

Charakterisierung des
Rißausbreitungsverhaltens unter
betriebsnaher Beanspruchung

Dipl.-Ing. Michael Broll

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Werkstoffkunde

Charakterisierung des Rißausbreitungsverhaltens unter betriebsnaher Beanspruchung

Dipl.-Ing. Michael Broll

Vollständiger Abdruck der bei der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) eingereichten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Rapp
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gudladt
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H.-J. Christ

Die Dissertation wurde am 17.05.2006 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 17.05.2006 angenommen.

Tag der Prüfung: 29. August 2006

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München.

Mein Dank gilt allen voran dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gudladt. Er gewährte vertrauensvoll Freiraum und förderte nicht zuletzt durch seine stete Diskussionsbereitschaft und zahlreichen Anregungen das Gelingen dieser Arbeit.

Für die Übernahme der Mitberichterstattung und die damit verbundenen Mühen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Christ gleichermaßen wie dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Rapp.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. J. Bär, der stets ein offenes Ohr für die experimentellen Schwierigkeiten hatte. Er wurde nie müde, die Arbeit durch förderliche Diskussionen zu unterstützen.

Meiner Kollegin Frau Dipl.-Ing. J. Mladek danke ich für die experimentelle Unterstützung. Herrn Dr.-Ing. S. Rödling möchte ich für die freundliche Überlassung von Meßergebnissen zur eigenen Auswertung danken.

Herrn G. Semmelmann sei für die Fertigung der Proben und die Wartung der Versuchsanlage Erika 3 besonders gedankt.

Der guten Seele des Instituts, Frau W. Müller, möchte ich an dieser Stelle für die Unterstützung der zahlreichen administrativen Aufgaben ebenfalls danken.

Weiterhin möchte ich allen Studenten der Universität danken, die mit einer Studien- oder Diplomarbeit einen Beitrag geleistet haben.

Neubiberg, im September 2006

Michael Broll

Meiner Frau

Alexandra Johanna

und meinen Kindern

Tibor Pascal

Kira Sophie

Cathrine Marie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Die Mechanik an der Rißspitze	4
2.1.1 Spannungsverteilung vor der Rißspitze	4
2.1.2 Rißausbreitung	11
2.2 Einflüsse auf die Ermüdungsrißausbreitung	16
2.2.1 Rißschließen	16
2.2.2 Einfache Überlasten	18
2.2.3 Mehrfache Überlasten	21
2.3 Lineare Hypothese der Schadensakkumulation	22
3 Versuchsbeschreibung	25
3.1 Werkstoff	25
3.2 Probenform	26
3.3 Die Versuchsanlage ERIKA 3	26
3.3.1 Optische Rißlängenbestimmung	28
3.3.2 Gleichstrompotentialsonde	28
3.3.3 Genauigkeit der Gleichstrompotentialmethode	30
3.3.4 Rißausbreitungskurven	31
3.3.5 Versuchsregelung	32
3.3.6 Einbringen von Überlasten	35
4 Ergebnisse	38
4.1 Einfluß einer Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung	38
4.2 Auswertung des Potentialverlaufs	41
4.3 Einfache Überlasten	42
4.3.1 Verzögerungsbereich der Überlasten	42

4.3.2	Rißfortschritt bei maximaler Verzögerung	48
4.3.3	Rißfortschritt im Überlastzyklus	52
4.3.4	Akkumulation von Überlasten	54
4.4	Mehrfache Überlasten	57
4.5	Bruchflächenanalyse der mehrfachen Überlasten	60
5	Diskussion	71
5.1	Rißlängenunabhängigkeit der Potentialsondenhysteresen	71
5.2	Auswertung der Potentialsondenhysteresen	73
5.2.1	Einfache Überlasten	76
5.2.2	Akkumulation von Überlasten	79
5.2.3	Mehrfache Überlasten	81
5.3	Lastinteraktionen bei einfachen Überlasten	88
5.3.1	Reihenfolgeeinfluß	88
5.3.2	Rißspitzenmechanik	94
5.4	Rißausbreitung bei mehrfachen Überlasten	100
5.4.1	Monotone und zyklische Rißausbreitung	100
5.4.2	Lastabsenkung nach mehrfachen Überlasten	104
5.5	Überlegungen zur Versetzungsstruktur bei Rißausbreitung	106
6	Zusammenfassung	110
	Glossar	114
	Literaturverzeichnis	117

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Rißöffnungsmodi _____	4
Abb. 2.2:	Geometrische Beschreibung der Rißspitze _____	6
Abb. 2.3:	Ausdehnung der plastischen Zone vor der Rißspitze _____	9
Abb. 2.4:	Makroskopische Abgleitungen in einer rißbehafteten Probe _____	10
Abb. 2.5:	Unendlich ausgedehnte Scheibe mit <i>Griffith</i> -Riß _____	11
Abb. 2.6:	Beschreibung einer sinusförmigen Belastung _____	14
Abb. 2.7:	Beanspruchungsbereiche einer Schwingbeanspruchung _____	14
Abb. 2.8:	Schematische Rißausbreitungskurve _____	15
Abb. 2.9:	Effektive Spannungsintensität ΔK_{eff} _____	17
Abb. 2.10:	Einfluß einer einfachen Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung _____	18
Abb. 2.11:	Vergleich Zug- mit Zug/Druck-Überlast _____	20
Abb. 2.12:	Eigenspannungen vor der Rißspitze nach einer Überlast _____	21
Abb. 2.13:	Einfluß von Überlastblöcken auf die Ermüdungsrißausbreitung _____	22
Abb. 2.14:	Palmgren-Miner-Regel schematisch _____	23
Abb. 3.1:	Bemaßte SEN-Probe _____	26
Abb. 3.2:	Probenkammer Erika 3 _____	27
Abb. 3.3:	SEN - Probe mit Potentialabgriffen _____	29
Abb. 3.4:	Fehlerbetrachtung der Rißlängenmessung _____	31
Abb. 3.5:	Rißausbreitungskurven für Al 6013 T62 in Laborluft _____	32
Abb. 3.6:	Regelung der Spannungsintensität _____	33
Abb. 3.7:	Rißgeschwindigkeit bei Regelung einer Spannungsintensität von $K_{\text{max}} = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $R = -1$ _____	34
Abb. 3.8:	Kraftverlauf einer symmetrischen Überlast _____	36

Abb. 3.9:	Vergleich des Verlaufs der Spannungsintensität und Kraft bei einem Überlastblock von 622 Überlastzyklen _____	37
Abb. 4.1:	Einfluß einer Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung ____	39
Abb. 4.2:	Überlasteinfluß und Lebensdauergewinn _____	40
Abb. 4.3:	Auswertung des Potentialverlaufs einer 200%-Zug/Druck-Überlast_____	41
Abb. 4.4:	Ausdehnung der Verzögerungsbereiche der Druck/Zug-Überlasten _____	43
Abb. 4.5:	Verzögerungsbereich der Druck/Zug-Überlasten _____	44
Abb. 4.6:	Verzögerungsbereich der Zug/Druck-Überlasten _____	46
Abb. 4.7:	Verzögerungsbereich der Zugüberlasten bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ _____	47
Abb. 4.8:	Minimale Rißfortschrittsrate bei Druck/Zug-Überlasten____	48
Abb. 4.9:	Minimale Rißfortschrittsrate bei Zug/Druck-Überlasten____	50
Abb. 4.10:	Minimale Rißfortschrittsrate der Zugüberlasten mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ _____	51
Abb. 4.11:	Beschleunigter Rißfortschritt bei Druck/Zug-Überlasten ____	52
Abb. 4.12:	Beschleunigter Rißfortschritt der Zugüberlasten bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ _____	53
Abb. 4.13:	Akkumulation von einfachen Zugüberlasten _____	54
Abb. 4.14:	Minimale Rißfortschrittsrate je Überlast bei der Akkumulation von Zugüberlasten _____	55
Abb. 4.15:	Distanz zur jeweiligen minimalen Rißfortschrittsrate bei der Akkumulation von Zugüberlasten _____	56
Abb. 4.16:	Rißfortschritt pro Zyklus im Überlastblock bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ _____	58
Abb. 4.17:	Rißfortschritt pro Zyklus im Überlastblock bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ _____	59
Abb. 4.18:	Probe mit 2 Überlastblöcken _____	60

Abb. 4.19: Übergang Grundlast - Überlastblock 150%	61
Abb. 4.20: Übergang Grundlast - Überlastblock 150% - Restbruch	62
Abb. 4.21: Probe mit 2 Überlastblöcken von 200%	63
Abb. 4.22: Überlastblock von 200% nahe dem Probenrand	64
Abb. 4.23: Überlastblock 300%	65
Abb. 4.24: Wabenstruktur und Nebenrisse am Anfang eines Überlastblockes	65
Abb. 4.25: Übergang Wabenstruktur - Schwingungsstreifen im Überlastblock	66
Abb. 4.26: Schwingungsstreifen im Überlastblock	67
Abb. 4.27: Grundlastwechsel von $R = -1$ auf $R = 0,7$	68
Abb. 4.28: Überlastblock 100% bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$	68
Abb. 4.29: Wabenstruktur am Anfang eines 100% Überlastblockes bei $R = 0,7$	69
Abb. 5.1: Spannungs-Potential-Hysteresen bei unterschiedlichen Gesamtrißlängen für $R = -1$	72
Abb. 5.2: Potentialsondenhysteresen bei unterschiedlichen Gesamtrißlängen $R = -1$	73
Abb. 5.3: Bestimmung der Potentialsondenhysteresenfläche bei $R = -1$	75
Abb. 5.4: Bestimmung der Potentialsondenhysteresenfläche bei $R = 0,7$	76
Abb. 5.5: Potentialsondenhysteresenfläche und beschleunigter Rißfortschritt bei $R = -1$	77
Abb. 5.6: Beschleunigter Rißfortschritt bei unterschiedlichen Grundlasten	78
Abb. 5.7: Einfluß von Grundlast und Spannungsverhältnis auf die Potentialsondenhysteresenfläche	79

Abb. 5.8: Auswertung der Potentialsondenhysteresenflächen bei der Akkumulation von Zugüberlasten	80
Abb. 5.9: Potentialsondenhysteresen bei der Akkumulation von 200%-Zugüberlasten	81
Abb. 5.10: Überlastblöcke bei $R = -1$	82
Abb. 5.11: Potentialverlauf eines 300%- Überlastblockes	84
Abb. 5.12: Überlastblöcke bei $R = 0,7$	86
Abb. 5.13: Potentialverlauf eines 150%- Überlastblockes bei $R = 0,7$	87
Abb. 5.14: Modell nach <i>Willenborg</i> und <i>Wheeler</i>	89
Abb. 5.15: Drucküberlasteinfluß auf den Verzögerungsbereich	90
Abb. 5.16: Drucküberlasteinfluß auf die minimale Rißfortschrittsrate	91
Abb. 5.17: Statistische Auswertung des Drucküberlasteinflusses auf die minimale Rißfortschrittsrate	92
Abb. 5.18: Einfluß des Spannungsverhältnis auf den Verzögerungsbereich bei Zugüberlasten	98
Abb. 5.19: Einfluß des Spannungsverhältnis auf den Rißfortschritt im Überlastzyklus bei Zugüberlasten	99
Abb. 5.20: Rißausbreitungscharakteristika	101

1 Einleitung

Versagt ein Bauteil bei Belastungen weit unter seiner statischen Festigkeit in Folge zyklischer Beanspruchung, so ist dies das Phänomen der Ermüdung.

Die wahrscheinlich erste veröffentlichte Auseinandersetzung mit dem Phänomen Ermüdung fand 1837 statt [Alb837]. Der Jurist *W. A. J. Albert* setzte sich intensiv im Silberbergbau mit der Verbesserung von Haltbarkeit und Sicherheit der eingesetzten Ketten auseinander. Die Ketten verdrängten auf Grund der zunehmenden Fördertiefen die zuvor eingesetzten Hanfseile. Durch den Umlauf über die treibenden Kettenräder kam es regelmäßig zu Brüchen der Ketten. Da die Ursache lange unklar war, unternahm er ab 1829 gezielte Versuche, die Festigkeit unter zyklischer Beanspruchung zu ermitteln.

Mit zunehmender technischer Entwicklung gewann auch die Ermüdung an Bedeutung. Die Eisenbahn erfuhr zyklische Belastungen mit hohen Lastspielzahlen. Die an Eisenbahnachsen resultierenden Schäden veranlaßten den damaligen Leiter der „Central-Werkstatt der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt an der Oder“, *August Wöhler*, ab 1858 umfangreiche Untersuchungen zur Ermüdung durchzuführen. Er stellte Überlegungen zur Messung von Biegung und Torsion an Eisenbahnachsen und zur Abhängigkeit der ertragbaren Lastspielzahl von der Belastung an. Nach zwölf Jahren Forschung veröffentlichte er 1870 seine Ergebnisse [Wöh870]. Ihm zu Ehren wurde die graphische Auftragung der Spannung über den ertragbaren Lastwechseln später nach ihm benannt.

Bei der *Wöhler*-Kurve werden konstante Beanspruchungsamplituden vorausgesetzt. Diese Voraussetzung war z. B. bei Kugellagern nicht gegeben, da dort eine veränderliche Belastung vorlag. Damit war die Notwendigkeit gegeben, eine Lebensdauervorhersage zu entwickeln. Dieser lag die Fragestellung zu Grunde, wie ein Bauteil in Abhängigkeit der einzelnen Belastungsamplituden geschädigt wird und wann es versagt. Die Ingenieure *Arvid Palmgren* und *Milton A. Miner* stellten 1924 bzw. 1945 eine Hypothese zur Beantwortung dieser Frage auf. Jedes aufgebrauchte Lastspiel schädigt das Bauteil anteilig der aus der *Wöhler*-Kurve ermittelten ertragbaren Lastspielzahl. Die Teilschädigungen werden linear akkumuliert und führen zum Bauteilversagen, wenn die Summe der Teilschädigungen den Wert Eins erreicht. Eine notwendige Voraussetzung ist dabei, daß sich die einzelnen Belastungsamplituden nicht beeinflussen [Palm24, Mine45].

Die heute als *Palmgren-Miner*-Regel bekannte lineare Schadensakkumulationshypothese ergibt regelmäßig große Abweichungen vom Experiment. Dies ist die Ursache für Modifikationen dieser Regel und der Einführung neuer Modelle zur Lebensdauervorhersage [Haib70, Liu93, Liu95, Zenn95], die innerhalb gesetzter Grenzen eine gute Übereinstimmung mit Experimenten liefern können. Das angestrebte Ziel ist auch heute noch eine zuverlässige Lebensdauervorhersage unter betriebsnaher Beanspruchung.

Die Lebensdauer eines Bauteils kann grundsätzlich in zwei Phasen unterteilt werden. Die erste Phase besteht aus der Bildung eines technischen Anrisses. Unter einem technischen Anriß wird ein Riß verstanden, der sicher detektierbar ist. Eine statistische Betrachtung der An-

rißerzeugung wurde z. B. in [Krüg96, Bazi99] durchgeführt. Daran schließt sich die zweite Phase der Rißausbreitung an, die z. B. durch die Atmosphäre [Volp99] oder einzeln eingebrachte Überlasten [Roed03] beeinflusst werden kann.

In der zweiten Phase kann der Riß als Schädigungsgröße für eine lineare Schadensakkumulation angesehen werden. Obwohl sich ein Ermüdungsriß mit der linear elastischen Bruchmechanik beschreiben läßt, ist die Akkumulation von Rißfortschrittsinkrementen nicht linear. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb der Riß allein als Schädigungsgröße in Frage gestellt und statt dessen die plastische Zone vor der Rißspitze mit betrachtet.

Dazu wird eine grundlegende Untersuchung der Ermüdungsrißausbreitung mit eingebrachten Spitzenbelastungen durchgeführt. Da bei Betriebslastfolgen die Interaktion der Belastungsamplituden für das Rißausbreitungsverhalten maßgeblich ist, wird im ersten Schritt die gegenseitige Beeinflussung zweier Überlasten analysiert. Eine einfache Variante einer Betriebslastfolge stellt eine als Überlastblock mehrfach eingebrachte Überlast dar. Die Ergebnisse der Untersuchung von Überlastblöcken werden im nächsten Schritt mit den Ergebnissen der einzeln eingebrachten Überlasten verglichen.

Das Ziel der Arbeit ist es, ein besseres Verständnis der Rißausbreitung zu erlangen, was eine notwendig Voraussetzung für eine Verbesserung der Lebensdauervorhersage ist.

2 Grundlagen

Zur Beurteilung von Bruchvorgängen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die Analyse der Bruchfläche ist eine praktikable und recht eindeutige Möglichkeit Hinweise auf die Ursachen für einen Versagensvorgang zu finden. Ausgehend von der Beschaffenheit der Bruchfläche gibt [Alli64, Gerl74] Hinweise auf die möglichen Ursachen für das Versagen. Zum Beispiel sind für eine Ermüdungsbruchfläche Schwingungstreifen typisch, oder eine Wabenstruktur für einen Gewaltbruch. Dies reicht jedoch in der Praxis nicht aus, um Schadensereignisse vollständig zu beschreiben und nachzuvollziehen. Deshalb ist die weiterführende Untersuchung des Schadensfalles mit der Bruchmechanik nötig.

2.1 Die Mechanik an der Rißspitze

2.1.1 Spannungsverteilung vor der Rißspitze

Wird ein rißbehaftetes Bauteil belastet, so verschieben sich die Rißufer. Diese Rißöffnung wird je nach Lasteinleitung in drei grundsätzliche Modi unterteilt, Abbildung 2.1 [Broe86].

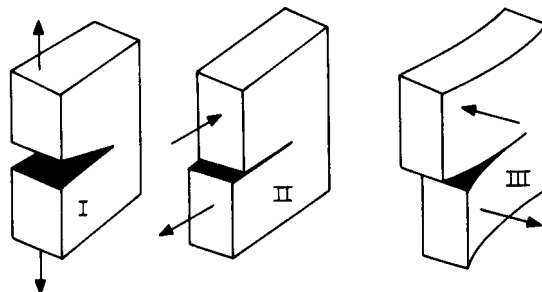


Abbildung 2.1: Rißöffnungsmodi

Der Modus I ist wohl der am häufigsten untersuchte Fall. Er tritt unter reiner Zugbeanspruchung auf, wodurch die Rißufer voneinander abgehoben, bzw. unter reiner Druckbeanspruchung zusammengedrückt werden. Der Modus II wird als Längsschub charakterisiert. Die Beanspruchung mit Querschub oder Torsion stellt den Modus III dar.

Die verschiedenen Rißöffnungsmodi treten in der Praxis häufig nicht isoliert auf, sondern sie überlagern sich bei komplizierten Belastungen oder bei einem nicht idealen Riß. Soll eine solche Belastung analytisch beschrieben werden, so ist zum einen die Kenntnis des Spannungsverlaufes vor der Rißspitze nötig und zum anderen müssen die analytischen Lösungen der beteiligten Rißöffnungsmodi superponiert werden.

Westergaard stellte für eine die Rißspitze beschreibende unendlich schmale Ellipse elastische Spannungsgleichungen auf [West39], die von *Sneddon*, *Williams* und *Irwin* [Sned46, Irwi57, Will57] für einen unendlich scharfen Riß vereinfacht wurden, Gleichung 2.1.

$$\begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3}{2}\Theta\right) \\ 1 + \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3}{2}\Theta\right) \\ \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{3}{2}\Theta\right) \end{pmatrix} \quad 2.1$$

In Abbildung 2.2 [nach Heck83] ist die zur Herleitung der *Sneddon*-Gleichungen zugehörige Rißspitze zu sehen.

Die äußere Belastung ist in Gleichung 2.1 im Spannungsintensitätsfaktor K enthalten, der nach Gleichung 2.2 berechnet wird.

$$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) = \sigma_\infty \sqrt{a} \cdot Y\left(\frac{a}{w}\right) \quad 2.2$$

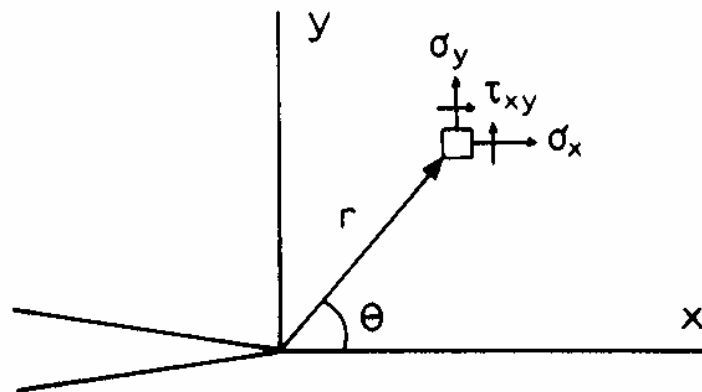


Abbildung 2.2: Geometrische Beschreibung der Rißspitze

Der Index I weist auf den Rißöffnungsmodus I hin. Im folgenden wird der Rißöffnungsmodus I vorausgesetzt und deshalb auf den Index verzichtet. σ_∞ ist dabei die auf den Querschnitt bezogene äußere Kraft, a ist die Länge des vorhandenen Risses und die Funktion $f(a/w)$ ist ein Korrekturpolynom, das den Einfluß der Probengeometrie auf die Spannungsintensität berücksichtigt. Ist der Faktor $\sqrt{\pi}$ bereits im Korrekturpolynom enthalten, wird dieses als $Y(a/w)$ angegeben. Für eine einseitig gekerbte Flachprobe mit paralleler Probenführung lautet die Korrekturfunktion [Schw80]:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{5}{\sqrt{20 - 13 \cdot \left(\frac{a}{w}\right) - 7 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2}} \quad 2.3$$

Der Spannungsintensitätsfaktor K ist damit eine einparametrische Beschreibung der Belastung, da er die Einflußgrößen äußere Kräfte und vorhandene Rißlänge miteinander kombiniert. Damit ist ein Bauteil einer gleichen wirksamen Belastung ausgesetzt, wenn entweder eine hohe äußere Kraft auf einen kurzen Riß wirkt oder eine niedrige äußere Kraft auf einen langen Riß.

Gleichung 2.1 enthält eine Proportionalität der Form $\sigma \sim 1/\sqrt{r}$. Diese aus der Vereinfachung resultierende Singularität beschränkt den Gültigkeitsbereich dieser Gleichung auf die Nähe der Rißspitze. Für $r \rightarrow 0$ nimmt die Spannung σ vor der Rißspitze unendlich hohe Werte an, was jedoch unrealistisch ist. Bei Erreichen der Fließgrenze σ_{ys} (yield strength = engl. Fließgrenze) setzt plastisches Fließen ein und es bildet sich eine plastische Zone vor der Rißspitze aus. Dies kann beispielsweise durch ein Modell mit elastisch - ideal plastischem Materialverhalten beschrieben werden. Für $r \rightarrow \infty$ geht die Spannung gegen Null, was ebenfalls nicht korrekt ist. Mit großem Abstand zur Rißspitze, die eine Spannungsüberhöhung verursacht, ist die wirksame Spannung gleich der äußeren Belastung und damit ungleich Null.

Einen zusätzlichen Einfluß auf den Spannungsverlauf im Material übt der Spannungszustand aus. Dieser ist direkt von der Bauteilgeometrie abhängig. In einer sehr dicken unendlich ausgedehnten rißbehafteten Scheibe stellt sich an der Oberfläche der Ebene Spannungszustand (ESZ) ein, während sich im inneren der Scheibe der Ebene Verformungszustand einstellt (EVZ). Die für den EVZ notwendigen Bauteilabmessungen können nach der Norm ASTM E399-90 [E399] abgeschätzt werden.

$$B, a \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_{p0,2}} \right)^2$$
$$W \geq 5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{R_{p0,2}} \right)^2$$
2.4

K_{IC} ist die kritische Spannungsintensität, bei der ein Bauteil im EVZ schlagartig versagt und $R_{p0,2}$ ist die 0,2%-Dehngrenze, die als Fließgrenze festgelegt wird. Jedoch tritt bereits vorher plastisches Fließen auf. Besonders der mehrachsige Spannungszustand vor der Rißspitze bereitet an dieser Stelle Schwierigkeiten, da die einzelnen Spannungskomponenten miteinander wechselwirken. Um dieser Wechselwirkung eine einzige resultierende Spannung zuzuordnen, berechnet man im ersten Schritt aus den Spannungen σ_x , σ_y und τ_{xy} eines beliebigen Koordinatensystems die Spannungen im Hauptachsensystem.

$$\sigma_{\xi,\psi} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad 2.5$$

$$\sigma_\zeta = 0 \text{ (ESZ) bzw. } \sigma_\zeta = \nu(\sigma_\xi + \sigma_\psi) \text{ (EVZ)}$$

Die *Sneddon*-Gleichungen im Hauptachsensystem lauten dann:

$$\sigma_{1,2} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \cdot \left(1 \pm \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)\right) \quad 2.6$$

$$\sigma_3 = 0 \text{ (ESZ) bzw. } \sigma_3 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot 2\nu \cdot \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right) \text{ (EVZ)}$$

Für die Vergleichsspannung, bei der plastisches Fließen unter mehrachsiger Beanspruchung auftritt, wird häufig die Gestaltänderungsenergiehypothese nach *von Mises* herangezogen. Danach tritt plastisches Fließen genau dann auf, wenn die Gestaltänderungsenergie die Werte bei Einsetzen des Fließens unter einachsigen Zug erreicht. Um dies vergleichen zu können, wird aus den Hauptspannungen eine einzige, wie unter einachsigen Zug wirkende, Vergleichsspannung berechnet:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_\xi - \sigma_\psi)^2 + (\sigma_\psi - \sigma_\zeta)^2 + (\sigma_\zeta - \sigma_\xi)^2 \right]} \quad 2.7$$

Setzt man diese Vergleichsspannung in Gleichung 2.6 ein, so erhält man in Abhängigkeit des Spannungszustandes den Fließradius $r_{ys}(\Theta)$:

$$r_{ys}(\Theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_V} \right)^2 \cdot \cos^2 \left(\frac{\Theta}{2} \right) \cdot \left(3 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Theta}{2} \right) + 1 \right) \quad (\text{ESZ}) \quad 2.8$$

$$r_{ys}(\Theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_V} \right)^2 \cdot \cos^2 \left(\frac{\Theta}{2} \right) \cdot \left(3 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Theta}{2} \right) + (1 - 2\nu)^2 \right) \quad (\text{EVZ})$$

Abbildung 2.3 [nach Heck83] zeigt die zwei- und dreidimensionale Ausdehnung der plastischen Zone, die durch die Fließgrenze berandet wird.

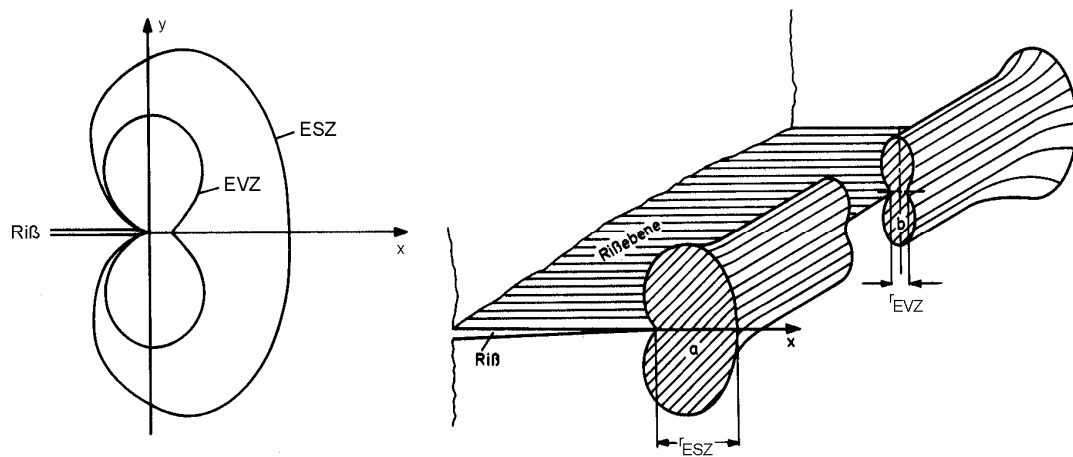


Abbildung 2.3: Ausdehnung der plastischen Zone vor der Rißspitze

Beeinflusst durch den Spannungszustand finden entlang der größten Schubspannungen in einer rißbehafteten Probe makroskopische Abgleitungen statt, die in Abbildung 2.4 [nach Hahn65] schematisch dargestellt sind.

Häufig ist aber nicht die Form der gesamten plastischen Zone von Interesse, sondern lediglich deren Ausdehnung in der Wachstumsrichtung des Risses. Auf dem Ligament lautet die Ausdehnung des plastischen Fließradius:

$$r_{ys}(\Theta = 0^\circ) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K}{\sigma_V} \right)^2 \quad 2.9$$

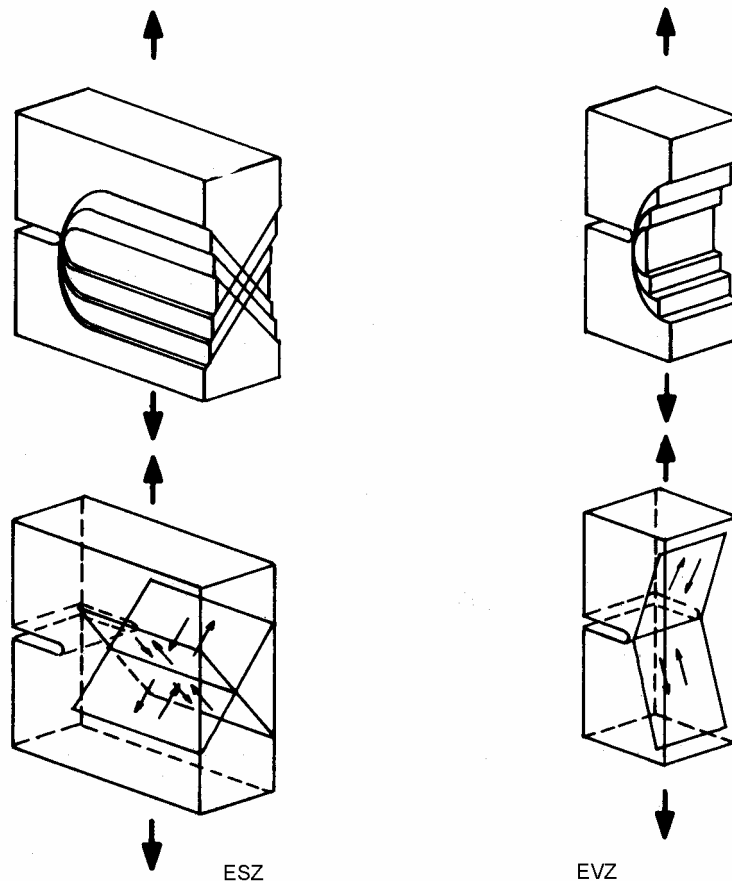


Abbildung 2.4: Makroskopische Abgleitungen in einer rißbehafteten Probe

Die *Sneddon*-Gleichungen, die nur elastisches Materialverhalten beschreiben, können auch im rißspitzennahen Bereich verwendet werden, wenn die physikalische Rißlänge um den Fließradius erweitert und damit in eine effektive Rißlänge überführt wird:

$$a_{\text{eff}} = a + r_{\text{ys}} \quad 2.10$$

Die LEBM darf angewendet werden, wenn r_{ys} klein ist gegen die Rißlänge a . Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Spannungsverhältnisse im Bereich der Rißspitze mit einem einfachen analytischen Modell zu beschreiben.

Für die Berechnung der Ausdehnung der plastischen Zone im Ligament gibt es eine Vielzahl an Modellen. Die Unterschiede resultieren aus

unterschiedlichen Ansätzen, wann die Grenze der linear elastischen Verformung erreicht ist und damit plastisches Fließen beginnt. Eine Übersicht über die verschiedenen Modelle findet sich z. B. in [Schw80, Sure98].

2.1.2 Rißausbreitung

Die Ausbreitung eines Risses ist die Trennung von Atombindungen. Für ideal spröde Werkstoffe, wie z. B. Glas, stellte *Griffith* ein Sprödbruchkriterium auf, dem eine energetische Betrachtung zu Grunde liegt [Grif21]. Ein Riß der Länge $2a$ in einer unendlich ausgedehnten Scheibe wird sich demnach genau dann ausbreiten, wenn mehr elastische Energie frei wird, als für die Schaffung der neuen Oberfläche benötigt wird, Abbildung 2.5 [Heck83].

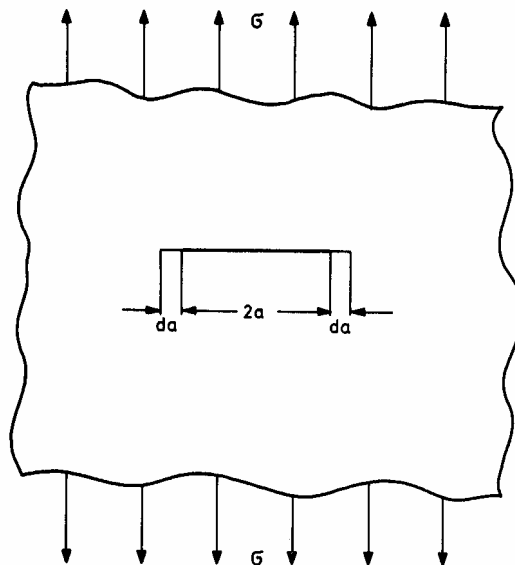


Abbildung 2.5: Unendlich ausgedehnte Scheibe mit *Griffith*-Riß

Die elastische Energie kann nach Gleichung 2.11 bestimmt werden.

$$E_E = -\frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2}{E} \quad (\text{ESZ})$$

$$E_E = -(1 - \nu^2) \cdot \frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2}{E} \quad (\text{EVZ})$$
2.11

Dabei ist E der Elastizitätsmodul. Da es sich bei diesem Riß um ein symmetrisches Problem handelt, ist die zur Schaffung der Oberfläche notwendige Energie

$$E_O = 2 \cdot 2a \cdot \gamma \quad 2.12$$

mit der spezifischen Oberflächenenergie γ . Die Bedingung für die Rißausbreitung lautet demnach

$$\frac{\partial E_E}{\partial 2a} = \frac{\partial E_O}{\partial 2a} \quad 2.13$$

Werden die Gleichungen 2.11 und 2.12 in 2.13 eingesetzt, so ergibt sich die für die Rißausbreitung notwendige äußere Belastung zu

$$\begin{aligned} \sigma_{\infty,c} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{a \cdot \pi}} \quad (\text{ESZ}) \\ \sigma_{\infty,c} &= \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{a \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (\text{EVZ}) \end{aligned} \quad 2.14$$

Die Änderung der elastischen Energie trägt zur Rißausbreitung bei und wird als Energiefreisetzungsrates G in der Form

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_E}{\partial 2a} &= -\frac{\sigma^2 \cdot \pi \cdot a}{E} = G \quad (\text{ESZ}) \\ \frac{\partial E_E}{\partial 2a} &= -\frac{\sigma^2 \cdot \pi \cdot a}{E} \cdot (1 - \nu^2) = G \quad (\text{EVZ}) \end{aligned} \quad 2.15$$

angegeben. Der Gegenpart dazu ist der Rißwiderstand R , der zu

$$\frac{\partial E_O}{\partial 2a} = 2 \cdot \gamma = R \quad 2.16$$

berechnet werden kann. Die Energiebilanz läßt sich nun anschaulich in drei Fälle unterscheiden. Für $R > G$ kann sich der Riß nicht ausbreiten, da die elastische Energie nicht ausreicht, um neue Oberflächen zu schaffen. Im Grenzfall $R = G$ breitet sich der Riß aus, da die elastische Energie genau so groß ist, daß die neue Oberfläche gebildet werden kann. Das schlagartige Bauteilversagen ergibt sich für $R < G$, wenn die

elastische Energie für die Rißausbreitung größer ist, als die zur Schaffung der neuen Oberfläche benötigte.

Im ideal elastischen Fall ist die Energiefreisetzungsrate G mit dem Spannungsintensitätsfaktor K durch Gleichung 2.17 gekoppelt.

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (\text{ESZ})$$
$$G = (1 - \nu^2) \cdot \frac{K^2}{E} \quad (\text{EVZ})$$
2.17

Treten zusätzlich plastische Deformationen auf, so ist Gleichung 2.17 nicht mehr anwendbar, da ein Großteil der Energie nicht in die Schaffung der neuen Oberfläche fließt, sondern in die Schaffung der plastischen Zone. Der Rißwiderstand muß also um den Beitrag der plastischen Energie erweitert werden.

Die Anwendung des Spannungsintensitätsfaktors K ist nicht auf eine statische Rißausbreitung begrenzt, sondern ebenso bei einer Schwingbeanspruchung möglich. Zur grundsätzlichen Beschreibung einer Schwingbeanspruchung werden die Spannungen in den Lastumkehrpunkten benutzt, um das Spannungsverhältnis R und die Schwingbreite $\Delta\sigma$ zu bestimmen, Abbildung 2.6.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$$
2.18

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_{\max} \cdot (1 - R)$$
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = K_{\max} \cdot (1 - R)$$
2.19

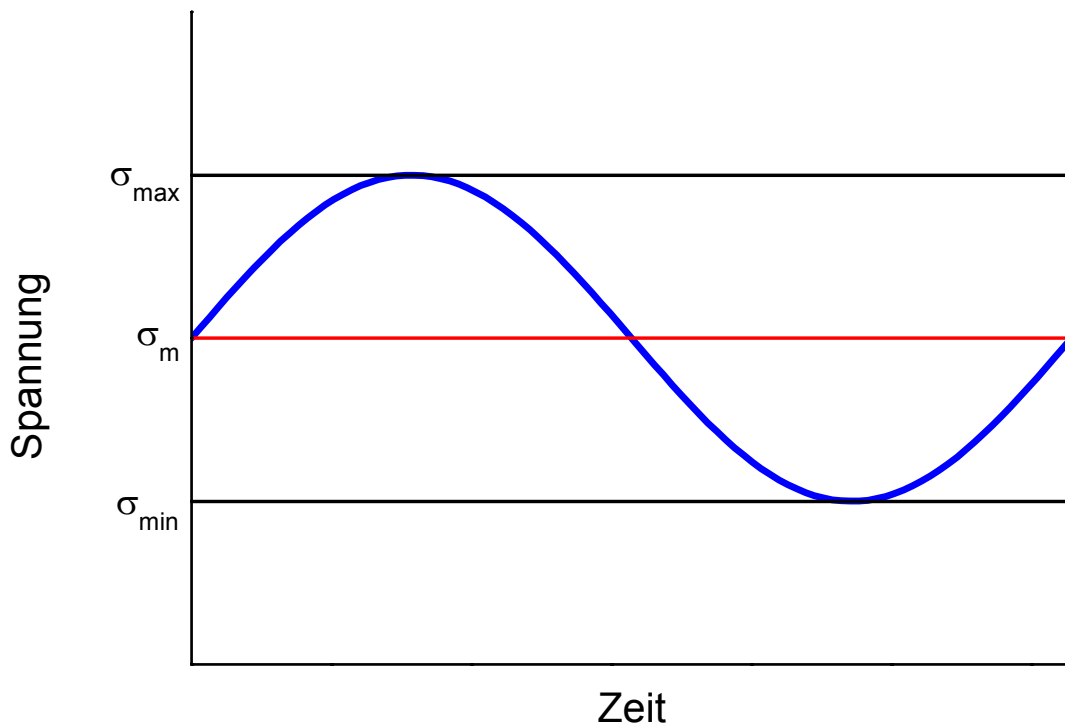


Abbildung 2.6: Beschreibung einer sinusförmigen Belastung

Die Lage der Mittelspannung σ_m gibt Auskunft über die Beanspruchungsart, Abbildung 2.7 [Rada95].

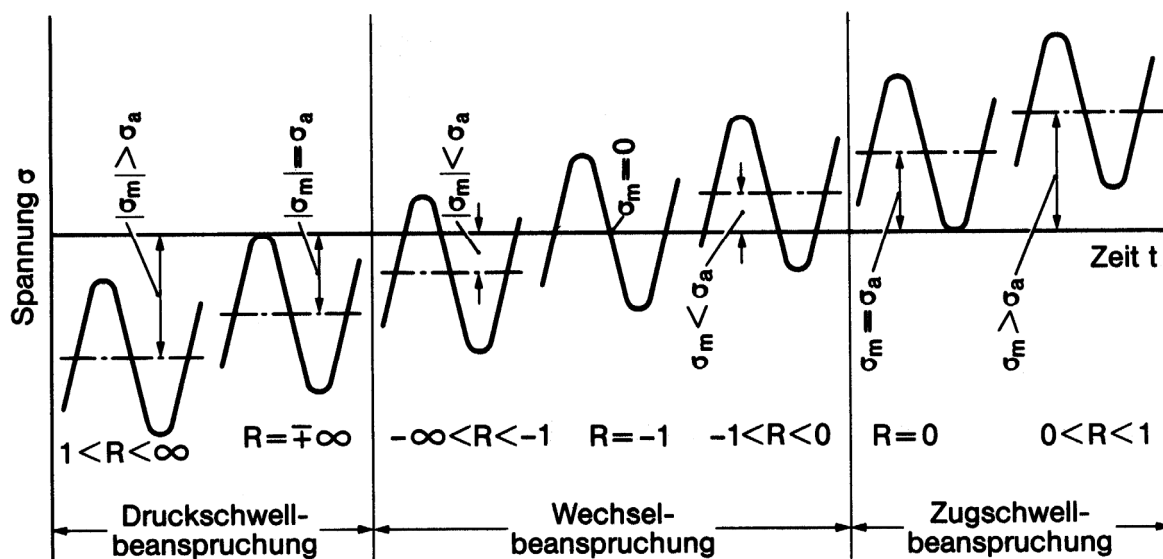


Abbildung 2.7: Beanspruchungsbereiche einer Schwingbeanspruchung

Eine symmetrische Wechselbeanspruchung liegt für $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ und damit $R = -1$ vor.

In Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis und der Belastung stellt sich eine entsprechende Rißfortschrittsrate ein. Dieser Zusammenhang wird in einem doppeltlogarithmischen Diagramm dargestellt, das in drei Bereiche eingeteilt werden kann, Abbildung 2.8 [nach Schw80].

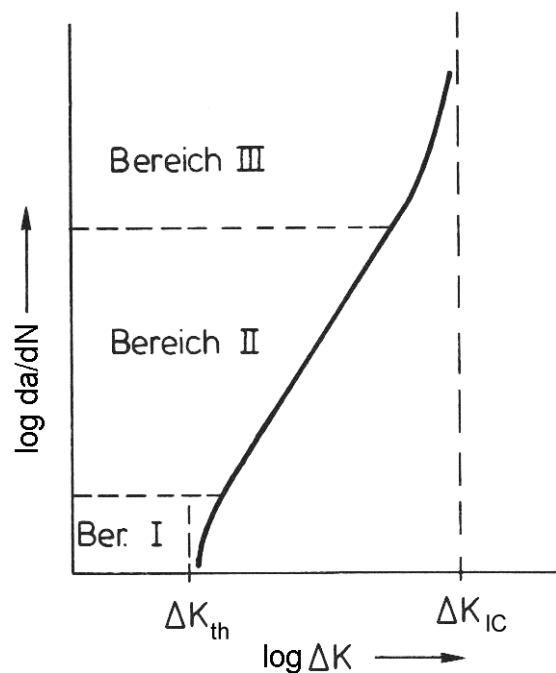


Abbildung 2.8: Schematische Rißausbreitungskurve

Der Bereich I wird als Schwellenwert (engl. threshold) bezeichnet. Erfährt das Bauteil eine Belastung kleiner als ΔK_{th} , so breitet sich der Riß nicht weiter aus. Im Bereich II ergibt sich in dieser Darstellung eine Gerade, die mit der *Paris-Erdogan-Gleichung* [PaEr60] (2.20) beschrieben werden kann.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad 2.20$$

Nach dieser Gesetzmäßigkeit wird der Bereich auch als *Paris*-Bereich bezeichnet. Der Rißlängenzuwachs kann durch Integration von Gleichung 2.20 berechnet werden. Die Konstanten C und m sind materialspezifisch und müssen experimentell ermittelt werden. Der Bereich III beinhaltet den katastrophalen Versagensfall, wenn das Bauteil mit der kritischen Spannungsintensität $\Delta K_{(I)C}$ beansprucht wird und damit schlagartig, d. h. innerhalb eines Lastwechsels, versagt.

2.2 Einflüsse auf die Ermüdungsrißausbreitung

Es gibt eine große Variation an Einflußgrößen auf die Ausbreitung eines Ermüdungsrißes. Diese wechselwirken mit der äußeren Belastung und können sie damit entweder verstärken oder reduzieren, was die Rißausbreitung entsprechend beschleunigt oder verlangsamt. Im folgenden werden als Einflußgrößen das Rißschließen, einfache und mehrfache Überlasten behandelt.

2.2.1 Rißschließen

Ein Riß kann sich unter einer Modus I-Belastung nur im geöffneten Zustand ausbreiten. Das sogenannte Rißschließen kann bewirken, daß ein Riß geschlossen ist, bevor er vollständig entlastet ist. Ein Riß kann bereits geschlossen sein und sich damit nicht weiter ausbreiten, obwohl er noch eine äußere positive Belastung erfährt. Einen Überblick über die verschiedenen Rißschließarten ist z. B. in [Schw80, Sure98] zu finden.

Plastisch induziertes Rißschließen tritt bei allen duktilen metallischen Werkstoffen auf und muß somit immer betrachtet werden. Die folgenden Ausführungen bleiben auf Grund der Relevanz für diese Arbeit auf das plastisch induzierte Rißschließen beschränkt.

Die Beschreibung des plastisch induzierten Rischlieens ist eng mit dem Namen *Wolf Elber* verknüpft. *Elber* führte umfangreiche Untersuchungen zu plastisch induziertem Rißschließen an der Aluminiumlegierung 2024 durch und wies damit auf die Bedeutung des Rischlieens hin [EIFM70, EIDV70, EIAS71]. Die plastische Zone vor und hinter der Rißspitze wechselwirkt mit dieser, so daß der Riß bereits vor der vollständigen Entlastung schließt. Dies führt dazu, daß auf die Rißspitze nicht die vollständige Schwingbreite ΔK einwirken kann, sondern lediglich eine kleinere effektive Spannungsintensität ΔK_{eff} . Dabei ist die effektive Spannungsintensität um den Anteil des bereits geschlossenen Risses reduziert, Abbildung 2.9 [nach Schi88].

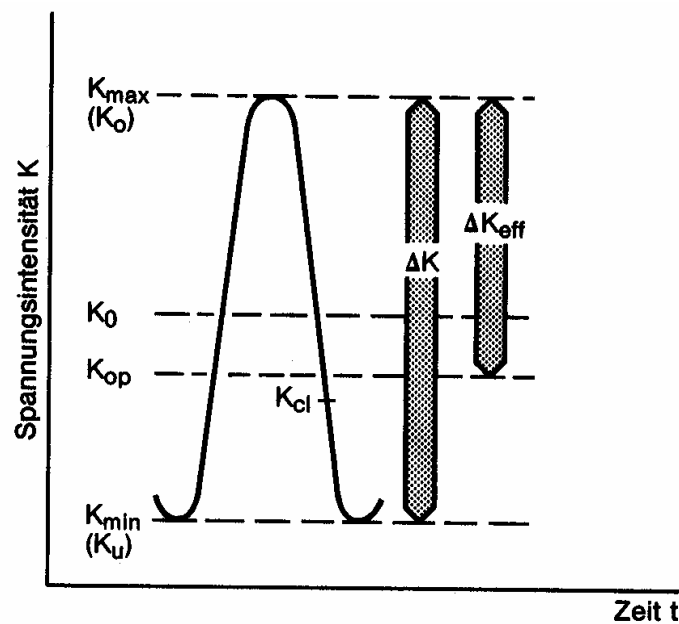


Abbildung 2.9: Effektive Spannungsintensität ΔK_{eff}

Dem Riß kann eine Spannungsintensität K_{op} (engl. open) zugeordnet werden, ab der er offen ist und eine Spannungsintensität K_{cl} (engl. closure) bei der er schließt. Die Reduzierung der wirksamen Spannungsintensität verursacht eine Reduzierung der Rißfortschrittsrate.

2.2.2 Einfache Überlasten

Wird in eine Folge zyklisch konstanter Belastungsamplituden aus dem *Paris*-Bereich eine einzelne Spitzenlast eingebracht, so weicht im weiteren Verlauf die Ermüdungsrißausbreitung $a(N)$ von dem erwarteten Verlauf ab. Dieser läßt sich z. B. mit der *Paris-Erdogan*-Gleichung durch Integration berechnen. Der grundlegende Einfluß ist schematisch in Abbildung 2.10 [SäGö93] dargestellt.

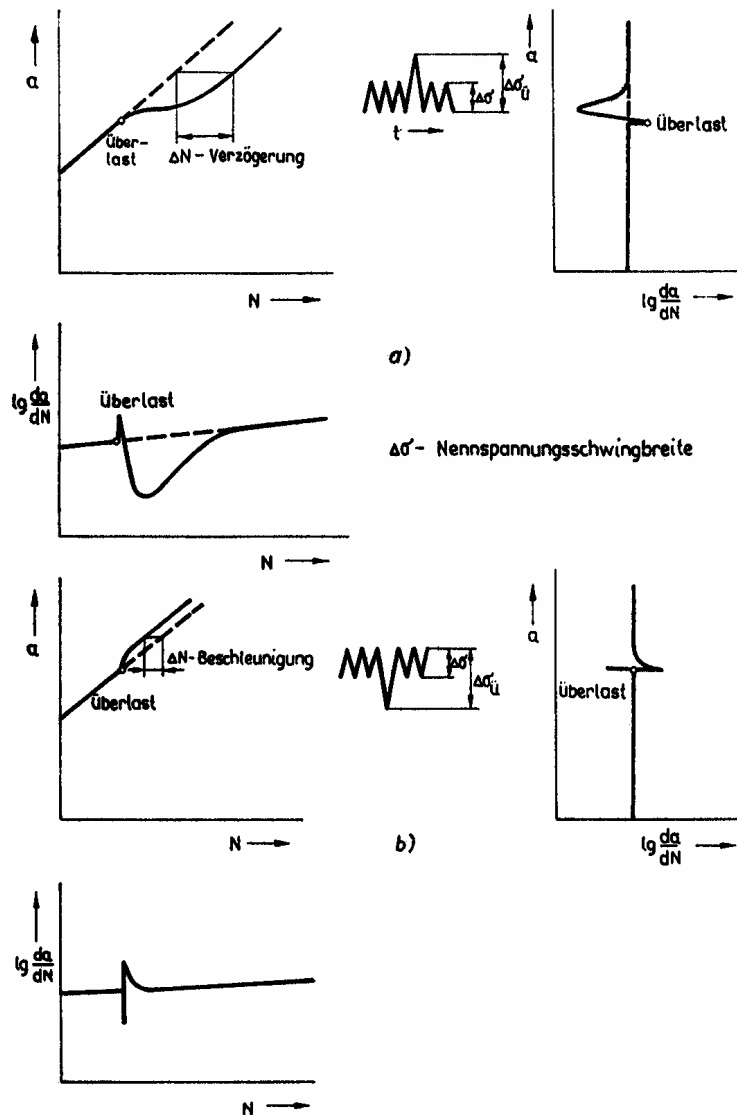


Abbildung 2.10: Einfluß einer einfachen Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung

Es muß grundsätzlich zwischen dem Einfluß einer Zugüberlast, positive Spannung (Teilbild a), und einer Drucküberlast, negative Spannung (Teilbild b), unterschieden werden.

Nach dem Einbringen einer Zugüberlast (Teilbild a) folgt eine kurzzeitige Rißbeschleunigung, der sich ein ausgedehnter Verzögerungsbereich anschließt. Aus der Auftragung der Rißlänge a über der Lastspielzahl N , sowie dem zyklenweisen Rißfortschritt da/dN über der Zahl der Lastspiele N ist insgesamt eine deutliche Verzögerungswirkung festzustellen. Die Rißfortschrittsrate ist über einen ausgedehnten Bereich gegenüber der Rißausbreitung ohne Überlast erheblich reduziert. Für einen identischen Rißfortschritt sind damit bei einer durch eine Zugüberlast beeinflussten Ermüdungsrißausbreitung erheblich mehr Lastspiele nötig, als bei der Rißausbreitung ohne Zugüberlast. Diese zusätzlich benötigten Lastspiele kommen der Lebensdauer des Bauteils zu Gute.

Bei einer reinen Drucküberlast (Teilbild b) gibt es gegensätzliche Ergebnisse bezüglich der Auswirkungen auf den Rißfortschritt. Eine Drucküberlast kann ausschließlich eine Rißbeschleunigung zur Folge haben [Sure98, SäGö93]. Die nach der Drucküberlast vorhandene erhöhte Rißfortschrittsrate nimmt mit zunehmender Lastspielzahl ab und erreicht dann wieder den Wert vor der Überlasteinstreuung. Damit benötigt der auf diese Weise beeinflusste Ermüdungsriß weniger Lastspiele als ein Riß ohne Drucküberlast, um denselben Rißfortschritt zu erzielen. Die Differenz der benötigten Lastspielzahlen reduziert die Lebensdauer des Bauteils. Im Gegensatz zu der Rißbeschleunigung nach einer Drucküberlast konnte an den Aluminiumlegierungen 2024,

6013 [Roed03] und 7075 [Bro100] keine Beeinflussung des Rißwachstums durch eine reine Drucküberlast festgestellt werden.

Für das Einbringen einer einfachen Überlast können Zug- und Drucküberlast auch kombiniert werden. Damit besteht der Überlastzyklus aus zwei Halbzyklen. Trägt man die Rißlänge a über den Lastwechseln N auf, so wird der Unterschied zwischen einer Zug- und einer Zug/Druck-Überlast deutlich, Abbildung 2.11 [Schi62].

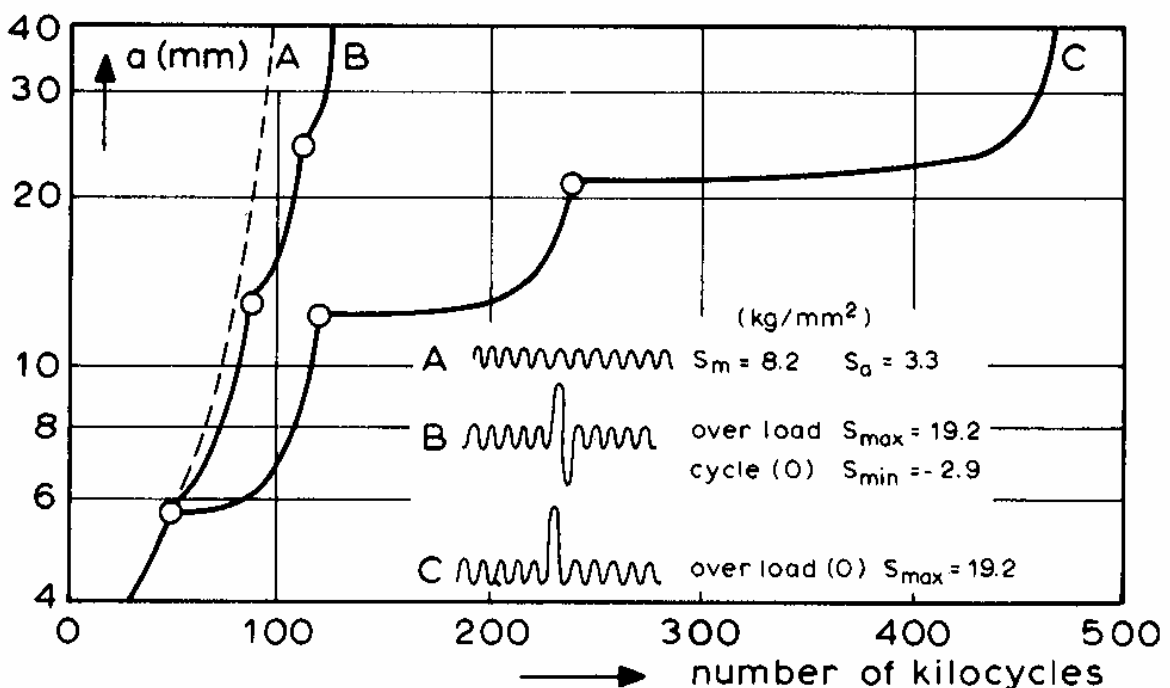


Abbildung 2.11: Vergleich Zug- mit Zug/Druck-Überlast

Folgt auf den Zughalbzyklus ein Druckhalbzyklus, so wird die verzögernde Wirkung des Zuganteils reduziert. Damit sind zwar immer noch mehr Lastwechsel für dieselbe Rißausbreitung als beim Ermüdungsriß ohne Überlast nötig, aber weniger als bei einer reinen Zugüberlast. Dies reduziert auch den Lebensdauergewinn. Neben Rißschließeffecten werden für den Überlasteinfluß auch Eigenspannungen angeführt. Eine Zugüberlast verursacht

Druckeigenstressen vor der Rißspitze, die mit der äußeren Belastung wechselwirken. Diese Wechselwirkung führt letztlich zu einer Reduzierung der effektiven Spannungsintensität und damit zu einer Abnahme der Rißfortschrittsrate. Dieser Einfluß ist bemerkbar, so lange sich die zyklische plastische Zone innerhalb der durch die Überlast eingebrachten monotonen plastischen Zone befindet, Abbildung 2.12 [Broe86].

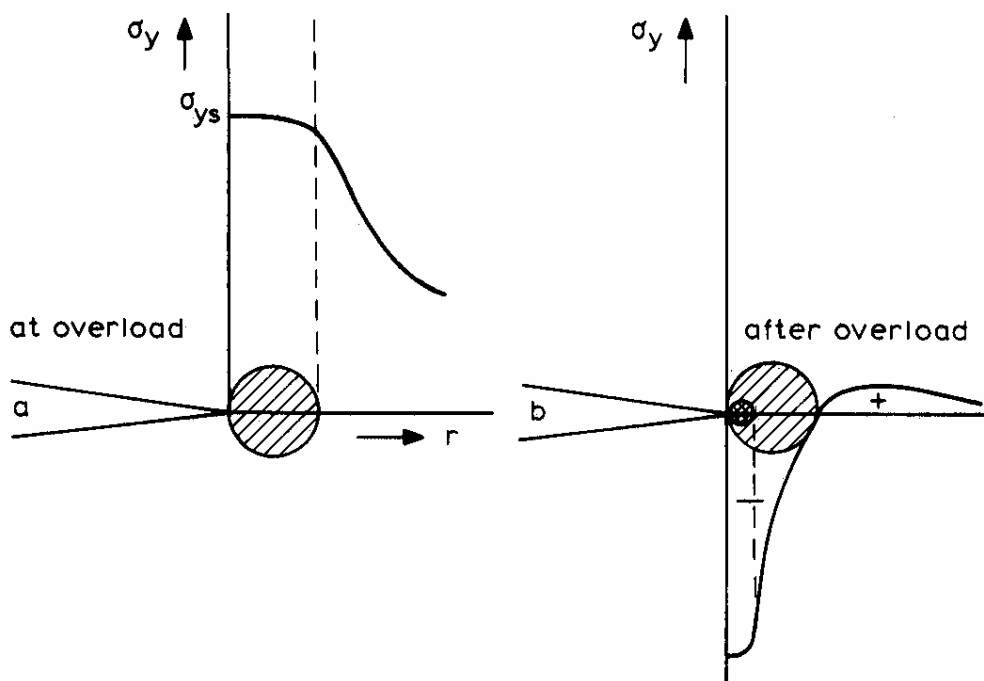


Abbildung 2.12: Eigenspannungen vor der Rißspitze nach einer Überlast

2.2.3 Mehrfache berlasten

Eine sehr einfache Lastfolge für die Untersuchung von Betriebslastfolgen stellen die mehrfachen berlasten dar. Dabei wird die Überlast nicht nur für einen Zyklus, sondern für mehrere Zyklen als Überlastblock eingebracht. Dies kann auch als Änderung des Grundlastniveaus verstanden werden, Abbildung 2.13 [SG93].

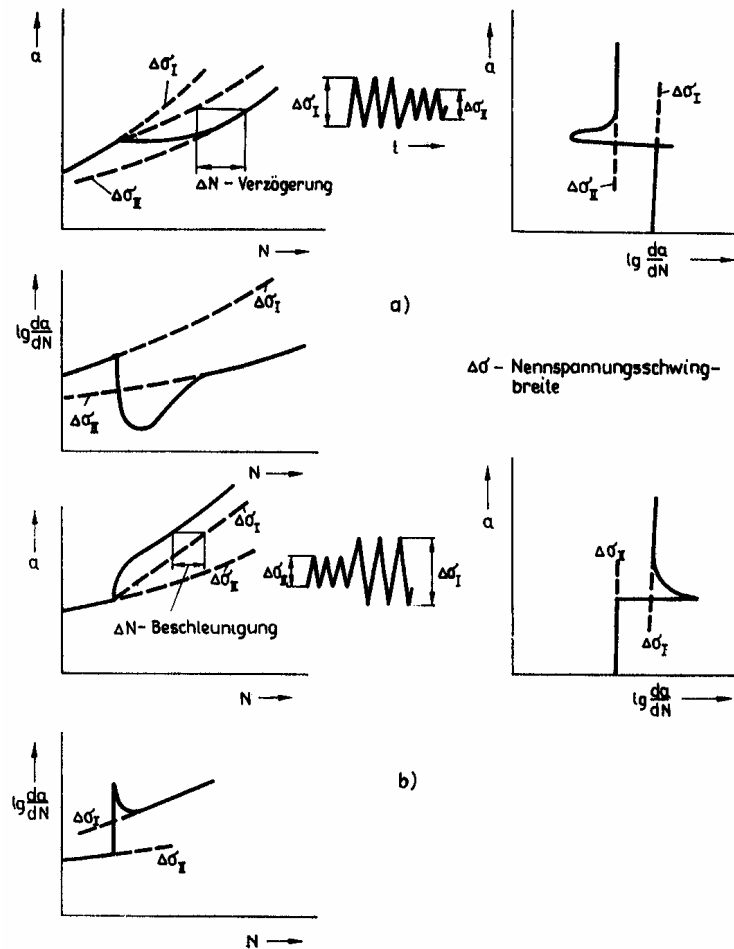


Abbildung 2.13: Einfluß von Überlastblöcken auf die Ermüdungsrißausbreitung

Findet der Wechsel des Lastniveaus von hoch zu niedrig statt (Teilbild a), wird die Rißfortschrittsgeschwindigkeit ähnlich wie bei einfachen Zugüberlasten verzögert, so daß auch hier ein Lebensdauergewinn resultiert. Im umgekehrten Fall, beim Wechsel von niedrig zu hoch (Teilbild b), wird der Riß beschleunigt, so daß eine Verkürzung der Lebensdauer die Folge ist.

2.3 Lineare Hypothese der Schadensakkumulation

Bauteile im Einsatz sind einem aus verschiedenen Überlasten und Überlastblöcken bestehenden Lastkollektiv, auch Betriebsbeanspruchung genannt, ausgesetzt. Betriebslastfolgen sind also durch beliebig aufeinanderfolgende Amplituden unterschiedlicher Höhe

gekennzeichnet. *Palmgren* stellte 1924 [Palm24] und *Miner* 1945 [Mine45], wahrscheinlich ohne Kenntnis von *Palmgren*, zur Vorhersage der Lebensdauer eines Bauteils unter Betriebsbeanspruchung eine lineare Hypothese der Schadensakkumulation auf. Diese ist heute als *Palmgren-Miner-Regel* oder einfach kurz *Miner-Regel* bekannt. Der Grundgedanke ist dabei, daß jeder Lastwechsel das Bauteil schädigt. Eine Interaktion der Lastwechsel untereinander oder ein Reihenfolgeeinfluß wird dabei ausgeschlossen. Das Bauteil versagt genau dann, wenn die auf diese Weise aufsummierten Teilschädigungen D_i eine kritische Gesamtschädigung D erreichen.

Die Teilschädigungen D_i werden ausgehend von einem Wöhlerdiagramm ermittelt, in dem die Anzahl der für eine bestimmte Lasthöhe S_i vorkommenden Lastwechsel n_i in Bezug zu den für diese Lasthöhe ertragbaren Lastwechseln N_i gesetzt werden, Abbildung 2.14.

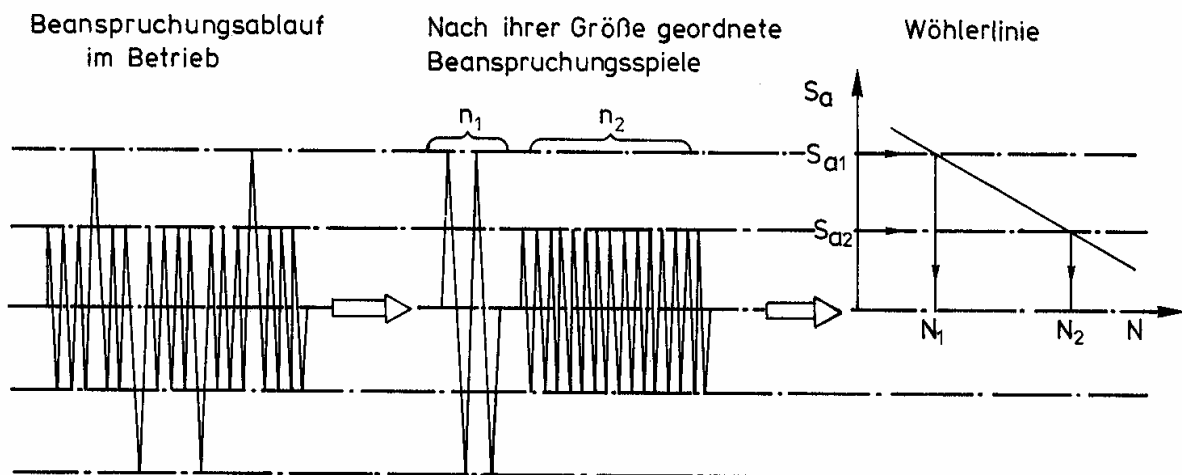


Abbildung 2.14: Palmgren-Miner-Regel schematisch

Die Teilschädigung D_i berechnet sich also zu

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad 2.21$$

Das Bauteil versagt, wenn die Summation der Teilschädigungen den Wert Eins erreicht, d. h.

$$D = \sum_i^{N_f} D_i = \sum_i^{N_f} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad 2.22$$

Eine weiterführende Übersicht, sowie Modifikationen der *Palmgren-Miner*-Regel können z. B. in [Buxb92, Haib70, Haib89, Liu93, Liu95, Zenn95] gefunden werden.

3 Versuchsbeschreibung

3.1 Werkstoff

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Werkstoff ist die Aluminiumknetlegierung 6013. Die Hauptlegierungselemente sind Aluminium, Magnesium und Silizium. Die genaue chemische Zusammensetzung beinhaltet Tabelle 3.1.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti +Zr	Andere		Al
										Einzel	Total	
Min.	0,6	-	0,15	0,2	0,6	-	0,1	-	-	-	-	Rest
Max.	1,3	0,5	1,1	1,0	1,2	0,25	0,7	0,1	0,2	0,05	0,15	

Tabelle 3.1: Legierungszusammensetzung der Aluminiumknetlegierung 6013 in Gewichtsprozent [AIMS00]

Material	E [GPa]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{p0,01} [MPa]	A [%]	Härte [HBW]
6013 T62	72 (68-72)	399 (350)	365 (310)	224	16 (8)	131

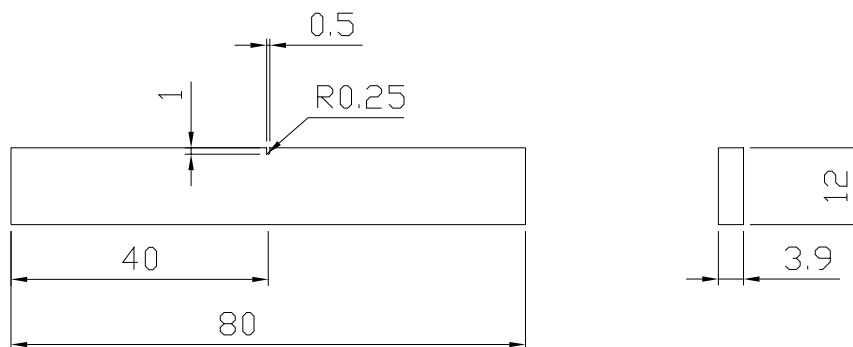
Tabelle 3.2: Mechanische Eigenschaften von Al 6013 T62. Herstellerangaben stehen in Klammern [AIMS00, Roed03]

Das Material wurde in Form von gewalzten Blechen mit einer Dicke von 3,9 mm von der Firma EADS Airbus Bremen zur Verfügung gestellt und lag im Behandlungszustand T62 vor [DIN515, AIMS00].

Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. Zur Kontrolle der Herstellerangaben wurden am Institut eigene Werte im Zugversuch, sowie bei Härtemessungen ermittelt.

3.2 Probenform

Für die Rißausbreitungsversuche wurden aus den Blechen einseitig gekerbte Flachproben (Single Edge Notch Specimen = SEN) hergestellt. Die Seitenflächen der Proben wurden nach dem Sägen gefräst, die Oberflächen blieben unbehandelt. Die Maße und Toleranzen können Abbildung 3.1 entnommen werden.



Allgemeintoleranzen
nach DIN ISO 2768 T1 f

Abbildung 3.1: Bemaßte SEN-Probe

Die Kerbe wurde mit einer Diamantdrahtsäge der Firma Well eingebracht. Die Kerbtiefe betrug $1,0 \pm 0,2$ mm mit einem festen Kerbradius von 0,25 mm.

3.3 Die Versuchsanlage ERIKA 3

Die Versuchsanlage Erika 3 basiert auf einer servohydraulischen Prüfmaschine vom Typ PSA 10 der Firma Schenck [Bär01]. Die möglichen Prüfkkräfte können statisch ± 10 kN oder dynamisch ± 8 kN bei Versuchsfrequenzen von 0,01 Hz bis 200 Hz aufgebracht werden. Als

Signalform sind Sinus-, Dreieck- und Rechteckverläufe möglich. Abbildung 3.2 zeigt die Probenkammer.

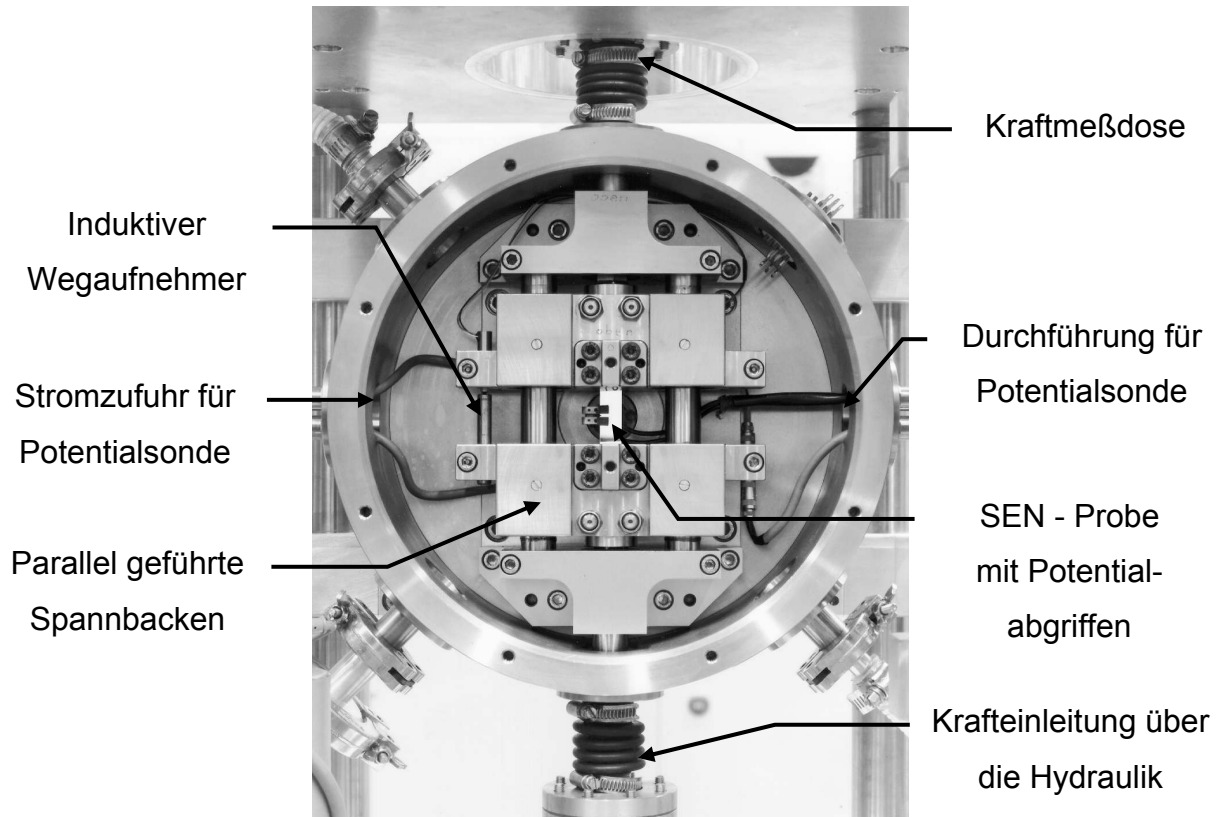


Abbildung 3.2: Probenkammer Erika 3

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Atmosphäre Laborluft gewählt. Die Temperatur belief sich auf Grund der Abwärme der Hydraulik auf $26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ bei einer mittleren Luftfeuchtigkeit von 40%. Zur Überwachung der atmosphärischen Bedingungen wurde ein Präzisionsdrucktaupunktfühler Typ 601 der Firma Testo benutzt.

Die parallele Probenführung in Abbildung 3.2 dient zur Realisierung einer reinen Modus I-Belastung, da Biegespannungen minimiert werden. Des weiteren werden Belastungen im Druckbereich möglich, da ein Ausknicken der Probe verhindert wird.

Zur Rißlängenbestimmung wurden zwei voneinander unabhängige Verfahren genutzt, die im folgenden beschrieben werden.

3.3.1 Optische Rißlängenbestimmung

Vor der Probenkammer ist ein Mikroskop mit 100-facher Vergrößerung auf einem Kreuztisch angebracht, dessen Position mit einem induktivem Wegaufnehmer erfaßt werden kann. Damit wird zum einen die Kerbtiefe vor Versuchsbeginn bestimmt, zum anderen kann ein Ermüdungsriß verfolgt werden. Da die Rißspitze nur manuell verfolgt werden kann, ist diese Methode sehr zeitaufwendig. Ferner kann nur einseitig der Oberflächenanteil der gekrümmten Rißfront verfolgt werden, so daß dieses Verfahren nur eine beschränkte Aussage über das Rißwachstum liefern kann. Aussagen über das Rißwachstum auf der Probenrückseite und der Rißfront in Probenmitte sind so nicht möglich.

3.3.2 Gleichstrompotentialsonde

Mit der Gleichstrompotentialsonde steht ein automatisierbares Verfahren zur Rißlängenbestimmung zur Verfügung. Die Probe wird mit einem konstanten Gleichstrom durchflossen. Symmetrisch zur Kerbe werden zwei Potentialabgriffe befestigt, über die die abfallende Spannung gemessen wird (siehe Abbildung 3.3). Breitet sich der Riß aus, so ändert sich der Widerstand der Probe und der Spannungsabfall vergrößert sich. Aus der Probengeometrie und der Spannungsänderung läßt sich die Rißlänge berechnen.

Als Stromquelle wurde ein Konstanter der Firma Delta Electronics benutzt, zur Spannungsmessung ein Nanovoltmeter Typ 182 der Firma Keithley. Bei einer Stromstärke von ca. 50 A betrug der Spannungsabfall des Anfangspotentials ca. 0,3 mV. Abhängig von der Rißlänge wurden Spannungen bis ca. 1,2 mV gemessen. Der Spannungswert wurde über

eine IEEE Schnittstelle am Nanovoltmeter abgefragt. Unter Berücksichtigung der Integrationszeiten des Nanovoltmeters betrug die maximale Meßfrequenz 26 Hz.

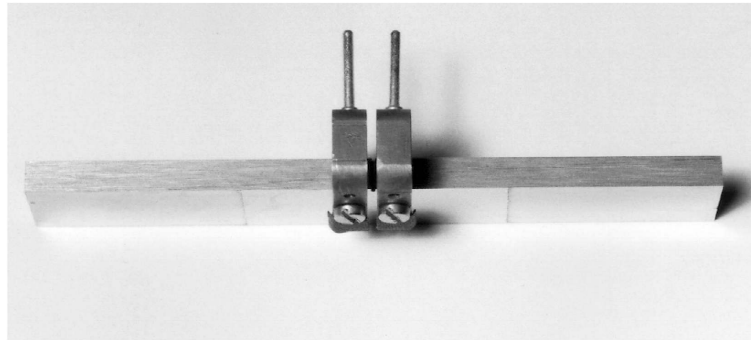


Abbildung 3.3: SEN - Probe mit Potentialabgriffen

1965 gab *Johnson* eine analytische Lösung der Laplace'schen Potentialgleichung an, mit der sich die Rißlänge aus der Änderung des Spannungsabfalls berechnen läßt [Joh65]. Sie ist in der Literatur als *Johnson-Formel* bekannt (Gleichung 3.1).

$$a = \frac{2 \cdot W}{\pi} \cdot \arccos \left(\frac{\cosh\left(\frac{\pi \cdot y_0}{2 \cdot W}\right)}{\cosh\left(\frac{U}{U_0} \cdot \operatorname{arccosh}\left(\frac{\cosh\left(\frac{\pi \cdot y_0}{2 \cdot W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi \cdot a_k}{2 \cdot W}\right)}\right)\right)} \right) \quad 3.1$$

Die in Gleichung 3.1 vorkommenden Größen sind die Rißlänge a , Probenbreite W , Anfangspotential U_0 , momentanes Potential U , halber Potentialabgriffabstand (Abstand Kerbmitte - Potentialabgriff) y_0 und die Kerbtiefe a_k . Für $\frac{U}{U_0} = 1$ folgt $a = a_k$.

Die Gleichstrompotentialmethode trifft ebenfalls keine getrennten Aussagen über das Rißwachstum an den Probenoberflächen und der Rißfront in Probenmitte. Sie stellt ein integrales Meßverfahren dar, eine Rißfrontkrümmung wird nicht berücksichtigt. Deswegen ist die auf diese Weise errechnete Rißlänge ein gemittelter Wert.

3.3.3 Genauigkeit der Gleichstrompotentialmethode

Die Genauigkeit der Messung wird durch den Potentialabgriffabstand beeinflusst. Die Genauigkeit steigt mit abnehmendem Abstand, ebenso wie mit einer Vergrößerung des Anfangspotentials. Um die Genauigkeit der Johnson-Formel abzuschätzen, erfolgt eine Fehlerbetrachtung des Potentials als bestimmender Teil nach Gauß. Setzt man für den Fehler der Spannungsmessung einen Wert von $\Delta U = 11 \text{ nV}$ an, der sich aus den Gerätespezifikationen und einem Sicherheitsfaktor zusammensetzt, so ergibt sich in Abhängigkeit der tatsächlichen Rißlänge der in Abbildung 3.4 gezeigte Fehlerverlauf.

Die Auswertung der Atmosphärendaten zeigt eine Lufttemperatur von $26^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ in Probennähe. Diese gemessene Lufttemperatur wird durch die Abwärme der Servohydraulik dominiert und ist damit, unabhängig von der eigentlichen Raumtemperatur, nahezu konstant. Betrachtet man ferner die im Vergleich zur Probe sehr viel größere Wärmekapazität der Spannbacken, so kann die Änderung der Probentemperatur vernachlässigt werden. Da alle Experimente ab einer Ermüdungsrißlänge $> 2 \text{ mm}$ durchgeführt werden, wird im folgenden konservativ von einem Fehler in der Rißlängebestimmung von $\pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ ausgegangen.

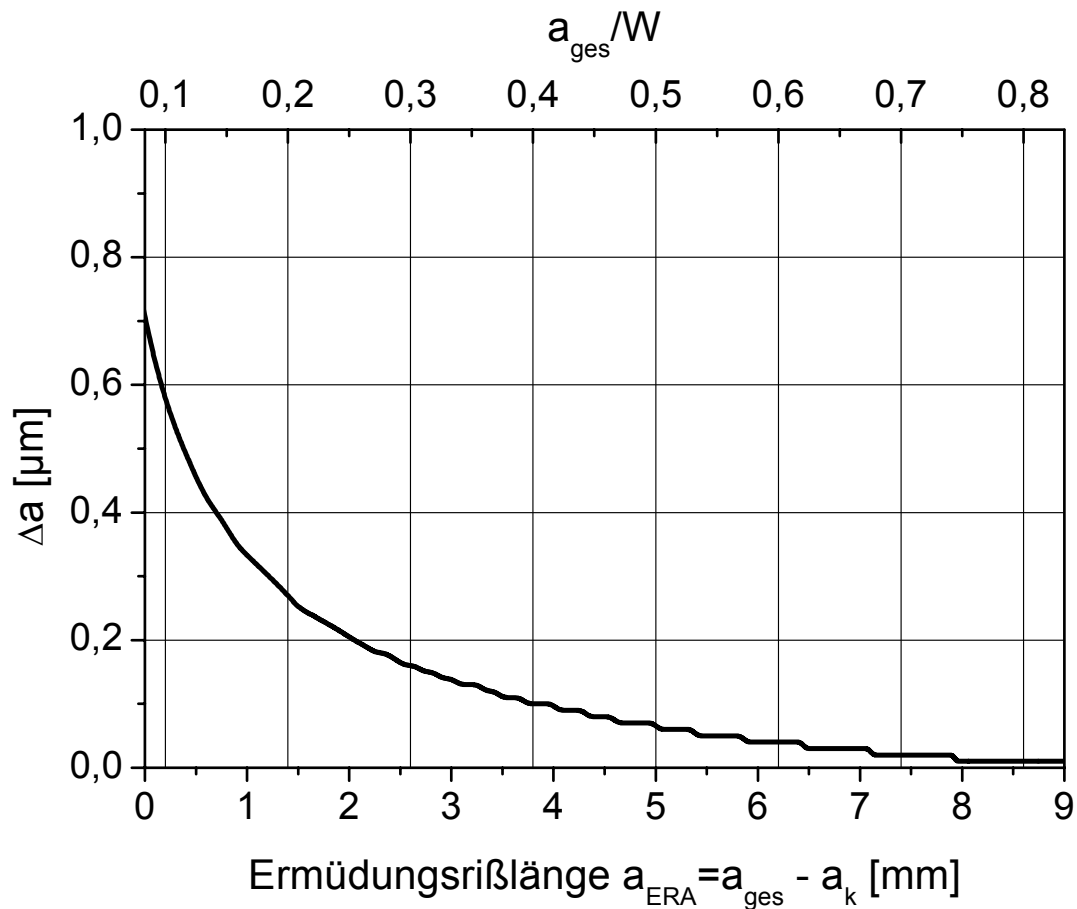


Abbildung 3.4: Fehlerbetrachtung der Rißlängenmessung

3.3.4 Rißausbreitungskurven

Die Festlegung des Lastniveaus in Abhängigkeit der Mittelspannung wird anhand der Rißausbreitungskurven getroffen. Für die Spannungsverhältnisse $R = -1$, $R = 0,1$ und $R = 0,7$ sind diese in Abbildung 3.5 [Roed03] dargestellt.

Die Kurve für $R = -1$ ist farblich hervorgehoben, da die grundlegenden Experimente mit diesem Spannungsverhältnis und einer Grundlast von $\Delta K = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ spannungsintensitätsgeregelt durchgeführt wurden. Diese Grundlast lieferte eine stabile Rißausbreitung von ca.

10^{-8} m/Zyklus, so daß Rißausbreitungsexperimente in einem zeitlich gut realisierbaren Rahmen durchführbar waren.

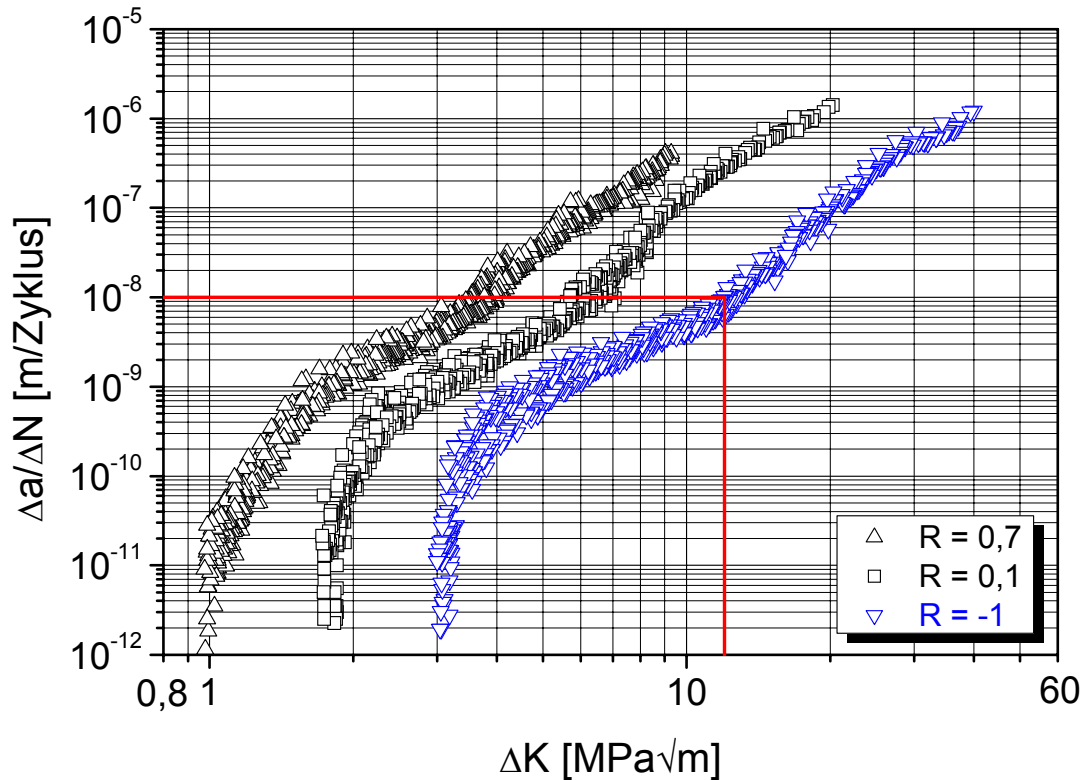


Abbildung 3.5: Rißausbreitungskurven für Al 6013 T62 in Laborluft

3.3.5 Versuchsregelung

Die Regelung der Servohydraulik übernimmt ein von *Trefzer, Volpp* und *Rödling* in Visual Basic geschriebenes Programm [Tref95, Volp99, Roed03]. Dieses wurde im Laufe der Zeit mehrmals modifiziert und bietet die Möglichkeit Experimente durchzuführen, bei denen die Spannungsintensität konstant gehalten werden kann. Dazu wird in dem Regelungsrechner Erika I laufend das Potential an der Probe abgefragt und in eine Rißlänge umgerechnet. Um eine zuvor festgelegte Spannungsintensität zu regeln, wird entsprechend des Rißlängenwachstums die Kraftamplitude reduziert. Für eine

Spannungsintensität von $K_{\max} = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ist dies in Abbildung 3.6 exemplarisch dargestellt.

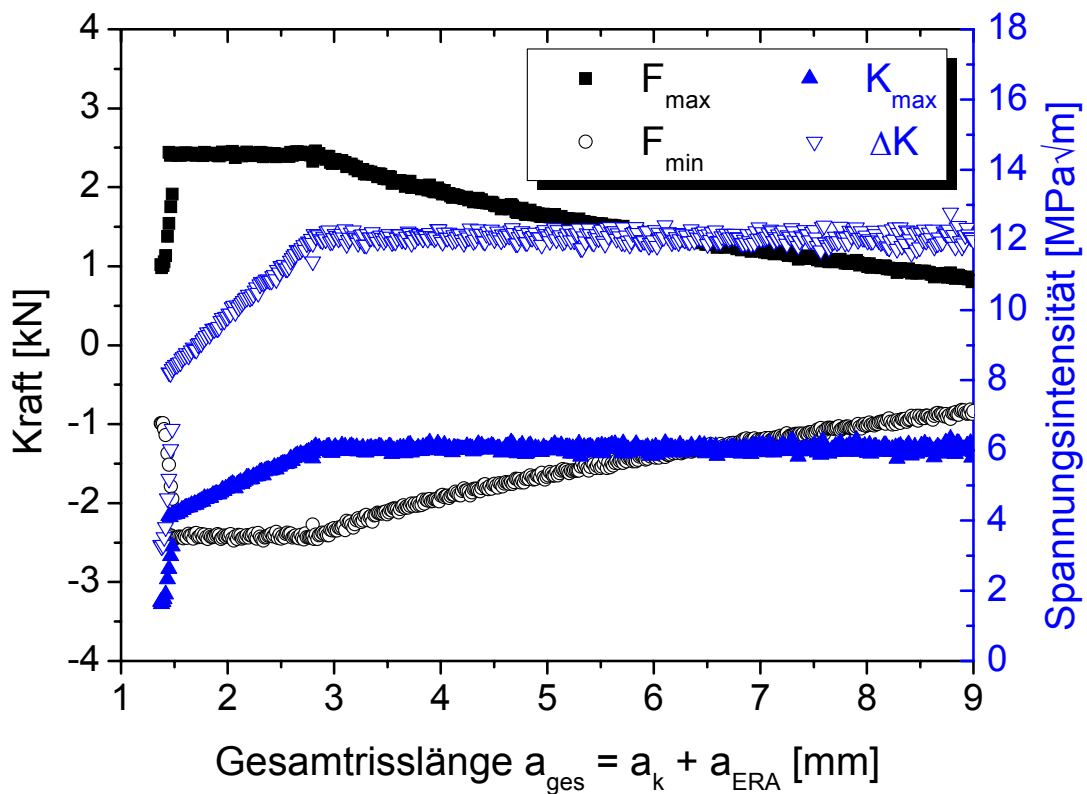


Abbildung 3.6: Regelung der Spannungsintensität

Die Anrißphase ist bis zu einer Gesamtrisslänge von $a_{\text{ges}} \approx 2,8 \text{ mm}$ zu erkennen, die sich aus der Kerbtiefe a_k und der Rißlänge der Ermüdungsrissausbreitung a_{ERA} zusammensetzt. Sie besteht aus zwei Teilschritten. Im ersten Teilschritt wird die Kraftamplitude in gleichmäßigen Intervallen gesteigert, bis eine zuvor festgelegte Spannungsintensität erreicht ist. Im zweiten Teilschritt wird die Kraftamplitude konstant gehalten und die Spannungsintensität steigt auf Grund der zunehmenden Rißlänge bis zur eingestellten Spannungsintensität der Versuchsdurchführung an. Dieses Vorgehen

bedingt eine der aktuellen Rißlänge und Belastung entsprechende Plastifizierung.

Im Anschluß an die Anrißerzeugung ist die mit zunehmender Rißlänge absinkende Kraftamplitude zu erkennen, wodurch die Spannungsintensität konstant gehalten wird.

Die Regelung der Spannungsintensität ($\Delta K = \text{konst.}$) bietet den Vorteil, daß auch die Rißgeschwindigkeit konstant bleibt. Abbildung 3.7 zeigt das Resultat der Regelung der Grundlast, wie sie in Kapitel 3.3.4 beschrieben ist.

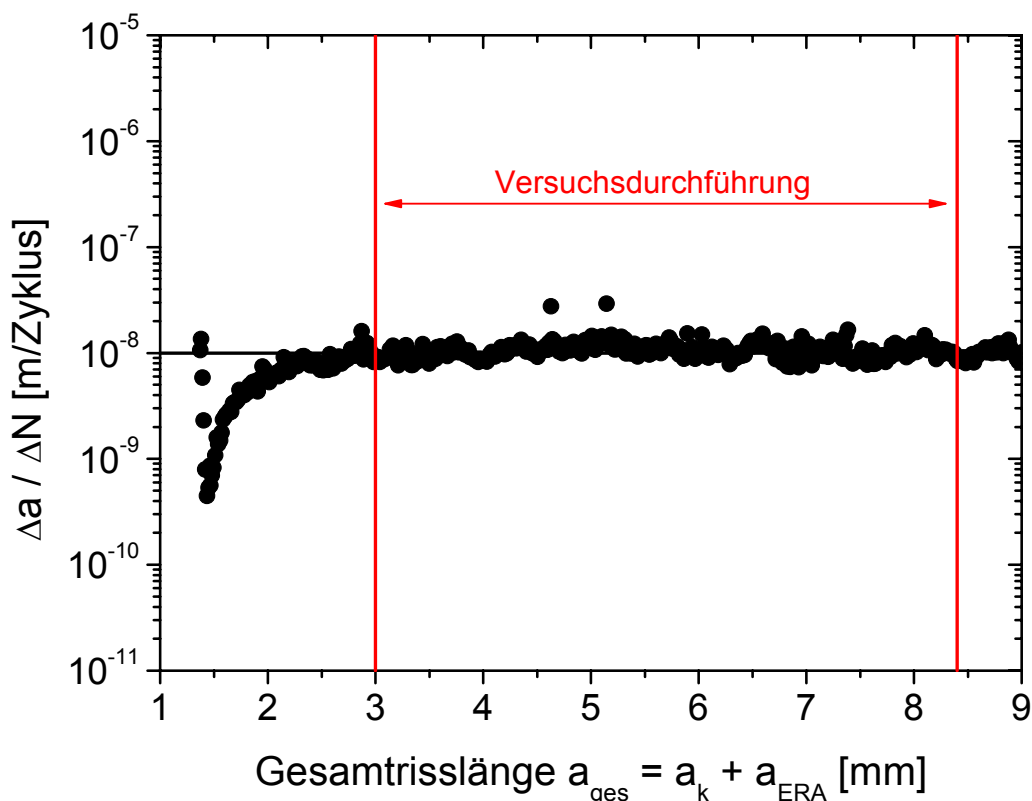


Abbildung 3.7: Rißgeschwindigkeit bei Regelung einer Spannungsintensität von $K_{\text{max}} = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $R = -1$

Die Versuchsdurchführung beginnt bei einer zyklischen Rißausbreitung mit konstanter Geschwindigkeit. Die Rißgeschwindigkeit wird von dem Regelungsrechner Erika I aus der Umrechnung des Potentials an der Probe in eine Rißlänge als Differenzenquotient zweier Meßpunkte nach Gleichung 3.2 bestimmt.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}} \quad 3.2$$

Die konstante Rißgeschwindigkeit ist bei den vorgenannten Versuchsparametern ab einem Verhältnis von $a/w \approx 0,25$ (= 3 mm) gegeben. Begrenzt wird dieser Bereich durch die Gültigkeitsgrenze der Korrekturfunktion (Gleichung 2.3) von $a/w = 0,7$ (= 8,4 mm).

3.3.6 Einbringen von berlasten

Unter einer Überlast versteht man das Einbringen einer Spitzenamplitude für einen Zyklus im Fall von einfachen berlasten, oder für mehrere Zyklen im Fall der berlastblcke. Für eine einfache Überlast wird der Kraftverlauf exemplarisch in Abbildung 3.8 gezeigt.

Die Überlast ist symmetrisch, da die berlastamplituden für den Zug- und den Druckanteil gleich groß sind. Bei unsymmetrischen berlasten sind die berlastamplituden unterschiedlich groß. Weiterhin kann die berlastreihenfolge variiert werden. Somit sind folgende Überlastkombinationen möglich: Zug, Druck, Zug/Druck und Druck/Zug. Die berlasthhe wird für alle Spannungsverhältnisse wie folgt berechnet.

$$\alpha_{\max} = \frac{F_{\max, \ddot{U}L}}{F_{\max, GL}} [-] \text{ bzw. } \alpha_{\max} = \left(\frac{F_{\max, \ddot{U}L}}{F_{\max, GL}} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad 3.3$$

$$\alpha_{\min} = \frac{F_{\min, \text{ÜL}}}{F_{\min, \text{GL}}} [-] \text{ bzw. } \alpha_{\min} = \left(\frac{F_{\min, \text{ÜL}}}{F_{\min, \text{GL}}} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad 3.4$$

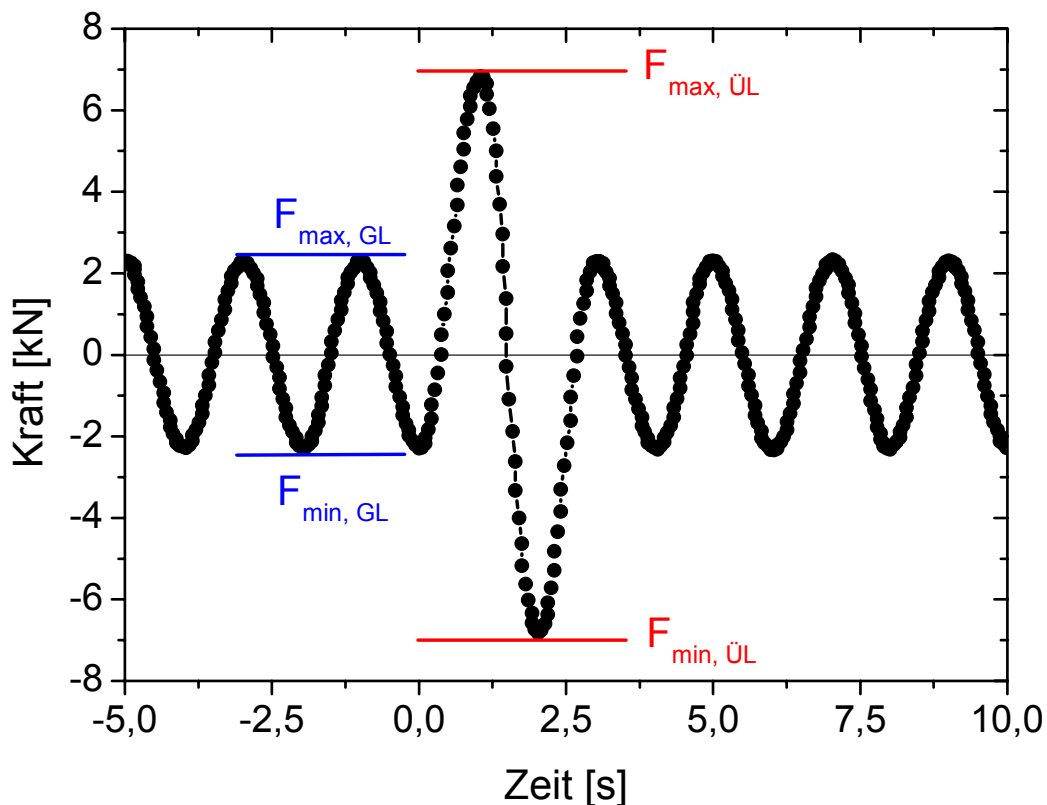


Abbildung 3.8: Kraftverlauf einer symmetrischen Überlast

Bei den Überlastblöcken wird die Überlast für mehr als einen Zyklus eingebracht. Die Überlasthöhe des Blockes wird dabei für den ersten Überlastzyklus berechnet. Zur Kontrolle aller Zyklen im Überlastblock ist eine Berechnung der Überlasthöhe aus den Kraftamplituden nicht mehr sinnvoll, da mit zunehmender Rißlänge die Kraftamplitude gesenkt wird, um die Spannungsintensität konstant zu halten. Deshalb wird die Überlasthöhe alternativ aus den zu den Kraftamplituden zugehörigen Spannungsintensitäten nach Gleichung 3.5 und 3.6 berechnet.

$$\alpha_{k,max} = \frac{K_{max,ÜL}}{K_{max,GL}} [-] \text{ bzw. } \alpha_{k,max} = \left(\frac{K_{max,ÜL}}{K_{max,GL}} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad 3.5$$

$$\alpha_{k,min} = \frac{K_{min,ÜL}}{K_{min,GL}} [-] \text{ bzw. } \alpha_{k,min} = \left(\frac{K_{min,ÜL}}{K_{min,GL}} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad 3.6$$

Abbildung 3.9 zeigt diesen Unterschied an Hand eines symmetrischen Überlastblockes von 200% auf. Im Vergleich zu den konstanten Amplituden der Spannungsintensität ist der Abfall der Kraftamplituden während des Überlastblockes deutlich erkennbar.

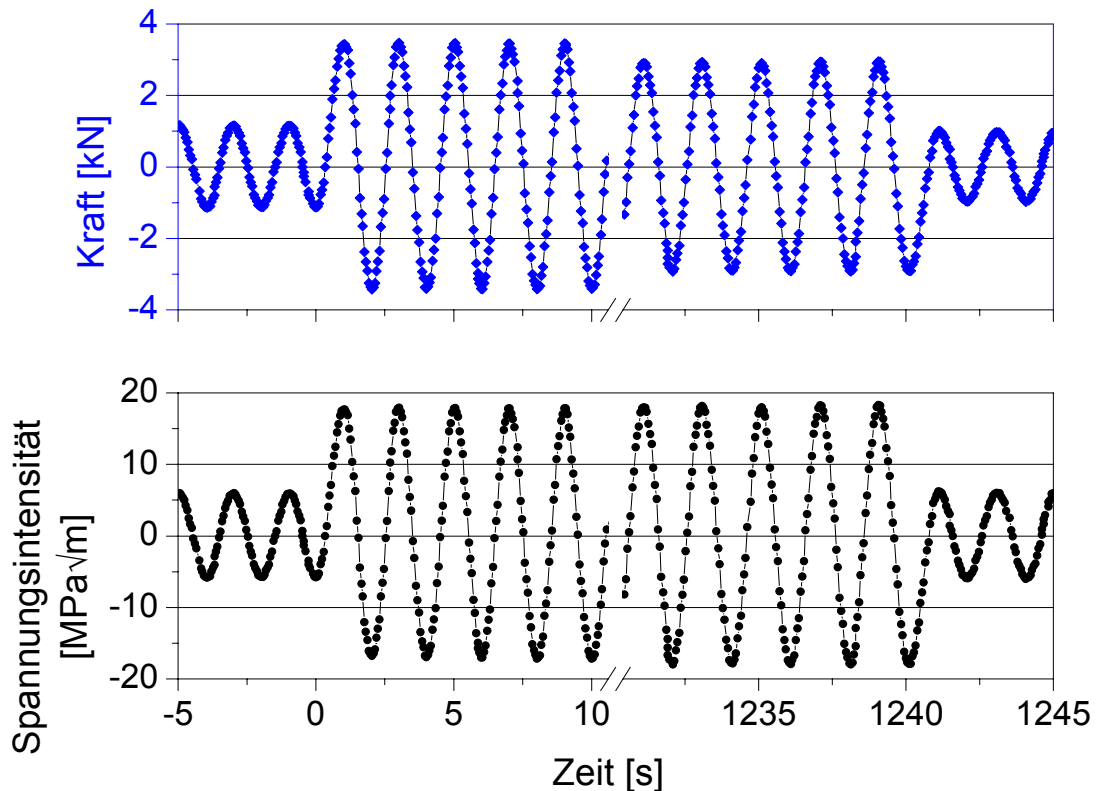


Abbildung 3.9: Vergleich des Verlaufs der Spannungsintensität und Kraft bei einem Überlastblock von 622 Überlastzyklen

4 Ergebnisse

4.1 Einfluß einer Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung

Im folgenden wird der grundsätzliche Einfluß einer Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung erläutert. Wie in Kapitel 3.3.5 beschrieben, wird durch die Regelung der Spannungsintensität eine konstante Rißausbreitungsgeschwindigkeit ermöglicht. Dieser wird eine Ermüdungsrißausbreitung gegenübergestellt, in deren Verlauf eine Überlast eingestreut wurde.

Die Rißausbreitungskurven aus Abbildung 3.1 zeigen bei konstanter Belastung eine Streuung der Rißgeschwindigkeit. Um einen direkten Vergleich der Rißausbreitungsexperimente bei unterschiedlichen Ausgangsrißgeschwindigkeiten zu ermöglichen, werden dazu alle Meßpunkte auf ihre jeweilige Rißgeschwindigkeit vor der Überlasteinstreuung $(\Delta a/\Delta N)_0$ normiert (Gleichung 4.1) und relativ zur Gesamtrißlänge der Überlasteinstreuung aufgetragen.

$$\left(\frac{\Delta a}{\Delta N}\right)_{\text{rel}} = \frac{\frac{\Delta a}{\Delta N}}{\left(\frac{\Delta a}{\Delta N}\right)_0} \quad 4.1$$

Abbildung 4.1 zeigt einen Vergleich zwischen einer Ermüdungsrißausbreitung ohne Überlast und einer 200%-Zug/Druck-Überlast, deren Kraftverlauf in Abbildung 3.8 zu sehen ist.

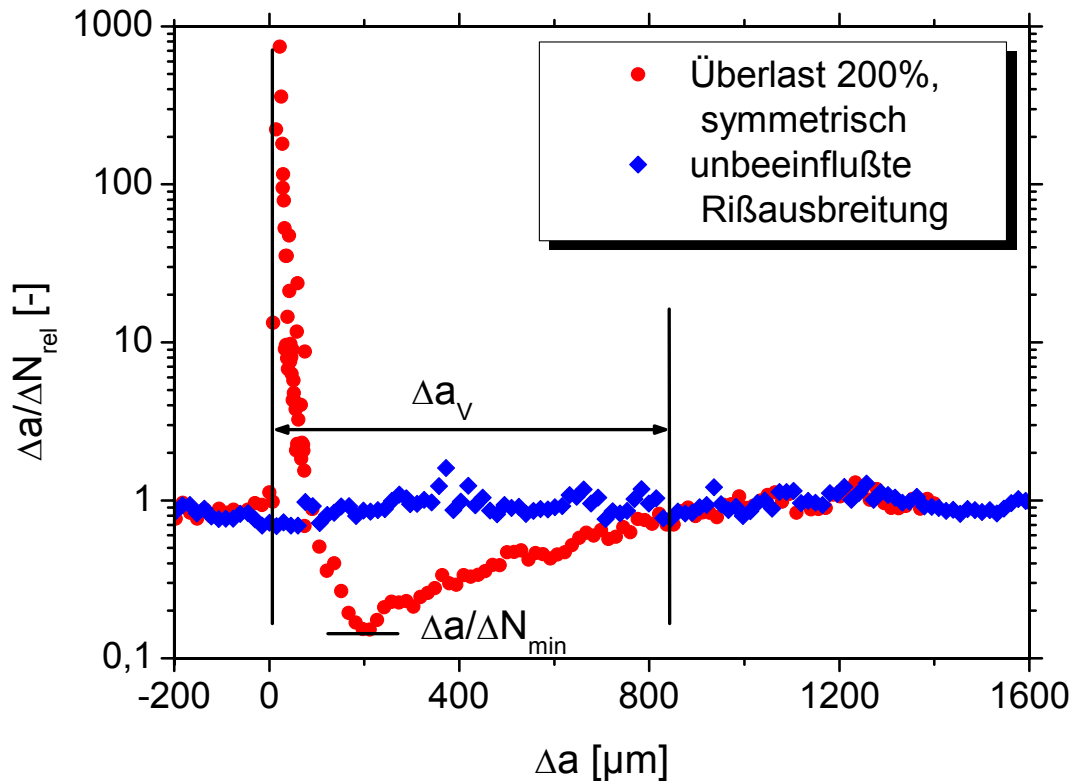


Abbildung 4.1: Einfluß einer Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung

Die Rißausbreitung ohne Überlasteinstreuung zeigt eine nahezu konstante relative Rißfortschrittsrate. Das Einbringen der symmetrischen 200%-Überlast verursacht anfangs eine deutliche Rißbeschleunigung. Daran schließt sich ein ausgeprägter Verzögerungsbereich Δa_v an, in dem die Rißgeschwindigkeit kleiner als die Rißgeschwindigkeit vor der Überlasteinstreuung ist. Der gesamte Verzögerungsbereich Δa_v besteht aus dem Anteil der kurzzeitigen Beschleunigung und der ausgedehnten Verzögerung, deren Extremwert die kleinste Rißfortschrittsrate $\Delta a / \Delta N_{min}$ ist.

Trägt man die Rißlänge über der Zahl der Lastwechsel auf, so ergibt sich die für $\Delta K = \text{konst.}$ erwartete Rißausbreitungsgeschwindigkeit. Durch

eine Zugüberlast verändert sich die Rißfortschrittsrate entsprechend der Änderung der Geradensteigung. In Abbildung 4.2 ist für den Überlasteinfluß eine Abweichung vom linearen Rißfortschritt deutlich erkennbar.

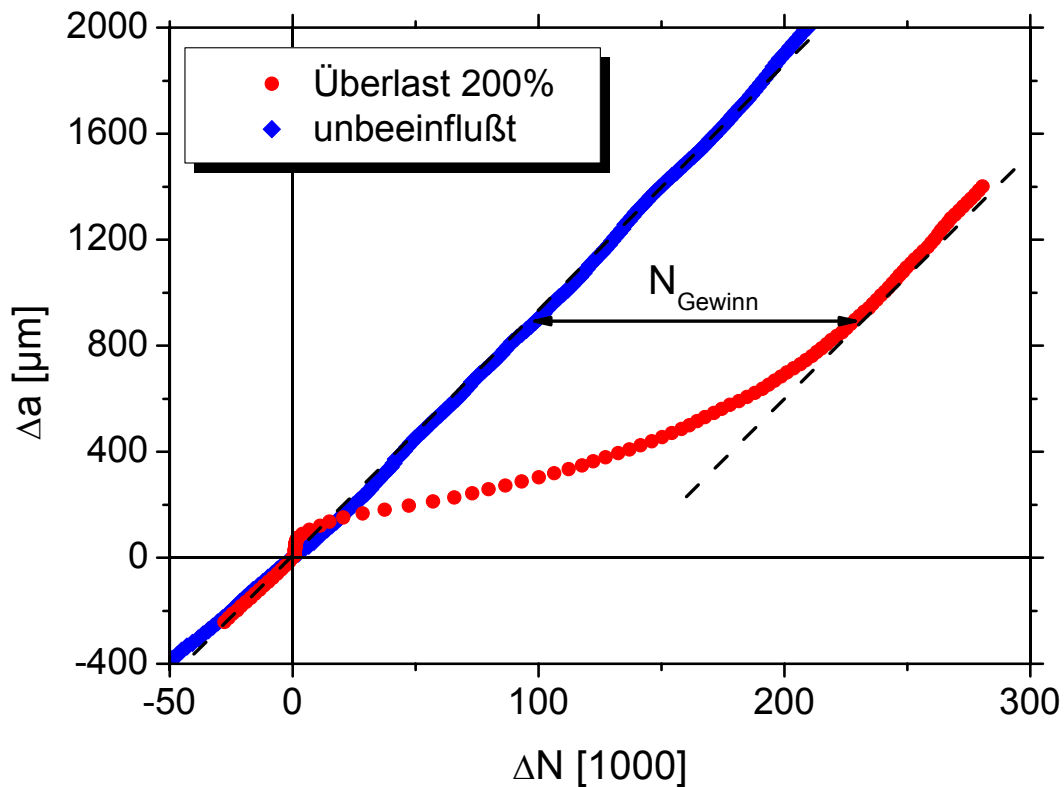


Abbildung 4.2: Überlasteinfluß und Lebensdauererwerb

Die Rißbeschleunigung in Folge der Überlast ist in dieser Darstellung an der kurzzeitigen Zunahme der Steigung erkennbar. Der weitaus größere Teil des Einflußgebietes der Überlast wird hingegen von einer deutlich kleineren Steigung dominiert. Vergleicht man die unterschiedlichen Verläufe, so ergibt die Rißausbreitung mit Überlast einen Lebensdauererwerb, da für die Distanz von in diesem Fall $1000 \mu\text{m}$ unterschiedlicher Rißausbreitung etwa 130.000 mehr Lastwechsel benötigt werden, als bei der Rißausbreitung ohne Überlast.

4.2 Auswertung des Potentialverlaufs

Der Potentialverlauf wird mit einem zweiten Rechner während und nach der Überlasteinstreuung gemessen. Der Rechner Erika II erfaßt Kraft, Wegaufnehmer und Potential mit einer Meßfrequenz von 26 Hz und speichert die Meßwerte im ASCII-Format. Die Messung wird vor der Überlasteinstreuung manuell gestartet und endet rechnerbedingt nach maximal 1500 Zyklen bei einer Versuchsfrequenz von $f = 0,5$ Hz.

Abbildung 4.3 zeigt den Potentialverlauf der symmetrische Zug/Druck-Überlast von 200% aus Abbildung 3.8.

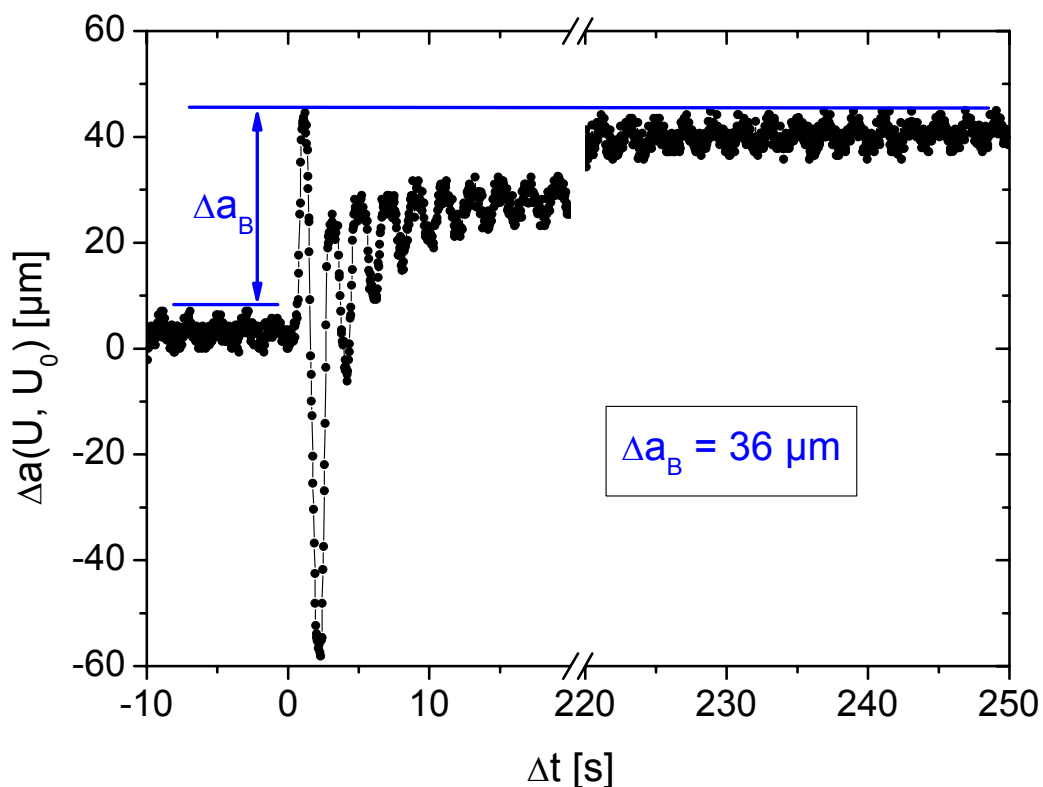


Abbildung 4.3: Auswertung des Potentialverlaufs einer 200%-Zug/Druck-Überlast

Dabei wird aus dem Potential nach *Johnson* eine Rißlänge berechnet und relativ zur Überlasteinstreuung aufgetragen. Vor der Überlasteinstreuung ist der sinusförmige Verlauf der Grundlast erkennbar. Die Differenz der Maxima zwischen Grundlast und Überlast ergeben den beschleunigten Rißfortschritt Δa_B . In diesem Fall beträgt der Rißfortschritt $\Delta a_B = 36 \mu\text{m}$.

Im weiteren Verlauf ist auf Grund des Druckanteils ein ausgeprägtes Schließen des Risses zu erkennen, da bei Bruchflächenkontakt die leitende Querschnittsfläche zu- und damit das Potential abnimmt. Der Riß benötigt nach der Überlast eine gewisse Anzahl von Zyklen, um sich so weit wie im Überlastzyklus wieder öffnen zu können. Bis dahin ergibt sich ein im Vergleich zum Überlastzyklus kleineres Potential. Anschließend steigt das Potential mit wachsender Rißlänge weiter an, da sich der Riß weiter ausbreitet.

4.3 Einfache Überlasten

Für die Untersuchung des Reihenfolgeeffektes bei einfachen Überlasten werden unsymmetrische Überlasten betrachtet. Diese bestehen nicht ausschließlich aus einem Zuganteil, sondern zusätzlich aus einem Druckanteil. Dabei wird sowohl die Reihenfolge der Anteile, als auch deren Überlasthöhe variiert. Zur systematischen Untersuchung wird ein Überlastanteil konstant belassen, z. B. der Zuganteil, während der andere Überlastanteil variiert wird.

4.3.1 Verzögerungsbereich der Überlasten

Um den Einfluß des Druckanteils auf den Verzögerungsbereich der unsymmetrischen Überlasten zu untersuchen, werden zunächst

Druck/Zug-Überlasten analysiert. Dazu wird bei konstantem Zuganteil der Druckanteil der Überlasten variiert.

In Abbildung 4.4 ist die Ausdehnung der Verzögerungsbereiche Δa_v der Druck/Zug-Überlasten, sowie der Zugüberlasten (Drucküberlast = 0%) zum Vergleich, dargestellt. Bei allen untersuchten Überlasthöhen kann kein Einfluß der Drucküberlasthöhe auf die Ausdehnung des Verzögerungsbereiches festgestellt werden.

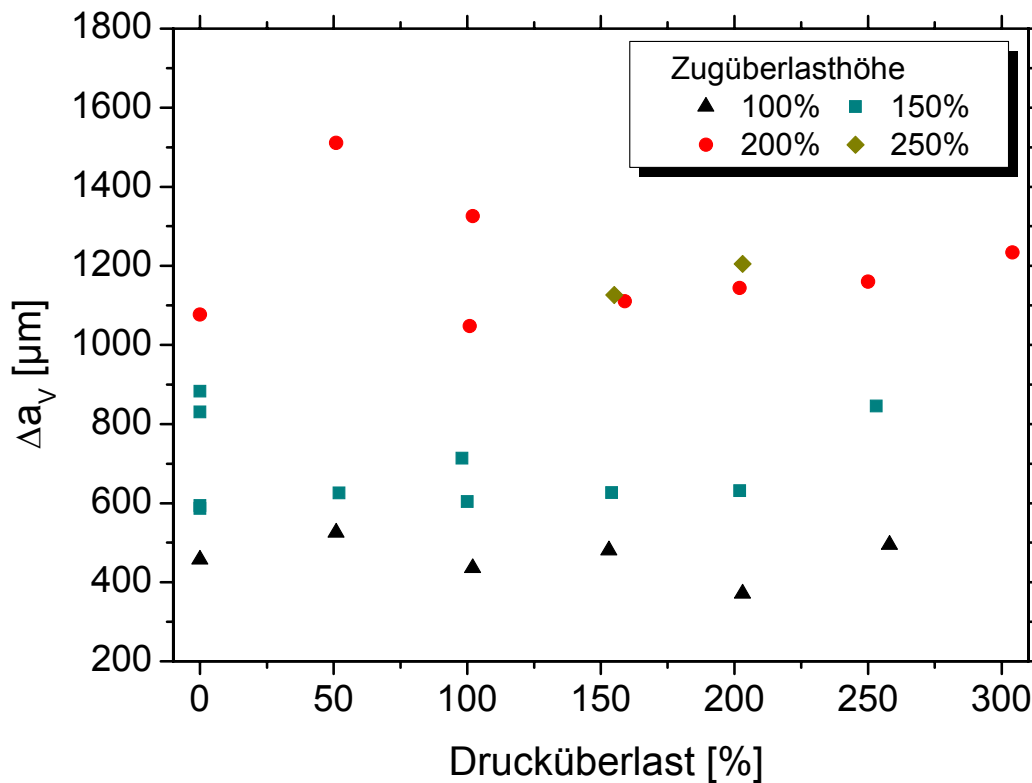


Abbildung 4.4: Ausdehnung der Verzögerungsbereiche der Druck/Zug-Überlasten

Nicht darstellbar ist bei dieser Auftragung das Auftreten des Ristopps. Rißstopp wird definiert, wenn innerhalb von mindestens 10^6 Zyklen kein Rißfortschritt zu beobachten ist. Da bei einigen Versuchen der Überlasten mit einem Zuganteil von 250%, sowie bei allen Versuchen mit

300%-Zuganteil Rißstillstand eingetreten ist, wird der Verzögerungsbereich bei Rißstillstand als eine unendliche Ausdehnung definiert. Damit wird eine Darstellung durch Kehrwertbildung des Verzögerungsbereiches möglich, da der Kehrwert der Verzögerungsbereiche bei Rißstopp Null beträgt. In Abbildung 4.5 sind die Kehrwerte der Verzögerungsbereiche der Druck/Zug-Überlasten aufgetragen.

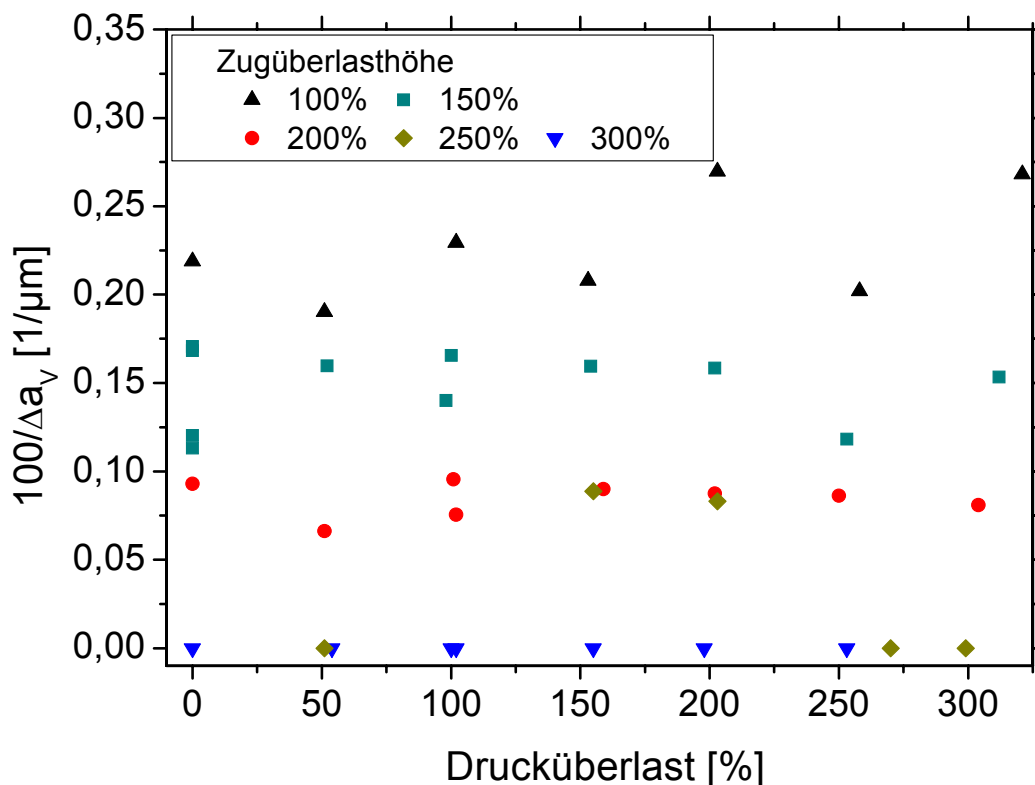


Abbildung 4.5: Verzögerungsbereich der Druck/Zug-Überlasten

Die Zugüberlasthöhe von 100% weist die größte Streuung der Lastniveaus auf. Der mittlere Wert dieser Zugüberlasthöhe beträgt $0,23 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}\mu\text{m}$ und stimmt damit mit dem Wert der 100%-Zugüberlasten von $0,22 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}\mu\text{m}$ gut überein. Die Lasthöhe 200% zeigt nur eine geringe Streuung. Der Mittelwert beträgt $0,08 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}\mu\text{m}$. Auch hier ist eine Übereinstimmung mit dem Wert der 200%-Zugüberlasten mit

$0,09 \cdot 10^{-2} \text{ 1}/\mu\text{m}$ gegeben. Praktisch keine Streuung weist hingegen die Reihe mit 300%-Zugüberlasten auf, da alle Versuche in einem Rißstillstand resultieren. Als Grenzlast für das Erreichen eines Ristillstandes kann die Lasthöhe mit 250% Zug angesehen werden, da sich der Riß in einigen Versuchen wieder erholt hat, bei einigen nicht. Dabei ist keine explizite Systematik zu erkennen.

Im Anschluß wird die Reihenfolge der berlastanteile umgekehrt, so daß die unsymmetrischen berlasten in der Reihenfolge Zug/Druck untersucht werden. Abbildung 4.6 zeigt die Ergebnisse, sowie die Zugüberlasten zum Vergleich.

Wie bereits bei den Druck/Zug-berlasten ist hier ebenfalls kein signifikanter Einfluß der Druckphase auf den Verzögerungsbereich der Überlast zu erkennen. Die Streuung ist bei den 100%-Zugüberlasten ebenfalls am größten. Der Mittelwert beträgt $0,22 \cdot 10^{-2} \text{ 1}/\mu\text{m}$ und stimmt damit mit dem Ergebnis der Druck/Zug-berlasten gut überein. Die Zugüberlasthöhe 200% weist die geringste Streuung der Lastniveaus auf. Ihr Mittelwert beträgt $0,09 \cdot 10^{-2} \text{ 1}/\mu\text{m}$ und korreliert damit gut mit den vorherigen Ergebnissen. Ein deutlicher Unterschied ergibt sich erstmals bei den 250%-Zugüberlasten. Bei einem Druckanteil der unsymmetrischen Überlast bis 100% ist auch hier bei allen Versuchen Rißstillstand zu verzeichnen. Bei einem Drucküberlastanteil von mehr als 150% resultiert kein Rißstillstand mehr, so daß sich der Riß weiter ausbreitet. Die Ordinatenwerte des Lastniveaus 250% Zug sind im Fall der Erholung des Risses größer als die Werte mit 300% Zug, was gleichbedeutend mit einer kleineren Ausdehnung des Verzögerungsbereiches ist. Der Mittelwert des Verzögerungsbereiches mit einem

Zuganteil von 300% beläuft sich für alle Überlastkombinationen mit einem Drucküberlastanteil $> 200\%$ auf $0,05 \cdot 10^{-2} 1/\mu\text{m}$.

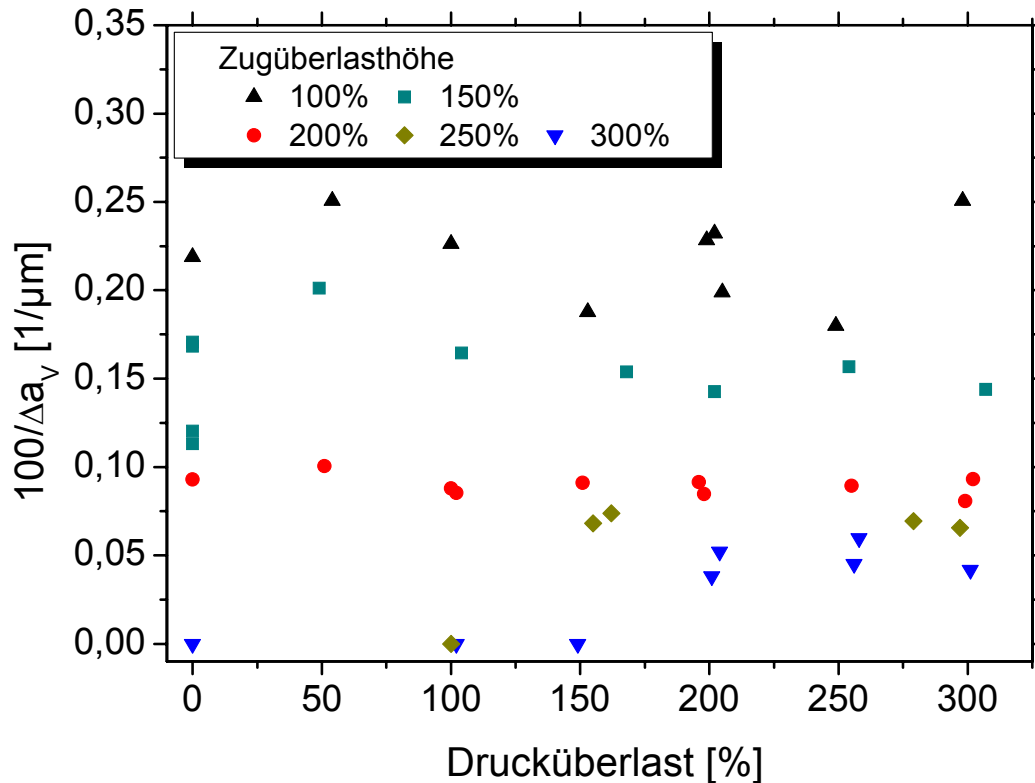


Abbildung 4.6: Verzögerungsbereich der Zug/Druck-Überlasten

Im folgenden wird untersucht, ob die Ausdehnung des Verzögerungsbereiches durch die Mittelspannung der Grundlast beeinflussbar ist. Dazu werden Versuche mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ durchgeführt. In beiden Spannungsverhältnissen wird eine Rißgeschwindigkeit von 10^{-8} m/Zyklus für die Grundbelastung gewählt. Deshalb wird die Spannungsintensität der Grundlast bei $R = 0,7$ auf $\Delta K = 3,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ eingestellt. Bei den dabei eingebrachten Überlasten handelt es sich ausschließlich um reine Zugüberlasten. In Abbildung 4.7 ist der Kehrwert des Verzögerungsbereiches zu sehen.

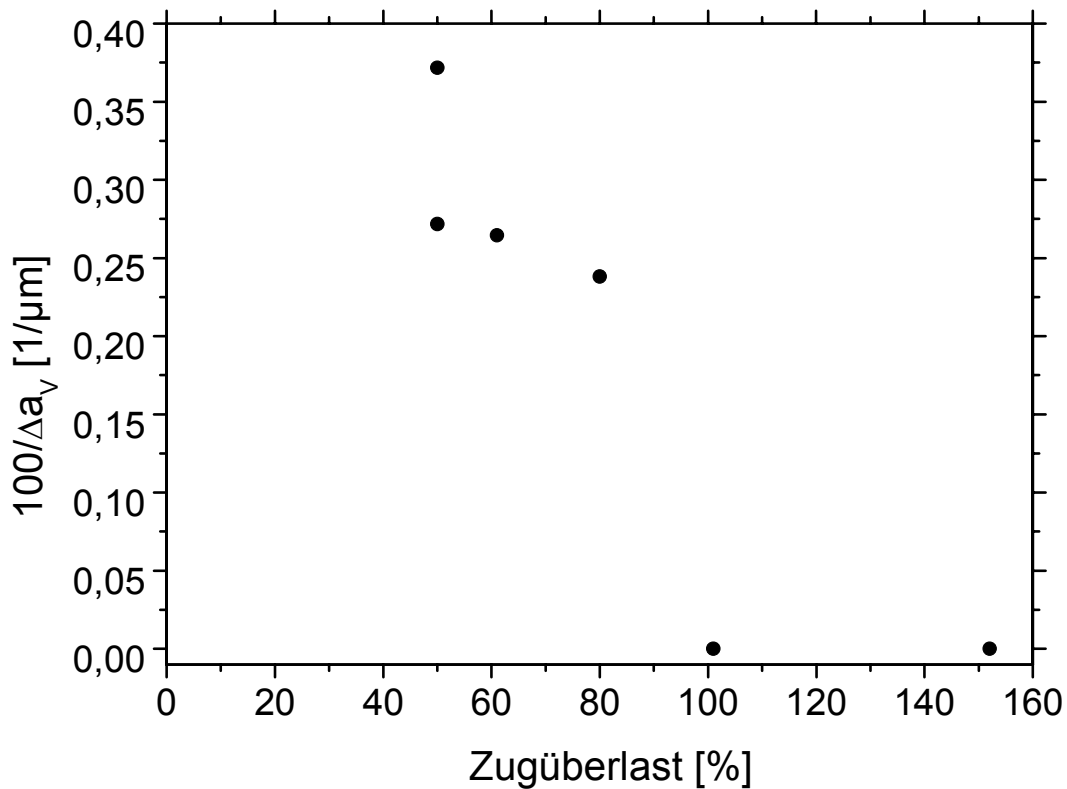


Abbildung 4.7: Verzögerungsbereich der Zugüberlasten bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$

Mit zunehmender Zugüberlasthöhe nimmt die Größe des Verzögerungsbereiches zu und damit der Kehrwert ab. Die Verzögerungsbereiche sind bei gleicher Zugüberlasthöhe deutlich ausgeprägter als die des Spannungsverhältnisses von $R = -1$. Ab einer Zugüberlasthöhe von 100% stellt sich in allen Versuchen Rißstillstand ein.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß bei einer systematischen Untersuchung des Einflusses des Drucküberlastanteils auf den Verzögerungsbereich von unsymmetrischen Überlasten im Spannungsverhältnis $R = -1$ keine signifikanten Einflüsse zu beobachten sind, was die Größe des Bereiches betrifft. Der Drucküberlastanteil der

Zug/Druck-Überlasten beeinflusst aber maßgeblich, ob sich Rißstillstand einstellt. Bei einem ausreichend hohen Drucküberlastanteil kann sich der Ermüdungsriß erholen und weiter ausbreiten.

4.3.2 Rißfortschritt bei maximaler Verzögerung

Neben der Größe des Verzögerungsbereiches bei unsymmetrischen Überlasten ermöglicht auch die Auswertung der minimalen Rißfortschrittsrate in Folge der Überlast quantitative Aussagen über den Einfluß der Druckphase. Die minimale Rißfortschrittsrate entspricht der maximalen Verzögerung in Folge der Überlast. In Abbildung 4.8 ist der Einfluß der Druckphase bei Druck/Zug-Überlasten im Vergleich mit Zugüberlasten zu sehen.

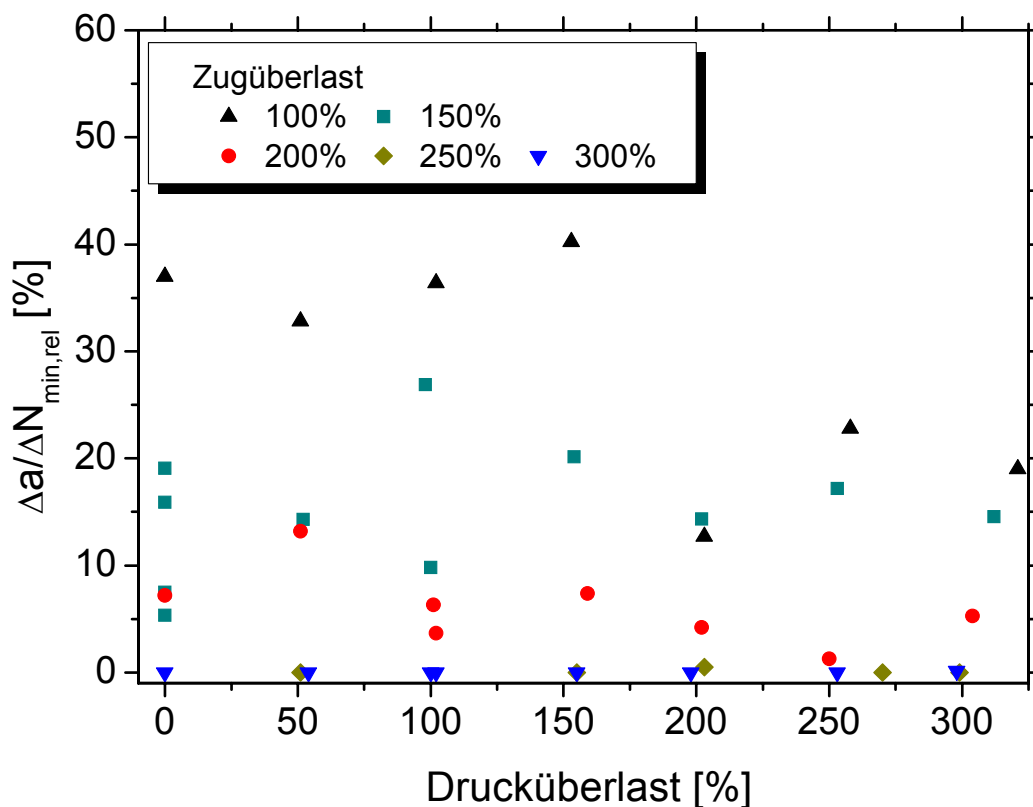


Abbildung 4.8: Minimale Rißfortschrittsrate bei Druck/Zug-Überlasten

Bei den minimalen Rißfortschrittsraten der einzelnen Zugüberlastniveaus ist keine Abhängigkeit von der Höhe des Drucküberlastanteils erkennbar. Lediglich bei der Zugüberlasthöhe von 100% ist ein Sprung bei den Meßwerten von 150% Drucküberlastanteil zu 200% zu erkennen. Die durchschnittliche minimale Rißfortschrittsrate im ersten Bereich dieser Laststufe beträgt 37% der Ausgangsrißgeschwindigkeit, im zweiten Teil, also nach dem Sprung, lediglich 18%. Eine nur geringe Streuung weist die Reihe der Überlastkombinationen mit einem Zuganteil von 200% auf. Die mittlere erzielte minimale Rißfortschrittsrate liegt bei 6% der Ausgangsrißgeschwindigkeit. Die Reihe mit 300% Zugüberlastanteil weist bis auf die symmetrische Überlastkombination Rißstillstand auf. Bei letzterer erholte sich der Ermüdungsriß, nachdem er bis auf 0,1% der Ausgangsrißgeschwindigkeit verzögert hatte.

Die Streuung in der minimalen Rißfortschrittsrate liegt bei Überlastkombinationen der Folge Zug/Druck etwas höher, Abbildung 4.9.

Hier ist bei keiner Lasthöhe ein horizontaler Verlauf der Meßpunkte erkennbar, vielmehr steigt die minimale Rißfortschrittsrate mit der Höhe des Drucküberlastanteils an. Diese Zunahme kommt einer Reduzierung der Verzögerungswirkung gleich, die durch den zuvor eingebrachten Zuganteil hervorgerufen wird. Ab einem Druckanteil $> 150\%$ tritt bei Überlasten mit einem Zuganteil von 250% kein Rißstopp mehr auf. Bei einem Zugüberlastanteil von 300% kann, im Unterschied zu den Druck/Zug-Überlasten, mit einem ausreichend großem Drucküberlastanteil Rißstillstand verhindert werden. Dazu wird ein Drucküberlastanteil von $> 250\%$ benötigt. Bei allen Versuchen mit diesem Zuganteil gab es nur eine Ausnahme, bei der bereits ein Drucküberlastanteil von 100% dazu ausreichte.

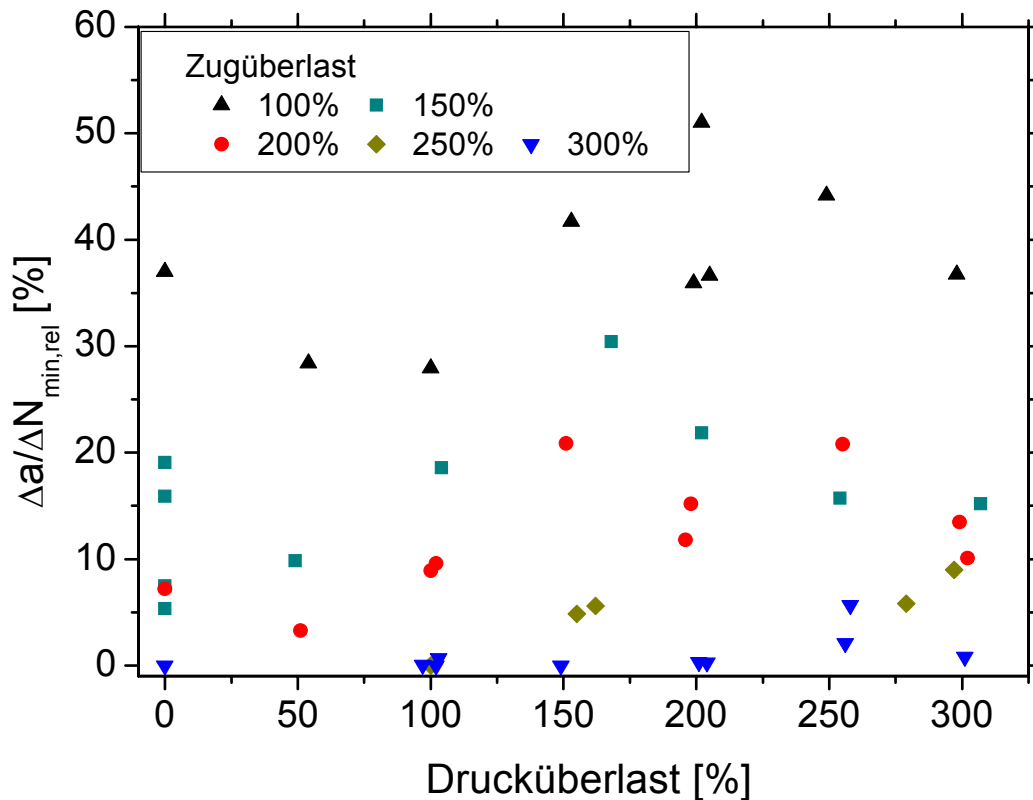


Abbildung 4.9: Minimale Rißfortschrittsrate bei Zug/Druck-Überlasten

Für die Untersuchung des Mittelspannungseinflusses auf die minimale Rißgeschwindigkeit ist in Abbildung 4.10 die minimale Rißfortschrittsrate der Zugüberlasten mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ aufgetragen.

Mit zunehmender Zugüberlasthöhe ist eine kleiner werdende minimale Rißfortschrittsrate erkennbar. Auffällig ist, daß die Werte dabei um den Faktor 100 kleiner sind, als bei den Überlasten mit einem Spannungsverhältnis von $R = -1$. Damit verzögern die Zugüberlasten bei einem Spannungsverhältnis der Grundlast von $R = 0,7$ den Rißfortschritt sehr

viel ausgeprägter, als die in der Regel größeren Zugüberlastanteile mit einem Spannungsverhältnis der Grundlast von $R = -1$.

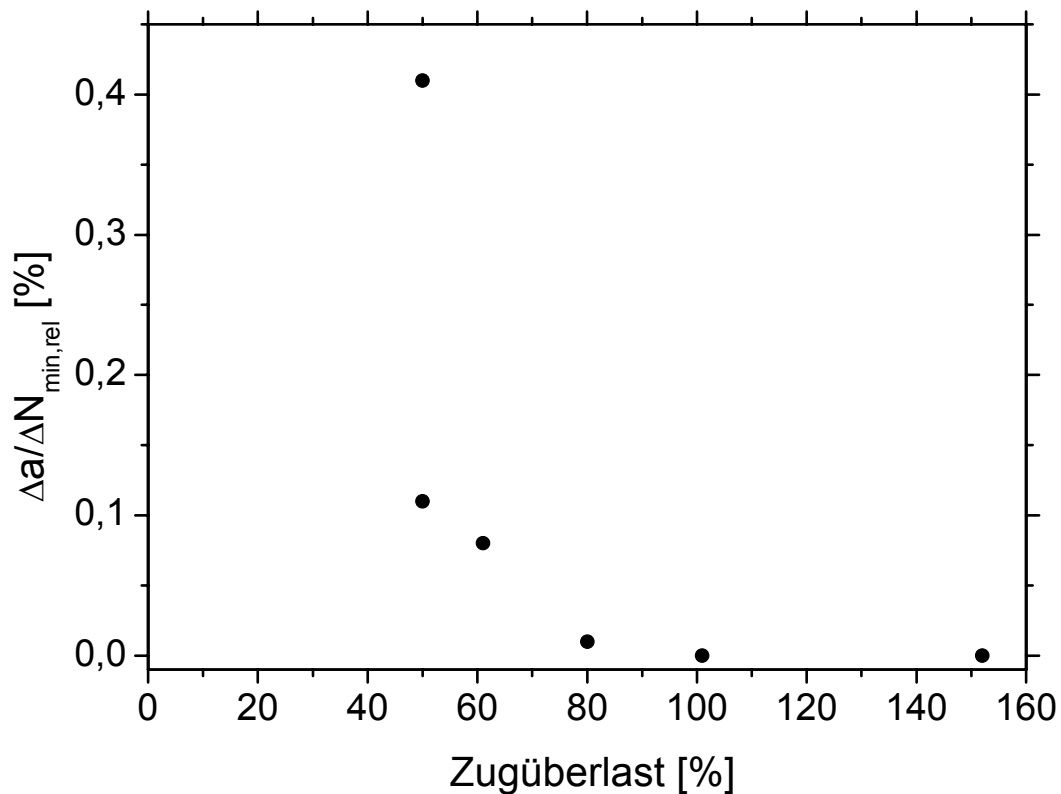


Abbildung 4.10: Minimale Rißfortschrittsrate der Zugüberlasten mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$

Bei den unsymmetrischen Überlasten der Reihenfolge Druck/Zug übt der Druckanteil keinen erkennbaren Einfluß auf die minimale Rißfortschrittsrate aus. Alle Grundlasthöhen zeigen einen nahezu horizontalen Verlauf der Meßergebnisse. Im Gegensatz dazu reduziert der Druckanteil der Zug/Druck-Überlasten die verzögernde Wirkung des Zuganteils. Bei ausreichend großer Drucküberlasthöhe wird damit Rißstopp verhindert.

4.3.3 Rißfortschritt im Überlastzyklus

In Kapitel 4.2 wurde gezeigt, daß der Zuganteil der Überlast einen beschleunigten Rißfortschritt Δa_B verursacht. In diesem Kapitel wird betrachtet, ob sich der Druckanteil auf diesen beschleunigten Rißfortschritt auswirkt. Dies kann auf Grund der zeitlichen Abfolge nur bei unsymmetrischen Überlasten der Reihenfolge Druck/Zug der Fall sein. In Abbildung 4.11 sind die Ergebnisse der Druck/Zug-Überlasten, sowie der Zugüberlasten zum Vergleich, aufgetragen.

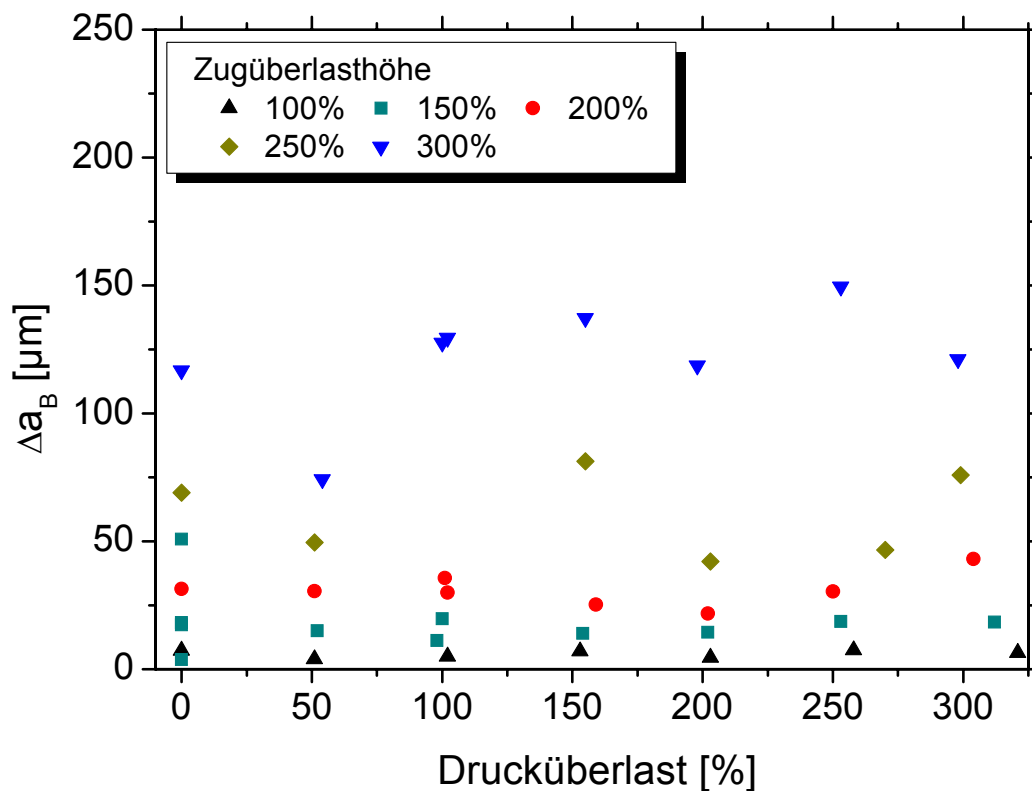


Abbildung 4.11: Beschleunigter Rißfortschritt bei Druck/Zug-Überlasten

Bei allen Lasthöhen stellt sich jeweils ein von der Höhe der Drucküberlast unabhängiger beschleunigter Rißfortschritt im Überlastzyklus ein. Bei Lastniveaus mit einem Zuganteil unter 250% ist die

Streuung der Rifortschritte nur sehr klein. Bei einem Zuganteil $\geq 250\%$ nimmt die Streuung zu.

Der beschleunigte Rißfortschritt im Überlastzyklus der Zugüberlasten bei einem Spannungsverhältnis der Grundlast von $R = 0,7$ ist in Abbildung 4.12 aufgetragen.

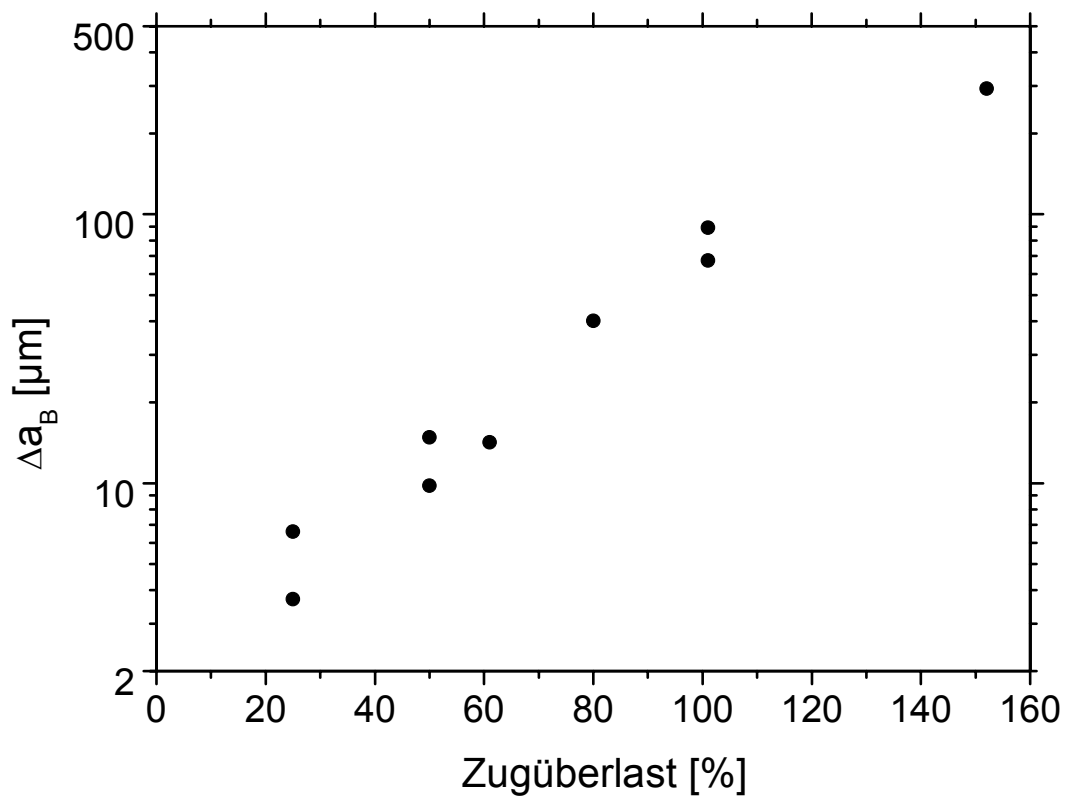


Abbildung 4.12: Beschleunigter Rißfortschritt der Zugüberlasten bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$

In halblogarithmischer Darstellung ergibt sich hier ein linearer Zusammenhang zwischen der Überlasthöhe und dem beschleunigten Rißfortschritt Δa_B . Dabei nimmt der Rißfortschritt mit zunehmender Zugüberlasthöhe zu.

4.3.4 Akkumulation von Überlasten

Bei der Untersuchung von Reihenfolgeeffekten ist die gegenseitige Beeinflussung der Überlasten von Interesse. Dazu gehört ebenfalls, wie sich die Verzögerungseffekte von Zugüberlasten akkumulieren lassen. Um eine maximale Akkumulation zu erreichen, wird jeweils bei Erreichen der minimalen Rißfortschrittsrate $\Delta a/\Delta N_{\min}$ eine weitere Zugüberlast eingebracht.

In Abbildung 4.13 ist der Rißfortschritt im Überlastzyklus in Abhängigkeit der Überlasteinstreuung aufgetragen. Dabei ist die erste Überlast als Nullter Zyklus gekennzeichnet.

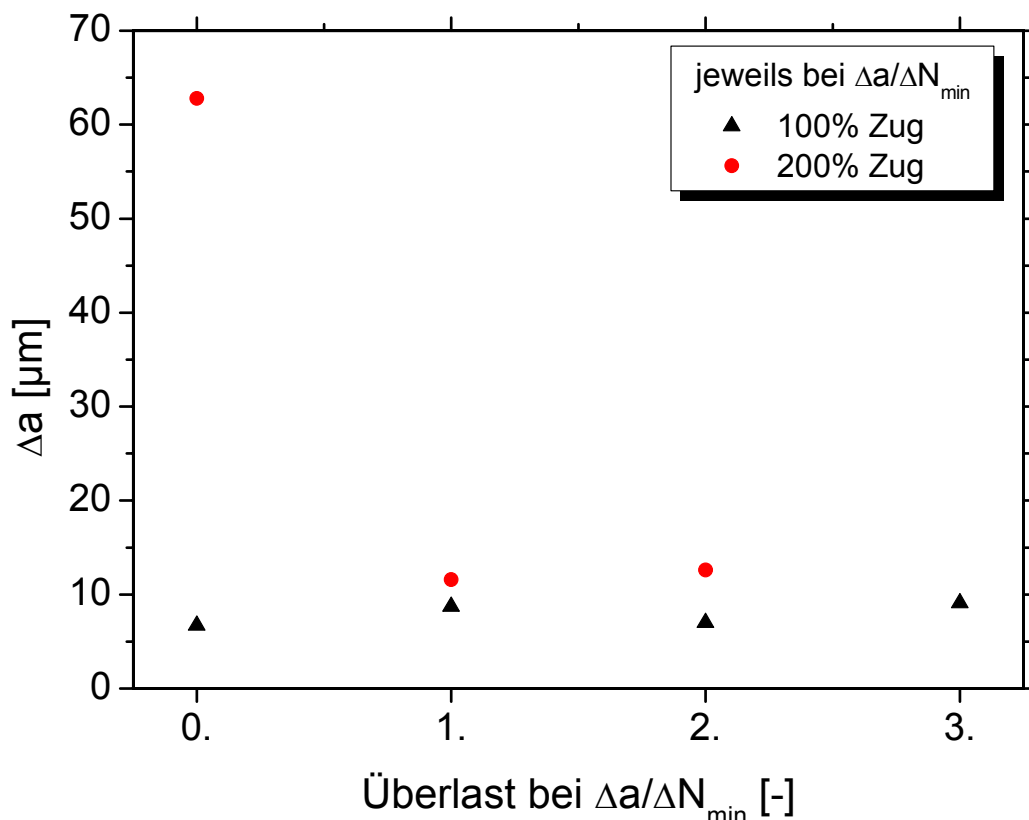


Abbildung 4.13: Akkumulation von einfachen Zugüberlasten

Die Überlasthöhe 100% zeigt einen nahezu horizontalen Verlauf der Rißfortschrittsraten. Bei dieser Auswertung ist damit keine Beeinflussung des Rißfortschrittsverhaltens im Überlastzyklus erkennbar.

Der Rißfortschritt im Überlastzyklus nimmt bei der Überlasthöhe 200% im Vergleich zur ersten Überlast ab, bleibt dabei aber für alle Überlasten im Verzögerungsbereich nahezu gleich.

Ermittelt man die minimale Rißfortschrittsrate, die sich nach jeder Überlast einstellt, so erhält man die in Abbildung 4.14 gezeigten Ergebnisse.

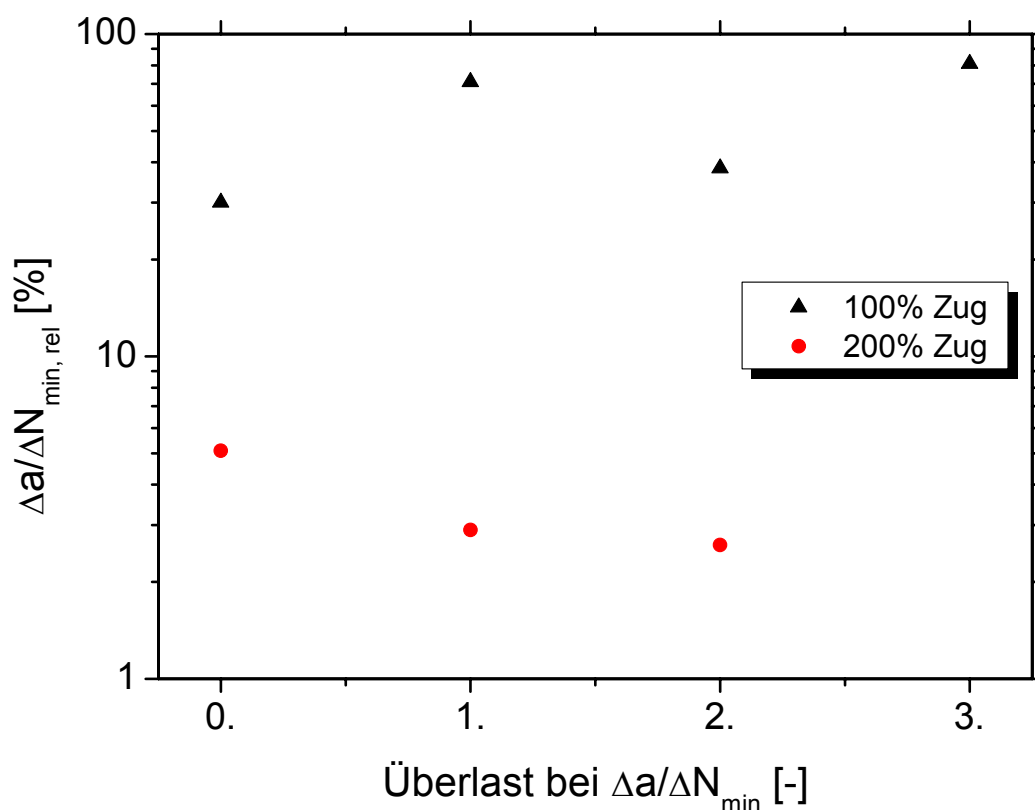


Abbildung 4.14: Minimale Rißfortschrittsrate je Überlast bei der Akkumulation von Zugüberlasten

Die 100%-Zugüberlasten zeigen nahezu gleich bleibende minimale Rißfortschrittsraten, während die 200%-Zugüberlasten tendenziell kleiner werdende Werte aufweisen. Dabei werden die Rißlängen, bis zum Erreichen des jeweiligen minimalen Rißfortschrittes immer kürzer, Abbildung 4.15.

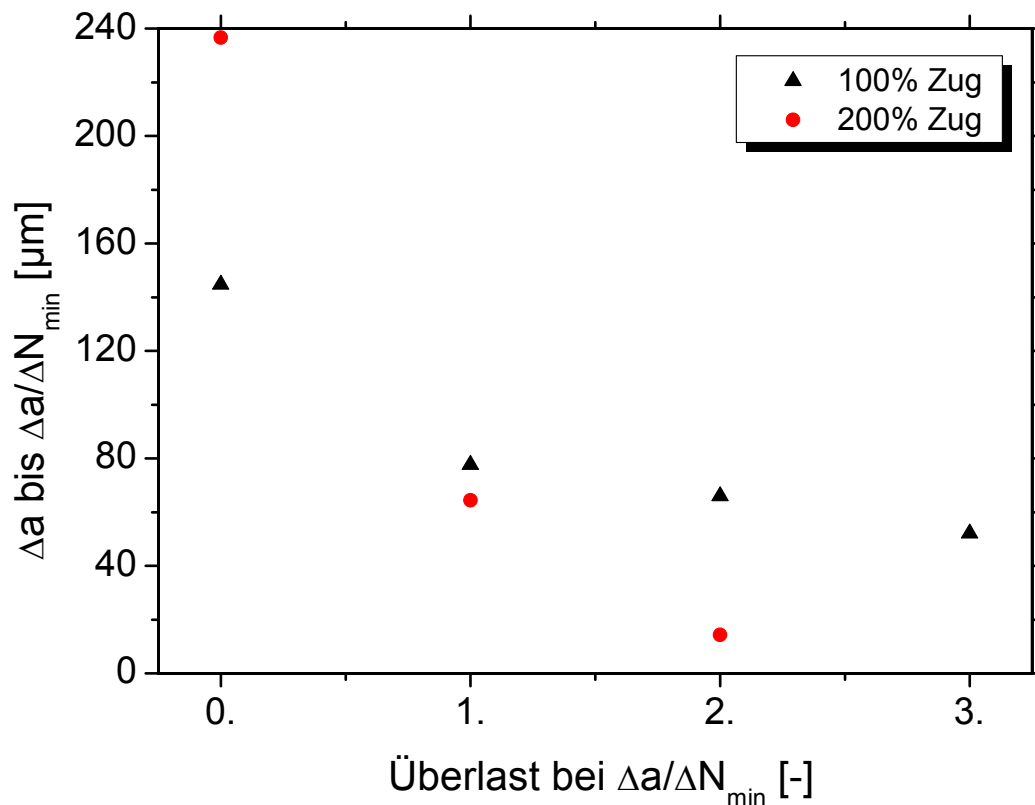


Abbildung 4.15: Distanz zur jeweiligen minimalen Rißfortschrittsrate bei der Akkumulation von Zugüberlasten

Bei allen Versuchen, bei denen die Zugüberlasten jeweils bei der maximalen Verzögerung der vorhergehenden Zugüberlast eingebracht wurden, ist auf diese Weise, abhängig von der Überlasthöhe, nach 5 bis 15 Zugüberlasten Rißstillstand erreicht worden.

4.4 Mehrfache Überlasten

Eine weitere einfache Art von Betriebslastfolgen stellen Überlastblöcke dar. Dabei wird nicht nur eine einzelne Überlast, sondern mehrere aufgebracht. Die Versuchsregelung ist auch während des Überlastblockes spannungsintensitätskontrolliert. Ein Überlastblock kann als eine Änderung des Grundlastniveaus aufgefaßt werden. Damit wird gewährleistet, daß auch innerhalb der Überlastblöcke das Spannungsverhältnis der Grundlast vorliegt.

Im folgenden wird untersucht, ob sich der Rißfortschritt pro Überlastzyklus mit wachsender Zyklenzahl verändert. In Abbildung 4.16 ist der Rißfortschritt pro Zyklus in doppeltlogarithmischer Darstellung innerhalb eines Überlastblockes aufgetragen.

Bei jeder Überlasthöhe ist eine deutliche Abnahme der Rißfortschrittsrate mit steigender Lastspielzahl erkennbar. Besonders deutlich wird dieser Trend am Beispiel des 300%-Überlastblockes, da hier die Streuung im Rißfortschritt am geringsten ist. Vom 1. zum 600. Lastspiel im Überlastblock nimmt die Rißfortschrittsrate um den Faktor 20 ab. Im Rahmen der Meßgenauigkeit einer zyklenweisen Auswertung des Rißfortschrittes ist etwa im 200. Überlastzyklus die Rißfortschrittsrate, die sich für diese Lasthöhe aus der Rißausbreitungskurve ergibt, erreicht.

Der Verzögerungsbereich im Überlastblock läßt sich nur bei der Überlasthöhe 100% auswerten. Der Verzögerungsbereich beträgt dabei 490,3 μm . Damit stimmt der Kehrwert von $0,20 \cdot 10^{-2} \text{ 1}/\mu\text{m}$ mit den Verzögerungsbereichen bei einfachen Zug/Druck-Überlasten (Abbildung 4.6) gut überein. Bei allen anderen Lasthöhen der Überlast-

blöcke tritt immer Rißstillstand ein, wenn die Belastung wieder auf die Grundlast reduziert wird.

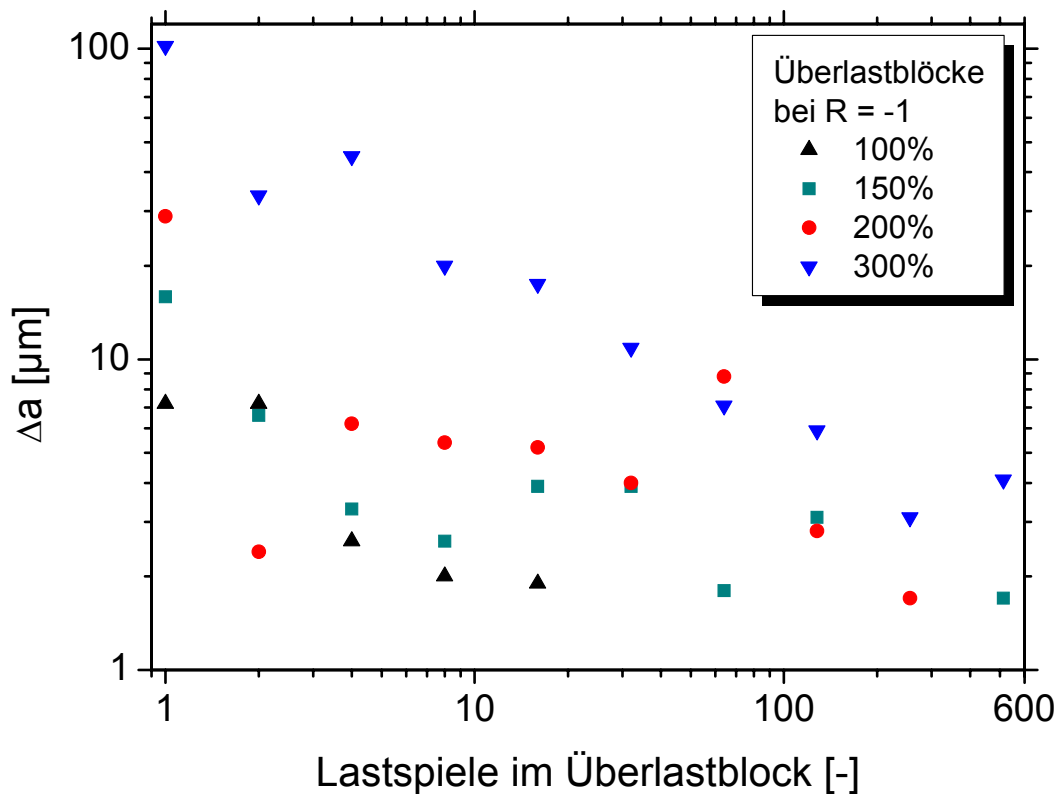


Abbildung 4.16: Rißfortschritt pro Zyklus im Überlastblock bei einem Spannungsverhältnis von R = -1

Mit Überlasthöhen von 50%, 100% und 150% werden bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ und einer Grundlast von $\Delta K = 3,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ebenfalls Überlastblöcke unter Beibehaltung des Spannungsverhältnisses aufgebracht, Abbildung 4.17.

Auch hier nimmt mit zunehmender Lastspielzahl im Überlastblock die Rißfortschrittsrate deutlich ab. Dabei nimmt die Rißfortschrittsrate innerhalb des Überlastblockes sogar um den Faktor 100 ab. Der

Überlastblock mit 150% korreliert mit $0,4 \mu\text{m}/\text{Zyklus}$ nach etwa 30 Zyklen mit der Reißausbreitungskurve gut. Die Reißfortschrittsraten der übrigen Überlastblöcke liegen jedoch unter der Auflösungsgrenze der Gleichstrompotentialsonde und können somit nicht erfaßt werden.

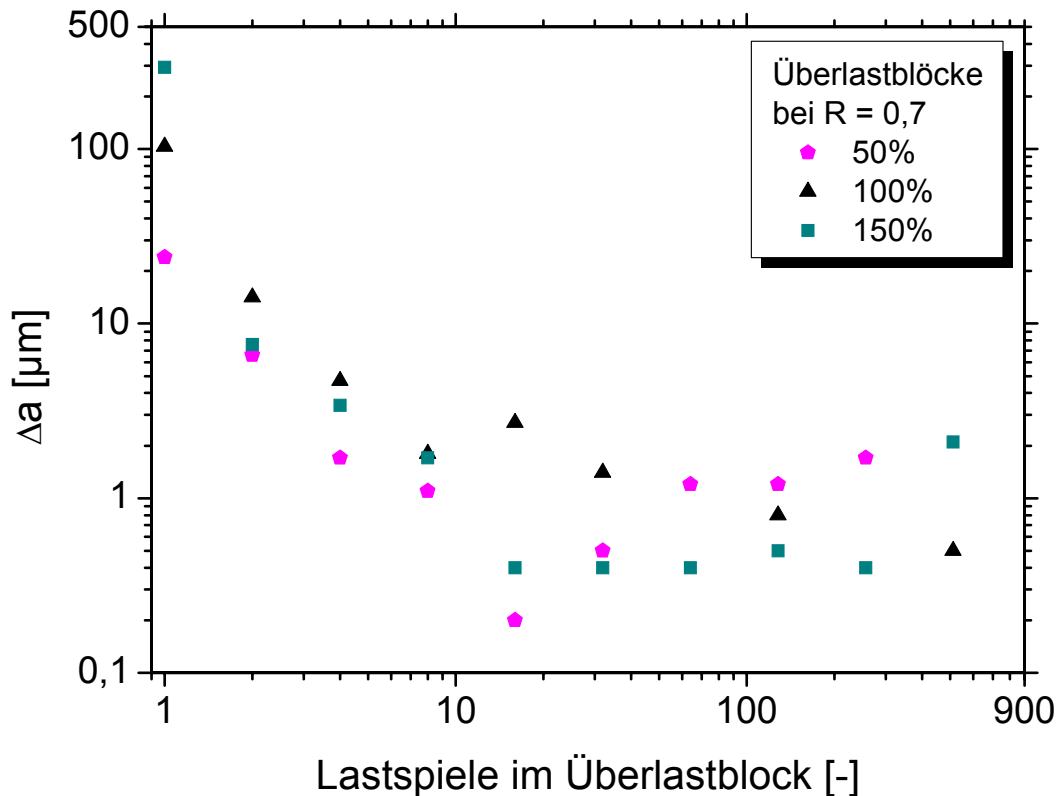


Abbildung 4.17: Reißfortschritt pro Zyklus im Überlastblock bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$

Der Verzögerungsbereich der Überlastblöcke mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ ist lediglich bei der Überlasthöhe 50% zu $354,8 \mu\text{m}$ bestimmbar. Der Kehrwert dazu stimmt mit $0,28 \cdot 10^{-2} 1/\mu\text{m}$ mit den Werten der einfachen Zugüberlasten aus Abbildung 4.7 gut überein. Bei den übrigen Überlastniveaus stellt sich bei allen Überlastblöcken

Rißstillstand ein, wenn die Belastung wieder auf die Grundlast reduziert wird.

4.5 Bruchflächenanalyse der mehrfachen Überlasten

Die Bruchflächen der Überlastblöcke werden mit einem Photomakroskop, sowie im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Analyse der Bruchflächenmorphologie und zwar im Bereich vor, während und nach dem Überlastblock. Im folgenden geben die Makroskopbilder einen ersten Eindruck der gesamten Probe. Eine detailliertere Untersuchung der Bruchfläche erfolgt an Hand der REM-Aufnahmen.

Abbildung 4.18 zeigt eine Aufnahme mit dem Photomakroskop einer Probe mit 2 Überlastblöcken.

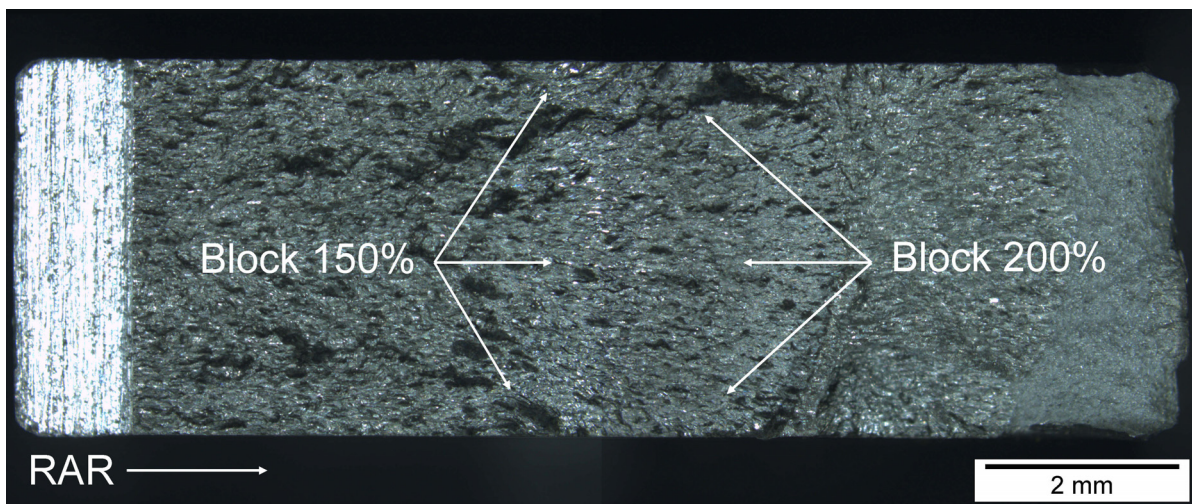


Abbildung 4.18: Probe mit 2 Überlastblöcken

Am linken Probenrand ist die mit der Diamantdrahtsäge eingebrachte Kerbe zu erkennen. Die Rißausbreitungsrichtung (RAR) verläuft im Bild von links nach rechts. Auf der Ermüdungsbruchfläche sind im Verlauf der RAR die Überlastblöcke mit den Überlasthöhen 150% und 200%

gekennzeichnet. Diese sind auf Grund einer Änderung der Bruchflächenmorphologie erkennbar. Am rechten Probenrand ist der Restbruch der Probe zu erkennen.

Der Übergang zum ersten Überlastblock wird in Abbildung 4.19 im REM genauer betrachtet.

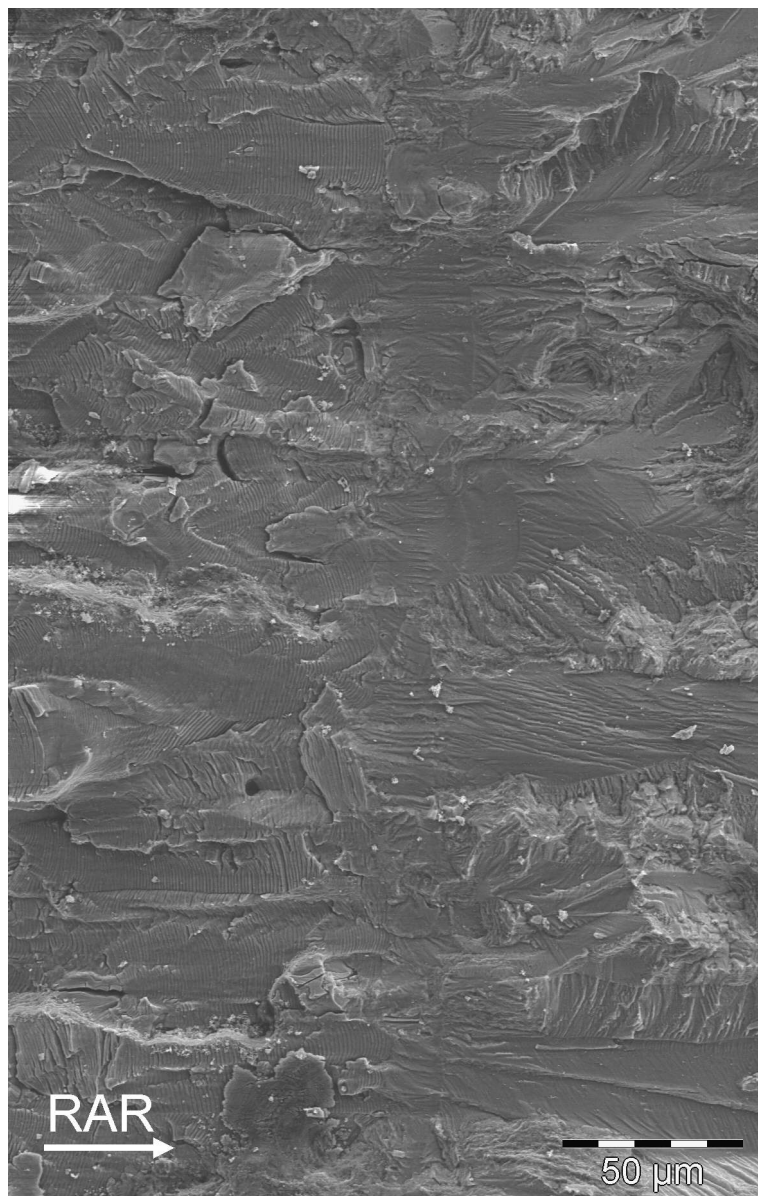


Abbildung 4.19: Übergang Grundlast - Überlastblock 150%

Die Ermüdungsrißausbreitung vor dem Überlastblock ist beginnend am linken Bildrand mit typischen Schwingungstreifen zu sehen. Daran schließt sich der Beginn des Überlastblockes in der Bildmitte an. In diesem Bereich erscheint die Bruchfläche etwas glatter. Nach dem Anfangsbereich des Überlastblockes sind keine Schwingungstreifen mehr zu sehen und die Bruchfläche wird wieder zunehmend rauher.

Die grundsätzlich unterschiedliche Bruchflächenstruktur zwischen der Ermüdungsrißausbreitung und einem gesamten Überlastblock ist bei geringerer Vergrößerung im REM an einer weiteren Probe mit einem Überlastblock der Überlasthöhe 150% in Abbildung 4.20 zu sehen.

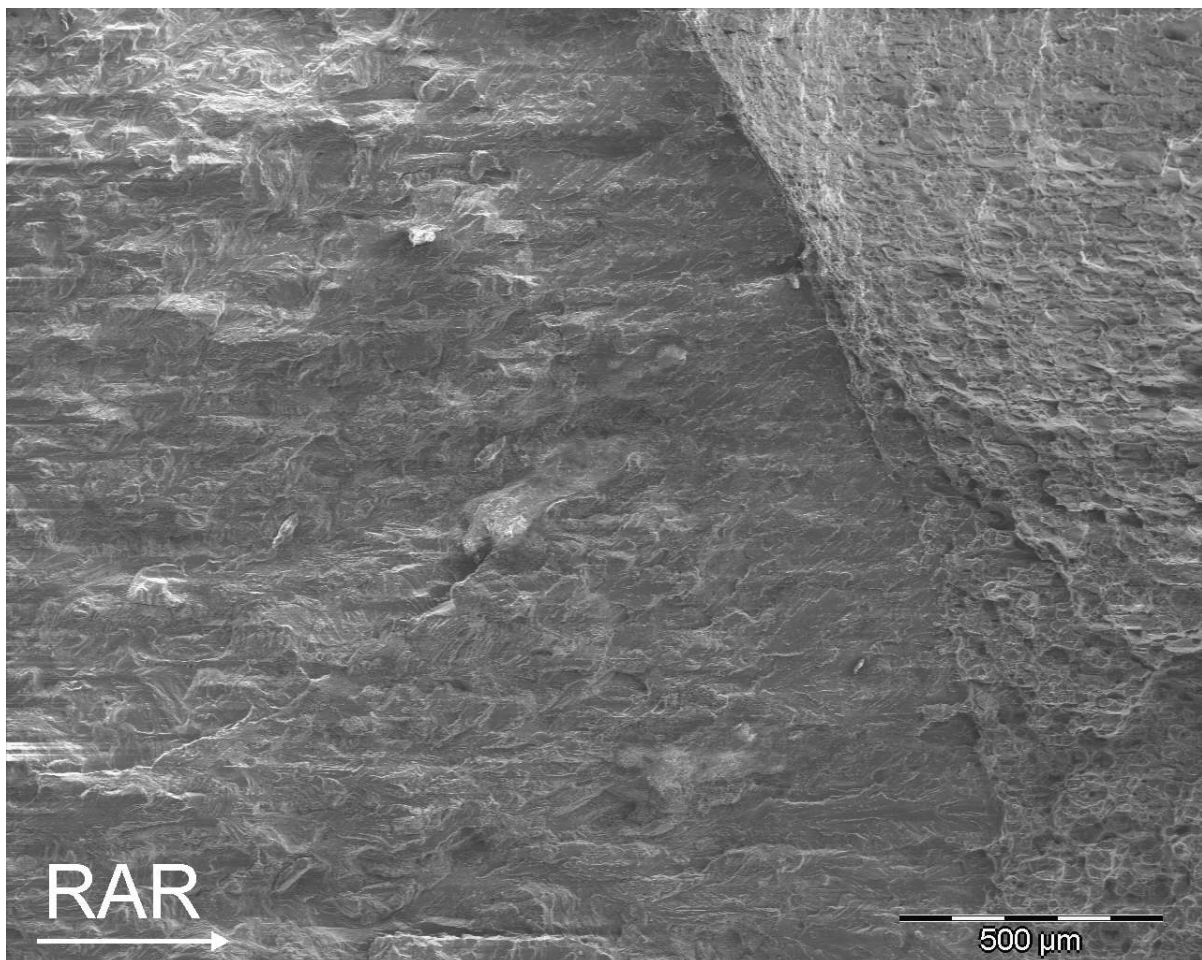


Abbildung 4.20: Übergang Grundlast - Überlastblock 150% - Restbruch

Die raue Bruchfläche der Ermüdungsrißausbreitung ist beginnend am linken Bildrand gut erkennbar. Im Gegensatz dazu erscheint der anschließende Bereich des Überlastblockes deutlich glatter. Dieser Überlastblock resultierte im Rißstillstand, weshalb direkt der Restbruch mit der typischen Wabenstruktur der Bruchfläche folgt.

Die Unterschiede in den Bruchflächenstrukturen zwischen der Ermüdungsrißausbreitung mit der Grundlast und dem Überlastblock sind um so deutlicher, je größer die Überlasthöhe im Überlastblock ist. Die gesamte Bruchfläche einer Probe mit zwei Überlastblöcken der Höhe 200% ist in Abbildung 4.21 zu sehen.

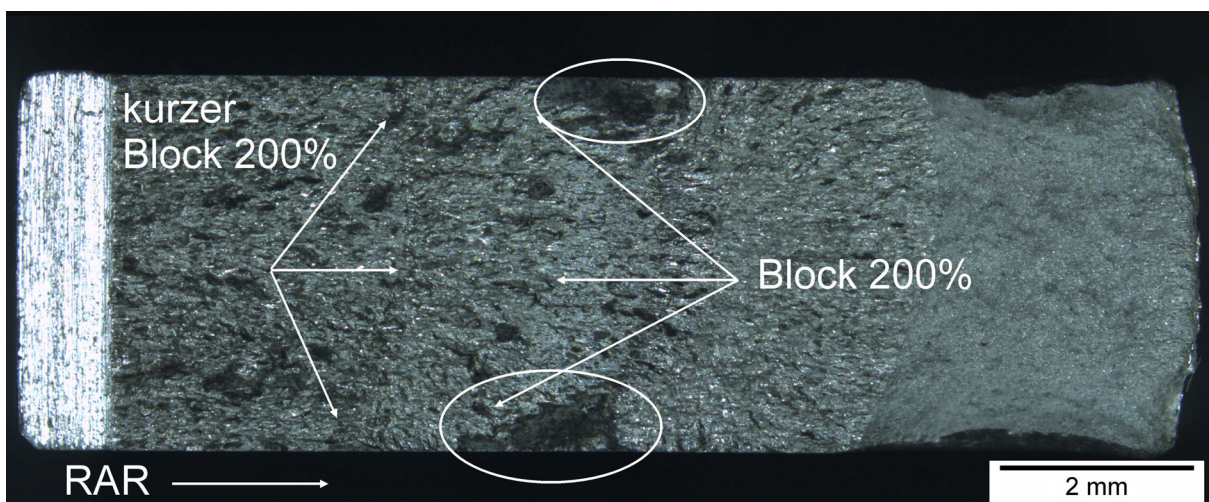


Abbildung 4.21: Probe mit 2 Überlastblöcken von 200%

Der zweite Überlastblock hebt sich deutlich von der Ermüdungsrißausbreitung mit der Grundlast ab. Bei dieser Überlasthöhe ist die Ausbildung von zwei abfallenden Flanken ersichtlich (im Bild eingekreist). Diese verlaufen zum Probenrand hin schräg abfallend zur Ebene der Rißausbreitung. Eine Untersuchung dieses Randbereiches im REM zeigt Abbildung 4.22. Der gesamte Bereich der Flanke wird von Schwingungstreifen dominiert. Es kann keinerlei Wabenstruktur

vorgefunden werden und nur wenige Nebenrisse. Damit entspricht die Bruchflächenstruktur der einer klassischen Ermüdungsrißausbreitung.

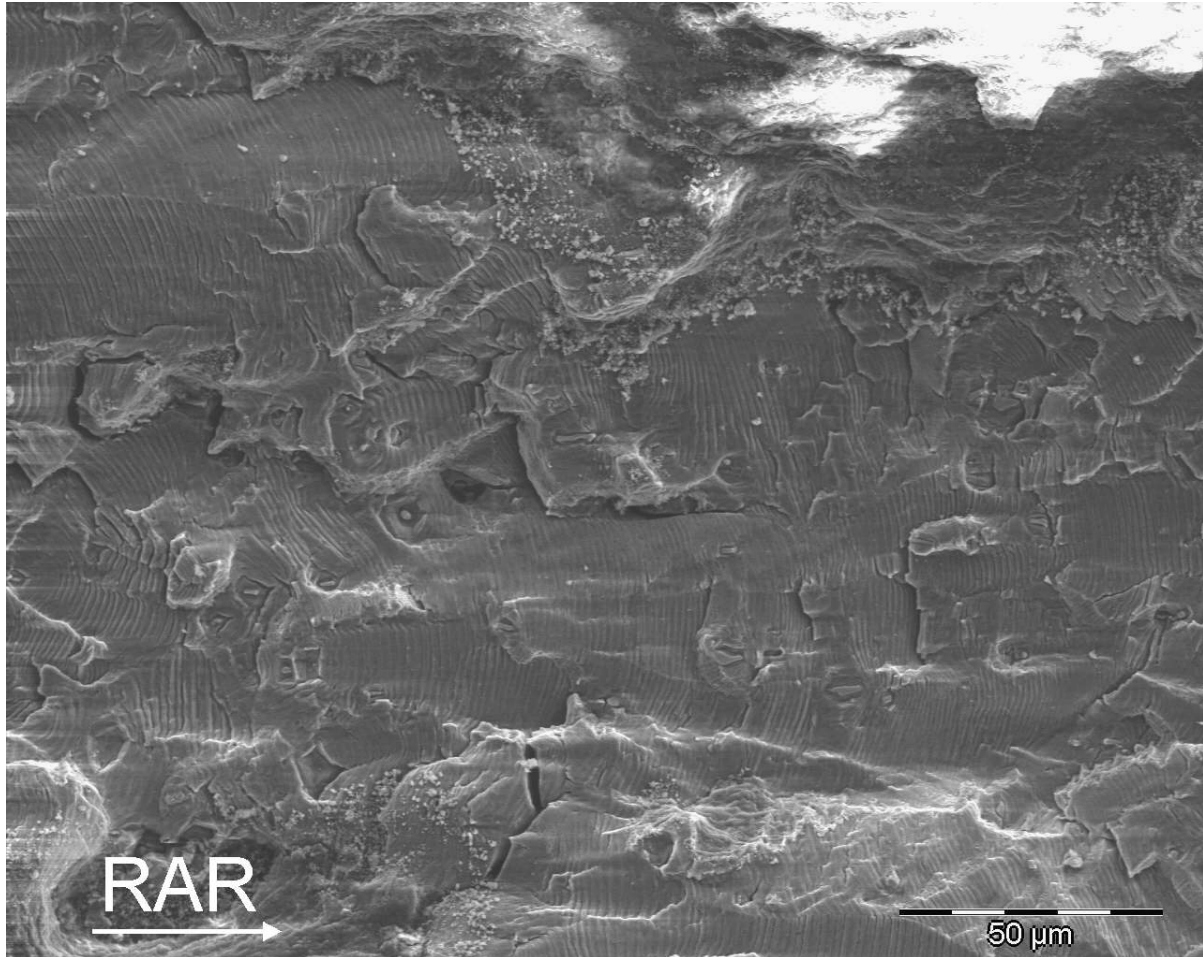


Abbildung 4.22: Überlastblock von 200% nahe dem Probenrand

Bei einem Überlastblock mit der Überlasthöhe 300% wird die bisher aufgetretene Bruchflächenmorphologie noch deutlicher sichtbar. Die durch den Überlastblock erzeugten sehr ausgeprägten Flanken, die bereits in Abbildung 4.21 zu sehen sind, sind ebenfalls in Abbildung 4.23 erkennbar. Dabei sind diese Bereiche erheblich ausgeprägter als die der Überlasthöhe 200%.

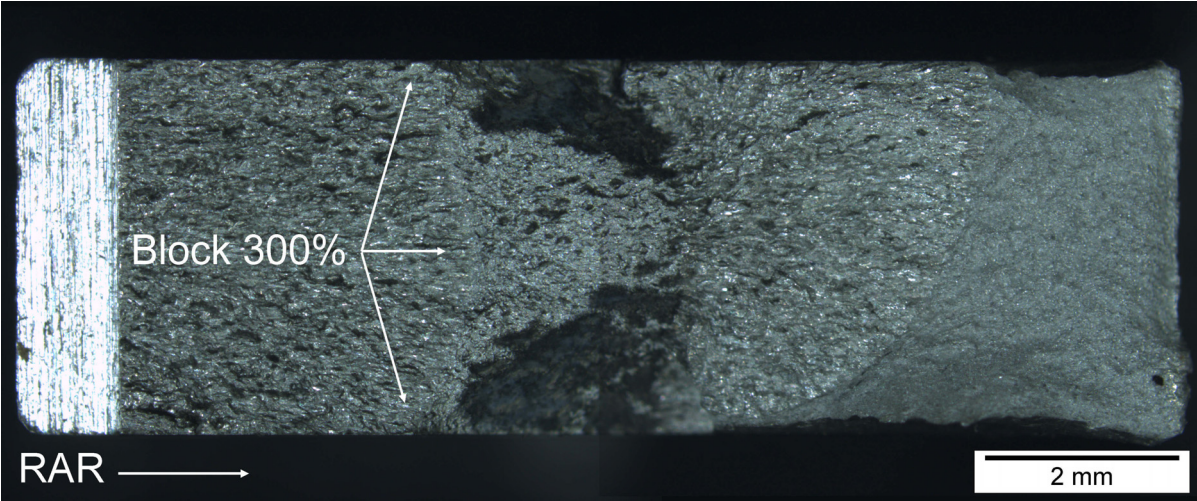


Abbildung 4.23: Überlastblock 300%

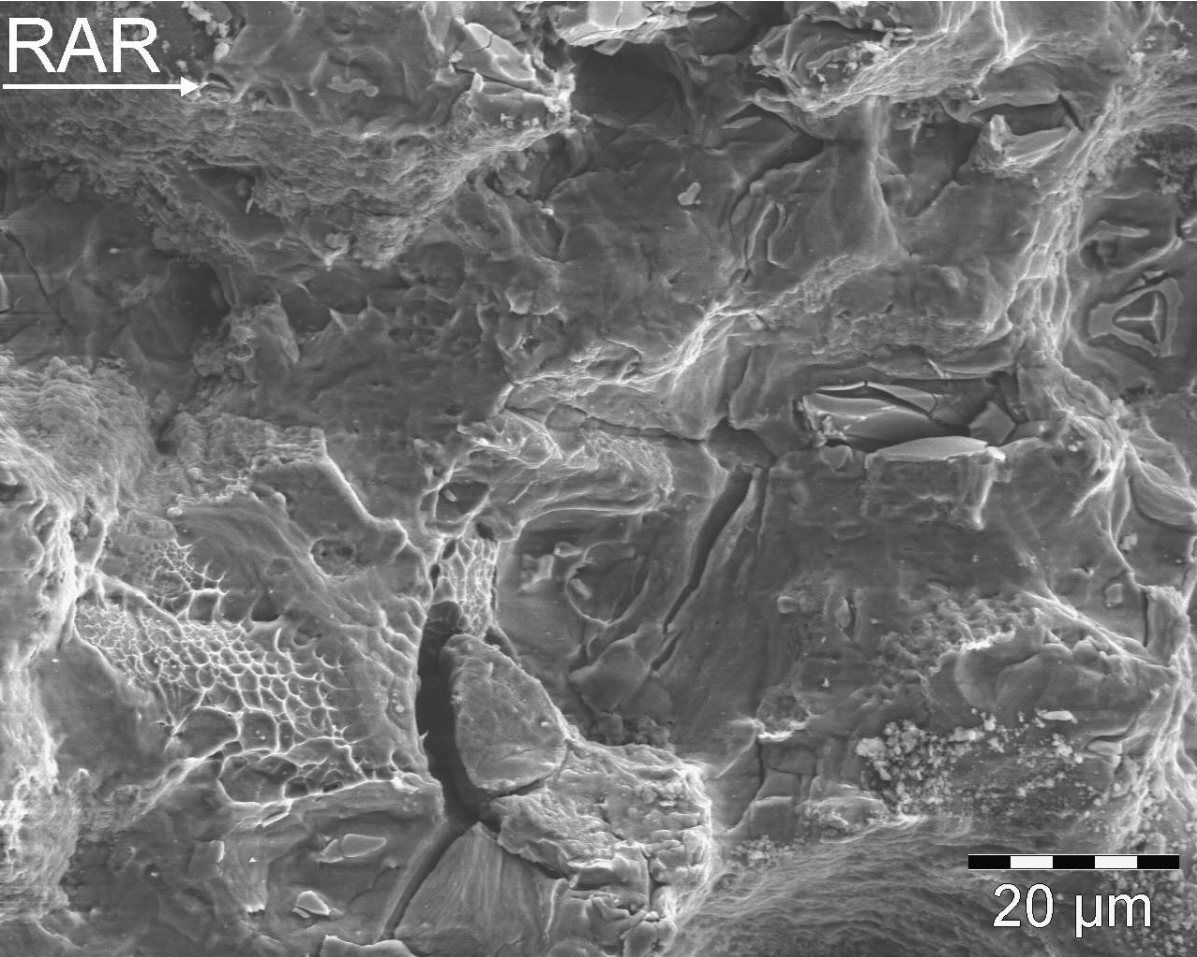


Abbildung 4.24: Wabenstruktur und Nebenrisse am Anfang eines Überlastblockes

Im Gegensatz zu den Flanken am Probenrand bilden sich in Probenmitte zu Beginn des Überlastblockes zahlreiche Nebenrisse aus, ebenso wie eine deutliche Wabenstruktur, Abbildung 4.24. Beides ist typisch für Gewaltbruchflächen. Innerhalb dieses Überlastblockes ist im weiteren Verlauf ein Übergang von dieser Gewaltbruchstruktur hin zur Bruchflächenmorphologie einer Ermüdungsrißausbreitung, in der sich Schwingungstreifen bilden, erkennbar, Abbildung 4.25. Verfolgt man die Rißausbreitung innerhalb des Überlastblockes weiter, so verschwindet die Wabenstruktur und auch weitestgehend die zahlreichen Nebenrisse. Zu sehen sind dann fast ausschließlich Schwingungstreifen, Abbildung 4.26.

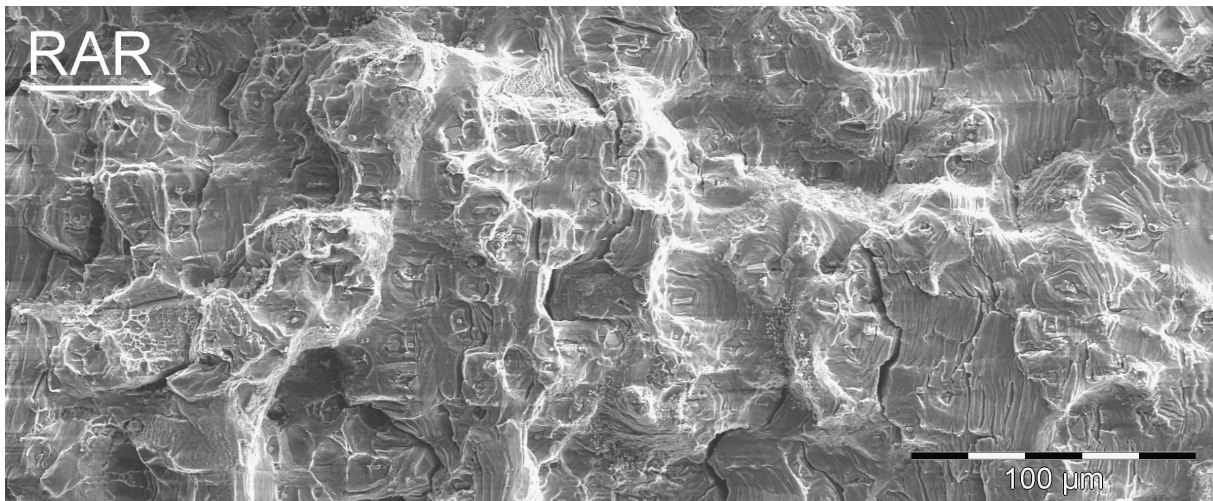


Abbildung 4.25: Übergang Wabenstruktur - Schwingungstreifen im Überlastblock

Bei der Untersuchung des Mittelspannungseinflusses ergibt sich eine andere Bruchflächenmorphologie. Bei dem Spannungsverhältnis $R = 0,7$ können die Überlastblöcke nicht mehr auf der Bruchfläche erkannt werden, lediglich der Wechsel der Grundlast von $R = -1$ auf $R = 0,7$ ist noch erkennbar, Abbildung 4.27. Die Bruchfläche erscheint bei dem

Spannungsverhältnis $R = 0,7$ glatter. Der Beginn der Überlastblöcke ist im Bild jeweils als Linie markiert.

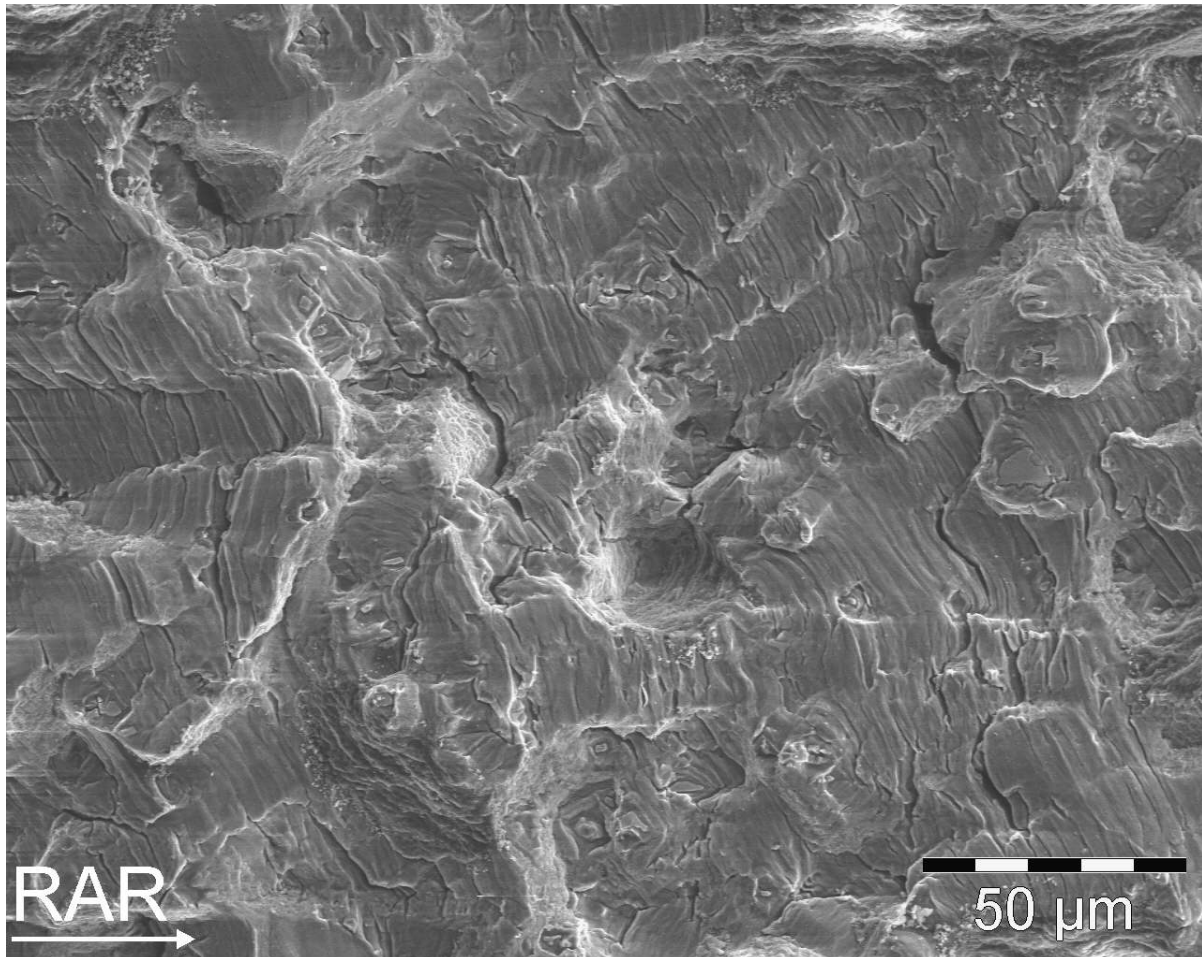


Abbildung 4.26: Schwingungsstreifen im Überlastblock

Der zweite Überlastblock mit der Überlasthöhe 100% und einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ ist im Photomakroskop nicht erkennbar. Im REM ist am Anfang dieses Überlastblockes eine Stufe erkennbar, sie ist in Abbildung 4.28 markiert.

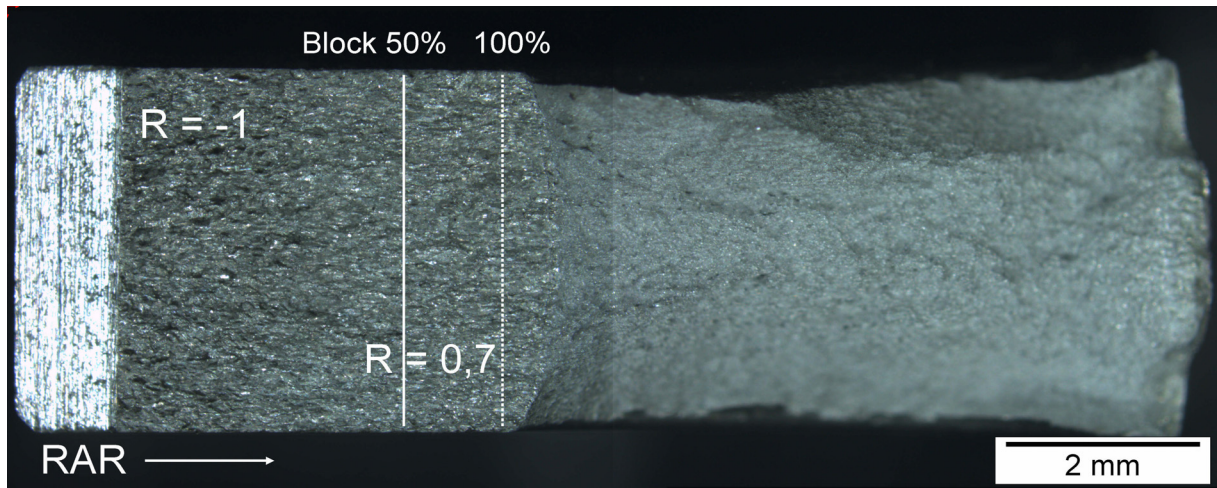


Abbildung 4.27: Grundlastwechsel von $R = -1$ auf $R = 0,7$

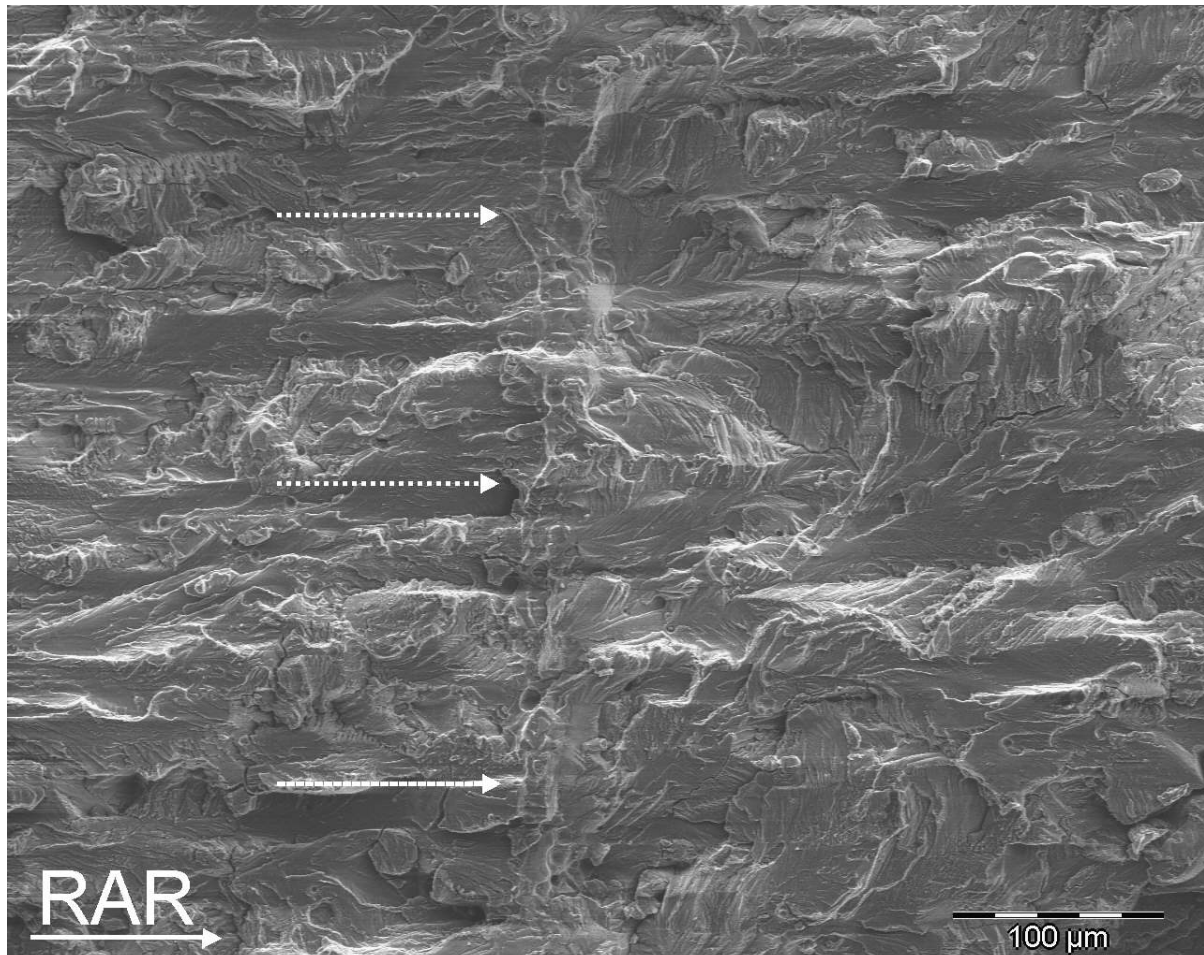


Abbildung 4.28: Überlastblock 100% bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$

Eine großflächige Wabenstruktur oder zahlreiche Nebenrisse sind bei diesem Spannungsverhältnis nicht erkennbar. Eine Wabenstruktur ist lediglich innerhalb der Stufe bei einer erhöhten Auflösung erkennbar, Abbildung 4.29.

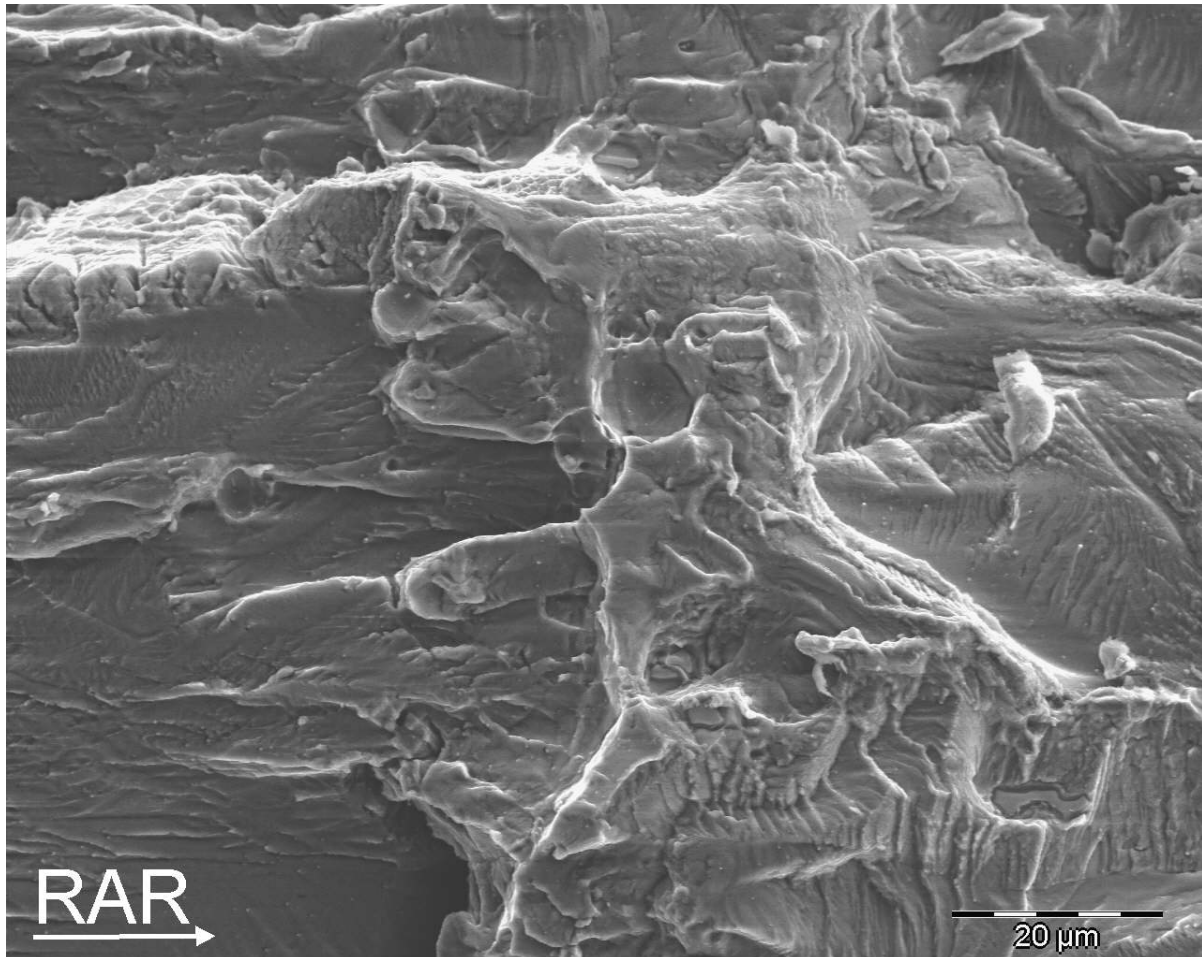


Abbildung 4.29: Wabenstruktur am Anfang eines 100% Überlastblockes bei $R = 0,7$

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ der Übergang von der Ermüdungsrißausbreitung mit der Grundlast zum Überlastblock deutlich erkennbar ist. Es findet ein Wechsel der Bruchflächenmorphologie von Schwingungstreifen hin zu einer Wabenstruktur am Beginn eines Überlastblockes statt. Dies ist um so deutlicher, je größer die Überlast-

höhe ist. Im weiteren Verlauf des Überlastblockes wechselt die Bruchfläche erneut ihr Bild, wieder hin zu Schwingungsstreifen. Des weiteren bilden sich, besonders bei großen Überlasthöhen, am Probenrand Abgleitungen im Überlastblock aus. Auf der dortigen Bruchfläche befinden sich nur Schwingungsstreifen, keine Wabenstruktur oder Nebenrisse. Letztere sind aber in Probenmitte ausgeprägt zu finden. Damit unterscheidet sich die Rißausbreitung im Überlastblock zwischen Probenrand und -mitte grundsätzlich.

Die Untersuchung des Mittelspannungseinflusses ergab eine im Vergleich zu den Versuchen mit symmetrischer Grundlast veränderte Bruchfläche. Die Überlastblöcke sind im Photomakroskop nicht mehr erkennbar. Lediglich im REM findet sich eine Stufe auf der Bruchfläche, die sich am Anfang des Überlastblockes befindet. Nur innerhalb dieser Stufe wird eine Wabenstruktur vorgefunden. Ansonsten ist keine Veränderung der Bruchfläche erkennbar.

5 Diskussion

Die Ergebnisse zum Überlasteinfluß zeigen eine Abhängigkeit von der Grundlast und vom Spannungsverhältnis. Um eine Beschreibung der Ergebnisse unabhängig von diesen Einflüssen zu ermöglichen, wird eine neue Art der Auswertung vorgeschlagen. Bei der Diskussion der auf diese Weise neu ausgewerteten Ergebnisse wird ein besonderes Augenmerk auf die gegenseitige Beeinflussung von Riß und plastischer Zone gelegt.

5.1 Rißlängenunabhängigkeit der Potentialsondenhysteresen

Die Überlasten werden anhand ihrer Hysteresen miteinander verglichen. Dabei handelt es sich aber nicht um klassische Spannungs-Dehnungs-Hysteresen, sondern um Spannungs-Potential-Hysteresen. Auf der Ordinate wird die Spannung aufgetragen, auf der Abszisse das in eine Rißlänge umgerechnete Potential relativ zur Gesamtrißlänge der Überlasteinstreuung. In Abbildung 5.1 werden drei Spannungs-Potential-Hysteresen für Zugüberlasten der Höhe 200% aufgetragen. Die Überlasten wurden bei drei unterschiedlichen Gesamtrißlängen eingebracht. Die aufsteigenden Hysteresenäste besitzen eine unterschiedliche Steigung. Die entsprechenden maximalen Spannungen nehmen mit zunehmender Rißlänge ab, da bei der Regelung der Spannungsintensität ($\Delta K = \text{konst.}$) mit zunehmender Rißlänge die Kraftamplitude abgesenkt wird. Damit sind diese Hysteresen, obwohl es sich um Überlasten mit identischem Überlastfaktor handelt, so nicht direkt miteinander vergleichbar.

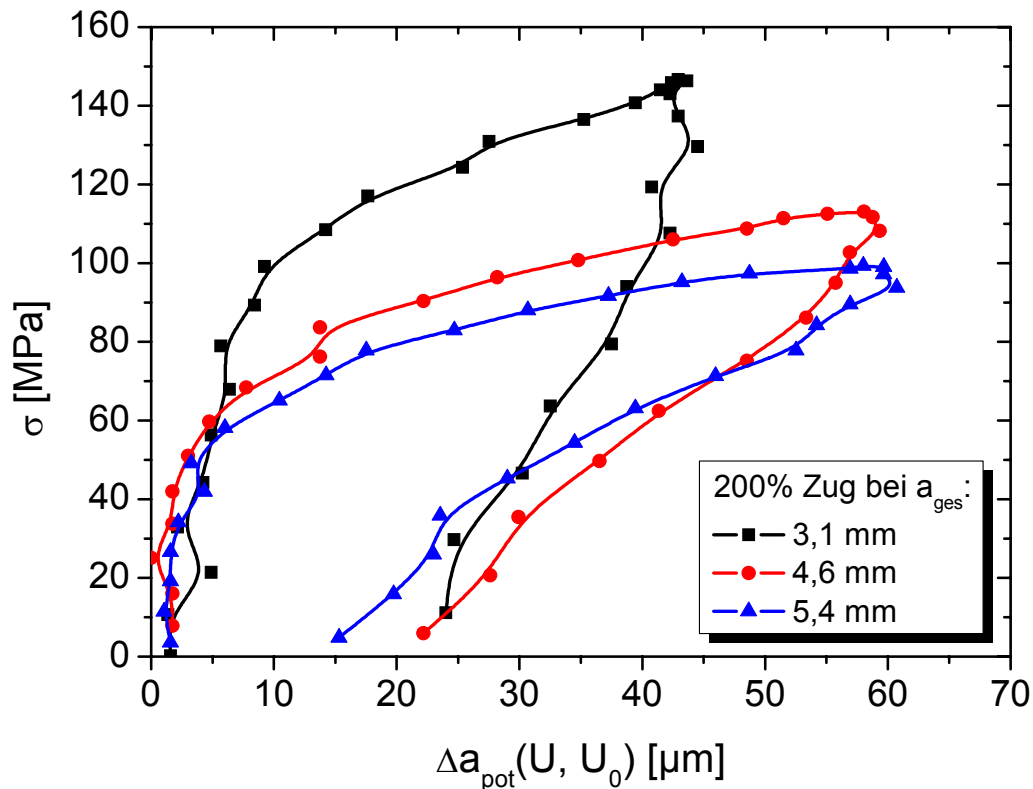


Abbildung 5.1: Spannungs-Potential-Hysteresen bei unterschiedlichen Gesamtrißlängen für $R = -1$

Im Gegensatz zu den Spannungs-Potential-Hysteresen bieten die Potentialsondenhysteresen die Möglichkeit Überlasten gleicher Höhe bei unterschiedlichen Gesamtrißlängen miteinander zu vergleichen. Dazu wird aus den Meßgrößen Kraft und Potential, das in eine Rißlänge umgerechnet wird, zu jedem Meßpunkt die Spannungsintensität berechnet und diese dann auf der Ordinate der Hysterese aufgetragen, Abbildung 5.2. Die aufsteigenden Hysteresenäste verlaufen nun nahezu identisch. Lediglich das maximale Potential, also die maximale relative Rißlänge, der 200%-Überlast bei $a_{ges} = 3,1$ mm fällt kleiner als die restlichen aus, was auf eine Streuung in der Rißverlängerung durch die Überlast zurückzuführen ist. Dabei ist zu beachten, daß Δa_{pot} auf der

Abszisse nicht nur aus der Rißverlängerung besteht, sondern auch aus dem Rißöffnen. Durch Rißschließeffekte ist die Abweichung der absteigenden Hysteresenäste größer als die der aufsteigenden. Damit bieten die Potentialsondenhysteresen die Möglichkeit Überlasten miteinander zu vergleichen, ohne daß die Rißlänge der Überlasteinstreuung relevant ist.

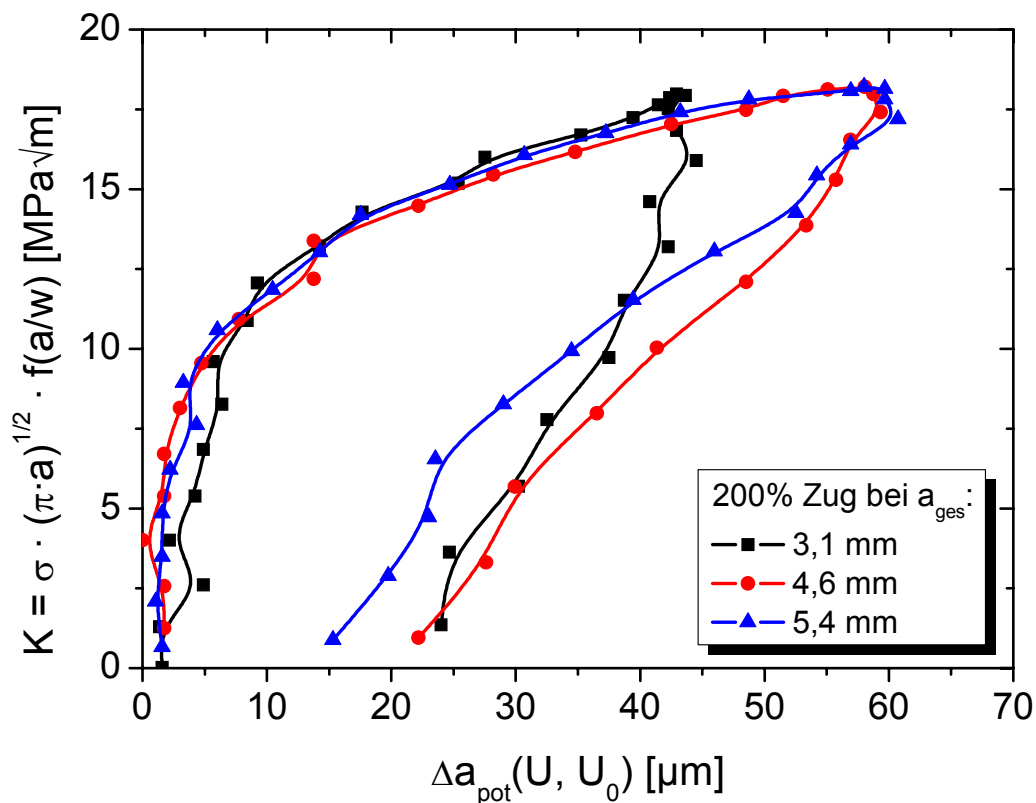


Abbildung 5.2: Potentialsondenhysteresen bei unterschiedlichen Gesamtrißlängen $R = -1$

5.2 Auswertung der Potentialsondenhysteresen

In Kapitel 5.1 wurde gezeigt, daß die Potentialsondenhysteresen die Überlasten unabhängig von der jeweiligen Gesamtrißlänge eindeutig

beschreiben. Als charakteristische Größe für die Überlast wird die Fläche unter dem aufsteigenden Hysteresenast definiert.

Für die Auswertung dieser Potentialsondenhysteresenflächen wird vorausgesetzt, daß sich der vorliegende Modus I-Riß nur ausbreitet, wenn er geöffnet ist. Der Riß wird als offen angenommen, sobald er eine äußere Zugspannung erfährt. Wird der Riß entlastet, wird ferner davon ausgegangen, daß der Riß wieder schließt und sich damit nicht weiter ausbreiten kann.

Abbildung 5.3 zeigt die integrierte Hysteresenfläche eines Zugüberlastzyklus einer 300%-Zug/Druck-Überlast beim Spannungsverhältnis $R = -1$. Die Fläche des aufsteigenden Hysteresenastes ist ein Maß für die Energiebilanz der Überlast. Die Energiebilanz für eine unterkritische Rißausbreitung lautet:

$$\frac{\partial}{\partial 2a} [E_E - (2 \cdot 2a \cdot \gamma + E_{pl})] \leq 0 \quad 5.1$$

Für duktile Werkstoffe muß der Rißwiderstand um den Anteil der plastischen Arbeit erweitert werden. Bei diesem Ansatz wird vorausgesetzt, daß der Unterschied der Oberflächenenergien zwischen einer rauhen Gewaltbruchfläche und einer glatteren Ermüdungsbruchfläche gegenüber des plastischen Energieanteils vernachlässigbar ist.

Die Hysteresenfläche wird für $0 \leq K \leq K_{\max}$ ermittelt und setzt sich aus Rißöffnen und Rißfortschritt zusammen. Derzeit sind die einzelnen Anteile nicht separierbar.

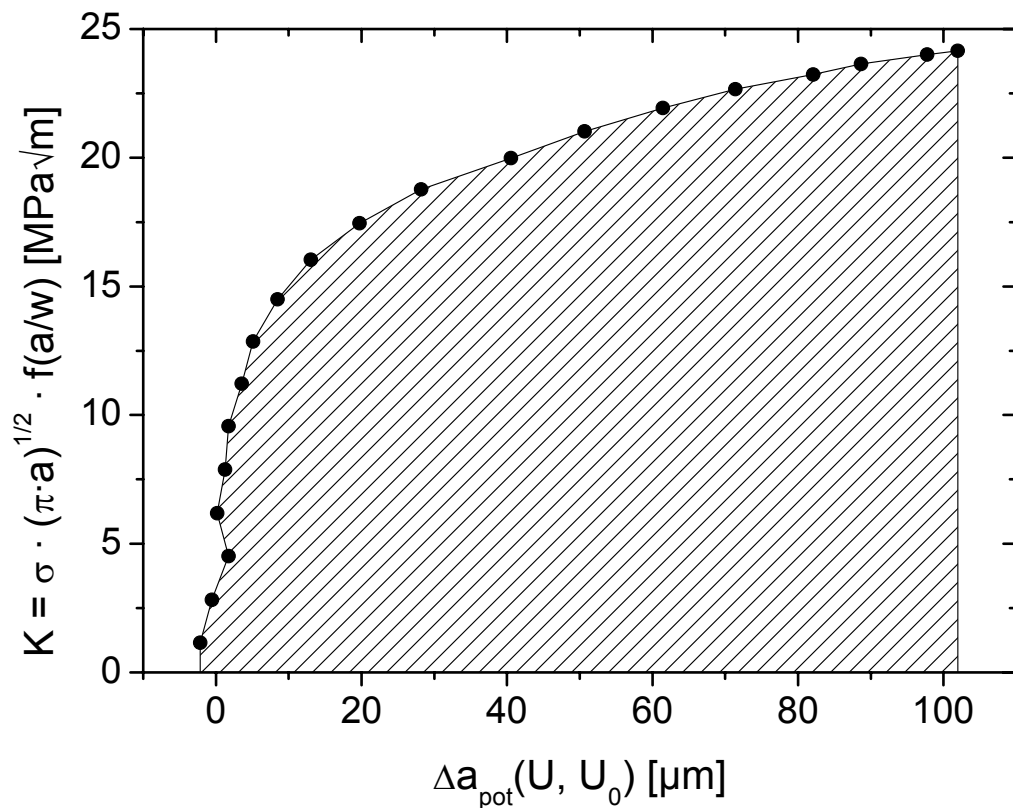


Abbildung 5.3: Bestimmung der Potentialsondenhysteresenfläche bei $R = -1$

Bei Überlastversuchen mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ verläuft die Integration analog. Hier wird ebenfalls der zur Rißausbreitung beitragende Teil der Hysterese integriert. Dazu wird postuliert, daß der statische Anteil der Hysterese nicht zur Rißausbreitung beiträgt. Damit verläuft die Integration nicht zwischen $0 \leq K \leq K_{\max}$, sondern zwischen $K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$. Abbildung 5.4 zeigt die Integration einer 150%-Zugüberlast beim Spannungsverhältnis $R = 0,7$.

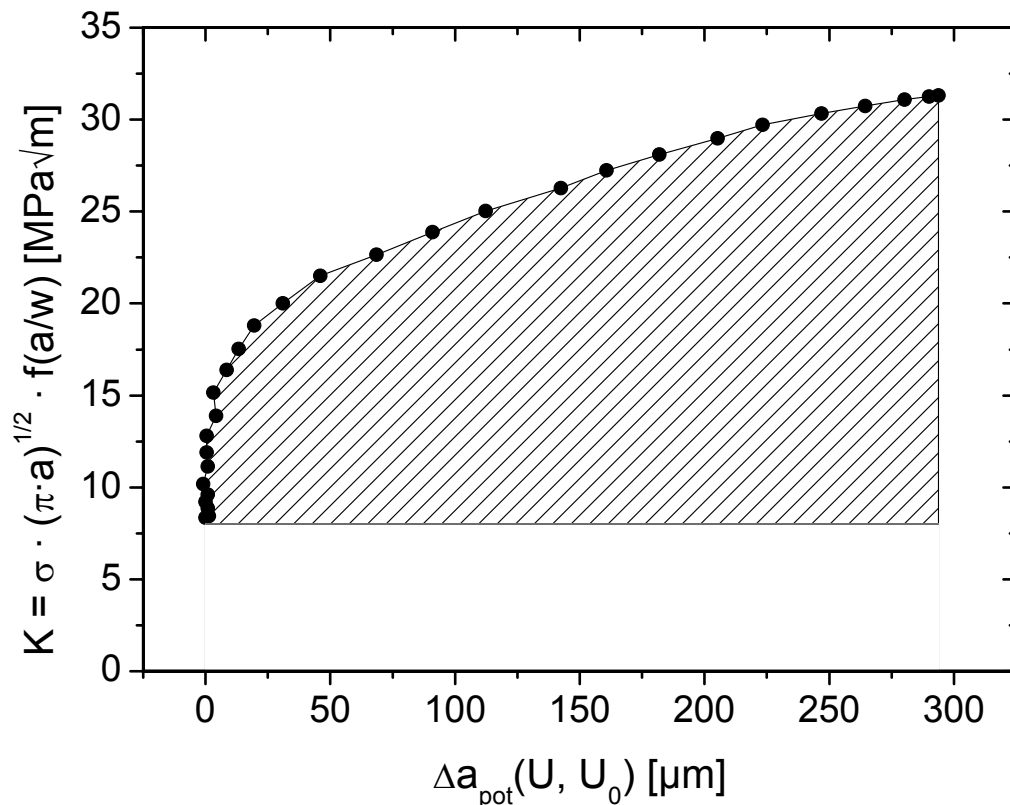


Abbildung 5.4: Bestimmung der Potentialsondenhysteresenfläche bei $R = 0,7$

5.2.1 Einfache Überlasten

Die Ergebnisse des beschleunigten Rißfortschrittes werden in Abhängigkeit der Potentialsondenhysteresenfläche dargestellt. Der beschleunigte Rißfortschritt Δa_B des Überlastzyklus wird dazu über der Potentialsondenhysteresenfläche in Abbildung 5.5 doppellogarithmisch aufgetragen.

Es ergibt sich in dieser Darstellung ein linearer Zusammenhang zwischen beschleunigtem Rißfortschritt und Hysteresenfläche. Ein Reihenfolgeeinfluß, d. h. ein Unterschied zwischen den verschiedenen

Überlastarten, ist nicht erkennbar. Dies bestätigen die Ergebnisse der Auswertung des Rißfortschrittes im Überlastzyklus (Kapitel 4.3.3).

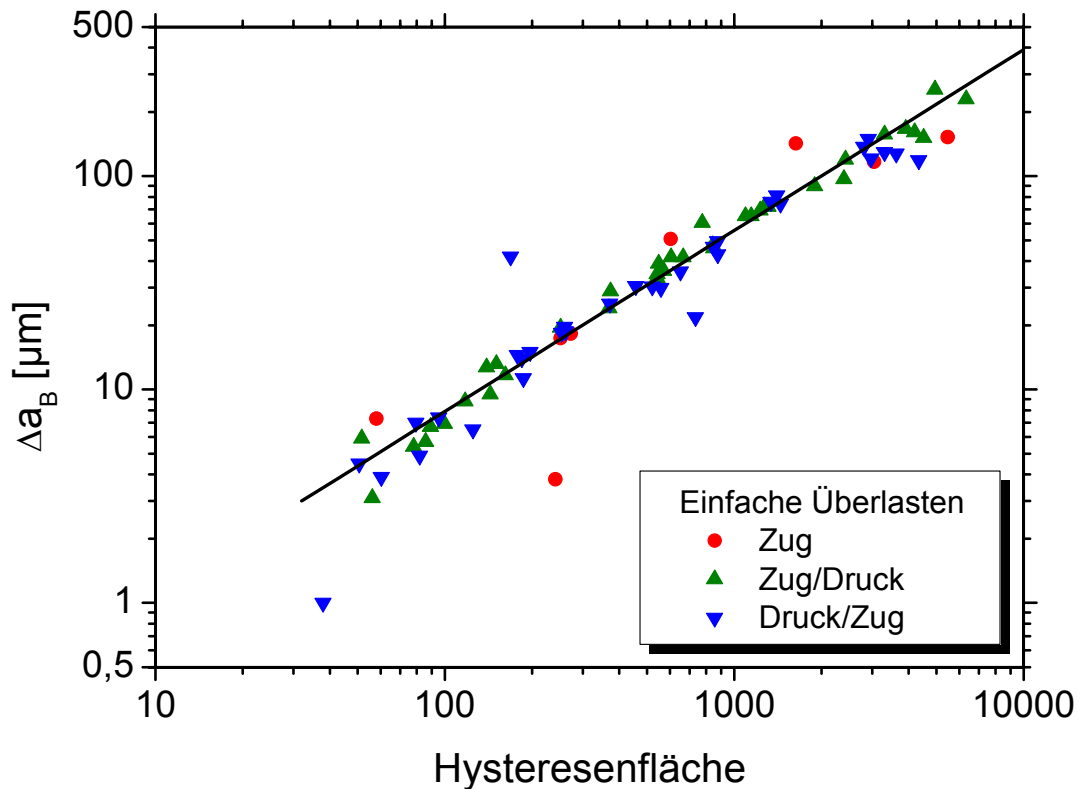


Abbildung 5.5: Potentialsondenhysteresenfläche und beschleunigter Rißfortschritt bei $R = -1$

In [Roed03] wurde gezeigt, daß der beschleunigte Rißfortschritt im Überlastzyklus sowohl vom Spannungsverhältnis der Grundlast, als auch von der Grundlasthöhe abhängt, Abbildung 5.6.

Für das Spannungsverhältnis $R = -1$ verlaufen die Geraden parallel und sind damit miteinander korrelierbar. Davon weicht allerdings die Gerade für das Spannungsverhältnis $R = 0,7$ deutlich ab, so daß eine gemeinsame Beschreibung aller Geraden nicht mehr möglich ist. Trägt

man aber nun den beschleunigten Rißfortschritt über der Potentialsondenhysteresenfläche bei verschiedenen Grundlastniveaus und Spannungsverhältnissen auf, so ergibt sich der in Abbildung 5.7 dargestellte Verlauf.

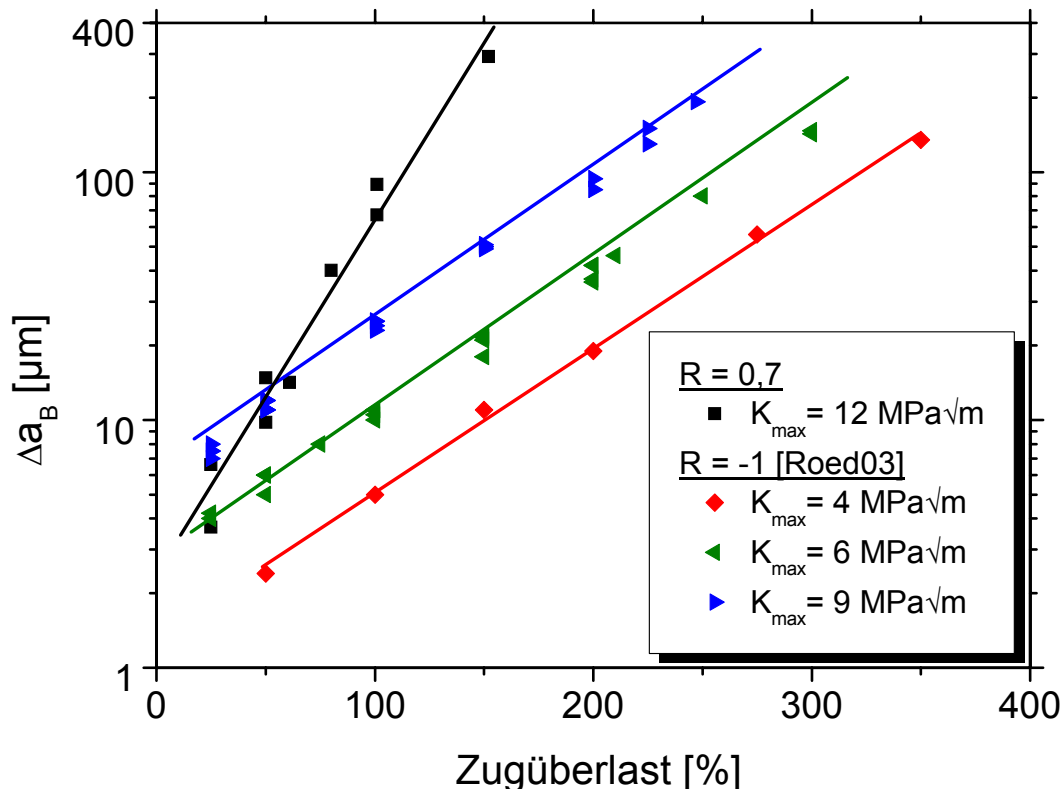


Abbildung 5.6: Beschleunigter Rißfortschritt bei unterschiedlichen Grundlasten

In der Legende von Abbildung 5.7 sind die aufgetragenen Spannungsverhältnisse, sowie die Grundlasten [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$] im jeweiligen Spannungsverhältnis beschrieben. Die Versuche für das Spannungsverhältnis $R = 0,1$ stammen aus [Roed03], die Auswertungen dazu vom Autor selbst. Die Ergebnisse liegen alle in einem gemeinsamen Streuband. Obwohl die Reihenfolge der unsymmetrischen Überlasten, das Grundlastniveau und das Spannungsverhältnis der Grundlast variiert wurden, bietet diese Auswertung die Möglichkeit, den

beschleunigten Rißfortschritt einheitlich zu beschreiben. Für die Erstellung eines Modells zur Beschreibung des Überlasteinflusses stellt eine solche einheitliche Beschreibung eine vielversprechende und auch notwendige Basis dar.

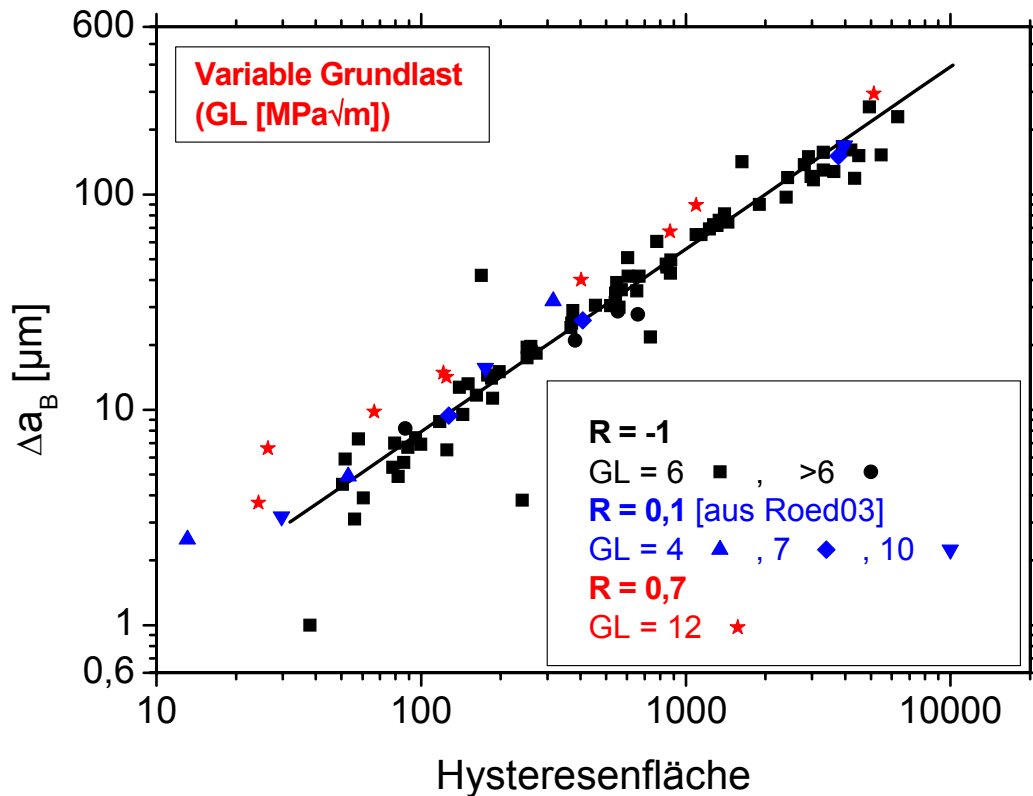


Abbildung 5.7: Einfluß von Grundlast und Spannungsverhältnis auf die Potentialsondenhysteresenfläche

5.2.2 Akkumulation von Überlasten

Bei der Akkumulation von Zugüberlasten wurde nach einer ersten Überlast jeweils bei der minimalen Rißfortschrittsrate im Verzögerungsbereich der vorherigen Überlast eine weitere eingebracht. Die Akkumulation von drei 200%-Zugüberlasten zeigt eine abnehmende

Rißfortschrittsrate durch die jeweilige Überlast, obwohl die Überlasthöhe gleich ist (Abbildung 4.13). In Abbildung 5.8 sind die erzielten beschleunigten Rißfortschritte über der Potentialsondenhysteresenfläche im Vergleich zu den Ergebnissen der einfachen Überlasten (Kapitel 5.2.1) aufgetragen.

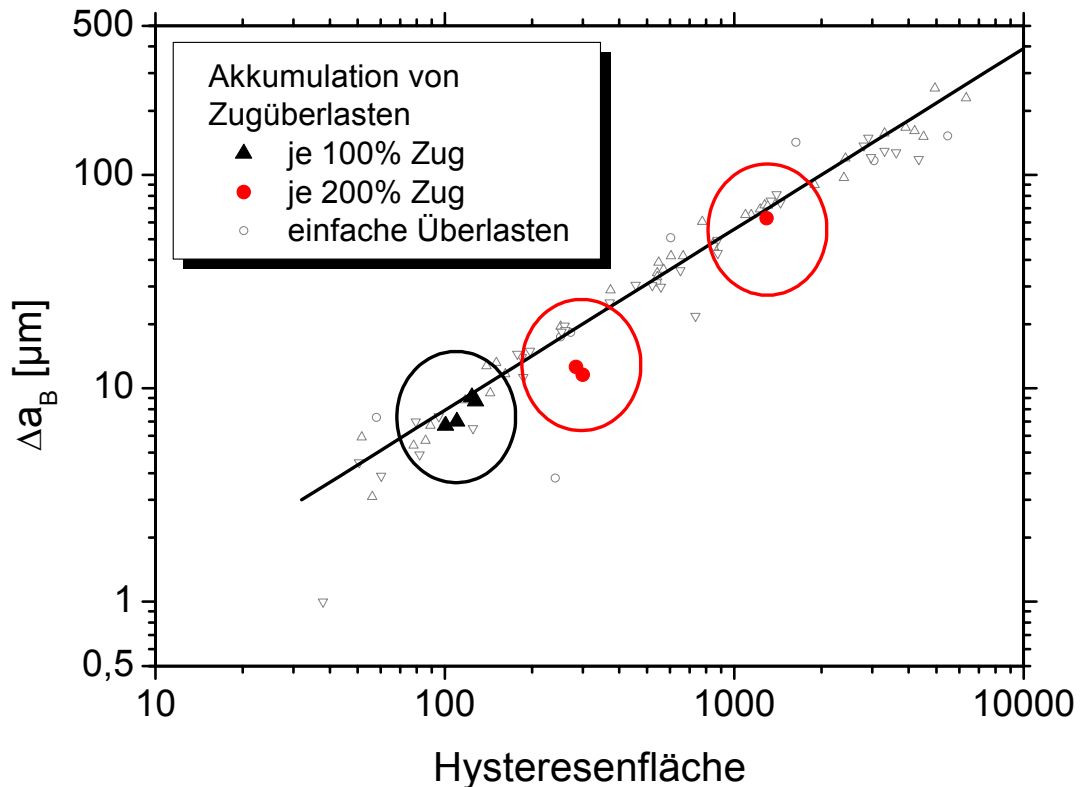


Abbildung 5.8: Auswertung der Potentialsondenhysteresenflächen bei der Akkumulation von Zugüberlasten

Auch die akkumulierten Zugüberlasten liegen bei dieser Auswertung im gleichen Streuband wie die einfachen Überlasten. Daß diese jeweils im Einflußbereich der vorhergehenden Zugüberlast eingebracht wurden, beeinflusst dieses grundsätzliche Ergebnis offensichtlich nicht. Es ist zu beobachten, daß mit zunehmender Zugüberlast die Potentialsonden-

hysteresenfläche kleiner wird und damit auch der resultierende Rißfortschritt, Abbildung 5.9.

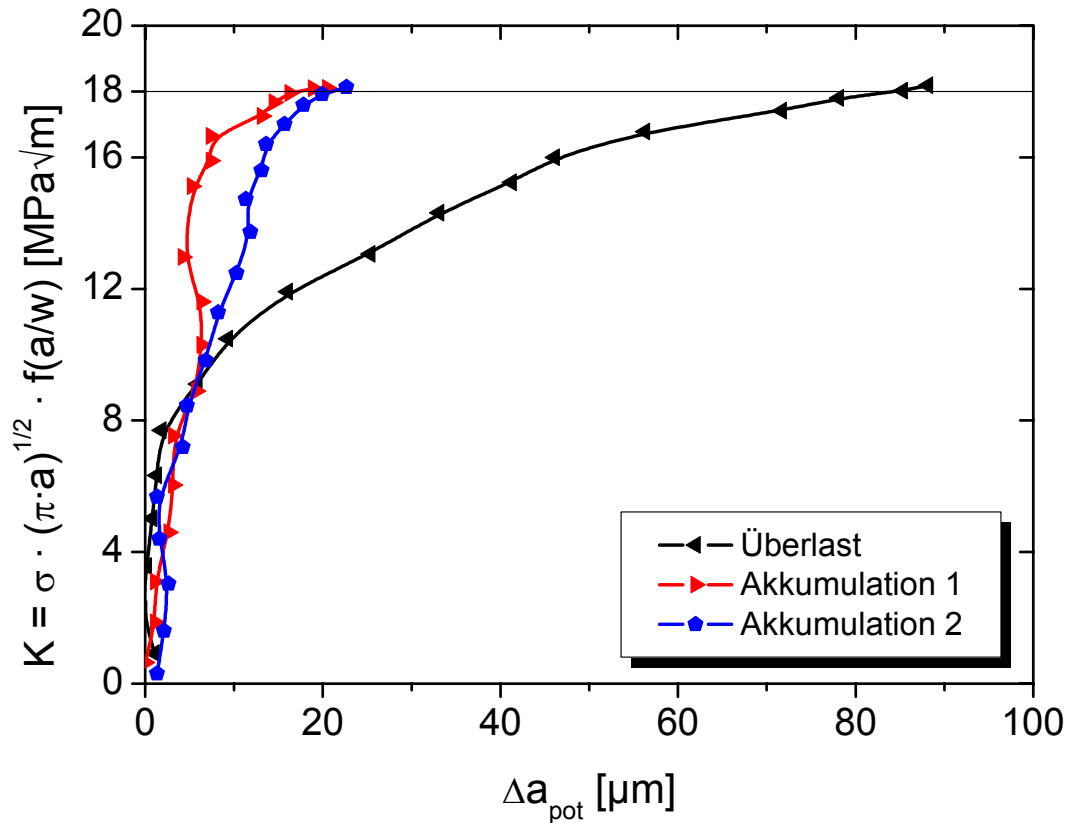


Abbildung 5.9: Potentialsondenhysteresen bei der Akkumulation von 200%-Zugüberlasten

Mit zunehmender Zahl von Akkumulationen nehmen sowohl Δa_B , als auch die Hysteresenfläche immer weiter ab. Dies führt letztlich dazu, daß der Riß stoppt (vgl. Kapitel 4.3.4).

5.2.3 Mehrfache Überlasten

Im Unterschied zu einzeln eingebrachten oder akkumulierten Überlasten ergibt sich bei der Auswertung der Potentialsondenhysteresen eines Überlastblockes ein grundlegend anderes Ergebnis. In Abbildung 5.10 ist

die Auswertung des erzielten Rißfortschrittes pro Lastspiel im Überlastblock in Abhängigkeit der Potentialsondenhysteresenfläche aufgetragen.

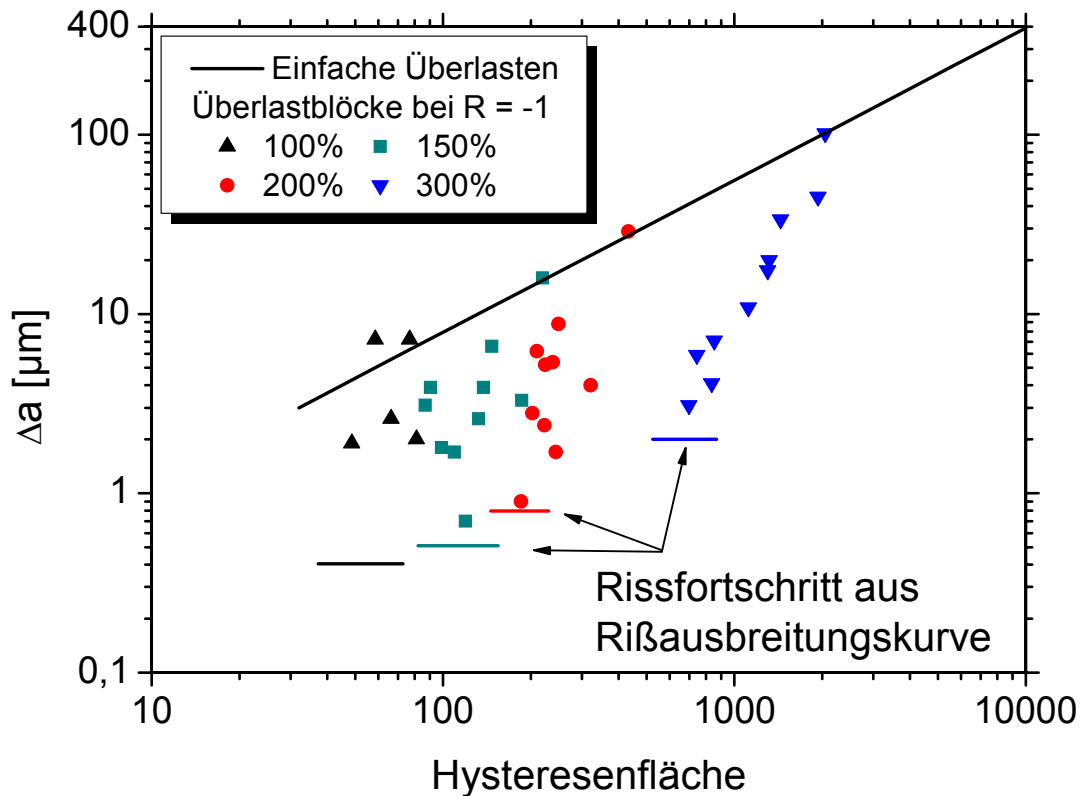


Abbildung 5.10: berlastblcke bei R = -1

Es ist zu erkennen, daß die Hysteresenfläche in geringerem Maß abnimmt, als der Rißfortschritt pro Lastwechsel. Der Rißfortschritt pro Zyklus wird ausgehend vom ersten Lastspiel im Überlastblock etwa um den Faktor 40 reduziert (vgl. Kapitel 4.4), die Hysteresenfläche um den Faktor 4. Nur der erste Zyklus im Überlastblock ist mit den einfachen berlasten vergleichbar. Die übrigen Zyklen verlaufen, trotz vergleichbarer Hysteresenfläche, hin zu kleineren Rißfortschrittsinkrementen.

Im Sinn der Energiebilanz der jeweiligen Überlastzyklen bedeutet dies einen mit der Lastspielzahl zunehmenden Reißwiderstand R . Die Energiefreisetzungsrates hängt von der jeweiligen Reißverlängerung ab und die Oberflächenenergie ändert sich kaum, da der jeweilige Reißfortschritt klein gegen die Gesamtrißlänge ist. Damit muß der Anteil der plastischen Arbeit E_{pl} markant ansteigen, womit für die Reißerweiterung weniger Energie zur Verfügung steht.

Der Reißfortschritt der Überlastblöcke mündet in einem Gleichgewichtswert, der sich auf Grund der Belastung aus der Reißausbreitungskurve einstellen sollte. Bei der Überlasthöhe 100%, liegt der Reißfortschritt am Ende des Überlastblockes unter der Auflösungsgrenze der Potentialmethode, so daß die erwartete zyklische Reißfortschrittsrate nicht kontinuierlich, d. h. pro Lastwechsel, gemessen werden kann.

Mit steigender Lastspielzahl im Überlastblock wird also eine zyklenweise Auswertung des Reißfortschrittes auf Grund der deutlichen Abnahme der Potentialunterschiede zunehmend schwierig. Wird jedoch der zeitliche Verlauf des Potentials betrachtet, so läßt sich ein integraler Eindruck der Abnahme der Reißfortschrittsinkremente erzielen. In Abbildung 5.11 ist exemplarisch der Potentialverlauf eines Überlastblockes mit 300% dargestellt.

Vor Beginn des Überlastblockes ist der Potentialverlauf der Grundlast zu sehen. Auf Grund der geringen Reißfortschrittsrate von 10^{-8} m/Zyklus erscheint der Potentialverlauf hier horizontal. Zum Zeitpunkt $\Delta t = 0$ s beginnt der Überlastblock und es ist ein deutlicher Anstieg des Potentials zu erkennen. Dieser Anstieg kommt einer hohen Reißfortschrittsrate

gleich. Der abnehmende Gradient $\partial(\Delta U)/\partial t$ spiegelt die zyklensweise Abnahme der Rißfortschrittsrate deutlich erkennbar wieder.

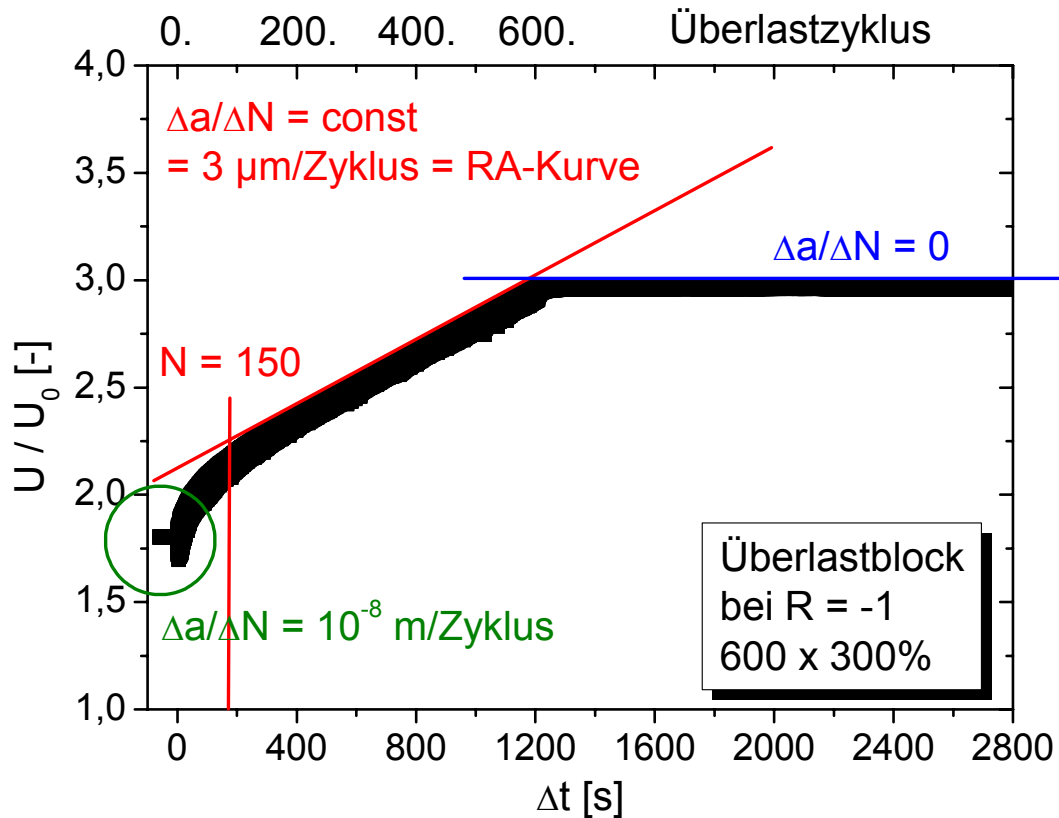


Abbildung 5.11: Potentialverlauf eines 300%- Überlastblockes

Nach etwa 300 s, also 150 Lastwechseln, stellt sich im Potentialverlauf eine konstante Steigung ein, die durch die rote Linie hervorgehoben wird, was zuvor in Abbildung 4.16 abgeschätzt werden konnte. Die Steigung wurde zwischen dem 200. und dem 600. Lastwechsel im Überlastzyklus zu einer Rißfortschrittsrate von $3 \mu\text{m/Zyklus}$ ausgewertet. Dieser Wert entspricht exakt einer Extrapolation der Rißausbreitungskurve für $R = -1$ (vgl. Abbildung 3.5). Damit benötigt der Riß etwa 150 Zyklen, bis sich ein zyklisches Gleichgewicht einstellen kann. Die Anzahl von etwa 150 Lastwechseln wird für alle Überlastblöcke beim Spannungsverhältnis $R = -1$ gefunden.

Sowohl aus der zyklischen als auch aus der integralen Auswertung des Potentialverlaufes folgt damit eine zwingende Unterscheidung des Rißwachstums. Der erste Zyklus im Überlastblock muß, genau wie einfache und akkumulierte Überlasten, einem monotonen Bruch zugeordnet werden. Mit zunehmender Lastspielzahl im Überlastblock findet dann ein kontinuierlicher Übergang zur zyklischen Rißausbreitung statt.

Nach dem Überlastblock (600 Überlastzyklen, $\Delta t = 1200$ s) wurde die Belastung wieder auf die Grundlast reduziert. Da nach 10^6 Zyklen kein Rißfortschritt festzustellen war, wird von Rißstillstand ausgegangen.

Um zu untersuchen, ob ein grundlegender Unterschied der Rißausbreitungscharakteristik nicht nur beim Spannungsverhältnis $R = -1$ auftritt, sondern auch bei $R = 0,7$, wird analog zu den einfachen Überlasten (Abbildung 5.7) auch der Mittelspannungseinfluß auf die Überlastblöcke bei $R = 0,7$ ausgewertet, Abbildung 5.12.

Der erste Zyklus im Überlastblock korreliert gut mit den einfachen Überlasten. Mit zunehmender Zyklenzahl im Überlastblock nimmt die Rißfortschrittsrate ebenfalls deutlich ab. Dabei ist die Streuung im Bereich kleiner Rißfortschrittsraten größer als bei Überlastblöcken mit einem Spannungsverhältnis von $R = -1$. Die aus der Rißausbreitungskurve zu entnehmenden Rißfortschrittsraten der entsprechenden Lastniveaus sind ebenfalls eingetragen, liegen aber unter der Auflösungsgrenze des Meßverfahrens.

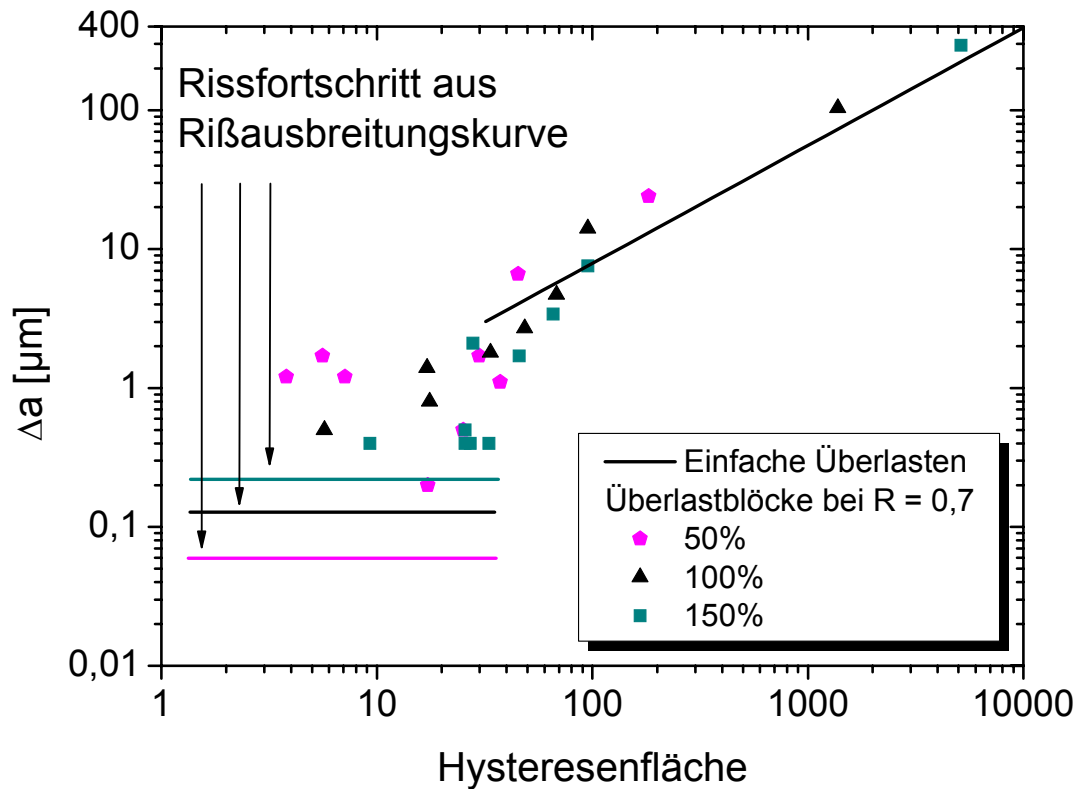


Abbildung 5.12: Überlastblöcke bei $R = 0,7$

In Abbildung 5.13 wird anhand des Potentialverlaufes eines Überlastblockes der Überlasthöhe 150% untersucht, wie viele Überlastzyklen bis zum Erreichen des zyklischen Gleichgewichtes bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,7$ benötigt werden.

Der Potentialverlauf beginnt bei der Rißfortschrittsrate der Grundlast. Diese beträgt 10^{-8} m/Zyklus und erscheint wegen der nur geringen Potentialänderungen als horizontaler Verlauf. Durch den Überlastblock kommt es zu Beginn zu einem sprunghaften Anstieg des Potentials. Diesem schließt sich ein abnehmender Gradient $\partial(\Delta U)/\partial t$ an, der für eine zyklensweise Abnahme des Rißfortschrittes pro Lastwechsel steht. Nach etwa 30 bis 50 Zyklen im Überlastblock stellt sich ein annähernd

konstanter Potentialanstieg ein, der als rote Linie eingezeichnet ist. Die entsprechende Rißfortschrittsrate wurde zwischen dem 200. und 600. Zyklus im Überlastblock zu $0,14 \mu\text{m}/\text{Zyklus}$ bestimmt. Dieser Wert korreliert gut mit der Rißausbreitungskurve für dieses Lastniveau. Damit benötigt der Riß bis zum Erreichen des zyklischen Gleichgewichtes etwa nur $\frac{1}{3}$ der Lastspiele, die beim Spannungsverhältnis von $R = -1$ nötig sind.

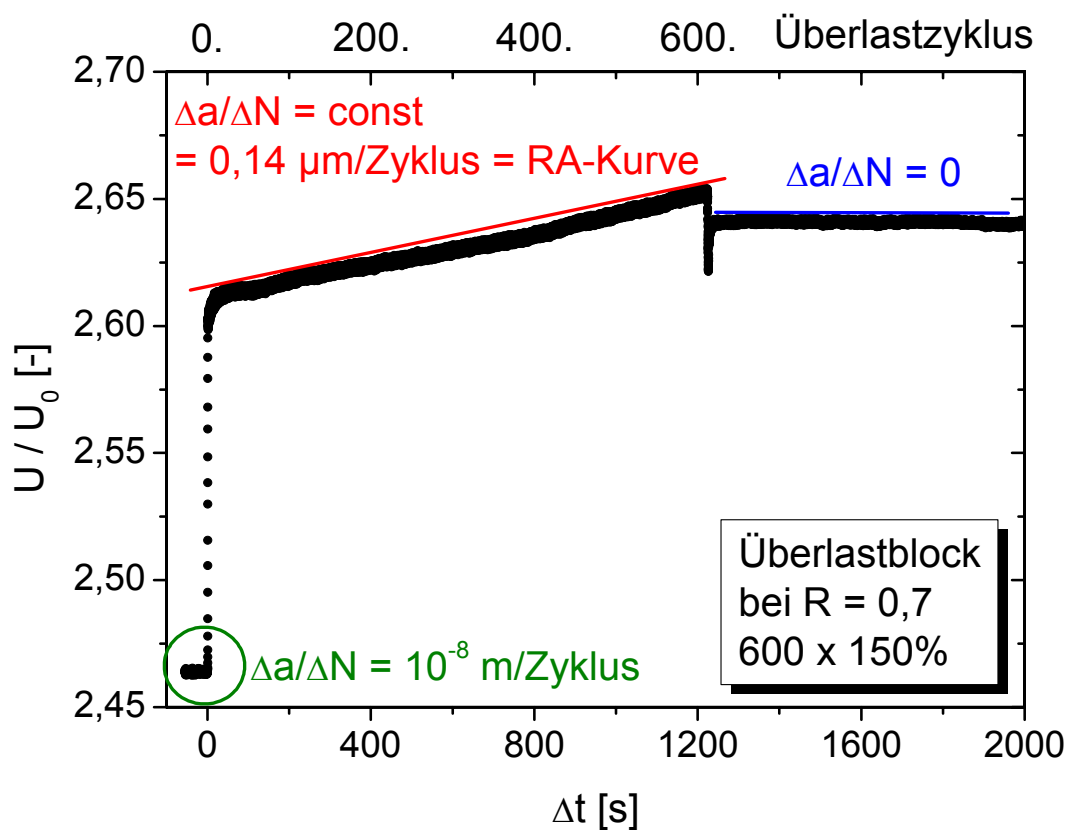


Abbildung 5.13: Potentialverlauf eines 150%- Überlastblockes bei $R = 0,7$

Nach dem Überlastblock (600 Überlastzyklen, $\Delta t = 1200 \text{ s}$) wurde wieder auf die Grundlast reduziert und es stellte sich ebenfalls Rißstillstand ein.

Der grundlegender Unterschied der Rißausbreitungscharakteristik wird auch beim Spannungsverhältnis $R = 0,7$ bestätigt. Damit ist offensichtlich

eine generelle Unterscheidung zwischen monotoner und zyklischer Rißausbreitung zu treffen, die unabhängig vom Spannungsverhältnis ist.

5.3 Lastinteraktionen bei einfachen Überlasten

In der linearen Schadensakkumulationshypothese nach *Miner* wird davon ausgegangen, daß pro Lastspiel ein Beitrag zur Schädigung des Bauteils unabhängig von der Vorgeschichte erfolgt. Daraus ergibt sich als Konsequenz eine Aufsummierbarkeit von Teilschädigungen und ein Ausschluß der Beeinflussung der Lastspiele untereinander. Bereits der Einfluß einer einzelnen Überlast auf die Ermüdungsrißausbreitung (Kapitel 4.1) widerspricht aber dieser Hypothese grundlegend.

Im wesentlichen werden in der Literatur für Lastinteraktionseffekte zwei Themengebiete angeführt. Erstens die Eigenspannungen. Darunter fallen sowohl durch Überlasten aufgeprägte Eigenspannungen als auch allgemeiner der Einfluß plastischer Zonen. Zweitens mechanische Einflüsse. Rißschließeffekte sowie Einflüsse auf die Rißspitzenmorphologie fallen unter diesen Punkt. An diese Schwerpunkte anlehnend wird nun zwischen Reihenfolgeeinflüssen und Rißspitzenmechanik unterschieden.

5.3.1 Reihenfolgeeinfluß

Um der Notwendigkeit einer Untersuchung der Ursache für einen Reihenfolgeeinfluß nachzukommen, werden die Ergebnisse der einfachen Überlasten diskutiert und der Literatur gegenübergestellt.

Eine einzelne Überlast erzeugt eine plastische Zone, die den Ermüdungsriß in seiner Ausbreitung verzögert. Die Modelle nach *Willenborg* [Will71] und *Wheeler* [Whee72] postulieren so lange

verzögerten Rißfortschritt, bis die zyklische plastische Zone die Berandung der durch die einzelne Überlast erzeugten monotonen plastischen Zone erreicht, Abbildung 5.14.

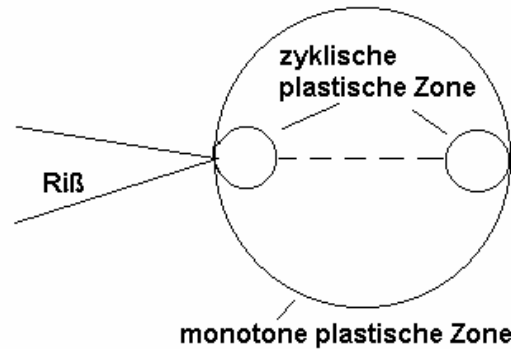


Abbildung 5.14: Modell nach *Willenborg* und *Wheeler*

Sowohl *Willenborg*, als auch *Wheeler* postulieren also einen Unterschied in der Art der plastischen Zone. Mit beiden Modellen kann grundsätzlich erklärt werden, daß sich innerhalb der monotonen plastischen Zone die Verzögerungswirkung verändert. Anfangs nimmt sie zu, bis die zyklische plastische Zone durch den Rißfortschritt vollständig in die monotone hineingewandert ist. Anschließend nimmt der Einfluß sukzessive ab, bis der Rißfortschritt wieder unbeeinflusst ist.

Ergebnisse zeigen, daß die Größe der zyklischen plastischen Zone innerhalb der monotonen nicht konstant ist. Vielmehr ändert sich ihre Ausdehnung. Nach der Überlast nimmt ihre Ausdehnung bis zur maximalen Verzögerungswirkung ab [Robi82], um anschließend wieder bis zum Gleichgewichtswert zuzunehmen [Führ84]. Diese Beobachtungen geben einen ersten deutlichen Hinweis darauf, daß die Eigenschaften der plastischen Zone vor der Rißspitze für die Rißausbreitung entscheidend ist und sich die Struktur der plastische Zone verändert.

In Kapitel 4.3.1 ist der Einfluß der Überlastreihenfolge auf die Ausdehnung des Verzögerungsbereiches Δa_v untersucht worden. Die Ergebnisse zeigen, daß die Ausdehnung des Verzögerungsbereiches keinem Reihenfolgeeinfluß unterliegt, da kein Einfluß der Druckphase beobachtet werden kann. Dies ist unabhängig davon, ob es sich bei den Überlasten um die Reihenfolge Druck/Zug oder Zug/Druck handelt, Abbildung 5.15.

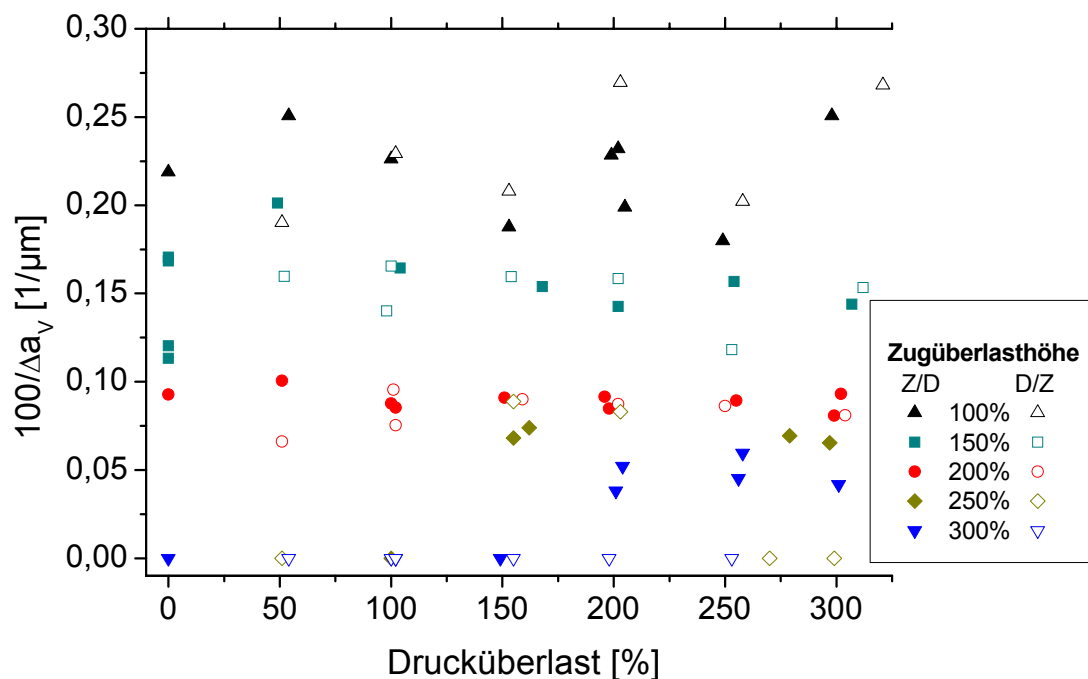


Abbildung 5.15: Drucküberlasteinfluß auf den Verzögerungsbereich

Während der Verzögerungsbereich Δa_v mit den Modellen in [Roed03] an der in dieser Arbeit untersuchten Aluminiumlegierung noch zu 80% mit der analytisch berechneten Größe der monotonen plastischen Zone übereinstimmt, findet [Step76] keine Übereinstimmung zwischen Experiment und Modell. Daraus läßt sich ableiten, daß die Modelle die Verzögerung in Folge einer Überlast nicht ausreichend beschreiben können.

Die Modelle versagen auch dann bereits für eine vollständige Beschreibung des Verzögerungseffektes (Verzögerungsbereich und -wirkung), wenn es sich bei den einfachen Überlasten nicht mehr nur um reine Zugüberlasten handelt, sondern um kombinierte Zug/Druck- oder Druck/Zug-Überlasten.

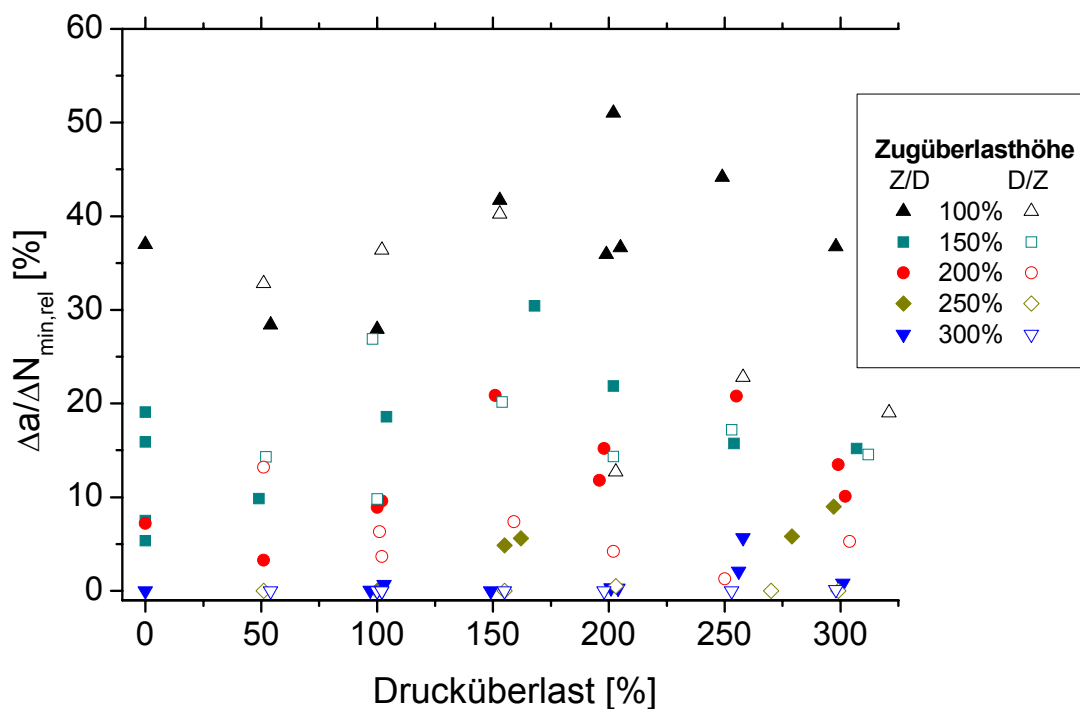


Abbildung 5.16: Drucküberlasteinfluß auf die minimale Rißfortschrittsrate

Im Gegensatz zur Ausdehnung des Verzögerungsbereiches übt bei der minimalen Rißfortschrittsrate, letztlich also bei der Effektivität des Verzögerungseinflusses, sehr wohl die Reihenfolge der unsymmetrischen Überlasten einen Einfluß auf die Rißausbreitung aus (Kapitel 4.3.2). Druck/Zug-Überlasten zeigen im Vergleich mit reinen Zugüberlasten identische Ergebnisse, während Zug/Druck-Überlasten mit zunehmender Drucküberlasthöhe eine steigende minimale Rißfortschrittsrate zeigen, Abbildung 5.16.

Um dies eindeutig zu belegen, ist in Abbildung 5.17 eine statistische Auswertung der Zug/Druck- und Druck/Zug-Überlasten aufgetragen.

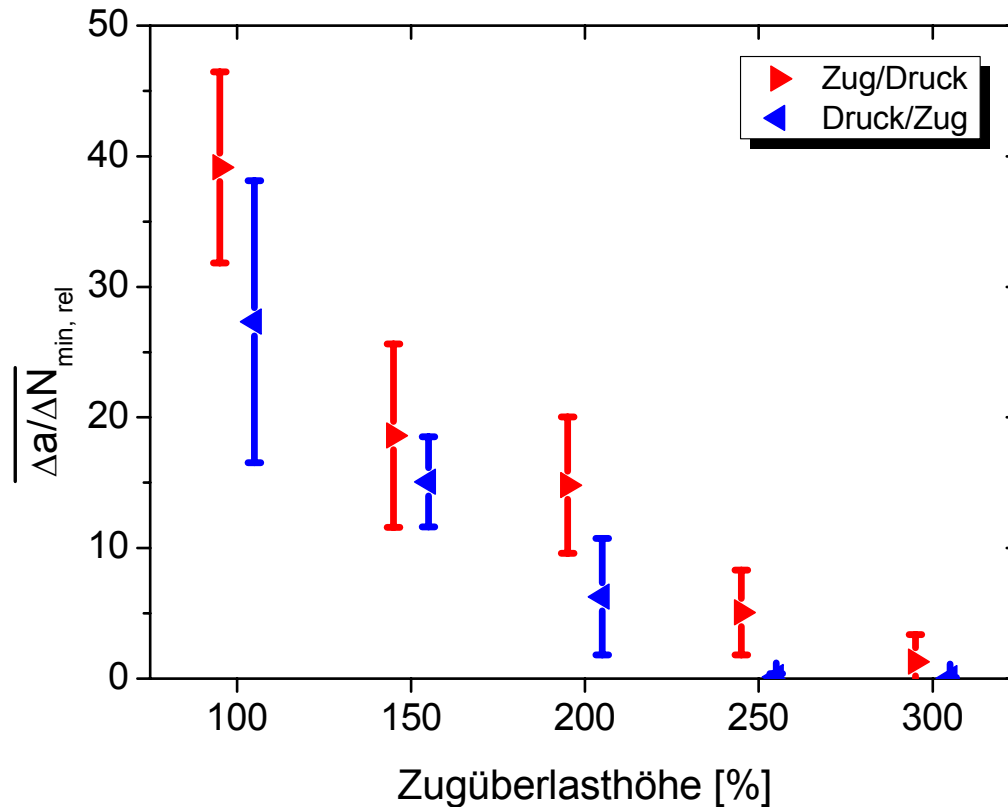


Abbildung 5.17: Statistische Auswertung des Drucküberlasteinflusses auf die minimale Rißfortschrittsrate

Die auf Grund der zunehmenden minimalen Rißfortschrittsrate größere Streuung der Zug/Druck-Überlasten hat für alle Zugüberlasthöhen, im Vergleich zu den Druck/Zug-Überlasten, größere Mittelwerte zur Folge. Die Druck/Zug-Überlasten zeigen diese Zunahme nicht und werden damit nicht durch den Druckanteil beeinflusst.

Eine Zunehmende minimale Rißfortschrittsrate kommt einer Abnahme der Effektivität der Verzögerung gleich.

Eine Röntgenanalyse der Spannungsverteilung vor der Rißspitze nach einer Zugüberlast ergibt einen Aufbau von Druckeigenstressungen [z. B. Kunz79, Wels83, Busc88]. In [Li92] ergibt sich sogar eine Korrelation zwischen der Ausdehnung der Eigenstressungsfelder und des Verzögerungsbereiches. Je größer die Grundlast bei Experimenten ist, desto größer sind auch die durch Überlasten verursachten Druckeigenstressungen. Diese Druckeigenstressungen überlagern sich mit der äußeren Belastung und verringern so die effektive Spannungsintensität ΔK_{eff} , was eine Verzögerung im Rißfortschrittsverhalten zur Folge hat. Der auf die Zugüberlast folgende Druckanteil reduziert diese Eigenstressungen [Hill75, Lang96].

Im Rahmen dieser Arbeit ist zwar keine Modellierung dieser Abnahme möglich, aber eine quantitative Erfassung. Die Abnahme wird besonders deutlich, wenn durch den Druckanteil der Überlast ein Rißstillstand verhindert wird und sich der Ermüdungsriß somit erholt. In der Literatur ist die Reduzierung der Druckeigenstressungen nicht nur an Aluminium zu finden [z. B. Bath77, Yish95, Sdn99], sondern auch an anderen Metallen, z. B. an Stahl [z. B. Bern76, Wels83, Führ84]. Die teilweise Kompensation der Druckeigenstressungen führen damit wieder zu einer Erhöhung der erniedrigten effektiven Spannungsintensität ΔK_{eff} . Die Folge ist eine Abnahme der Effektivität der Verzögerungswirkung.

Eine Analyse des Reihenfolgeinflusses bei einfachen Überlasten ergibt eine Dominanz des Zuganteils von unsymmetrischen Überlasten bei der Größe des Verzögerungsbereiches Δa_v . Bei der nach der Überlast erreichten minimalen Rißfortschrittsrate reduziert ein Druckanteil, der auf den Zuganteil folgt, die Verzögerungswirkung. Die Konzepte der

plastischen Zonen und der durch Überlasten eingebrachte Eigenspannungen vor der Rißspitze führen letztlich gemeinsam auf eine, kontinuumsmechanisch betrachtet, Reduzierung der effektiven Spannungsintensität, so daß die Rißausbreitung dadurch verlangsamt wird. Eine Verzögerung der Rißausbreitung bedeutet eine Erhöhung der Lebensdauer.

5.3.2 Rißspitzenmechanik

Neben den durch Überlasten aufgebrachten Eigenspannungen kommen für die Verzögerungswirkung mechanische Einflüsse an der bzw. auf die Rißspitze in Betracht. Der erste in diesem Zusammenhang zu diskutierende Aspekt ist das Rißschließen.

Da plastisch induziertes Rißschließen für alle duktilen Materialien der dominierende Rißschließenmechanismus ist, wird es exemplarisch betrachtet. Bei plastisch induziertem Rißschließen wird der Riß durch seine eigene Vergangenheitsspur beeinflusst. Der plastifizierte Bereich entlang des Rißpfades überlagert mit seinen Druckeigenspannungen die äußere Belastung, so daß der Riß nicht kräftefrei ist und, bevor er vollständig in einem Belastungszyklus entlastet ist, geschlossen wird. Damit wird auch die effektive Spannungsintensität reduziert. Es finden sich neben *Elber* [EIDV70] nicht nur an Aluminium bestätigende Artikel für plastisch induziertes Rißschließen [Dext89], sondern auch an Stahl [Bern76, Flec89] oder an der Titanlegierung TiAl6V4 [Jaco76]. Diese Beobachtungen interpretieren andere Experimentatoren [Lang96, Sdn99] für Aluminium aber anders. Sie führen weniger Rißschließeneffekte für die Verzögerungswirkung einer Überlast an, sondern vielmehr Eigenspannungen. Damit sind die Beobachtungen offenbar nicht eindeutig zuzuordnen. Sowohl die teilweise Kompensation der äußeren

Belastung durch Eigenspannungen, als auch die Beeinflussung der Rißspitze durch Rißschließmechanismen führen gemeinsam, in einer kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise, auf eine Reduzierung von ΔK_{eff} .

Als weitere Ursache für die Verzögerungswirkung einer Überlast werden direkte Veränderungen der Geometrie der Rißspitze angesehen. Darunter fallen Rißspitzenabstumpfung und Rißverzweigung.

Erfährt die Rißspitze eine Abstumpfung, so reduzieren sich damit die wirkenden Spannungen vor der Rißspitze. Der Riß kann nun vorübergehend nicht mehr wie ein sehr scharfer Riß im Sinn der LEBM betrachtet werden, sondern eher wie eine Kerbe, die hohen plastischen Verformungen ausgesetzt ist. Der Riß muß sich nun aus dieser deformierten Kerbe heraus entwickeln. Diese Eigenschaft wurde an verschiedenen Aluminiumlegierungen beobachtet [Bath77, Bath78, Brow78]. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Überlastversuchen konnte eine Abstumpfung der Rißspitze ebenfalls beobachtet werden. Die Rißspitze wirkte dabei optisch weit geöffnet, im Gegensatz zur Öffnung des Risses während der Grundlast.

Bei Überlasten kann die Rißspitze auch durch ein Verzweigen des Risses entlastet werden [Bucc80, Lank81]. Dabei verlassen Haupt- und Nebenriß kurzzeitig die ursprüngliche Rißausbreitungsrichtung. Der kürzere Nebenriß wächst nicht weiter. Wie in [Roed03] konnte bei größeren Überlasthöhen bei den durchgeführten Experimenten Rißverzweigung regelmäßig beobachtet werden. Da aber ein Überlasteinfluß mit und ohne Rißverzweigung beobachtet wurde, kann diese kein dominierender Faktor sein.

Die Spannungsverteilung und damit auch die Plastifizierung vor der Rißspitze sind abhängig vom Spannungszustand der Probe. Dieser ist direkt von der Geometrie der Probe, besonders der Dicke, abhängig. Zum Beispiel in [Chan77, Flec89] wird eine ausgeprägtere Verzögerungswirkung der Überlast für den ebenen Spannungszustand, also in dünnen Proben, gefunden. Diese Beobachtungen beruhen darauf, daß der ebene Spannungszustand eine größere Ausdehnung besitzt, als der ebene Verformungszustand. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Proben nur im ESZ untersucht.

Die diskutierten Modellvorstellungen zur Beschreibung des Überlasteinflusses sind nicht in der Lage, alle auftretenden Aspekte zu erfassen. Aus diesem Grund wird die Betrachtung dieser Erklärungsansätze nun abgeschlossen. Daraus ergibt sich aber die Notwendigkeit, eindeutige Hinweise auf die Rißausbreitungscharakteristik angeben zu können. Es wird daher notwendig, die Bruchfläche zu untersuchen. Sowohl an Aluminiumlegierungen als auch an Stahl kann eine mit der Überlasthöhe zunehmende Krümmung der Rißfront auf der Bruchfläche gefunden werden [Bath78, Mats80]. Die zunehmende Krümmung weist eindeutig darauf hin, daß der Riß in Probenmitte weniger stark verzögert wird, als am Probenrand. Obgleich umfangreiche Untersuchungen zur Krümmung der Rißfront bei einfachen Überlasten durchgeführt wurden, konnte bei den Überlastexperimenten ein solcher makroskopischer Einfluß nicht beobachtet werden. Aufgrund der spannungsintensitätsgeregelten Versuchsdurchführung ergab sich auch keine Abhängigkeit der Rißfrontkrümmung von der Rißlänge. In den Bereichen nach der einfachen Überlast konnten keine variierenden Rißfrontkrümmungen ausgemacht werden.

Im Gegensatz dazu lassen sich im REM sehr wohl diese Unterschiede nachweisen. In [Roed03] konnte an, in dieser Arbeit ebenfalls verwendeten, SEN-Proben gezeigt werden, daß nach einfachen Überlasten am Probenrand stets Ermüdungsbruchflächenstrukturen auftreten, während in der Probenmitte die für einen Gewaltbruch typische Wabenstruktur gefunden werden konnte. Dies bestätigt die Ergebnisse in [Huds63], wo dieses unterschiedliche Ausbreitungsverhalten zwischen Probenrand und -mitte ebenfalls beobachtet wurde.

Rißausbreitung im 2-stufigen Versuch wird durch das komplexe Zusammenspiel von monotonem und zyklischem Rißfortschritt bestimmt. Der Rißfortschritt im ersten Zyklus eines Überlastblockes ist erheblich größer als der zu erwartende zyklische Wert der Rißausbreitungskurve. Diesem nähert sich der Rißfortschritt mit zunehmender Lastspielzahl im Überlastblock erst an. Dieser beschleunigte Rißfortschritt Δ_{aB} muß, da er erheblich größer als der zu erwartende zyklische Rißfortschritt ausfällt und die Bruchfläche bereichsweise eine Wabenstruktur zeigt, einem monotonen Bruch zugeordnet werden. Das Fernbleiben der für Ermüdungsrisse charakteristischen Schwingungstreifen nach einer Überlast findet sich auch schon in [Bath77, Chan77].

Die Ergebnisse der Größe des Verzögerungsbereiches und der minimalen Rißfortschrittsrate (Kapitel 4.3.1 bzw. 4.3.2) unterliegen deutlich einem Mittelspannungseinfluß. Im Gegensatz zu [Step76] wird eine mit steigendem Spannungsverhältnis deutlichere Ausprägung der Verzögerung und auch des Gewaltbruches festgestellt.

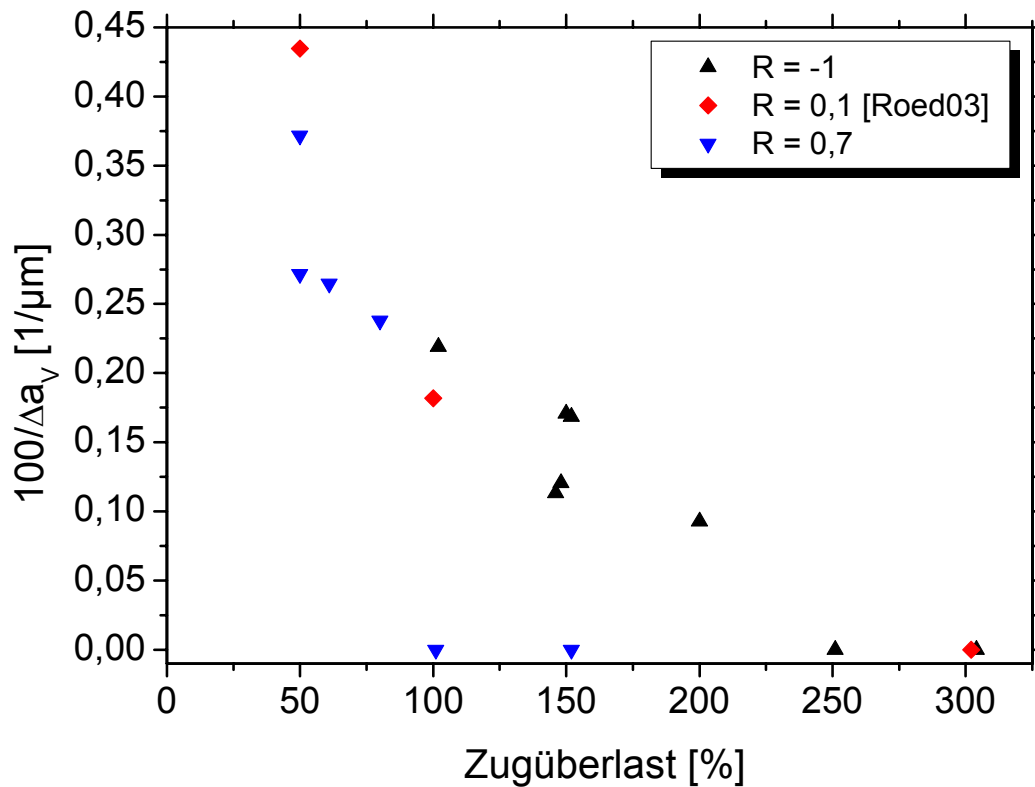


Abbildung 5.18: Einfluß des Spannungsverhältnis auf den Verzögerungsbereich bei Zugüberlasten

Ein Vergleich an einfachen Zugüberlasten zwischen den Spannungsverhältnissen $R = -1$, $0,1$ und $0,7$ bei gleicher Rißausbreitungsrate von 10^{-8} m/Zyklus zeigt Abbildung 5.18. Der Kehrwert des Verzögerungsbereiches ($100/\Delta a_v$) bei gleicher Überlasthöhe ist um so kleiner, d. h. Δa_v ist um so größer, je höher das Spannungsverhältnis ist. Bei $R = 0,7$ stellt sich damit zuerst ein Rißstopp ein und zwar bereits bei einer Überlasthöhe von 100%.

Der selbe Zusammenhang wird auch bei dem beschleunigten Rißfortschritt Δa_B im Überlastzyklus gefunden, Abbildung 5.19.

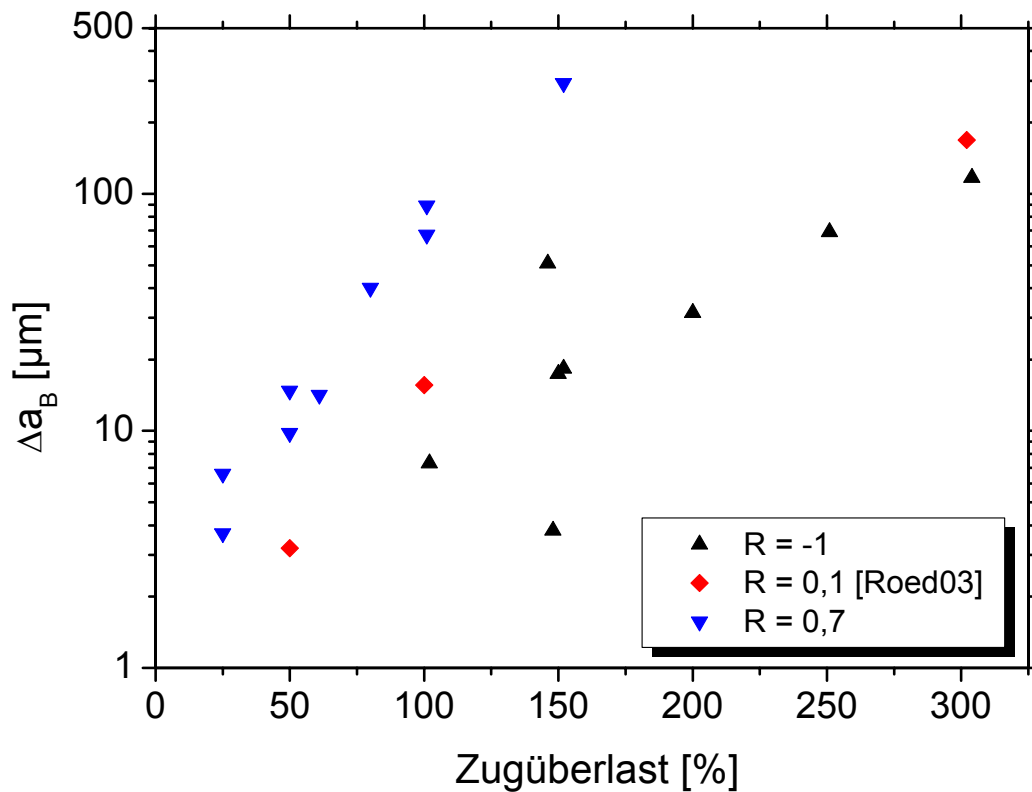


Abbildung 5.19: Einfluß des Spannungsverhältnis auf den Rißfortschritt im Überlastzyklus bei Zugüberlasten

Mit steigendem R-Wert nimmt bei gleicher Überlasthöhe der beschleunigte Rißfortschritt ebenfalls zu. Für alle Spannungsverhältnisse liegt der beschleunigte Rißfortschritt Δa_B weit über dem zyklischen Rißfortschritt $\Delta a/\Delta N$, wie er anhand der Rißausbreitungskurve zu erwarten wäre. Diese Ergebnisse zeigen, daß die Zuordnung des beschleunigten Rißfortschrittes Δa_B zu einem monotonen Bruchvorgang grundsätzlich vorzunehmen ist und nicht vom Spannungsverhältnis abhängt.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Einflüsse auf die Mechanik an der Rißspitze führen in einer kontinuumsmechanischen Betrachtung zu dem

selben Ergebnis, wie bereits die Diskussion des Reihenfolgeinflusses, nämlich die Reduzierung von ΔK_{eff} . Die unterschiedlichen Ausprägungen der Verzögerungswirkung, in Abhängigkeit von der Probengeometrie und der auf der Bruchfläche nachweisbaren Rißausbreitungsarten, zeigen ein weiteres Mal die Bedeutung der Eigenschaften der plastischen Zone auf.

5.4 Rißausbreitung bei mehrfachen Überlasten

Der Übergang vom monotonen Bruch zur zyklischen Rißausbreitung konnte am Beispiel der Überlastblöcke optimal studiert werden. Die Überlastblöcke wurden dabei, wie in Kapitel 3.3.6 beschrieben, so aufgebracht, daß das jeweilige Spannungsverhältnis der Grundlast beibehalten wurde. Das Augenmerk wird dabei auch auf die transienten Vorgänge zu Beginn und am Ende des Überlastblockes gelegt.

5.4.1 Monotone und zyklische Rißausbreitung

Wird in eine zyklisch stabilisierte Rißausbreitung ein Überlastblock eingebracht, so beschleunigt der Riß und erzielt zunächst Fortschrittswerte, wie sie für eine einfache Überlast erwartet werden, d. h. sie liegen über der zu erwartenden zyklischen Rate. Dies bestätigt die Ergebnisse aus [Euw72, Führ84], wo zu Beginn eines Überlastblockes ebenfalls eine größere Rißfortschrittsrate beobachtet wurde, als der zyklische Wert. Die nicht dem zyklischen Gleichgewicht entsprechenden Rißfortschrittsinkremente $\Delta a(N)$ nehmen mit zunehmender Zyklenzahl im Überlastblock ab und nähern sich dem zyklischen Wert. In [Treb73, Führ82] finden sich Hinweise darauf, daß sich eine Anhebung des Niveaus der Spannungsintensität einstellt, bei der der Riß öffnet, was einer Abnahme der effektiven Spannungsintensität im Verlauf des Überlastblockes gleichkommt. Allerdings konnte bereits in Kapitel 5.3 gezeigt werden, daß die auf einer Reduzierung von

ΔK_{eff} basierenden Erklärungsansätze keine ausreichende Beschreibungsmöglichkeit darstellen.

Ein Vergleich der Rißfortschrittsraten zwischen einer einfachen Überlast (Δa_B) und einem Überlastblock ($\Delta a(N)$) ist in Abbildung 5.20 angestellt.

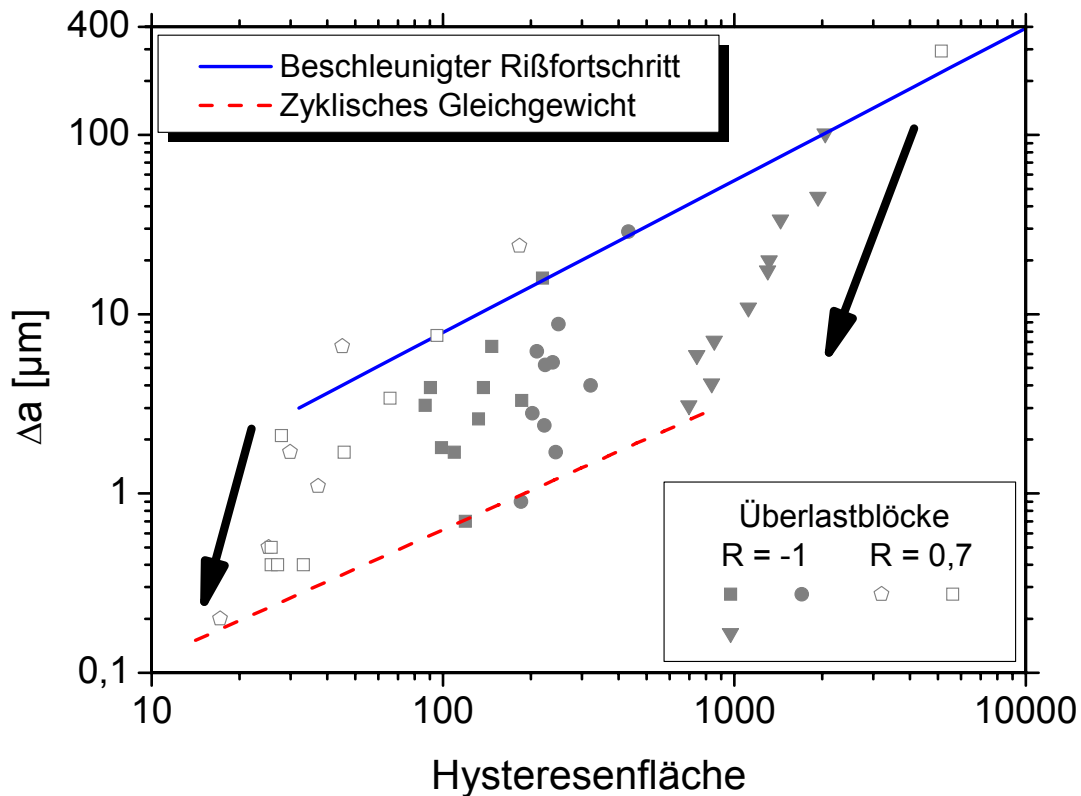


Abbildung 5.20: Rißausbreitungscharakteristika

Innerhalb des Überlastblockes verändert sich die Bruchflächenmorphologie von einer Gewaltbruchfläche mit Wabenstruktur hin zu einer Ermüdungsbruchfläche mit Schwingungstreifen (Abbildung 4.25). Es ist damit auf zwei voneinander unabhängigen Wegen ganz eindeutig nachgewiesen, daß sich die Art der Rißausbreitung ändert, und zwar von einem monotonen Bruchereignis zu einem zyklischen. Eine grundsätzlich

ähnliche Unterscheidung und auch ein Übergang der Rißausbreitungsarten findet sich in [Lang96].

In Abbildung 5.20 sind folgende Grenzen zu erkennen. Auf der oberen durchgezogenen Linien breiten sich alle einfachen Überlasten und auch die akkumulierten aus. Letztere wandern dabei von hohen Rißfortschrittswerten entlang dieser Linie zu niedrigeren. Die untere gestrichelte Linie zeigt den Verlauf des zyklischen Gleichgewichtes. Sie ist damit eine alternative Darstellung zur Rißausbreitungskurve. Der Bereich zwischen diesen beiden Grenzen kann nur durch transiente Übergänge in Pfeilrichtung von monotonem Bruch zu zyklischer Rißausbreitung erreicht werden. Übergänge entgegen der Pfeilrichtung, also vom zyklischen Gleichgewicht hin zum monotonen Rißfortschritt, finden durch Überlasten nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft statt.

Beim Einbringen einer Überlast in eine zyklische Rißausbreitung ändert sich offenbar die Energiebilanz (Gleichung 5.1). Der Rißwiderstand R nimmt sprunghaft ab, so daß große Rißfortschrittsinkremente erzielt werden. Hingegen macht der Übergang vom beschleunigten Rißfortschritt zum zyklischen deutlich, daß der Rißwiderstand allmählich größer wird und sich somit der Rißfortschritt dem zyklischen Gleichgewicht kontinuierlich nähert. Für diese dramatischen Änderungen des Rißwiderstandes kommt nur der Anteil der plastischen Energie E_{pl} in Betracht. Damit beschreibt die Hysteresenfläche in Verbindung mit dem (unbekannten) Rißwiderstand die Rißausbreitung.

Eine Überlast wird erst dann als solche wahrgenommen, wenn der Unterschied im Rißfortschritt größer ist als die Streuung der Rißausbreitungskurve. In diesem Sinn kann bei einer Rißausbreitung im

schwelligkeitsnahen Bereich daher ein Zusammentreffen der monotonen und zyklischen Rißausbreitung erwartet werden (Abbildung 5.20). In dieser Darstellung sollte der Rißfortschritt gegen Null gehen, während die Hysteresenfläche endlich bleiben muß, da der Riß noch öffnet, auch wenn er sich nicht weiter ausbreitet. Experimente in diesem Bereich sind wegen der Auflösungsgrenze des Meßverfahrens allerdings nicht möglich.

Der Unterschied zwischen monotoner und zyklischer Rißausbreitung kann auch für eine überkritische Rißausbreitung erwartet werden. Bei hohen Rißfortschrittsraten ist weniger davon auszugehen, daß sich diese zyklisch stabilisieren, sondern vielmehr, daß eine monotone Rißausbreitung dominiert. Damit ginge sowohl der Rißzuwachs, als auch damit zusammenhängend, die Hysteresenfläche im Grenzfall gegen ∞ . Ein Zusammenlaufen beider Rißausbreitungsarten wird auch nicht beobachtet, obwohl Überlasten mit einer Spannungsintensität von 80% des K_{IC} -Wertes untersucht wurden. Dabei ist anzumerken, daß das in dieser Arbeit verwendete K-Konzept bei Überlasten dieser Größenordnung an seine Gültigkeitsgrenzen gelangt. Und dennoch stechen diese Ergebnisse im Vergleich zu den übrigen Überlastversuchen nicht hervor.

Jedoch sind der Schwellenwertbereich und der Bereich der überkritischen Rißausbreitung derzeit dem Experiment nicht zugänglich.

Im Gegensatz zu einfachen Überlasten verändert sich die Krümmung der Rißfront bei Überlastblöcken erkennbar. Mit zunehmender Überlasthöhe wird die Rißlängendifferenz zwischen Probenrand und -mitte größer. Die sich dabei ausbildenden Flanken unter ca. 45° zur Rißausbreitungs-

ebene (Abbildung 4.21, Abbildung 4.23) spiegeln typischerweise den ebenen Spannungszustand wieder (vgl. Abbildung 2.4). Die Bruchflächenmorphologie verdeutlicht die Notwendigkeit die mittels der Potentialsonde ermittelten Rißfortschrittsinkremente als konservativ einzustufen. Die Zunahme der Rißfrontkrümmung weist in Übereinstimmung mit [Lang96, Mats80] auf ein Stehenbleiben der Risses am Probenrand hin, während er sich in Probenmitte stets weiter ausbreitet. Da die Potentialsondenmessung ein integrales Meßverfahren ist, muß der Rißfortschritt in Probenmitte größer als der berechnete sein, wenn der Riß am Probenrand stoppt.

5.4.2 Lastabsenkung nach mehrfachen Überlasten

Am Ende eines Überlastblockes kann nach der Reduzierung auf die Grundlast eine sehr viel ausgeprägtere Verzögerungswirkung festgestellt werden als bei einfachen Überlasten gleicher Höhe. Dieses Verhalten konnte auch in [Euw72, Mill76, Zuid91] beobachtet werden.

Nach der Lastabsenkung am Ende der Überlastblöcke auf die Grundlast stellt sich bei allen Spannungsverhältnissen meist Rißstillstand ein. Bei niedrigen Überlastblöcken, d. h. 100% bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ und 50% bei $R = 0,7$ hingegen, erholt sich der Riß wieder und kann sich weiter ausbreiten. Diese Überlastblöcke wirken sich also hinsichtlich des Verzögerungsbereiches wie eine einfache Überlast gleicher Höhe aus, was durch eine Übereinstimmung der jeweiligen Verzögerungsbereiche Δa_v belegt wird. Die minimal erreichte Rißfortschrittsrate $\Delta a / \Delta N_{\min, \text{rel}}$ ist aber mit 1,7% bzw. 0,04% deutlich geringer als die der einfachen Überlasten gleicher Höhe, d. h. die Verzögerungswirkung ist ebenfalls größer.

Die trotz gleicher Überlasthöhe unterschiedlichen Auswirkungen der einfachen und mehrfachen Überlasten weisen grundlegend verschiedene Verzögerungswirkungen auf. Bei einfachen Überlasten wird aus der zyklisch stabilen Rißausbreitung kommend in der Be- und Entlastungsphase eine monotone plastische Zone aufgebaut. Nach der Überlast bildet sich innerhalb der monotonen plastischen Zone eine der Grundlast entsprechende zyklische plastische Zone. Bei mehrfachen Überlasten hingegen ist die Riausbreitungsrate $\Delta a/\Delta N$ nach ca. 50 bzw. 150 Lastwechseln zyklisch stabil, was die Auswertung des Potentialverlaufes aus Kapitel 5.2.3 eindeutig zeigt. Danach müßte sich eine der Grundlast des Überlastblockes entsprechende zyklische plastische Zone gebildet haben. Diese große zyklische plastische Zone entspricht in ihrer Ausdehnung nicht der zyklischen plastischen Zone der ursprünglichen Grundlast. Nach der Reduzierung auf die ursprüngliche Grundlast am Ende des Überlastblockes wird der Riß blockiert. Mit anderen Worten, die zyklische plastische Zone des Überlastblockes behindert die Rißausbreitung mit der Grundlast wesentlich effizienter, als die monotone plastische Zone einer einfachen Überlast gleicher Höhe.

Dies führt zu der Überlegung, daß nicht wie im K-Konzept eigentlich vorausgesetzt die plastische Zone klein sein muß gegen die Rißlänge, um nicht berücksichtigt werden zu müssen, sondern daß gerade die Struktur der plastische Zone für die Rißausbreitung entscheidend ist. Denn eine Lastabsenkung auf das Grundlastniveau nach einer einfachen oder mehrfachen Überlast unterscheidet sich letztlich nur durch die Art der bei Lastabsenkung vorliegenden plastischen Zone vor der Rißspitze.

5.5 Überlegungen zur Versetzungsstruktur bei Rißausbreitung

Alle vorgestellten Experimente zeigen, daß die Rißausbreitung durch die Vorgeschichte des jeweiligen Lastzyklus entscheidend beeinflußt wird. Die Vorgeschichte selbst entwickelt sich durch die Struktur der plastischen Zone vor der Rißspitze. Folgt man diesen Überlegungen, so stellt sich die Frage, wie die plastische Zone strukturiert ist, was ihren Aufbau beeinflußt und welche Konsequenzen sich daraus für das Rißausbreitungsverhalten ableiten lassen.

Bei der Diskussion des Reihenfolgeeinflusses von einfachen Überlasten konnte die verminderte Verzögerungswirkung bei Zug/Druck-Überlasten, verglichen mit Zugüberlasten, nur durch den Einfluß von Eigenspannungen erklärt werden, die durch den Druckanteil der Überlast eingebracht werden. Die dabei zu Grunde liegende Betrachtungsweise berücksichtigt nicht die Mikrostruktur, sondern ist eine ingenieurwissenschaftliche, ebenso wie die Überlegungen zur Ausdehnung des Verzögerungsbereiches einer Überlast und der Größe der durch sie erzeugten monotonen plastischen Zone. Verläßt man diese Betrachtungsebene und konzentriert sich auf die Mikrostruktur, so sind plastische Zonen und auch Eigenspannungen durch Versetzungen bestimmt. Versetzungswechselwirkungen, sowie ihre Erzeugung und Vernichtung bestimmen die plastische Zone vor der Rißspitze und bewirken damit das beobachtete Rißausbreitungsverhalten.

Das unterschiedliche Rißfortschrittsverhalten zu Beginn und Ende der Überlastblöcke führt zu der Überlegung, daß sich die Struktur der plastischen Zone vor der Rißspitze verändert. Die Bruchflächenanalysen

im REM der einfachen und mehrfachen Überlasten zeigen im Bereich des beschleunigten Rißfortschrittes einen Wechsel von Schwingungstreifen zu einer Wabenstruktur. Die Ergebnisse der Potentialsondenauswertung bestätigen diesen Wechsel ebenfalls durch eine Änderung der Rißfortschrittsrate von Werten der Rißausbreitungskurve hin zu Raten, die wesentlich höher liegen.

Damit kann postuliert werden, daß sich unter Ermüdung eine andere Versetzungsstruktur aufbaut, als bei monotoner Rißausbreitung und zwingend zwischen einer monotonen und einer zyklischen plastischen Zone differenziert werden muß. Offenbar sorgt nun eine solche Versetzungsanordnung für kleine Rißfortschrittsinkremente unter zyklisch stabilisierter Beanspruchung, also Ermüdung, im Gegensatz zu großen monotonen Rißfortschrittsinkrementen bei einfachen Überlasten. Der Aufbau einer zyklischen plastischen Zone unter Ermüdung muß den Anteil E_{pl} des Rißwiderstandes R erhöhen, was eine kontinuierliche Reduzierung des Rißfortschrittes pro Lastwechsel bewirkt. Tatsächlich wird dies experimentell verifiziert.

Alle durchgeführten Experimente haben zweifelsfrei gezeigt, daß die plastische Zone die Rißausbreitung und auch Lastinteraktionen dominiert. Die zyklische plastische Zone wird dabei einer bestimmten Versetzungsstruktur zugeschrieben, die monotone plastische Zone notwendigerweise einer anderen. Makroskopisch wird dies im unterschiedlichen Verzögerungsverhalten von einfachen Überlasten und Überlastblöcken gleicher Höhe besonders deutlich. Während die zyklisch stabilisierte plastische Zone der Grundlast durch eine einfache Überlast teilweise oder vollständig durchbrochen wird und sich im Anschluß eine neue zyklische plastische Zone aufbaut, muß nach einem Überlastblock

bei der Reduzierung auf die Grundlast eine der Grundlast entsprechende zyklische plastische Zone aufgebaut werden. Da im letzteren Fall meist Rißstillstand zu beobachten ist, reicht die von der Grundlast bereitgestellte Energie nicht aus, um den Riß weiter voranzutreiben, d. h. die zyklische plastische Zone des Überlastblockes kann nicht überwunden werden.

Die Ausbildung einer im Vergleich zur monotonen Belastung unterschiedliche Versetzungsstruktur wurde bereits bei Experimenten mit Low-Cycle-Fatigue (LCF) beobachtet. Auch wenn ein direkter Vergleich auf Grund der bei LCF-Proben homogenen Dehnungsbeanspruchung gegenüber des ausgeprägten Spannungs- und damit Dehnungsgradienten vor der Rißspitze bei der Ermdungsrsausbreitung nur schwerlich möglich ist, weisen die Ergebnisse Analogien auf. Für die Ausbildung der unter Ermüdung beobachteten persistenten Gleitbänder, sowie Versetzungsanordnungen in einer Zell- und Labyrinthstruktur wird eine gewisse Anzahl von Lastwechseln benötigt. Dies wurde nicht nur an Einkristallen, sondern auch bei einer polykristallinen, ausscheidungsgehärteten Cu-Co-Legierung [Gudl86] beobachtet. Eine Übersicht über Versetzungsstrukturen bei LCF-Experimenten wird in [Chri91] gegeben.

Die zukünftige Herausforderung bei diesen Überlegungen besteht nach wie vor darin, die gewonnenen Erkenntnisse, die mikrostruktureller Natur sind, auf eine ingenieurwissenschaftliche Basis zu übertragen, die meist kontinuumsmechanischer Natur ist. Diese Notwendigkeit hatte *Wheeler* bereits 1972 erkannt [Whee72].

Eine weitere vielversprechende Methode neben REM, TEM und Röntgenbeugung zur Untersuchung der Struktur der plastischen Zonen

bietet die Positronenspektroskopie. Mit ihr kann zwischen verschiedenen Defektarten wie Versetzungen, Leerstellen und Leerstellenagglomeraten unterschieden werden [KrRe99]. Wird die Lebensdauer von Positronen gemessen, ergeben sich in Abhängigkeit der Defektart charakteristische Zeiten. Auf diese Weise kann auf die Defektart rückgeschlossen werden [Köge04]. Auf Ermüdungsbruchflächen wird eine charakteristische Lebensdauer gemessen, die auf Gewaltbruchflächen nicht auftritt. Mit dieser weiteren Meßmethode ergibt sich also ebenfalls eine Möglichkeit den Unterschied zwischen Ermüdungs- und Gewaltbruch grundsätzlich unterscheiden zu können. Die Grundlasthöhe übt keinen Einfluß auf die Unterscheidbarkeit aus, die Atmosphäre nur einen geringen [Egg04].

Im Rahmen dieser Arbeit konnten am Institut für Angewandte Physik und Meßtechnik der Universität der Bundeswehr München keine weiteren Untersuchungen mit den beiden Positronenstrahlsystemen PLEPS und SPM [Egg03] durchgeführt werden, da diese am Forschungsreaktor München II (FRM II) neu aufgebaut werden. Im Anschluß an den Umzug sollte sowohl eine einfache Überlast auf einer Probe untersucht werden, als auch ein Überlastblock. Diese Experimente können darüber Aufschluß geben, ob die Ergebnisse der gefundenen Gewaltbruchstrukturen im Bereich der einfachen Überlast und der transiente Vorgang im Überlastblock bestätigt werden können. Darüber hinaus gibt die am FRM II gesteigerte Auflösung und Empfindlichkeit der Strahlsysteme Grund zur Hoffnung auf eine Ausweitung der bisher in Messungen gefundenen Erkenntnisse. Möglicherweise eröffnet dies den Weg zum besseren Verständnis der Prozesse im Bereich der Rißspitze und damit zum besseren Verständnis der Rißausbreitung.

6 Zusammenfassung

Bauteile im Einsatz sind komplexen Lastfolgen ausgesetzt. Bei einer Lebensdauervorhersage mit der linearen Schadensakkumulationshypothese nach *Palmgren-Miner* finden sich Diskrepanzen zwischen Modell und Experiment. Die Ursache dafür ist die Interaktion der einzelnen Belastungsamplituden, die in der *Palmgren-Miner*-Regel keine Berücksichtigung findet. Ein Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen ist es, Reihenfolgeeffekte von kombinierten einfachen Zug- und Druck-Überlasten zu untersuchen, sowie transiente Vorgänge, wie sie bei mehrfachen Überlasten (Überlastblöcken) als einfache Form von Betriebslastfolgen auftreten. Dabei wurde auch der Mittelspannungseinfluß durch Variation des R-Wertes berücksichtigt. Das Verständnis beider Schwerpunkte ist entscheidend für die Verbesserung der Lebensdauervorhersage von Bauteilen unter Betriebsbeanspruchung.

Dazu werden an einer servohydraulischen Prüfmaschine spannungsintensitätskontrollierte Überlastversuche an einseitig gekerbten Flachproben mit paralleler Probenführung der Aluminiumlegierung 6013 (Al-Mg-Si) durchgeführt. Die Rißausbreitung wird dabei mit der Gleichstrompotentialmethode in-situ verfolgt.

Bei der Bewertung des Reihenfolgeeffektes von einfachen Überlasten werden der Rißfortschritt, die Größe des Einflußbereiches einer Überlast, sowie die minimale Rißfortschrittsrate nach dem Einbringen einer Überlast analysiert.

Der während einer Zugüberlast gemessene Rißfortschritt ist erheblich größer als entsprechend der Rißausbreitungskurve zu erwarten ist und muß somit einem monotonen Bruchereignis zugeordnet werden. Dieses Ergebnis ist unabhängig von einer der Zugüberlast vor- oder nachgeschalteten Drucküberlast. Auf der Bruchfläche finden sich im Bereich nach einer Überlast für einen monotonen Bruch typische Wabenstrukturen. Der erzielte beschleunigte Rißfortschritt ist dabei abhängig von der Höhe der Grund- und Überlast.

Eine auf die Zugüberlast folgende Drucküberlast reduziert die Effektivität der Verzögerungswirkung. Mit zunehmender Höhe der Drucküberlast nimmt bei konstantem Zuganteil die minimal erreichte Rißfortschrittsrate zu.

Die minimal erreichte Rißfortschrittsrate nimmt weiter ab, wenn Zugüberlasten in geeigneter Weise akkumuliert wurden. Dazu wird nach einer einfachen Zugüberlast jeweils eine weitere eingebracht, wenn sich der Ermüdungsriß mit der minimalen Rißfortschrittsrate in Folge der vorhergehenden Überlast ausbreitet. Die auf diese Weise mehrfach eingebrachten Zugüberlasten führen letztlich zu einem Rißstillstand.

Die Größe des Einflußgebietes einer Überlast auf die Rißausbreitung der Grundlast wird ausschließlich durch die Höhe der Zugüberlast bestimmt. Eine vor- oder nachgeschaltete Drucküberlast übt darauf keinen Einfluß aus.

Der erste Zyklus eines Überlastblockes verhält sich bezüglich der Rißbeschleunigung wie eine einfache Überlast. Mit zunehmender Zyklenzahl im Überlastblock nimmt der Rißfortschritt hingegen ab und

stabilisiert sich zyklisch auf den Wert einer Rißausbreitungskurve. Für das Spannungsverhältnis $R = -1$ sind dazu etwa 150 Lastspiele im Überlastblock nötig, für $R = 0,7$ etwa 50.

Um Überlasten unabhängig von deren Gesamtrißlänge der Einstreuung vergleichen zu können, wird eine neue Auswertung vorgeschlagen. Dazu wird die Fläche unter der Potentialsondenhysterese (Spannungsintensität über Potential) bestimmt. Die Auswertung der Hysteresenfläche zeigt einen eindeutigen Übergang vom monotonen Rißfortschritt hin zu zyklischer Rißausbreitung entsprechend der Rißausbreitungskurve. Dieser transiente Übergang wird durch Bruchflächenanalysen bestätigt. Zu Beginn eines Überlastblockes besteht die Morphologie der Bruchfläche aus einer Wabenstruktur. Die Morphologie verändert sich im weiteren Verlauf des Überlastblockes und es können für eine Ermüdungsrißausbreitung typische Schwingungstreifen nachgewiesen werden.

Sowohl bei den einfachen Überlasten, als auch bei den mehrfachen Überlasten werden die Grundlast, die Überlasthöhen und -reihenfolgen, sowie das Spannungsverhältnis variiert. Die in dieser Arbeit eingeführte Auswertung von erzielttem Rißfortschritt und den zugehörigen Potentialsondenhysteresen ermöglicht eine einheitliche Beschreibung dieser Lastinteraktionen. Diese Auswertung verdeutlicht ein grundsätzlich unterschiedliches Rißausbreitungsverhalten von Ermüdungsrisen (monoton vs. zyklisch), was einen deutlichen Widerspruch zu einer linearen Schadensakkumulationshypothese darstellt. Der Widerspruch ergibt sich aus der bisherigen einseitigen Betrachtungsweise des Risses, der die plastische Zone beeinflusst. Vielmehr müssen nun Riß und plastische Zone gemeinsam als

Schädigungsgröße berücksichtigt werden, da sich beide gegenseitig beeinflussen. Mit der Möglichkeit der einheitlichen Beschreibung von Lastinteraktionseffekten besteht nun eine Basis zur zukünftigen Entwicklung von Lebensdauervorhersagen unter betriebsnaher Beanspruchung.

Glossar

a	Rißlänge
a(N)	Rißfortschritt pro Lastwechsel im Überlastblock
a _{ERA}	Rißlänge der Ermüdungsrißausbreitung
a _{ges}	Gesamtrißlänge
a _k	Kerbtiefe
B	Bauteildicke
D	Schädigungsparameter
E	Elastizitätsmodul
E _E	Elastische Energie
E _O	Oberflächenenergie
E _{pl}	Plastische Arbeit
ESZ	Ebener Spannungszustand
EVZ	Ebener Verformungszustand
FRM II	Forschungsreaktor München II
G	Energiefreisetzungsrate
K	Spannungsintensität
K _C	Kritische Spannungsintensität im ESZ
K _I	Spannungsintensität für eine Modus-I-Belastung
K _{IC}	Kritische Spannungsintensität im EVZ
K _{max}	Maximale Spannungsintensität im Belastungszyklus
K _{min}	Minimale Spannungsintensität im Belastungszyklus
LCF	Low cycle fatigue
N, n	Anzahl von Lastwechseln
R	Rißwiderstand, Spannungsverhältnis
R-Wert	Spannungsverhältnis

r_{ys}	Fließradius der plastischen Zone
SEN	Single edge notched specimen
S_i	Lasthöhe
U	Gemessener Potentialabfall an einer Probe
U_0	Anfangspotential einer Probe
W	Probenbreite
y_0	Halber Potentialabgriffabstand
Δa	Rißlängendifferenz, Rißfortschritt
$\Delta a/\Delta N$	Rißgeschwindigkeit
$\Delta a/\Delta N_{min}$	Minimale Rißgeschwindigkeit im Verzögerungsbereich einer Überlast
$\Delta a/\Delta N_{min, rel}$	Minimale relative Rißgeschwindigkeit im Verzögerungsbereich einer Überlast
$\Delta a/\Delta N_{rel}$	Auf Ausgangswert bezogene Rißgeschwindigkeit
Δa_B	Beschleunigter Rißfortschritt während einer Überlast
Δa_{pot}	In eine Rißlänge umgerechneter Potentialabfall
Δa_v	Größe des Verzögerungsbereiches einer Überlast
ΔK	Schwingbreite (Differenz zwischen K_{max} und K_{min})
ΔK_{eff}	Effektive Spannungsintensität
ΔN	Lastspielzahldifferenz
Δt	Zeitdifferenz
$\sigma_{1, 2, 3}$	Elastische Spannungen vor der Rißspitze im Hauptachsensystem
σ_∞	Äußere Spannung
σ_m	Mittelspannung
σ_v	Vergleichsspannung
$\sigma_{x, y}$	Spannungen an der Rißspitze in einem beliebigen Koordinatensystem
$\sigma_{\xi, \psi, \zeta}$	Äußere Spannungen im Hauptachsensystem

α	Überlastfaktor
γ	Spezifische Oberflächenenergie
ν	Querkontraktionszahl
τ_{xy}	Schubspannung an der Rißspitze in einem beliebigen Koordinatensystem

Literaturverzeichnis

- AIMS00 Airbus Industrie Material Specification, AIMS 03-04-034 (2000)
- Alb837 Albert W.A.J., Über Treibseile am Harz, Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde, Band 10 (1837), 215-234
- Alli64 Pohl E.J., Bark R., Wege zur Schadenverhütung im Maschinenbetrieb - Technische und wirtschaftliche Maßnahmen zur Verhütung und Minderung von Schäden an technischen Anlagen, Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin (1964)
- Bär01 Bär J., Volpp T., Vollautomatische Experimente zur Ermüdungsrisssausbreitung, Materialprüfung 43 Nr. 6 (2001), 242-247
- Bath77 Bathias C., Vancon M., Mechanismen der Einwirkung von Überbelastungen auf die Fortpflanzung von Ermüdungsrisse bei Aluminiumlegierungen, HTM 32, 5 (1977), 241-249
- Bath78 Bathias C., Vancon M., Mechanisms of Overload Effect on Fatigue Crack Propagation in Aluminium Alloys, Engineering Fracture Mechanics 10 (1978), 409-424
- Bazi99 Bazios I., Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten einer AlMgSi-Legierung bei betriebsnaher Beanspruchung in korrosiven Medien, Dissertation, Universität der Bundeswehr München (1999)
- Bern76 Bernard P. J., Lindley T. C., Richards C. E., Mechanisms of Overload Retardation during Fatigue Crack Propagation,

- ASTM STP 595 (1976), 78-97
- Broe86 Broek D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1986)
- Brol00 Broll M., Einfluß von Überlasten auf die Rißausbreitung der Aluminiumlegierung 7075, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München (2000)
- Brow78 Brown R.D., Weertman J., Effects of tensile overloads on crack closure and crack propagation rates in 7050 aluminium, Engineering Fracture Mechanics 10 (1978), 867-878
- Bucc80 Bucci R.J., Thakker A.B., Sanders T.H., Sawtell R.R. & Staley J.T., Ranking 7xxx aluminium alloy fatigue crack growth resistance under constant amplitude and spectrum loading, In: Effect of Load Spectrum Variables on Fatigue Crack Initiation and Propagation, Special Technical Publication 714, American Society for Testing and Materials (1980), 41-78
- Busc88 Busch M.-L., Lebrun J.-L., X-Ray Diffraction Study of Stress Distributions following a Single Tensile Overload, In: Petit J., Davidson D. L., Suresh S., Rabbe P., Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, London: Elsevier Applied Science (1988), 76-86
- Buxb92 Buxbaum O., Betriebsfestigkeit - Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile, 2. Auflage, Verlag Stahleisen (1992)
- Chan77 Chanani G.R., Effect of thickness on retardation behaviour of 7075 and 2024 aluminium alloys, In: Flaw Growth and Fracture, ASTM STP 631 (1977), 365-387

- Chri91 Christ H.-J., Wechselverformung von Metallen, Werkstoff-Forschung und -Technik, Band 9, Springer-Verlag (1991)
- Dext89 Dexter R.J., Hudak S.J., Davidson D.L., Modelling and measurement of crack closure and crack growth following overloads and underloads, Engineering Fracture Mechanics 33 (1989), 855-870
- DIN515 DIN EN 515, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Halbzeug, Bezeichnung der Werkstoffzustände (1993)
- E399 Annual Book of ASTM Standards, ASTM E399-90, Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness Testing of Metallic Materials (1990)
- Egg03 Egger W., Kögel G., Sperr P., Triftshäuser W., Bär J., Rödling S., Gudladt H.-J., Fatigue and fracture-induced defect structures of metals investigated by positron microscopy, Zeitschrift für Metallkunde 94 (2003), 687-693
- Egg04 Egger W., Kögel G., Sperr P., Triftshäuser W., Bär J., Rödling S., Gudladt H.-J., Measurements of defect structures of a cyclically deformed Al-Mg-Si alloy by positron annihilation techniques, Materials Science and Engineering A 387-389 (2004), 317-320
- EIAS71 Elber W., The Significance of Fatigue Crack Closure, In: Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486 (1971), 230-242
- EIDV70 Elber W., Einfluss der plastischen Zone auf die Rissausbreitung unter Schwingbelastung, Materialprüfung 12 (1970), 189-220
- EIFM70 Elber W., Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension, Engineering Fracture Mechanics 2 (1970), 37-45
- Euw72 Von Euw E.F.J., Hertzberg R.W., Roberts R., Delay effects

- in fatigue crack propagation, ASTM STP 513 (1972), 230-259
- Flec89 Fleck N. A., Shercliff H. R., Overload Retardation due to Plasticity Induced Crack Closure, Proceedings of 7th International Conference on Fracture ICF7, Houston, USA (1989), Pergamon Press, 1400-1415
- Führ82 Führung H., Modell zur nichtlinearen Rißfortschrittsvorhersage unter Berücksichtigung von Lastreihenfolgeeffekten (LOSEQ), Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF) Darmstadt, Bericht Nr. F-162 (1982)
- Führ84 Führung H., Seeger T., Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading, In: Subcritical Crack Growth Due to Fatigue Stress Corrosion and Creep, Edited by L. H. Larson, Elsevier Applied Science Publishers, London (1984), 109-133
- Gerl74 Engel L., Klingele H., Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden, Gerling Institut für Schadenforschung und Schadenverhütung, Köln (1974)
- Grif21 Griffith A.A., The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions, Proceedings of the Royal Society A 221 (1921), 163
- Gudl86 Choe J.S., Gudladt H.-J., Gerold V., Vergleich des ein- und vielkristallinen Ermüdungsverhaltens einer unteralterten Cu-Co-Legierung, Zeitschrift für Metallkunde, Band 77 (1986), 739-745
- Hahn65 Hahn G.T., Rosenfield A.R., Acta met 13 (1965), 293
- Haib70 Haibach E., Modifizierte Schadensakkumulationshypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit

- fortschreitender Schädigung, Techn. Mitteilung Nr. TM 50/70, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt (1970)
- Haib89 Haibach E., Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI-Verlag (1989)
- Heck83 Heckel K., Einführung in die Anwendung der Bruchmechanik, Carl Hanser Verlag München (1983)
- Hill75 Hillberry B.M., Alzos W.X., Skat A.C., The Fatigue Crack Propagation Delay Behavior in 2024-T3 Aluminium Alloy Due to Single Overload/Underload Sequences, AFFDL-TR-75-96, Air Force Flight Dynamics Lab. (1976)
- Huds63 Hudson C.M., Hardrath H.F., Investigation of the Effects of Variable Amplitude Loadings on Fatigue Crack Propagation Pattern, NASA-TN-D-1803 (1963)
- Irwi57 Irwin G.R., Analysis of Stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, 24 (1957), 361-364
- Jaco76 Jacoby G.H., Nowack H., van Lipzig H.T.M., Experimental Results and a Hypothesis for Fatigue Crack Propagation Under Variable-Amplitude Loading, In: ASTM STP 595 (1976), 172-183
- Joh65 Johnson H. H., Calibrating the Electric Potential Method for studying slow Crack Growth, Materials Research and Standards, Vol. 5 No. 9 (1965), 442-445
- Köge04 Kögel G., Egger W., Rödling S., Gudladt H.-J., Investigation of Fatigue Cracks in an Al-Based Alloy by Means of Pulsed Positron (Micro-)Beams, Materials Science Forum Volumes 445-446 (2004), 126-128
- KrRe99 Krause-Rehberg R., Leipner H.S., Positron Annihilation in

- Semiconductors: Defect studies, Springer, Berlin (1999)
- Krüg96 Krüger A.E.F., Bedeutung des Spannungsgradienten für den statistischen Größeneinfluß bei Schwingbeanspruchung, Dissertation, Universität der Bundeswehr München (1996)
- Kunz79 Kunz L., Knesl Z., Lukas P., Macroscopic Residual Stress Distribution at a Fatigue Crack Tip, Fatigue of Engineering Materials and Structures 2 (1979), 279-287
- Lang96 Lang M., Quantitative Untersuchung Reihenfolgeeffekten auf Ermüdungsrißfortschritt, Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe (1996)
- Lank81 Lankford J., Davidson D.L., The effect of overloads upon fatigue crack tip opening displacement and crack tip opening/closing loads in aluminium alloys, In: Advances in Fracture Research Volume 2, Pergamon Press, Oxford (1981)
- Li92 Li Y., Lebrun J. L., Ji N., Chen C. Q., Distribution of Residual Stress and Plastic Strain at a Crack Tip of an Aluminium Alloy - Influence of an Overload on the Fatigue Crack Retardation, In: Proceedings of the 3rd International Conference on Residual Stresses ICRS3, Tokushima (1991), Eds.: H. Fujiwara, T. Abe and K Tanaka, Elsevier, London-UK (1992), 537-542
- Liu93 Liu J., Zenner H., Berechnung der Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung - Teil 2 und 3, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 24 (1993), 296-303 und 339-347
- Liu95 Liu J., Zenner H., Berechnung von Bauteilwöhlerlinien unter

- Berücksichtigung der statistischen und spannungsmechanischen Stützziffer, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 26 (1995), 14-21
- Mats80 Matsuoka S., Tanaka K., The influence of sheet thickness on delayed retardation phenomena in fatigue crack growth in HT80 steel and A5083 aluminium alloy, Engineering Fracture Mechanics 13 (1980), 293-306
- Mill76 Mills W.J., Hertzberg R.W., Load Interaction Effects on Fatigue Crack Propagation in 2024-T3 Aluminium Alloy, Engineering Fracture Mechanics 8 (1976), 657-667
- Mine45 Miner M.A., Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics Volume 12 (1945), 159-164
- PaEr60 Paris P. C., Erdogan F. J., A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering 85 (1960), 528-534
- Palm24 Palmgren A., Die Lebensdauer von Kugellagern, VDI-Zeitschrift 68 (1924), 339-341
- Rada95 Radaj D., Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau, Springer Verlag (1995)
- Robi82 Robin C., Chehimi C., Pluvinege G., Influence of Overloads on the subsequent crack growth of a fatigue crack in a E36 steel, In: International Conference on Strength of Materials ICSMA6 (1982), 919-925
- Roed03 Rödling S., Einfluß von Überlasten auf das Rißausbreitungsverhalten von Aluminiumlegierungen aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt, Dissertation, Universität der Bundeswehr München (2003)
- SäGö93 Sähn S., Göldner H., Bruch- und Beurteilungskriterien in der Festigkeitslehre, Fachbuchverlag Leipzig, Köln (1993),

- 24-91, 257
- Schi62 Schijve J., Broek D., Crack-propagation-tests based on a Gust Spectrum with Variable Amplitude Loading, Aircraft Engineering 34 (1962), 314-316
- Schi88 Schijve J., Fatigue Crack Closure: Observations and technical significance, ASTM STP 982 (1988), 319-341
- Schw80 Schwalbe K.-H., Bruchmechanik metallischer Werkstoffe, Carl Hanser Verlag (1980)
- Sdn99 Sadananda K., Vasudevan A. K., Holtz R. L., Lee E. U., Analysis of Overload Effects and related Phenomena, International Journal of Fatigue 21 (1999), 233-246
- Sned46 Sneddon I.N., The Distribution of Stress in the Neighbourhood of a Crack in an Elastic Solid, Proceedings of the Royal Society A 187, London (1946), 220-260
- Step76 Stephens R. I., Chen D. K., Hom B. W., Fatigue Crack Growth with Negative Stress Ratio Following Single Overloads in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys, In: ASTM STP 595 (1976), 27-40
- Sure98 Suresh S., Fatigue of Materials, Second Edition, Cambridge University Press (1998)
- Treb73 Trebules V. W., Roberts R., Hertzberg R. W., Effect of Multiple Overloads on Fatigue Crack Propagation in 2024-T3 Aluminium Alloy, ASTM STP 536 (1973), 115-146
- Tref95 Trefzer T., Einrichtung einer servohydraulischen Prüfmaschine für Rißausbreitungsexperimente, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München (1995)
- Volp99 Volpp T., Einfluß der Atmosphäre auf das Rißausbreitungsverhalten partikelverstärkter Aluminium-

- legierungen für den Einsatz in Luft- und Raumfahrt, Dissertation, Universität der Bundeswehr München (1999)
- Wels83 Welsch E., Scholtes B., Eifler D., Macherauch E., Überlastbedingte Eigenspannungsverteilungen in rissspitzennahen Werkstoffbereichen und deren Einfluss auf die Ausbreitung von Ermüdungsrissen, In: Macherauch E., Hauk V., Eigenspannungen Entstehung – Messung – Bewertung 2, DGM Oberursel (1983), 219-234
- West39 Westergaard H.M., Bearing pressures and cracks, Journal of Applied Mechanics 6 (1939), 49-53
- Whee72 Wheeler O. E., Spectrum Loading and Crack Growth, Journal of Basic Engineering 94 (1972), 181-186
- Will57 Williams M.C., On the Stress Distribution at the Base of a stationary Crack, Journal of Applied Mechanics 24 (1957), 109
- Will71 Willenborg J. D., Engle R. M., Wood H. A., A Crack Growth Retardation Model using an Effective Stress Concept, AFFDL-TM-FBR-71-1, Air Force Flight Dynamics Lab. (1971)
- Wöh870 Wöhler A., Über die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl, Zeitschrift für Bauwesen, Band XX (1870), 73-106
- Yish95 Yisheng A., Schijve J., Fatigue crack closure measurement on 2024-T3 specimens, Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures 18 (1995), 917-921
- Zenn95 Gudehus H., Zenner H., Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, 3. Auflage, Verlag Stahleisen (1995)
- Zuid91 Zuidema J., Shen W.Y., Janssen M., Retardation in Fatigue Crack Growth in Al-2024 after Blocks of Underloading, Fatigue Fracture Engineering in Material Structures 14

(1991), 991-1005