bzw. 10.000 Ssp) experimentell ermittelt. Die festgestellte Wechselwirkung zwischen den Überlasten resultierte in einer unterschiedlich hohen Rissverlängerung. Während bei den untersuchten Lastkollektiven nach 10.000 Schwingspielen wieder von unbeeinflusster Überlastwirkung ausgegangen werden kann, zeigen kleinere Intervalle auch eine geringere Rissverlängerung $\Delta a_{\text{ÜL}}$.

Der festgestellte Zusammenhang wurde funktionell beschrieben und in das von *Brucksch* entwickelte Programm „Rissausbreitung“ implementiert (Brucksch, 2009). In Beispielrechnungen konnte die Verbesserung der Lebensdauervorhersage nachgewiesen werden.

Neben den Ergebnissen für lange Risse konnten auch Erkenntnisse über das Wachstum mechanisch kurzer Ermüdungsrissse gewonnen werden.

Die Überlasten wirkten als Markerloads und erzeugten auf den Bruchflächen markante Überlastlinien. Diese Linien ermöglichten die Beschreibung des Rissausbreitungsverhaltens (inklusive gemittelter Rissfortschrittsraten) für den überwiegenden Teil der Lebensdauer.

Für die unterschiedlichen Beschreibungsmöglichkeiten von Risslänge und –geschwindigkeit beim Kurzrissswachstum wurden die *optische*, die *vektorielle* sowie die *äquivalente* Darstellung eingeführt. Insbesondere bis zur Vereinigung verschiedener Anrisse zu einem gemeinsamen Ermüdungsriss (Risskoaleszenz) zeigen sich deutliche Abweichungen zwischen *vektorieller* und *äquivalenter* Betrachtung.

Mit den ermittelten (durchschnittlichen) Rissgeschwindigkeiten eröffnet sich nunmehr auch eine Möglichkeit, Spannungsintensitäten für kurze Risse sowie im Einflussbereich von Kerben experimentell zu bestimmen. Postuliert wurde hierbei, dass gleiche Rissfortschrittsraten durch gleiche Spannungsintensitäten verursacht werden. Somit lassen sich Abweichungen zu bekannten Korrekturfunktionen zum einen mit einer *vektoriellen* Betrachtung und zum anderen mit geometrischen, risslängenabhängigen Korrekturfunktionen beschreiben.

Die Arbeit darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass zwar die Beschreibung der Auswirkung von Überlasten verbessert, der ursächliche Mechanismus jedoch nicht herausgestellt wurde. Letztendlich ist ein verändertes Risswachstum die Reaktion auf eine äußere Belastung und erst mit Kenntnis dieses Mechanismus vollständig erklärbar. Daher darf die hier wie auch in anderen Arbeiten dargestellte Abhängigkeit einzelner Effekte von einer definierten Anzahl an Lastwechseln / Schwingspielen nicht einfach auf geänderte Versuchsbedingungen übertragen werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit müssen die Auswirkungen mit der Modellvorstellung einer Fließ- bzw. gebildeten plastischen Zone in Zusammenhang gebracht und verifiziert werden.

Diesen Gedanken folgend, liegt die Zukunft der rechnerischen Lebensdauerabschätzung für beliebige Lastverläufe im Einzelschrittverfahren, insbesondere wenn Einzeleffekte eine dominante Rolle einnehmen. Auch Abschätzungen, wann bestimmte Lastspiele zu einem „worst case“ führen, sind mit diesem Verfahren möglich.

Die Schädigungsgröße Risslänge ist hierbei mit Modellen zu kombinieren, die den Einfluss plastischer Zonen sowie der Bauteil- / Probengeometrie berücksichtigen.

7 Anhang

8 Literaturverzeichnis

Aebi, Andreas. 2011. Untersuchung der Wirkung von Überlasten im Zugschwellbereich an gelochten Flachproben AW7475-T761 (CCT-Proben). *Masterarbeit*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2011.

ALCOA. www.alcoa.com. [Online] [Zitat vom: 30. Mai 2012.]
http://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7475techplatesheet.pdf.

ASM. 2007. Aerospace Specification Metals Inc. 2007.

ASTM. 2008. Annual book of ASTM Standards. 2008. Bd. Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures.

ASTM International. 1965. Fracture Toughness Testing and its Applications. *ASTM STP 381*. 1965.

— **1996.** Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. 1996.

— **2013.** Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. 2013.

Bär, Jürgen und Wilhelm, Gero. 2012. Influence of overloads on the crack formation and propagation in EN AW 7475-T761. *Beitrag zur 19. European Conference on Fracture*. Kazan, Russland : s.n., 2012.

Bär, Jürgen. 2001. Vollautomatische Experimente zur Ermüdungsrissausbreitung. 2001, S. 242ff.

Barter, S.A. und Wanhill, R.J.H. 2008. Marker Loads for Quantitative Fractography of Fatigue in Aerospace Alloys. *NRL Client Report NLR-TR-2008-644*. Amsterdam : National Aerospace Laboratory, 2008.

Bazios, I. 1999. Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten einer AlMgSi-Legierung bei betriebsnaher Beanspruchung in korrosiven Medien. *Dissertation*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 1999.

Broek, D. 1982. Elementary Engineering Fracture Mechanics. Den Haag : Nijhoff Publishers, 1982. 4. Ed. ISBN 90-247-2580-1.

Broll, Michael. 2006. Charakterisierung des Rissausbreitungsverhaltens unter betriebsnaher Beanspruchung. *Dissertation*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2006.

Brucksch, Rolf. 2009. Betriebsfestigkeits- und Ermüdungsrissausbreitungsuntersuchungen an einer hochfesten Aluminiumknetlegierung aus der Luftfahrt, Dissertation. *Dissertation*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2009.

Celik, C.E, Vardar, O. und Kalenderoglu, V. 2004. Comparison of retardation behaviour of 2024-T3 and 7075-T6 Al alloys. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 27. 2004.

Christ, H.-J. (Ed.). 2009. Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe. Weinheim : WILEY-VCH, 2009.

de los Rios, E.R. und Miller, K.J. 1992. Short Fatigue Cracks. London : Mechanical Engineering Publications, 1992.

Deutsches Institut für Normung. 1993. Aluminium und Aluminiumlegierungen, Bezeichnungen für Werkstoffzustände. *DIN EN 515*. s.l. : Beuth Verlag, 1993.

DOLI. 2012. DOLI Elektronik Artikel 2012. [Online] Februar 2012. [Zitat vom: 18. 07 2012.] http://2007.doli.de/web/index.php?option=com_content&task=view&id=158&Itemid=176#Feb%2012.

Felsner, Thomas. 2012. Lebensdauervorhersage für geschweißte Bauteile unter Betriebsbelastung am Beispiel einer Aluminiumlegierung. *Dissertation*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2012.

Führung, H. und Seeger, T. 1984. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. *Subcritical crack growth due to fatigue, stress corrosion and creep*, S. 109-133. London : Elsevier Applied Science Publishers, 1984.

Gangloff, R. P., et al. 1992. Direct Current Electrical Potential Measurement of the Growth of Small Cracks. *Small Crack Test Methods, ASTM STP 1149*. s.l. : Larsen, J. M.; Allison, J. E. (Eds.), 1992.

Haibach, Erwin. 2006. Betriebsfestigkeit. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. 3. Auflage.

Heckel, Klaus. 1991. Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1991. 3. Auflage.

Heidemann, Jens. 2008. Ermüdungsrissoausbreitung in hochfesten Aluminium- und Titanlegierungen bei periodischen Überlasten. *Dissertation*. Hamburg : Technische Universität Hamburg-Harburg, 2008.

Johnson, H. H. 1965. Calibrating the Electric Potential Method for studying slow Crack Growth. *Materials Research and Standards Vol. 5 No. 9*. 1965, S. 442-445.

Klesnil, M. 1972. Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilization of Fatigue Cracks. *Engineering Fracture Mechanics*. 1972. 4.

Kocanda, D. und Jaszal, M. 2012. Probabilistic predicting the crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*. 2012. 39.

Krischker, Dirk. 2012. Untersuchung von Anrissbildung und Rissausbreitung in der Legierung EN AW 7475 T761 mittels Potenzialsondenmessung. *Masterarbeit*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2012.

Laird, C. und Thomas, G. 1967. On fatigue-induced reversion and overaging in dispersion strengthened alloy systems. *International Journal of fracture Mechanics*. 1967. 3.

Lardner, R.W. 1967. A dislocation model for fatigue crack growth in metals. *Philosophical Magazine*. 1967. 17.

Miller, K.J. 1982. The short crack problem. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 5. 1982.

Miner, M. 1945. Culmulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics, Vol. 12*. 1945.

Murakami, Y (Hrsg.). 1987. Stress Intensity Factors Handbook. Oxford : Pergamon Press, 1987.

Neuber, H. 1985. Kerbspannungslehre. s.l. : Springer-Verlag, 1985. 3. Auflage.

Niegel. 1986. *MJP*. 1986.

Nowack, H., et al. 1984. Darstellung und Bewertung von Modellen für die Ausbreitung kurzer Risse bei Schwingbeanspruchung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 15. 1984.

Paris, P. 1960. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*. 1960. 85.

Peters, J.O., Gysler, A. und Lütjering, G. 1998. Influence of Variable Amplitude Loading on Fatigue Crack Propagation of Al 7475. *Sato, T.; Kumai, S.; Kobayashi, T.; Murakami, Y. (Hrsg.): Aluminum Alloys - Their Physical and Mechanical Properties*. Tokyo : The Japan Institute of Light Metals, 1998. Bd. 3.

Petit, J., et al. 1988. Influence of microstructure and environment on fatigue crack propagation affected by single or repeated Overloads in a 7075 Alloy. *Petit, J. (Hrsg.): Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading*. s.l. : Elsevier Science Publishers, 1988. ISBN 1-85166-377-8.

Radaj, D. und Vormwald, M. 2007. Ermüdungsfestigkeit. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. 3. Auflage.

Richard, H. und Sander, M. 2009. Ermüdungsrisse. Wiesbaden : Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2009.

- Rödling, 2003.** Einfluss von Überlasten auf das Rissausbreitungsverhalten von Aluminiumlegierungen aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt. *Dissertation*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2003.
- Sander, M. und Richard, H.A. 2006.** Fatigue crack growth under variable amplitude loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 29. 2006.
- Schijve, J. 1972.** The Accumulation of fatigue damage in aircraft materials and structures. *AGARDograph No. 157*. München : Zentralstelle für Luftfahrtokumentation, 1972.
- Schijve, J., et al. 2004.** Fatigue crack growth in the aluminum alloy D16 under constant and variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue* 26. 2004.
- Schütz, W. 1976.** Lebensdauerberechnung bei Beanspruchung mit beliebigen Last-Zeit-Funktionen. *VDI-Berichte 268, S. 113/38*. 1976.
- . **1965.** Über eine Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und veränderlicher Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Bemessung von Flugzeugbauteilen. *Dissertation*. München : TH München, 1965.
- Schwalbe, K.-H. 1980.** Bruchmechanik metallischer Werkstoffe. Wien : Hanser-Verlag, 1980. 1. Ed.
- Skorupa, M. 1998.** Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 21. 1998.
- Steinbock. 2008.** Einfluss unterschiedlicher mechanischer Belastungen auf das Ermüdungsrisswachstum in Stählen und Aluminiumlegierungen. *Dissertation*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2008.
- Steinbock, J. und Gudladt, H.-J. 2011.** More insights into fatigue crack growth from experiments on steel and aluminium alloys –thresholds. *Material Science and Engineering*. 2011. Bd. MSE A 528, 1296-1301.
- Suresh. 1993.** *Fatigue of materials*. Cambridge : Cambridge University Press, 1993.
- Suresh, S. 1998.** *Fatigue of Materials*. Cambridge : University Press, 1998. Second Edition.
- Tanaka, K. 2003.** Fatigue crack propagation. *Ritchie, R.O.; Murakami, Y. (Ed.): Comprehensive Structural Integrity*. s.l. : Elsevier, 2003. Bd. Volume 4: Cyclic Loading and Fracture.
- Weertman, J. 2007.** Dislocation crack tip shielding and the Paris exponent. *Materials Science and Engineering: A* 468-470. 2007.
- Wheeler, O. 1972.** Spectrum Loading and Crack Growth. *Journal of Basic Engineering Vol. 94*. 1972.

Willard, S.A. 1997. Use of Marker Bands for Determination of Crack Growth Rates and Crack Front Shapes in Pre-Corroded Coupons. *NASA/CR-97-206291*. Hampton, Virginia : NASA Langley Research Center, 1997.

Wu, W.F. und Ni, C.C. 2003. A study of stochastic fatigue crack growth modelling through experimental data. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2003. 18.

Zerbst, Uwe, Madia, Mauro und Hellmann, Dieter. 2012. Fracture mechanics model for predicting fatigue strength of metallic alloys containing large second phase particles . *European Conference on Fracture (ECF)*. Kazan : s.n., 2012. Bd. Konferenzband.

Zhang, S., et al. 1987. Crack Propagation Studies on Al 7475 on the Basis of Constant Amplitude and Selective Variable Amplitude Loading Histories. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1987. Bd. Vol. 10, No. 4, S. 315 - 332.

9 verwendete Parameter für Rissfortschrittsrechnung

	R= 0	R= -1	R= -1 (ΔK)
n	2,88	3,29	3,26
C	1,85 E-10	1,5 E-10	1,62 E-11

Tabelle 9-1: Paris-Parameter

Anpassung der charakteristischen Rissausbreitungskurve	Bereich I	m₁	2,46
		C₁	4,1 E-10
	Bereich II	m₂	3,52
		C₂	1,06 E-10
	Bereich III	m₃	1,95
		C₃	3,16 E-9
Werte aus alternativem Schwellenwertexperiment	da/dN_{alt} (R= -1) in m/Ssp		1,28 E-7
	C₀		4 E-10
	a		-0,456
	b		0,38
	c		5,084
	K_{max, th, krit} (R= -1) in MPa√m		1,05
	$\Delta K_{th, krit}$ (R= -1) in MPa√m		2,15
Bruchzähigkeit	K_c in MPa√m		

Tabelle 9-2: Steinbock-Parameter

10 Formel- und Abkürzungsverzeichnis

a	Risslänge
$a_{\text{äqui}}$	äquivalente Risslänge
a_f	Endrisslänge, Risslänge bei Probenversagen
a_i	Risslänge des Anrisses
a_k	Kerbtiefe
a_{tech}	technischer Anriss
a_{opt}	optische Risslänge
a_{vekt}	vektorielle Risslänge
Δa	Rissverlängerung
$\Delta a_{\text{ÜL}}$	Rissverlängerung während einer Überlast
$\Delta a_{\text{EÜL}}$	Rissverlängerung während einer Einzelüberlast
$\Delta a_{\text{PÜL}}$	Rissverlängerung während einer periodischen Überlast
$\frac{\Delta a}{\Delta N}$	Rissfortschrittsrate / Rissgeschwindigkeit
A	Rissfläche
B	Probenbreite (Abmessung in z-Richtung)
C	Lageparameter der Rissausbreitungskurve
CCT-Probe	Probenform mit Mittelloch, <i>center cracked tension specimen</i>
COD	Rissöffnungsverschiebung, <i>crack opening displacement</i>
CTOD	Rissöffnungsverschiebung der Rissspitze, <i>crack tip opening displacement</i>
$\frac{da}{dN}$	Rissfortschrittsrate / Rissgeschwindigkeit
E	Elastizitätsmodul
ERIKA	Versuchsanlage für Ermüdungsrissausbreitung in korrosiven Atmosphären
f	Frequenz
$f\left(\frac{a}{W}\right)$	dimensionslose Korrekturfunktion zur Berechnung der Spannungsintensität
$f(I)$	überlastintervallabhängige Skalierung für $\Delta a_{\text{PÜL}}$
F	Kraft

G	Schubmodul
GL	Grundlast
I	Überlastintervall
K	Spannungsintensität / Spannungsintensitätsfaktor
K_C	kritische Spannungsintensität
K_{max}	maximale Spannungsintensität
K_{min}	minimale Spannungsintensität
K_{GL}	Spannungsintensität der Grundlast
K_{th}	Schwellenwert der Spannungsintensität (<i>th= threshold</i>)
k_t	Kerbfaktor
$K_{ÜL}$	Spannungsintensität der Überlast
K_I	Spannungsintensität im Belastungsmodus I
ΔK	zyklische Spannungsintensität
LEBM	linear elastische Bruchmechanik
n	Steigung der Rissausbreitungskurve im Paris-Bereich
N	Schwingspielzahl
N_f	Lebensdauer, Bruchspielzahl (<i>f= failure</i>)
N_i	Anrisslebensdauer
N_{Ic}	Lebensdauer Langrisswachstum
N_{Sc}	Lebensdauer Kurzrisswachstum
R	Spannungsverhältnis
RAR	Rissausbreitungsrichtung
REM	Rasterelektronenmikroskop
S_a	Spannungsamplitude
$S_{a, GL}$	Spannungsamplitude der Grundlast
$S_{a, ÜL}$	Spannungsamplitude der Überlast
SEN-Probe	einseitig gekerbte Probe, <i>single edge notched specimen</i>
U_i	aktueller Spannungswert der Potenzialsonde
U_0	Potenzialsondenspannung bei Messbeginn
ÜL	Überlast
W	Probentiefe (Abmessung in x-Richtung)
y_0	Abstand des Potenzialabgriffs zur Kerbmitte

α	Überlastfaktor
β	Anpassungsparameter im CTOD-Konzept
δ	Rissöffnungsverschiebung
σ	mechanische Spannung
σ_{\max}	Maximalspannung
σ_{\min}	Minimalspannung
σ_{ys}	Fließspannung (<i>ys= Yield Strength</i>)
τ	Schubspannung

Indizierungen

äqui	äquivalent
e	elastisch
EÜL	Einzelüberlast
eff	effektiv
f	<i>failure</i>
GL	Grundlast
k	Kerbe
krit	kritisch
loc	lokal
max	maximal
opt	optisch
PÜL	periodische Überlast
ÜL	Überlast
ys	<i>Yield Strength</i>
x, y, z	Richtungen gem. Koordinatensystem

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Kenngrößen zyklischer Beanspruchung.....	3
Abbildung 2-2: Phasen der Rissausbreitung (Radaj, et al., 2007), (Richard, et al., 2009).....	4
Abbildung 2-3: Spannungsfeld vor der Rissspitze	5
Abbildung 2-4: Rissöffnungsarten [nach (Broek, 1982)]	6
Abbildung 2-5: schematische Rissausbreitungskurve	7
Abbildung 2-6: Darstellung mehrdimensionale Rissausbreitungskurve [nach (Steinbock, 2008)]	8
Abbildung 2-7: Ermüdungsbruchfläche und zugehörige Lastfolgen (Barter, et al., 2008)	10
Abbildung 2-8: Betriebslast (links) und experimentelle Simulation [nach (Richard, et al., 2009)]	10
Abbildung 2-9: Variationsmöglichkeiten mechanischer Lastfolgen nach Sander (Sander, et al., 2006).....	11
Abbildung 2-10: Auswirkung einer einzelnen Überlast auf die Rissausbreitungsgeschwindigkeit (Heidemann, 2008)	12
Abbildung 2-11: Vergleich der Auswirkungen von Zug und Zug-Drucküberlasten nach Schijve (Schijve, 1972)	13
Abbildung 3-1: Geometrie CCT-Proben.....	17
Abbildung 3-2: Versuchsführung R= -1 mit Überlasten ($\alpha= 3$).....	19
Abbildung 3-3: Versuchsführung R= 0 mit Überlasten ($\alpha= 1,5$)	20
Abbildung 3-4: Versuchsaufbau schematisch	21
Abbildung 3-5: Probenkammer und Spannzeug für CCT-Proben (Brucksch, 2009).....	22
Abbildung 3-6: Versuchsanlage ERIKA, parallel geführte Einspannungen mit SEN-Probe	23
Abbildung 3-7: Simulation der elektrischen Potenzialverteilung SEN-Probe	24
Abbildung 3-8: Bezeichnungen zur Risslängenberechnung	26
Abbildung 3-9: Vergleich in-situ Risslängenmessung mit Fraktographie.....	28
Abbildung 3-10: Bruchfläche einer SEN-Probe zur Kalibrierung.....	29
Abbildung 3-11: Kalibrierung der Potenzialsonde	29
Abbildung 4-1: Proben-Wöhlerlinien CCT-Proben R= -1 und R= 0, nach (Brucksch, 2009)	31
Abbildung 4-2: Proben-Wöhlerlinien SEN-Proben R= -1 und R= 0.....	32
Abbildung 4-3: Ergebnisübersicht CCT-Proben R= -1	33
Abbildung 4-4: Ergebnisübersicht SEN-Proben R= -1.....	34
Abbildung 4-5: Ergebnisübersicht CCT-Proben R= 0	35
Abbildung 4-6: Ergebnisübersicht SEN-Proben R= 0.....	36
Abbildung 4-7: Bruchfläche SEN-Probe R= -1, Sa= 100 MPa, l= 10.000.....	37
Abbildung 4-8: Endrisslängen CCT-Proben, R= -1	38
Abbildung 4-9: Endrisslängen SEN-Proben R= 0	39
Abbildung 4-10: Überlastexperiment Sa= 90 MPa, l= 10.000, R= -1, SEN-Probe	41
Abbildung 4-11: Vergleich Risswachstum für l= 1.000 CCT-Proben R= -1	42
Abbildung 4-12: Vergleich Rissentwicklung Sa= 90 MPa, CCT-Proben R= -1	43

Abbildung 4-13: Vergleich Rissentwicklung über normierter Lebensdauer $S_a = 90$ MPa CCT-Proben $R = -1$	44
Abbildung 4-14: Überlastexperiment $S_a = 60$ MPa, $I = 1.000$, $R = 0$ SEN-Probe.....	45
Abbildung 4-15: Vergleich Rissentwicklung über normierter Lebensdauer $S_a = 90$ MPa CCT-Proben $R = 0$	46
Abbildung 4-16: Anrisse im Kerbgrund, CCT-Probe $R = 0$; $I = 10.000$ (Aebi, 2011).....	47
Abbildung 4-17: REM-Aufnahme halb elliptischer Anriss (3000-fache Vergrößerung, CCT-Probe, $R = 0$; $I = 1.000$)	48
Abbildung 4-18: Rissfortschrittsraten für SEN-Proben $R = -1$	49
Abbildung 4-19: Rissfortschrittsraten für SEN-Proben $R = 0$	50
Abbildung 4-20: (Teil)Bruchfläche einer Anrissprobe (II.55).....	52
Abbildung 4-21: Bruchfläche einer SEN-Probe (II.9) mit markierten Überlastlinien (rot) und Risspfaden (grün)	54
Abbildung 4-22 optische Risslängen SEN-Anrissprobe ($R = -1$; $I = 10.000$).....	55
Abbildung 4-23: vektorielle Risslängen	56
Abbildung 4-24: Betrachtung von Risslängen (schematisch).....	57
Abbildung 4-25: Vergleich von fraktographisch und mittels Potenzialsonde bestimmten Risslängen.....	58
Abbildung 4-26: Rissgeschwindigkeiten Anrissprobe $R = -1$	59
Abbildung 4-27: Eckanriss SEN-Probe nach 25 Überlasten ($R = 0$)	61
Abbildung 4-28: Abgleich $\Delta a_{\text{ÜL}}$ zwischen Bruchfläche und ermittelter Risslänge (SEN-Probe).....	63
Abbildung 4-29: Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei unterschiedlichen ÜL-Intervallen, $R = -1$	65
Abbildung 4-30: Rissverlängerungen $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei unterschiedlichen ÜL-Intervallen, $R = 0$ (Krischker, 2012).....	66
Abbildung 4-31: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I = 100$, $R = -1$	67
Abbildung 4-32: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I = 1.000$, $R = -1$	67
Abbildung 4-33: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I = 10.000$, $R = -1$	68
Abbildung 4-34: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I = 100$, $R = 0$	69
Abbildung 4-35: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I = 1.000$, $R = 0$	70
Abbildung 4-36: beeinflusste Rissausbreitung SEN, $I = 10.000$, $R = 0$	70
Abbildung 5-1: Vergleich Wöhlerlinien CCT- und SEN-Proben	75
Abbildung 5-2: Risslänge bei Probenversagen (schematisch).....	77
Abbildung 5-3: Überlastrischwachstum SEN-Proben, $R = -1$	79
Abbildung 5-4: Interferenzfunktion für $\Delta a_{\text{ÜL}}$ bei $R = -1$	82
Abbildung 5-5: Rissfortschrittsraten aus einstufiger Belastung $R = -1$	85
Abbildung 5-6: Verlauf des Beeinflussungsfaktors (Brucksch, 2009).....	87
Abbildung 5-7: Einfluss des Gewichtungsfaktors, Beispielrechnung für $I = 1.000$ Ssp	88
Abbildung 5-8: Einfluss des Gewichtungsfaktors, Beispielrechnung für $I = 10.000$ Ssp	88
Abbildung 5-9: Entwicklung der Rissgeschwindigkeit (schematisch).....	91
Abbildung 5-10: Ermittlung der Spannungsintensität kurzer Risse	92
Abbildung 5-11: durch Kerbwirkung beeinflusste Rissgeschwindigkeiten	93

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: chemische Zusammensetzung von Grundmaterial und Plattierschicht	15
Tabelle 3-2: Werkstoffkennwerte EN AW 7475 T761	16
Tabelle 5-1: Rissverlängerungen $\Delta a_{P\ddot{U}L}$ für R= -1	80
Tabelle 9-1: Paris-Parameter	103
Tabelle 9-2: Steinbock-Parameter	103