
Schallemissionsuntersuchungen
an
Metallmatrix-Verbundwerkstoffen

Diplomarbeit

von

Cornelia Schurr

aus Ditzingen

April 2003

*durchgeführt am
Institut für Metallkunde
der Universität Stuttgart
unter Anleitung von
Dr. Alexander Wanner*

Meinen Eltern

*Gutta cavat lapidem
non vi sed saepe cadendo*

NACH OVID

Danksagung

Viele Menschen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ihnen möchte ich meinen aufrichtigsten Dank ausdrücken:

- Prof. Dr. Arzt möchte ich dafür danken, dass er mir die Gelegenheit gegeben hat, diese Arbeit an seinem Institut durchzuführen. Ebenso gebührt Prof. Dr. Aldinger mein Dank dafür, dass er den Mitbericht übernommen hat.
- Dr. Alexander Wanner hat mich nicht nur während der Zeit der Diplomarbeit betreut. Auch während meinem Auslandsaufenthalt in Lausanne, aus dem schließlich diese Arbeit erwuchs, stand er mir stets bei Fragen und Problemen zur Seite.
- Dagmar Saxa stand mir in meinen Bemühungen zur Seite, den in Lausanne entwickelten Versuchsaufbau auf die Stuttgarter Gegebenheiten zu übertragen. Natascha Tomic half mir bei der metallographischen Präparation und bei den Untersuchungen am Lichtmikroskop.
- Ludger Weber, Andreas Rossoll und Benedikt Moser waren meine Ansprechpartner während des Aufenthaltes an der EPFL. In unzähligen Diskussionen halfen sie mir ein Verständnis für das Material und Batdorfs Model zu entwickeln. Aber auch über die fachliche Seite hinaus haben sie viel für mich getan und mir mit vielen Unternehmungen über die Einsamkeit in einer fremden Stadt hinweg geholfen.
- Prof. Dr. Andreas Mortensen möchte ich dafür danken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, vier Monate an seinem Institut zu experimentieren, und dafür, dass er stets Anregungen und Verbesserungsvorschläge hatte.
- Monique und Gérald Cavin waren mehr als nur meine Vermieter in Lausanne. Sie nahmen mich auf das Freundlichste in ihr Haus und in ihre Familie auf. Merci beaucoup.

-
- Ich möchte meinen vier Mitinsassen des „Diplomandenzimmers“ für manche vergnügliche Stunde danken und für so manchen Ratschlag, wenn mal wieder etwas schiefgegangen war. Wir waren ein gutes Team.
 - Ein ganz besonderer Dank gilt Stephan Otto. Er führte mich in die Bedienung von L^AT_EX ein und las die Arbeit Korrektur. Noch wichtiger war aber, dass er mich immer wieder zu kleinen Pausen zwang und dass er meine Launigkeit, ohne zu murren ertrug, als die Nerven in der Schlussphase blank lagen.
 - Zuletzt möchte ich mich aus tiefstem Herzen bei meinen Eltern bedanken. Sie waren in den schlechten Zeiten für mich da und haben sich mit mir an den guten Zeiten gefreut. Von klein auf haben sie mich darin gefördert, den Dingen auf den Grund zu gehen. Ohne sie wäre nicht nur diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	5
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	9
Kurzfassung	13
Problemstellung	15
1 Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht	17
1.1 Metallmatrix-Verbundwerkstoffe	17
1.2 Al ₂ O ₃ -faserverstärkte Aluminiumdrähte	18
1.2.1 Fasereigenschaften	18
1.2.2 Matriceigenschaften	20
1.2.3 Compositeigenschaften	20
1.3 Schallemissionsanalyse	22
1.3.1 Mechanismen	23
1.3.2 Vorteile des Schallemissionsanalyse	24
1.3.3 Grenzen der Schallemissionsanalyse	24
1.3.4 Lokalisierungsalgorithmus	25
1.4 Theoretische Modelle	26
1.4.1 Shear-Lag-Theorie	27
1.4.2 Batdorfs Modell	28
2 Experimentelle Methoden	35
2.1 Untersuchte Materialien	35
2.2 Metallographie	36
2.3 Dichtemessung	36
2.4 Zugversuche	37
2.4.1 Zugversuchsaapparatur	37

2.4.2	Schallemissionsapparatur	38
2.4.3	Kalibrierung der Ortsbestimmung	39
2.5	Datenverarbeitung	40
2.5.1	Probenauswahl	40
2.5.2	Filterung der Daten	41
2.5.3	Bestimmung der ersten Amplitude einer Wellenform	41
2.5.4	Zufällige Verschiebung bei Lokalisierung	41
2.6	Sensorankopplung	43
2.6.1	Getestete Ankopplungen	43
2.6.2	Untersuchung mittels Wellengenerator	44
3	Ergebnisse	47
3.1	Dichte und Fasergehalt	47
3.2	Metallographie	48
3.3	Zugversuche	51
3.4	Sensorankopplung	53
4	Diskussion	55
4.1	Gesamtverlauf der Schädigung	55
4.1.1	Verlauf der Ereignisrate gegenüber der Spannung	57
4.1.2	Vergleich mit Batdorf	60
4.1.3	Bruchspannung in Experiment und Theorie	62
4.2	Räumliche Verteilung der Ereignisse	63
4.2.1	Keine Häufung von Ereignissen	64
4.2.2	Häufung von Ereignissen	66
4.2.3	Rein-Aluminium-Matrix	70
4.2.4	Energiegehalt der Bruchstelle	72
4.3	Sensorankopplung	76
	Zusammenfassung	77
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	83
	Literaturverzeichnis	85
	Anhänge:	
A	Ergebnisse	89
B	Einstellungen der Schallemissionsapparatur	93
C	Datenverarbeitung	95
D	Quellcode des Auswerteprogramms	101
	Erklärung	109

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

$\square_{\parallel}$	Größe in Faserrichtung
$\square_{\perp}$	Größe quer zur Faserrichtung
$\square_f$	eine auf die Fasern bezogene Größe
$\square_k$	eine auf den Komposit bezogene Größe
$\square_m$	eine auf die Matrix bezogene Größe
$A_{lin}(i)$	Amplitude des laufenden Datenpunktes in einer Wellenform
A	Maximalamplitude eines Treffers in dB
A_{lin}	Maximalamplitude eines Treffers in mV
a	Amplitude der ersten Halbschwingung in dB
a_{lin}	Amplitude der ersten Halbschwingung in mV
α	thermischer Ausdehnungskoeffizient
CFK	Kohlefaser-verstärkter Kunststoff
d	Durchmesser
d_{Korn}	Korndurchmesser
δ	Shear-Lag-Länge
E	Energie eines Treffers
$E_1(\sigma)$	Energie des ersten Treffers eines Ereignisses
$E_2(\sigma)$	Energie des zweiten Treffers eines Ereignisses
F	Querschnittsfläche
f_f	Faseranteil
f_{lok}	Bruchteil der lokalisierbaren Treffer an allen Treffer
$f(x)$	Anteil der Ereignisse, der bei der Ortskoodinate x lokalisiert wurde

GFK	Glasfaser-verstärkter Kunststoff
GLS	Global Load Sharing
hp-Al	Aluminium mit einer Reinheit von 99,99%
i	Anzahl gebrochener Fasern in einem Cluster
i	laufende Nummer des Datenpunktes in einer Wellenform
L_0	Bezugslänge der Weibull-Parameter σ_0 und m
L	Faserlänge
l_{Klasse}	Klassenbreite in einem Histogramm
LLS	Local Load Sharing
λ_i	modifizierte Shear-lag-Länge um einen Faserbruch
m	Weibull-Modul
m_{Luft}	Masse der Probe an Luft (für die Dichtemessung)
m_{Wasser}	Masse der Probe in Wasser (für die Dichtemessung)
MMC	Metallmatrix-Verbundwerkstoff
N_f	Anzahl der Fasern in der Probe
n_{lok}	Anzahl lokalisierter Ereignisse
n_i	Anzahl nächster Nachbarn um eine Ansammlung von i Faserbrüchen
$N_{Treffer}$	Gesamtzahl aller registrierter Treffer
n_{wert}	Anzahl verwerteter Ereignisse
P_{Bruch}	Anzahl der Proben, die in der Messlänge gebrochen sind
$P_{i \rightarrow i+1}$	Wahrscheinlichkeit, dass das i -plet zum $i+1$ -plet wird
$P_{Weibull}$	Bruchwahrscheinlichkeit nach Weibull
P_{wert}	Anzahl der ausgewerteten Proben
Q_i	Anzahl der Cluster mit der Größe i
r	Radius
R	Ereignisrate
$R_{Treffer}$	Trefferrate
ρ	Dichte
ρ_{el}	elektrischer Widerstand
ρ_{Luft}	Dichte von Luft (für die Dichtemessung)
ρ_{Wasser}	Dichte von dest. Wasser (für die Dichtemessung)
s_i	Spannungskonzentration in den Nachbarn Clusters der Größe i
σ	mechanische Spannung
σ_0	Weibull-Parameter der Spannung
σ_{Bruch}	Bruchspannung
t	Zeit
t_i	Ankunftszeit eines Treffers am Sensor i
Δt	Unterschied der Ankunftszeiten an den beiden Sensoren für ein Ereignis
t_{lok}	maximale Zeitdifferenz zwischen erstem und zweitem Treffer eines Ereignisses

T_{melt}	Schmelztemperatur
$\tau_{m,y}$	Scherfließspannung der Matrix
v	Schallgeschwindigkeit
V	Probenvolumen
V_0	Bezugsvolumen der Weibull-Parameter
x	Ortskoordinate entlang der Probe
x_i	Ortskoordinate des Sensors i ($x_1 = 0$)
Δx	Unsicherheit der Ortsbestimmung
x_{Bruch}	makroskopische Bruchstelle
x_{Probe}	Gesamtlänge der Probe
x_{sens}	Sensorabstand
z	Zufallszahl zwischen 0 und 1

Kurzfassung

Es wurden Zugversuche an unidirektional mit Al_2O_3 -Fasern verstärkten Metallmatrix-Verbundwerkstoffen durchgeführt. Als Matrixmaterial wurde technisch reines Aluminium und eine Aluminium-Kupfer-Legierung, die verschiedenen Wärmebehandlungen unterworfen wurde, untersucht. Der Werkstoff wurde von der Firma 3M hergestellt. Er lag in Form von Drähten vor.

Die Versuche wurden von Schallemissionsmessungen begleitet. Bis zu einer gewissen Schwellspannung finden praktisch keine Schallemissionsereignisse statt. Danach wächst die Ereignisrate mit zunehmender Spannung stark an. Die räumliche Entwicklung der Schädigung zeigt, dass die meisten Ereignisse auf isolierte Faserbrüche zurückgehen. Bei den AlCu-Matrix-Drähten im lösungsgeglühten sowie im lösungsgeglühten und ausgelagerten Zustand findet sich eine deutliche Häufung von Ereignissen in der Umgebung der Bruchstelle kurz vor dem Bruch der Probe. Die AlCu-Drähte im Gußzustand zeigen keine Häufung. Bei den dickeren der beiden Al-Matrix-Drähten findet sich von Beginn an ein breiter Bereich mit erhöhter Aktivität. Die Bruchstelle liegt in diesem Bereich. Bei den dünnen Al-Matrix-Drähte brach keine Probe innerhalb der Messlänge, so dass hier keine Aussage gemacht werden kann. Anzeichen für Schallereignisse durch Matrixplastizität wurden nicht gefunden.

Die Ergebnisse wurden mit einem theoretischen Modell für das Bruchverhalten unidirektionaler Endlosfaserverbunde verglichen. Dieses Modell greift auf die Weibull-Parameter der Fasern sowie die Fließspannung der Matrix zurück. Bei einem der beiden Al-Matrix-Drähte sowie bei den AlCu-Matrix-Drähten fand sich eine sehr gute Übereinstimmung der Experimente mit der Theorie für hohe Spannungen. Bei mittleren Spannungen dagegen zeigten die Schallemissionsmessungen Ereignisraten, die sich nicht mit den in der Literatur allgemein akzeptierten Weibull-

Parametern der Faser erklären lassen. Der dickere Al-Draht zeigte über den ganzen Spannungsbereich einen von den Literaturwerten abweichende Weibull-Modul. Wie die metallographischen Untersuchungen zeigten, wurden hier andere Fasern verwendet. Bei allen untersuchten Materialien lag die experimentell bestimmte Bruchspannung deutlich unter der theoretischen. Die möglichen Ursachen für die Abweichungen werden diskutiert.

Als Vorstudie für weiterführende Hochtemperatur-Versuche wurden außerdem die Möglichkeiten untersucht, die Sensoren für die Schallemissionsanalyse über einen Wellenleiter an die Probe anzukoppeln. Die Signalverluste waren sehr hoch, so dass diese Art der Ankopplung für die Schallemissionsanalyse ungeeignet erscheint.

Einleitung

Kaum eine Werkstoffklasse hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten so für Furore gesorgt wie die Verbundwerkstoffe. Während die Kunststoffmatrix-Komposite heute weite Verbreitung finden, ist dies bei Metallmatrix-Verbunden (Metal Matrix Composite: MMC) noch immer nicht der Fall. Das hat vor allem zwei Gründe. Zum einen sind diese Werkstoffe durch ihre meist aufwendige Herstellung teurer als vergleichbare monolithische Materialien. Zum anderen ist ihr Verhalten unter Belastung bis jetzt nur in Ansätzen verstanden.

Bevor ein Werkstoff in der Praxis Verwendung finden kann, müssen seine Eigenschaften genau bekannt sein, um zum einen ein möglicherweise katastrophales Versagen zu vermeiden, zum anderen um eine sinnvolle Werkstoffwahl überhaupt erst zu ermöglichen. Bei der Vielzahl der verschiedenen Verbundwerkstoffe ist es unmöglich, alle Kombinationen vorher ausreichend zu testen. Aus diesem Grund ist es nötig, theoretische Modelle zu finden, die das Verhalten eines Werkstoffes vorher sagen können, und diese Modelle auch experimentell zu bestätigen.

Unter all den verschiedenen Arten von Verbundwerkstoffen sind momentan die unidirektionalen endlosfaserverstärkten Komposite am besten theoretisch erfasst, da sie am leichtesten zu modellieren sind. Ein solcher Werkstoff wurde in der vorliegenden Diplomarbeit mittels der Schallemissionsanalyse untersucht, und die gewonnenen Erkenntnisse mit der Theorie verglichen.

Die Schallemissionsanalyse bietet dabei die Möglichkeit, den kompletten Schädigungsverlauf zu erfassen und bereits geringste Schädigungen zu detektieren. Sie erlaubt eine zeitliche und räumliche Auflösung der einzelnen Faserbrüche und gibt damit einen genauen Einblick in das Material während der Belastung. Beim Bruch von Fasern entstehende Schallemission wird schon lange benutzt, um Einblicke in

Werkstoffe unter Belastung zu gewinnen, allerdings meist nur bei Raumtemperatur, da die verwendeten Sensoren Experimente bei erhöhten Temperaturen nicht zulassen. Genau diese erhöhten Temperaturen sind aber zur Charakterisierung des Kriechverhaltens eines Materials unerlässlich. Ein zweiter Teil dieser Diplomarbeit beschäftigt sich deshalb mit der Suche nach neuen Ankopplungsmethoden für die Sensoren, die es erlauben, die Sensoren aus dem geheizten Bereich zu entfernen.

KAPITEL 1

Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht zum Stand der Forschung zur Schallemissionsanalyse an Metallmatrix-Verbundwerkstoffen präsentiert. Zuerst wird das Material selbst vorgestellt, seine wichtigsten Eigenschaften und eine mögliche Anwendung. Danach wird ein kurzer Überblick über die Schallemissionsanalyse an Verbundwerkstoffen gegeben bevor zum Schluss ein Modell präsentiert wird, das die Schädigung des untersuchten Materials theoretisch beschreibt.

1.1 Metallmatrix-Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe sind wohl die vielseitigste Werkstoffklasse. Man unterscheidet sie zum einen nach Art und Orientierungsverteilung der Verstärkung, zum anderen nach dem Material der Matrix. Als verstärkende Phase werden sowohl mehr oder weniger kugelförmige Teilchen als auch Fasern eingesetzt. Bei den Fasern unterscheidet man wiederum Kurzfasern, Langfasern und Endlosfasern, die das ganze Werkstück durchziehen. Partikelverstärkte Komposite zeigen meist isotropes Verhalten. Auch bei Kurz- und Langfasern kann durch eine statistische Verteilung der Fasern eine isotrope Verstärkung erreicht werden. Bei Endlosfasern ist eine isotrope Verstärkung zwar möglich, doch vergleichsweise schwierig. Diese Fasern ermöglichen eine optimale Kraftübertragung. Die höchsten Festigkeiten werden mit unidirektionalen Endlosfaserverbunden erzielt, bei denen alle Fasern parallel liegen. Hier ist jedoch auch die Anisotropie am größten.

Meisten jedoch werden Verbundwerkstoffe nach dem Material der Matrix klassifiziert. Kunststoffmatrix-Verbundwerkstoffe sind mittlerweile im allgemeinen Gebrauch. Besonders häufig werden glasfaser- und kohlefaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt (GFK bzw. CFK). Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (Metal Matrix Composites: MMCs) dagegen finden bis jetzt – trotz teilweise exzellenter Eigenschaften – kaum Anwendung. Dafür gibt es mehrere Gründe. Zum einen sind die für MMCs verwendeten Keramikfasern sehr teuer. Auch die Herstellung ist problematisch. Bei den hohen Temperaturen, die zum Schmelzen der Matrix benötigt werden, reagieren viele Fasern mit der Luft oder der Matrix. Um dieses Problem zu umgehen muss unter Schutzgas gearbeitet werden oder spezielle Beschichtungen sog. Coatings auf die Faser aufgebracht werden. Beides verteuert die Herstellung extrem.

1.2 Al_2O_3 -faserverstärkte Aluminiumdrähte

Ein Material, das in den nächsten Jahren breite Anwendung finden könnte, sind Al_2O_3 -faserverstärkte Aluminiumdrähte. Die Herstellung ist relativ einfach, da Al_2O_3 selbst bei hohen Temperaturen gegenüber Sauerstoff und auch Aluminium stabil ist. Es sind deshalb weder eine Schutzgasatmosphäre noch teure Fasercoatings nötig. Die mechanischen Eigenschaften von Al_2O_3 -Fasern wurden in den letzten Jahren stark verbessert [1].

Als Matrixmaterial wurden die verschiedensten Aluminiumlegierungen getestet [2]. Bei allen zeigte sich, dass die Haftung an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix sehr gut war, wenn sie nicht durch besondere Coatings absichtlich herabgesetzt wurde. Eine schwächere Grenzfläche ermöglicht es, dass gebrochene Fasern aus der Matrix herausgezogen werden (sog. „Pullout“) und damit weitere Energie verbrauchen. Auf diese Weise kann die Bruchzähigkeit von Verbundwerkstoffen erhöht werden. Gleichzeitig führt eine schwächere Grenzfläche aber zu einer starken Verschlechterung der Festigkeit quer zur Faserrichtung. Eine zweite Möglichkeit, die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes zu verbessern, wurde darin gesehen, eine ausscheidungshärtbare Matrix zu verwenden. Bei allen Versuchen mit technischen Al-Legierungen kam es dabei aber zu einer deutlichen Verschlechterung der Festigkeit. Nur wenn es gelingt, die Grenzflächen frei von Ausscheidungen zu halten, kann auch eine Al-Legierung zu ähnlich guten Ergebnissen wie reines Aluminium führen [2].

1.2.1 Fasereigenschaften

Al_2O_3 -Fasern verschiedener Zusammensetzung werden heutzutage von mehreren Herstellern produziert. Dabei unterscheidet man zwischen Monofilament- und Multifilament-Fasern. Monofilament-Fasern haben einen relativ großen Durchmesser. Sie

werden einzeln verarbeitet. Multifilament-Fasern dagegen bestehen aus Strängen mit mehreren hundert Fasern. Jede einzelne Faser hat dabei einen Durchmesser von nur wenigen μm . Bezogen auf das Gewicht kosten sie nur etwa ein Fünfzehntel von Monofilamenten.

In dieser Arbeit wurde allein die von 3M hergestellte Nextel™ 610-Fasern verwendet. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über Zusammensetzung und Eigenschaften.

Tabelle 1.1: Eigenschaften der Nextel™ 610-Fasern [3]

Zusammensetzung		$> 99\% \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
Schmelzpunkt	$T_{f,melt}$	2273 K
Durchmesser	r_f	$5 - 6 \mu\text{m}$
Korngröße	$d_{f,Korn}$	$< 500 \text{ nm}$
Dichte	ρ_f	$3,9 \text{ g/cm}^3$
Bruchfestigkeit	$\sigma_{f,Bruch}$	3100 MPa
E-Modul	E_f	380 GPa
thermischer Ausdehnungskoeffizient	α_f	$8,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Es handelt sich hierbei um Multifilamente, die durch einen Sol-Gel-Prozess hergestellt werden. Dabei wird Eisenoxid als Hilfsmittel für die Keimbildung zugegeben. Es ergibt sich dadurch ein sehr feines Gefüge. Die entstehenden Fasern enthalten noch eine gewisse Restporosität, so dass die theoretische Dichte nicht ganz erreicht wird.

Die Festigkeit dieser Fasern gehorcht näherungsweise einer Weibull-Verteilung [5]. Wilson bestimmte den Weibull-Modul auf drei verschiedene Weisen. In der klassischen Weibull-Auftragung ergab sich ein Modul von $m = 11,2$. Diese Modul wird auch in anderen Veröffentlichungen angenommen. Da die Festigkeit eines Materials, das einer Weibull-Verteilung gehorcht, vom untersuchten Volumen abhängt, kann der Modul auch über eine Variation des Faserdurchmessers oder der Faserlänge bestimmt werden. Bei der Bestimmung über den Faserdurchmesser fand Wilson einen Modul von nur $m = 3$ bis 5. Wurde die Faserlänge variiert, ergab sich ein Modul von $m = 22$. In rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von gebrochenen Fasern wurden Schweißnähte als bruchauslösende Defekte identifiziert [6]. Diese Schweißnähte entstehen, wenn Fasern beim Sintern in zu engem Kontakt sind. Solche Schweißnähte sind von Faser zu Faser unterschiedlich stark ausgebildet und können auch ganz fehlen. Entlang einer Faser bleiben sie allerdings über weite Strecken gleich. Diese Unterschiede in der Defektverteilung macht Wilson für die verschiedenen gemessenen Weibull-Moduli verantwortlich.

Der E-Modul der Faser nimmt mit zunehmender Dehnung linear ab. Bei einer Dehnung von 0,5% beträgt diese Abnahme ca. 13 GPa [4]. Die Änderung des E-Moduls der Faser ist vollkommen reversibel.

1.2.2 Matriceigenschaften

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Matrixlegierungen verwendet. Zum einen wurde 99,99% reines Aluminium untersucht. Zum anderen wurde eine Al-2%-Cu-Legierung verwendet, um den Einfluss der Wärmebehandlung bei einer ausscheidungshärtbaren Legierung zu untersuchen. Dabei konnte an die Arbeit von Moser [7] angeknüpft werden. Tabelle 1.2 gibt die von ihm gemessenen Scherfließspannungen.

Tabelle 1.2: Scherfließspannungen der verschiedenen Matrix-Materialien [7]

Matrix-Material	Fließspannung $\tau_{m,y}$
Al Gußzustand	45 MPa
Al 2%Cu Gußzustand	80 MPa
Al 2%Cu lösungsgeglüht	98 MPa
Al 2%Cu gealtert	105 MPa

1.2.3 Kompositeigenschaften

Die Drähte werden von 3M über einen kontinuierlichen Prozess hergestellt. Dabei wird das Faserbündel durch die Aluminiumschmelze gezogen. Um einen runden Draht zu erhalten, muss das Faserbündel unter Umständen gefaltet werden. Die Infiltration wird durch den Einsatz von Ultraschall erleichtert, da sonst die Faserbündel nicht vollständig benetzt werden [8, 7]. Diese Art der Herstellung ist kostengünstig und technologisch vergleichbar einfach.

Gedacht sind solche Drähte für den Einsatz in Hochspannungsleitungen. Bis jetzt bestehen solche Leitungen aus einem Kern von Stahldrähten, die für die mechanische Festigkeit sorgen, und einem Kranz von Aluminiumdrähten als elektrische Leiter. In Zukunft könnten die Stahldrähte durch Al_2O_3 -faserverstärkte Aluminiumdrähte ersetzt werden. Das hat mehrere Vorteile. Die Kompositdrähte wiegen bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften weniger als halb so viel wie die Stahldrähte. Sie besitzen einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten, was zusammen mit dem geringeren elektrischen Widerstand zu einer starken Verringerung des wärmebedingten Durchhängens der Kabel führt. Wird der Durchhang eines Hochspannungskabels verringert, so kann auf schon bestehenden Trassen sein Durchmesser und damit die maximale Strommenge erhöht werden. Auf neu zu bauenden Trassen können die Masten in größeren Abständen gesetzt werden, was zu einer enormen Kostenersparnis führt, da das Errichten der Masten den größten Anteil an den Kosten beim Errichten einer neuen Trasse hat. Die Kostenersparnis ist so groß, dass sie den deutlich höheren Preis der Verbunddrähte gegenüber den herkömmlichen Stahldrähten rechtfertigen würde. Sollte es tatsächlich zu einem flächende-

ckenden Einsatz der Verbunddrähte in Hochspannungsleitungen kommen, so würde Al₂O₃-faserverstärkte Aluminiumdrähte zum meist verwendeten Metallmatrixverbund überhaupt werden [9].

Es gab in der Vergangenheit mehrere Untersuchungen zu mit Nextel™ 610 verstärkten Aluminiumdrähten. In Tabelle 1.3 sind die wichtigsten Ergebnisse zu den Drähten mit Al-Matrix zusammengefasst. Die Werte variieren, da verschiedene Fasergehalte untersucht wurden.

Tabelle 1.3: Übersicht über die in der Literatur berichteten Eigenschaften für Al-Al₂O₃-Verbundwerkstoffe

E-Modul	$E_{\parallel}$	220 bis 260 GPa	†
	$E_{\perp}$	120 bis 140 GPa	†
Bruchfestigkeit	$\sigma_{Bruch, \parallel}$	1,5 bis 1,9 GPa	†
Dichte	ρ	3,2 g/cm ³	‡
el. Widerstand	$\rho_{el, \parallel}$	0,066 $\mu\Omega \cdot m$	‡
	$\rho_{el, \perp}$	0,6 $\mu\Omega \cdot m$	‡
therm. Ausdehnungskoeff.	$\alpha_{\parallel}$	$5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	‡
	$\alpha_{\perp}$	$12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	‡

† reine Al-Matrix mit 55 bis 65% Al₂O₃ [1]

‡ reine Al-Matrix mit 60 % Al₂O₃ [1]

Um die Eigenschaften quer zur Faserrichtung zu verbessern, wurde mit verschiedenen gußfähigen Al-Legierungen experimentiert, insbesondere mit der 6061-Legierung [10, 2, 11]. Dabei zeigte sich aber, dass alle kommerziellen Legierungen zu starken Verschlechterungen der Eigenschaften in Faserrichtung führen [2]. Einzig mit einer Matrix aus Al-Zn6-Mg1-Ag1 [2] und einer Matrix aus Al-2%Cu [1] konnten vergleichbare Festigkeitswerte erreicht werden wie bei der Verwendung von technisch reinem Aluminium.

Pacheco et al. haben das Bruchverhalten von endlosfaserverstärkten Aluminium-Al₂O₃-Verbundwerkstoffen untersucht [11]. Sie verglichen ein Material mit hp-Al-Matrix mit einem mit Al6061-Matrix. Als Verstärkung wurden Nextel™ 610 und 440-Fasern¹ verwendet. Die Bruchflächen waren relativ glatt mit einer Anzahl verschiedener Plateaus. Das selbe Bruchbild wird auch von Deve und McCullough [1] gefunden. Diese flache Bruchfläche deutet auf ein schnelles Fortschreiten des bruchauslösenden Defektes hin. In einzelnen Fällen wurde ein kleines Bündel an Fasern gemeinsam ein Stück weit aus der Matrix herausgezogen (Bündel-Pullout). Ein Herausziehen

¹ Nextel™ 440 ist eine Faser, die aus γ -Al₂O₃, Mullit und amorphem SiO₂ besteht. Sie hat einen E-Modul von 190 GPa und ist damit nur etwa halb so steif wie Nextel™ 610. Der Durchmesser ist bei beiden Fasern gleich.

einzelner Fasern konnten sie nicht feststellen. Das deutet auf eine gute Haftung zwischen Faser und Matrix hin. Beim 610/hp-Al-Werkstoff kam es an einigen Stellen zu einem Ablösen der Matrix von den Fasern („debonding“). In allen Fällen kam es zu starken plastischen Verformungen in der Matrix. Verbunden mit der Untersuchung der Bruchflächen wurde auch eine Schallemissionsanalyse durchgeführt. Dabei wurden zwei Arten von Schallereignissen gefunden: solche mit niedriger Amplitude, die Pacheco auf Matrixplastizität zurückführt, und solche mit hoher Amplitude, die er Faserbrüchen zuschreibt.

1.3 Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse beruht auf der Messung von im Werkstoff erzeugten Schallwellen. Sie unterscheidet sich damit von der Ultraschallanalyse, die auf außerhalb der Probe erzeugtem Schall beruht. Damit in einer Probe Schall entsteht, muss sie einer Belastung unterworfen werden, z. B. einer mechanischen Spannung. Unter dieser Spannung beginnt sich die Probe zu verformen. Kommt es zu einem lokalen Abbau von Verzerrungsenergie, kann es zu einer mechanischen Welle kommen, die die Probe durchläuft und an der Oberfläche detektiert werden kann. Diese Schallwellen bewegen sich normalerweise im Frequenzbereich zwischen 50 kHz und 2 MHz². Höhere Frequenzen werden größtenteils vom Material absorbiert, niedriger Frequenzen von externen Störquellen überlagert. Um diese Signale aufzuzeichnen haben sich piezoelektrische Sensoren bewährt und werden heutzutage fast ausschließlich eingesetzt.

Schallereignisse können entweder kontinuierlich oder diskret sein. Kontinuierliche Schallemission kann nicht in einzelne Ereignisse aufgelöst werden. Sie zeichnet sich durch eine eher niedrige Amplitude aus. Diskrete Schallemission dagegen besteht aus einzelnen klar definierbaren Ereignissen. Hier ist die Amplitude im Normalfall um einiges höher. Es gibt jedoch nur wenige Mechanismen (z. B. Fließgeräusche von Flüssigkeiten), die wirklich kontinuierlich sind. Die meisten der als kontinuierlich bezeichneten Vorgänge entstehen aus einer Überlagerung vieler schwacher diskreter Vorgänge (z. B. Versetzungsbewegung).

Entsprechend der diskreten oder kontinuierlichen Natur der Ereignisse gibt es auch zwei verschiedene Strategien zur Aufzeichnung derselben. Bei der kontinuierlichen Aufzeichnung wird die Entwicklung einer Größe über den ganzen Zeitraum des Experiments verfolgt. Bei diskreten Ereignissen wird meist ein Schwellwert-Ansatz verfolgt. Nur Ereignisse, die eine gewisse Amplitude, eben den Schwellwert, überschreiten, werden aufgezeichnet. Dabei wird die Länge der Aufzeichnung über die

² Erbebenwellen, die sehr viel niedrigere Frequenzen aufweisen, beruhen auf ähnlichen Mechanismen und werden oft ebenfalls unter den Schallemissionsphänomenen aufgeführt.

„Duration Discrimination Time“ (DDT) festgelegt. Kommt es nach einer Schwellwertüberschreitung innerhalb dieser Zeit zu keiner erneuten Schwellwertüberschreitung, so wird die Aufzeichnung beendet. Der Schwellwert muss deshalb höher als das Niveau des Rauschens liegen.

Man unterscheidet zwei Arten der Schallemissionsanalyse. Bei der parameterbasierten Schallemissionsanalyse werden von jeder ankommenden Welle nur einige Parameter berechnet und aufgezeichnet. Es gibt eine Vielzahl solcher Parameter. Am häufigsten werden wohl Amplitude, Energie und Zeitpunkt der Schwellwertüberschreitung (Ankunftszeit) ausgewertet. Diese Methode hat den Vorteil, dass relativ geringe Datenmengen anfallen, so dass auch bei großer Ereignisdichte kein Datenverlust auftritt. Andererseits tritt durch die Reduktion der Wellenform auf einige wenige Parameter bereits ein großer Verlust an Information ein.

Im Gegensatz dazu wird bei der Wellenform-Analyse die komplette Wellenform aufgezeichnet. Dies führt zu sehr viel größeren Datenmengen, so dass dieses Verfahren sehr viel schneller an die Grenzen der Messtechnik stößt. Dafür enthalten die so gewonnenen Wellenformen prinzipiell alle Informationen. Es gab in der Vergangenheit mehrere Versuche, aus solchen Wellenformen auf das auslösende Ereignis zurückzurechnen, mit wechselnder Genauigkeit und unterschiedlichem Grad an Komplexität.

1.3.1 Mechanismen

Es gibt mehrere Mechanismen die zur Schallemission beitragen können [12]. Hier seien nur die aufgeführt, die vom Material selbst herrühren und nicht auf einen Herstellungsprozess oder das Vorhandensein einer flüssigen oder gasförmigen Phase zurückzuführen sind. Reversible Prozesse, die zu Schallemission führen können, sind z. B. :

- Phasenumwandlungen im Festen sowie Schmelz- und Erstarrungsvorgänge
- Bewegungen der Wände zwischen ferromagnetischen bzw. ferroelektrischen Domänen
- thermoelastische Effekte

Wichtiger sind jedoch irreversible Effekte, die mit einer Schädigung oder bleibenden Veränderung des Materials einhergehen.

- Korrosion
- Ablösung von Oberflächenschichten
- Risswachstum
- plastische Verformung(Versetzungsbewegung)
- Bruch von spröden Zweitphasen wie Ausscheidungen oder Verstärkungsphasen

- Ablösen der Matrix von Zweitphasen (debonding)
- Herausziehen von Zweitphasen aus der Matrix (pullout)

Die Schallemissionsanalyse spricht in der Regel nur auf Veränderungen im Werkstoff an. Bereits bestehende aber inaktive Defekte werden im allgemeinen nicht erkannt.

1.3.2 Vorteile des Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse ermöglicht es, die Entwicklung der Schädigung zu verfolgen, ohne dass dadurch der Schädigungsverlauf beeinflusst wird. Dabei wird stets das gesamte Probenvolumen erfasst. Die Probe wird bei der Schallmessung selbst nicht beschädigt, in diesem Sinne handelt es sich um ein zerstörungsfreies Verfahren.

Werden mehrere Sensoren verwendet, können die Ereignisse lokalisiert werden. Dies ermöglicht es, die räumliche Entwicklung des Schädigungsprozesses nachzuvollziehen.

Die Schallemissionsanalyse detektiert einzelne Ereignisse und nicht den Gesamtzustand der Probe. Damit ist sie besonders bei geringer Schädigung ein sehr empfindliches Verfahren.

1.3.3 Grenzen der Schallemissionsanalyse

Die meisten Verfahren zur Schallemissionsanalyse beruhen darauf, dass nur solche Schallereignisse aufgezeichnet werden, deren Lautstärke einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Versuche an Verbundwerkstoffen haben gezeigt, dass die Anzahl der detektierten Ereignisse exponentiell zunimmt, je weiter man den Schwellwert absenkt [13]. Eine untere Grenze für die Amplitude von Ereignissen scheint es in diesem Fall nicht zu geben. Da aber durch die Umgebung immer ein gewisser Rauschpegel gegeben ist, kann man den Schwellwert nicht beliebig absenken und wird so nie alle Ereignisse messen können. Will man die Ereignisse zusätzlich lokalisieren, so verstärkt sich dieses Problem noch. Dann muss das Signal nicht mehr nur an einem Sensor den Schwellwert überschreiten, sondern an mehreren. Betrachtet man nur die lokalisierten Ereignisse, werden also die Schwächsten systematisch ausgefiltert.

Ein weiteres Problem ist die geringe Aussagekraft der tatsächlichen Wellenform. In einem unendlich ausgedehnten Körper unterscheidet man zwischen Druckwellen und Scherwellen, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. An Oberflächen kann es zu weiteren Wellenarten (Lamb- oder Platten-Wellen) kommen. An jeder Grenzfläche kommt es zu Reflexionen und Modenkonversionen, zusätzlich wird die Wellenform durch Dämpfung und Dispersion beeinflusst. Gerade in Verbundwerkstoffen, die eine große Anzahl innerer Grenzflächen besitzen, wird dadurch die Welle auf ihrem Weg vom auslösenden Defekt zum Sensor stark verändert. Es ist nicht möglich aus der gemessenen Wellenform auf die ursprüngliche Form der

Welle zurückzurechnen. Davon betroffen ist auch die parameter-basierte Schallemissionsanalyse. Gerade die Maximalamplitude eines Ereignisses, die gerne für Auswertungen verwendet wird, kann durch Verstärkungs- und Auslöschungsphänomene zwischen verschiedenen Wellenmoden stark beeinflusst werden. Einzig die Amplitude der ersten Halbschwingung ist von diesen Dingen relativ unbeeinflusst. In ihr sollte sich einzig der schnellste Wellenmod, der die Strecke zwischen Quelle und Sensor auf direktestem Weg zurückgelegt hat, wiederfinden [14].

Damit verbunden ist die Schwierigkeit, die gemessenen Ereignisse bestimmten Mechanismen zuzuordnen. Eine theoretische Berechnung der für die einzelnen Mechanismen erwarteten Wellenformen ist nur in den einfachsten Fällen möglich. Damit bleibt nur die Möglichkeit, die gemessenen Wellenformen nach augenscheinlichen Kriterien (z.B. Amplitude, Energie) zu gruppieren und nach Korrelationen zum Auftreten bestimmter Defektarten zu suchen. Eine solche Gruppierung wird nur bei stark unterschiedlichen Ereignisarten erfolgreich sein [15].

Die Schallemissionsanalyse zielt auf die Messung einzelne Ereignisse. Bei hoher Schädigungsrate kann es dazu kommen, dass zwei Ereignisse sich überlappen und als eines gemessen werden. Des weiteren kann es bei hohen Ereignisdichten dazu kommen, dass die Messapparatur die Daten nicht schnell genug verarbeiten kann und es somit zu Datenverlust kommt. Mit der rasanten Entwicklung im Computer-Bereich hat sich dieses Problem verringert.

Ein letztes Problem ist die mangelnde Hochtemperatur-Stabilität der piezoelektrischen Sensoren. Der Einsatzbereich dieser Sensoren geht nur wenig über Raumtemperatur hinaus. Andere Sensoren sind im Allgemeinen zu teuer, zu wenig empfindlich und zu schwierig in der Handhabung, als dass sie sich für umfangreiche Messungen eignen würden. Will man trotzdem Hochtemperatur-Messungen mit piezoelektrischen Sensoren machen, muss man die Sensoren aus der beheizten Zone entfernen. Dabei sorgt ein Wellenleiter, meist ein dünner Draht, dafür, dass der Schall von der Probe zum Sensor geleitet wird. Die Befestigung eines solchen Drahtes bereitet jedoch große Schwierigkeiten, da jede weitere Grenzfläche zu starken Signalverlusten führt. Aus diesem Grund wurde die Schallemissionsanalyse bis jetzt noch bei praktisch keinem Kriechversuch an technisch interessanten Materialien eingesetzt.

1.3.4 Lokalisierungsalgorithmus

Will man den Ort einer Schallquelle bestimmen, so benötigt man im einfachsten Fall zwei Sensoren. Aus der Differenz $\Delta t = t_2 - t_1$ der Ankunftszeiten an den Sensoren 1 und 2 lässt sich der Ort x des Ereignisses auf der Verbindungsline zwischen den

Sensorpositionen x_1 und x_2 berechnen.

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} - \frac{v \cdot \delta t}{2} \quad (1.1)$$

In diese Rechnung geht die Schallgeschwindigkeit v ein. Um aus der Vielzahl an Signalen die zusammengehörigen herauszufinden, wird eine Zeitkonstante t_{lok} verwendet. Wird z.B. Kanal 1 als erstes angesprochen und registriert Kanal 2 ein Signal innerhalb von t_{lok} , dann gelten die beiden Signale als zusammengehörig und das Ereignis ist beendet. Kommt es jedoch innerhalb von t_{lok} zu einer erneuten Schwellwertüberschreitung an Kanal 1, bevor Kanal 2 ein Signal misst, dann wird das erste Signal auf Kanal 1 verworfen und der Prozess beginnt erneut mit dem zweiten Signal. In dieser Weise werden alle Signale darauf untersucht, ob sie lokalisiert werden können. Die Erfahrung zeigt, dass die besten Lokalisierungsergebnisse erreicht werden, wenn t_{lok} dem Zwei- bis Dreifachen der maximalen Laufzeit zwischen den beiden Sensoren entspricht.

Da sich die verschiedenen Wellenmoden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Werkstoff fortpflanzen, muss für eine erfolgreiche Lokalisierung sichergestellt werden, dass beide Sensoren auf die gleichen Wellenmoden reagieren. Bei hohen Signaldichten kann es zu Problemen kommen, wenn der Lokisierungsalgorithmus keine zueinander passenden Signale mehr findet, oder wenn die falschen Signale einander zugeordnet werden.

Die Lokalisierung der Ereignisse ermöglicht es, Störsignale, die außerhalb der Messlänge entstehen, räumlich auszufiltern [16]. Damit lassen sich besonders Signale, die in der Probeneinspannung ihren Ursprung haben, einfach aussondern. Im Weiteren wird die folgende Nomenklatur verwendet.

- | | |
|----------|--|
| Treffer | Ein einzelnes Signal, unabhängig davon, ob es zu einem Ereignis gehört oder nicht. |
| Ereignis | Eine Gruppe von zwei Signalen, die vom Lokisierungsalgorithmus einander zugeordnet und lokalisiert wurden. |

1.4 Theoretische Modelle

Die Eigenschaften von Kompositen überstreichen einen sehr weiten Bereich. Deshalb ist gerade bei dieser Werkstoffklasse die Modellierung besonders wichtig, da man aus Kostengründen nicht alle möglichen Kombinationen von Matrix und Verstärkungsphase experimentell überprüfen kann. Die unidirektionalen Endlosfaser-Verbunde stellen einen besonders einfachen Fall für die Modellierung dar.

Die verschiedenen Modelle lassen sich in zwei Gruppen einteilen, die unter den Namen Global Load Sharing (GLS) bzw. Local Load Sharing (LLS) bekannt sind.

Beim Global Load Sharing wird davon ausgegangen, dass nach einem Faserbruch alle noch intakten Fasern die Last gleichmäßig tragen. Der Verbund verhält sich weitgehend wie ein loses Bündel von Fasern. Die Matrixeigenschaften spielen hier nur eine untergeordnete Rolle, besonders bei einem großen Unterschied in der Fließgrenze zwischen Matrix und Fasern oder einem hohen Faseranteil. GLS wird beobachtet, wenn es zu einer schwachen Bindung an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix kommt. Das kann zum einen dann der Fall sein, wenn die Haftung zwischen den beiden Phasen schlecht ist, oder wenn die Matrix eine so geringe Scherfließspannung zeigt, dass es zum Abscheren in der Matrix selbst kommt [1].

Beim Local Load Sharing dagegen tragen nur die Fasern in der Nähe eines Faserbruchs eine erhöhte Last. Fasern, die weiter entfernt sind, bemerken nichts von dem Bruch. Die Matrix spielt hier eine wichtige Rolle, indem sie die Kraft von der gebrochenen Faser auf die Nachbarn überträgt. LLS tritt bei guter Haftung zwischen Matrix und Fasern auf, wenn die Fließspannung der Matrix relativ hoch ist.

1.4.1 Shear-Lag-Theorie

Die Shear-Lag-Theorie beschreibt eigentlich das Verhalten von Kurzfasern. Bei Endlosfasern bekommt sie dann Bedeutung, wenn das Verhalten um einen Faserbruch betrachtet wird. Eine genaue Herleitung findet sich in vielen Lehrbüchern der Werkstoffmechanik (z. B. [17]). Es sei eine Faser eingebettet in eine Matrix, wobei die Probenlänge deutlich größer ist als die Faserlänge und die Faser einen deutlich höheren E-Modul aufweist als die Matrix. Unter einer äußeren Spannung beginnt sich die Matrix zu verformen. Es wird davon ausgegangen, dass über die Stirnseiten der Faser keine Kraft übertragen wird. Durch die Differenz der E-Module kommt es an der Mantelfläche der Faser zu Scherkräften in der Matrix, die für einen Kraftübertrag auf die Faser sorgen. Diese Scherkräfte sind an den Faserenden am größten und in der Fasermitte gleich null. In mit keramischen Fasern verstärkten Metallen ist der Unterschied in der Fließgrenze zwischen Matrix und Faser so groß, dass schon bei geringen Dehnungen die Matrix an der Grenzfläche zur Faser ihre Fließspannung erreicht. Sofern es zu keiner Kaltverfestigung kommt kann dann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass die Scherkräfte entlang der ganzen Faser-Matrix-Grenzfläche konstant sind. Über eine Gleichgewichtsbetrachtung aller auftretenden Kräfte kann die Spannung in der Faser an jedem Punkt berechnet werden.

Bei einer bestimmten Länge, der kritischen Faserlänge, erreicht die Spannung in der Fasermitte den Wert, den eine Endlosfaser erfahren würde. Die Shear-Lag-Länge δ entspricht der Hälfte dieser kritischen Faserlänge, also dem Abstand von Faserende zum Punkt, an dem die maximale Spannung erreicht wird. Gleichung 1.2 gibt die Shear-Lag-Länge in Abhängigkeit von der erreichten Faserspannung σ_f , dem

Faserradius r_f und der Scherfließspannung $\tau_{m,y}$ der Matrix an.

$$\delta = \frac{\sigma_f \cdot r_f}{2 \cdot \tau_{m,y}} \quad (1.2)$$

In einem Endlosfaserverbund spielt diese Shear-Lag-Länge ebenfalls eine wichtige Rolle. Bricht eine Faser, dann wird sie in der Umgebung des Bruches entlastet. Durch die Scherkräfte in der Matrix wird aber wieder Kraft auf sie übertragen, so dass sie außerhalb einer Shear-Lag-Länge beiderseits des Bruches wieder volle Last trägt und von einer nicht-geschädigten Faser nicht unterschieden werden kann.

1.4.2 Batdorfs Modell

Batdorf hat bereits 1982 ein Modell vorgeschlagen, mit dem sich die Entwicklung der Schädigung in einem unidirektionalen Endlosfaserverbund berechnen lässt [18, 19]. Er geht davon aus, dass die Fasern einer Weibull-Verteilung gehorchen. Eine solche Verteilung wird häufig für keramische Materialien gefunden. Die Bruchwahrscheinlichkeit wird von Gleichung 1.3 beschrieben [20].

$$P_{Weibull} = 1 - \exp \left[\frac{-V}{V_0} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1.3)$$

Dabei ist V das Volumen der Probe und σ die an der Probe anliegende Spannung. Die Verteilung wird beschrieben durch den Weibull-Modul m , der etwas über die Breite der Verteilung aussagt, und den Spannungsparameter σ_0 , der die Spannung angibt, bei der noch 37% aller Proben intakt sind. Beide Parameter sind abhängig vom Normierungsvolumen V_0 . Bei Fasern mit konstanten Durchmesser können V und V_0 durch die Länge L der Probe und die Normierungslänge L_0 ersetzt werden. Als Normierungslänge wird meistens $L_0 = 25,4$ mm gewählt. Abb. 1.1 zeigt die Weibull-Verteilung berechnet für die für Nextel™ 610 berichteten Weibull-Parameter von $m = 11,2$ und $\sigma_0 = 3400 MPa$ [6].

In einem ersten Schritt berechnet Batdorf die Anzahl Q_1 der Singlets, d.h. der isolierten Faserbrüche, die keinen anderen Faserbrüchen benachbart sind.

$$Q_1 = \frac{N_f x_{Probe}}{2\delta} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2\delta}{L_0} \cdot \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right)^m \right] \right\} \quad (1.4)$$

Diese Anzahl wird praktisch nur durch die Weibull-Verteilung der Fasern bestimmt. Die Shear-Lag-Länge δ , die zusätzlich von der Fließspannung der Matrix bestimmt wird, kürzt sich in erster Näherung heraus.

$$1 - \exp(-x) \approx x \quad (1.5)$$

$$Q_1 \approx \frac{N_f x_{Probe}}{L_0 \sigma_0^m} \cdot \sigma_f^m \quad (1.6)$$

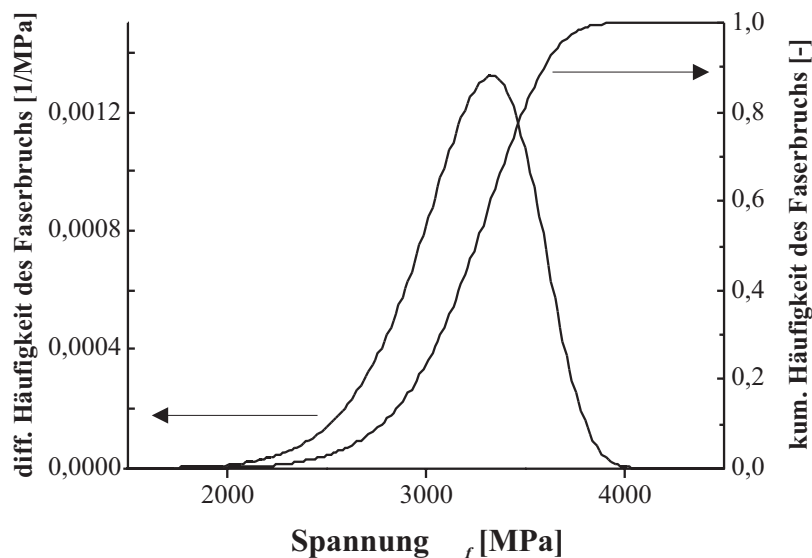


Abbildung 1.1: Weibull-Verteilung. Die Kurven wurden mit den von Wilson [5] angegebenen Werten berechnet ($m = 11,2$; $\sigma_0 = 3400$ MPa). Der Weibull-Modul m stimmt in erster Näherung mit der maximalen Steigung der kumulativen Kurve überein. σ_0 entspricht in erster Näherung der Lage des Maximums der differentiellen Kurve.

Trägt man die Wahrscheinlichkeit Q_1 des Singlets doppelt-logarithmisch gegen die Faserspannung σ_f auf, so erhält man eine Gerade mit der Steigung m .

In der Umgebung eines Faserbruchs kommt es zu einer Inhomogenität in der Spannungsverteilung, wie sie auch dem Shear-Lag-Konzept zugrunde liegt. Abb. 1.2 zeigt eine schematische Darstellung einer solchen Spannungsinhomogenität. Die mittlere Faser ist gebrochen. An der Bruchstelle selbst ist sie frei von jeder Spannung. Über Scherkäfte in der Matrix wird sie langsam wieder beladen, bis sie im Abstand δ vom Bruch wieder die gleiche Spannung σ_f wie die anderen Fasern erfährt. Batdorf geht davon aus, dass nur die nächsten Nachbarn eine erhöhte Spannung erfahren. Auf der Höhe des Bruches berechnet sich die Spannungskonzentration s_1 um ein Singlet nach Gleichung 1.7

$$s_1 = 1 + \frac{1}{n_1} \quad (1.7)$$

Sind die Fasern dichtgepackt, beträgt die Anzahl der nächsten Nachbarn eines Singlets $n_1 = 6$. Durch die erhöhte Spannung verändert sich auch die Shear-Lag-Länge δ . Gleichung 1.8 gibt den korrigierten Wert.

$$\lambda_1 = \delta \cdot \frac{s_1^{m+1} - 1}{s_1^m \cdot (s_1 - 1) \cdot (m + 1)} \quad (1.8)$$

Batdorf geht davon aus, dass die Spannungskonzentration entlang der Fasern linear abklingt. Das ist dann der Fall, wenn die Matrix vollkommen im plastischen Bereich ist und keine Kaltverfestigung zeigt.

Es kann nun sein, dass diese Spannungskonzentration in einer benachbarten Faser ausreicht, um sie zum Bruch zu bringen, selbst wenn sie bei der makrosko-

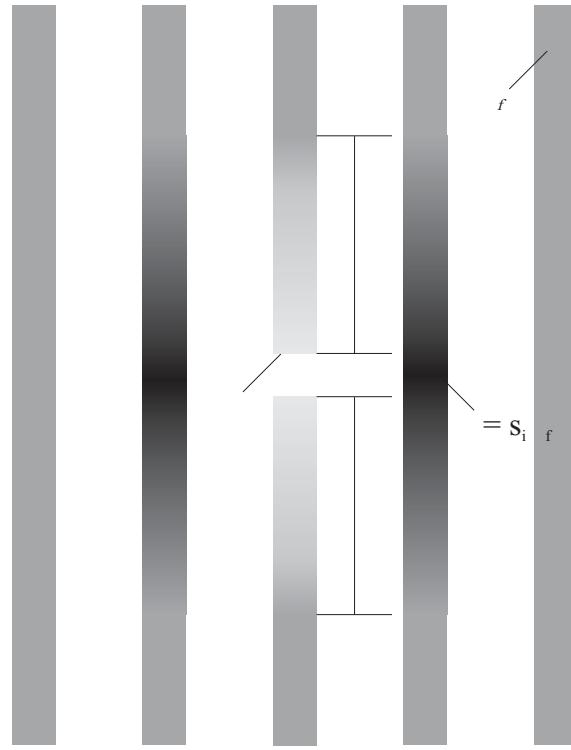


Abbildung 1.2: Batdorfs Model: Spannungskonzentration um einen Faserbruch. Die ungeschädigten Fasern fernab von Faserbrüchen erfahren die makroskopische Spannung σ_f , hier angedeutet durch eine graue Färbung. Bricht eine Faser, so nimmt die Spannung in der Umgebung des Faserbruchs ab. Direkt am Bruch ist die Spannung $\sigma = 0$ (weiße Färbung). Die Nachbarn der gebrochenen Faser tragen eine erhöhte Spannung $\sigma = s_i \cdot \sigma_f$ (schwarz). Durch Scherkräfte in der Matrix kommt es zu einer Kraftübertragung von den Nachbarfasern zu der gebrochenen Faser hin. Im Abstand der Shear-Lag-Länge δ vom Bruch ist die Spannung wieder überall gleich der makroskopischen Spannung σ_f .

pisch angelegten Spannung σ_f noch stabil ist. Es kommt zu einer Überlagerung der Weibull-Verteilung der Faserfestigkeit mit der inhomogenen Spannungsverteilung durch bereits gebrochene Fasern. Batdorf spricht in so einem Fall von einem Duplet, also einer Ansammlung von zwei korrelierten Faserbrüchen. Diese müssen nicht exakt auf einer Höhe sein, doch sind sie immer in großer räumlicher Nähe, da λ klein ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Singlet in ein Duplet verwandelt, ergibt sich nach Gleichung 1.9 zu

$$P_{1 \rightarrow 2} = 1 - \exp \left[\frac{-n_1 \cdot \lambda_1}{L_0} \cdot \left(\frac{s_1 \cdot \sigma_f}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1.9)$$

Damit ist die Gesamtzahl Q_2 der Duplets gegeben durch Gleichung 1.10.

$$Q_2 = Q_1 \cdot P_{1 \rightarrow 2} = Q_1 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-n_1 \cdot \lambda_1}{L_0} \cdot \left(\frac{s_1 \cdot \sigma_f}{\sigma_0} \right)^m \right] \right\} \quad (1.10)$$

Entsprechende Überlegungen gelten auch für den Übergang vom Duplet zum Triplet oder allgemein vom i -plet zum $i+1$ -plet. Die Gleichungen 1.7 und 1.8 werden

dann allgemein zu den Gleichungen 1.11 und 1.12.

$$s_i = 1 + \frac{i}{n_i} \quad (1.11)$$

$$\lambda_i = \delta \cdot \frac{s_i^{m+1} - 1}{s_i^m \cdot (s_i - 1) \cdot (m + 1)} \quad (1.12)$$

Für eine Anzahl von gebrochenen Fasern von $i > 2$ hängt die Anzahl der nächsten Nachbarn n_i von der Form der Faserbruch-Ansammlung ab. Moser hat über statistische Auswertungen Mittelwerte für näherungsweise runde Ansammlungen von Faserbrüchen bestimmt [4]. Dort findet sich auch eine Näherung für $i \geq 10$. In der hier vorliegenden Arbeit wurde diese Näherung allerdings schon für $i \geq 8$ verwendet, da die Folge der n_i sonst nicht monoton steigt. Tabelle 1.4 gibt eine Übersicht der verwendeten Werte.

Tabelle 1.4: Batdorfs Model: nächste Nachbarn und Spannungskonzentration

Faserbrüche i	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
Nachbarn n_i	6	8	9	10	11	12	13	$5 + \sqrt{8 \cdot i}$
Sp.konzentration s_i	1,17	1,25	1,33	1,40	1,45	1,50	1,54	$1 + \frac{i}{n_i}$

Allgemein ergibt sich die Anzahl Q_{i+1} der $i+1$ -plets nach Gleichung 1.13 aus der Anzahl Q_i der i -plets.

$$Q_i + 1 = Q_i \cdot P_{i \rightarrow i+1} = Q_1 \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-n_i \cdot \lambda_i}{L_0} \cdot \left(\frac{s_i \cdot \sigma_f}{\sigma_0} \right)^m \right) \right] \quad (1.13)$$

Die Spannung, bei der $Q_i = 1$ ist, markiert das erste Auftreten des i -plets. Bei höheren Spannungen nimmt die Anzahl der i -plets dann schnell zu. Abb. 1.3 zeigt die Q -Kurven für $i = 1 \dots 3$. Wie man leicht erkennen kann, ist die Anzahl der Singlets bereits beträchtlich, wenn es zum ersten Auftreten eines Duplets kommt. Über den ganzen Verlauf der Schädigung stellen Singlets den bei weitem größten Teil der Faserbrüche dar.

Trägt man die Spannung des ersten Erscheinen eines i -plets gegen die Zahl i der in einem Cluster vorliegenden Faserbrüche auf, so bietet sich das in Abb. 1.4 gezeigte Bild. Das erste Singlet erscheint relativ früh im Schädigungsprozess. Das erste Duplet kommt erst bei deutlich höheren Spannungen zustande. Der Abstand zum ersten Triplet ist schon signifikant kleiner. Die höheren i -plets folgen dann immer dichter aufeinander, bis der Abstand ab $i = 8$ praktisch gleich Null wird. Die hier erreichte Spannung stellt das makroskopische Versagen der Probe dar. In diesem Moment kommt es zum katastrophalen Bruch.

In Abb. 1.3 und 1.4 sind die Vorhersagen dargestellt, die sich aus dem Batdorf-Modell für einen Aluminiumdraht der Länge $x_{Probe} = 6$ cm ergeben, der mit 50

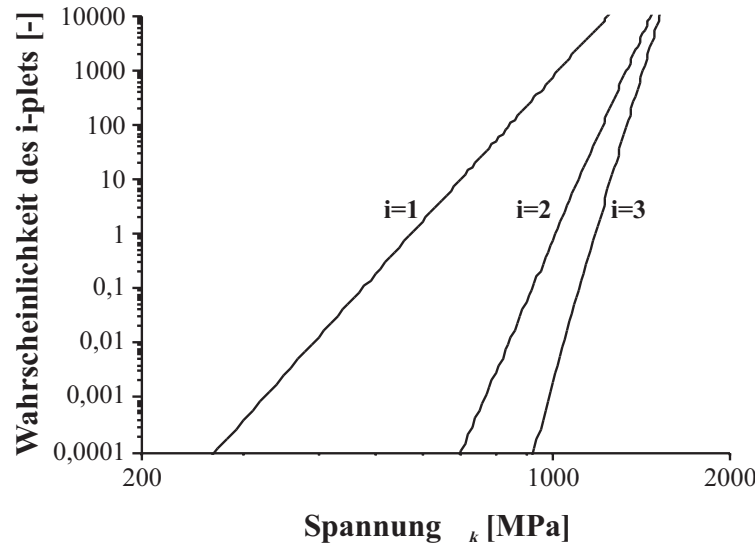


Abbildung 1.3: Wahrscheinlichkeit des i-plets mit zunehmender Spannung für $i = 1$ bis 3. Die Kurven sind berechnet für die gleichen Werte wie Abb. 1.1 sowie eine Scherfließspannung der Matrix von $\tau_{m,y} = 45$ MPa und eine Probenlänge von $x_{Probe} = 6$ cm. Die Spannung bei der die Wahrscheinlichkeit $Q_i = 1$ wird, gibt das erste Auftreten des i-plets an.

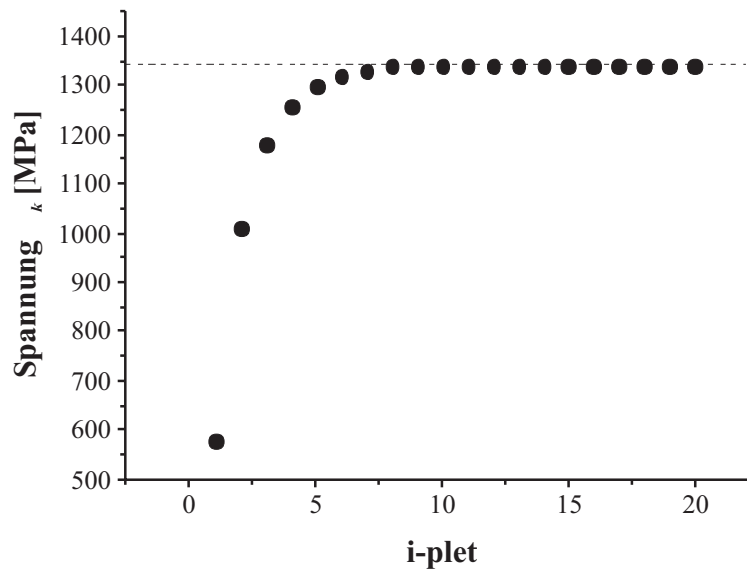


Abbildung 1.4: Batdorfs Vorhersage für das Versagen der Probe. Trägt man das erste Auftreten des i-plets gegen die Spannung auf, so zeigt die resultierende Kurve eine waagerechte Tangente. Bei dieser Spannung kommt es zum Bruch der Probe.

vol% Nextel™ 610-Fasern verstärkt ist³. Bei der Berechnung wurde eine Matrix-Fließspannung von $\tau_{m,y} = 45$ MPa angenommen und für die Fasern die von [6] angegebenen Weibull-Parameter eingesetzt.

Wie aus Abb. 1.4 ersichtlich, ergibt sich für dieses Beispiel eine Bruchspannung von ca. 1350 MPa. In den nachfolgenden Kapiteln dieser Arbeit werden die Vorhersagen des Batdorf-Modells mit den experimentellen Befunden aus Zugversuchen mit begleitender Schallemissionsanalyse verglichen.

³ Das entspricht 14700 Fasern und damit einer Gesamtfaserlänge von ca. 870m.

Experimentelle Methoden

Im folgenden werden die experimentellen Methoden vorgestellt, die in der vorliegenden Arbeit angewandt wurden. Außerdem wird ein Überblick über Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten gegeben.

2.1 Untersuchte Materialien

Es wurden fünf verschiedene Drähte untersucht. Alle wurden von 3M hergestellt. Zwei davon hatten eine Matrix aus technisch reinem Aluminium. Bei dreien bestand die Matrix aus Aluminium mit 2% Kupfer. Hier wurden die Matrixeigenschaften durch verschiedene Wärmebehandlungen beeinflusst. Tabelle 2.1 zeigt die verschiedenen Drähte in der Gegenüberstellung. Dabei bezeichnet d_{Probe} den mittleren Durchmesser der Probe, f_f den Fasergehalt als Anteil am Gesamtvolumen und N_f die Faseranzahl.

Tabelle 2.1: Übersicht über die untersuchten Materialien

Name	d_{Probe} mm	f_f	N_f	Matrix	Wärmebehandlung
Al I	1,99	0,5	14700	hp-Al	Gußzustand
Al II	2,68	0,58	25400	hp-Al	Gußzustand
AlCu I	1,99	0,5	14000	Al-2% Cu	Gußzustand
AlCu II	1,99	0,5	14000	Al-2% Cu	lösungsgeglüht
AlCu III	1,99	0,5	14000	Al-2% Cu	gealtert

Die AlCu II-Drähte wurden 16 Stunden bei 520 °C an Luft geglüht, um alle Ausschei-

dungen aufzulösen und dann in Wasser abgeschreckt. Die AlCu III-Drähte wurden zuerst genauso behandelt und anschließend 48 Stunden bei 190 °C an Luft ausgelagert.

Für die Versuche wurden die Drähte mit einem Seitenschneider auf ca. 25 cm Länge zugeschnitten. Dabei wurden zwar die Enden gequetscht, doch befand sich dieser Teil der Proben außerhalb der Messlänge. Wie sich bei den metallographischen Untersuchungen herausstellte, haben die Fasern im Material Al II einen ovalen statt runden Querschnitt. Auf Nachfrage teilte 3M mit, dass der Herstellungsprozess der Fasern geändert worden sei, was die Formänderung zur Folge gehabt habe. Auf die mechanischen Eigenschaften habe das allerdings keinen Einfluss.

2.2 Metallographie

Für die metallographischen Untersuchungen wurden mit der Diamantdrahtsäge Abschnitte von ca. 20 mm Länge von den Drähten abgeschnitten. Je zwei dieser Abschnitte wurden in Epoxidharz eingebettet und danach präpariert. Tabelle 2.2 zeigt die einzelnen Präparationsschritte in der Übersicht.

Tabelle 2.2: Metallographische Präparation

Schleifmittel	Körnung	Material
SiC-Papier	240	AlCu I + III
SiC-Papier	320	alle Materialien
SiC-Papier	500	alle Materialien
SiC-Papier	1000	alle Materialien
SiC-Papier	1200	alle Materialien
Diamantpaste	6 µm	alle Materialien
Diamantpaste	3 µm	alle Materialien
Diamantpaste	1 µm	alle Materialien
OP-S	Endpolitur	alle Materialien

Die so präparierten Proben wurden unter dem Lichtmikroskop bei Vergrößerungen zwischen 50fach und 1000fach betrachtet. Die in dieser Arbeit gezeigten Aufnahmen wurden mittels einer Digitalkamera gemacht.

2.3 Dichtemessung

Zur Dichtemessung wurden die für die Metallographie bestimmten Drahtabschnitte verwendet, bevor sie eingebettet wurden. Gewogen wurden die Proben mit einer Waage der Firma Mettler Toledo vom Typ „AG204“. Dazu wurden die Proben jeweils

einmal an Luft und einmal in destilliertem Wasser gewogen. Aus den beiden Massen m_{Luft} und m_{Wasser} wurde die Dichte ρ_k mit Hilfe der Dichtebestimmungssoftware „238491“ der selben Firma nach folgender Formel berechnet.

$$\rho_k = \frac{m_{Luft} \cdot \rho_{Wasser}}{m_{Wasser}} + \rho_{Luft} \quad (2.1)$$

Dabei wurde die Dichte des Wassers ρ_{Wasser} nach der Temperatur korrigiert und der Luftauftrieb von $\rho_{Luft} = 0,0012 \text{ g/cm}^3$ berücksichtigt.

2.4 Zugversuche

Diese Arbeit entstand aus einem Auslandspraktikum an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) im Winter 2001/02. Im Rahmen der Diplomarbeit sollten die dort gewonnenen Daten ausgewertet und interpretiert werden. Außerdem sollte die Datenbasis durch zusätzliche Zugversuche vergrößert werden. Es zeigte sich aber, dass in Stuttgart die Sensoren starken Störsignalen ausgesetzt waren. Trotz umfangreicher Suche konnte die Störquelle nicht ausfindig gemacht werden, so dass ein sinnvolles Experimentieren unmöglich war. In der weiteren Behandlung der Zugversuche stammen deshalb alle Daten aus den Experimenten an der EPFL.

2.4.1 Zugversuchsaapparatur

Als Zugmaschine wurde eine Alliance RT/50¹ mit hydraulischen Einspannungen verwendet. Diese Maschine ist mit einer Justiereinrichtung versehen, die es ermöglicht, die Biegebelastung der Probe zu minimieren. Um die Probe so weit als möglich vor erhöhten Belastungen in der Einspannung zu schützen, wurden zwischen die Spannbacken und die Probe selbst Holzklötzchen geklemmt, die etwas über die Spannbacken hinausragten. Wie sich bei Versuchen mit einer alternativen (rein metallischen) Einspannung zeigte, haben diese Holzklötzchen zusätzlich den Vorteil, dass sie die Probe elektrisch isolieren und störende elektromagnetische Signale von den Sensoren abhalten. Ohne diese Holzklötzchen war es unmöglich, verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

Für die Versuche an den dünnen Drähten wurde eine Kraftmessdose mit einer Maximalbelastung von 5 kN verwendet. Für die dicken Drähte musste auf eine 50 kN-Kraftmessdose umgestellt werden. Alle Versuche wurden weggesteuert mit einer konstanten Querschnittsgeschwindigkeit von 5 $\mu\text{m/s}$ gefahren.

¹ Firma MTS, Minn., USA

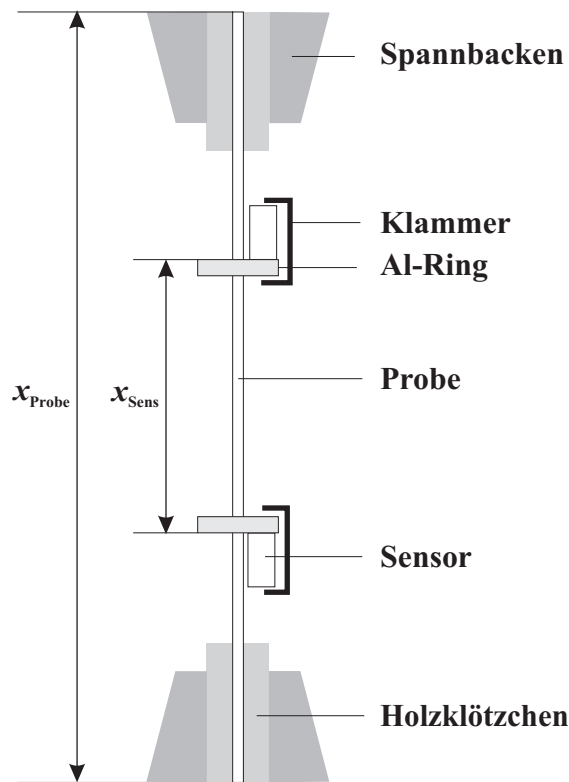


Abbildung 2.1: Aufbau für die Zugversuche. Die Probe wird in eine Zugmaschine mit hydraulischen Spannzeugen eingespannt. Zwischen den Spannbacken und der Probe sorgen Holzklötzchen für einen verbesserten Kraftschluß und elektrische Isolation. Auf die Probe werden zwei Al-Ringe geklebt. Auf diesen Ringe werden die Sensoren mit Wäscheklammern festgeklemmt. Der Abstand zwischen den Außenseiten der Al-Ringe ist die Messlänge x_{sens} . Dagegen umfasst die Probenlänge x_{Probe} die gesamte Probe mitsamt den eingespannten Abschnitten.

2.4.2 Schallemissionsapparatur

Die Schallereignisse wurden mit Sensoren vom Typ „Pico Z“ der Firma Dunegan Engineering sowie mit Vorverstärkern vom Typ AEP3 und einem AMSY4-Gerät von Vallen Systeme aufgezeichnet. Dieses Gerät verfügte über einen Squarer-Chip, der es erlaubt, die Energie des ankommenden Ereignisses aufzuzeichnen.

Es wurden zwei Sensoren verwendet, die jeweils über einen eigenen Kanal am AMSY4 angeschlossen waren. Beide Kanäle zeichneten die Schallereignisse sowohl parameter-basiert als auch in Wellenformen auf. Der Schwellwert wurde auf 29,8dB gesetzt bei einer Vorverstärkung von 34 dB. In der parameter-basierten Aufzeichnung agierten die beiden Kanäle unabhängig voneinander. Nur wenn der Kanal selbst eine Schwellwertüberschreitung feststellte, wurde ein Datensatz aufgenommen. In der Wellenform-Aufzeichnung waren die beiden Kanäle gekoppelt. Sobald einer der beiden Kanäle eine Schwellwertüberschreitung registrierte, wurde an beiden Kanälen die Wellenform aufgezeichnet, unabhängig davon, ob auch am zweiten Ka-

nal der Schwellwert überschritten wurde. Für jede Wellenform wurden 2048 Punkte bei einer Aufzeichnungsrate von 5MHz aufgenommen, was einer Dauer von 40 ms entspricht. Über einen Parameter-Kanal wurde die von der Zugmaschine gemessene Spannung an das AMSY4 übertragen und zusammen mit den Schallemissionsdaten abgespeichert. Die genauen Software-Einstellungen finden sich in Anhang B.

Die Aufzeichnungsrate eines jeden Schallemissionsgerätes ist begrenzt. Um den Datenverlust zu minimieren, wurden Probenlänge und Zuggeschwindigkeit so aufeinander abgestimmt, dass es zumindest zu keinem Verlust von parameter-basierten Daten kam. Um auch den Verlust von Wellenformdaten zu vermeiden, hätte man entweder das Querhaupt extrem langsam verfahren oder kürzere Proben wählen müssen. Eine starke Verringerung der Zuggeschwindigkeit war aus apparativen Gründen nicht möglich. Ein Verkürzen der Proben hätte nicht nur den untersuchte Bereich verkleinert, auch die Biegebelastungen in der Probe wären gestiegen, was zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Versagens am Rand der Einspannungen geführt hätte. Da sowieso schon ein großer Teil der Proben in den Einspannungen brach, wurde ein gewisser Verlust an Wellenformen in Kauf genommen.

Da die Sensoren gegenüber Schwingungen in Längsrichtung sensitiv sind, wurden auf die Probe Aluminium-Ringe aufgeklebt, auf denen dann die Sensoren festgeklemmt wurden. Vakuum-Fett verbesserte die Haftung zwischen den Ringen und den Sensoren. Auf diese Weise können die Sensoren in der Längsachse der Probe angebracht werden. Damit sind sie besonders empfindlich in Bezug auf die Longitudinalschwingungen, die sich aufgrund der Tatsache, dass sie die höchste Schallgeschwindigkeit aufweisen, am besten für die Lokalisierung von Ereignissen eignen. Zum Aufkleben der Ringe wurde ein metallpulvergefüllter Epoxidklebstoff² verwendet. Ausgehärtet wurde der Klebstoff etwa 20 min lang bei 120°C. Da es nicht möglich war, die komplette Klebefläche in Augenschein zu nehmen, wurde wenigstens darauf geachtet, dass die Klebung an der Seite der Ringe, an der die Sensoren befestigt wurden, lückenlos war.

2.4.3 Kalibrierung der Ortsbestimmung

Die Schallgeschwindigkeit v wird für die Lokalisierung der Ereignisse benötigt. Dabei hat sie nur einen Einfluss auf die absolute Lage der Ereignisse, aber nicht auf die relative Lage der Ereignisse untereinander. Die Schallgeschwindigkeit v wurde aus einer Eigenart des Lokalisierungsalgorithmus heraus bestimmt. Der verwendete Algorithmus kann nicht zwischen einem Ereignis an der Sensorposition und einem außerhalb der Messlänge unterscheiden. Beide Arten von Ereignissen führen zur maximalen Zeitdifferenz und damit zu einer Lokalisierung am Ort des nächstgelegenen

² Scotch Weld 2214 Hi-Dense von 3M

Sensors. Da andererseits in den Einspannungen sehr viele Schallereignisse stattfinden, ist die Sensorposition in der Auftragung der Schallereignisse über der x-Position deutlich zu erkennen. Die Schallgeschwindigkeit wurde nun so lange verändert, bis die Lage dieser Orte gehäufte Schallaktivität mit der makroskopisch gemessenen Sensorposition übereinstimmte (siehe Abb. 2.2.)

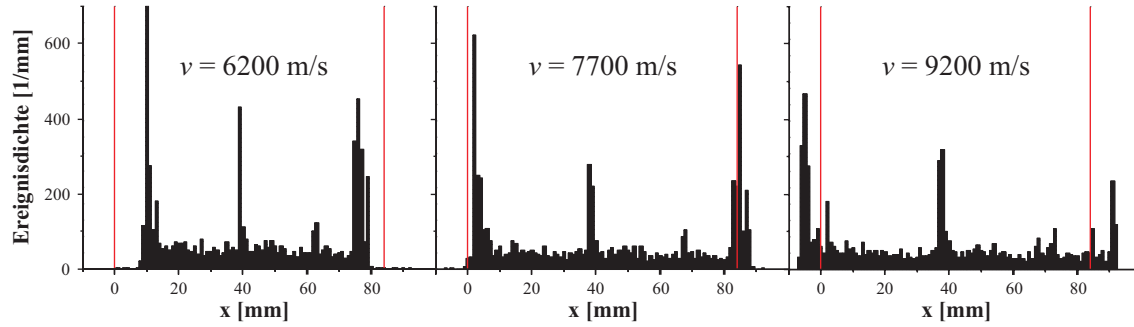


Abbildung 2.2: Kalibrierung der Lokalisierung. Das Histogramm stellt die räumliche Verteilung aller Ereignisse eines Versuchs dar. Die roten Linien markieren die Sensorpositionen. Der Lokalisierungsalgorithmus kann nicht zwischen einem Ereignis an der Sensorposition und einem Ereignis, das außerhalb der Messlänge liegt, unterscheiden. Dadurch kommt es zu Randmaxima in der räumlichen Verteilung. In Abb. a wurde die Schallgeschwindigkeit zu niedrig gewählt. Die Randmaxima liegen innerhalb der Sensorpositionen. Ist die Schallgeschwindigkeit zu groß (Abb. c), befinden sich die Maxima außerhalb. Bei der optimalen Schallgeschwindigkeit (Abb. b) fallen die Maxima genau mit den Sensorpositionen zusammen.

2.5 Datenverarbeitung

Ein großer Teil der Arbeit bestand darin, die bei den Versuchen gewonnenen Daten, auf ein überschaubares Maß zu reduzieren. Anhang C zeigt den genauen Ablauf der Datenverarbeitung im Fließschema.

2.5.1 Probenauswahl

Trotz aller Sorgfalt konnte nicht gewährleistet werden, dass beide Sensoren immer gleich guten Kontakt mit der Probe hatten. Das kann zum einen an der Klebestelle zwischen Probe und Aluminiumringen liegen, zum anderen aber auch an der Kontaktstelle zwischen Aluminiumring und Sensor. Kommt es zu einer solchen Ungleichheit der Anbringung, dann empfängt der eine Sensor deutlich mehr Signale als der andere. Viele Signale können dann nicht mehr geortet werden. Um ein objektives Kriterium für die Güte der Sensoranbringung zu schaffen, wurden von jedem Versuch der Bruchteil f_{lok} der lokalisierbaren Ereignisse bestimmt.

$$f_{lok} = \frac{2 \cdot n_{lok}}{N_{Tref}} \quad (2.2)$$

$N_{Treffer}$ ist die Gesamtzahl aller gemessenen Treffer, n_{lok} die Anzahl der lokalisierbaren Ereignisse. Der Faktor zwei kommt dadurch zustande, dass jeder der beiden Sensoren ein Signal aufzeichnen muss, damit ein Ereignis lokalisiert werden kann. Nur wenn ein Versuch einen Wert von $f_{lok} \geq 0,6$ erreichte, wurde er in die anschließende Wertung aufgenommen. Alle Versuche mit $f_{lok} < 0,6$ wurden verworfen.

2.5.2 Filterung der Daten

Wie im Abschnitt 2.4.3 beschrieben, werden durch den Lokalisierungsalgorithmus Ereignisse, die außerhalb des Messbereichs lagen am Ort des nächstgelegenen Sensors lokalisiert. Um diese Ereignisse auszublenden, wurden nur die Daten verwendet, für die galt:

$$0,1 \cdot x_{Sens} \leq x \leq 0,9 \cdot x_{Sens} \quad (2.3)$$

Dabei ist x_{sens} der Abstand der beiden Sensoren, x der vom Lokalisierungsalgorithmus berechnete Ort des Ereignisses. Als Nullpunkt für die Ortskoordinate wurde stets die Position des unteren Sensors gewählt.

2.5.3 Bestimmung der ersten Amplitude einer Wellenform

Aus den aufgezeichneten Wellenformen wurde die Amplitude a der ersten Halbschwingung, die den Schwellwert überschreitet, bestimmt. Dazu wurde mit Hilfe des selbst-geschriebenen Visual Basic-Programmes „First Amplitude“ auf die Wellenform-Daten zugegriffen und die erste Amplitude berechnet. Dieses Programm erlaubt es auch die Zeit zwischen Schwellwertüberschritt und Maximum der ersten Halbschwingung auszuwerten, doch wurden diese Daten in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Anhang D zeigt den relevanten Quelltext des Programms.

Abb. 2.3 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus Abb. 3.6a. Hier sind die verschiedenen in dieser Arbeit verwendeten Größen eingezeichnet. Die erste Amplitude a stellt das Maximum der ersten Halbschwingung dar, die den Schwellwert überschreitet. Da es - wie in diesem Fall - vorkommen kann, dass die erste Halbschwingung negativ ist, wird nur der Absolutwert betrachtet. Die Maximalamplitude A stellt den betragsmäßig größten Wert dar, den die Wellenform erreicht. Beide Amplitudengrößen sind auf einer dB-Skala angegeben. Der Ankunftszeitpunkt t_i für einen Kanal i ist als der Moment der Schwellwertüberschreitung bestimmt.

2.5.4 Zufällige Verschiebung bei Lokalisierung

Durch die begrenzte zeitliche Auflösung der Schallemissionmessung ergibt sich auch eine begrenzte räumliche Auflösung. Durch die vielen Ereignisse, die während eines Versuches stattfinden, kommt es dann in der graphischen Darstellung zur Ausbildung

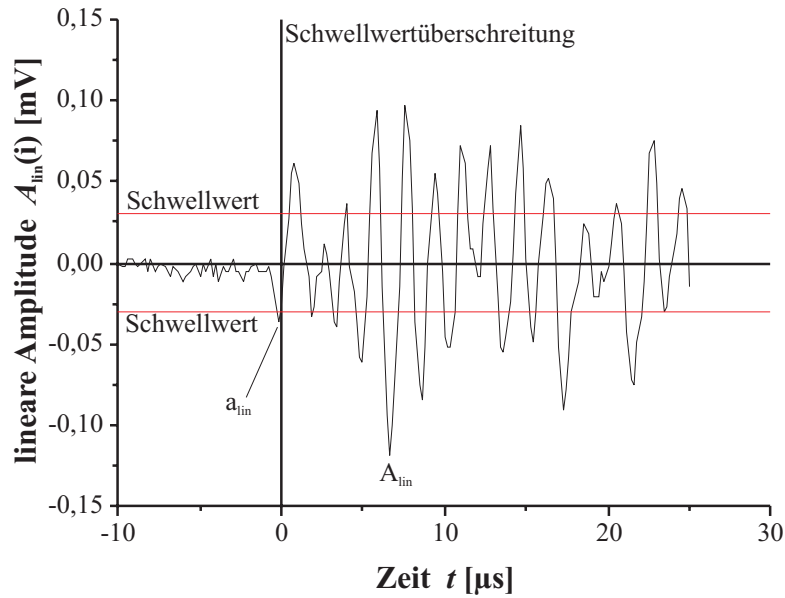


Abbildung 2.3: Die verschiedenen Messgrößen und ihr Bezug zur Wellenform. a Amplitude der ersten Halbschwingung, A Maximal-Amplitude der Wellenform. Die Zeitskala in diesem Diagramm ist auf den Zeitpunkt der Schwellwertüberschreitung ausgerichtet. Die Ankunftszeit t des Treffers ist der Zeitpunkt der Schwellwertüberschreitung auf einer Zeitskala, die den ganzen Versuch umfasst.

von Streifen, in denen sehr viele Ereignisse liegen. Diese Ereignisse überdecken sich zum Teil auch gegenseitig. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurde für einen Teil der Schaubilder die berechnete Ortskoordinate nach Formel 2.4 zufällig etwas nach oben oder unten verschoben.

$$x_{Zufall} = x_{gemessen} + z * \Delta x - \frac{\Delta x}{2} \quad (2.4)$$

Dabei ist z eine Zufallszahl zwischen 0 und 1. Δx ergibt sich aus der zeitlichen Auflösung $\Delta t = 5 \cdot 10^{-8} \text{s}$ und der Schallgeschwindigkeit v . Die Schallgeschwindigkeit variierte etwas, so dass sich Δx zwischen 0,375 mm und 0,4 mm bewegte. Die Auswirkungen dieser Zufallsverschiebung sind in Abb. 2.4 dargestellt.

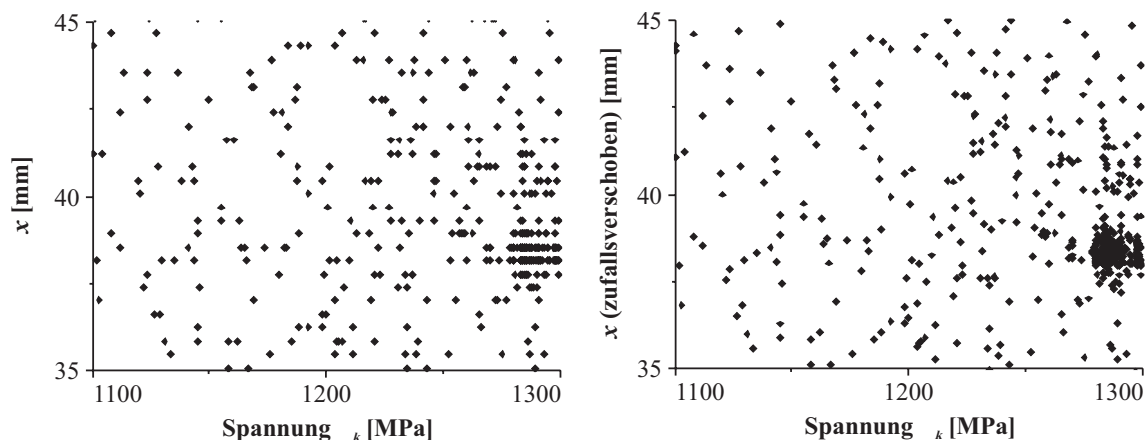


Abbildung 2.4: Auswirkung der Zufallsverschiebung der Ortskoordinate. Abb. a zeigt die Ortskoordinate, wie sie vom Lokalisierungsalgorithmus berechnet wird. Durch die begrenzte zeitliche Auflösung der Messung ordnen sich die Ereignisse in Streifen an und verdecken sich teilweise gegenseitig. In Abb. b wurde die Ungenauigkeit der Messung über eine zufällige Verschiebung der Ortskoordinate nach Gl. 2.4 zurückgerechnet. Es sind jetzt mehr Ereignisse sichtbar; das Bild entspricht eher den tatsächlichen Gegebenheiten.

2.6 Sensorankopplung

Um den Einfluss der Sensorankopplung – vor allem auch in Bezug auf etwaige spätere Kriechversuche – genauer verfolgen zu können, wurden verschiedene Ankopplungsmethoden getestet. Dabei sollte vor allem der Signalverlust durch Dämpfung und an den Grenzflächen, sowie die Möglichkeit der Ortung von Ereignissen untersucht werden.

2.6.1 Getestete Ankopplungen

Als erstes wurde die Ankopplung über an eine Probe angeklebte Aluminiumringe untersucht, wie sie bei den Zugversuchen verwendet wurde. Der Einfluss eines Wellenleiters auf die Schallübertragung wurde an drei Proben getestet. Bei allen wurde über eine Federhalterung ein Metallkegel auf den Sensor gepresst. An der Spitze dieses Kegels wurde ein Nickeldraht von ca. 1 mm Durchmesser angeschweißt. Am anderen Sensor wiederholte sich diese Anordnung, so dass die beiden Sensoren über den Draht verbunden waren. Die drei Proben unterschieden sich in der Drahtlänge. Bei diesen Proben wurden Sensoren vom Typ „B-1025“ der Firma Digital Wave verwendet.

Zum Vergleich wurden beide Sensoren-Paare auch allein getestet. Dabei wurden die beiden Sensoren eines Paares von Hand aufeinander gepresst. Tabelle 2.3 gibt nochmals alle Ankopplungen im Überblick.

Tabelle 2.3: Getestete Sensorankopplungen

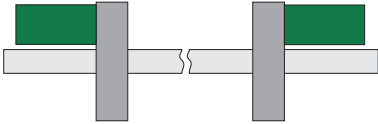
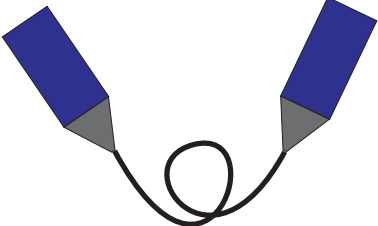
Bezeichnung	Skizze	Bemerkungen
A1		Dunegan „Pico Z“
A2		Digital Wave „B-1025“
B		entspricht den Zugversuchen
C1		Drahtlänge $l = 56,7$ cm
C2		Drahtlänge $l = 50,2$ cm
C3		Drahtlänge $l = 25,5$ cm

Abb. 2.5 zeigt eine Aufnahme der Ankopplung C. Zwei Plastikscheiben sind über zwei Federn miteinander verbunden. Die Spitze des Metallkegels wird durch ein Loch in der größeren Scheibe geführt und der Draht an der Spitze festgeschweißt. Dann wird der Sensor zwischen die Grundfläche des Kegels und die zweite Scheibe geklemmt.

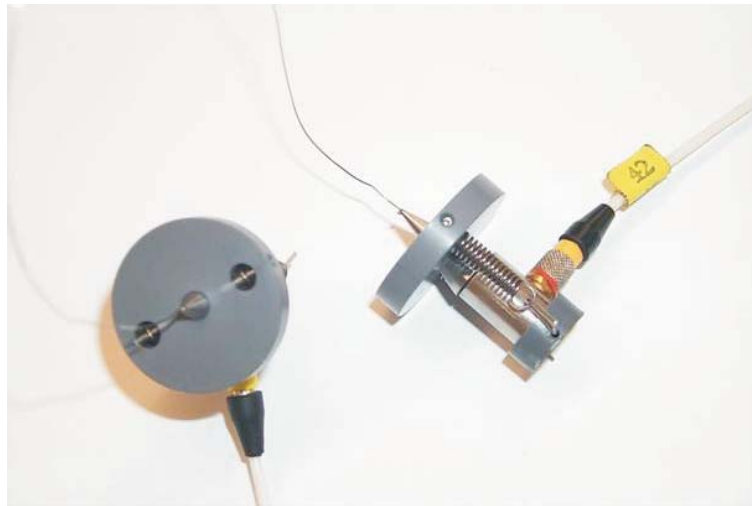


Abbildung 2.5: Versuchsaufbau für die Ankopplung der Sensoren über einen Wellenleiter. Der Draht, der als Wellenleiter dient, ist an jedem Ende an die Spitze eines Metallkegels geschweißt, der über eine Halterung auf die Sensoren gedrückt wird.

2.6.2 Untersuchung mittels Wellengenerator

Um eine reproduzierbare Schallquelle zu haben, wurde mit einem programmierbaren Wellengenerator ein genau definierter Impuls an den Sender gegeben. Als Wellengenerator wurde ein Gerät vom Typ „DS 345“ der Firma Stanford Research Systems

verwendet. Programmiert wurde es über die Funktion Waveform Generator aus dem Software-Paket „Laminated Plate Wave Analyzer“ (Version 1.0D) der Firma Digital Wave Corporation.

Als Signal wurde ein Kosinus verwendet, dem eine Gauß-Kurve überlagert war. Es wurden verschiedene Frequenzen getestet. Dabei wurde die Signalbreite so an die Frequenz angepasst, dass sich die Anzahl der Halbschwingungen nicht änderte. Tabelle 2.4 gibt einen Überblick über die verwendeten Signale. Alle verwendeten Wellenformen bestanden 4096 Punkten und erreichten eine Maximal-Amplitude von 0,5 V.

Das Ausgangssignal wurde über ein Oszilloskop kontrolliert, bevor es an den Sender weitergegeben wurde. Es stimmte sehr gut mit dem in der Software eingestellten Signal überein.

Tabelle 2.4: Zum Test der Sensoranordnungen verwendete Wellenformen

Frequenz	Punkte in Wellenform
50 kHz	1024
100 kHz	512
200 kHz	256
400 kHz	128
800 kHz	64
1,6 MHz	32
2,0 MHz	26

KAPITEL 3

Ergebnisse

3.1 Dichte und Fasergehalt

Aus der gemessenen Dichte ρ_k der Komposit-Drähte lässt sich der Fasergehalt f_f nach Formel 3.1 berechnen.

$$f_f = \frac{\rho_k - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \quad (3.1)$$

Dabei ist die Dichte der Fasern $\rho_f = 3,88 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [5]. Für die Matrix wurde die Dichte von reinem Aluminium $\rho_m = 2,70 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ angenommen.

Aus den Fasergehalt f_f und dem Durchmesser d_k des Drahtes lässt sich die Fläche F_f bestimmen, die von Fasern eingenommen wird.

$$F_f = f_f \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \pi \quad (3.2)$$

Bei Kenntnis des Faserradius r_f kann daraus die Anzahl N_f der Fasern im Verbund bestimmt werden.

$$N_f = \frac{F_f}{\pi r_f^2} \quad (3.3)$$

Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht über alle Werte. 3M gibt den Fasergehalt für die Al I- und AlCu-Drähte mit $f_f = 0,5$ an, für die Al II-Drähte mit $f_f = 0,55$. Damit liegen die experimentell ermittelten Werte stets leicht unter den Herstellerangaben.

Tabelle 3.1: Experimentell bestimmter Fasergehalt

Material	ρ_k $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	f_f	d_k mm	F_f mm^2	r_f μm	N_f
Al I	3,280	0,49	1,990 [†]	1,53	5,75 [‡]	14700
Al II	3,340	0,54	2,668	3,03	6,17	25400
AlCu	3,252	0,47	1,990 [†]	1,46	5,75 [‡]	14000

[†] aus [7]

[‡] aus [5]

3.2 Metallographie

Abb. 3.1 zeigt einige Aufnahmen von Querschliffen der Al I-Drähte. Wie man an der Übersichtsaufnahme 3.1a sehen kann, sind die Drähte nicht perfekt rund. Sie weisen Bereiche, in denen die Fasern dicht gepackt sind, neben solchen auf, die

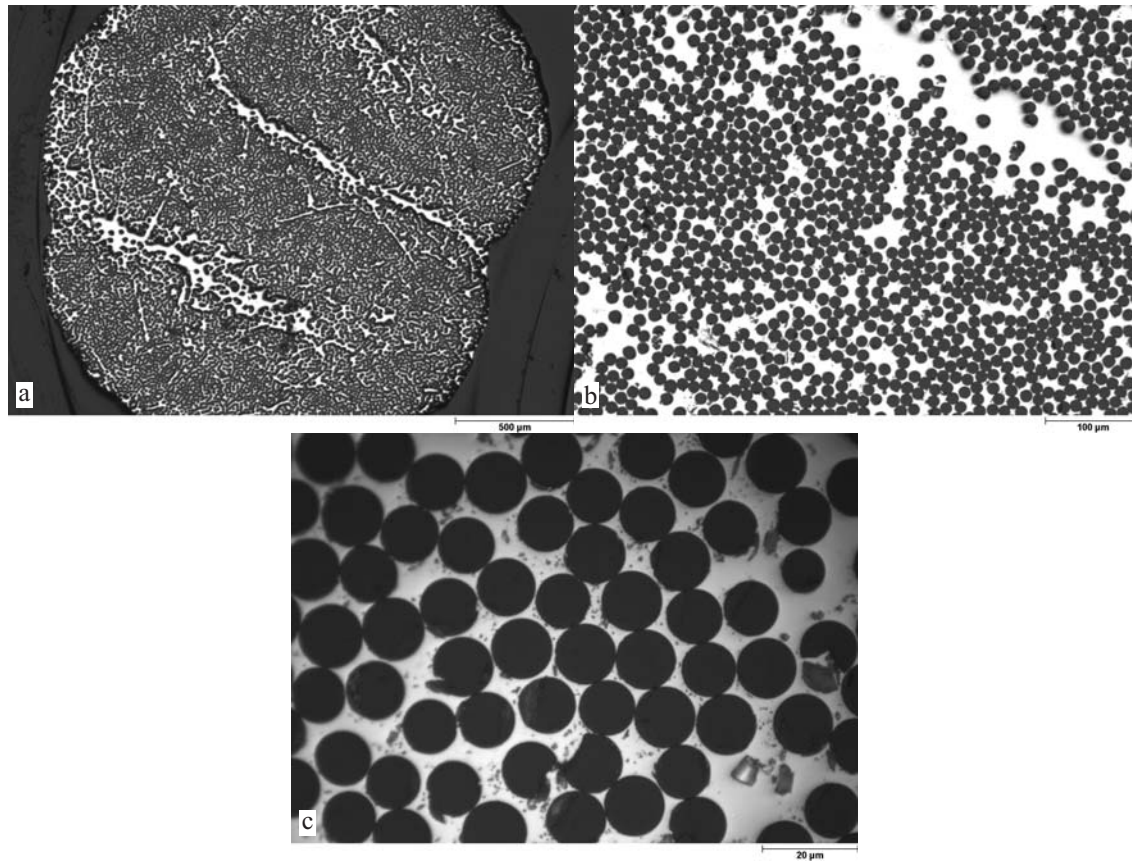


Abbildung 3.1: Metallographische Aufnahmen der Al I-Drähte. Abb. a zeigt eine Übersichtsaufnahme. Es sind Bereiche mit hohem Fasergehalt neben praktisch faserfreien Gegenden zu erkennen. Abb. b zeigt faserarme und -reiche Bereiche in größerer Vergrößerung. Die Matrix ist frei von Ausscheidungen. In Abb. c sind die Auswirkungen der Präparation zu erkennen. Die Fasern sind teilweise zerbrochen. Faserbruchstücke wurden in die Matrix eingedrückt oder liegen an der Oberfläche.

fast faserfrei sind. Dabei zeigt sich eine typische S-förmige Anordnung der verstärkten Bereiche, die durch das Zusammenfallen des ursprünglich flachen Faserbündels entstanden ist. In Bild 3.1b sieht man faserarme und -reiche Bereiche in stärkerer Vergrößerung. Die Matrix ist frei von Ausscheidungen. Die kleinen schwarzen Partikel zwischen den Fasern sind während der Präparation von den Fasern abgebrochen und in die Matrix eingedrückt worden. In Abb. 3.1c sind mehrere Fasern zu erkennen, die beim Schleifen beschädigt wurden. Im unteren rechten Eck ist dazu ein Stück einer abgebrochenen Faser zu sehen. Die Fasern selbst haben einen kreisförmigen Querschnitt. Die Unterschiede im Durchmesser sind gering.

In Abb. 3.2 sind Aufnahmen der Al II-Drähte zu sehen. Diese Drähte sind nahezu rund und weisen nur kleine Unebenheiten am Rand auf. Es gibt nur kleine faserfreie Bereiche und eine Faltung des Faserbündels ist nicht zu erkennen. Wie in Abb. 3.2b deutlich zu sehen ist, wurden hier andere Fasern verwendet. Sie sind fast

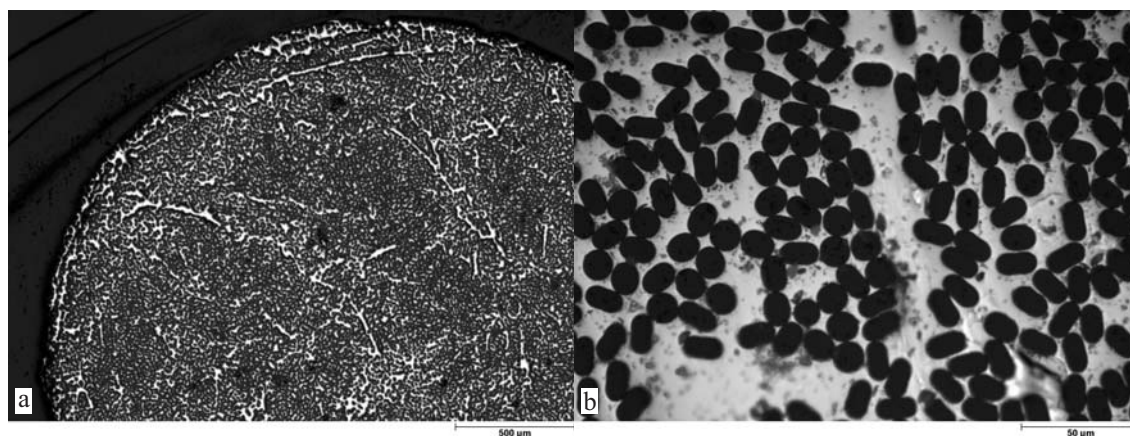


Abbildung 3.2: Metallographische Aufnahmen der Al II-Drähte. In Abb. a ist zu erkennen, dass der Draht nahezu rund ist und die Fasern gleichmäßig in der Matrix verteilt sind. Abb. b zeigt ovale Fasern in einer Matrix, in der es keine Ausscheidungen gibt, aber dafür einige Faserbruchstücke (Präparationsartefakte).

alle oval, mit nur einigen wenigen runden Fasern dazwischen. Die Unterschiede in der Faserquerschnittsfläche sind aber auch hier gering. Die Faserquerschnittsfläche wurde zu $A_{Faser} = 119,7 \mu\text{m}^2$ bestimmt. Eine runde Faser hätte die gleiche Fläche, wenn sie einen Äquivalenzradius von $r_{f,eq} = 6,2 \mu\text{m}$ hätte. Die Matrix ist wiederum frei von Ausscheidungen und weist nur abgebrochene Faserstücke auf (Präparationsartefakte).

Abb. 3.3 zeigt die AlCu-Drähte. Die Übersichtsaufnahme 3.3a stammt von einer AlCu II-Probe. Da sich die Proben jedoch nur in der Wärmebehandlung unterscheiden, gelten die Beobachtungen auch für die anderen AlCu-Proben. Diese Drähte weisen deutliche Einbuchtungen auf. Es gibt einen großen faserfreien Bereich, der durch eine Faltung des Bündels zustandekommt. Abb. 3.3b zeigt das Material im Gußzustand. An den Korngrenzen haben sich feine Al_2Cu -Ausscheidungen gebildet,

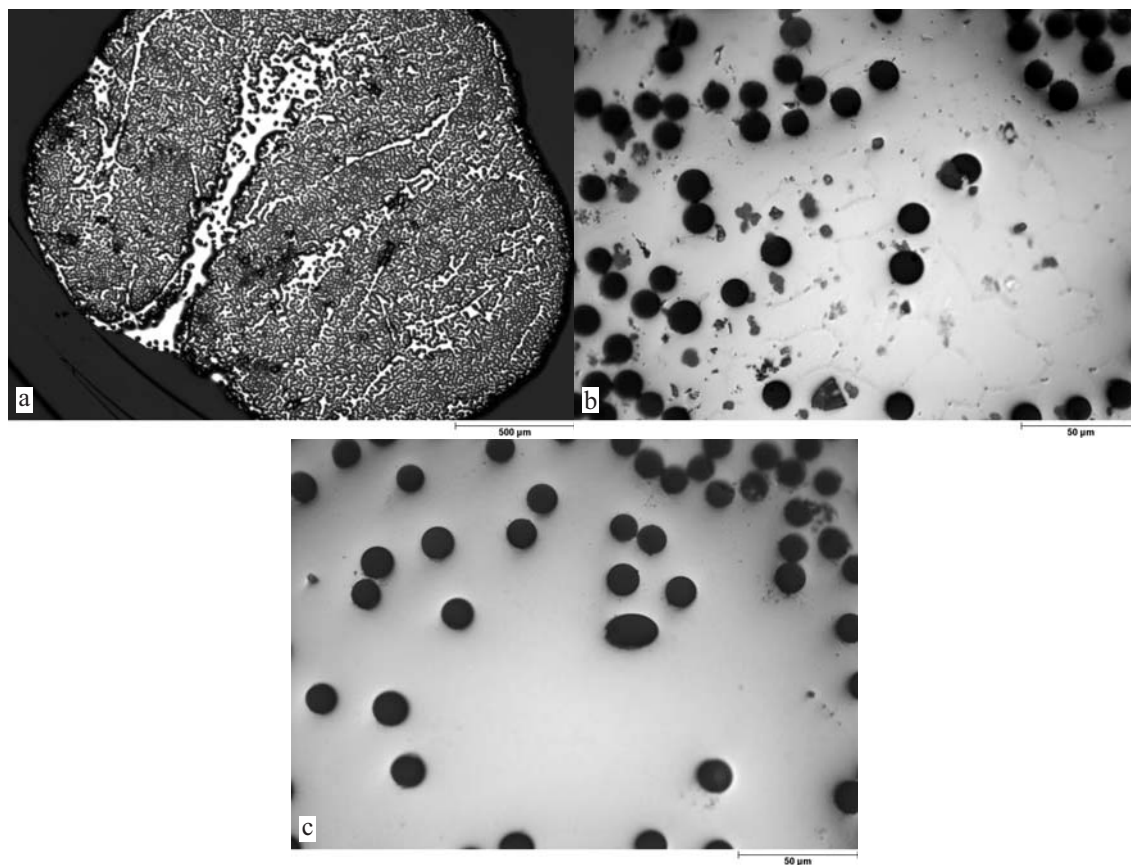


Abbildung 3.3: Metallographische Aufnahmen der AlCu-Drähte. Abb. a zeigt eine AlCu I-Probe. Die Verteilung der Fasern ist ungleichmäßig. Abb. b stammt von der gleichen Probe. An den Korngrenzen hat sich Al_2Cu abgeschieden. Abb. c zeigt einen AlCu III-Draht. Die Ausscheidungen haben sich aufgelöst. In der Mitte ist eine Faser mit elliptischen Querschnitt zu sehen. Sie wurde schief in die Matrix eingebettet.

so dass die Korngrenzen als schwache Schatten zu erkennen sind. Ausscheidungen an den Faser-Matrix-Grenzflächen konnten nicht identifiziert werden, doch ist anzunehmen, dass sie auch dort vorkommen. Abb. 3.3c stammt von einem AlCu III-Draht, doch bietet sich bei AlCu II das gleiche Bild. Die Ausscheidungen sind verschwunden, von den Korngrenzen ist nichts mehr zu erkennen. Wie beim Al I sind auch in den AlCu-Proben ausschließlich runde Fasern zu erkennen. Die ovale Faser in der Mitte von Abb. 3.3 liegt schief in der Matrix.

3.3 Zugversuche

Abb. 3.4 zeigt ein typisches Spannungs-Zeit-Diagramm. Die Dehnung wurde nicht gemessen. Da die Maschine aber mit konstanter Querhauptgeschwindigkeit gefahren wurde und es zu keiner Einschnürung der Probe kam, ist die Dehnung näherungs-

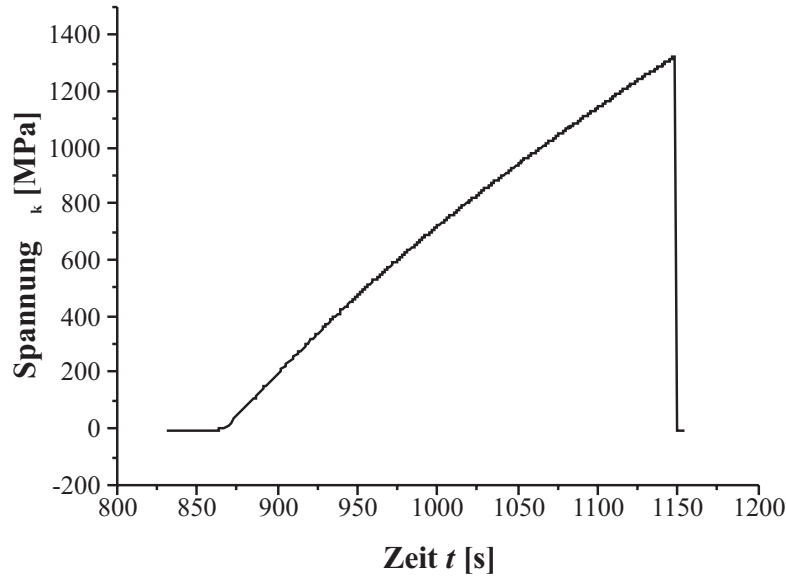


Abbildung 3.4: Verlauf der Spannung über der Zeit für einen ausgewählten Versuch (36_3).

Die Abbildung zeigt einen AlCu II-Versuch, doch sieht das Spannungs-Zeit-Diagramm für alle Proben ähnlich aus. Die Kurve ist nahezu linear. Ein Einsetzen der Schädigung oder Auswirkungen von Faserbrüchen sind nicht zu erkennen.

weise proportional zur Zeit. Die Kurve zeigt einen nahezu linearen Verlauf bis zum Bruch. Aus dem Diagramm lässt sich keine Aussage über Einsetzen und Fortschreiten der Schädigung im Material machen.

In Abb. 3.5 ist die Schallemissionsaktivität gegen die Zeit aufgetragen. Ein Vergleich mit Abb. 3.4 zeigt, dass die Schallemission bei einer Spannung von etwa 400 MPa einsetzt. Mit zunehmender Spannung nimmt die Aktivität deutlich zu.

Zu jedem Treffer wurde ein voller Datensatz aufgezeichnet. Ein solcher Datensatz besteht aus ca. 20 verschiedenen Werten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden jedoch nur Amplitude, Energie, Spannung und die Ankunftszeit des Signals am Sensor verwendet. Zusätzlich liegt zu den meisten Ereignissen auch die komplette Wellenform vor.

Alle Messwerte zusammen ergeben eine Datenmenge von mehreren Gigabyte. Es ist deshalb unmöglich, alle Werte darzustellen. Die Tabellen A.1 bis A.5 im Anhang A geben jedoch einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der ausgewerteten Proben. Die sich daraus ergebenden Mittelwerte sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Dabei bezeichnet $N_{Treffer}$ die Gesamtzahl der Treffer, n_{lok} die Anzahl der lokalisierten Ereignisse, f_{lok} den Anteil der lokalisierten Treffer an allen Treffern, n_{wert} die Anzahl der ausgewerteten Treffer nach dem Filtern, σ_{Bruch} die Bruchspannung,

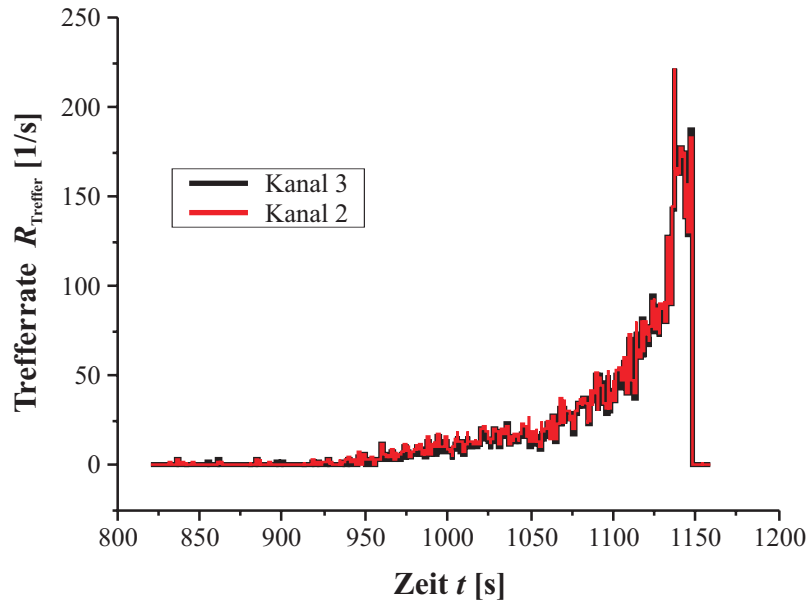


Abbildung 3.5: Die Schallemissionsaktivität im Verlauf eines ausgewählten Versuches (36_3).

Zu Beginn des Zugversuchs gibt es praktisch keine Schallemission. Bei einer Spannung von ca. 470 MPa setzt die Schallemissionsaktivität ein. Mit zunehmender Spannung nimmt die Anzahl der Treffer stark zu, bis sie am Bruch der Probe ein Maximum erreicht.

x_{sens} den Sensorabstand, P_{wert} die Anzahl der ausgewerteten Proben und P_{Bruch} die Anzahl der Proben, die in der Messlänge gebrochen sind.

Tabelle 3.2: Durchschnittliche Ergebnisse aller Materialien

Material	$N_{Treffer}$	n_{lok}	f_{lok}	n_{wert}	σ_{Bruch} MPa	x_{sens} mm	P_{wert}	P_{Bruch}
Al I	26878	9968	74,27	2899	1340,0	67	8	0
Al II	80810	33326	81,50	17556	1548,7	93	5	1
AlCu I	12539	4582	73,08	2215	1078,7	87	9	2
AlCu II	13090	5396	81,43	2286	1282,3	83	8	4
AlCu III	14852	5886	70,60	3238	1323,6	86	10	3

In den Tabellen im Anhang A sind auch die Bezeichnungen für die einzelnen Proben zu finden, auf die im weiteren Verlauf manchmal Bezug genommen wird. Im selben Anhang sind auf zwei CDs die kompletten Rohdaten zusammengestellt.

Im Rahmen dieses Kapitels sind diese Rohdaten an einigen Versuchen exemplarisch dargestellt. Alle vorhandenen Daten finden dann in stark aufbereiteter Form im Diskussionsteil Verwendung. Diese Aufteilung wurde gewählt, da die Datenmenge zu groß ist, um sie ohne die Zuhilfenahme fremder Ergebnisse sinnvoll überblicken zu können.

Jeder Treffer löste die Aufzeichnung von zwei Wellenformen (eine auf jedem Kanal) aus, sofern der Wellenform-Puffer nicht bereits voll war. Abb. 3.6 zeigt ein

solches Wellenpaar. Die obere Wellenform stammt von dem Kanal, der die Aufzeichnung ausgelöst hatte. Bei der unteren Wellenform erfolgte die Schwellwertüberschreitung etwas später. Alle gemessenen Wellenformen zeigen ein ähnliches Bild. Die Frequenz der Schwingungen ist sehr einheitlich. Sie liegt etwa bei 600 kHz. Die Wellenformen spiegeln rein den longitudinalen Wellenmod wieder. Scherwellen kommen aufgrund ihrer niedrigeren Schallgeschwindigkeit nach den longitudinalen Wellen an. Sie haben eine niedrigere Frequenz und meist eine höhere Amplitude. Von einem solchen zweiten Mod ist nichts zu erkennen.

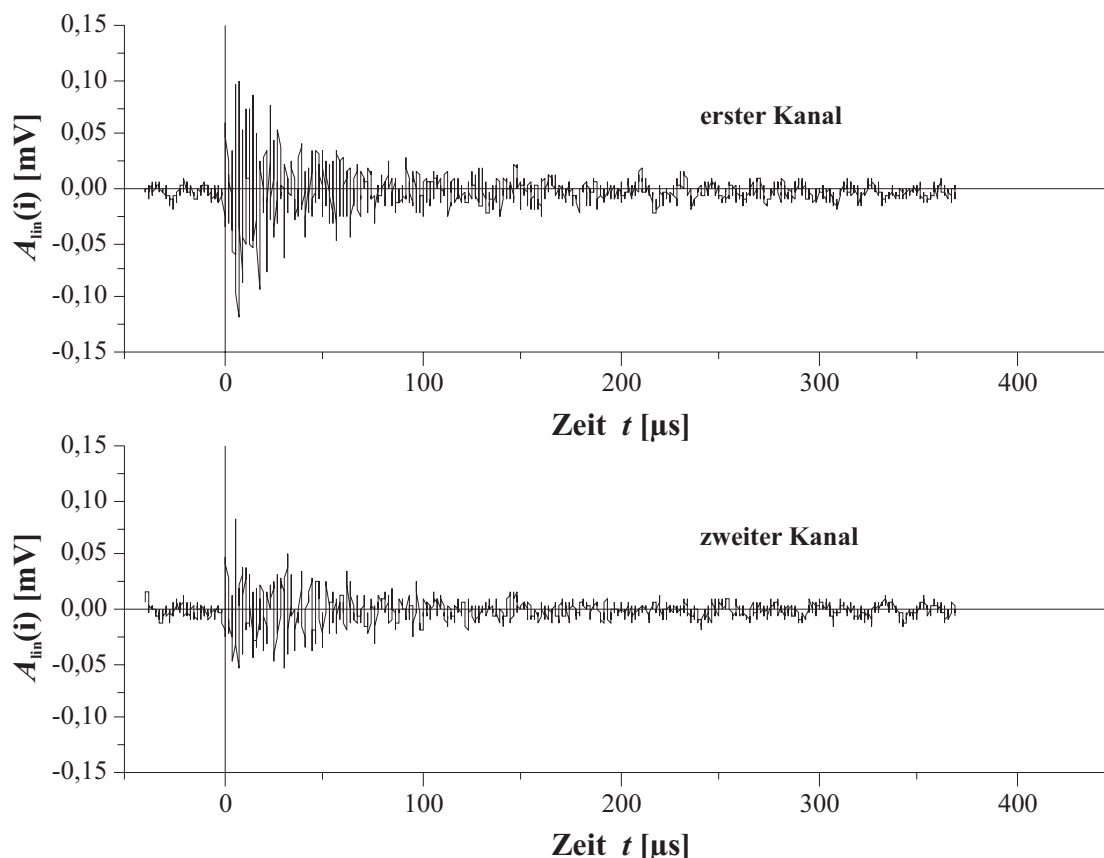


Abbildung 3.6: zwei zueinander gehörende Wellenformen. Kurve a zeigt die Wellenform des ersten Kanals, der die Aufzeichnung ausgelöst hat. Kurve b stellt die Wellenform des zweiten Kanals dar. Die Schwellwertüberschreitung erfolgt etwas später als beim ersten Kanal.

3.4 Sensorankopplung

Abb. 3.7 zeigt die Ergebnisse der Versuche zur Sensorankopplung. Dargestellt ist die lineare Amplitude über der Frequenz des eingestrahnten Signals. Das AMSY kann die Amplitude bei der eingestellten Verstärkung mit einem Fehler von 3 μV messen. Damit bewegen sich die Fehlerbalken selbst bei den niedrigen Werten im Bereich des Zeichenstärke. Die beiden oberen Kurven zeigen das Verhalten der Sensoren, wenn sie direkt aufeinandergedrückt werden. Sie bieten eine Referenz für die anderen Kurven. Schon bei diesen beiden Kurven fällt auf, dass der Verlust durch die

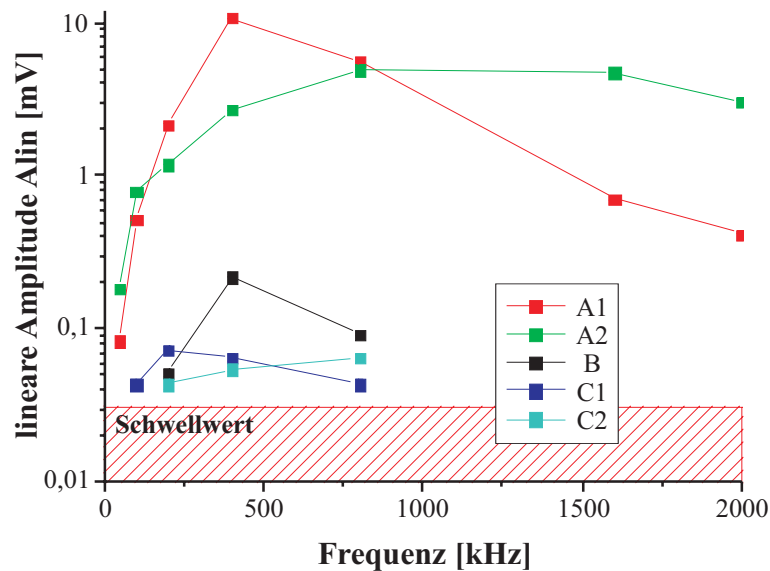


Abbildung 3.7: Ergebnis der Versuche zur Sensorankopplung. Die beiden oberen Kurven zeigen das Verhalten der Sensoren, wenn sie direkt aufeinandergedrückt werden (Aufbau A1 bzw. A2). Bereits hier ist ein starker Verlust im Vergleich zur ausgestrahlten Signalamplitude von 500 mV zu erkennen. Die schwarze Kurve wurde mit dem Aufbau, wie er für die Zugversuche verwendet wurde, gemessen. Die beiden blauen Kurven entsprechen den Anordnungen C1 und C2. Die unterschiedliche Drahtlänge scheint keinen Einfluss auf die Signalabschwächung zu haben. In beiden Fällen sind die Verluste sehr hoch. Bei der Anordnung C3 waren die Verluste so hoch, dass keine Messung möglich war, sie ist hier nicht gezeigt.

Sensoren selbst enorm ist. Das vom Wellengenerator ausgestrahlte Signal besaß eine Maximal-Amplitude von 500 mV. Selbst ohne jede Behinderung zwischen den Sensoren kommen davon nur noch etwa 10 mV am Empfänger an. Die Veränderungen der Maximal-Amplitude mit wechselnder Frequenz des Signals sind für die Digital-Wave-Sensoren relativ gering. Sie zeigen nur zu den niedrigen Frequenzen hin einen deutlichen Abfall. Die Dunegan-Sensoren dagegen zeigen ein Maximum bei etwa 400 kHz. Das Abfallen zu den höheren Frequenzen hin ist zwar schwächer, als zu den niedrigen, doch ist es klar zu erkennen.

Je komplizierter der Weg des Signals vom Sender zum Empfänger wird, desto stärker nimmt auch die Maximal-Amplitude am Empfänger ab. Am besten schneidet hier noch die Anordnung über an der Probe angeklebte Al-Ringe ab, wie sie für die Zugversuche verwendet wurde. Als Vorversuch für spätere Kriechversuche wurde das Dämpfungsverhalten bei Verwendung eines Wellenleiters betrachtet. Dazu wurden drei Drähte verschiedener Länge getestet, die jeweils über einen angeschweißten Kegel an den Sensor angekoppelt waren. Die beiden längeren Drähte zeigen wenig Unterschied in den erzielten Maximal-Amplituden. Der längste Draht erreicht nur bei Frequenzen zwischen 100 kHz und 800 kHz Amplituden, die über dem Schwellwert liegen. Der mittlere Draht überschreitet sogar nur zwischen 200 kHz und 800 kHz den Schwellwert. Der kürzeste Draht ist in Abb. 3.7 nicht eingezeichnet, da er bei keiner der getesteten Frequenzen einen Treffer auslöste.

KAPITEL 4

Diskussion

Bei der Schallemissionsanalyse fallen sehr große Datenmengen an. Erst in stark aufbereiteter Form ergeben sich aussagekräftige Diagramme. Um die Ergebnisse deuten zu können, werden Vergleiche zu Veröffentlichungen anderer Autoren gezogen.

4.1 Gesamtverlauf der Schädigung

Abb. 4.1 zeigt die Entwicklung der Amplitude mit steigender Spannung für einen AlCu II-Draht (Versuch 36_3). Abb. 4.1a zeigt dabei die jeweilige Maximal-Amplitude A , Abb. 4.1b die Amplitude a der ersten Halbschwingung für die Treffer, von denen eine Wellenform aufgezeichnet wurde. In beiden Fällen bietet sich ein ähnliches Bild. Obwohl die Amplituden der stärksten Treffer mit steigender Spannung linear zunehmen, liegt bei jeder Spannung der Großteil der Treffer nur knapp über dem Schwellwert. Die Entwicklung scheint gleichmäßig zu verlaufen.

In Abb. 4.2 ist das Histogramm über die Amplitude für die beiden Diagramme aus Abb. 4.1 dargestellt. Beide Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die Kurve für die Maximal-Amplitude ist zu etwas höheren Amplituden verschoben. In beiden Fällen ist eine leichte Schulter auf der Seite der höheren Amplituden zu erkennen, doch ist diese Schulter nicht ausgeprägt genug, um auf das Vorhandensein mehrere Mechanismen der Schallemission schließen zu können.

Pacheco und Chen haben in ihren Arbeiten über Schallemissionsanalyse an Metallmatrix-Verbundwerkstoffen jeweils eine bimodale Verteilung der Amplituden gefunden [11, 10]. Sie führten die Ereignisse mit niedriger Amplitude auf plastische Verfor-

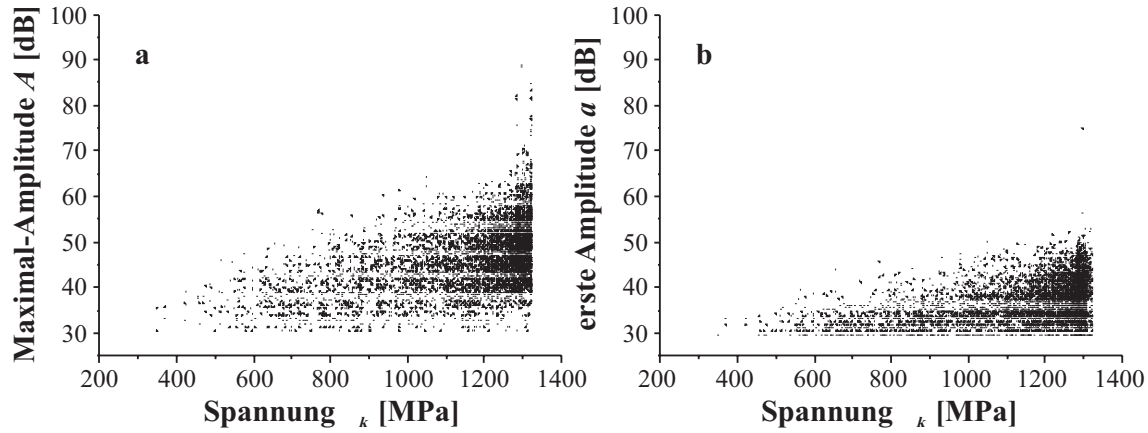


Abbildung 4.1: Amplitude gegen Spannung für eine AlCu II-Probe (Probe 36_3). Diagramm a zeigt die Maximal-Amplitude, Diagramm b die Amplitude der ersten Halbschwingung. In beiden Fällen nimmt die Amplitude der stärksten Treffer linear mit der Spannung zu. Der Großteil der Treffer liegt aber auch bei hohen Spannungen nur knapp über dem Schwellwert.

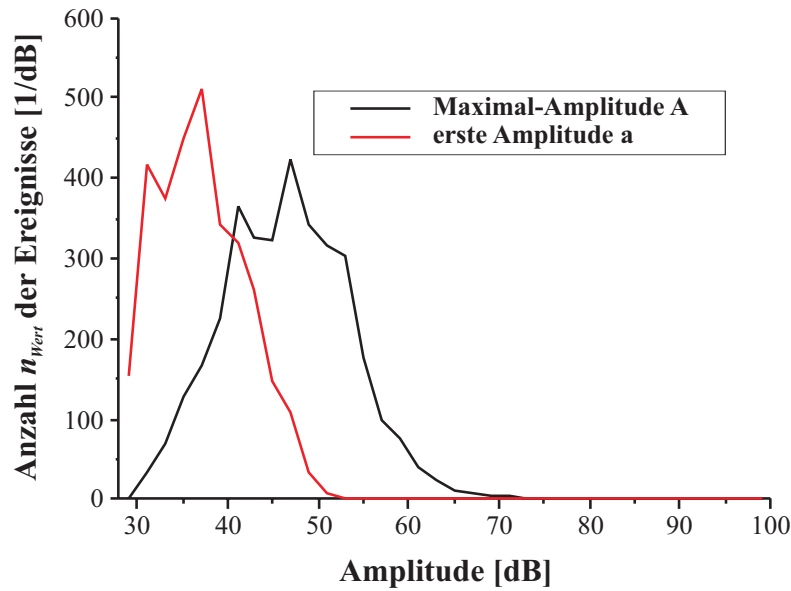


Abbildung 4.2: Amplitudenverteilung für eine AlCu II-Probe (36_3). In schwarz ist die Verteilung der Maximal-Amplituden gezeigt. Die rote Kurve stellt die Verteilung der ersten Amplituden dar. Beide Kurven zeigen eine ähnliche Form. Eine Unterscheidung in mehrere Ereignispopulationen kann nicht gemacht werden.

mungen in der Matrix zurück, die Ereignisse mit höherer Amplitude auf Faserbrüche und damit zusammenhängende Mechanismen, wie Faser-pullout oder Ablösen der Matrix von der Faser. Untermauert wurde diese Zuordnung dadurch, dass Ereignisse mit höherer Amplitude erst ab Spannungen auftauchten, bei denen Faserbrüche auch metallographisch nachweisbar waren.

Eine solche Klassifizierung nach der Amplitude ist bei den Daten, die in dieser Arbeit gewonnen wurden, nicht möglich. Auch in den Wellenformen fanden sich keinerlei Hinweise auf unterschiedliche Schallentstehung. Wahrscheinlich sind alle hier gemessenen Ereignisse auf Faserbrüche zurückzuführen. Versetzungsbewegung in der Matrix sollte deutlich leiser sein und verschwand bei diesen Messungen wohl im Rauschen. Es ist aber nicht auszuschließen, dass einige Ereignisse auf Matrixplastizität zurückgehen.

4.1.1 Verlauf der Ereignisrate gegenüber der Spannung

In Abb. 4.3a ist die Ereignisrate pro 1 m Faserlänge und pro 1 MPa Spannungszinkrement dargestellt¹. Diese Darstellung wurde gewählt, um einen direkten Vergleich mit der Grundlage des Batdorf-Modells erwarteten Faserbruchrate zu ermöglichen (vgl. Singlets in Abschnitt 1.4.2). Die Kurve zeigt dabei den Durchschnitt aller gewerteten Al I-Proben. Sobald eine Probe bricht, wird sie im Durchschnitt nicht mehr gewertet, da sonst die Ereignisrate künstlich erniedrigt wird.

Man erkennt drei Bereiche. Der erste Bereich verläuft näherungsweise waagrecht. Durch die doppelt-logarithmische Darstellung erscheinen die Punkte sehr stark zu streuen, doch tatsächlich sind sie nur auf einige wenige Ereignisse zurückzuführen. Diese Ereignisse können entweder durch ungewöhnlich hohe Amplituden im Rauschen oder durch einige wenige sehr schwache Fasern verursacht werden. Für das Verhalten des Verbundes insgesamt ist dieser Bereich uninteressant.

Der zweite Bereich zeigt einen linearen Verlauf in der doppelt-logarithmischen Auftragung, wie es von Batdorf vorhergesagt wird. Er beginnt bei etwa 300 MPa und endet bei etwa 1000 MPa. Danach folgt ein allmählicher Übergang zum dritten Bereich.

Ab etwa 1200 MPa schließt sich dann der letzte Bereich an. Wie Bereich II zeigt er einen linearen Verlauf, doch ist die Steigung hier deutlich höher. Durch den graduierlichen Übergang zwischen den Bereichen 2 und 3 ist es sehr schwer, die genauen Grenzen festzulegen. Je nach ihrer Wahl ändert sich auch die Steigung in den Bereichen etwas.

Die Al I-Proben erreichen eine durchschnittliche Festigkeit von 1340 MPa. Dieser

¹ Die genaue Vorgehensweise bei der Erstellung der Diagramme 4.3 und 4.4 findet sich im Anhang C in Abb. C.2

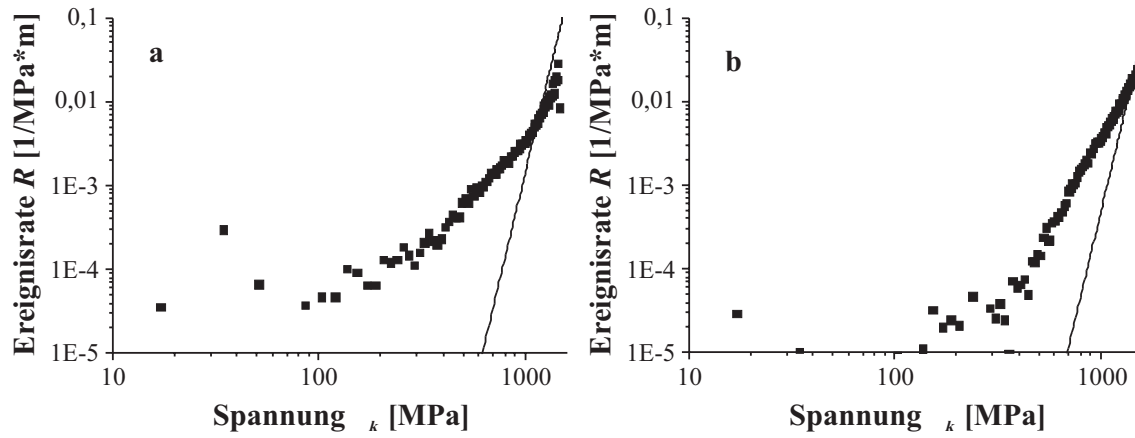


Abbildung 4.3: Ereignisrate gegen die Kompositsspannung σ_k für die Drähte mit Aluminium-Matrix. Die Punkte stellen den Mittelwert aller auswertbaren Proben dar, normiert auf die Gesamtfaserlänge in der Probe (siehe auch Abb. C.2). Die durchgezogene Linie zeigt die theoretische Singlet-Rate nach Batdorf. Die Ergebnisse für die Al I-Proben sind in Abb. a zu sehen. Auf einen Bereich in dem sich die Ereignisrate nur wenig ändert, aber dafür stark streut, folgt ein linear-ansteigender Abschnitt, der allmählich in einen zweiten linear-ansteigenden Bereich mit größerer Steigung übergeht. Dieser letzte Bereich zeigt gute Übereinstimmung mit der theoretischen Kurve. Abb. b zeigt die Auftragung für die Al II-Proben. Auch hier folgt ein linear-ansteigender Bereich auf einen waagerechten Abschnitt. Der zweite linear-ansteigende Abschnitt fehlt jedoch. Eine Übereinstimmung mit der Theorie ist nur in den letzten Messpunkten gegeben.

Wert liegt etwas niedriger als der von Moser gefundene Wert von 1378 MPa [4]. Die Proben waren in der vorliegenden Arbeit allerdings etwas länger, so dass ein leicht erniedrigter Wert zu erwarten war. Desweiteren führte Moser sehr viel mehr Versuche durch, und bezog nur solche Proben in seine Arbeit ein, die nicht in den Einspannungen gebrochen waren. Da in der hier vorliegenden Arbeit keine einzige Al I-Probe außerhalb der Einspannungen brach, war dieses Vorgehen hier nicht möglich. Alle Proben brachen an Schwachstellen, die von der Einspannung und den aus ihr resultierenden Spannungskonzentrationen herrühren. Damit dürfte die eigentliche Bruchspannung etwas höher liegen als der gemessene Wert.

Abb. 4.3b zeigt die entsprechende Kurve für die Al II-Proben. Wieder beginnt die Probe mit einem waagerechten Abschnitt. Der darauf folgende linear-ansteigende Bereich setzt sich dann aber bis zum Bruch fort, ohne dass sich die Steigung ändert.

Die mittlere Bruchspannung der Al II-Proben liegt mit 1549 MPa deutlich höher. Das liegt wohl hauptsächlich an dem größeren Fasergehalt. Auch die gleichmäßigere Verteilung der Fasern und die Tatsache, dass der Draht eine sehr glatte Oberfläche ohne große Einbuchtungen hat, tragen wohl zu den verbesserten Eigenschaften bei.

In Abb. 4.4 sind die entsprechenden Kurven für die AlCu-Drähte gezeigt. Kurve a zeigt die Ergebnisse für den Draht im Gußzustand. Nach dem durch Rauschen dominierten waagerechten Bereich, folgt wiederum ein linear-ansteigender Abschnitt, der etwa zwischen 270 MPa und 700 MPa liegt. Danach zeigt die Kurve einen zwei-

ten linear ansteigenden Bereich, der von etwa 900 MPa bis zum Bruch bei knapp 1100 MPa reicht.

Mit einer durchschnittlichen Bruchspannung von 1079 MPa zeigen diese Proben die schlechtesten Eigenschaften von allen untersuchten Materialien, wie auch von Moser berichtet wird [4]. Wahrscheinlich dienen Al_2Cu -Ausscheidungen an den Fasergrenzflächen als Bruchinitiatoren.

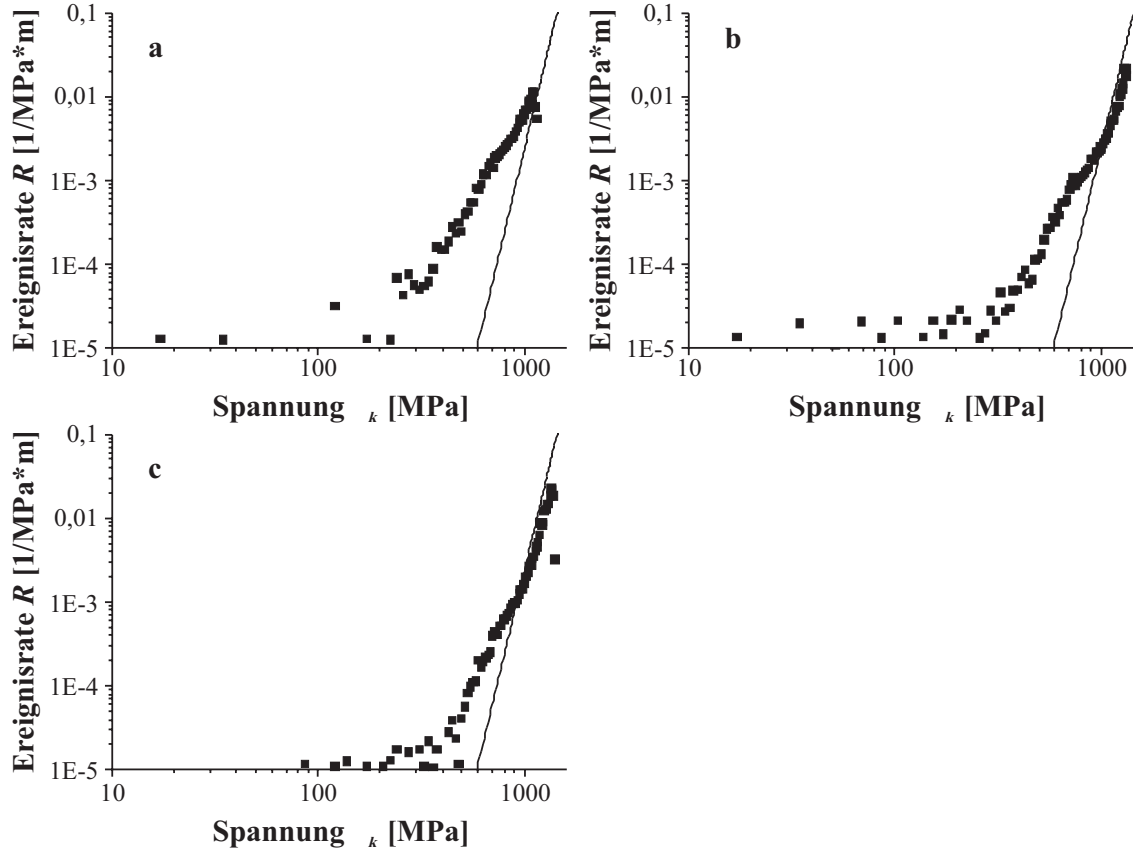


Abbildung 4.4: Ereignisrate gegen die Kompositsspannung σ_k für die Drähte mit Al-Cu2-Matrix.

Die Punkte stellen den Mittelwert aller auswertbaren Proben dar, normiert auf die Gesamtfaserlänge in der Probe (siehe auch Abb. C.2). Die durchgezogene Linie zeigt die theoretische Singlet-Rate nach Batdorf. Abb. a zeigt den Verlauf für die AlCu I-Proben. Die Kurve weist einen waagerechten und zwei linear-ansteigende Abschnitte auf (vgl. Abb. 4.3a). Die Übereinstimmung mit der Theorie ist nur für die letzten Messpunkte gegeben. Abb. b (AlCu II) und Abb. c (AlCu III) zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der letzte Abschnitt ist hier gegenüber Abb. 4.4a deutlich verlängert und passt gut auf die theoretische Berechnung.

Abb. 4.4b und c zeigen die Diagramme für die AlCu-Drähte mit lösungsgeglühter bzw. ausgelagerter Matrix. Die Kurven weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Beide zeigen deutlich alle drei Bereiche. Der Unterschied in den Steigungen der beiden Abschnitte ist deutlich kleiner als bei den Al I-Proben.

Mit einer mittleren Bruchspannung von 1282 MPa bzw. 1324 MPa kommen die beiden Materialien fast an die Eigenschaften des Al I-Drahtes heran. Der Draht, der zusätzlich zum Lösungsglühen noch einmal ausgelagert wurde, weist dabei die

besseren Eigenschaften auf.

4.1.2 Vergleich mit Batdorf

Um einen Vergleich der Messwerte mit Batdorfs Theorie zu ermöglichen wurde Gl. 1.6 durch die Faserlänge geteilt und nach der Spannung abgeleitet. Auf diese Weise erhält man eine Rate R der Faserbrüche, die direkt mit den Kurven in Abb. 4.3 und 4.4 übereinstimmen sollte.

$$R = \frac{1}{N_f x_{Probe}} \cdot \frac{\partial Q_1}{\partial \sigma} \approx \frac{m}{L_0 \sigma_0^m} \cdot \sigma^{m-1} \quad (4.1)$$

Aus den Weibull-Parameter m und σ_0 , der Fließspannung der Matrix unter Scherbeanspruchung $\tau_{m,y}$ und der Faseranzahl N_f wurde diese Rate für jedes Material berechnet. Tabelle 4.1 gibt die verwendeten Parameter an.

Tabelle 4.1: Batdorfs Model: für die Rechnung verwendete Parameter

Material	m	σ_0 MPa	$\tau_{m,y}$ MPa	N_f
Al I	11,2	3400	45	14700
Al II	11,2	3400	45	25400
AlCu I	11,2	3400	80	14000
AlCu II	11,2	3400	98	14000
AlCu III	11,2	3400	105	14000

Die so erhaltenen Kurven sind in den Abb. 4.3 und 4.4 als durchgezogene Linien dargestellt. Es fällt sofort auf, dass die theoretischen Kurven nur für hohe Spannungen mit den Messwerten übereinstimmen. Bei den Materialien Al I, AlCu II und AlCu III schwenkt die gemessenen Ereignisrate tatsächlich auf die theoretische Kurve ein. Bei den Materialien Al II und AlCu I schneidet die theoretische Kurve die Messwerte in den letzten Punkten. Es ist denkbar, dass auch hier noch ein Bereich von guter Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie zu beobachten wäre, wenn die Proben eine etwas höhere Bruchspannung aufwiesen.

Im Bereich der niedrigen Spannungen ist die Übereinstimmung ebenfalls gut. Batdorf sagt voraus, dass es unterhalb einer bestimmten Spannung zu keinerlei Faserbrüchen kommen sollte, und auch im Experiment gibt es nur vereinzelte Ereignisse, die evtl. auch von Rauschen herrühren können.

Im mittleren Bereich findet sich allerdings keine Übereinstimmung. Zwar zeigen alle Materialien einen linearen Verlauf, wie Batdorfs Modell es vorhersagt, doch passen die Steigungen nicht zu den Weibull-Parametern, die in der Literatur für Nextel™ 610 zu finden sind. Die Quelle, von der diese Ereignisse herrühren, ist nicht klar.

Es gibt mehrere Möglichkeiten:

- Versetzungsbewegung in der Matrix
- beim Herstellungsprozess geschädigte Fasern
- nicht perfekt ausgerichtete Fasern
- schwächere Fasern

Für Ereignisse durch Versetzungsbewegung spricht, dass in mehreren Untersuchungen Schallemissionsereignisse, die von Matrix-Plastizität herrühren, beobachtet wurden [11]. Dagegen spricht, dass in der hier vorliegenden Arbeit keine signifikanten Unterschiede in der Amplitude gefunden wurden zwischen Ereignissen aus dem mittleren und dem hohen Spannungsbereich. Zwar tauchen die Ereignisse hoher Amplitude nur kurz vor dem Bruch auf, doch wird auch in diesem Bereich die Schädigung von den Ereignissen niedriger und mittlerer Amplitude dominiert.

Moser hat in durchlichtmikroskopischen Aufnahmen eine nicht unbeträchtliche Anzahl von Fasern gefunden, die bereits vor jeder Belastung des Drahtes gebrochen waren [4]. Diese Fasern finden sich bevorzugt am Rand des ursprünglichen Faserbündels. Das legt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um Fasern handelt, die im Rahmen des Handlings des nicht-infiltrierten Faserbündels beschädigt wurden. Es ist denkbar, dass es auch Fasern gibt, die in diesem Stadium zwar nicht brechen, aber doch geschädigt werden, so dass sie später eine niedrigere Bruchspannung und einen niedrigeren Weibull-Modul aufweisen. Da diese Schädigung erst bei der Herstellung des Verbundwerkstoffes entsteht, kann sie in Einzelfaser-Tests nicht auftauchen. Um solche geschwächten Fasern in metallographischen Aufnahmen zu entdecken, sind sie zu selten. Die Wahrscheinlichkeit ist sehr gering, genau solch eine Schwachstelle in einem Querschliff zu entdecken. Andererseits ist es bei solch spröden Werkstoffen, wie es diese Keramikfasern sind, unwahrscheinlich, dass die Faser nur geschädigt wird und nicht sofort vollständig bricht.

In Abb. 3.3c auf Seite 50 ist eine Faser zu sehen, die schief in die Matrix eingebettet ist. Solche Fasern sind veränderten Spannungsverhältnissen ausgesetzt und könnten für die unerklärten Ereignisse verantwortlich sein. Es ist auch denkbar, dass bei der Herstellung Fasern überkreuzt zu liegen kamen. Ein solcher Fall wurde aber bis jetzt metallographisch nicht nachgewiesen.

Zuletzt könnte es sich auch um Fasern handeln, die von Anfang an schwächer waren. In der Veröffentlichung von 1997 berichtet Wilson von unterschiedlichen Weibull-Moduli je nach der Art, in der der Modul bestimmt wurde [5]. Er führt das auf Unterschiede in der Defektgröße von Faser zu Faser zurück. Manche Fasern beginnen beim Sintern mit ihren Nachbarn zusammen zu wachsen. Werden sie danach wieder getrennt so bleibt eine Art Schweißnaht zurück, die die Faser schwächt. Solange nur wenige Fasern davon betroffen sind, haben sie kaum Einfluss

auf die Festigkeit des Verbundwerkstoffes. Untersuchungen, in denen die Weibull-Parameter aus den Compositeigenschaften hergeleitet werden, können vereinzelte Fasern deswegen nicht feststellen [7]. Damit solche Fasern in Einzelfasertest nachgewiesen werden können, müssen sehr viele Fasern getestet werden. Dagegen befanden sich bereits in einer einzigen Drahtprobe der vorliegenden Untersuchung Fasern mit einer Gesamtlänge von mehrere Tausend Metern.

Wilson gibt als niedrigsten Modul einen Wert von $m = 3$ bis 5 an. Das stimmt gut mit den Werten überein, die in dieser Arbeit für den Bereich II gefunden wurde (siehe Tabelle 4.2). Je nach Wahl der Grenzen für den Bereich zwei schwanken die Weibull-Moduli etwas. Auch eine Veränderung des Herstellungsprozess der Fasern, wie er für die Al II-Drähte belegt ist, könnte zu Unterschieden zur Veröffentlichung von Wilson führen.

Tabelle 4.2: Gemessene Weibull-Moduli in den Bereichen I und II

Material	II	m_{II}	III	m_{III}
Al I	289-1020 MPa	3,6	1190-1428 MPa	6,4
Al II	408-1513 MPa	5,5		
AlCu I	272-697 MPa	4,9	901-1071 MPa	6,2
AlCu II	357-748 MPa	5,7	969-1275 MPa	7,7
AlCu III	408-697 MPa	7,5	901-1326 MPa	8,8

Eine endgültige Entscheidung über die Ursache der Ereignisse im mittleren Bereich lässt sich nicht fällen. Die Wellen sind auf ihrem Weg vom Entstehungsort zum Sensor zu vielen Veränderungen unterworfen, als dass sie eine eindeutige Identifizierung des erzeugenden Mechanismus zulassen würden, wenn nicht mit anderen Verfahren begleitende Messungen gemacht werden. Für die meisten anderen Messmethoden (z. B. die Metallographie) sind die fraglichen Ereignisse aber zu selten, als dass sie sich sicher detektieren ließen.

4.1.3 Bruchspannung in Experiment und Theorie

Batdorf macht nicht nur eine Aussage über die Anzahl der Faserbrüche, sondern auch über das Versagen des ganzen Verbundes (vgl. Abschnitt 1.4.2). Die Berechnung der Bruchspannung ist nicht trivial. Die in Tabelle 4.3 angegebenen Werte wurden deswegen nur auf 10 MPa genau bestimmt.

Alle Messungen liefern deutlich niedrigere Werte als die nach Batdorfs Modell mit den in Tabelle 4.1 angegebenen Parametern berechnete Bruchspannung. Durch Spannungskonzentrationen in den Einspannungen brachen die meisten Proben bei Werten, die wohl unterhalb der tatsächlichen Bruchspannung des Materials lagen. Doch auch die Proben, die in der Messlänge brachen, erreichen nicht die theoretischen Werte. Ist wirklich ein Teil der Fasern schwächer als angenommen, so würde

das nicht nur die Schallereignisse im mittleren Spannungsbereich erklären, sondern auch die niedrigere Bruchspannung.

Tabelle 4.3: Vergleich der experimentell bestimmten Bruchspannung zu den Werten, die sich aus Batdorfs Modell ergeben

Material	σ_{Bruch} (nach Batdorf) MPa	σ_{Bruch} (experimentell) MPa
Al I	1530	1340,0
Al II	1670	1548,7
AlCu I	1510	1078,7
AlCu II	1540	1282,3
AlCu III	1540	1323,6

Die von Batdorf vorhergesagte Erhöhung der Bruchspannung bei Verwendung einer steiferen Matrix hat sich nicht bestätigt. Im Gegenteil, die Verbundwerkstoffe mit der rein-Al-Matrix, die die niedrigste Fließspannung hat, erzielten die höchsten Festigkeiten. Besonders groß ist der Unterschied zwischen Theorie und Experiment bei den AlCu I-Proben. Bei diesem Material liegt die experimentelle Festigkeit fast 450 MPa unter der von Batdorf vorhergesagten. Diese niedrige Festigkeit ist wohl auf spröde Ausscheidungen an den Fasern zurückzuführen, die in Batdorfs Modell nicht berücksichtigt werden. Werden diese Ausscheidungen durch eine Wärmebehandlung aufgelöst, so wächst die experimentelle Bruchspannung um über 200 MPa an. In der Theorie, die nur die unterschiedliche Fließspannung der Matrix berücksichtigt, beträgt der Zuwachs lediglich 30 MPa.

4.2 Räumliche Verteilung der Ereignisse

Batdorf macht nur sehr begrenzte Aussagen zur räumlichen Verteilung der Schädigung in einem Verbundwerkstoff. Zwar berechnet er, wie viele Cluster der Größe i es bei einer bestimmten Spannung gibt, er macht allerdings keinerlei Vorraussagen, wie diese Cluster zueinander liegen. Die Schallemissionsanalyse dagegen ermöglicht bei Verwendung von mehreren Sensoren die Lokalisierung von Ereignissen. Damit kann auch die räumliche Entwicklung der Schädigung verfolgt werden. Es ist besonders von Interesse, ob bzw. ab wann sich die spätere Bruchstelle vom Rest der Probe unterscheidet. Um das erkennen zu können, ist es nötig, dass die Bruchstelle innerhalb der Messlänge liegt. Leider war das nur selten der Fall. Die meisten Proben brachen in den Einspannungen, so dass sie für diesen Teil der Arbeit nicht ausgewertet werden können.

4.2.1 Keine Häufung von Ereignissen

Zwei der neun Proben vom Material AlCu I brachen innerhalb der Messlänge. Abb. 4.10 zeigt die räumliche Entwicklung der Schädigung von einer dieser beiden Proben. Aufgetragen ist die geringfügig zufallsverschobene Ortskoordinate x gegen die Spannung σ_k , bei der das Ereignis aufgezeichnet wurde. Der Fehler der Ortsbestimmung beträgt je nach Probe zwischen 0,375 mm und 0,4 mm. In genau diesem Bereich wurden die Messpunkte nach dem in Abschnitt 2.5.4 beschriebenen Algorithmus verschoben. Der statistische Fehler, der durch diese Verschiebung entsteht, ist durch die große Anzahl an Messpunkten minimal, so dass die Darstellung ein glaubwürdiges Bild der tatsächlichen Schädigung abgibt. Die Farbe der Punkte macht zusätzlich eine Aussage über die Stärke des Ereignisses. Ereignisse mit niedriger Amplitude sind dunkelgrün; über hellgrün und gelb wird die Maximal-Amplitude immer größer. Mit rot sind schließlich die stärksten Ereignisse gekennzeichnet. Die schwarze Linie markiert die Stelle, an der die Probe gebrochen ist.

Schon bei niedrigen Spannungen gibt es vereinzelte Ereignisse. Mit zunehmender Spannung werden diese immer häufiger und nehmen auch an Intensität zu. Es gibt jedoch schon von Beginn an vereinzelte Ereignisse mittlerer Amplitude. Eine räumliche Häufung der Ereignisse ist nicht zu erkennen, auch nicht in der Umgebung der späteren Bruchstelle.

Um einen besseren Überblick über die räumliche Verteilung der Ereignisse direkt vor dem Bruch zu gewinnen, wurde ein Histogramm über den Bereich der letzten 100 MPa erstellt. In Abb. 4.6 ist dieses Histogramm für die beiden in der Messlänge gebrochenen Kurven gezeigt. Dabei stellt die rote Linie jeweils die Bruchstelle der Probe dar. In beiden Fällen sind die Ereignisse sehr gleichmäßig verteilt. Es gibt keine Häufung, die auf eine besonders geschwächte Stelle hinweisen würde.

Aus den Untersuchungen von Deve und Pacheco ist bekannt, dass die Bruchstellen sehr glatt sind, was darauf hindeutet, dass dem makroskopischen Versagen der Probe eine räumliche Häufung der Faserbrüche vorausgeht [1, 11]. Moser stellte in rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen fest, dass sich in den AlCu II-Drähten im Gußzustand Ausscheidungen von Al_2Cu bilden [7]. Diese Ausscheidungen finden sich bevorzugt an den Grenzflächen zwischen Faser und Matrix oder in Bereichen, in denen sich zwei Fasern berühren. Sie sind auch in Abb. 3.3b zu sehen. Dort sind sie allerdings nur an den Korngrenzen in der Matrix zu erkennen.

Diese Ausscheidungen an der Faseroberfläche wirken wohl als Defekt, der den Faserbruch erleichtert. Durch die fein-verteilten Ausscheidungen ist die Wahrscheinlichkeit sehr viel größer, dass sich in der Umgebung eines Faserbruchs eine zweite Schwachstelle befindet. Der Weibull-Modul der Fasern wird künstlich herabgesetzt, so dass es schon bei kleinen Ansammlungen von Faserbrüchen zu einem katastrophalen Bruchverlauf kommt. Diese weiteren Faserbrüche folgen so schnell aufeinander,

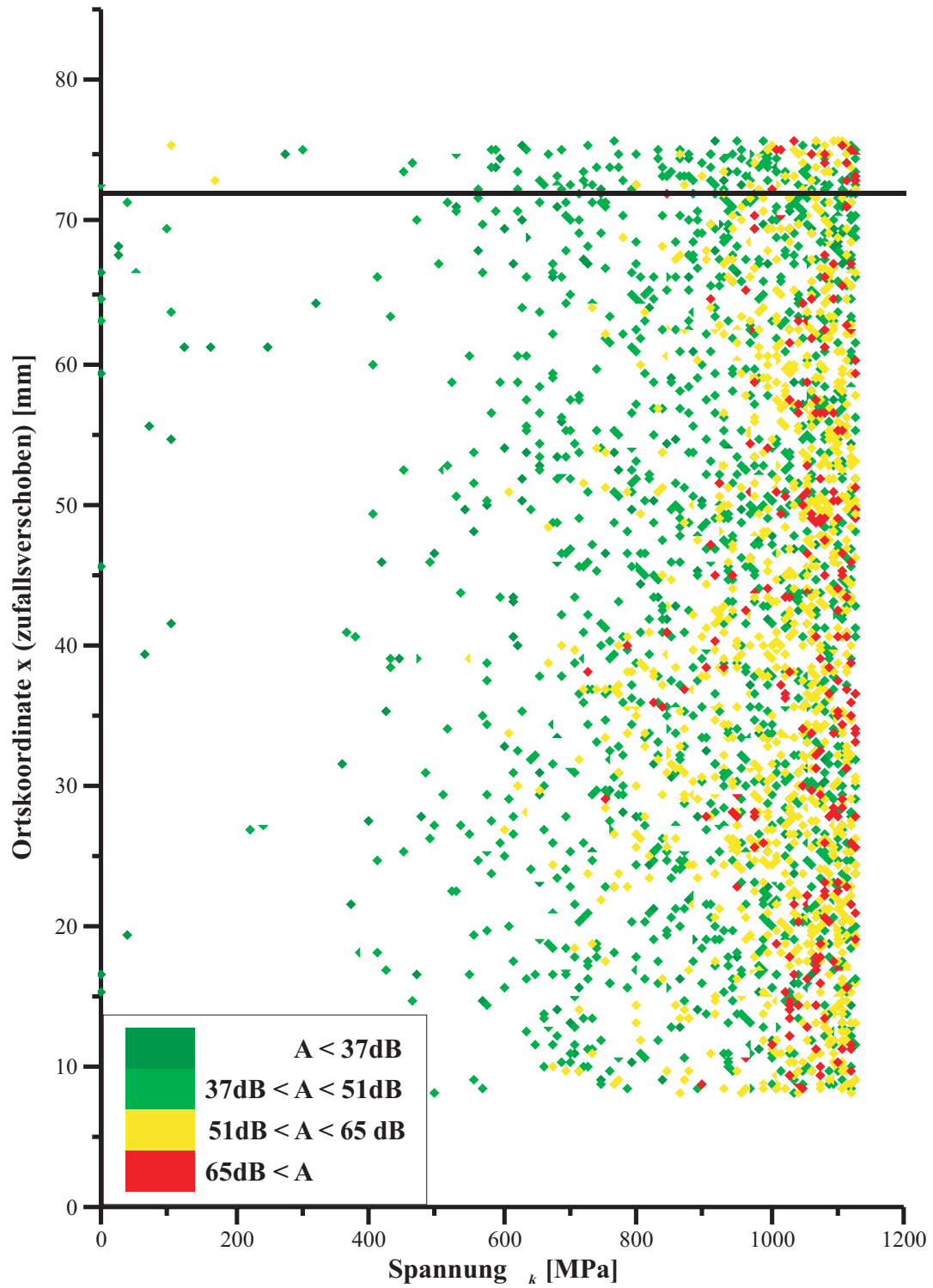


Abbildung 4.5: Räumliche Entwicklung der Schädigung für eine AlCu I-Probe (34_2). Die schwarze Linie markiert die makroskopische Bruchstelle. Die Ortskoordinate x der Ereignisse wurden wie in Abschnitt 2.5.4 beschrieben verschoben, um mehr Ereignisse sichtbar zu machen. Es ist keine Lokalisierung erkennbar.

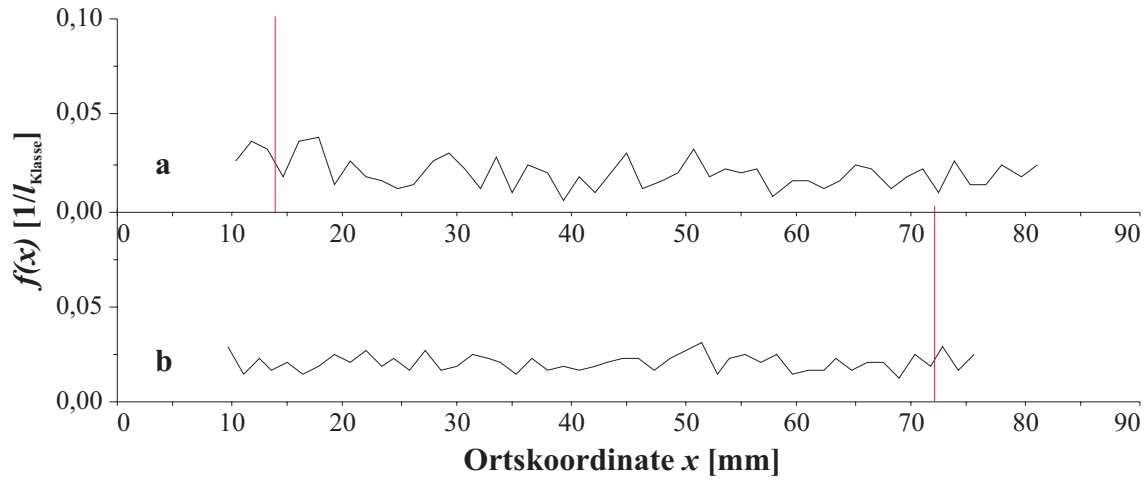


Abbildung 4.6: Räumliche Verteilung der Ereignisse für die in der Messlänge gebrochenen AlCu I-Proben. Ausgewertet wurden nur die letzten 100 MPa vor dem Bruch. Die Klassenbreite entspricht $\frac{1}{50}$ der ausgewerteten Länge, $x_{Klasse} = 0,016 \cdot x_{sens}$. Die rote Linie zeigt die makroskopische Bruchstelle der Proben. In a ist die Verteilung für Probe 34_1 zu sehen. b zeigt Probe 34_2, die auch in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Beide Proben zeigen keine Häufung von Ereignissen in der Nähe der Bruchstelle. Die Ereignisse sind gleichmäßig über die gesamte Messlänge verteilt.

dass sie von der Schallemissionsanalyse nicht mehr getrennt werden können und als ein Ereignis aufgezeichnet werden.

Damit erklärt sich auch die niedrige Bruchspannung, die mit einem Durchschnittswert von 1079 MPa deutlich unter den Werten für die anderen Materialien liegt. Durch eine ausscheidungsgehärtete Matrix lassen sich die Verbundeigenschaften nur dann verbessern, wenn es gelingt die Faseroberflächen frei von Ausscheidungen zu halten.

4.2.2 Häufung von Ereignissen

Werden diese Ausscheidungen durch eine Wärmebehandlung aufgelöst, so ändert sich das Verhalten deutlich. Abb. 4.7 zeigt eine der AlCu II-Proben. Die ersten Ereignisse treten erst bei etwa 400 MPa auf, deutlich später als in den Proben mit einer Matrix im Gußzustand. Über lange Zeit hinweg gibt es nur Ereignisse mit relativ niedriger Amplitude. Zu mittleren und hohen Amplituden kommt es erst kurz vor dem Bruch.

Eine räumliche Häufung der Ereignisse in der Umgebung der makroskopischen Bruchstelle ist deutlich erkennbar. An dieser Stelle findet sich auch der Großteil der Ereignisse mit hoher Amplitude. Noch deutlicher wird dieses Verhalten, wenn man die räumliche Verteilung der Ereignisse aus den letzten 100MPa vor dem Bruch ansieht, wie sie in Abb. 4.8 dargestellt ist. Dabei korrespondiert Abb. 4.8d mit Abb. 4.7. Die Kurven b und d zeigen eine deutliche Überhöhung direkt an der Bruch-

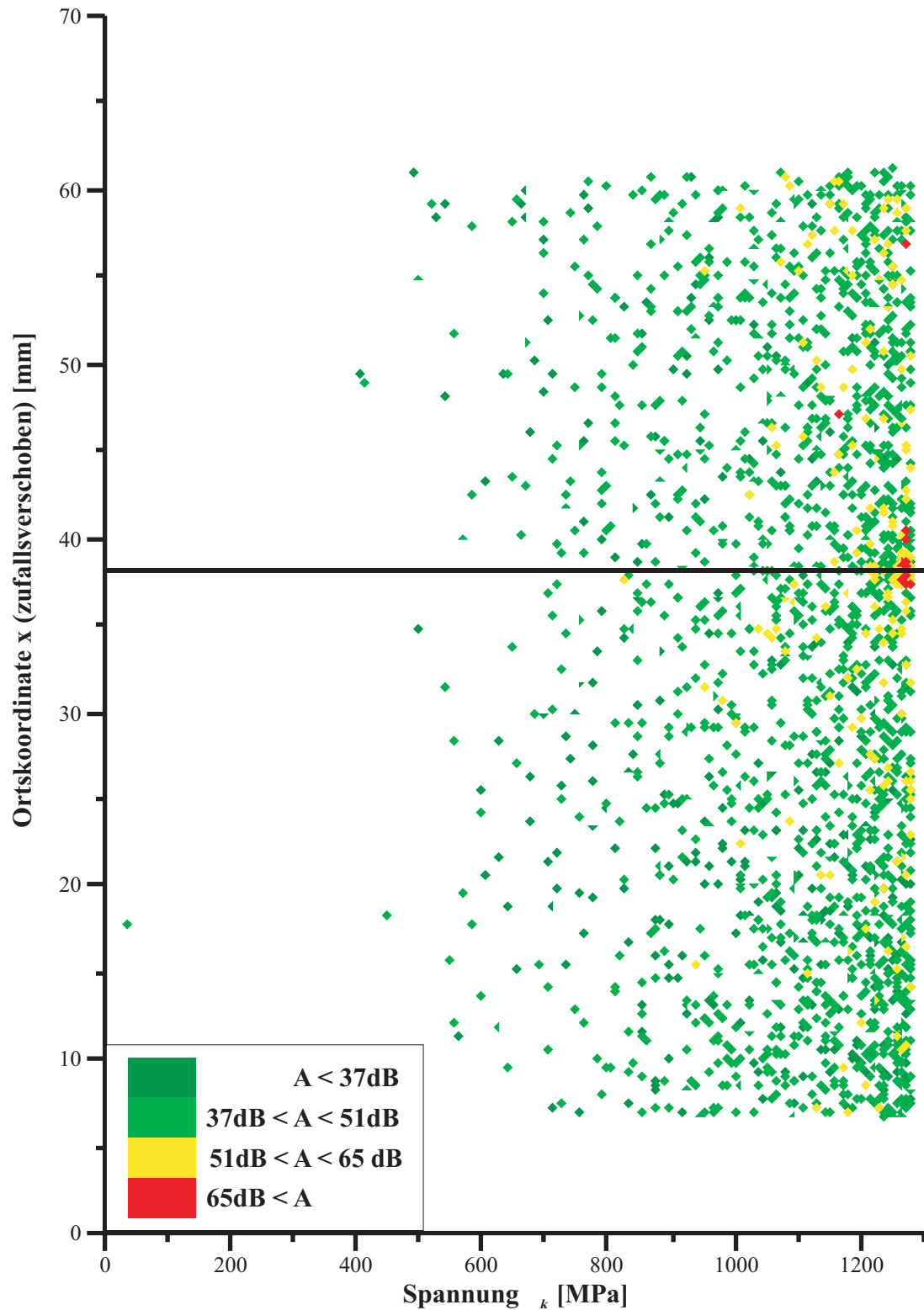


Abbildung 4.7: Räumliche Entwicklung der Schädigung für eine AlCu II-Probe (36b_1). Darstellung siehe Abb. 4.5. Kurz vor dem Bruch zeigt sich eine scharfe Lokalisierung der Ereignisse im Bereich der Bruchstelle. In diesem Bereich liegt auch der Großteil der Ereignisse mit hoher Amplitude (rot markiert).

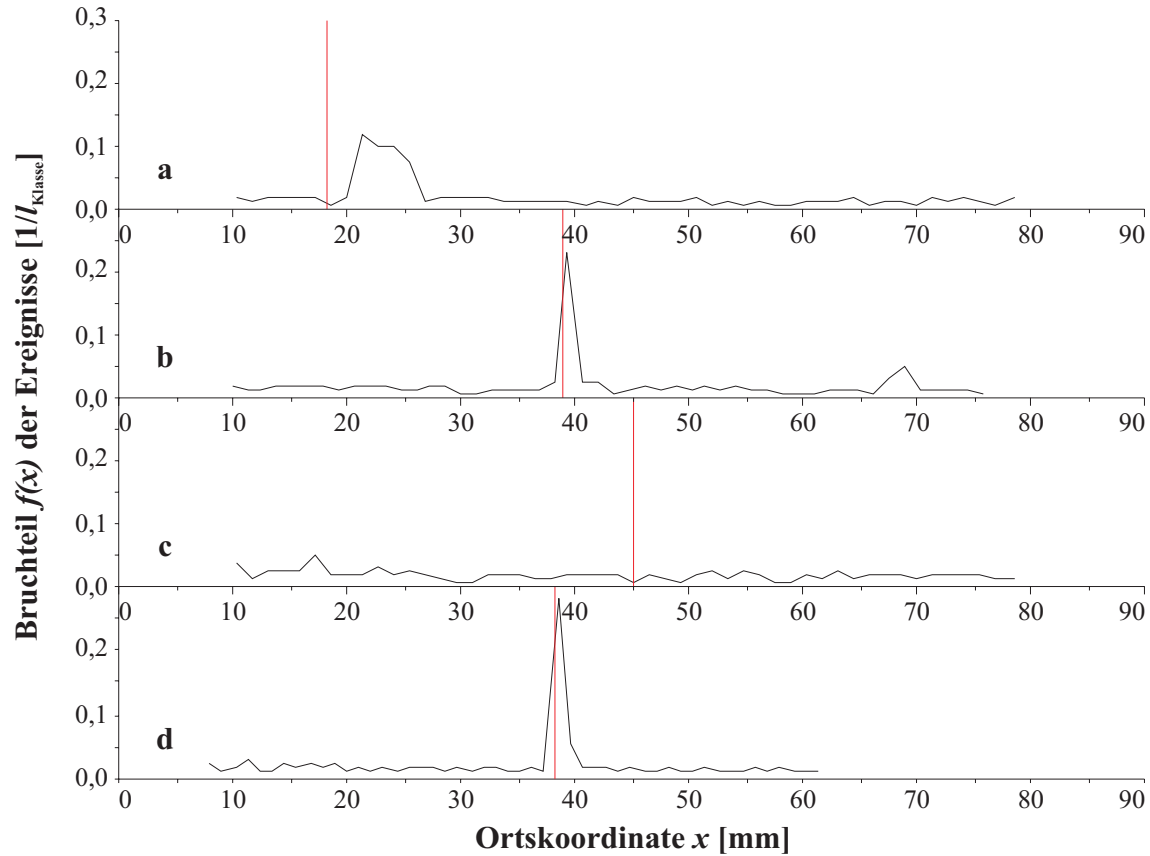


Abbildung 4.8: Räumliche Verteilung der Ereignisse für die in der Messlänge gebrochenen AlCu II-Proben. Darstellung vgl. Abb. 4.6. Kurve a zeigt die Probe 36_2. Ein deutliches Maximum ist etwas neben der Bruchstelle zu erkennen. Diese Verschiebung kommt wohl aus einer fehlerhaft bestimmten Schallgeschwindigkeit. Abb. b zeigt die Probe 36_3. Hier ist die Übereinstimmung zwischen Bruchstelle und Maximum der Verteilung sehr gut. Bei $x \approx 70$ mm ist ein Nebenmaximum zu sehen. Kurve c zeigt die Verteilung für Probe 36_5. Ähnlich wie bei den AlCu I-Proben ist hier keinerlei Häufung der Ereignisse zu erkennen. Kurve d zeigt Probe 36b_1, die auch in Abb. 4.7 zu sehen ist. Die Kurve zeigt ein Maximum, das sehr gut mit der Bruchstelle übereinstimmt. Nebenmaxima sind nicht zu erkennen.

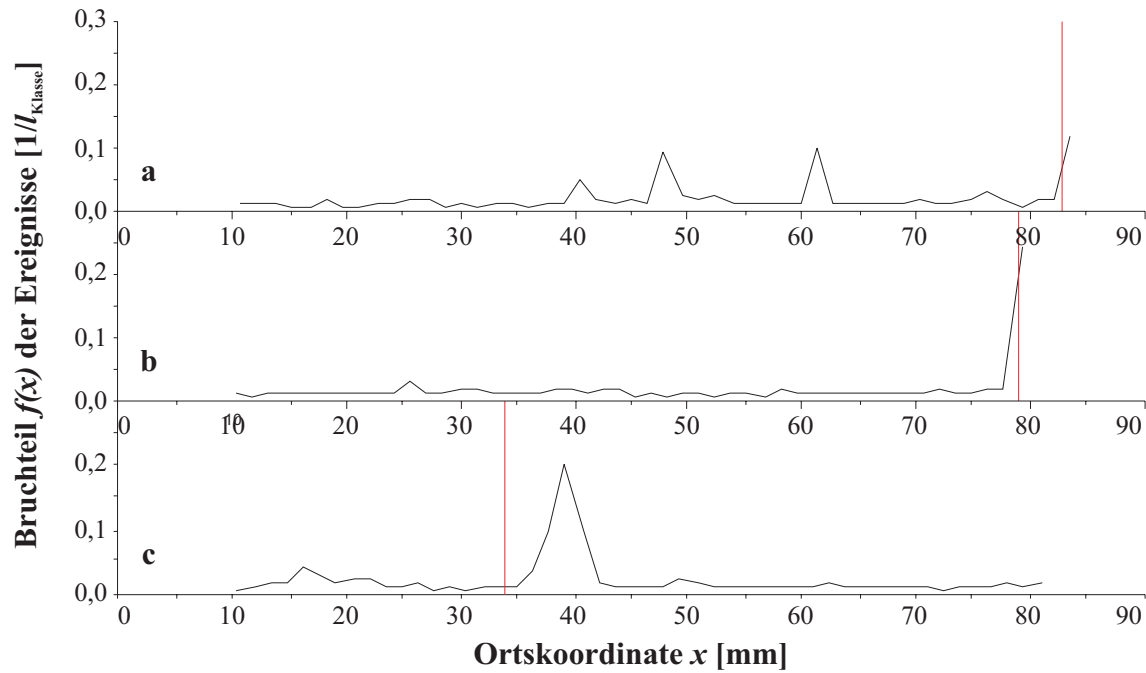


Abbildung 4.9: Räumliche Verteilung der Ereignisse für die in der Messlänge gebrochenen AlCu III-Proben. Darstellung vgl. Abb. 4.6. Abb. a zeigt die Probe 37_4. Neben einer deutlichen Häufung an der Bruchstelle sind noch zwei weitere Stellen zu erkennen, die ähnlich viele Ereignisse haben und eine die etwas hinter den anderen zurückbleibt. In Kurve b ist die Verteilung von Probe 37_6 dargestellt. Hier ist nur eine Stelle mit erhöhter Aktivität zu sehen. in Kurve c (38_2) ist das Maximum etwas gegenüber der makroskopischen Bruchstelle verschoben, was wohl auf eine fehlerhafte Bestimmung der Schallgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Es ist ein schwaches Nebenmaximum zu sehen.

stelle. Auch Kurve a weist ein Maximum auf, doch liegt dieses etwas neben der makroskopischen Bruchstelle. Diese Verschiebung liegt wohl an der Ungenauigkeit der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Eine etwas höhere Schallgeschwindigkeit würde die ganze Kurve dehnen, so dass das Maximum mit der Bruchstelle zur Deckung käme.

Einzig Abb. 4.8c weicht von den anderen ab. Hier ist keine räumliche Häufung zu erkennen, d.h. die Ausbildung der Bruchstelle erfolgte so abrupt, dass sie nicht in getrennte Ereignisse aufgelöst werden konnte. Damit zeigt diese Probe eher ein Verhalten wie es die AlCu I-Drähte aufweisen. Die Bruchspannung war allerdings mit 1307 MPa sogar höher als der Durchschnitt für die AlCu II-Proben, der bei 1282 MPa lag. Es ist möglich, dass sich in dieser Probe zufälligerweise eine Gegend befand, in der alle Fasern eine sehr ähnliche Festigkeit haben. Wie häufig ein solches Verhalten ist, ist schwer zu beurteilen, da nur vier Proben in der Messlänge brachen.

Abb. 4.9 zeigt die Histogramme der drei AlCu III-Proben, die innerhalb der Messlänge brachen. Sie zeigen ein ähnliches Verhalten wie die AlCu II-Proben. Alle Proben zeigen eine deutliche Häufung an oder nahe der Bruchstelle. Die Kurve 4.9a weist daneben mehrere andere Peaks auf. Hier entwickelten sich mehrere Schwachstellen, von denen letztendlich die schwächste zum Bruch der Probe führte. Auch die durchschnittliche Bruchspannung der AlCu III-Proben ist mit 1324 MPa nur wenig höher, als die der AlCu II-Proben. Die zusätzliche Auslagerung bringt nur graduelle Verbesserungen gegenüber den rein lösungsgeglühten Proben.

4.2.3 Rein-Aluminium-Matrix

Die Al II-Proben nehmen eine Mittelstellung zwischen den beiden Typen ein, zumindest soweit sich das aus den vorhandenen Daten ergibt. Nur eine einzige Probe brach innerhalb der Messlänge, so dass eine Verallgemeinerung nicht möglich ist. Zuerst einmal fällt auf, dass insgesamt sehr viel mehr Ereignisse beobachtet werden, als bei den anderen Proben. Zwar enthalten die Al II-Drähte fast doppelt so viele Fasern wie die Al I-Drähte, doch liegt die Anzahl der Ereignisse mehr als dreimal so hoch. Vereinzelte Ereignisse finden schon früh statt, besonders in einer ca. 10 mm breiten Umgebung um die spätere Bruchstelle. Über den ganzen Versuchsverlauf hinweg finden sich in dieser Umgebung mehr Ereignisse als in der restlichen Probe.

Wie bei den anderen Materialien nimmt die Amplitude mit zunehmender Spannung zu. In der unteren Hälfte finden sich dabei sehr viele Ereignisse mittlerer Amplitude, während diese in der oberen Hälfte eher selten sind. Dies liegt wohl daran, dass der untere Sensor etwas besseren Kontakt zur Probe hatte.

Dieses Bild spiegelt sich auch in Abb. 4.11 wieder. Eine erhöhte Häufigkeit in der Nähe der Bruchstelle ist zwar klar erkennbar, doch ist sie sehr viel breiter und auch niedriger als bei den AlCu II- und AlCu III-Proben.

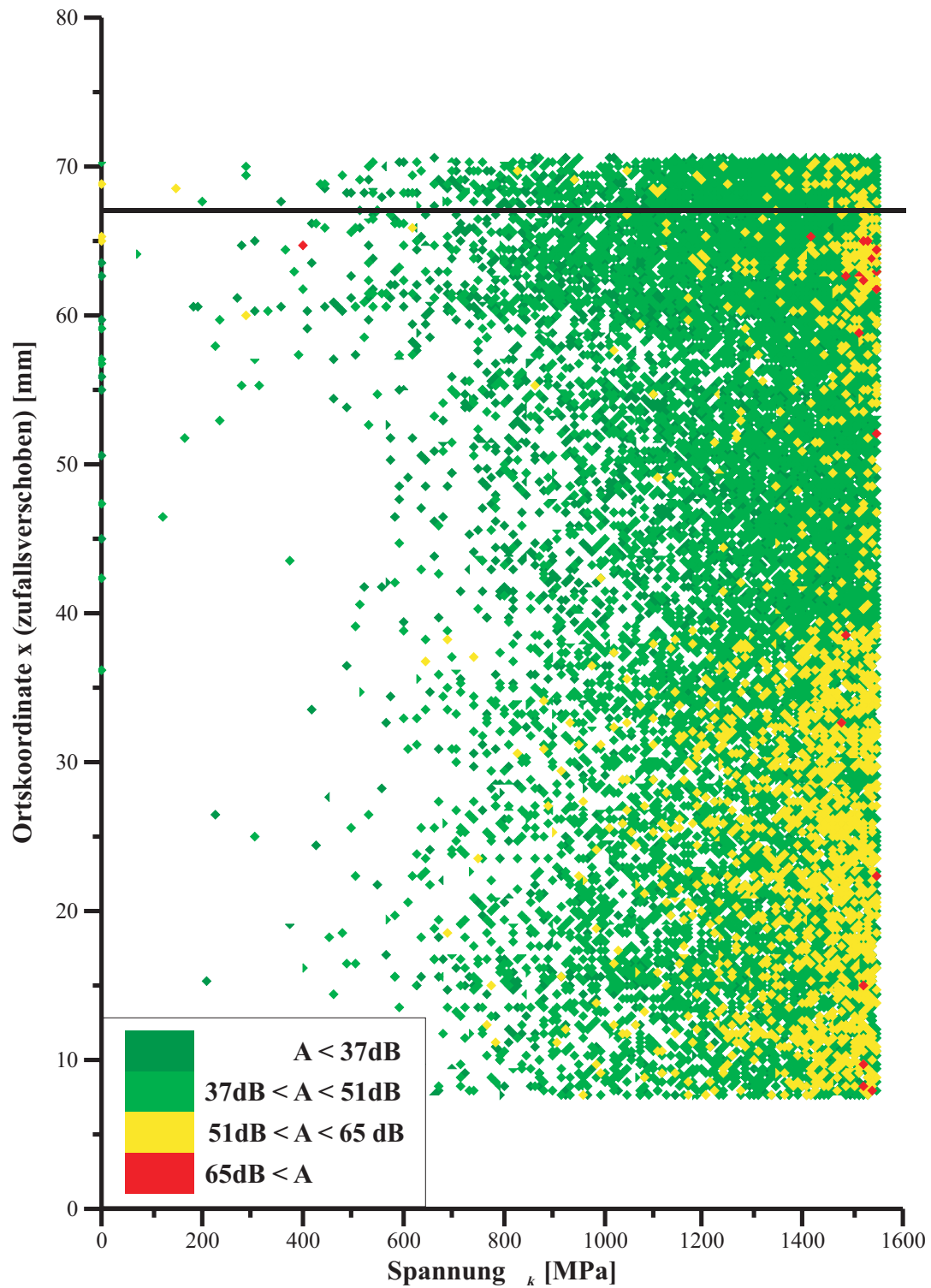


Abbildung 4.10: Räumliche Entwicklung der Schädigung für eine Al II-Probe (35_3). Darstellung vgl. Abb. 4.5. In der Umgebung der Bruchstelle ist ein breiter Bereich mit erhöhter Schallemissionsaktivität zu erkennen, jedoch keine scharfe Lokalisierung wie in Abb. 4.7.

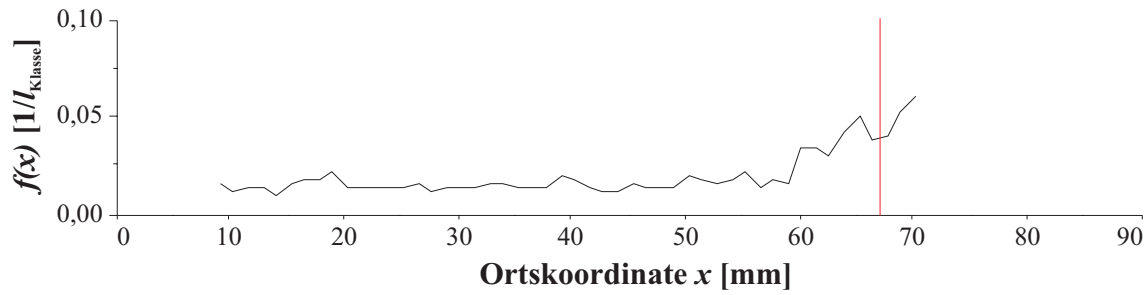


Abbildung 4.11: Räumliche Verteilung der Ereignisse für die in der Messlänge gebrochene Al II-Probe. Darstellung vgl. Abb. 4.6. Die rote Linie zeigt die makroskopische Bruchstelle der Probe(35_3). Im Bereich der Bruchstelle findet sich ein schwach ausgeprägtes Maximum, das aber dafür relativ breit ist.

Von den Al I-Proben brach keine einzige innerhalb der Messlänge. Eine definitive Aussage über die räumliche Entwicklung der Schädigung lässt sich deswegen nicht machen. Da diese Proben aber in allem ein ähnliches Verhalten wie die AlCu II- und AlCu III-Proben zeigten, ist zu vermuten, dass sie sich auch bezüglich der Lokalisierung von Ereignissen ähnlich verhalten.

4.2.4 Energiegehalt der Bruchstelle

Um den Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem sich die spätere Bruchstelle vom Rest der Probe unterscheidet, wurde die Entwicklung des Energiegehaltes von 2 mm breiten Scheiben des Drahtes verfolgt. Abb. 4.12 zeigt diese Entwicklung für einen AlCu I-Draht. Auf der linken Seite ist noch einmal die Kurve zu sehen, wie sie in Abb. 4.6a zu sehen war, allerdings mit vertauschten Achsen. Für die farbig markierten Stellen ist links die Entwicklung der kumulierten Energie aufgetragen. Zuerst wurden die Ereignisse ausgefiltert, die in einem 2 mm breiten Bereich um die betrachtete Stelle lokalisiert wurden. Danach wurde für jedes Ereignis die Summe der Energien von erstem und zweitem Kanal gebildet. Diese Gesamtenergie des Ereignisses wurde über die Spannung aufsummiert, um die in Abb. 4.12 dargestellten Kurven zu ergeben.

In diesem Diagramm, wie auch in den folgenden, ist die Bruchstelle rot markiert. Wie auch in Abb. 4.5 zeigen sich zuerst wenig Unterschiede. Kein Bereich erfährt deutlich weniger Energie als die anderen. Erst kurz vor dem Bruch nimmt die kumulative Energie im blauen und im roten Abschnitt gegenüber dem grünen Abschnitt plötzlich deutlich zu. Erst unmittelbar vor dem Bruch entwickelt sich dann auch ein Unterschied zwischen dem roten und dem blauen Bereich. Am Bruch selbst liegt die Energie im rot gekennzeichneten Abschnitt um ca. 50% höher als im blauen. Gegenüber dem grünen Bereich hat die Bruchstelle jedoch mehr als das 20fache an Energie gesehen.

Abb. 4.13 stammt von einer der AlCu II-Proben. Sie zeigt einen ähnlichen Verlauf. Ab etwa 100 MPa vor dem Bruch weicht das Verhalten der späteren Bruchstelle

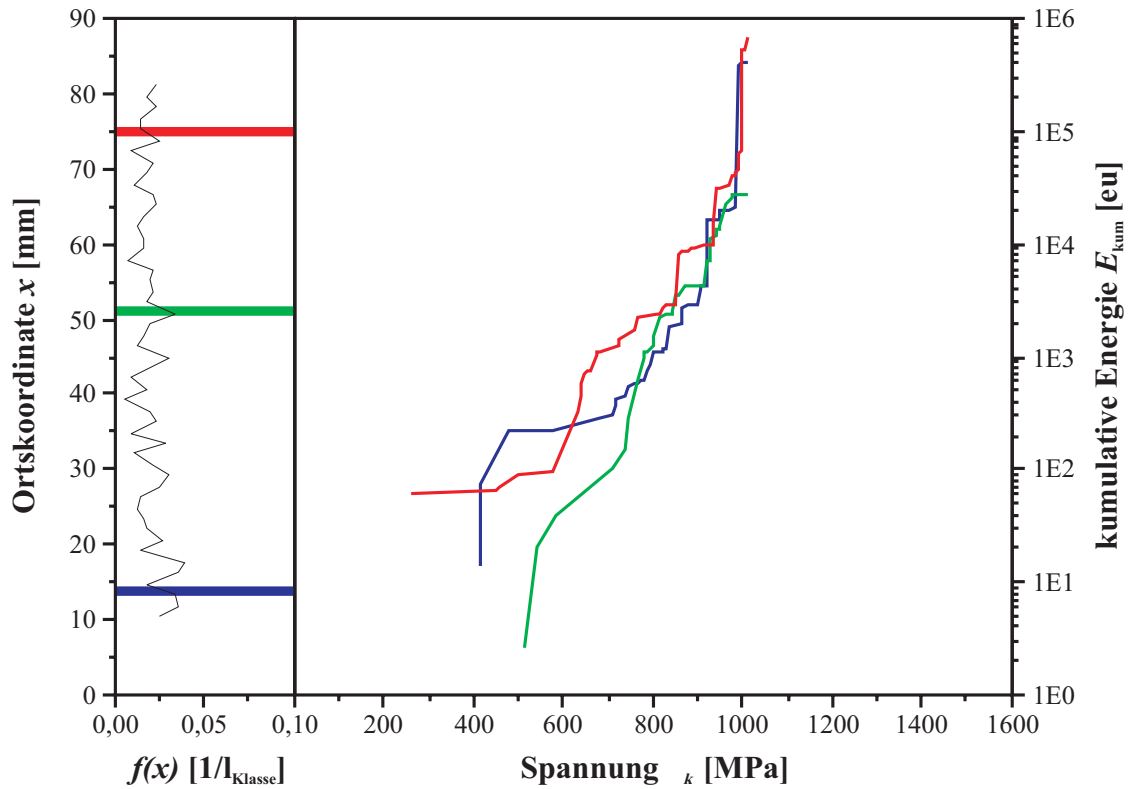


Abbildung 4.12: Energie der Bruchstelle - AlCu I (Versuch 34_1) Auf der linken Seite ist die räumliche Verteilung der Ereignisse dargestellt (vgl Abb. 4.6a). Auf der rechten Seite ist die kumulative Energie aller Ereignisse dargestellt, die in einem 2 mm breiten Abschnitt der Probe lokalisiert wurden. Die betrachteten Abschnitte sind in der linken Kurve farbig markiert. Die makroskopische Bruchstelle ist rot gekennzeichnet. Über weite Spannungsbereiche unterscheiden sich einzelnen Bereiche kaum. Kurz vor dem Bruch heben sich der rote und der blaue Bereich gegenüber dem Rest der Probe ab. Erst unmittelbar vor dem Bruch wird ein Unterschied zwischen der Bruchstelle und der konkurrierenden Schwachstelle erkennbar.

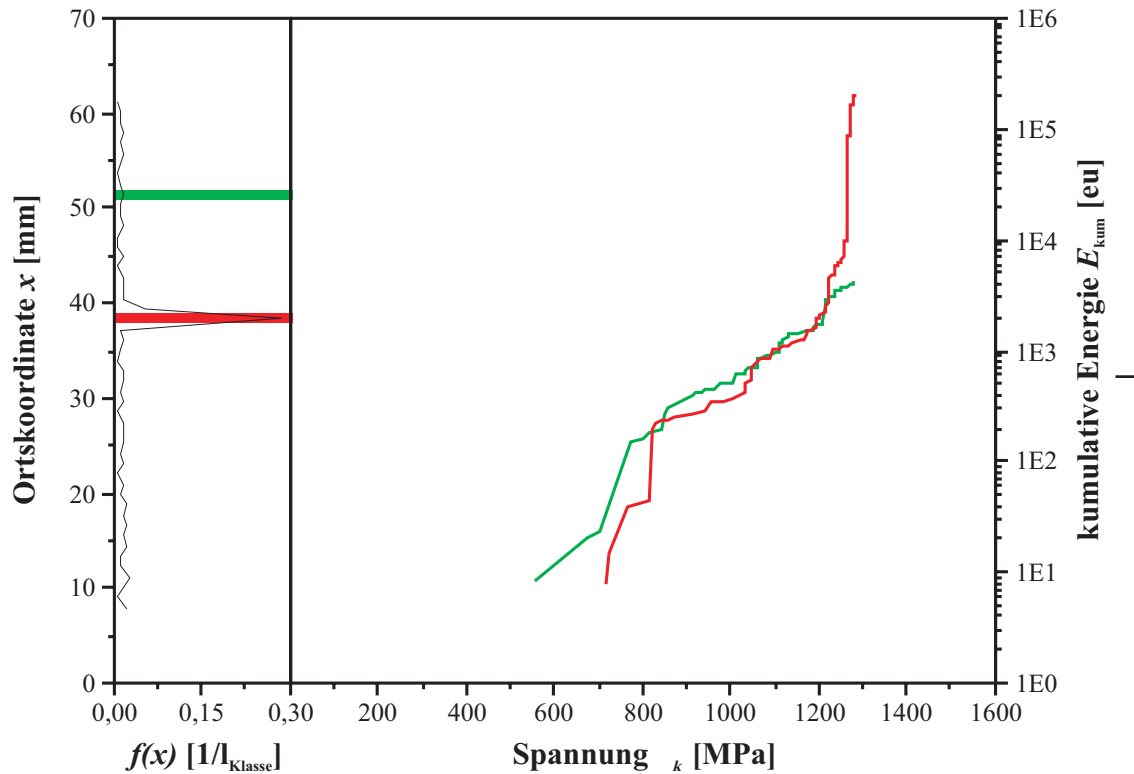


Abbildung 4.13: Energie der Bruchstelle - AlCu II (Versuch 36b_1). Das Diagramm entspricht Abb. 4.12. Im Bereich niedriger und mittlerer Spannungen ist kein Unterschied zwischen der Bruchstelle und dem Rest der Probe zu erkennen. Ab etwa 100 MPa vor dem Bruch zeigt die spätere Bruchstelle deutlich erhöhte Aktivität.

plötzlich von dem der anderen Stelle ab. Beim Bruch der Probe ist der Unterschied hier sogar noch größer; die Ereignisse aus dem Bereich der Bruchstelle besitzen letztendlich eine kumulative Energie, die 50mal so groß ist wie die des grün gekennzeichneten Abschnittes.

In Abb. 4.14 ist die Auftragung der kumulierten Energie gegen die Spannung für die einzige Probe zu sehen, die in der Messlänge gebrochen ist. Außer der Bruchstelle wurde für die Auswertung eine weitere Stelle im Bereich erhöhter Aktivität (blau markiert) sowie eine Stelle, die sich durch keine Besonderheit auszeichnete (grün markiert) ausgewählt. Bei einer Spannung von ca. 300 MPa findet im blauen Bereich ein sehr starkes Ereignis statt, was zu einem deutlichen Sprung in der blauen Kurve führt. Bei etwa 650 MPa kommt es zu einem ähnlich starken Ereignis im roten Bereich. Von da an zeigen die rote und die blaue Kurve den gleichen Verlauf. Am Bruch selbst hat der blaue Bereich sogar eine etwas höhere Energie gesehen, als die Bruchstelle selbst. Die Energie im blauen Bereich ist etwa 1,5mal so hoch, wie in der Umgebung der Bruchstelle, obwohl diese etwa 20% mehr Ereignisse aufweist.

Der grün gekennzeichnete Abschnitt bleibt über das ganze Experiment deutlich hinter den beiden anderen zurück. Hier finden sich nicht nur deutlich weniger Ereignisse, auch die Energie erreicht nur etwa ein Drittel des Wertes für den blauen Bereich.

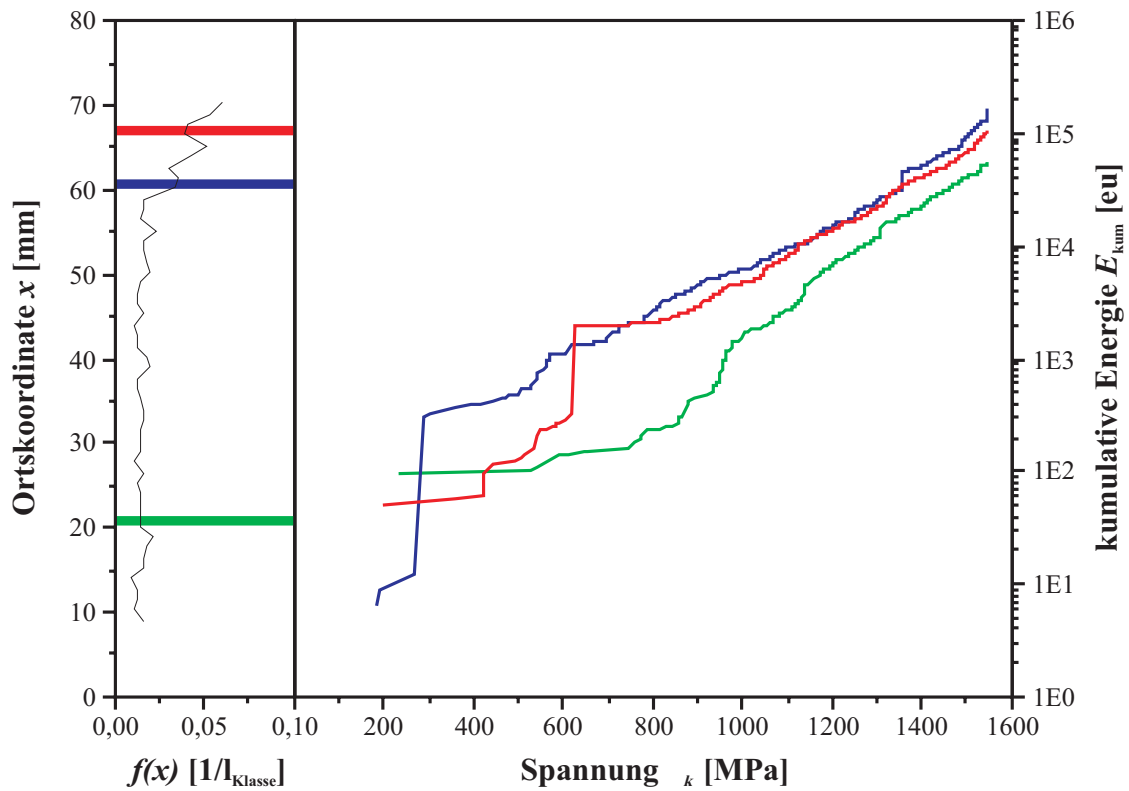


Abbildung 4.14: Energie der Bruchstelle - Al II (Versuch 35_3). Das Diagramm entspricht Abb. 4.12. Durch einige besonders starke Ereignisse bei niedrigen Spannungen erhöht sich die Energie im blauen und im roten Bereich deutlich. Diese Bereiche erfahren den ganzen Versuch über eine höhere Energie. Die Bruchstelle selbst bleibt in der Energie etwas hinter dem blauen Abschnitt zurück.

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen Batdorfs Modell vollständig. Für aussagekräftige Vorhersagen ist es aber unabdingbar, dass die Weibull-Parameter der Faser genau bekannt sind. Die Fließspannung der Matrix hat besonders Auswirkungen auf die Bruchfestigkeit des Verbundwerkstoffes. Der größte Teil der Mikrobrüche besteht dagegen, im Einklang mit dem Modell, aus Singlets, für die die Matrixeigenschaften irrelevant sind.

4.3 Sensorankopplung

Bei allen getesteten Möglichkeiten, die Sensoren an einer Probe anzukoppeln, kam es zu starken Signalverlusten. Im Hinblick auf Hochtemperatur-Versuche ist es besonders von Interesse, welchen Einfluß die Drahtlänge auf die Signalabschwächung hat. In einem solchen Versuch ist eine nicht unbeträchtliche Drahtlänge von Nöten, um die Sensoren aus der geheizten Zone entfernen zu können. Es zeigte sich, dass die Drahtlänge keinen oder nur wenig Einfluss auf die Signalverluste hat. Tatsächlich hat die Probe mit dem längsten Draht die besten Ergebnisse geliefert. Die kürzeste Probe schnitt am schlechtesten ab. Wahrscheinlich lag dieses unerwartete Verhalten an der unterschiedlichen Güte der Schweißverbindungen zwischen dem Draht und den Metallkegeln, die die Schallübertragung auf die Sensoren besorgten. Die Qualität der Sensorankopplung über Wellenleiter muss noch deutlich verbessert werden, bevor an Hochtemperaturversuche gedacht werden kann.

Zusammenfassung

Die Schallemissionsanalyse erwies sich als gutes Werkzeug zur Untersuchung des Bruchverhaltens in den untersuchten Materialien. Sowohl der Verlauf der gesamten Schädigung in einer Probe, als auch die räumliche Entwicklung der Schädigung konnte verfolgt werden. Die gewonnenen Daten machten einen Vergleich mit dem theoretischen Modell von Batdorf möglich.

Die Auswertung der Daten liefert ein gutes Bild vom Schädigungsprozess in den untersuchten Materialien. Bis zur Bruchspannung geht der Großteil der Ereignisse auf Singlets, also isolierte Faserbrüche zurück, ganz wie Batdorf es vorhersagt. Bei hohen Spannungen gibt es eine gewisse Anzahl von Ereignissen mit höherer Amplitude. Diese könnten durch Mehrfach-Faserbrüche zustande kommen. Zwar lässt sich die Energie berechnen, die bei einem einzelnen Faserbruch freigesetzt wird, doch ist nicht bekannt, wie groß die Energie ist, die davon noch am Sensor ankommt. Auch kann je nach Art der Reflexion und Überlagerung der Schallwellen die Energie, die am Sensor gemessen wird, stark variieren. Damit kann aus den Messwerten nicht bestimmt werden, wie viele Fasern in einem einzelnen Ereignis gebrochen sind. Auch ein Vergleich mit Batdorf hilft hier nicht weiter, da die Gleichungen keine Aussage darüber machen, ob ein Duplet aus einem gerade erst entstandenen Singlet entsteht, was einem Doppel-Faserbruch entspricht, oder ob eine Faser in der Umgebung eines schon lange existierenden Singlets bricht und so das Duplet erzeugt. Dies gilt für alle untersuchten Materialien.

Nur in den Al II-Drähten zeichnet sich die spätere Bruchstelle praktisch von den ersten Ereignissen an ab. Die Entwicklung der Energie bei dieser Probe zeigt, dass einige wenige starke Ereignisse zu Beginn des Versuches das Verhalten über den ganzen Spannungsbereich festlegen. Da keine Vergleichsprobe vorliegt, kann

die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden, dass diese Probe eine Schwachstelle enthielt, die normalerweise nicht in diesem Material vorkommt. Für diese Deutung spricht auch, dass diese Probe die zweitniedrigste Bruchspannung unter den Al II-Drähten aufweist.

In den anderen Materialien macht sich die spätere Bruchstelle erst kurz vor dem Bruch bemerkbar. Dabei kommt es in einigen Fällen vor, dass sich mehrere konkurrierende Schwachstellen herausbilden, die untereinander wenig Unterschiede zeigen, jedoch eine deutlich erhöhte Schallaktivität gegenüber dem Rest der Probe aufweisen. Dabei muss die tatsächliche Bruchstelle nicht unbedingt die meisten bzw. die stärksten Ereignisse zeigen. Auch dieses Ergebnis steht im Einklang mit Batdorfs Modell. Zwar ist die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung eines i-plets in der Umgebung eines i-1-plets durch die dort herrschenden Spannungsüberhöhungen erhöht, doch können mehrere benachbarte Fasern auch praktisch gleichzeitig brechen, wenn sie eine nahezu identische Bruchspannung besitzen. Somit kann es zu Sprüngen im Energiegehalt kommen, und eine Stelle schlussendlich zum Bruch führen, die vorher nicht zu den am stärksten geschädigten Bereichen gehörte. Erst das erste instabile i-plet legt die Bruchstelle endgültig fest, doch findet der Bruch der ganzen Probe dann so schnell statt, dass er in der Schallemissionsanalyse nicht mehr aufgelöst wird.

Batdorfs Modell wird durch die Ergebnisse bestätigt, doch kann das Verhalten keines der Materialien allein durch die in der Literatur allgemein akzeptierten Weibull-Parameter für Nextel™ 610-Fasern erklärt werden. Eher scheint eine bimodale Verteilung der Faserfestigkeiten vorzuliegen, sofern die Ereignisse im mittleren Spannungsbereich nicht von Matrix-Plastizität verursacht wurden, was aber unwahrscheinlich erscheint. Bei den Al II-Drähten wurde der Herstellungsprozess der Fasern geändert, was zu ovalen Fasern führt. Bei diesem Material gibt es keinerlei Anzeichen auf ein Vorhandensein einer Faserpopulation mit einem Weibull-Modul im Bereich von $m \approx 12$.

Eine mögliche Erklärung für diese bimodale Verteilung findet sich bei Wilson, wie sie bereits in Abschnitt 1.2.1 dargestellt wurde. Bei verschiedenen Methoden den Weibull-Modul zu bestimmen, fand er verschiedene Weibull-Moduli. Er führt dies darauf zurück, dass die Defekte innerhalb einer Faser ähnlich in ihrer Größe seien, zwischen verschiedenen Fasern aber variieren. Einen Einfluss darauf könnten Schweißnähte haben, die entstehen, wenn zwei Fasern beim Sintern in engen Kontakt kommen.

Wird die Bruchspannung nach Batdorfs Modell und den allgemein akzeptierten Weibull-Parametern berechnet, so liegt sie deutlich über den experimentell ermittelten Werten. Dies könnte auf einen gewissen Anteil schwächerer Fasern zurückzuführen sein, der in der theoretischen Berechnung nicht berücksichtigt wurde.

Die Schallemissionsanalyse erwies sich als sehr gut geeignet, um die Schädigung

in einem faserverstärkten Metallmatrix-Verbundwerkstoff bei Raumtemperatur zu verfolgen. Auch in Kriechversuchen sind interessante Ergebnisse zu erwarten, doch muss dafür eine Möglichkeit gefunden werden, die hitzempfindlichen Sensoren aus der beheizten Zone zu entfernen, ohne die Schallsignale signifikant zu schwächen.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Weibull-Verteilung der Fasern	29
1.2	Batdorfs Model: Spannungskonzentration um einen Faserbruch	30
1.3	Batdorfs Model: erstes Auftreten der i-plets	32
1.4	Batdorfs Model: Versagen der Probe	32
2.1	Aufbau für die Zugversuche	38
2.2	Kalibrierung der Lokalisierung	40
2.3	Messgrößen und Wellenform	42
2.4	Auswirkung der Zufallsverschiebung der Ortskoordinate	43
2.5	Sensorankopplung über Wellenleiter	44
3.1	Metallographische Aufnahmen der Al I-Drähte	48
3.2	Metallographische Aufnahmen der Al II-Drähte	49
3.3	Metallographische Aufnahmen der AlCu-Drähte	50
3.4	Spannungs-Zeit-Diagramm	51
3.5	Schallemissionsaktivität	52
3.6	Wellenform von erstem und zweitem Kanal	53
3.7	Sensorankopplung - Ergebnisse	54
4.1	Amplitude gegen Spannung: Maximal-Amplitude und erste Amplitude	56
4.2	Amplitudenverteilung: Maximal-Amplitude und erste Amplitude . . .	56
4.3	Ereignisrate gegen Spannung: Al I und Al II	58
4.4	Ereignisrate gegen Spannung: AlCu	59
4.5	Räumliche Verteilung der Schallereignisse - keine Lokalisierung	65
4.6	Räumliche Verteilung der Ereignisse: AlCu I	66

4.7	Räumliche Verteilung der Schallereignisse - ausgeprägte Lokalisierung	67
4.8	Räumliche Verteilung der Ereignisse: AlCu II	68
4.9	Räumliche Verteilung der Ereignisse: AlCu III	69
4.10	Räumliche Verteilung der Schallereignisse - Ansätze einer Lokalisierung	71
4.11	Räumliche Verteilung der Ereignisse: Al II	72
4.12	Energie der Bruchstelle - AlCu I	73
4.13	Energie der Bruchstelle - AlCu II	74
4.14	Energie der Bruchstelle - Al II	75
C.1	Fließdiagramm für die allgemeine Datengewinnung und -verarbeitung	96
C.2	Fließdiagramm für die Abb. 4.3 und 4.4	97
C.3	Fließdiagramm für die Abb. 4.5 bis 4.10	98
C.4	Fließdiagramm für die Abb. 4.6, 4.8, 4.9 und 4.11	99
C.5	Fließdiagramm für die Abb. 4.12 bis 4.14	100

Tabellenverzeichnis

1.1	Fasereigenschaften	19
1.2	Matrixeigenschaften	20
1.3	Verbundeigenschaften aus der Literatur	21
1.4	Batdorfs Model: nächste Nachbarn und Spannungskonzentration	31
2.1	Übersicht über die untersuchten Materialien	35
2.2	Metallographische Präparation	36
2.3	Getestete Sensorankopplungen	44
2.4	Wellenformen für den Test der Sendorankopplungen	45
3.1	Experimentell bestimmter Fasergehalt	48
3.2	Durchschnittliche Ergebnisse aller Materialien	52
4.1	Batdorfs Model: verwendete Parameter	60
4.2	gemessene Weibull-Moduli	62
4.3	Vergleich der experimentell bestimmten Bruchspannung zur Theorie	63
A.1	Ergebnisse für das Material Al I: alle Proben	90
A.2	Ergebnisse für das Material Al II: alle Proben	90
A.3	Ergebnisse für das Material AlCu I: alle Proben	90
A.4	Ergebnisse für das Material AlCu II: alle Proben	91
A.5	Ergebnisse für das Material AlCu III: alle Proben	91
B.1	Einstellungen für parameter-basierte Schallaufzeichnung	93
B.2	Einstellungen für Wellenformen	93
B.3	Einstellungen für Parameterkanäle	93
C.1	In den Fließdiagrammen verwendete Symbole	95

Literaturverzeichnis

- [1] H.E. DEVE C. MCCULLOUGH, *Continuous Fiber-Reinforced Al Composites: A New Generation*. In: JOM Juli 1995, S. 33-37
- [2] E. NEUSSL, P.R. SAHM, H.M. FLOWER, *Continuous Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites - Influence of Alloy Composition on Mechanical Properties*. In: Advanced Engineering Materials 2000, S. 587-592
- [3] 3M COMPANY, *Nextel™ Ceramic Textile Technical Notebook*, St. Paul, Minn., USA: 3M Company, 2001
- [4] B. MOSER, A. ROSSOLL, L. WEBER, O. BEFFORT, A. MORTENSEN, *Nextel™ 610 alumina fibre reinforced aluminium: influence of matrix and process on flow stress*, In: Composites Part A 2001; S. 1067-1075.
- [5] D.M. WILSON, *Statistical strength of Nextel™ 610 and Nextel™ 720 fibers*, In: J. Mater. Sci. 1997, S. 2535-2542
- [6] D.M. WILSON, L.R. VISSER, *High performance oxide fibers for metal and ceramic composites*. Processing of Fibers & Composites Conference, Barga, Italien, 22. Mai 2000
- [7] B. MOSER, *Deformation and fracture of continuous alumina fibre reinforced aluminium composites*; Lausanne, École Polytechnique Federale de Lausanne, Faculté STI Section des Matériaux, Diss., 2002
- [8] C. MCCULLOUGH, A. MORTENSEN, P.S. WERNER, H.E. DÈVE, T.L. ANDERSON, *Fiber reinforced aluminium matrix composite wire*, Unites States Patent 6,245,425 B1, 12. Juni 2001

- [9] B. MARUYAMA, *Continuously Reinforced MMCs*. In: A. Kelly, C.H. Zweben (Hrsg): *Comprehensive Composite Materials*, Bd. 3, Oxford: Pergamon Press, 2000, S. 717-739
- [10] A.S. CHEN, R.S. BUSHBY, V.D. SCOTT, *Deformation and damage mechanisms in fibre-reinforced aluminium alloy composites under tension*. In: *Composites Part A* 1997, S. 289-297
- [11] T. PACHECO, H. NAYEB-HASHEMI, H.E.M. SALLAM, *The effects of matrix and fiber properties on the mechanical behavior and acoustic emission in continuous fiber reinforced metal matrix composites*. In: *Materials Science and Engineering A* 1998, S. 88-96
- [12] C.B. SCRUBY, *An introduction to acoustic emission*. In: *J. Phys. E: Sci. Instrumen.* 1987, S. 946-953
- [13] M.A. HAMSTAD, *On Determination of Arrival Time of Arrival Times for Acoustic Emission Source Location in Composites*.
- [14] A. WANNER, T. BIDLINGMAIER, S. RITTER, *Fiber Fragmentation and Acoustic Emission*, *Journal of Acoustic Emission* 14 (Juli - Dezember 1996), Nr. 3-4, S. S47 - S60
- [15] M. WEVERS, M. SURGEON, *Acoustic Emission and Composites*. In: A. Kelly, C.H. Zweben (Hrsg): *Comprehensive Composite Materials*, Bd. 5, Oxford: Pergamon Press, 2000, S. 345-357
- [16] J. AWERBUCH, J.G. BAKUCKAS, *On the Applicability of Acoustic Emission for Monitoring Damage Progression in Metal Matrix Composites*. In: ?(Hrsg): *Metal Matrix Composites* ??
- [17] T.H. COURTNEY, *Mechanical behaviour of materials*. 2. Auflage. Boston: McGraw-Hill; 2000, S. 257-263. - ISBN 0-07-116171-6
- [18] S.B. BATDORF, *Tensile Strength of Unidirectionally Reinforced Composites - I*. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 1982, S. 153-164
- [19] S.B. BATDORF, R. GHAFARIAN, *Tensile Strength of Unidirectionally Reinforced Composites - II*. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 1982, S. 165-176
- [20] W. WEIBULL, *A statistical theory of the strength of materials*. In: *Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar* Nr. 151 (1939), S. 1-45

Layouthilfen:

- [21] H. F. EBEL, C. BLIEFERT, *Schreiben und Publizieren in den Naturwissenschaften*, Weinheim: Wiley-VCH; 4. völlig neu bearbeitete Auflage, 1998

- [22] M. GOOSSENS, F. MITTELBACH, A. SAMARIN, *Der L^AT_EX Begleiter*, Bonn: Addison-Wesley Publishing Company; 1995

ANHANG A

Ergebnisse

Die folgenden Tabellen zeigen die wichtigsten Ergebnisse für die ausgewerteten Proben und die sich daraus ergebenden Mittelwerte, wie sie in Tab. 3.2 übernommen wurden. Desweiteren finden sich in diesem Anhang zwei CDs, die alle Rohdaten der Versuche enthalten. Dabei enthält CD 1 die Daten zu den Proben mit rein-Al-Matrix, CD 2 die Daten zu den Proben mit AlCu-Matrix sowie zu den Versuchen zur Ankopplung. In diesen Datensätzen finden sich auch alle nicht ausgewerteten Proben.

Die Datei Parameter_alleProben.xls, die auf beiden CDs enthalten ist, enthält sämtliche Daten zu den Zugproben, die nicht in den Schallemissionsdatensätzen gespeichert sind. Die letzte Spalte dieser Tabelle gibt die Gründe an, falls eine Probe nicht ausgewertet wurde.

Zu jedem Versuch gehören zwei Dateien. Die Datei mit der Endung *.pri enthält die Daten aus der parameter-basierten Schallemissionsmessung. Die Dateien mit der Endung *.tra enthalten die Wellenformen. Diese Dateien wurden zusätzlich mit einem handelsüblichen Programm gepackt. Um die Datensätze lesen zu können, wird das Programm Visual Studio™ von Vallen Systeme benötigt.

Tabelle A.1: Ergebnisse für das Material Al I: alle Proben

Probe	N_{Treffer}	n_{lok}	f_{lok}	n_{wert}	σ_{Bruch} MPa	x_{sens} mm	x_{Bruch} mm
30	35339	13606	77,00	4657	1424,0	64	-
31_1	15397	7038	91,42	2202	1270,1	70	-
32_3	30075	10803	71,84	4310	1452,5	64	-
32_4	22428	7153	63,79	2386	1333,7	66	-
32_5	16605	5363	64,60	1728	1278,5	65	-
33_3	30650	11750	76,67	3342	1368,7	70	-
33_5	30239	11163	73,83	1931	1305,0	66	-
33_6	34294	12864	75,02	2638	1287,1	72	-
Mittelwert	26878	9968	74,27	2899	1340,0	67	-

Tabelle A.2: Ergebnisse für das Material Al II: alle Proben

Probe	N_{Treffer}	n_{lok}	f_{lok}	n_{wert}	σ_{Bruch} MPa	x_{sens} mm	x_{Bruch} mm
35_3	82606	32826	79,48	17374	1548,4	78	67
35_4	94011	39799	84,67	21030	1561,8	101	-
35_5	54973	19580	71,23	9004	1575,7	89	-
35_6	94582	41913	88,63	21263	1586,4	91	-
35_7	77879	32514	83,50	17109	1471,4	105	-
Mittelwert	80810	33326	81,50	17556	1548,7	93	-

Tabelle A.3: Ergebnisse für das Material AlCu I: alle Proben

Probe	N_{Treffer}	n_{lok}	f_{lok}	n_{wert}	σ_{Bruch} MPa	x_{sens} mm	x_{Bruch} mm
34_1	11101	3873	69,78	1695	1015,6	90	14
34_2	14278	5515	77,25	1693	1129,9	84	72
34_3	10662	3594	67,42	1936	1081,5	87	-
34_4	8114	3107	76,58	1546	1047,0	82	-
34_5	9797	3731	76,17	1947	1048,3	87	-
34b_1	20471	7674	74,97	3510	1109,4	85	-
34b_2	14164	4854	68,54	2051	1064,2	85	-
34b_4	12829	4533	70,67	2258	1117,5	94	-
34b_6	11431	4361	76,30	2403	1094,8	92	-
Mittelwert	12539	4582	73,08	2215	1078,7	87	-

Tabelle A.4: Ergebnisse für das Material AlCu II: alle Proben

Probe	N_{Treffer}	n_{lok}	f_{lok}	n_{wert}	σ_{Bruch} MPa	x_{sens} mm	x_{Bruch} mm
36_2	18370	6796	73,99	2997	1300,1	87	18
36_3	14399	6728	93,45	3469	1324,3	84	39
36_5	17789	7916	89,00	1221	1307,0	87	45
36b_1	10116	4410	87,19	2306	1285,3	68	38
36b_2	9294	3464	74,54	1296	1205,3	90	-
36b_3	12912	5305	82,17	2839	1271,2	97	-
36b_4	13827	5938	85,89	2812	1297,7	77	-
36b_6	8012	2613	65,23	1351	1267,3	74	-
Mittelwert	13090	5396	81,43	2286	1282,3	83	-

Tabelle A.5: Ergebnisse für das Material AlCu III: alle Proben

Probe	N_{Treffer}	n_{lok}	f_{lok}	n_{wert}	σ_{Bruch} MPa	x_{sens} mm	x_{Bruch} mm
37_1	7927	3158	79,68	1656	1210,6	89	-
37_2	16593	7460	89,92	3803	1354,0	77	-
37_3	19463	7752	79,66	3844	1379,1	89	-
37_4	18378	7709	83,89	3901	1366,3	93	83
37_5	17892	6488	72,52	4184	1380,3	91	-
37_6	15877	7286	91,78	4037	1366,3	88	79
38_1	16155	6318	78,22	3229	1311,0	90	-
38_2	13662	4784	70,03	3019	1253,0	90	34
38_3	10024	3133	62,51	2791	1302,0	73	-
38_4	12546	4769	76,02	1919	1312,9	83	-
Mittelwert	14852	5886	70,60	3238	1323,6	86	-

ANHANG B

Einstellungen der Schallemissionsapparatur

Für die Schallemissionsanalyse wurde ein Gerät vom Typ „AMSY-4“ der Firma Vallen Systeme, Icking, verwendet.

Tabelle B.1: Einstellungen für die parameter-basierte Aufzeichnung von Schallereignissen

Schwellwert	29,8 dB
Duration Discrimination Time	150 μ s
Rearm Time	150,4 μ s
Verstärkung	34dB

Tabelle B.2: Einstellungen für die Aufzeichnung der Wellenformen

Sample Rate	5MHz
Samples per Set	2048
PreTrigger Samples	200
Trigger Mode	Pool

Tabelle B.3: Einstellungen für die Parameterkanäle

Intervall	200ms
Clock	10ms
Status Intervall	10s

ANHANG C

Datenverarbeitung

Im folgenden werden die wichtigsten Schritte der Datenverarbeitung im Fließschema gezeigt. Die verwendeten Symbole haben die in Tabelle C.1 angegebene Bedeutung.

Tabelle C.1: In den Fließdiagrammen verwendete Symbole

Symbol	Bedeutung
	Dateien mit Schallemissionswerten; liegt für jeden Versuch getrennt vor
	Datei mit den makroskopischen Größen aller Proben
	Rechenoperation oder Messung
	Ausschlußkriterium für Daten; nur Daten, die das Kriterium erfüllen, werden weiterverarbeitet
	graphische Darstellung

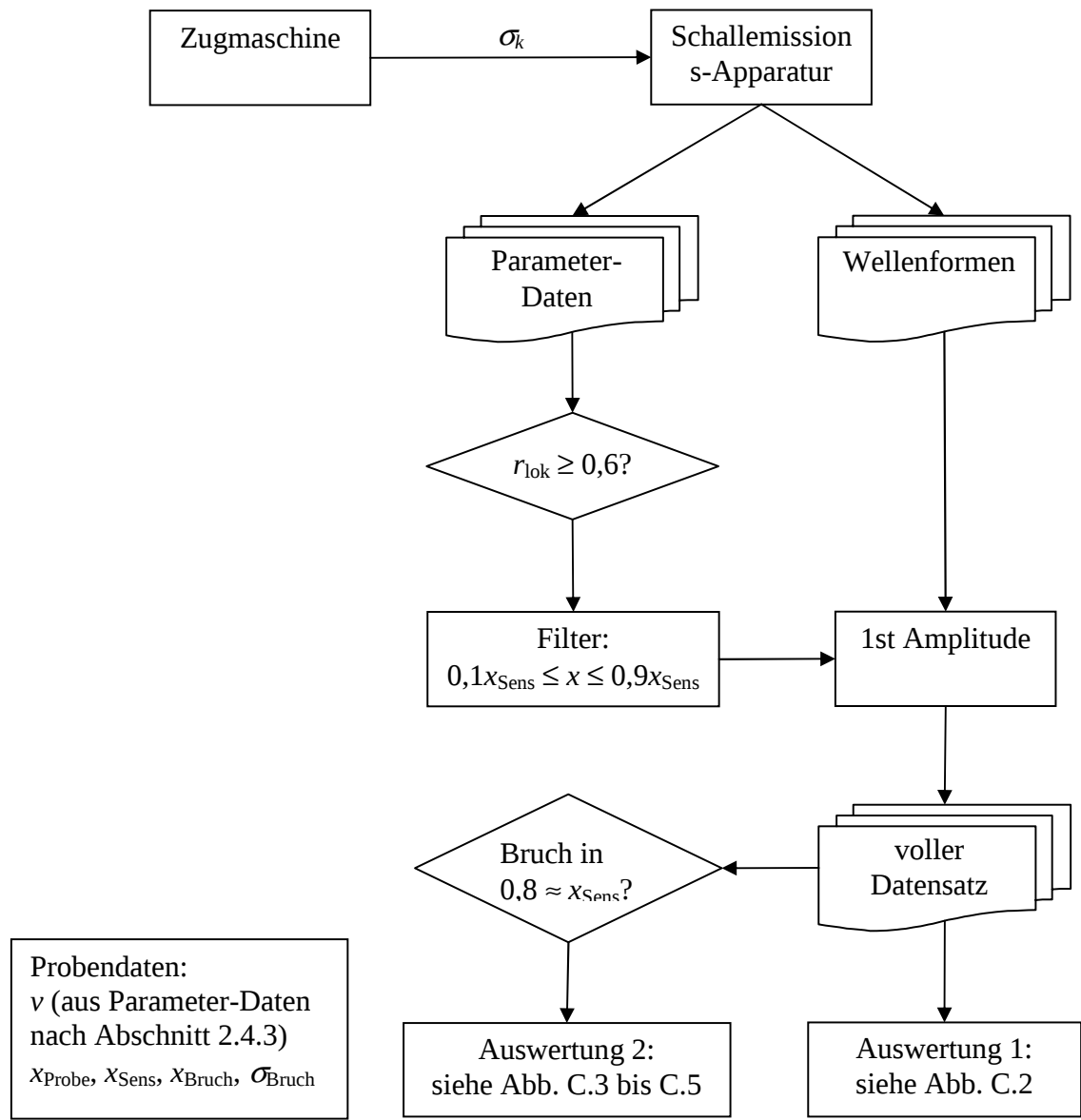


Abbildung C.1: Fließdiagramm für die allgemeine Datengewinnung und -verarbeitung.

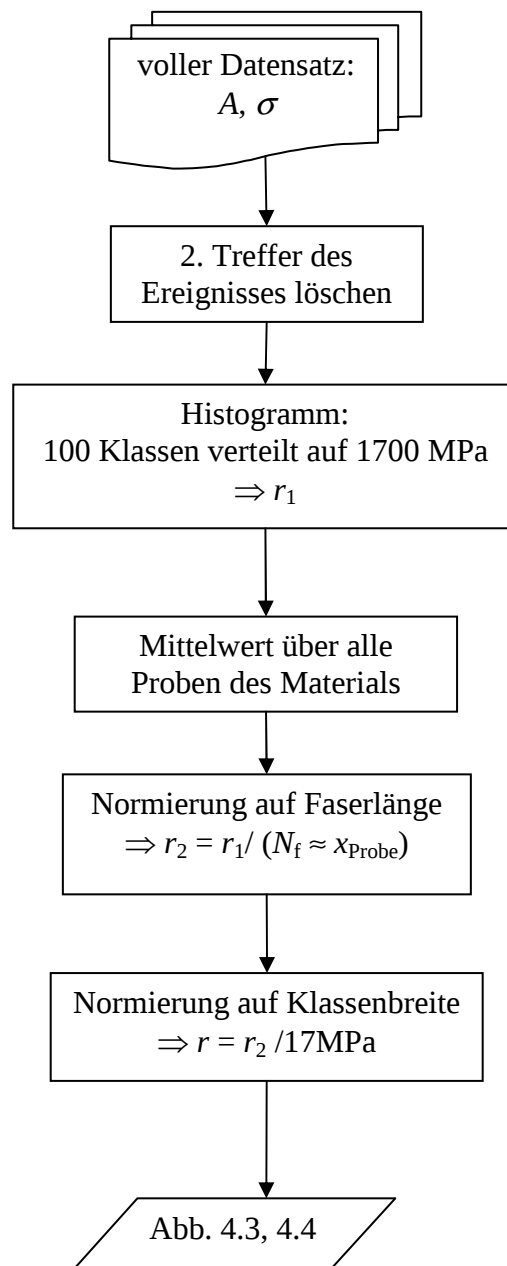


Abbildung C.2: Fließschema für die Diagramme zur Entwicklung der Ereignisrate über der Spannung (Abb. 4.3 und 4.4).

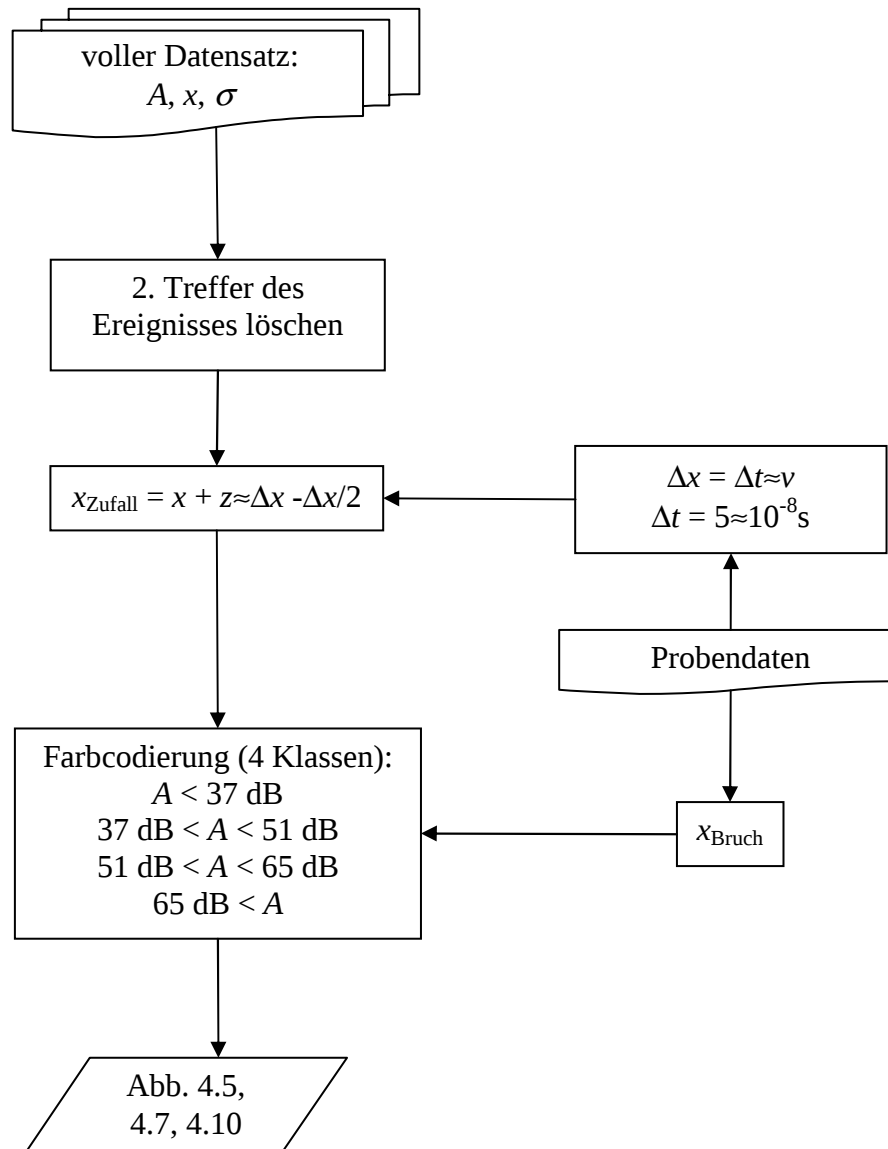


Abbildung C.3: Fließschema für die Diagramme zur räumlichen Entwicklung der Schädigung (Abb. 4.5, 4.7 und 4.10).

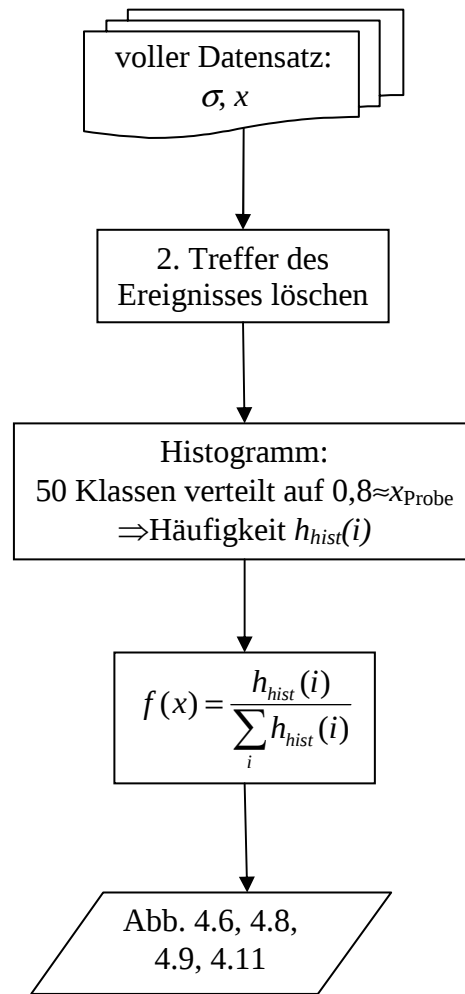


Abbildung C.4: Fließschema für die Diagramme zur örtlichen Häufung der Ereignisse in den letzten 100 MPa vor dem Bruch (Abb. 4.6, 4.8, 4.9 und 4.11).

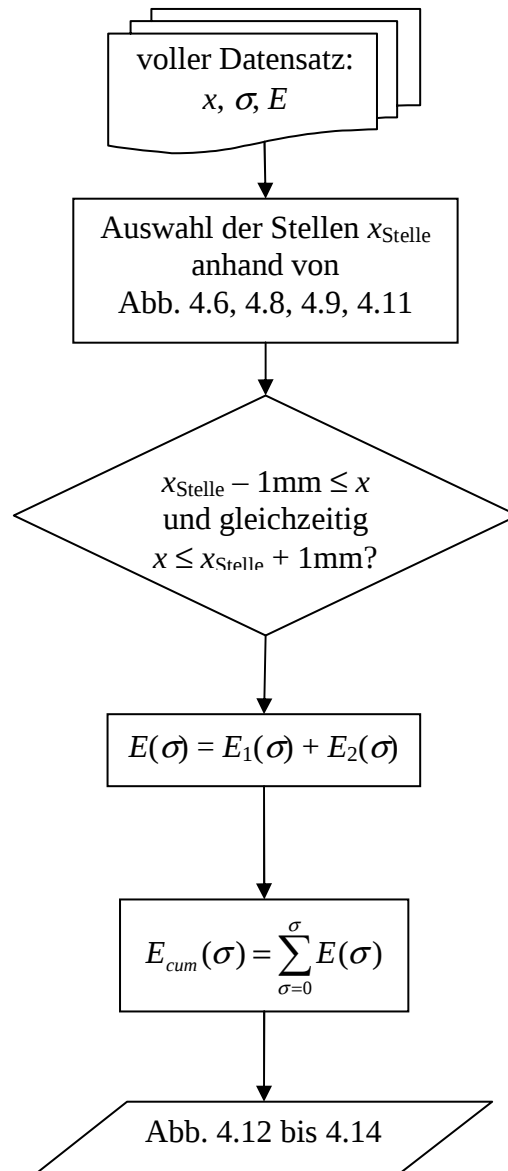


Abbildung C.5: Fließdiagramm für die Entwicklung des Energiegehalts ausgewählter Stellen (Abb. 4.12 bis 4.14).

ANHANG D

Quellcode des Programmes „First Amplitude“

Das Programm „First Amplitude“ hat folgende Funktionalität: Es bietet dem Benutzer die Möglichkeit eine Datei, die Wellenformen enthält (TR-File) und eine Kontrolldatei auszuwählen. Diese Kontrolldatei muss im ASCII-Format abgespeichert sein, und die Daten zu den auszuwertenden Treffern in Tabellenform enthalten. Dabei müssen alle Werte zu einem Treffer in einer Zeile stehen. Die einzelnen Spalten müssen durch Tabulatoren getrennt sein. Der Index der Wellenform muss an zweiter Stelle stehen. Nach diesem Teil erfolgt die eigentliche Auswertung für die der Quelltext unten angegeben ist. Das Programm liest die Kontrolldatei aus und bestimmt zu jedem Treffer den zugehörigen Index¹. Danach sucht es nach der Wellenform, die den entsprechenden Index hat. Aus dieser Wellenform bestimmt es die folgenden Größen:

- Den Zeitpunkt der Schwellwertüberschreitung relativ zum Beginn der Aufzeichnung der Wellenform (Triggerzeitpunkt)
- Die Amplitude der ersten Halbschwingung, die den Schwellwert überschreitet. Der Wert wird in dB ausgegeben
- Den Kanal, der die Wellenform aufgezeichnet hat.
- Den Index der Wellenform.

¹ Visual AE™ von Vallen Systeme, mit dem die Kontrolldateien erstellt wurden, gibt nur für den ersten Treffer eines Ereignisses den Index aus.

Ist die Analyse einer Wellenform abgeschlossen, so schreibt das Programm die Werte in eine neue ASCII-Datei. Dabei hängt es die berechneten Werte an die Zeile an, die es aus der Kontrolldatei entnommen hat.

```
'Definition of local variables and setting them to zero.
'Variables in comments are public and defined in a different module.

'error handling
Dim firstError As Boolean = False
'False = Error in opening TR-File

'file dependant variables
'Dim SetsOnFile As Integer = 0
'Number of waveforms (=sets) in the TR-File
'Dim SamplesPerSet As Integer
'Samples (=datapoints) in one set
'Dim RateOfSampling As Integer
'sampling rate (=datapoints per second) of the set

'set dependant variables
'Dim PreTriggerSamples As Integer
'number of samples preceeding the trigger-point
'Dim Threshold As Single
'(positiv) threshold
'Dim FactorAmplitudeScaling As Single
'Factor m for converting the datapoint x to the linear amplitude
'Alin = m*x + c
'Dim OffsetAmplitudeScaling As Single
'offset c for converting the datapoint x to the linear amplitude
'Alin = m*x + c
'Dim Channel As System.UInt16
'Channel on which the waveform was recorded
'(UInt16 is not fully supported by VB.net
'and must be converted using System.Convert)
'Dim TRAI As Integer
'Index of set (waveform), can be used in Visual AE

'open TrFile, an Error in opening the file will end
'the programm after displaying a message box
VTR = CreateObject("vxaebas.VallenTRFileX")
firstError = VTR.OpenFile(TrFile)
If firstError = False Then GoTo Error1
Label1.Text = TrFile

'read number of Sets in File
SetsOnFile = VTR.SetsOnFile
TextBox1.Text = SetsOnFile
'read sample rate of file
RateOfSampling = VTR.SampleRate
'read number of samples (data points) per set
SamplesPerSet = VTR.SamplesPerSet
'open first sample for following values
secondError = VTR.ReadSetHeader(1)
```

```

        'read number of pretrigger samples
        PreTriggerSamples = VTR.PreTriggerSamples
        'read value of positiv threshold
        Threshold = VTR.ThresholdPos
        TextBox5.Text = Threshold
        GoTo Endsub

Error1:
    MsgBox("Could not open TR-File.")
    End
Endsub:
    'used to bypass the error-handler 1
    End Sub

Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, _
    ByVal e As System.EventArgs) Handles Button3.Click
    'Cancel-Button
    End
End Sub

Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, _
    ByVal e As System.EventArgs) Handles Button2.Click
    'definition of local variables and setting them to zero.
    'Variables in comments are public and defined in variablen.vb
    'loop variables
    Dim iint As Integer = 0
    'variable for all "small" loops
    Dim kint As Integer = 0
    'loop-variable for finding the theashold-crossing
    Dim lint As Integer = 0
    'loop-variable for finding the first maximum after threshold-crossing
    '(=1st amplitude)
    Dim EndLine As Integer = 0
    'number of lines in ReadFile to scan for TRAI
    Dim CurrentLine As Integer
    'loop-variable for reading the ReadFile

    'variables for string manipulation
    Dim search As Char = Chr(9)
    'Chr(9) = tab, seperating the columns in Reafile
    Dim initialWord As String
    'the line as read from ReadFile
    Dim alteredWord As String
    'clipped line containing either the Id, or the TRAI
    Dim nint As Integer = 0
    'integer used for searching in strings

    'Caculation variables
    Dim mismatch As Integer
    'mismatch between Set-Number and TRAI
    Dim mismatchstart As Integer
    Dim ExistingTRAI As Boolean
    'True if there was a TRAI in the preceding line, false if not
    Dim Buffer(SamplesPerSet) As Short
    'Buffer to read all datapoints of one set
    Dim Amplitude(SamplesPerSet) As Single

```

```

'linear Amplitude calculated from Buffer
Dim Slope(SamplesPerSet) As Single
'Slope of the waveform: A(n)-(A(n-1))
Dim TimeOfAmplitude As Single
'time of 1stAmplitude calculated from lint and rate

'feature extraction
Dim CheckFeature(5) As Short
'1 if checkbox is checked, 0 if not
Dim SumOfCheckFeature As Short = 0
'how many features are checked
Dim numberOfFeature(5) As Short
'running number of all checked features
Dim DataOfFeature(5) As Single
'array for the actual Data that was calculated
Dim LabelOfFeature(5) As String
'Labels to write in top line

'creating the filename for the WriteFile, by inserting "eval_"
nint = InStr(ReadFile, "Versuch")
WriteFile = Microsoft.VisualBasic.Left(ReadFile, nint - 1) _
& "eval_" & ReadFile.Remove(0, nint - 1)

'i/o-management
'Opening ReadFile for reading and WriteFile for writing
System.IO.File.Delete(WriteFile)
Dim ioReadFile As System.IO.StreamReader = _
System.IO.File.OpenText(ReadFile)
Dim ioWriteFile As System.IO.StreamWriter = _
System.IO.File.AppendText(WriteFile)

'reading out the text boxes in case the user changed the value
EndLine = TextBox1.Text
Threshold = TextBox5.Text

'Setting all variables connected to the selection of features to zero
For iint = 0 To 4
    CheckFeature(iint) = 0
    numberOfFeature(iint) = 0
    LabelOfFeature(iint) = ""
    DataOfFeature(iint) = 0
Next iint

'determining which features are selected.
'SumOfCheckFeature gives the total number of selected features.
'NumberOfFeature gives a running number of the selected features.
'Not selected features have the number of the preceding selected feature.
'The final part determines the Labels for the features
If CheckBox1.Checked = True Then CheckFeature(1) = 1
If CheckBox2.Checked = True Then CheckFeature(2) = 1
If CheckBox3.Checked = True Then CheckFeature(3) = 1
If CheckBox4.Checked = True Then CheckFeature(4) = 1

For iint = 1 To 4
    SumOfCheckFeature = SumOfCheckFeature + CheckFeature(iint)
    numberOfFeature(iint) = numberOfFeature(iint - 1) _

```

```

        + CheckFeature(iint)
Next iint
If SumOfCheckFeature = 0 Then GoTo noFeatureSelected

If CheckFeature(1) = 1 _
Then LabelOfFeature(numberOfFeature(1)) = "t1[mu*s]"
If CheckFeature(2) = 1 _
Then LabelOfFeature(numberOfFeature(2)) = "Ampl. [dB]"
If CheckFeature(3) = 1 _
Then LabelOfFeature(numberOfFeature(3)) = "Chan."
If CheckFeature(4) = 1 _
Then LabelOfFeature(numberOfFeature(4)) = "traI"

'Initializing the progress bar
ProgressBar1.Visible = True
Label2.Visible = False
Label6.Visible = False
CheckBox1.Visible = False
CheckBox2.Visible = False
CheckBox3.Visible = False
CheckBox4.Visible = False
Button1.Visible = False
Button2.Visible = False
Button3.Visible = False
TextBox1.Visible = False
TextBox5.Visible = False

ProgressBar1.Minimum = 1
ProgressBar1.Maximum = EndLine

'Calculation:
mismatchstart = 0

For CurrentLine = 1 To EndLine
'Loop for reading ReadFile line by line
    ProgressBar1.Value = CurrentLine

    initialWord = ioReadFile.ReadLine
    If initialWord = "" Then GoTo Leerzeile
    'deleting empty lines
    nint = InStr(initialWord, search)
    alteredWord = Microsoft.VisualBasic.Left(initialWord, nint)
    alteredWord = Replace(alteredWord, Chr(9), "")
    'deleting Labels, Dates, and unit lines according to their ID
    If alteredWord = "La" Or alteredWord = "DT" Or alteredWord = "" _
    Then GoTo Leerzeile

    'selecting the second column and converting it to a number (TRAI).
    'If there is no value in column 2, it is determined
    'wether the line belongs to a second waveform of
    'an event using ExistingTRAI
    alteredWord = initialWord.Remove(0, nint)
    nint = InStr(alteredWord, search)
    alteredWord = Microsoft.VisualBasic.Left(alteredWord, nint - 1)
    If alteredWord = "TRAI" Then 'write lables
        ioWriteFile.Write(initialWord & Chr(9))

```

```

    For iint = 1 To 4
        If CheckFeature(iint) = 1 Then ioWriteFile.Write_
            (LabelOfFeature(numberOfFeature(iint)) & Chr(9))
    Next iint
    ioWriteFile.WriteLine("")
    GoTo Leerzeile
ElseIf alteredWord = "" Then
    If ExistingTRAI = True Then 'second waveform of event
        TRAI = TRAI + 1
        ExistingTRAI = False
    Else 'no waveform exists
        ioWriteFile.WriteLine(initialWord)
        GoTo Leerzeile
    End If
Else
    TRAI = CInt(alteredWord) 'first waveform of event
    ExistingTRAI = True
End If

For iint = 1 To SamplesPerSet 'empty arrays for calculation
    Buffer(iint) = 0
    Amplitude(iint) = 0
    Slope(iint) = 0
Next iint

For iint = 0 To 4
    DataOfFeature(iint) = 0 'empty data-array
Next iint

'Initiate Calculation:
'finding the right set

For mismatch = mismatchstart To SetsOnFile
    secondError = VTR.SeekAndRead(TRAI - mismatch, 0, _
        SamplesPerSet, Buffer)
    If TRAI = VTR.TRIndex Then Exit For
    'MsgBox(mismatch & Chr(10) & TRAI & Chr(19) & VTR.TRIndex, _
        MsgBoxStyle.AbortRetryIgnore)
Next mismatch
mismatchstart = mismatch - 1
SetNo = TRAI - mismatch

'reading the set and getting the set-dependant variables
secondError = VTR.SeekAndRead(SetNo, 0, SamplesPerSet, Buffer)
If secondError = False Then GoTo Error2

thirdError = VTR.ReadSetHeader(SetNo)
If thirdError = False Then GoTo Error3

Threshold = VTR.ThresholdPos
PreTriggerSamples = VTR.PreTriggerSamples
FactorAmplitudeScaling = VTR.VScaleFactor
OffsetAmplitudeScaling = VTR.VScaleOffset

'Threshhold:
For kint = 3 To SamplesPerSet - 1
    'loop for finding the threshold-crossing

```

```

        Amplitude(kint) = (Buffer(kint) + OffsetAmplitudeScaling) _
        * FactorAmplitudeScaling
        If Abs(Amplitude(kint)) >= Threshold Then Exit For
    Next (kint)

'Feature2 (1st Amplitude):
,
For lint = kint - 1 To SamplesPerSet - 1
    Amplitude(lint) = (Buffer(lint) + OffsetAmplitudeScaling) _
    * FactorAmplitudeScaling
    Amplitude(lint + 1) = (Buffer(lint + 1) + OffsetAmplitudeScaling) _
    * FactorAmplitudeScaling
    If Abs(Amplitude(lint + 1)) < Abs(Amplitude(lint)) Then
        If CheckFeature(2) = 1 Then
            DataOfFeature(numberOfFeature(2)) = Abs(Amplitude(lint))
        End If
    Exit For
End If
'End If
Next (lint)
If Abs(Amplitude(lint)) > Abs(Amplitude(kint)) Then
    DataOfFeature(numberOfFeature(2)) = Abs(Amplitude(lint))
Else
    DataOfFeature(numberOfFeature(2)) = Abs(Amplitude(kint))
End If

'Conversion to logarithmic amplitude[dB]
DataOfFeature(numberOfFeature(2)) = 20 * Log(1000 * _
DataOfFeature(numberOfFeature(2)), 10)

'Feature1(Time of 1st Amplitude):
TimeOfAmplitude = (lint - PreTriggerSamples) / RateOfSampling * 1000000
If CheckFeature(1) = 1 Then
    DataOfFeature(numberOfFeature(1)) = TimeOfAmplitude
End If

'Feature3 (Channel):
Channel = VTR.Channel
If CheckFeature(3) = 1 Then
    DataOfFeature(numberOfFeature(3)) = System.Convert.ToSingle(Channel)
End If

'feature4 (calculated TRAI):
If CheckFeature(4) = 1 Then
    DataOfFeature(numberOfFeature(4)) = SetNo
End If

'PrintLine:
'the originalline and all the calculated data are recorded
'separated by tabs.
'writeline "" closes the line
ioWriteFile.Write(initialWord & Chr(9))
For kint = 1 To 4
    If CheckFeature(kint) = 1 Then ioWriteFile.Write_
        (DataOfFeature(numberOfFeature(kint)) & Chr(9))
Next kint

```

```
        ioWriteFile.Write(VTR.TRIndex)
        ioWriteFile.WriteLine("")

Leerzeile:
        'closes the loop
        Next CurrentLine
        GoTo ProgramEnd

noFeatureSelected:
        MsgBox("Please select a feature.")
        GoTo ProgramEnd

Error2:
        ioWriteFile.WriteLine(TRAI)
        ioWriteFile.Flush()
        ioWriteFile.Close()
        ioReadFile.Close()

        VTR.CloseFile()
        VTR = Nothing

        MsgBox("Could not retrieve set.")
        End

Error3:
        ioWriteFile.Flush()
        ioWriteFile.Close()
        ioReadFile.Close()

        VTR.CloseFile()
        VTR = Nothing

        MsgBox("Could not read Set Header.")
        End

ProgramEnd:
        'closing all files.
        ioWriteFile.Flush()
        ioWriteFile.Close()
        ioReadFile.Close()

        VTR.CloseFile()
        VTR = Nothing
        MsgBox("Data successfully written to file " & Chr(10) & ReadFile)

        End
```

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Diplomarbeit selbstständig angefertigt und keine Hilfsmittel außer den in der Arbeit angegebenen benutzt habe.

Stuttgart, den 30. April 2003

.....

Cornelia Schurr