

EINFLUSS DES VERFORMUNGSGRADES AUF DIE LEBENSDAUER VON BAUTEILEN AUS ALUMINIUM-STAHL WERKSTOFFVERBUNDEN

DISSERTATION

Dipl.-Ing. Abdelrhani Lamik



Montanuniversität Leoben
Department Product Engineering
Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau
Leoben, Austria

Begutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wilfried Eichlseder
Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau / Montanuniversität Leoben

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr
Lehrstuhl für Umformtechnik / Montanuniversität Leoben

Juni 2008

Dipl.-Ing. Abdelrhani Lamik

Montanuniversität Leoben
Department Product Engineering
Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau
CD-Labor für Betriebsfestigkeit
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben, Austria

Internet: <http://amb.mu-leoben.at>
E-Mail: abdelrhani.lamik@unileoben.ac.at
Tel.: +43 (0)3842 402 1401
Fax.: +43 (0)3842 402 1402

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau an der Montanuniversität Leoben im Zeitraum Jänner 2005 bis März 2008.

*„Denn entgegengesetzte Eigenschaften
machen eine innigere Verbindung möglich.“*

Johann Wolfgang von Goethe
Die Wahlverwandtschaften, Roman
Erster Teil 1809

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die vorliegende Dissertation mit dem Titel

*Einfluss des Verformungsgrades auf die Lebensdauer von Bauteilen aus Aluminium-Stahl
Werkstoffverbunden*

von mir selbstständig und nur unter Verwendung der angeführten Literatur verfasst wurde.

Dipl.-Ing. Abdelrhani Lamik

Leoben, am 21.05.2008

Für meinen leider schon verstorbenen Vater Abdallah,
und meine fabelhafte Mutter Zahra,
die mich auf diesem Weg unterstützt haben.

أهدي عملي هذا إلى أبي العزيز، عبد الله، رحمه الله
و إلى أمي الحنونة، زهراء،
الذان وضعاني في هذه الطريق

À mon père aimé Abdallah malheureusement déjà défunt,
et à ma mère fabuleuse Zahra,
qui m'ont mis sur ce chemin.

To my unfortunately already deceased father Abdallah,
and to my marvellous mother Zahra,
who have put me on this path.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wilfried Eichlseder, Vorstand des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau, für die Ermöglichung der Mitarbeit im *Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau* sowie für die Bereitschaft zu ausführlichen fachlichen Diskussionen.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr vom Lehrstuhl für Umformtechnik danke ich für seine Bereitschaft, als Zweitbegutachter diese Arbeit einer genauen Durchsicht zu unterziehen und als Zweitprüfer zu fungieren.

Für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit im Rahmen des Technologieoffensive-Projekts Austrian Light Weight Structures möchte ich mich bei der Austrian Research Centers GmbH und der österreichischen Nationalstiftung bedanken. In den Dank einschließen möchte ich auch Dr. Franz Riemelmoser von der Firma ARC Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH (LKR) für die gute Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinem Kollegen, Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Heinz Leitner für die intensive Begleitung meiner Tätigkeit und die vielen wertvollen Diskussionen und Anregungen.

Ich danke Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Michael Stoschka, Dipl.-Ing. Dr.mont. István Gódor und Dipl.-Ing. Dr.mont. Jürgen Fröschl für die konstruktiven und persönlichen Gespräche, die den Nährboden für neue Ideen darstellten.

Mein besonderer Dank gilt Frau Christina Lohner für ihre Arbeit im Sekretariat des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau für die schöne Zeit in Leoben und die ausgezeichnete Kollegialität.

Natürlich wird der Grundstein für eine berufliche Entwicklung auf privater Seite gelegt. Hier gilt mein aufrichtiger Dank meiner Freundin Irene Pretterhofer für ihr Verständnis, die Unterstützung während der Arbeit an meiner Dissertation u.a. durch sprachliches Korrekturlesen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meiner Schwester Dipl.-Ing. Bouchra Lamik Thonhauser, die mich auf dem Weg nach Leoben tatkräftig unterstützt hat.

Leoben, im Mai 2008
Abdelrhani Lamik

Kurzfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Ermittlung eines Simulationsmodells zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden. Es sollen Ermüdungsversuche an den Komponenten und in weiterer Folge am Werkstoffverbund selbst durchgeführt und Modelle für die Lebensdauerberechnung erarbeitet werden.

Die Kenntnis des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffverbunden, durch zyklische Versuche an Proben, soll die Basis für die Auslegung von Bauteilen aus dem Al6016-T4/DC06 unter dynamischer Belastung bilden.

Da solche Bauteile überwiegend durch Walzen (Herstellung des Werkstoffverbundes) und Tiefziehen (Fertigung des Bauteils) hergestellt werden, muss der Einfluss von plastischen Verformungen während des Fertigungsprozesses auf das Ermüdungsverhalten untersucht werden.

Insbesondere hat der Verformungsgrad (Dickenänderung) einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten des Werkstoffes DC06, was sich im weiteren auch deutlich auf die Lebensdauer des Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbundes auswirkt. Simulationsmodelle für Lebensdauerabschätzung müssen daher den Einfluß der Verfestigung, die während des Herstellungsprozesses (Walzen und Tiefziehen) auftritt, berücksichtigen.

Abstract

The goal of this research project is the development of a simulation model for the lifetime estimation of components manufactured from the AA6016-T4/FeP06 material compound. By means of static and cyclic fatigue tests, models for lifetime estimation have to be generated.

The knowledge of the fatigue behaviour of this material compound forms the basis for the design of components manufactured from the AA6016-T4/FeP06 material compound under cyclic load.

Components composed of this material are manufactured predominantly by rolling (manufacturing of the material compound) and deep-drawing (components manufacturing). For this reason, the influence of the plastic deformations during the manufacturing process on the fatigue behaviour must be investigated.

Particularly the cyclic hardening behaviour of FeP06 steel has a relevant effect on the fatigue life of this aluminium-steel compound. Simulation models for fatigue life estimation therefore have to consider the influence of this hardening effect, which occurs during the manufacturing process (rolling and deep-drawing processes).

Wissenschaftlicher Beitrag

Diese Arbeit erweitert nach dem Erachten des Verfassers den bisherigen Stand der Wissenschaft um folgende Aspekte:

1. Durch systematische Untersuchungen der Einzelkomponenten Al6016-T4 bzw. DC06 des Werkstoffverbundes (WV) ist es gelungen, den Einfluss des Verformungsgrades auf die zyklischen Eigenschaften zu quantifizieren und bei der Lebensdauerberechnung zu berücksichtigen.
2. Basierend aus diesen Untersuchungsergebnissen wurden Modelle abgeleitet, die den Einfluss des Verformungsgrades auf das Ermüdungsverhalten von Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden einkalkulieren.
3. Der Einfluss der Mittelspannung und Anisotropie auf die Lebensdauer von Werkstoffverbunden wurden ebenfalls untersucht und daraus Modelle abgeleitet.
4. Um tiefgezogene Bauteile aus dem oben erwähnten WV mit beliebiger Dicke simulieren zu können, wurde für DC06 ein Modell zur Ermittlung der Fließkurve in Abhängigkeit des Verformungsgrades erstellt. Dieses Fließkurvenmodell zeigt gute Ergebnisse bei niedrigen Verformungsgraden und sehr gute Genauigkeit bei höheren Verformungsgraden, verglichen mit den Fließansätzen nach SWIFT und VOCE.
5. Basierend auf der Schadensanalyse an WV-Proben wird anhand theoretischer Überlegungen eine Hypothese für die Erklärung des Schädigungsverlaufes vorgestellt.
6. Die vorgestellten Ergebnisse in Kombination mit den abgeleiteten Modellen bilden die Basis für eine gezielte Weiterentwicklung von Modellen für die Lebensdauerberechnung von Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
3	Grundlagen	7
3.1	Konzepte für die Berechnung der Betriebsfestigkeit	7
3.2	Lineare Schadensakkumulation	9
3.3	Darstellung der Ergebnisse zyklischer Versuche durch Wöhlerlinien	11
3.3.1	Statistische Auswertung der Zeitfestigkeitslinie	13
3.3.2	Statistische Auswertung des Dauerfestigkeitswertes	15
3.4	Verformungsverfestigung durch Kaltwalzen	16
3.5	Mittelspannungsempfindlichkeit	17
3.6	Stützwirkung	18
3.7	Fließkurve	21
3.7.1	Verfestigungsexponent	21
3.7.2	Empirische Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge	21
3.8	Grundlage für die Lebensdauerberechnung mittels FEMFAT®	24
3.8.1	Geometriedaten der Struktur (Knoten, Elemente)	24
3.8.2	Gruppendaten	25
3.8.3	Spannungsdaten	25
3.8.4	Werkstoffdaten	25
3.8.5	Belastungsdaten (Belastungskollektive oder Dauerlasten)	25
3.8.6	Zuweisung von Eigenschaften zu Knoten	26
3.8.7	Auswahl der gewünschten Berechnungsverfahren	26
3.8.8	Aktivierung-Deaktivierung von Einflussgrößen	26
3.8.9	Festlegung der gewünschten Ausgabegrößen	26
3.8.10	Betriebsfestigkeitsberechnung an Knoten in der aktuellen Gruppe	26
4	Prüfmaschinen und untersuchte Werkstoffe	27
4.1	Prüfmaschinen	27
4.2	Untersuchte Werkstoffe	27
5	Herstellung des Werkstoffverbundes	29
5.1	Mechanismen des Kaltpressschweißens	29
5.1.1	Schichttheorie	29

5.1.2	Energiebarrieretheorie	30
5.2	Einfluss der Wärmebehandlung auf die Haftfestigkeit	30
5.3	Herstellung des Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbundes	33
6	Charakterisierung der Grundwerkstoffe Al6016-T4 und DC06 im Anlieferungs- zustand	35
6.1	Geometrie und Herstellung der Werkstoffproben	35
6.2	Ergebnisse der Zugversuche	36
6.3	Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen	38
7	Gefüge- und Härteuntersuchungen am DC06	40
8	Lebensdauerrelevante Einflussgrößen - Versuche und Modelle	43
8.1	Einfluss des Verformungsgrades	43
8.1.1	Definition des Verformungsgrades	45
8.1.2	Untersuchungen am Werkstoff DC06	45
8.1.3	Untersuchungen am Werkstoff Al6016-T4	52
8.2	Einfluss der Umformung	53
8.2.1	Verhalten von DC06 unter plastischer Umformung	53
8.2.2	Verhalten von Al6016-T4 unter plastischer Umformung	55
8.3	Einfluss der Mittelspannung auf das Ermüdungsverhalten	57
8.3.1	Einfluss der Mittelspannung auf den Werkstoff DC06	57
8.3.2	Einfluss der Mittelspannung auf den Werkstoff Al6016-T4	59
8.4	Einfluss der Walzrichtung	59
8.4.1	Einfluss der Walzrichtung auf Al6016-T4	60
8.4.2	Einfluss der Walzrichtung auf DC06	60
8.5	Einfluss der Laststeigerung am Versuchsbeginn	61
8.6	Verformungsgrade der Einzelschichten des Werkstoffverbundes	63
8.7	Einfluss der Stützwirkung auf das Verhalten von DC06	63
9	Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die FEM Berechnung	65
9.1	Fließkurve von Al6016-T4	65
9.2	Vorschlag des Verfassers zur Fließkurvenermittlung von DC06	66
9.3	Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche für die Fließkurvengenerierung	71
9.4	Gegenüberstellung unterschiedlicher Ansätze zur Fließkurvenermittlung . .	71
10	Vorschlag eines Lebensdauerberechnungskonzeptes	73
11	Verifikation der erstellten Modelle an Werkstoffverbund-Proben	76
11.1	Simulation der WV-Probe	76
11.2	Untersuchungen am Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund	76
11.2.1	Zugversuche	76
11.2.2	Zyklische Untersuchungen	78
11.3	Schadensanalyse an WV-Proben	80
11.4	Vergleich Rechnung und Versuche	82

12 Verifikation der erstellten Modelle am Beispiel einer Rundsicke	83
12.1 Geometrie des Ersatzbauteiles	83
12.2 Simulation der Rundsicke	85
12.2.1 Fließkurve für unterschiedlichen Verformungsgrad	85
12.2.2 Eigenspannungen im Stahl bei unterschiedlichem VG	85
12.3 Ausdünnung des Werkstoffverbundes während des Tiefziehprozesses	86
12.4 Einfluss des VG auf die Rückfederung von Bauteilen aus dem WV	87
12.5 Versuche an der Rundsicke	88
12.6 Schadensanalyse an Rundsicken	90
12.7 Vergleich Rechnung und Versuche	92
13 Diskussion der Ergebnisse	94
14 Publikationen des Verfassers	96
Abbildungsverzeichnis	98
Tabellenverzeichnis	103
Literaturverzeichnis	105
A Tabellarische Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen	111
A.1 DC06 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$	112
A.2 DC06, VG = 28 %, wechselnd $R = -1$	113
A.3 DC06, VG = 26 %, Vierpunktbiegung $R = -1$	114
A.4 DC06, VG = 32 %, Vierpunktbiegung $R = -1$	115
A.5 DC06, VG = 22 %, wechselnd $R = -1$	116
A.6 DC06, VG = 32 %, wechselnd $R = -1$	117
A.7 DC06, VG = 19 %, zugschwellend $R = 0$	118
A.8 DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$, Quer zur Walzrichtung	119
A.9 DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$ in Walzrichtung	120
A.10 DC06, VG = 37 %, zugschwellend $R = 0$	121
A.11 Al6016-T4/DC06 WV, VG = 40 %, zugschwellend $R = 0$	122
A.12 Al6016-T4/DC06 WV, VG = 48 %, zugschwellend $R = 0$	123
A.13 Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$	124
A.14 Al6016-T4, VG = 50 %, zugschwellend $R = 0$	125
A.15 Al6016-T4, VG = 36 %, wechselnd $R = -1$	126
A.16 Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0,5$	127
A.17 Al6016/DC06 WV, VG = 33 %, Vierpunktbiegung $R = -1$	128

Kapitel 1

Einleitung

Die Anforderungen des Marktes führen zur ständigen Weiterentwicklung von Bauteilen und Modulen hinsichtlich geringen Gewichtes, Zuverlässigkeit, spezieller physikalischer Eigenschaften, wie z.B. Korrosion oder Wärmeleitfähigkeit.

In vielen Fällen stößt man aufgrund der vielfältigen und oftmals mit Zielkonflikten behafteten Anforderungen mit herkömmlichen Materialien an die Grenzen der Realisierbarkeit. Völlig neue Möglichkeiten eröffnen sich durch den Einsatz von Werkstoffverbunden. Die Vorteile der einzelnen Komponenten des Werkstoffverbundes können gezielt ausgenutzt bzw. Nachteile vermieden werden. Der Werkstoff Al6016-T4 wird wegen seiner guten mechanischen Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit, Umformbarkeit und niedriger Dichte eingesetzt, wohingegen der Werkstoff DC06 aufgrund seiner guten Umform- und Schweiß-eigenschaften Verwendung findet [Buc08].

Für die Industrie ist das Walzplattieren eine bekannte Anwendungstechnologie. Mittels Walzplattierprozesse verschiedener Legierungen werden z.B. Luftfahrt-Werkstoffverbunde, Glanzprodukte und Gleitlagerwerkstoffe hergestellt. Allerdings existieren keine zyklischen Untersuchungen an walzplattierten Verbundblechen. Somit gibt es noch kein Modell für die Lebensdauerabschätzung von Bauteilen aus solchen Werkstoffverbunden. Durch aussagekräftige Modelle können hier Zeit und Kosten gespart werden.

Die Lebensdauerabschätzung von Bauteilen stellt einen wesentlichen Teil bei der Dimensionierung von Bauteilen dar. Grundlagen für die Berechnung der Lebensdauer sind neben der äußeren Belastung und deren Häufigkeit, das Werkstoffverhalten unter zyklischer Beanspruchung, welches unter anderem durch Wöhlerlinien beschrieben wird. Die experimentelle Ermittlung dieser lokalen Wöhlerlinien ist, wenn der Bauteil erst virtuell und noch nicht in Realität existiert, nicht möglich. Man ist daher auf die Abschätzung der Bauteilwöhlerlinien durch Simulation angewiesen. Die Simulation verlangt einerseits nach Grunddaten, gewonnen an idealisierten Proben, andererseits nach einem Modell zur Übertragung dieser Probenkennwerte auf den realen Bauteil.

Gliederung der Arbeit

Folgende Themen werden in der vorliegenden Arbeit behandelt:

Kapitel 2 zeigt, kurz zusammengefasst, die Literaturrecherche hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens von Feinblech.

In Kapitel 3 werden die Grundkonzepte für die Lebensdauerberechnung sowie Methoden für die Auswertung der Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen vorgestellt. Es werden die Grundlagen der Verfestigungsmechanismen, einige Begriffe aus der Betriebsfestigkeit und die in der Literatur vorhandenen Fließansätze erläutert.

In Kapitel 4 werden die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Prüfmaschinen und die untersuchten Werkstoffe präsentiert.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit dem Herstellungsprozess des Werkstoffverbundes. Hier wird der Mechanismus des Kaltpressschweißens sowie der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Haftfestigkeit von Werkstoffverbunden (WV) erläutert.

Die Charakterisierung der Grundwerkstoffe Al6016-T4 und DC06 des Werkstoffverbundes im Anlieferungszustand wird in Kapitel 6 beschrieben.

Kapitel 7 umfasst Härte- und Gefügeuntersuchungen am Werkstoff DC06.

In Kapitel 8 werden die für die Berechnung der Lebensdauer relevanten Einflussgrößen untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen werden Modelle für die Beschreibung des Ermüdungsverhaltens vorgestellt.

In Kapitel 9 werden die Werkstoffkennwerte für die elastoplastische Simulation ermittelt. Es wird ein Vorschlag des Verfassers zur Fließkurvengenerierung von DC06 vorgestellt und den Ansätzen nach VOCE und SWIFT gegenübergestellt.

Kapitel 10 erläutert ein Konzept für die Lebensdauer von tiefgezogenen Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden.

In Kapitel 11 wird die Verifikation der erstellten Modelle an WV-Proben durchgeführt.

Die Verifizierung der Modelle an bauteilähnlichen Proben (Napf) wird in Kapitel 12 vorgestellt.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 13, das eine Diskussion der Ergebnisse beinhaltet und einen Ausblick gibt.

Kapitel 2

Stand der Technik

Da das Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen von jenem der idealisierten Probe abweichen kann, muss die Übertragbarkeit von Werkstoffwöhlerlinien auf Bauteilwöhlerlinien unter den jeweils relevanten Einflussgrößen gewährleistet werden.

Das Lokalspannungskonzept (siehe Kapitel 3.1) ist gut geeignet für die Lebensdauer von Bauteilen aus dem Werkstoffverbund Al6016-T4/DC06 (z.B. Tiefgezogene Komponenten...), da hierfür nur Werkstoffkennwerte benötigt werden um in der Konstruktionsphase Aussagen über die Lebensdauer des Bauteils zu treffen.

Die heute kommerziell eingesetzten Softwarepakete für die Lebensdauerberechnung berücksichtigen nicht den Einfluss des Verformungsgrades auf das Schwingfestigkeitsverhalten während des Herstellungsprozesses.

Die ersten Ansätze für die Schwingfestigkeitsberechnung von Bauteilen aus Feinblech wurden von Herrman, Le Roch sowie Masendorf u.a. erstellt, jedoch blieb der Einfluss des Verformungsgrades auf die Lebensdauer unberücksichtigt [Her96] [RY98].

Die lokalen Spannungen im Bauteil aus Feinblech wurden mittels FEM-Berechnungen ermittelt [RY98]. Die lokalen elastoplastischen Beanspruchungen wurden unter Verwendung des Neuber-Näherungsverfahrens [Neu61] und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve von ungeformten Werkstoffen ermittelt.

Das vorgestellte Konzept berücksichtigt die Änderung der Werkstoffeigenschaften weder durch den Walzprozess noch durch die Umformung (z.B. durch Tiefziehen). Ausgangspunkt war eine gleichbleibende Blechstärke und eine ideale Bauteilgeometrie.

Eine Umformsimulation wurde von Le Roch durchgeführt. Sie dient der Ermittlung der Blechdickenänderung während des Umformprozesses. Der Umformgrad wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Position der kritischen Spannung wurde mittels Ansatz von Dang Van ermittelt [Dan89].

Der Einfluss des Umformgrades auf die zyklischen Werkstoffkennwerte wurde zum ersten Mal von Masendorf [Mas00] untersucht. Es wurde bei allen untersuchten Werkstoffen festgestellt, dass durch eine Umformung die Spannungs-Dehnungs-Kurve zu höheren

Spannungswerten und die Dehnungswöhlerlinie zu längeren Lebensdauern im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit verschoben werden.

Masendorf hat ein Modell entwickelt, das den Einfluss der Umformung (z.B. während eines Tiefziehprozesses) auf die zyklischen Werkstoffkennwerte berücksichtigt.

Mit dem MLSS-Modell (MATERIAL LAW FOR STEEL SHEET) nach Masendorf wurde eine Näherungslösung vorgeschlagen, die auf der Kenngröße des Zugversuches sowie Parametern aus der Umformsimulation basiert, siehe Gleichung 2.3.

Für die Versuchsauswertung wurde die Gerade der elastischen und plastischen Dehnungsanteile als Konstante angenommen. In der Näherungslösung wurde der daraus abgeleitete Mittelwert verwendet [Mar03].

$$c = -0,518 \quad (2.1)$$

$$b = -0,065 \quad (2.2)$$

Die Versuchsergebnisse wurden anschließend mit den konstanten Neigungen c und b erneut ausgewertet und die Korrelation der Werkstoffkonstanten $\sigma_{f'}$ und $\varepsilon_{f'}$ mit Kennwerten aus dem Zugversuch untersucht.

$$\varepsilon_a = \frac{(10370 + 13036 \cdot \varphi_v)}{E \cdot A_g} \cdot (2N)^{-0,065} + (1,5262 - 1,1578 \cdot \varphi_v) \cdot n \cdot (2N)^{-0,518} \quad (2.3)$$

Hierbei ist ε_a die Dehnungsamplitude und A_g bezeichnet die Gleichmaßdehnung in [%]. N ist die Lastspielzahl und n bezeichnet den Verfestigungsexponent. φ_v ist die logarithmische Vergleichsumformung, welche aus der Simulation ermittelt wird, siehe Gleichung 2.4.

$$\varphi_v = \sqrt{\frac{2}{3} (\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)} \quad (2.4)$$

Die durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass Duplex-Stahl durch Walzen ein ausgeprägtes anisotropisches Verhalten aufweist. In [Mat03] wurde das Ermüdungsverhalten eines EN 1.4462 Duplex Stahls im Bereich der Zeitfestigkeit untersucht. Abbildung 2.1 zeigt eine dreidimensionale Darstellung der Mikrostruktur von Duplex-Stahl. Es wurden sowohl statische als auch dynamische Versuche an Proben durchgeführt, die in unterschiedlichen Positionen (0° , 45° und 90° zur Walzrichtung) entnommen wurden. Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen höhere Festigkeitswerte für die Proben, die quer zur Walzrichtung (WR) entnommen worden sind. Die Proben, die in 45° zur WR liegen besitzen die niedrigsten Festigkeitskennwerte.

Unter zyklischer Belastung haben die Proben, die in 45° zur Walzrichtung entnommen worden, eindeutig die niedrigste Lebensdauer. Die anderen Proben (in und quer zur Walzrichtung) zeigen im HCF-Bereich äquivalente Ergebnisse, Abbildung 2.2.

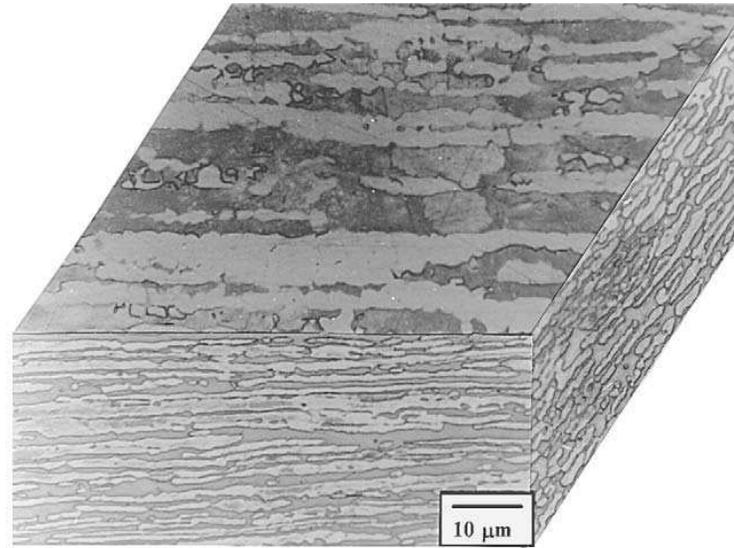


Abbildung 2.1: Dreidimensionale Darstellung der Mikrostruktur von Duplex-Stahl [Mat03]

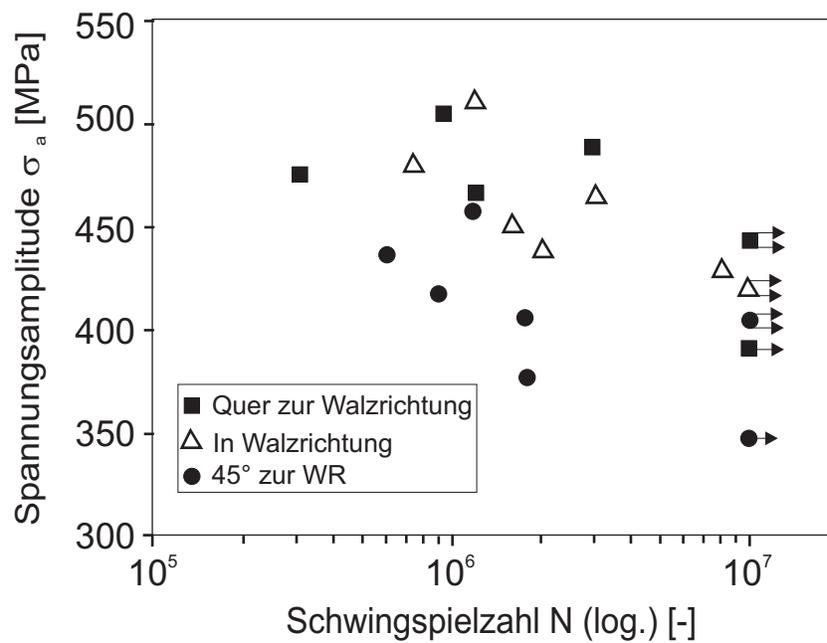


Abbildung 2.2: Einfluss der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten des Werkstoffes EN1.4462 Duplex Stahl [Mat03]

Das Ermüdungsverhalten von Al7055 im Zeitfestigkeitsbereich (high cycle fatigue, HCF) wurde in [Sri00] untersucht. Abbildung 2.3 zeigt die Ergebnisse der zyklischen Versuche

an Proben, die in und quer zur Walzrichtung entnommen worden sind. Die beiden Kurven weisen kleine Unterschiede auf. Es ist nur ein geringfügiger Einfluss der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten von Al7055 bemerkbar.

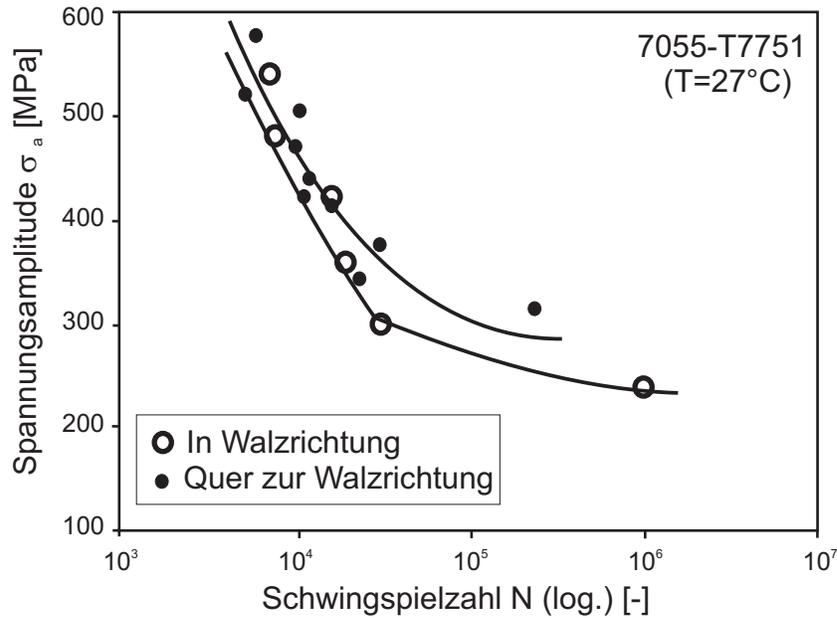


Abbildung 2.3: Einfluss der Walzrichtung auf die Schwingfestigkeit von Al7055 [Sri00]

Der Stand der Forschung bezüglich des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffverbunden kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Es liegen keine zyklischen Untersuchungen an Werkstoffverbunden vor. Weiteres existiert noch kein Berechnungskonzept auf der Basis des Örtlichen Spannungskonzeptes.
- Vorliegende Berechnungsmodelle an einfachen Feinblechen berücksichtigen den Einfluss des Verformungsgrades nicht.
- Es liegen fast keine Werkstoffkennwerte vor.
- Die meisten Untersuchungen an Werkstoffverbunden beschäftigen sich ausschließlich mit der Haftfestigkeit (Oberflächenvorbereitung, Wärmebehandlung,...).
- Es existieren Näherungslösungen für die Ermittlung der zyklischen Werkstoffkennwerte von umgeformten einfachen Feinblechen.
- Der Einfluss der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten von EN1.4462 Duplex Stahl und Al7055 wurde untersucht. Es liegen aber keine Untersuchungen des Einflusses der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten der Werkstoffe Al6016-T4 und DC06 vor.

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Konzepte für die Berechnung der Betriebsfestigkeit

Für die Lebensdauerermittlung stehen drei Berechnungskonzepte zur Verfügung:

- **Nennspannungskonzept**

Um die zulässigen Beanspruchungen in einem Bauteil ermitteln zu können müssen die Nennspannungen bekannt sein. Diese sind ohne die Ermittlung eines charakteristischen Querschnitts nicht möglich. Für die Lebensdauerabschätzung ist eine Bauteilwöhlerlinie erforderlich, die experimentell bestimmt oder rechnerisch abgeschätzt werden kann [Gud95, FKM98]. Diese wird aus der Werkstoffwöhlerlinie unter Berücksichtigung von meist empirisch bestimmten Einflussfaktoren für Oberflächenbeschaffenheit, Bauteilgröße, Bauteilgeometrie, usw. erstellt [Eic07]. Die Lebensdauerabschätzung bei veränderlicher Beanspruchungsamplitude erfolgt durch eine Lineare Schadensakkumulation (Miner-Regel).

- **Örtliches Konzept**

Beim Örtlichen Konzept werden die örtlichen Dehnungen und Spannungen für den versagenskritischen Ort des Bauteils auf der Grundlage des elastoplastischen Werkstoff- und Bauteilverhaltens berechnet und den örtlich ertragbaren Spannungen und Dehnungen gegenübergestellt [See96]. Für die Lebensdauerberechnung bis zum Anriss werden keine Kenndaten benötigt die aus Schwingfestigkeitsversuchen an Bauteilen stammen, sondern Kennwerte, die an einachsiger beanspruchten Werkstoffproben gewonnen werden.

- **Örtliches Spannungskonzept**

Die Festigkeitsbeurteilung auf Basis von Nennspannungen lässt sich für komplizierte Bauteilgeometrien nicht anwenden, da die Angabe eines Bezugsquerschnittes

nicht möglich ist. Daher sind Lebensdauerberechnungskonzepte auf Basis lokaler Spannungen [Eic89] erforderlich, Abbildung 3.1. Das hier präsentierte Lebensdauerberechnungskonzept auf Basis lokaler Spannungen umfasst die Berechnung des Lastkollektives, die Ermittlung der Spannungsverteilung im Bauteil unter Verwendung der Finite Elemente Methode und die Ermittlung der lokalen Werkstoffeigenschaften. Dazu werden Basis-Wöhlerlinien, welche an Proben unter definierten Beanspruchungs- und Fertigungszuständen ermittelt werden, unter Verwendung verschiedener Schädigungshypothesen und Modelle an den lokalen Spannungszustand angepasst. Basierend auf den lokalen Wöhlerlinien, auf den Spannungen und auf dem Lastkollektiv lässt sich eine Schadensakkumulation für jede Stelle im Bauteil durchführen. Da das Schwingfestigkeitsverhalten von

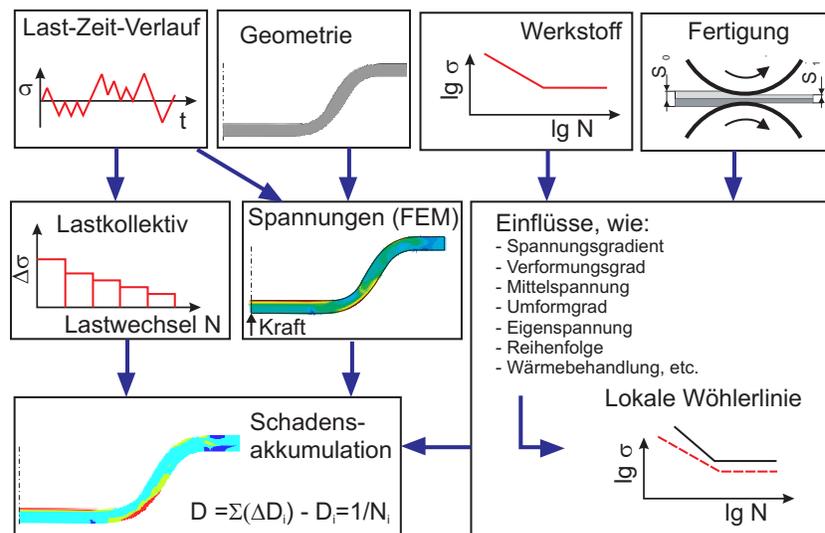


Abbildung 3.1: Lebensdauerberechnungskonzept auf Basis lokaler Spannungen

Bauteilen von jenem der idealisierten Probe abweichen kann, muss die Übertragbarkeit von Werkstoffwöhlerlinien auf Bauteilwöhlerlinien unter den jeweils relevanten Einflussgrößen gewährleistet werden [Eic02, EW05]. In den folgenden Kapiteln, wird versucht auf Basis der Wöhlerlinien der Einzelkomponenten des Werkstoffverbundes (Al6016-T4 und DC06) die Wöhlerlinie des Werkstoffverbundes für unterschiedliche Stärken (unterschiedlicher Verformungsgrad) zu generieren.

• Rissfortschrittskonzept

Beim Bruchmechanischen Konzept bleibt die Lebensdauer des Bauteils bis zum Anriss außer Betracht. Es wird angenommen, dass der untersuchte Bauteil rissbehaftet ist. Das Rissfortschrittskonzept kann als die Fortsetzung des örtlichen Konzepts für die Phase zwischen Anriss und Bruch angesehen werden. Allgemein kann die Bruchmechanik in verschiedene Bereiche eingeteilt werden. Es wird zwischen linearer und nichtlinearer Bruchmechanik unterschieden. Erstere beschreibt Bruchvorgänge unter Anwendung der linearen Elastizitätstheorie. Daher kann der spröde Bruch gut

charakterisiert werden. Die nichtlineare Bruchmechanik beschreibt Bruchvorgänge, die durch ein inelastisches Materialverhalten geprägt sind [Gro01].

Ein Überblick über die Lebensdauerbegriffen ist aus [Rad03, Hai02, Bux92, Gud95] zu entnehmen.

3.2 Lineare Schadensakkumulation

Als Hypothese für die Schadensakkumulation wird meist die Miner-Regel herangezogen [Min45, Lan90]. Dabei schädigt jedes Schwingspiel um den Betrag $\frac{1}{N_i}$ des zugehörigen Spannungshorizontes σ_{ai} der betreffenden Wöhlerlinie. Die Lebensdauer gilt als erreicht, wenn die Summe dieser Beträge den Wert 1 erreicht [FKM94]. Es gibt verschiedene Modifikationen zur Miner-Regel:

- **Miner Original**

Wird ein Bauteil im Bereich der Zeitfestigkeit mit einer konstanten Spannungsamplitude σ_{ai} belastet, so würde dieser Bauteil nach N_i Lastwechsel versagen. Somit nimmt die Schädigung den Wert $D = 1$ an. Wird ein Bauteil mit einer Spannung σ_{ai} für nur ein einziges Schwingspiel belastet (Abbildung 3.2), so errechnet sich die Schädigung D_i mittels Gleichung 3.1.

$$D_i = \frac{1}{N_i} \quad (3.1)$$

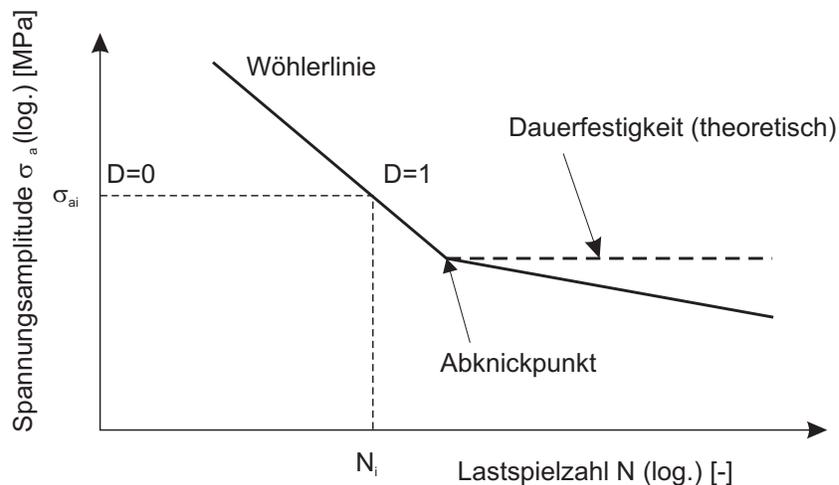


Abbildung 3.2: Wöhlerlinie für die Durchführung einer linearen Schadensakkumulation [Pöt00]

Tritt die Belastung mehrfach in unterschiedlichen Belastungsstufen auf, so lässt sich die Schädigung wie folgt berechnen, Gleichung 3.2.

$$D = \sum_i^m \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2)$$

Hierbei bezeichnet m die Anzahl der Belastungsstufen, n_i die dazugehörige Stufenschwingspielzahl und N_i die Anzahl der Schwingspiele bis zum Bruch. Mit einem Schädigungswert $D \geq 1$ versagt das Bauteil.

Bei Miner Original wird davon ausgegangen, dass sich Schädigungen ausschließlich im Zeitfestigkeitsbereich ereignen. Gemäß der Definition der Dauerfestigkeit ist anzunehmen, dass Belastungen unter diesem Niveau zu keiner Schädigung führen. Versuchsergebnisse in [Pal98, Pal05] zeigen jedoch, dass Beanspruchungen unterhalb der Dauerfestigkeit einen Beitrag zur Gesamtschädigung leisten können. Berechnungen nach Miner Original führen deswegen zu einer Überschätzung der Lebensdauer. Um die Treffsicherheit bei der Lebensdauerabschätzung zu erhöhen wurden Ansätze zur Modifikation der Wöhlerlinien entwickelt.

- **Miner Elementar**

Die Miner Elementar stellt die einfachste Form zur Berücksichtigung des Schädigungsanteiles von unter Dauerfestigkeit liegenden Belastungen dar. Bei diesem Ansatz wird die Zeitfestigkeitsgerade der Wöhlerlinie in doppeltlogarithmischer Darstellung in den Bereich unterhalb der Dauerfestigkeit hinein verlängert, Abbildung 3.3. Dieser Ansatz lässt sich anwenden, wenn die Wöhlerlinie keine ausgeprägte Dauerfestigkeit aufweist. Ansonsten wird die Lebensdauer unterschätzt.

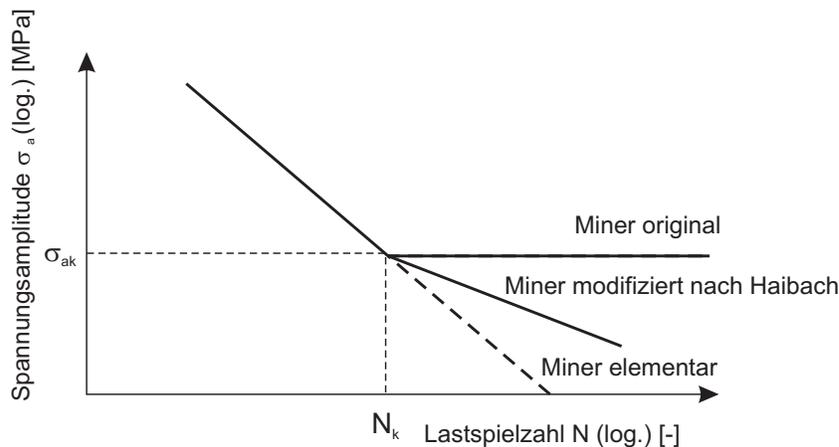


Abbildung 3.3: Modifikationen der Wöhlerlinie, Miner Elementar und modifiziert nach Haibach [Gud95]

- **Miner modifiziert nach Haibach**

Hier wird die Zeitfestigkeitsgerade unterhalb der Dauerfestigkeit mit der Neigung $2k - i$ fortgesetzt, wobei $i = 1$ für duktile Werkstoffe gilt, bei spröden Werkstoffen

(z.B. Gusseisen) wird $i = 2$ empfohlen, Abbildung 3.3. Eine Berechnung nach diesem Ansatz berücksichtigt auch den Schädigungsanteil, der durch Beanspruchungen unterhalb der theoretischen Dauerfestigkeit entsteht. Allerdings wird dieser Anteil weniger gewichtet als es bei Miner Elementar der Fall ist.

- **Miner modifiziert nach Liu und Zenner**

Die Modifikation der Bezugswöhlerlinie wird wie folgt festgelegt, Abbildung 3.4.

- Die Wöhlerlinie wird gegenüber der Bauteilwöhlerlinie k gedreht. Der Drehpunkt liegt in Höhe des Kollektivhöchstwertes $\sigma'_{a,k}$.
- Die Neigung wird nach der Gleichung 3.3 errechnet.

$$k^* = \frac{k + m}{2} \quad (3.3)$$

Hierbei stellt m die Neigung der Rissfortschrittswöhlerlinie dar.

- Die theoretische Dauerfestigkeit wird abgesenkt, Gleichung 3.4.

$$\sigma_D^* = \frac{\sigma_D}{2} \quad (3.4)$$

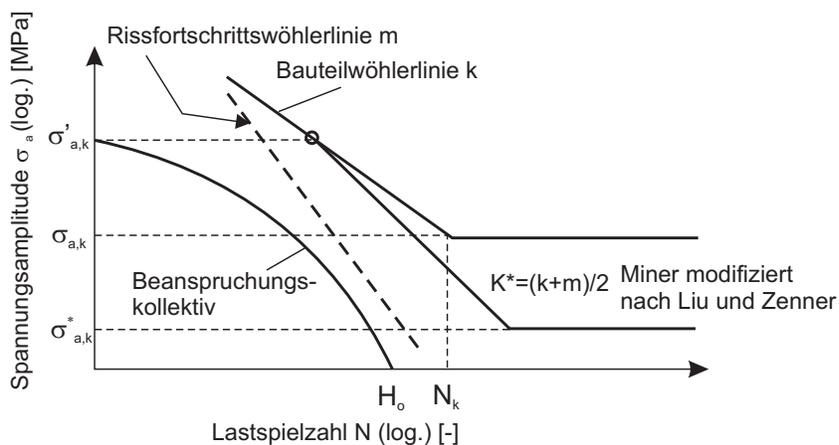


Abbildung 3.4: Modifikation der Wöhlerlinie nach Liu und Zenner

3.3 Darstellung der Ergebnisse zyklischer Versuche durch Wöhlerlinien

Wöhler Versuche, welche auch Einstufenversuche genannt werden, sind die grundlegende Funktion zur Beschreibung von Dauerschwingversuchen. Die zyklische Belastung wird

mit konstanter Spannungsamplitude σ_a und Mittelspannung σ_m durchgeführt. Ob die Schwingbelastung sinus-, dreieck- oder rechteckförmig abläuft, hat nur untergeordneten Einfluss auf das Ermüdungsverhalten. Der ermittelte Kennwert ist die Lastspielzahl bis zum Schwingbruch bzw. bis zum Schwinganriss. Für die Erstellung der Wöhlerlinie (Abbildung 3.5) sind mehrere Wöhlerversuche bei unterschiedlicher Belastung erforderlich [Hai02]. In DIN 50100 wird zur Beschreibung einer Wöhlerlinie die Anwendung einer

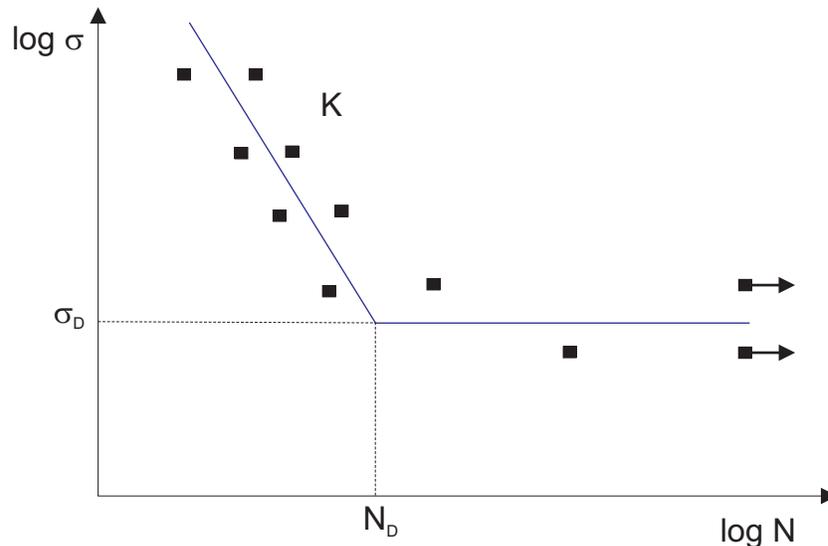


Abbildung 3.5: Beschreibung der Wöhlerlinie

halblogarithmischen Darstellung vorgeschlagen. Allerdings kann die halblogarithmische Skala zu unterschiedlichen Aussehen der Wöhlerlinie führen [Hai02].

Verschiedene Gleichungen für eine formelmäßige Beschreibung von Wöhlerlinien und eine darauf ausgerichtete Versuchsauswertung wurden vorgeschlagen. Hierbei handelt es sich um Geraden in halb- oder doppellogarithmischer Skala.

$$1870 \text{ Wöhler} \quad \log N = a - b \cdot \sigma \quad (3.5)$$

$$1910 \text{ Basquin} \quad \log N = a - b \cdot \log \sigma \quad (3.6)$$

$$1914 \text{ Stromeyer} \quad \log N = a - b \cdot \log(\sigma - \sigma_D) \quad (3.7)$$

$$1924 \text{ Palmgren} \quad \log(N + B) = a - b \cdot \log(\sigma) \quad (3.8)$$

$$1949 \text{ Weibull} \quad \log(N + B) = a - b \cdot \log[(\sigma - \sigma_D) / (R_m - \sigma_D)] \quad (3.9)$$

$$1955 \text{ Stüssi} \quad \log N = a - b \cdot \log[(\sigma - \sigma_D) / (R_m - \sigma)] \quad (3.10)$$

$$1963 \text{ Bastenaire} \quad \log N = a - \log(\sigma - \sigma_D) - b(\sigma - \sigma_D)^c \quad (3.11)$$

Es handelt sich um Geraden im halb- oder doppellogarithmischen Netz Gl. 3.5 und Gl. 3.6, um Kurven mit asymptotischem Übergang in die Dauerfestigkeit Gl. 3.7 und Gl. 3.8 und um Kurven mit S-förmigen Verlauf, die sowohl den Übergang in die Dauerfestigkeit wie auch in die Kurzzeitfestigkeit darstellen, Gl. 3.9 bis Gl. 3.11. Die Parameterwerte a , b , c , B und S_D sind dazu in bestmöglicher Annäherung an die Versuchspunkte zu bestimmen. In den letzten Jahren hat sich mehr und mehr die Darstellung der Wöhlerlinien in einer

doppellogarithmischen Skala durchgesetzt, wobei dies auf die einfache Darstellung der Versuchsergebnisse zurückzuführen ist.

In der vorliegenden Arbeit wird eine doppellogarithmische Darstellung der Versuchsergebnisse angewendet 3.5. Dabei wird angenommen, dass die Neigung k von der Überlebenswahrscheinlichkeit unabhängig ist. Die Neigung k wird für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % errechnet. Diese Neigung k wird für die Ermittlung der Schwingfestigkeit für Überlebenswahrscheinlichkeiten von 10 % und 90 % herangezogen.

Im folgenden wird die in dieser Arbeit angewendete Auswertungsmethode im Detail beschrieben. Sie besteht aus zwei Teilen:

- Statistische Auswertung der Zeitfestigkeitslinie
- Statistische Auswertung des Dauerfestigkeitswertes

3.3.1 Statistische Auswertung der Zeitfestigkeitslinie

Für die statistische Auswertung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich kann eine Lognormalverteilung der Lastzyklen angenommen werden [Rad03]. Das Streuband der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich wird festgestellt, indem man eine Regressionslinie für die ausgewerteten Lastzyklen auf unterschiedlichen Spannungsebenen errechnet. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten der ausgewerteten Lastzyklen müssen identisch sein.

Auf mehreren Horizonten mit ausgewählter Beanspruchungshöhe werden jeweils mehrere Versuche durchgeführt. Die Auswertung wird im doppellogarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz durchgeführt [War69, Mas80]. Die ertragenen Schwingspielzahlen N sind den vorliegenden n Versuchen zugeordnet und vom Größtwert beginnend mit einer Ordnungszahl j versehen. Jeder Versuchswert erhält zur Auftragung im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz einen Wert der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$ zugeordnet, der sich nach Rossow [Ros64] berechnen lässt, Gleichung 3.12.

$$P_{\ddot{u}} = \frac{3j - 1}{3n + 1} \quad (3.12)$$

Im Allgemeinen lassen sich die Versuchspunkte über eine logarithmische Merkmalsteilung des Wahrscheinlichkeitsnetzes einer Geraden zuordnen, Abbildung 3.6. Abweichungen von einer Geraden ergeben sich bei Prüfhorizonten am Übergang zur Dauerfestigkeit sowie am Übergang zur Kurzzeitfestigkeit. Eine durch die untere Streugrenze (90 %) mehrerer Prüfhorizonte gelegte Zeitfestigkeitslinie besagt, dass die als ertragbar angegebene Spannung oder Schwingspielzahl mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % erreicht oder überschritten wird, Abbildung 3.7. Eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 10 % wird als obere Streugrenze angenommen.

Die Lastspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\ddot{u}} = 50 \%$ kann mittels Gleichung 3.13 errechnet werden.

$$\log N_{50\%} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \log N_j \quad (3.13)$$

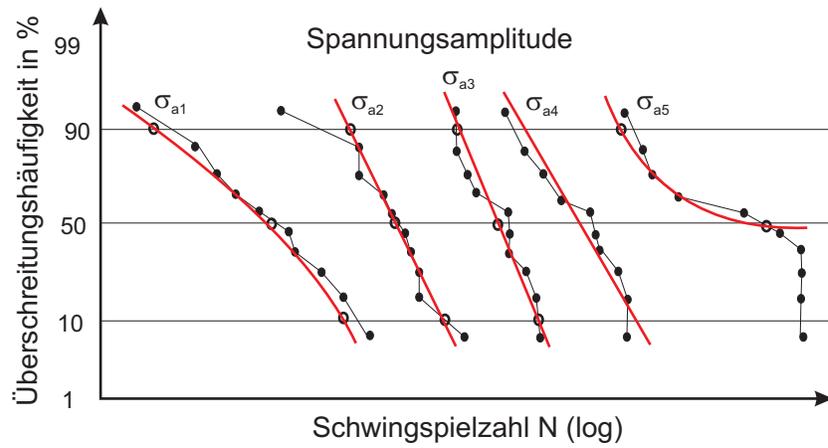


Abbildung 3.6: Auftragung für eine auf mehreren Spannungshorizonten statistisch belegten Wöhlerlinie (Schemabild) [Hai02]

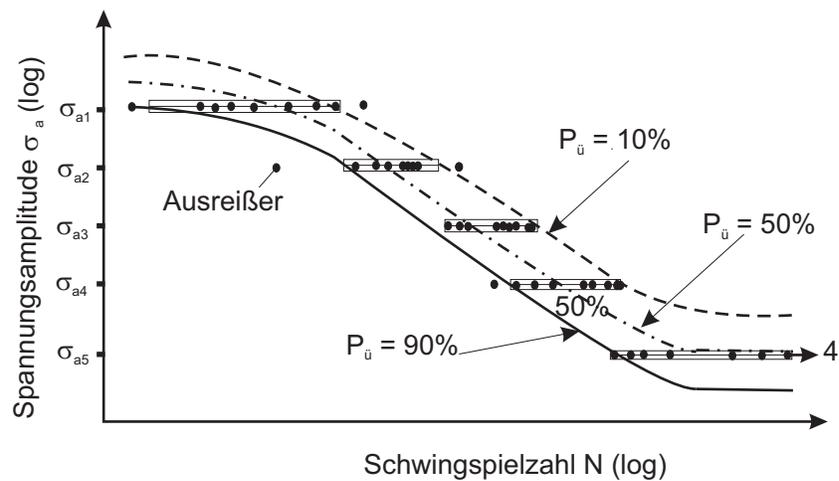


Abbildung 3.7: Auswertung für eine auf mehreren Spannungshorizonten statistisch belegten Wöhlerlinie (Schemabild) [Hai02]

Die Standardabweichung s wird wie folgt ermittelt, Gleichung 3.14.

$$s_{\log N}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\log N_j - \log N_{50\%})^2 \quad (3.14)$$

Die Lastzyklen für die Überlebenswahrscheinlichkeiten von $P_{\bar{u}} = 10\%$ bzw. 90% können mittels Gleichung 3.15 bis 3.17 geschätzt werden.

$$s_{\log N} = \sqrt{s_{\log N}^2} \quad (3.15)$$

$$\log N_{10\%} = \log N_{50\%} + 1.28s_{\log N} \quad (3.16)$$

$$\log N_{90\%} = \log N_{50\%} - 1.28s_{\log N} \quad (3.17)$$

Mittels der vorhergehenden Gleichungen kann die untere Streugrenze $P_{\bar{u}} = 90\%$ sowie die obere Streugrenze $P_{\bar{u}} = 10\%$ des Streubandes ermittelt werden.

Das endgültige Streuband $\bar{s}_{\log N}$ der Wöhlerlinie lässt sich wie folgt errechnen, Gleichung 3.18.

$$\bar{s}_{\log N} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_{\log N, i} \quad (3.18)$$

wobei m die Anzahl der Spannungshorizonte bezeichnet.

Die Steigung der Wöhlerlinie kann durch lineare Regression ermittelt werden, indem man die Lastzyklen mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 50\%$ betrachtet.

3.3.2 Statistische Auswertung des Dauerfestigkeitswertes

Das arcsin \sqrt{p} Verfahren wird für die Abschätzung der Dauerfestigkeit bei einer begrenzten Probenanzahl verwendet [Rad03]. Der Vorteil dieser Transformation besteht darin, daß die Varianz der Transformationsgröße ab 5 – 7 Proben einen konstanten Wert erreicht. Die Transformationsfunktion hat eine empirische Basis.

Die Ergebnisse der zyklischen Versuche müssen in steigende Spannungshorizonte sortiert werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit P_i in jedem Spannungshorizont wird mittels Gleichung 3.19 berechnet.

$$P_i = \frac{r_i}{h_i} \quad (3.19)$$

r_i ist die Anzahl der gebrochenen Proben und i bezeichnet den Spannungshorizont. h_i ist die gesamte Probenanzahl am Spannungshorizont.

Wenn bei einem Spannungshorizont kein Bruch auftritt ($r_i = 0$), wird die Gleichung 3.20 verwendet.

$$P_i = \frac{1}{2 \times h_i} \quad (3.20)$$

Die Ausfallmöglichkeit wird umgewandelt, Gleichung 3.21.

$$z_i = \arcsin \sqrt{P_i} \quad (3.21)$$

Für die Dauerfestigkeit wird ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Ausfallmöglichkeit und der Dauerfestigkeit angewendet, Gleichung 3.22.

$$\sigma_{D,P_{\dot{u}}} = a_A + b_A \cdot z \quad (3.22)$$

Die Parameter a_A und b_A sind mittels Gleichung 3.23 und 3.24 zu berechnen.

$$a_A = \frac{\left(\sum_g \sigma - b_A \sum_g z \right)}{g} \quad (3.23)$$

$$b_A = \frac{\sum_g z\sigma - \sum_g \sigma \frac{\sum z}{g}}{\sum_g z^2 - \frac{\left(\sum_g z \right)^2}{g}} \quad (3.24)$$

Wobei g die Anzahl der Spannungshorizonte ist.

3.4 Verformungsverfestigung durch Kaltwalzen

Während einer Kaltverformung werden im Kristallverband neue Versetzungen erzeugt (Frank-Read-Quellen) [Bar99, Wei94]. Ab einer bestimmten Versetzungsdichte blockieren sich die Versetzungen gegenseitig, sodass die Bewegung einzelner Versetzungen erschwert wird. Die Folge ist die Ausweitung des Hooke'schen- und damit die Verkleinerung des plastischen Bereichs (Verfestigung). Dadurch wird die Festigkeit des Werkstoffes gegenüber dem Grundzustand erhöht, Abbildung 3.8.

Die Verfestigung eines Werkstoffes ist also gekennzeichnet durch die Erhöhung der Festigkeitswerte und meist auch durch Erniedrigung des Dehnungsvermögens und der Zähigkeit. Die Verfestigung ist verknüpft mit einer Strukturänderung; bei kristallinen Stoffen führt sie zu einer Verringerung des Ordnungsgrades [Hor00]. Neben der Verformungsverfestigung (Kaltverfestigung genannt) finden bei metallischen Werkstoffen andere Verfestigungsmechanismen statt:

- **Korngrenzenverfestigung**

Die Ursache dieser Verfestigungsart ist die Blockade der gleitenden Versetzungen. Der Einfluss der Verfestigung auf die Streckgrenze R_e lässt sich mittels *Hall-Petch* Beziehung beschreiben, siehe Gleichung 3.25.

$$R_e = \sigma_0 + K \cdot \sqrt{d} \quad (3.25)$$

σ_0 bezeichnet die Reibungsspannung (Spannung, die aufgebracht werden muss, um die Versetzungsbewegung im Korn einzuleiten). K ist eine Werkstoffkonstante (entspricht dem Widerstand, den die Korngrenze der Fortpflanzung der plastischen Verformung entgegensetzt) und d ist die mittlere Korngröße.

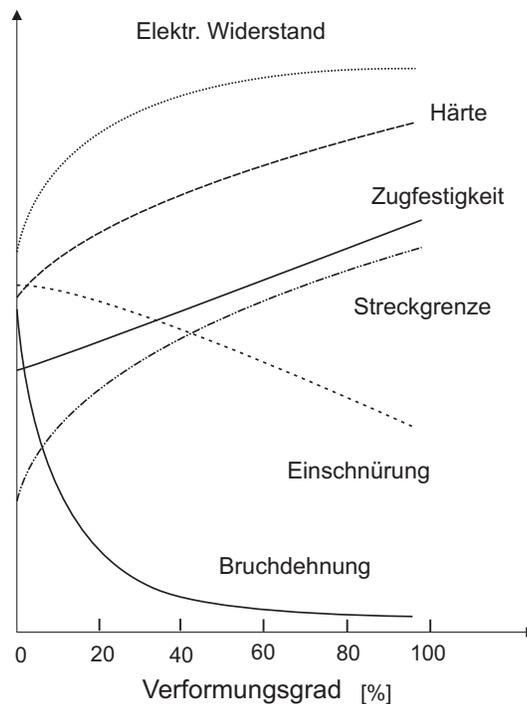


Abbildung 3.8: Änderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit des Verformungsgrades [Hor00]

- **Mischkristallverfestigung**

Die unterschiedlichen lokalen Spannungsfelder, die in den Matrixatomen gelösten Legierungselemente bewirken eine Behinderung der Versetzungsbewegungen wodurch die Festigkeit des Metalles steigt. Legierungen wie z.B. Stahl und Aluminium besitzen daher eine höhere Festigkeit im Vergleich zu reinem Metall (Eisen bzw. Aluminium) [Kul03].

- **Ausscheidungshärtung**

Wird auch Teilchenverfestigung genannt. Die Ausscheidung von Teilchen bewirkt eine Behinderung der Versetzungsbewegung wodurch höhere äußere Kräfte zur plastischen Verformung benötigt werden. Die Festigkeit des Metalles steigt. Die Teilchengröße, die Teilchenmenge und die Härte sind die relevanten Einflussparameter für die auftretende Verfestigung [Mer00, Bar99].

3.5 Mittelspannungsempfindlichkeit

Der Einfluss der Mittelspannung σ_m bzw. des Spannungsverhältnisses auf das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen wird durch die Mittelspannungsempfindlichkeit M berücksich-

tigt [Sch67] und wird nach Gleichung 3.26 definiert.

$$M = \frac{\sigma_A(R = -1) - \sigma_A(R = 0)}{\sigma_m(R = 0)} = \frac{\sigma_A(R = -1)}{\sigma_A(R = 0)} - 1 \quad (3.26)$$

Wobei $\sigma_A(R = -1)$ bzw. $\sigma_A(R = 0)$ die Spannungsamplitude bei wechselnder- bzw. bei schwellender Beanspruchung bezeichnen.

Die Darstellung nach Haigh ist heute die bevorzugte Darstellung des Mittelspannungseinflusses, siehe Abbildung 3.9. Die Mittelspannungsempfindlichkeit bezeichnet somit die

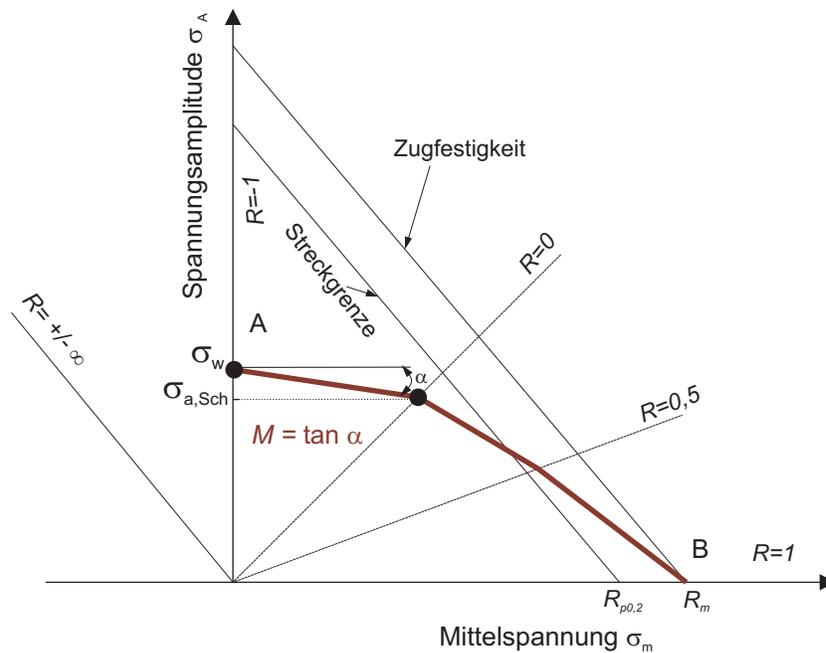


Abbildung 3.9: Haigh-Diagramm, Schematische Darstellung

Neigung zwischen Wechsel- und Schwellfestigkeit, $R = -1$ und $R = 0$. Aus Gleichung 3.26 kann man den Einfluss der Mittelspannung auf die Schwingfestigkeit für beliebige Spannungsverhältnisse R wie folgt beschreiben, Gleichung 3.27.

$$\sigma_A = \sigma_W - M \cdot \sigma_m \quad (3.27)$$

3.6 Stützwirkung

Die Steigerung der Schwingfestigkeit infolge Spannungsgradient z.B. bei Biegung oder Kerbwirkung wird als Stützwirkung bezeichnet und wird mittels Stützziffer beschrieben. Siebel und Stieler [Sie55] haben 1955 die ersten Arbeiten in diese Richtung vorgeschlagen. Sie haben die Stützwirkung durch das bezogene Spannungsgefälle χ^* beschrieben, Abbildung 3.10.

Die Stützziffer n_χ wird wie folgt definiert, siehe Gleichung 3.29.

$$\chi^* = \frac{1}{\sigma_{\max}} \left(\frac{d\sigma}{dx} \right) \quad (3.28)$$

$$n_\chi = \frac{K_t}{K_f} \quad (3.29)$$

Wobei K_t die Formzahl bzw. K_f die Kerbwirkungszahl beschreiben. Die zyklischen Un-

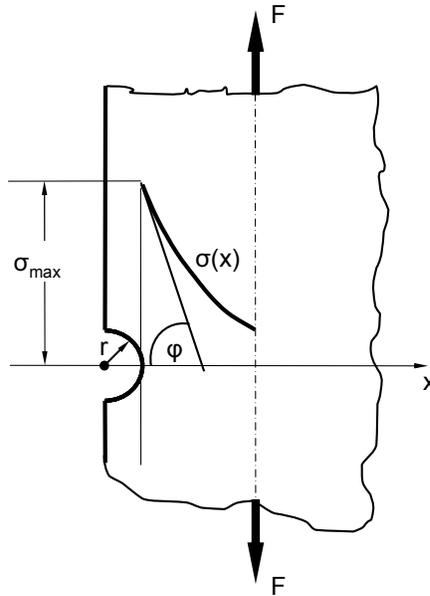


Abbildung 3.10: Bezogenes Spannungsgefälle

tersuchungen zeigen, dass die Beanspruchungsart (Zug/Druck, Torsion oder Biegung) erheblichen Einfluss auf die Schwingfestigkeit hat. Dies ist auf die unterschiedliche Spannungsverteilung im beanspruchten Querschnitt zurückzuführen. Bei der Umlaufbiegebelastung von Rundproben oder bei der reinen Biegebelastung von Flachproben ist die Spannungsverteilung stark inhomogen: verschwindende Spannungen in der Probenachse, Höchstspannungen am Außenrand und dazwischen ein linearer Anstieg, Abbildung 3.11. Die hochbeanspruchten Stellen am Kerbgrund werden durch weniger beanspruchte Bereiche gestützt. Diese wirken hemmend auf Risseinleitung und Risswachstum, sodass die Schwingfestigkeit erhöht wird. Bei Zug-Druck-Belastung einer ungekerbten Probe entfällt die Stützwirkung der niedriger beanspruchten Bereiche, was eine Belastung des gesamten Querschnitts bedeutet und somit zu niedrigerer Schwingfestigkeit im Vergleich zur Biege-wechselfestigkeit führt.

Die Stützwirkung ist umso höher je größer der Spannungsgradient ist, weil unterschiedlich hochbeanspruchte Stellen dichter beieinander liegen.

Siebel hat den Bereich, in dem dieser Umschichtungsvorgang abläuft, mit einer werkstoffabhängigen Gleitschichtdicke s_G begrenzt. Diese entspricht etwa der mittleren Korngröße [Pet51, Pet52].

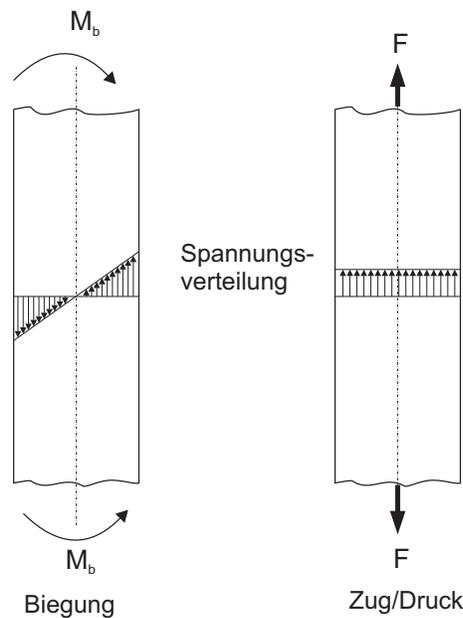


Abbildung 3.11: Spannungsverteilung unter Zug/Druck- und Biegebelastung

Nach zahlreichen Untersuchungen konnte Siebel den folgenden Zusammenhang ermitteln, Gleichung 3.30.

$$n_\chi = 1 + \sqrt{s_G \cdot \chi^*} \quad (3.30)$$

Die mit zunehmender Zähigkeit abnehmende Kerbempfindlichkeit kann gut durch das Modell nach Siebel erklärt werden. Die Fließvorgänge laufen in einem zähen Werkstoff leichter ab.

Für einfache Bauteile unter einfacher Belastung wurden von Wellinger und Dietmann [Wel76] bzw. der Richtlinie TGL 19340 [TGL75] Richtwerte angegeben.

Das Modell von Siebel wurde von Petersen [Pet51] weiterentwickelt.

Ein anderer Ansatz wurde von Hück, Thrainer und Schütz definiert [Hüc83]. Sie untersuchten zahlreiche Werkstoffe und ermittelten aus den Ergebnissen relevante Werkstoffparameter. Im Gegensatz zu den zuvor erwähnten Modellen ist die Stützziffer hier von der Werkstofffestigkeit unabhängig. Es wird lediglich zwischen den Werkstoffgruppen unterschieden.

Eine Erweiterung des Modells von Siebel wurde von Dietmann [Die85] durchgeführt, wobei eine zweiparametrische Form verwendet wurde. Dadurch wurden bessere Anpassungsmöglichkeiten und eine höhere Genauigkeit erreicht.

Eichseder [Eic89] definiert die Stützziffer als Quotient der Zug/Druck Wechselfestigkeit σ_{zdw} zur Biegewechselfestigkeit σ_{bw} , Gleichung 3.31. Bei reiner Zugbeanspruchung gilt $n_\chi = 1$.

$$n_\chi = f \left(\frac{\sigma_{bw}}{\sigma_{zdw}} \right) \quad (3.31)$$

Mit diesem Ansatz ist es gelungen eine Unabhängigkeit von K_t und K_f zu gewährleisten und somit eine Basis für die computergestützte Berechnung (z.B. FEM) von Bauteilen

mit komplexen Geometrien zu schaffen. Die Stützziffer nach Eichlseder wird wie folgt definiert, Gleichung 3.32.

$$n_{\chi^*} = 1 + \left(\frac{\sigma_{bw}}{\sigma_{zdw}} - 1 \right) \left(\frac{\chi^*}{\frac{2}{d}} \right)^{K_D} \quad (3.32)$$

d bezeichnet den Probendurchmesser bezeichnet und K_D ist ein Anpassungsexponent. σ_{bw} und σ_{zdw} kann durch Versuche ermittelt bzw. aus der Literatur entnommen werden. Das Verfahren von Eichlseder wurde in der Lebensdauerberechnungssoftware FEMFAT® implementiert [Ung99].

3.7 Fließkurve

Im Bereich des isotropen Verhaltens lässt sich die Fließspannung als Funktion der Verformung, der Formänderungsgeschwindigkeit und der Temperatur ausdrücken. Erfolgt die Umformung deutlich unter der Rekristallisationstemperatur kann die Abhängigkeit von der Formänderungsgeschwindigkeit und der Temperatur im allgemeinen vernachlässigt werden.

$$\sigma_0 = f\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}, T\right) \quad (3.33)$$

Die Fließspannung hängt dann lediglich vom Umformgrad ab. Damit wird die Gleichung 3.33 auf $\sigma_0 = f(\varphi)$ reduziert. Somit kann eine Fließkurve als eine graphische Auftragung der Fließspannung k_f in Abhängigkeit vom Umformgrad φ definiert werden.

3.7.1 Verfestigungsexponent

Der Verfestigungsexponent n beschreibt die Verfestigung eines Werkstoffes während der Umformung. Trägt man die Fließkurve Abbildung 3.12(a) doppeltlogarithmisch auf, stellt n die Steigung der Geraden dar, Abbildung 3.12(b) [Kön95]. Der Verfestigungsexponent kann somit wie folgt definiert werden, Gleichung 3.34.

$$n = \frac{\partial \ln(k_f)}{\partial \ln(\varphi)} \quad (3.34)$$

3.7.2 Empirische Spannungs-Dehnungs-Zusammenhänge

Um die Fließkurve generieren zu können, existieren mehrere Ansätze, die auf physikalischen Mechanismen oder empirischen Ansätzen, die mit Hilfe mathematischer Funktionen die Fließkurve beschreibt, beruhen. Man kann sich leicht vorstellen, dass mathematische

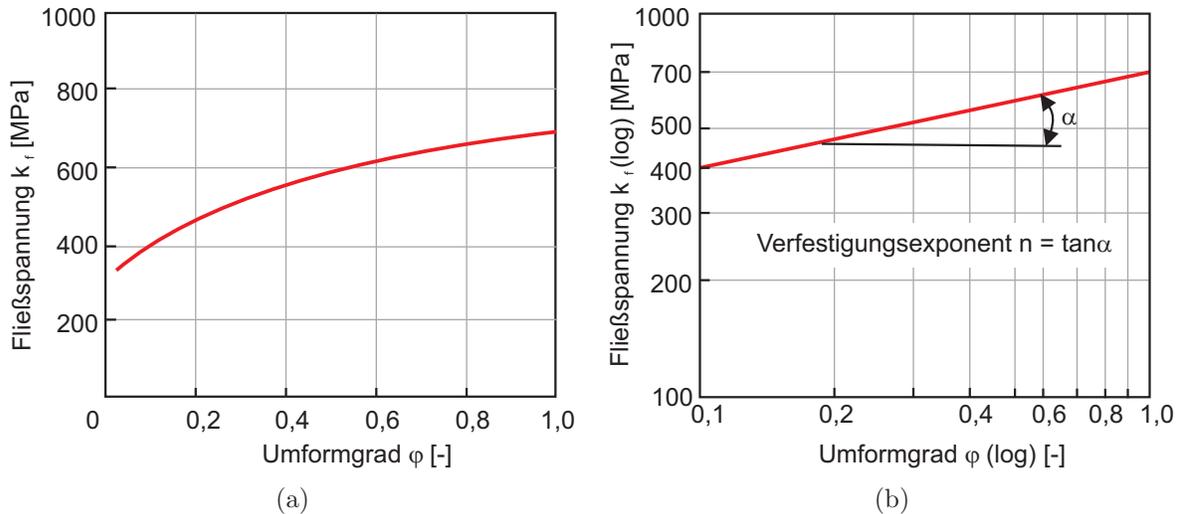


Abbildung 3.12: (a) Fließkurve, lineare Darstellung
(b) Fließkurve, doppeltlogarithmische Darstellung

Beschreibungen keine zuverlässigen Extrapolationen über die zur Anpassung verwendeten experimentellen Daten hinaus erlauben. Trotzdem finden solche Beschreibungen breite Anwendung, da eine wirklich physikalische grundlegende Modellierung des Fließverhaltens zum einen teilweise Kenntnisse über den heutigen Wissensstand hinaus erfordern, zum anderen auch sehr komplex sind.

Vier empirische Fließansätze werden häufig zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens während der Kaltverformung [Mon96] angewendet:

- **Ansatz nach Ludwik**, Abbildung 3.13(a):
Zur Wiedergabe des plastischen Materialverhaltens kann das Modell von Ludwik (1909), Gleichung 3.35 verwendet werden.

$$\sigma_0 = \sigma_e + \sigma_2 \cdot \varphi^{n'} \quad (3.35)$$

Wobei σ_e die Streckgrenze ist. Der Wert σ_2 beschreibt die Zunahme der Spannung $\sigma_0 - \sigma_e$ bei einem Umformgrad von $\varphi = 1$. n' charakterisiert das Verfestigungsverhalten.

- **Potenzansatz oder Ansatz nach Hollomon**, Abbildung 3.13(b):
Dieser einfache Ansatz ist gut geeignet um das Verhalten von weichen Werkstoffen und Werkstoffen mit niedriger Streckgrenze zu beschreiben [Tru80], Gleichung 3.36.

$$\sigma_0 = \sigma_1 \cdot \varphi^n \quad (3.36)$$

wobei σ_1 die Werkstoffkonstante und n der Verfestigungsexponent sind. Die Werkstoffkonstante σ_1 stellt die Fließspannung bei einem Umformgrad von $\varphi = 1$ dar.

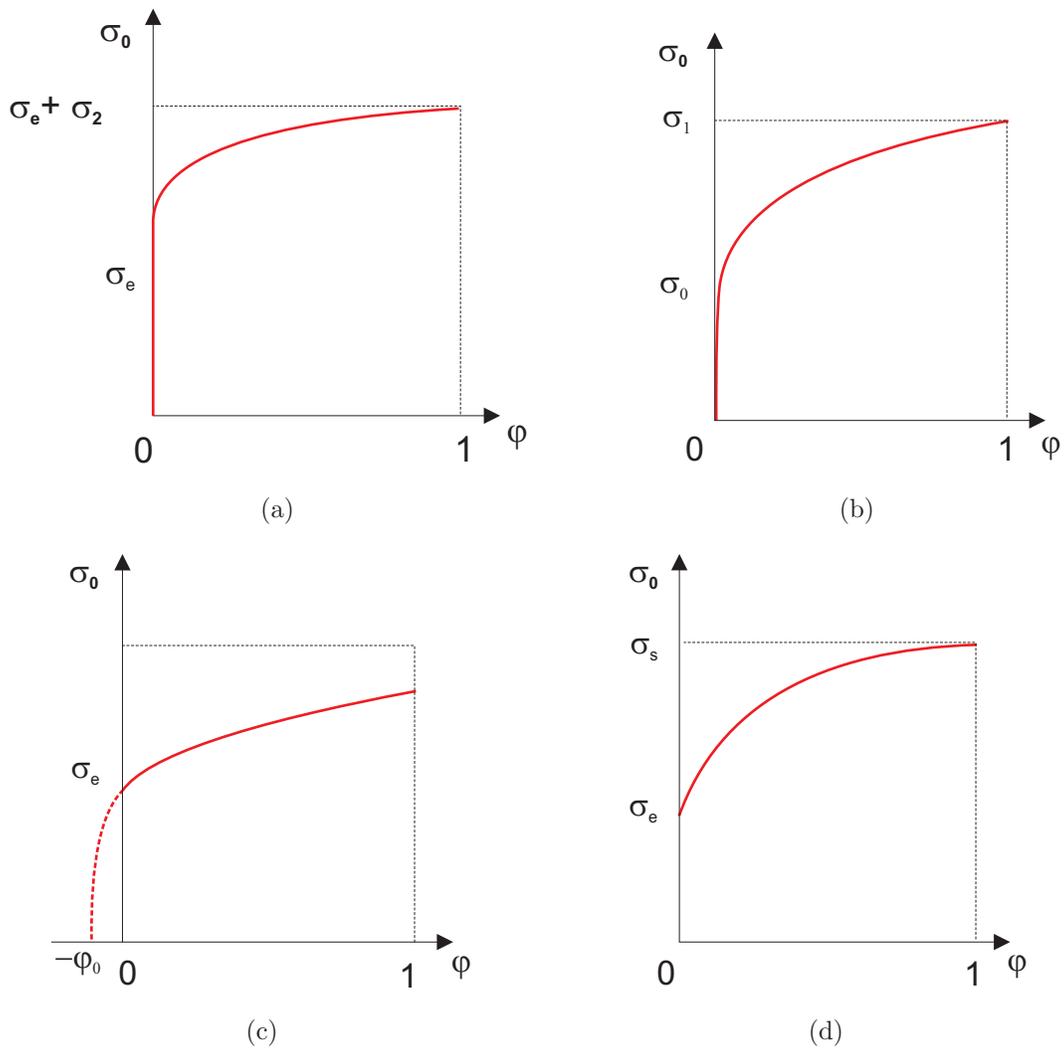


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung der üblichen Fließkurven

- (a) Ansatz nach Ludwik
- (b) Ansatz nach Hollomon
- (c) Ansatz nach Swift
- (d) Ansatz nach Voce

- **Ansatz nach Swift/Krupkowski**, Abbildung 3.13(c):

Hier wird die Fließkurve durch parallele Verschiebung zur x-Achse der Kurve nach Hollomon mit dem Betrag $-\varphi_0$ definiert, Gleichung 3.37.

$$\sigma_0 = \sigma_e \left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^{n''} \quad (3.37)$$

Wobei die Konstante φ_0 auf Abbildung 3.13(c) veranschaulicht ist. n'' beschreibt das Verfestigungsverhalten.

Anzumerken ist, dass die Parameter n' und n'' nicht gleich dem Verfestigungsexponenten n sind. Die Tabelle 3.1 zeigt einige typische Werte des Verfestigungsparameters n'' nach Swift.

Werkstoffe	Verfestigungsparameter nach Swift n''
Aluminium	0,36
Kupfer	0,55
Austenitische Stähle	0,87
Ferritische Stähle	0,26

Tabelle 3.1: Typische Werte des Parameters n'' nach Swift

- **Ansatz nach Voce**, Abbildung 3.13(d):

Im Gegensatz zu den beiden Ansätzen nach Ludwik und Swift, strebt die Fließspannung bei größerer Verformung gegen einen Grenzwert $\sigma = \sigma_s$, was den Mechanismus der dynamischen Erholung wiedergibt. Der Vorgang des Erholungsprozesses während der Verformung wird als dynamische Erholung bezeichnet. Dieser Fließansatz ist an den oberen Teil des Bereiches der Kaltverformung adaptiert. Die Beschreibung der Fließkurve nach Voce [Voc48] bezieht die Vorstellung mitein, dass sich ein Werkstoff nicht beliebig verfestigen kann, sondern eine Sättigungsspannung σ_s des Materials durch den dynamischen Erholungsprozess erreicht wird [Mül01], Gleichung 3.38.

$$\sigma_0 = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_e) \exp\left(-\frac{\varphi}{K_v}\right) \quad (3.38)$$

Hierbei ist K_v eine anzupassende Konstante, die ein Maß für den Übergang in die Sättigungsspannung ist. Sie beschreibt nach Gusek et al. [Gus96] die dynamische Auslöschung von Versetzungen. Die Streckgrenze wird mit σ_e bezeichnet. Die exponentielle Darstellung von Voce ist in der Materialwissenschaft weit verbreitet, weil ihr eine metallphysikalische Vorstellung unterliegt.

3.8 Grundlage für die Lebensdauerberechnung mittels FEMFAT[®]

Die im folgenden beschriebene Vorgangsweise wird für Betriebsfestigkeitsberechnungen mit FEMFAT BASIC empfohlen. Für Lebensdauer- bzw. Dauerfestigkeitsanalysen ist es nötig, dem Programm folgende Daten bekannt zugeben bzw. zugänglich zu machen:

3.8.1 Geometriedaten der Struktur (Knoten, Elemente)

Die FE-Daten sind erforderlich, um in weiterer Folge Spannungsgradienten (i.e. das maximale Spannungsgefälle) zwischen benachbarten Knoten berechnen zu können. Diese

Spannungsgradienten und die daraus abgeleiteten relativen Spannungsgradienten bilden die Grundlage für die Berücksichtigung der Kerbwirkung (und damit verbundenen der Stützwirkung), die einen entscheidenden Einfluss auf die Wöhlerlinie im betrachteten Knoten haben kann.

3.8.2 Gruppendaten

Gruppen können aus Knoten und Elementen bestehen und dienen der einfacheren Definition bestimmter Strukturbereiche, für die spezifische Parameter (Werkstoffdaten, Oberflächenrauigkeiten, Vergütungszustände, etc.) festgelegt werden sollen. In FEMFAT stehen eine Reihe von Funktionen zur Erzeugung und Veränderung von Gruppen zur Verfügung. Eine Identifikation von Knoten und Elemente anhand verschiedener Kenngrößen wird unterstützt.

3.8.3 Spannungsdaten

Für die Betriebsfestigkeitsrechnung ist der aktuelle Spannungszustand an jedem betrachteten Knoten von entscheidender Bedeutung. Bei der Berechnung können sowohl Spannungsamplitude, als auch Mittelspannung unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Spannungstensors in Betracht gezogen werden.

3.8.4 Werkstoffdaten

Für die Betriebsfestigkeitsrechnung sind eine Reihe von Werkstoffdaten zu definieren, um das dynamische Festigkeitsverhalten des Werkstoffes entsprechend erfassen zu können.

3.8.5 Belastungsdaten (Belastungskollektive oder Dauerlasten)

Zur Durchführung von Lebensdauerberechnungen ist es erforderlich, Belastungskollektive festzulegen, in welchen die auftretenden Lastwechselzahlen bei bestimmten Amplituden- und Mittelspannungen abgelegt sind. Die Belastungsdaten können im STEYR-ASCII- oder TECMATH-ASCII-Fileformat eingelesen oder interaktiv definiert werden.

3.8.6 Zuweisung von Eigenschaften zu Knoten

Die Berechnung der Schädigungen bzw. der Sicherheiten gegen Dauerbruch erfolgt generell an Strukturknoten. Damit die relevanten Einflussgrößen berücksichtigt werden können, sind diese vorher für die einzelnen Knoten festzulegen.

3.8.7 Auswahl der gewünschten Berechnungsverfahren

In FEMFAT stehen eine Reihe verschiedener Verfahren zur Berechnung von Einflussfaktoren zur Verfügung, welche vom Benutzer individuell ausgewählt werden können.

3.8.8 Aktivierung-Deaktivierung von Einflussgrößen

Um die Auswirkungen von bestimmten Einflussgrößen auf das jeweilige Berechnungsergebnis mit geringem Aufwand untersuchen zu können, besteht die Möglichkeit, jeden Einfluss einzeln zu aktivieren oder zu deaktivieren.

3.8.9 Festlegung der gewünschten Ausgabegrößen

Im Ausgabefile werden die Ergebnisdaten der FEMFAT-Betriebsfestigkeitsrechnung knotenbezogen ausgegeben. Dieses File kann in ein FE-Postprozessor-Programm eingelesen und die Ergebnisdaten auf der FE-Struktur graphisch dargestellt werden.

3.8.10 Betriebsfestigkeitsberechnung an Knoten in der aktuellen Gruppe

In der Betriebsfestigkeitsberechnung erfolgt die eigentliche Berechnung der Sicherheiten gegen Dauerbruch oder statische Überlast oder der Schädigungswerte nur an den Knoten der aktuellen Gruppe. Die Ergebnisse werden, sofern nicht vom Benutzer unterdrückt, auf das geöffnete FEMFAT-Protokollfile und das Ausgabefile ausgegeben. Es besteht aber auch die Möglichkeit mit dem spannungsamplitudenbezogenen Berechnungsfilter die Berechnung nicht mit allen Knoten der aktuellen Gruppe durchzuführen, sondern nur mit denen im hochbelasteten Bereich der Struktur.

Kapitel 4

Prüfmaschinen und untersuchte Werkstoffe

4.1 Prüfmaschinen

Die Zug- und LCF Versuche wurden bei Raumtemperatur auf einer Instron[®] 8802 Prüfmaschine mit 100 *kN* Nennkraft durchgeführt, siehe Abbildung 4.1(a). Als Regelung diente dabei eine Instron FastTRACK 8800. Die Dehnungsmessung erfolgte mit einem Instron Extensometer der Serie 2620 mit einer Messlänge von 37,5 *mm* und einer maximalen Messlänge von ± 5 *mm*.

Die zyklischen Untersuchungen wurden auf einer MICROTRON Resonanz Prüfmaschine der Firma RUMUL[®] mit 20 *kN* Nennkraft durchgeführt, Abbildung 4.1(b).

4.2 Untersuchte Werkstoffe

Für diese Untersuchungen standen folgende Werkstoffe zur Verfügung:

- Kaltgewalzter IF-Stahl DC06 nach EN10130 mit einer Dicke von 2,5 *mm* im Anlieferungszustand.
- Platten aus dem Werkstoff DC06 mit unterschiedlichen Verformungsgraden (19 %, 22 %, 25 %, 26 %, 28 %, 32 % und 37 %).
- Kaltgewalztes Al6016-T4 mit einer Dicke von 2 *mm* im Anlieferungszustand.
- Platten aus dem Werkstoff Al6016-T4 mit unterschiedlichen Verformungsgraden (0 %, 19 %, 26 %, 36 % und 50 %).

- Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund hergestellt durch Kaltpressschweißen mit unterschiedlichen Verformungsgraden (25 %, 27 %, 33 %, 40 % und 48 %).



(a)



(b)

Abbildung 4.1: Prüfmaschinen

(a) für Zugversuche, (b) für zyklische Versuche

Die chemische Zusammensetzung der beiden Werkstoffe ist den Tabellen 4.1 und 4.2 zu entnehmen.

DC06	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
Massenanteil in %	0,002	0,01	0,12	0,006	0,011	0,045	0,072

Tabelle 4.1: Chemische Zusammensetzung von DC06

Al6016	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Massenanteil in %	1,0-1,05	0,2	0,2	0,2	0,25-0,60	0,2	0,15

Tabelle 4.2: Chemische Zusammensetzung von Al6016

Der Werkstoffverbund wurde bei einer Temperatur von 540 °C gegläht. Um bei den Untersuchungen an den Einzelkomponenten des Werkstoffverbundes die gleichen Bedingungen zu schaffen wurden auch sie bei 540 °C gegläht.

Kapitel 5

Herstellung des Werkstoffverbundes

5.1 Mechanismen des Kaltpressschweißens

Unter einer Reihe von Theorien, die den Mechanismus des Kaltpressschweißens zu erklären versuchen, sind zwei Theorien (Schichttheorie und Energiebarrieretheorie) am weitesten verbreitet [Moh75, Bay85].

Eine ausführliche Literaturrecherche über die Mechanismen des Kaltpressschweißens wurde in [Buc08], Kapitel 2 durchgeführt.

5.1.1 Schichttheorie

Der Mechanismus des Kaltwalzens wurde ausführlich in [Cav73, McE62, Frö82, Bay85] untersucht.

Der Druck im Walzspalt dehnt die beiden Streifen aus und bewirkt, dass die beiden rauhen Schichten gemeinsam (an der selben Position) wie eine Einheit aufbrechen, Abbildung 5.1-a und 5.1-b. Das darunterliegende frische Metall wird durch den Druck im Walzspalt in die Lücken extrudiert, Abbildung 5.1-c. Die Metalloberflächen treten miteinander in Kontakt und verschweißen, Abbildung 5.1-d. Die Qualität der Verbindung hängt vom Verformungsgrad (VG), den zu verbindenden Metallen, der Herstelltemperatur, dem Druck, der Walzzeit, der Gitterstruktur, der Löslichkeit von Sauerstoff, der Werkstoffreinheit und von der Vorbereitung der Oberfläche ab.

Untersuchungen des Umformungsverhaltens und der Verbindungsfestigkeit wurden detailliert in [Dan03a, Mor96, Dan05, Yah91] durchgeführt.

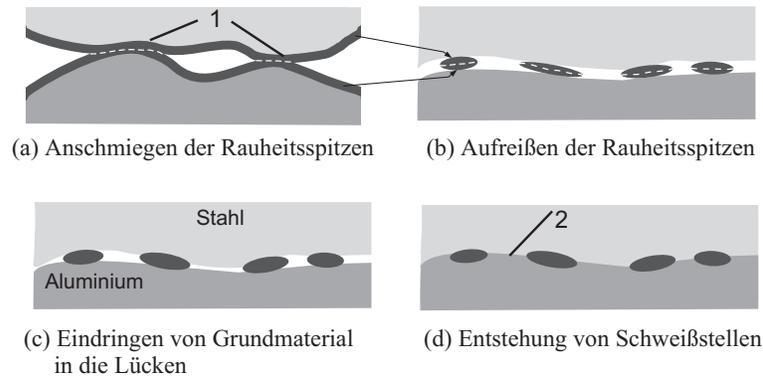


Abbildung 5.1: Mechanismus des Kaltpressschweißens (Schematisch) [Ake92]

5.1.2 Energiebarrieretheorie

Die Energiebarrieretheorie besagt, dass zwei Metalle nur dann miteinander verschweißt werden können, wenn eine bestimmte Energiebarriere überschritten wird [Bay85]. Bei der Energiebarriere unterscheidet man zwischen:

- **Fehlpassung der Kristallgitter**

Für die Verschweißung von Metallen muss gleichzeitig ein inniger Kontakt der reinen Oberflächen und ein Anstieg der Summe aller Energien im Kristallgitter über eine gewisse Energiebarriere gewährleistet werden [Sem61].

- **Einfluss der Oberflächenenergie**

Es wurde gezeigt, dass die Adhäsion von Metallen nicht ausschließlich von der Fehlpassung der Atomebenen, sondern auch von der Atomdichte der Ebenen und der Oberflächenenergie abhängig ist [Buc86].

5.2 Einfluss der Wärmebehandlung auf die Haftfestigkeit

Die Wärmebehandlung ist, neben Oberflächenvorbereitung und Kaltwalzen, einer der wichtigen Schritte bei der Herstellung von Werkstoffverbunden [Dur56]. Aufgrund der Verunreinigungen, die in der Schweißgrenzschicht vorhanden sind, wird nur eine teilweise Verschweißung nach dem Walzprozess erreicht, wobei mittels einer geeigneten Wärmebehandlung der Schweißprozess verbessert werden kann, [Nic62].

Das Walzplattieren bei erhöhter Temperatur verringert die Schwelldeformation. Dies hat eine große industrielle Bedeutung, da die Forderung nach großen Deformationen bei Raumtemperatur die Anwendung beschränkt. Da die Verwendung von erhöhten Tempe-

raturen sehr aufwendig ist, wäre es von Vorteil die Verschweißung bei Raumtemperatur durchzuführen und durch Wärmenachbehandlung zu verbessern. Tylecote und Wynne untersuchten die Kaltverschweißung von Aluminium und Kupfer, welche bei einem Verformungsgrad (Dickenänderung) von 60 % hergestellt wurde [Tyl63]. Sie zeigten, dass die Festigkeit durch eine Wärmenachbehandlung steigt. Diese Steigerung ist auf die lokale Neuordnung der Atome in der Grenzschicht zurückzuführen. Das Verhalten der Schweißverbindungen nach der Rekristallisation ist von den Eigenschaften der Metalloxide abhängig. Wenn eine Oxidauflösung möglich ist, wie bei Kupfer, verbessert eine weitere Wärmenachbehandlung die Haftfestigkeit infolge der Entfernung von Poren an der Grenzschicht. Ist eine Oxidauflösung nicht möglich, wie bei Aluminium, ist die endgültige Gleichgewichtsfestigkeit erreicht, sobald die Rekristallisation beendet ist.

Der Einfluss der Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften eines Aluminium-Stahl Werkstoffverbundes wurde auch in [Dan03b] evaluiert.

Bei der Produktion von Al1050/St37/Al1050 Werkstoffverbunden durch Kaltwalzen, ist eine hohe plastische Deformation der beiden Schichten notwendig um eine gewisse Haftfestigkeit zu gewährleisten. Die Wärmebehandlung ist relevant um die Eigenspannungen zu reduzieren. In [Dan03a] wird durch die Anwendung des Erichsen-Tiefungsversuches (Abbildung 5.2) der Einfluss der Anlasstemperatur (AT) auf die Verbindungsfestigkeit von Werkstoffverbunden untersucht. Abbildung 5.3(a) und 5.3(c) zeigen mikroskopische Aufnahmen der Oberfläche von "Erichsen cup" bei einer Anlasstemperatur von 450 °C bzw. 600 °C unter gleichen Versuchsbedingungen. Bei 600 °C wird die Probe eindeutig mehr geschädigt als bei 450 °C. Der Autor führt diesen Unterschied auf den Dickenunterschied der intermetallischen Schicht zurück, siehe Abbildung 5.3(b) und Abbildung 5.3(d).

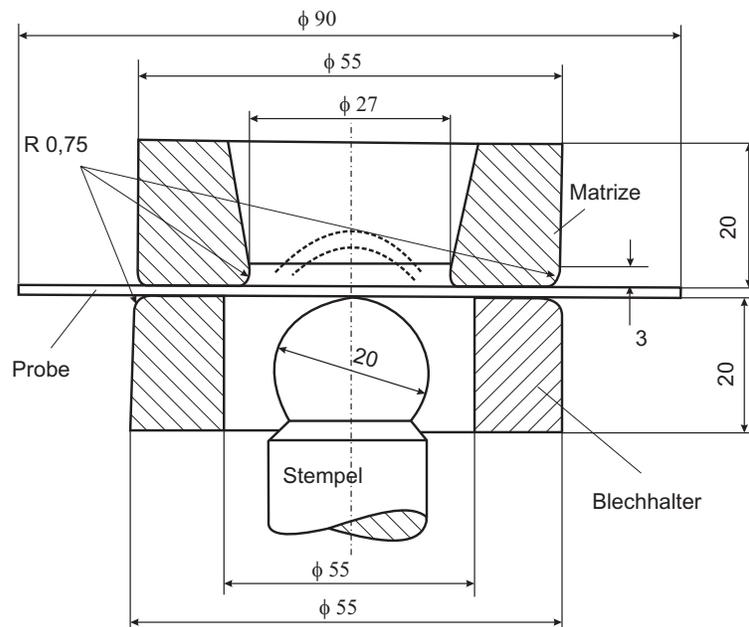


Abbildung 5.2: Werkzeug für den Erichsen-Tiefungsversuch nach DIN 50101

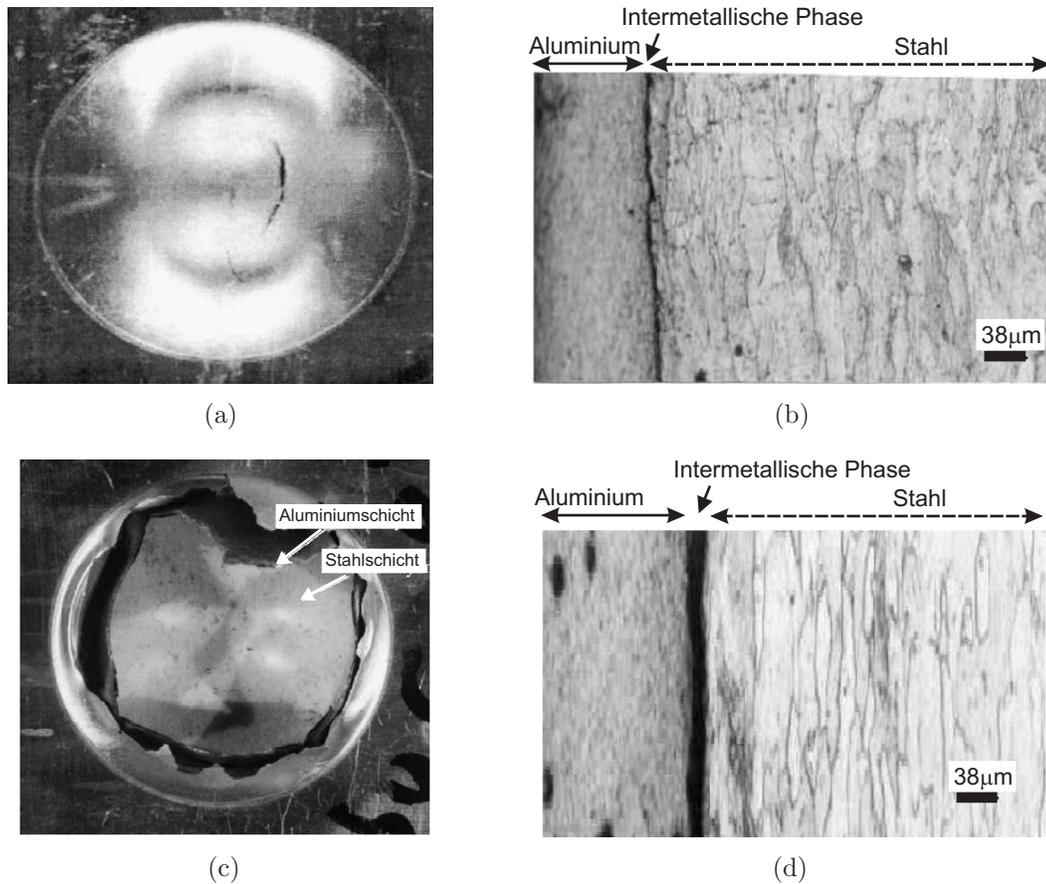


Abbildung 5.3: Einfluss der Anlasstemperatur auf die Haftfestigkeit
 (a) Mikroskopische Aufnahme des Erichson cups, AT 450 °C
 (b) Mikroskopische Aufnahme der Interphase, AT 450 °C
 (c) Mikroskopische Aufnahme des Erichson cups, AT 600 °C
 (d) Mikroskopische Aufnahme der Interphase, AT 600 °C

Abbildung 5.4 zeigt die Einflüsse der Anlasstemperatur (AT) und Anlanszeit (AZ) auf die Streckgrenze bzw. auf die Dehnung von Werkstoffverbunden aus Al/St/Al. Es gibt eine Kombination von Anlasstemperatur und -zeit um eine ideale Formbarkeit und hohe mechanische Eigenschaften (z.B. Streckgrenze) zu erreichen. Die Zugversuche wurden entsprechend ASTM-E8M-88a ausgeführt [Dan03b].

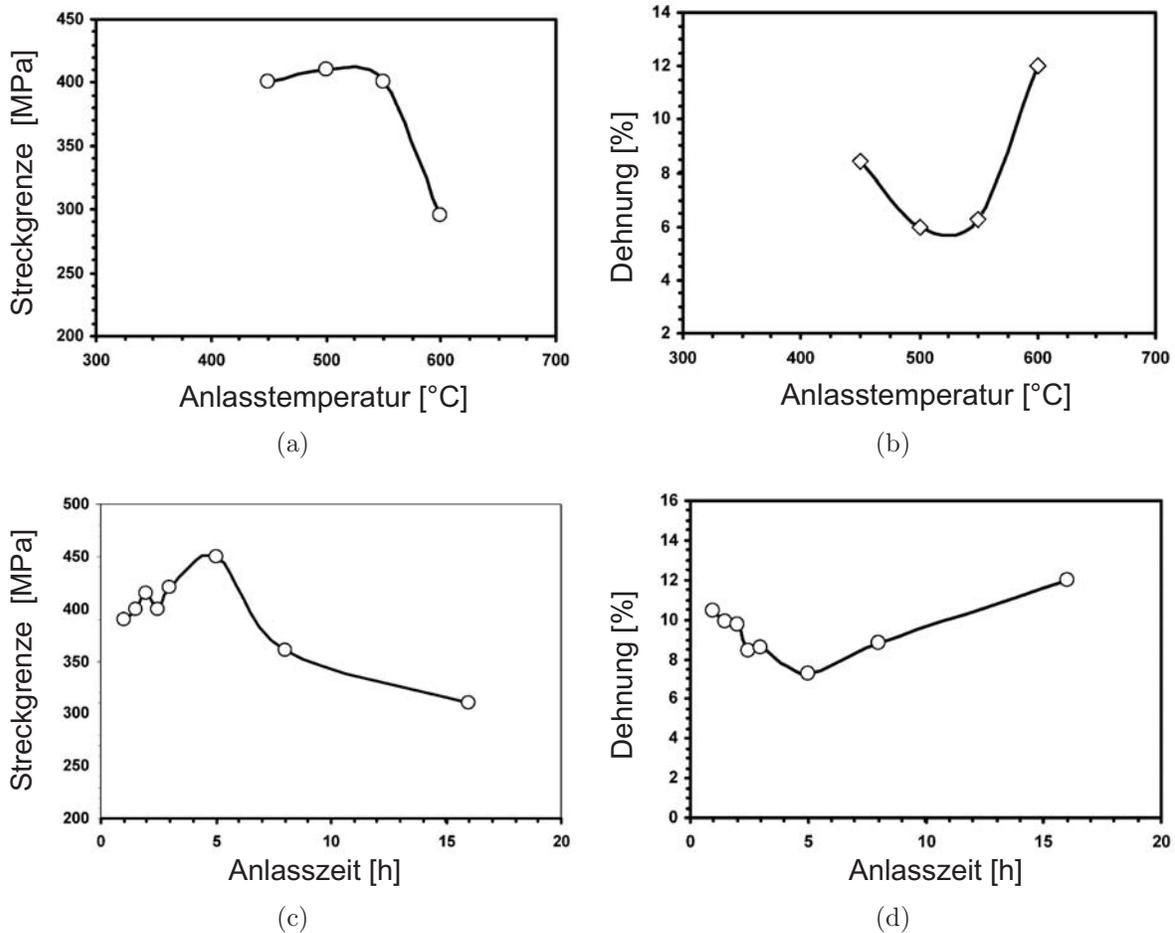


Abbildung 5.4: Einfluss der AT und AZ auf die mechanischen Eigenschaften von Al/St/Al WV

- (a) Einfluss der AT auf die Streckgrenze, AZ von 2, 5 h
- (b) Einfluss der AT auf die Dehnung, AZ von 2, 5 h
- (c) Einfluss der AZ auf die Streckgrenze, AT von 450 °C
- (d) Einfluss der AZ auf die Dehnung, AT von 450 °C

5.3 Herstellung des Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbundes

Die Herstellung des in der vorliegenden Arbeit untersuchten Werkstoffverbundes (WV) erfolgte mittels Walzplattieren bei einer Temperatur von 400 °C. Die beiden Werkstoffplatten (Al6016-T4 und DC06) wurden vor dem Kaltwalzen entfettet. Anschließend wurde die Oberfläche gebürstet. Durch Bürsten wird die Adsorptionsschicht (Gase, Wasser, organische Substanzen...) entfernt, so dass sich eine raue Schicht auf den beiden Oberflächen ausbildet.

Die Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit von Aluminium-Stahl-Verbundblechen wurden ausführlich in [Buc08] untersucht.

Um die Haftfestigkeit zum Schweißprozess zu vervollständigen wurde der Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund einer geeigneten Wärmebehandlung (Glühen bei 540 °C) unterzogen, Abbildung 5.5. Dies fördert den Diffusionsprozess und führt zu hoher Haftfestigkeit.

Für die Herstellung des Werkstoffverbundes mittels Walzplattieren ist ein Verformungsgrad von über 15 % erforderlich um eine Verbindung zwischen DC06 und Al6016 zu gewährleisten. Daher werden bei der Erstellung der Modelle die Verformungsgrade über 15 % betrachtet.

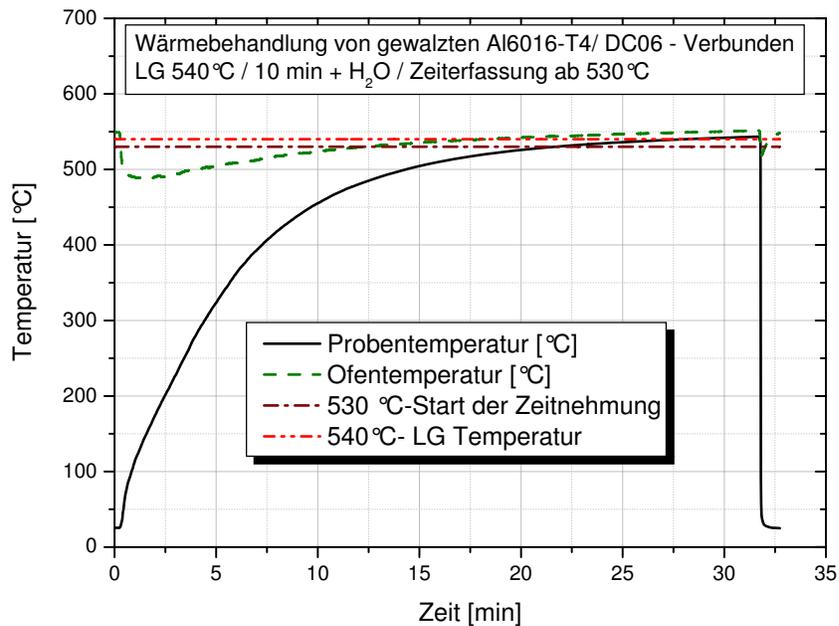


Abbildung 5.5: Wärmebehandlung des Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbundes

Kapitel 6

Charakterisierung der Grundwerkstoffe Al6016-T4 und DC06 im Anlieferungszustand

6.1 Geometrie und Herstellung der Werkstoffproben

Die Werkstoffe Al6016-T4 und DC06 wurden in Form von Platten vom Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen (LKR) zur Verfügung gestellt. Daraus wurden von der Firma BÖHLER Hochdrucktechnik (BHDT) mittels Wasserstrahlschneiden Zugversuchsproben mit einer Prüfbreite von $12,5\text{ mm}$ hergestellt, siehe Abbildung 6.1.

Es wurden Proben in verschiedenen Positionen (0° , 45° und 90°) zur Walzrichtung gefertigt, siehe Abbildung 6.2.

Die Versuche wurden entsprechend der Norm ÖNORM EN 10002 Teil 1 durchgeführt.

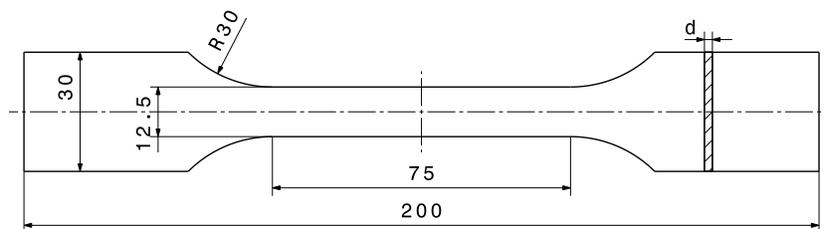


Abbildung 6.1: Probengeometrie für Zugversuche

Für die zyklischen Untersuchungen wurde entsprechend standard am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau die Probenform lt. Abbildung 6.3 definiert. Die Proben wurden ebenfalls zuerst mittels Wasserstrahlschneiden grob gefertigt. Die Feinbearbeitung auf eine Prüfbreite von 10 mm erfolgte durch Fräsbearbeitung, um die Rauigkeit an der Stirn-

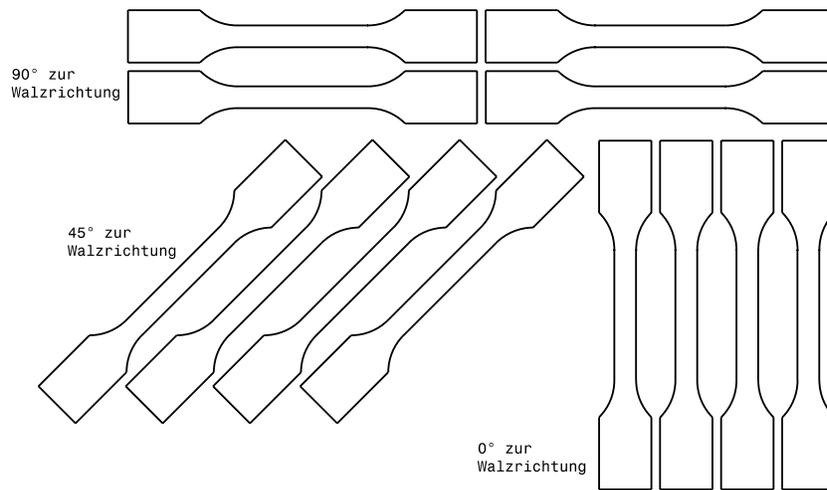


Abbildung 6.2: Skizze für die Entnahmeposition der Proben

seite der Proben im Prüfbereich zu verringern. Die Probendicke der Einzelkomponenten im Anlieferungszustand betrug 2 mm für das Aluminium und $2,5\text{ mm}$ für den Stahl.

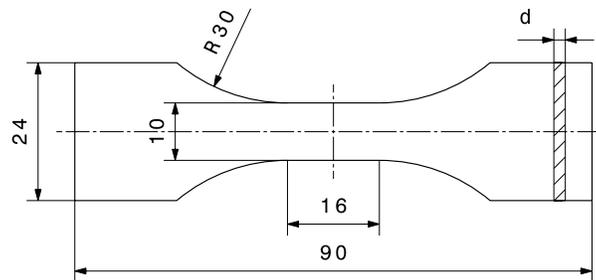


Abbildung 6.3: Probengeometrie für die Schwingfestigkeitversuche

6.2 Ergebnisse der Zugversuche

Die Zugversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Zur genauen Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden die Versuche bis zu einer Probenverlängerung von 5 mm innerhalb der Messlänge in Dehnungsregelung durchgeführt. Anschließend wurde auf Wegregelung umgeschaltet. Für die DC06-Proben wurden die Versuche mit einer Dehngeschwindigkeit von $0,01\text{ [mm/s]}$ und einer Wegrate von $0,1\text{ [mm/s]}$ durchgeführt. Für die Aluminium Proben wurde eine Dehngeschwindigkeit von $0,01\text{ [mm/s]}$ und Wegrate von $0,05\text{ [mm/s]}$ verwendet.

Die E-Moduli wurden rechnerisch aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm bestimmt und sind nur als gute Näherung zu interpretieren.

Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche an DC06.

Die höchste Zugfestigkeit und Streckgrenze bei 0,2 % plastischer Dehnung für den Werkstoff DC06 zeigen jene Proben, die in 45° zur Walzrichtung entnommen wurden. Die niedrigsten mechanischen Eigenschaften zeigen die Proben, die in 0° zur Walzrichtung entnommen wurden. Generell sind die Unterschiede in den Festigkeitskennwerten gering, Tabelle 6.1.

Die Ergebnisse der Zugversuche am Werkstoff Al6016-T4 sind in Abbildung 6.5 dargestellt, wobei keine signifikanten Unterschiede der verschiedenen Walzrichtungen feststellbar sind, Tabelle 6.2.

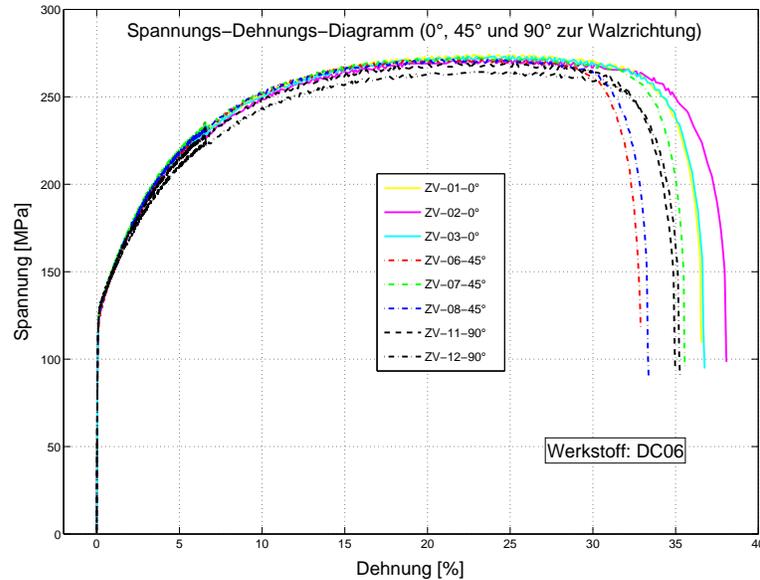


Abbildung 6.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von DC06

Werkstoff	DC06			
Lage zur Walzrichtung	0°	45°	90°	Mittelwert
R_m [MPa]	273	272	266	270
$R_{p0,2}$ [MPa]	129	130	132	130
A_g [%]	24	22	23	23
E-Modul [MPa]	200000	211000	206000	206000

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Zugversuche an DC06

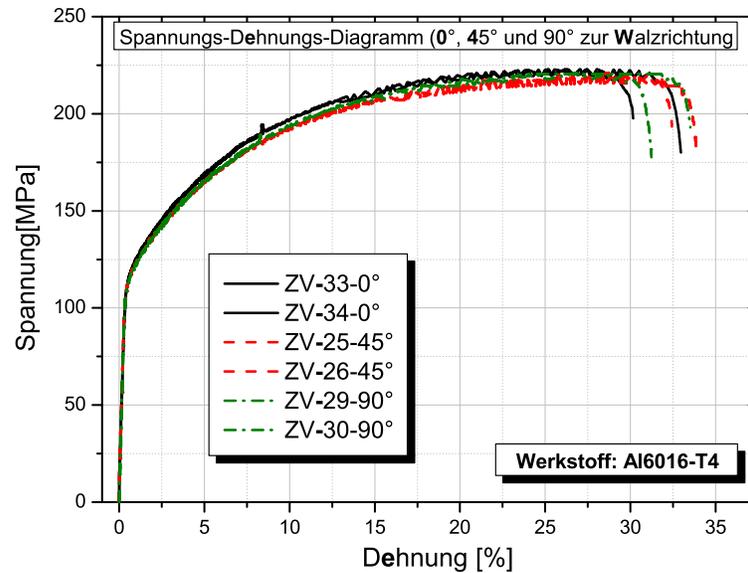


Abbildung 6.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Al6016-T4

Werkstoff	Al6016-T4			
Lage zur Walzrichtung	0°	45°	90°	Mittelwert
R_m [MPa]	221	218	219	219
$R_{p0,2}$ [MPa]	116	113	113	114
A_g [%]	21	22	19	21
E-Modul [MPa]	69000	73000	71000	71000

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Zugversuche an Al6016-T4

6.3 Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen

Die hier beschriebenen HCF-Versuche wurden kraftgesteuert mit einer Frequenz von 76 Hz durchgeführt. Aus der Prüfkraft wurde die Nennspannung im Prüfquerschnitt berechnet. Da Aluminiumlegierungen keine ausgeprägte Dauerfestigkeit aufweisen, wird die Schwingfestigkeit auf $N = 10^7$ Lastwechsel bezogen und ein zwei Phasen Wöhlerlinienmodell eingesetzt, bei dem die Neigung der Wöhlerlinie im Übergangsgebiet zur Dauerfestigkeit 5-fach höher ist als im Zeitfestigkeitsgebiet, $k_2 = 5 \cdot k_1$. Dieses Modell hat sich sehr gut zur Beschreibung des HCF-Ermüdungsverhaltens von Aluminiumlegierungen bewährt [Lei01]. Die Schwingfestigkeit ergibt sich zu einer Schwellfestigkeit von $\sigma_{aD, sch} = 61 \text{ MPa}$ bezogen auf eine Lastspielzahl von 10^7 . Die Ecklastspielzahl beträgt $N_D = 10^6$ und die Steigung der Wöhlerlinie $k_1 = 6$ und $k_2 = 30$. Bei wechselnder Belastung beträgt die Dauerfestigkeit

$\sigma_{aD,W} = 66 \text{ MPa}$, $k_1 = 9$ und $k_2 = 45$, Abbildung 6.6. Im Druckbereich knicken Proben aus Feinblech aus. Um ein Ausknicken zu verhindern, wurden Knickstütze verwendet.

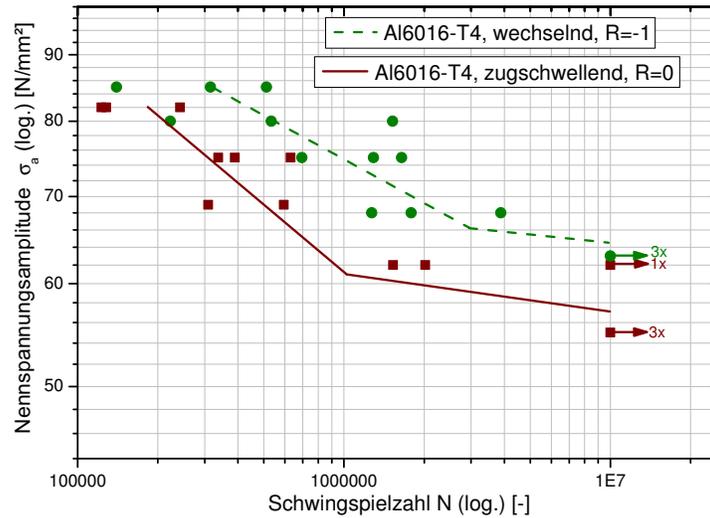


Abbildung 6.6: Anrisswöhlerlinie des Werkstoffes Al6016-T4 im Anlieferungszustand

Zur zyklischen Charakterisierung von DC06 standen in Summe 15 Proben zur Verfügung. Die Versuche wurden ebenfalls kraftgesteuert mit einer Frequenz von 79 Hz durchgeführt. Bei der Spannungsamplitude von $\sigma_a = 94 \text{ MPa}$ erkennt man eine relativ große Streuung. Die Schwingfestigkeit ergibt sich zu $\sigma_{aD,sch} = 91 \text{ MPa}$. Die Ecklastspielzahl beträgt $N_D = 85100$ und die Steigung der Wöhlerlinie $k = 5$, Abbildung 6.7.

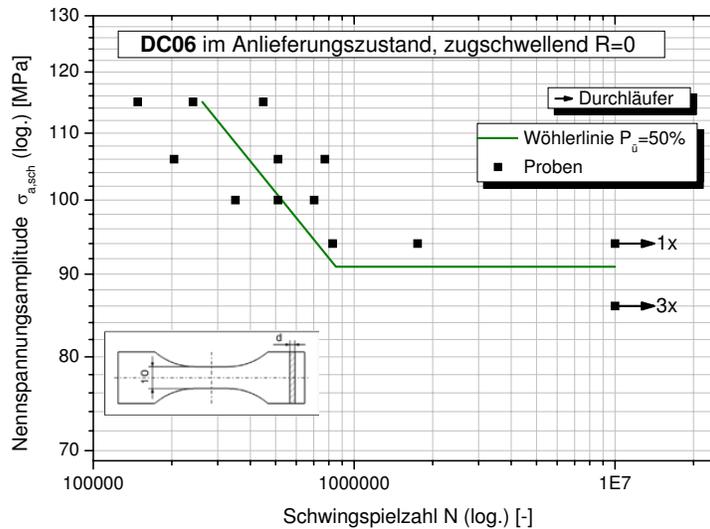


Abbildung 6.7: Anrisswöhlerlinie des Werkstoffes DC06 im Anlieferungszustand

Kapitel 7

Gefüge- und Härteuntersuchungen am DC06

Wenn man sich das Ausgangswerkstück aus Würfeln zusammengesetzt vorstellt, würden diese Würfel durch den Walzvorgang zu Quadern verzerrt (siehe Abbildung 7.2).

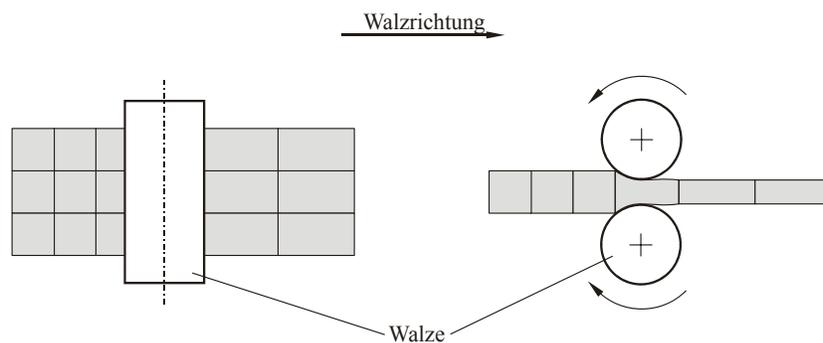


Abbildung 7.1: Gefügeänderung durch das Walzen [Buc05]

Das Gefüge des Werkstoffes DC06 im Lieferzustand zeigt erwartungsgemäß eine feinkörnige, globulare Struktur, siehe Abbildung 7.2(a). Das Walzen führt zu einem verstreckten, zeiligen Gefüge, dessen mechanische Eigenschaften anisotrop werden (siehe Abschnitt 8.4). Mit steigendem Verformungsgrad steigt die Zeiligkeit des Werkstoffes DC06, Abbildung 7.2(c) bis 7.2(d).

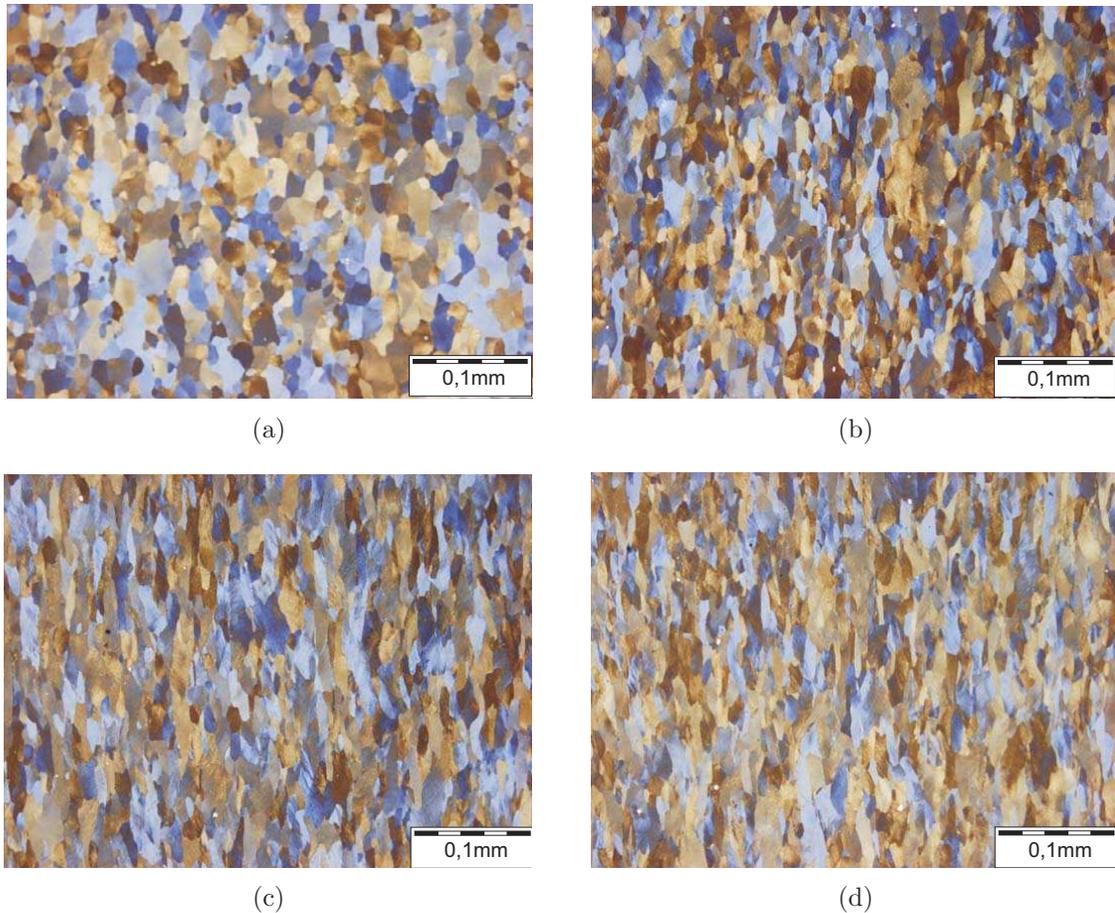


Abbildung 7.2: Gefügeausbildung von DC06

- (a) im Anlieferungszustand
- (b) bei einem Verformungsgrad von 19 %
- (c) bei einem Verformungsgrad von 25 %
- (d) bei einem Verformungsgrad von 37 %

Um den Einfluss des Verformungsgrades auf die Härte von DC06 untersuchen zu können, wurden Härtemessungen an Proben mit unterschiedlichen Verformungsgraden durchgeführt.

Abbildung 7.3 zeigt exemplarisch die Härtemessung an einer Probe. Die Änderung der Textur durch die Verformung beeinflusst eindeutig die Härteeigenschaften. Abbildung 7.4 zeigt die Änderung der Härte in Abhängigkeit des Verformungsgrades. Die Härtemessungen wurden in Anlehnung zur ÖNORM EN ISO 6507-1 durchgeführt.

Die Proben wurden mit Aceton gereinigt und geschliffen. Bei der Belastung wurde eine Geschwindigkeit von 0,25 mm/s gewählt. Die Entlastungsgeschwindigkeit betrug 1 mm/s.

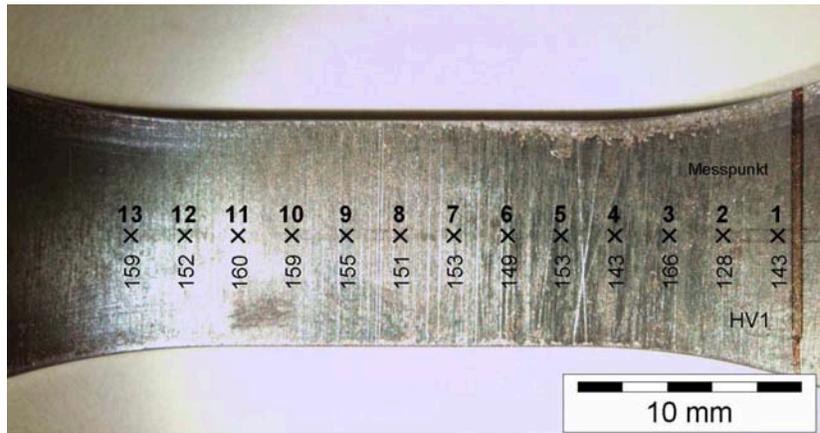


Abbildung 7.3: Position der Härtemessstelle

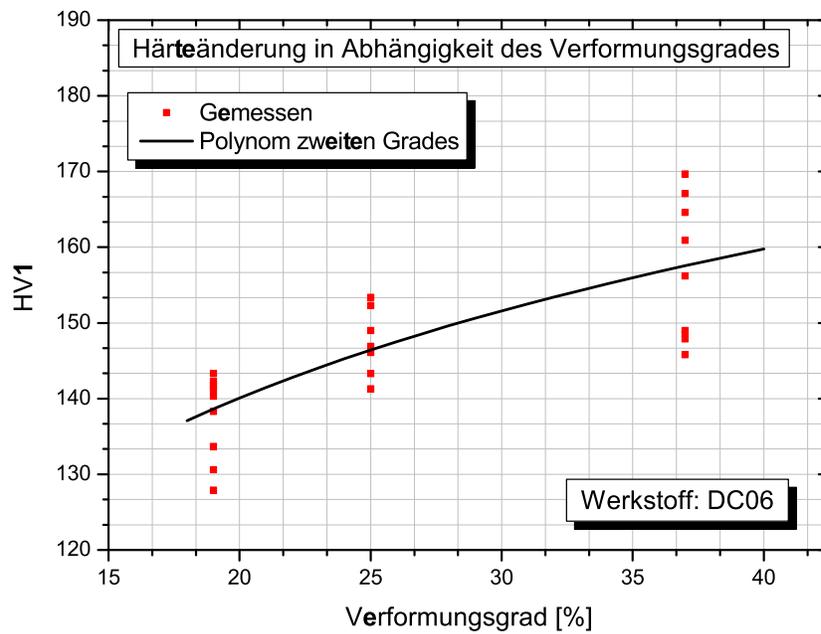


Abbildung 7.4: Härte des Werkstoffes DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades

Kapitel 8

Lebensdauerrelevante Einflussgrößen - Versuche und Modelle

Um ein Berechnungsmodell, das unabhängig von der Dicke des Werkstoffverbundes ist ermitteln zu können, wurden erst die Einzelkomponenten und dann der Werkstoffverbund untersucht.

8.1 Einfluss des Verformungsgrades

Basierend auf experimentellen Untersuchungen [Buc08, Bic06] und der Literatur [Dan03a, Dan03b], hat sich herauskristallisiert, dass eine Wärmebehandlung (Glühen bei 540 °C) des Werkstoffverbundes zu einer starken Haftfestigkeit führt. Während des Herstellungsprozesses des Werkstoffverbundes durch Kaltpressschweißen treten Verfestigungen auf. Aufgrund des Glühens bei 540 °C rekristallisiert der Werkstoff Al6016-T4 und zeigt somit keinen signifikanten bleibenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, Abbildung 8.1. Die Temperatur von 540 °C hingegen verursacht keine Rekristallisation des Werkstoffes DC06. Somit bleibt der Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 erhalten, Abbildung 8.2.

Infolgedessen wird der Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 und somit auf die Eigenschaften des Werkstoffverbundes als der Haupteinflussfaktor angenommen. Um den Einfluss des Verformungsgrades auf die statischen und zyklischen Eigenschaften zu ermitteln wurden Untersuchungen an Proben aus unterschiedlich vorverformten Platten durchgeführt.

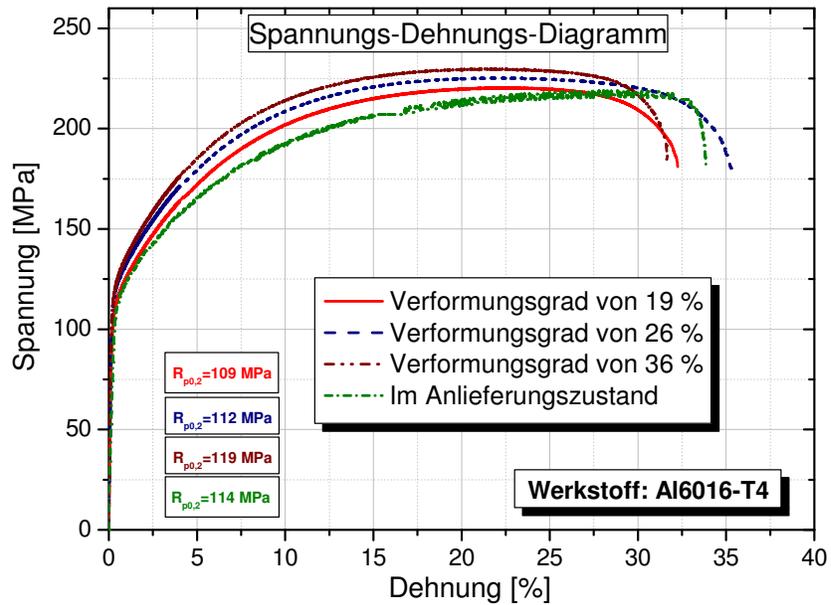


Abbildung 8.1: Einfluss des VG auf die mechanischen Eigenschaften von Al6016-T4

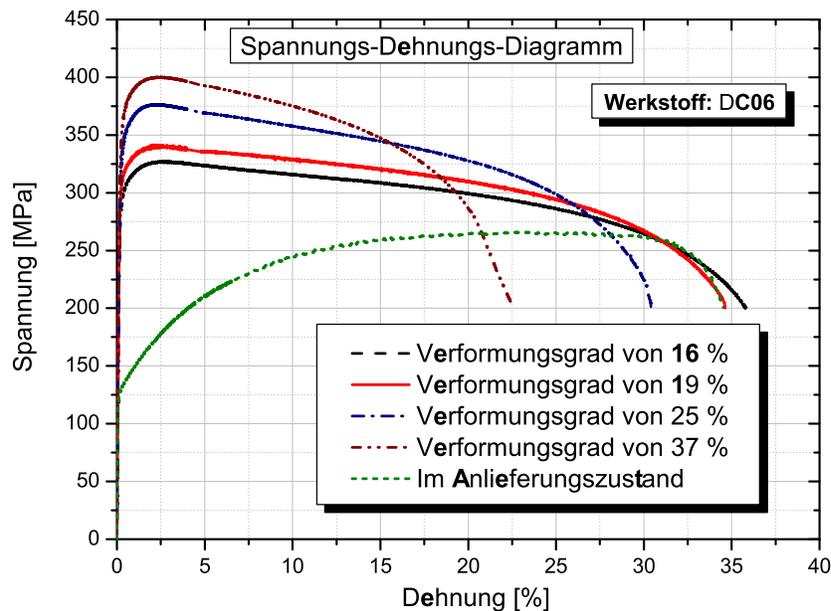


Abbildung 8.2: Einfluss des VG auf die mechanischen Eigenschaften von DC06

8.1.1 Definition des Verformungsgrades

Der Verformungsgrad ist aus dem Quotienten der Querschnittsänderung ΔS und des Anfangsquerschnittes S_0 definiert [Wei94], siehe Gleichung 8.1 und Abbildung 8.3. Der maximal erreichbare Verformungsgrad und die Verformungsfähigkeit eines Werkstoffes sind keine reinen Werkstoffkennwerte. Sie sind auch abhängig vom Spannungszustand und somit vom Formgebungsverfahren [Bar99].

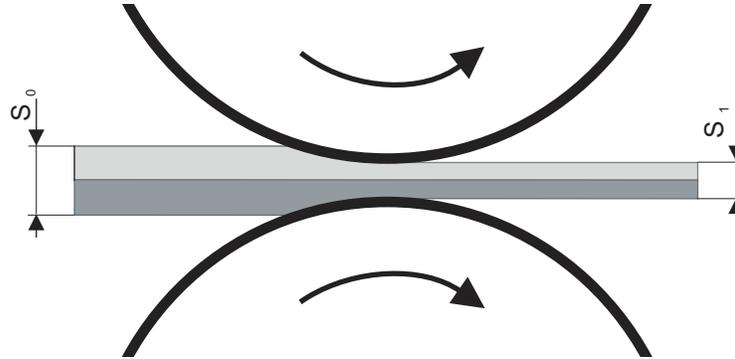


Abbildung 8.3: Definition des Verformungsgrades

$$VG = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 \% \quad (8.1)$$

8.1.2 Untersuchungen am Werkstoff DC06

IF(Interstitial-Free)-Stähle eignen sich auf Grund ihrer hervorragenden Kaltumformbarkeit sowohl für höchste Tiefzieh- als auch Streckziehbeanspruchungen. Dieses Verhalten wird durch die vollständige Abbindung der Elemente Kohlenstoff und Stickstoff durch Mikrolegierung mit Niob und/oder Titan erreicht. Dies geschieht in Verbindung mit entsprechenden Walz- und Glühbedingungen.

Für die Herstellung des Werkstoffverbundes mittels Walzplattieren ist ein Verformungsgrad von über 15% erforderlich um eine Verbindung zwischen DC06- und Al6016 zu gewährleisten. Daher werden bei der Erstellung der Simulationsmodelle, die Verformungsgrade über 15% betrachtet. Somit finden die erstellten Modelle erst ab einem Verformungsgrad von 15 % ihren Anwendung.

8.1.2.1 Einfluss des Verformungsgrades auf die statischen Festigkeitseigenschaften von DC06

Um den Einfluss des Verformungsgrades auf die statischen Werkstoffkennwerte ermitteln zu können, wurden Proben mit unterschiedlichen Verformungsgraden (16 %, 19 %, 25 % und 37 %) hergestellt und im Zugversuch geprüft, siehe Abbildung 8.2. Es ist ein erheblicher Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 zu bemerken.

Der Zusammenhang zwischen den statischen Eigenschaften (die Streckgrenze $R_{p0,2}$, die Zugfestigkeit R_m und die Bruchdehnung A) und dem Verformungsgrad wurde anhand logarithmischer Gleichungen (siehe Gleichung 8.2 bis 8.4) beschrieben.

$$R_{p0,2} = 78,9 \cdot \ln(VG) + 82,9 \quad [MPa] \quad (8.2)$$

$$R_m = 89,9 \cdot \ln(VG) + 78,5 \quad [MPa] \quad (8.3)$$

$$A = -11 \cdot \ln(VG) + 62,9 \quad [\%] \quad (8.4)$$

8.1.2.2 Einfluss des Verformungsgrades auf das Ermüdungsverhalten von DC06

Es wurden Proben mit unterschiedlichen Verformungsgraden im Zug/Druck Bereich bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ und $R = -1$ zyklisch geprüft. Untersuchungen unter Wechselbiegebelastung ($R = -1$) wurden ebenfalls durchgeführt.

Einfluss auf die zyklischen Eigenschaften, Zugschwellbelastung $R = 0$

Um den Einfluss des Verformungsgrades auf die Lebensdauer von DC06 zu ermitteln, wurden Proben aus Platten mit unterschiedlichen Verformungsgraden (VG) gefertigt. Durch Vorverformen (Verformungsgrad von 19 %) der DC06-Platte steigt die Schwingfestigkeit von $\sigma_{aD,sch} = 91 \text{ MPa}$ erheblich auf $\sigma_{aD,sch} = 162 \text{ MPa}$. Die Ecklastspielzahl beträgt $N_D = 1,67E6$ und die Neigung der Wöhlerlinie beträgt $k_1 = 20$. Eine noch größere Vorverformung (Verformungsgrad von 25 % bzw. 37 %) der Platte steigert die Dauerfestigkeit nochmals auf $\sigma_{aD,sch} = 165 \text{ MPa}$ bzw. 184 MPa , Abbildung 8.4. Um die Lebensdauer von Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden ermitteln zu können muss der Einfluss des Verformungsgrades bzw. des Herstellprozesses berücksichtigt werden.

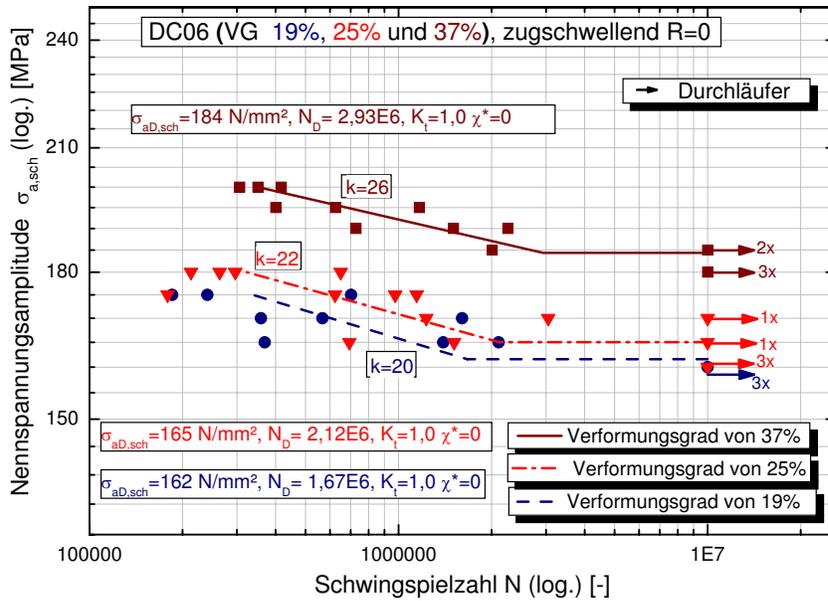


Abbildung 8.4: Anrisswöhlerlinie von DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades, zugschwellend $R = 0$

Basierend auf den Ergebnissen der Ermüdungsversuche ist es gelungen einen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Wöhlerlinie (die Schwingfestigkeit σ_D , die Neigung k und die Ecklastspielzahl N_D) in Abhängigkeit des Verformungsgrades zu ermitteln, Gleichung 8.5 bis 8.7.

Die Untersuchungen in der Literatur zeigen, dass sich der Zusammenhang zwischen der Streckgrenze und dem Verformungsgrad von Stahl mittels einer logarithmischen Funktion beschreiben lässt. Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen zeigen einen proportionalen Zusammenhang zwischen der Schwingfestigkeit und der Streckgrenze. Daher wurde für die Beschreibung des Zusammenhanges zwischen den Eigenschaften der Wöhlerlinie und des Verformungsgrades eine logarithmische Funktion herangezogen, Abbildung 8.5

$$\sigma_{D,Sch} = 34,1 \cdot \ln(VG) + 59,3 \quad [MPa] \quad (8.5)$$

$$k_{Sch} = 9,1 \cdot \ln(VG) - 6,9 \quad [-] \quad (8.6)$$

$$N_{D,Sch} = 1902000 \cdot \ln(VG) + 395300 \quad [-] \quad (8.7)$$

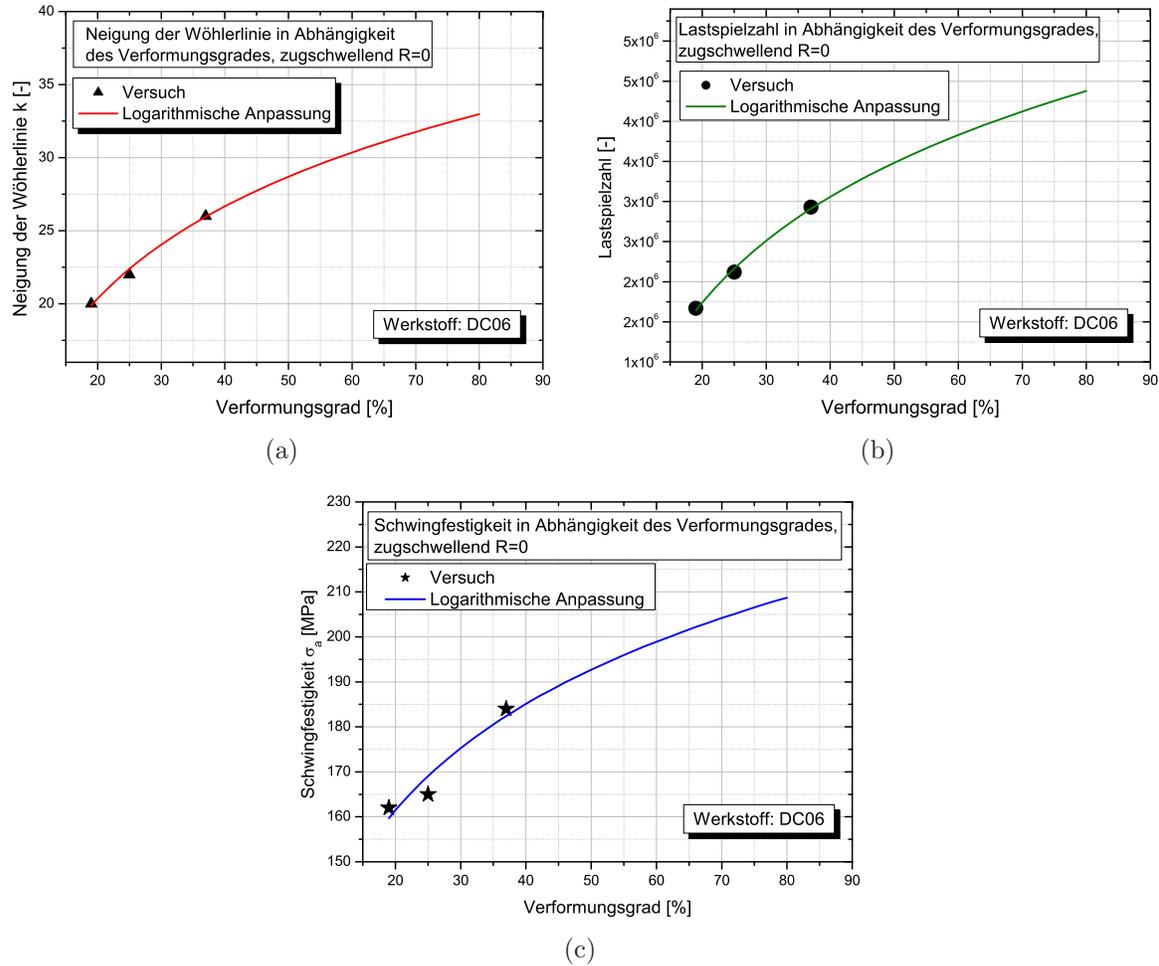


Abbildung 8.5: Einfluss des Verformungsgrades auf die Wöhlerlinie, $R = 0$
 (a) Neigung der Wöhlerlinie, (b) Lastspielzahl, (c) Schwingfestigkeit

Es wurden auch zugschwellende Versuche an nicht wärmebehandelten Proben durchgeführt und den Ergebnissen der wärmebehandelten Proben gegenübergestellt. Die Ergebnisse bestätigen die Überlegungen, dass der Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 trotz des Glühens der WV-Proben bei 540 °C erhalten bleibt, Abbildung 8.6.

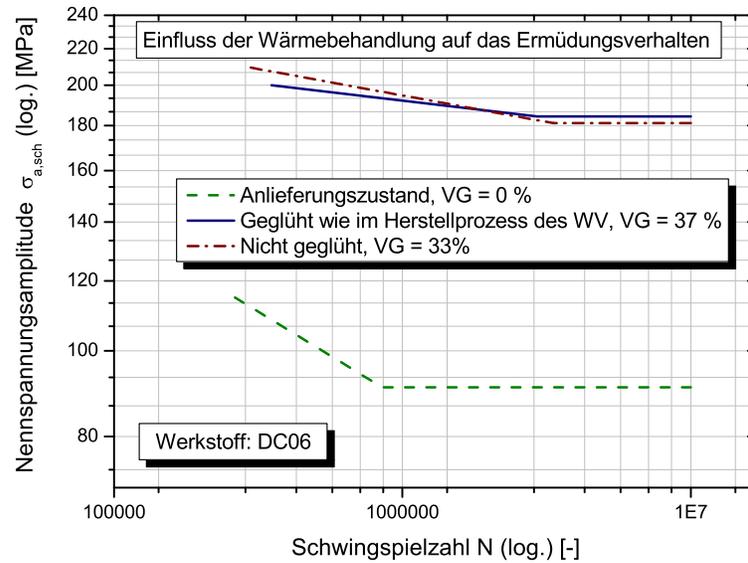


Abbildung 8.6: Einfluss der Wärmebehandlung auf das Ermüdungsverhalten von DC06

Einfluss auf die zyklischen Eigenschaften, Zug/Druck $R = -1$

Es wurden wiederum zyklische Versuche an Proben mit unterschiedlichen Verformungsgraden (22 %, 28 % und 32 %) durchgeführt. Abbildung 8.7 zeigt die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen. Der Zusammenhang zwischen den Schwingfestigkeits-eigenschaften und dem Verformungsgrad wurde mittels Gleichung 8.8 bis 8.10 beschrieben, Abbildung 8.8.

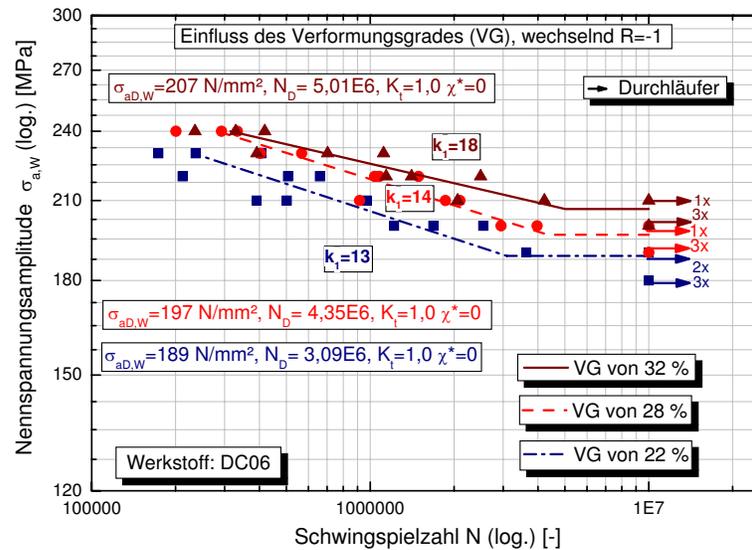
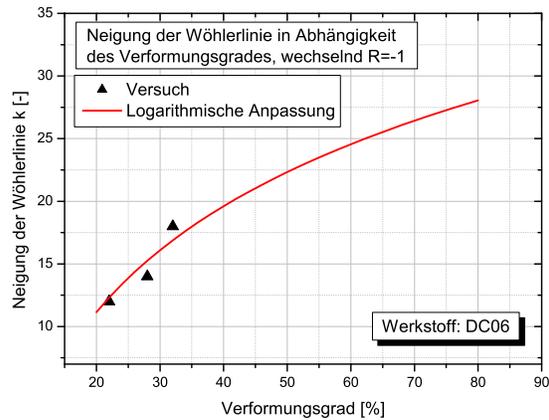


Abbildung 8.7: Anrisswöhlerlinie von DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades

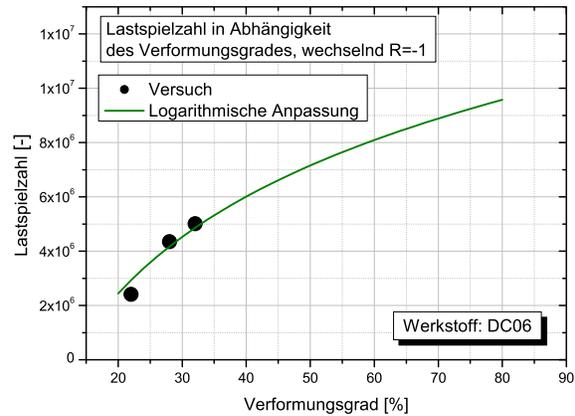
$$\sigma_{D,ZDW} = 46 \cdot \ln(VG) + 43 \quad [MPa] \quad (8.8)$$

$$k_{ZDW} = 12,2 \cdot \ln(VG) - 25,4 \quad [-] \quad (8.9)$$

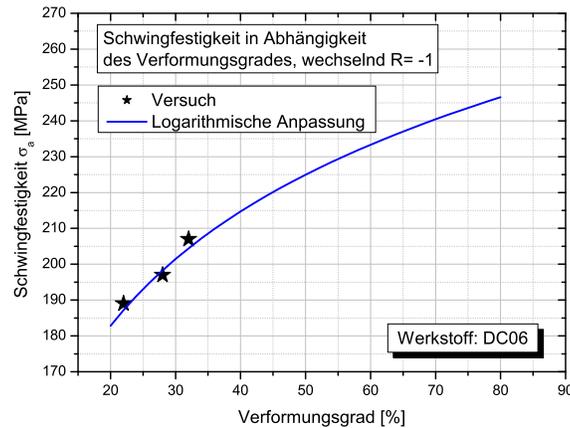
$$N_{D,ZDW} = 5147000 \cdot \ln(VG) - 12980000 \quad [-] \quad (8.10)$$



(a)



(b)



(c)

Abbildung 8.8: Einfluss des Verformungsgrades auf die Wöhlerlinie, $R = -1$
 (a) Neigung der Wöhlerlinie, (b) Lastspielzahl, (c) Schwingfestigkeit

Einfluss auf die zyklischen Eigenschaften, Vierpunktbiegung $R = -1$

Um den Einfluss des Verformungsgrades auf das Ermüdungsverhalten zu untersuchen wurden Vierpunktbiegeversuche durchgeführt, Abbildung 8.9.

Die Ergebnisse der Vierpunktbiegeversuche an DC06 wurden in Abbildung 8.10 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Wöhlerlinie (die Schwingfestigkeit

σ_D , die Neigung k und die Ecklastspielzahl N_D) und dem Verformungsgrad (Abbildung 8.11) wurde anhand logarithmischer Gleichungen, Gleichung 8.11 bis 8.13 beschrieben.

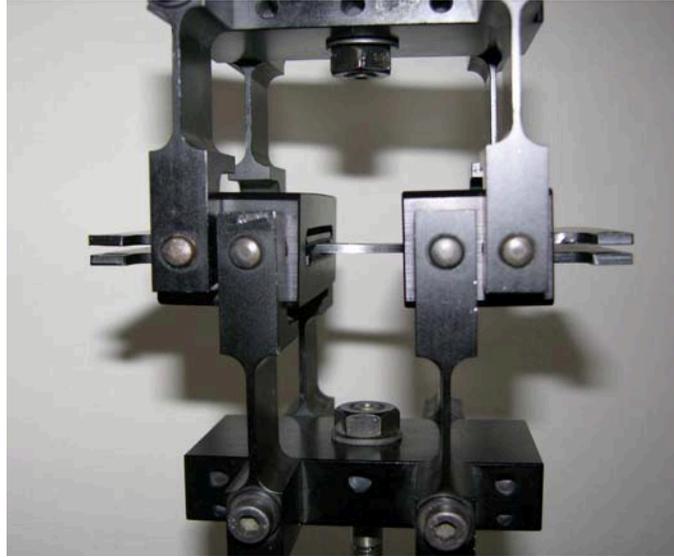


Abbildung 8.9: Einspannvorrichtung für die Biegeversuche, $R = -1$

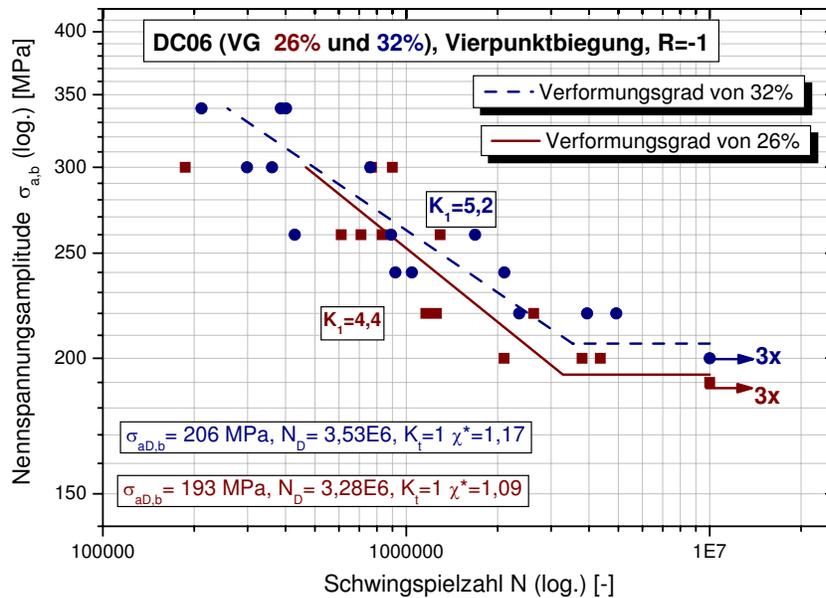


Abbildung 8.10: Anrisswöhlerlinie von DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades, Vierpunktbiegebelastung $R = -1$

$$\sigma_{D,bw} = 63,8 \cdot \ln(VG) - 11 \quad [MPa] \quad (8.11)$$

$$k_{bw} = 3,85 \cdot \ln(VG) - 8,15 \quad [-] \quad (8.12)$$

$$N_{D,bw} = 1204000 \cdot \ln(VG) + 642000 \quad [-] \quad (8.13)$$

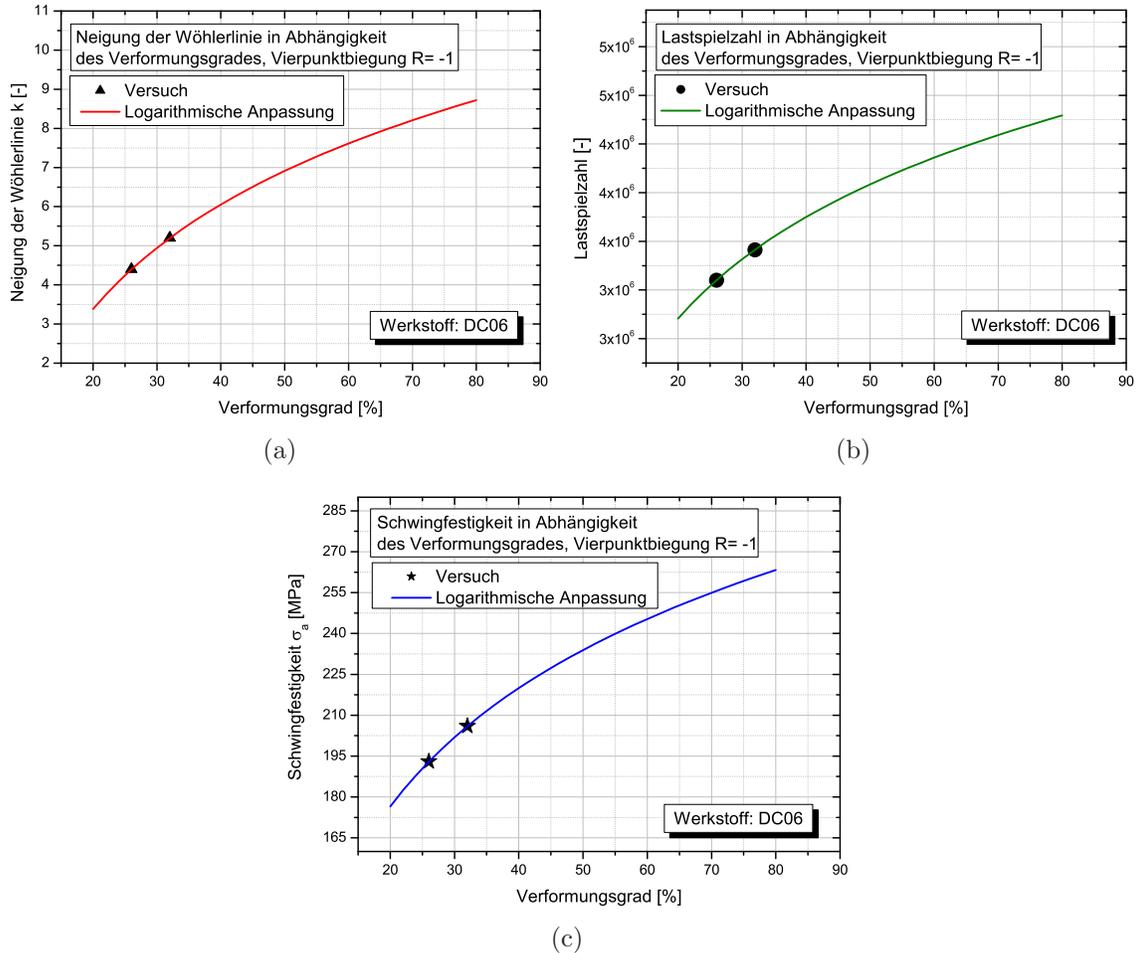


Abbildung 8.11: Einfluss des Verformungsgrades auf die Wöhlerlinie unter Vierpunktbiegebelastung, $R = -1$

(a) Neigung der Wöhlerlinie, (b) Lastspielzahl, (c) Schwingfestigkeit

8.1.3 Untersuchungen am Werkstoff Al6016-T4

Um den Einfluss des Verformungsgrades auf das Ermüdungsverhalten des Werkstoffes Al6016-T4 zu untersuchen wurden Proben aus Platten in verschiedenen Zuständen (im Lieferzustand und 50 % Verformungsgrad) gefertigt. Die unterschiedlichen Verformungsgrade wurden durch Kaltwalzen der ursprünglichen Platte erreicht. Anschließend wurde eine Wärmebehandlung durchgeführt (Glühen bei 540 °C). Durch die höhere Wärmebehandlungstemperatur und eine Haltezeit von 10 min findet eine vollständige Rekri-

stallisation (siehe Kapitel 3.4) des Werkstoffes Al6016 statt. Daher ist der Einfluss der Verformung auf die statischen und zyklischen Festigkeitseigenschaften nicht bemerkbar, Abbildung 8.12.

Der Einfluss des Verformungsgrades auf das Ermüdungsverhalten von Al6016-T4 wird im Simulationsmodell für die Lebensdauerberechnung nicht berücksichtigt.

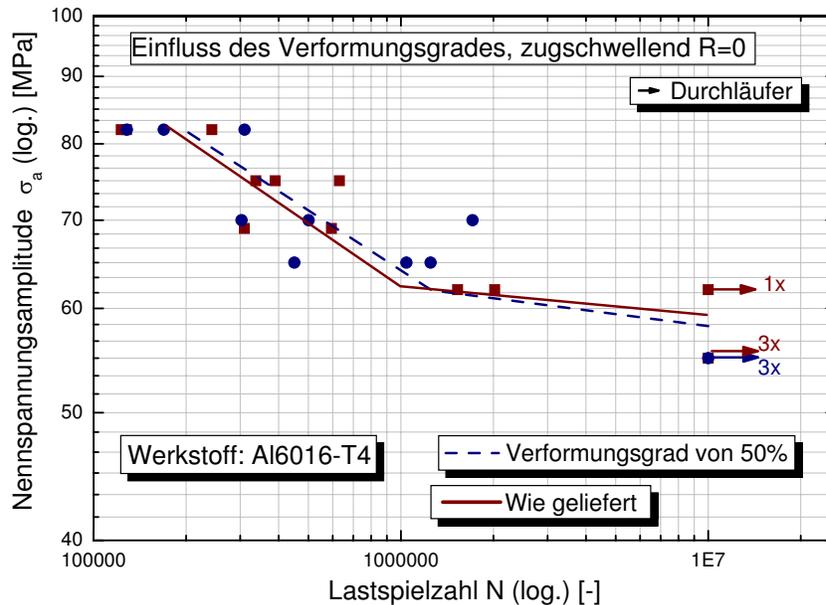


Abbildung 8.12: Einfluss des VG auf das Ermüdungsverhalten von Al6016-T4

8.2 Einfluss der Umformung

8.2.1 Verhalten von DC06 unter plastischer Umformung

In [Ste02] wurden statische und zyklische Untersuchungen in Abhängigkeit der Umformung vom DC06 durchgeführt. Das Material wurde vor der Herstellung der Proben einer Vorverformung von 10% durch einachsige Zugbeanspruchung unterworfen. Die Ergebnisse zeigen zwar eine deutliche Steigerung der statischen Festigkeitskennwerte aber nur eine geringfügige Verringerung der ertragbaren Spannungsamplitude in den zyklischen Versuchen. Diese Untersuchungen waren die Motivation, das Verfestigungsverhalten des DC06 näher zu untersuchen. Zur Ermittlung des Verfestigungsverhaltens wurden LCF-Versuche (low cycle fatigue) in Anlehnung an [Rie05] bei konstanter Maximalspannung durchgeführt, Abbildung 8.13. Die Abnahme der plastischen Dehnung, Abbildung 8.14 zeigt eine starke Verfestigung des DC06-Werkstoffes.

Weiters wurden Zugversuche an Proben in verschiedenen Zuständen durchgeführt, um den

Einfluss der plastischen Verformung auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes DC06 zu erklären.

Folgende Werkstoffzustände wurden untersucht:

- Nicht verfestigte Probe: Probe im Anlieferungszustand.
- Verfestigte Probe: Probe, die im kraftgesteuerten zugschwellenden LCF- Versuch ($R = 0$) bis 102 Lastwechsel bei einer Spannungsamplitude von $\sigma_a = 90 \text{ MPa}$ untersucht wurde.

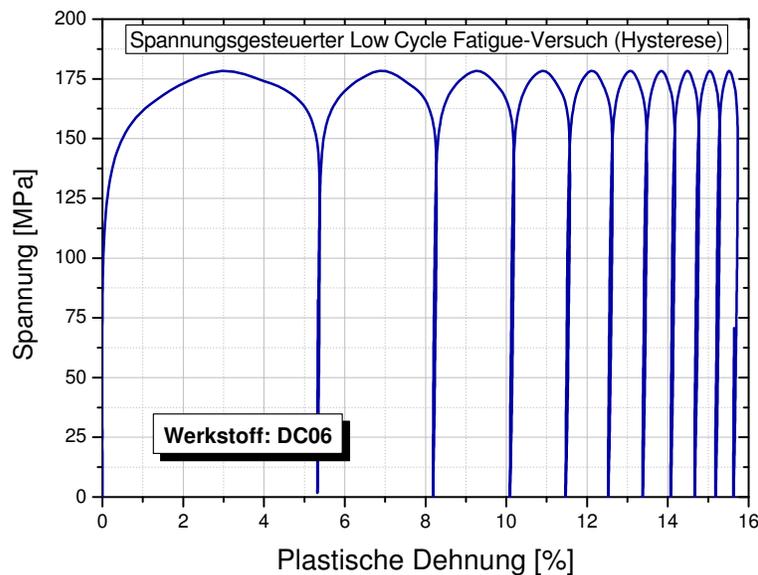


Abbildung 8.13: Spannungsgesteuerter LCF-Versuch, Hysterese

Abbildung 8.15 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche. Durch Vorbelasten der Proben wurde die Streckgrenze um 32% gesteigert. Dies ist auf die Verfestigung des Werkstoffes DC06 durch die plastische Verformung zurückzuführen.

Da die meisten Bauteile aus Feinblech überwiegend durch Walzen und Tiefziehen hergestellt werden, muss der Einfluss von plastischen Verformungen während des Fertigungsprozesses auf die Schwingfestigkeit untersucht werden. Simulationsmodelle für die Lebensdauerabschätzung von Bauteilen aus diesem Werkstoffverbund müssen daher den Einfluss der elastoplastischen Verformung abbilden.

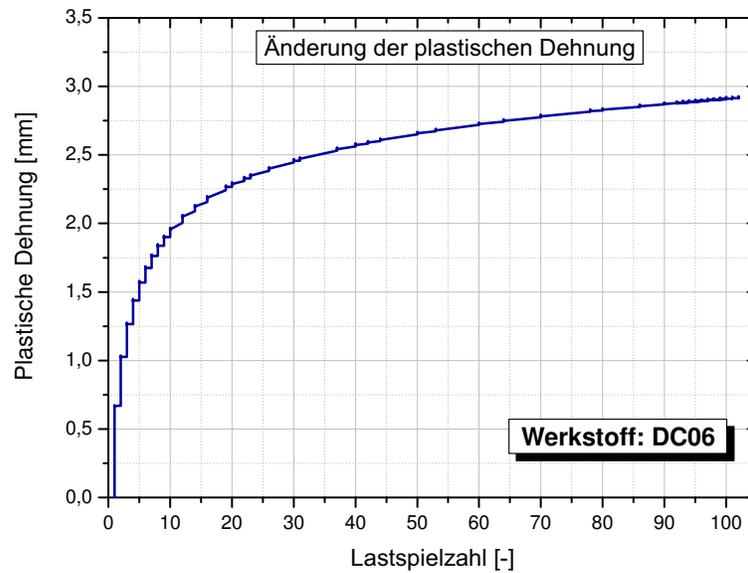


Abbildung 8.14: Änderung der plastischen Dehnung im LCF-Versuch

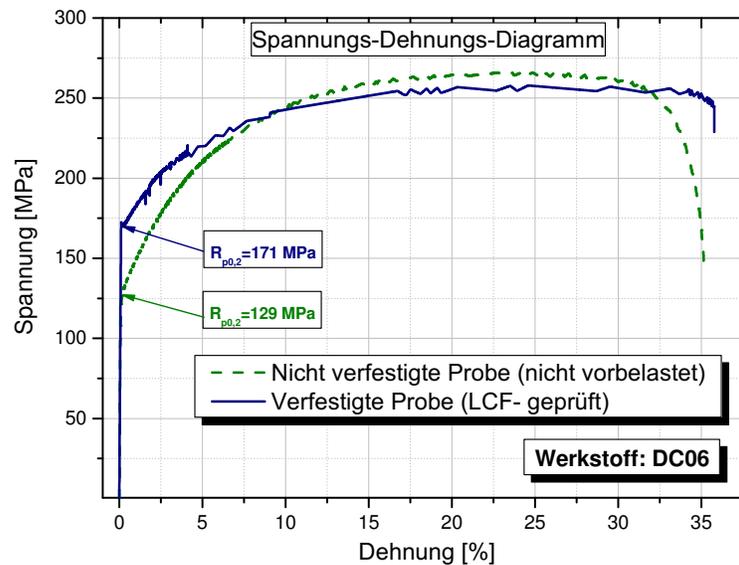


Abbildung 8.15: Gegenüberstellung der Zugversuche an DC06 Proben in verschiedenen Zuständen

8.2.2 Verhalten von Al6016-T4 unter plastischer Umformung

Abbildung 8.16 zeigt die Änderung der plastischen Dehnung bei gleichbleibender Spannung ($\sigma_a = 85 \text{ MPa}$).

Die Abnahme der Änderung der plastischen Dehnung (siehe Abbildung 8.17) zeigt, dass eine Verfestigung des Al6016-T4 Werkstoffes stattfindet. Daher muss der Einfluss der Umformung auf die mechanischen Eigenschaften und somit auf das Ermüdungsverhalten berücksichtigt werden.

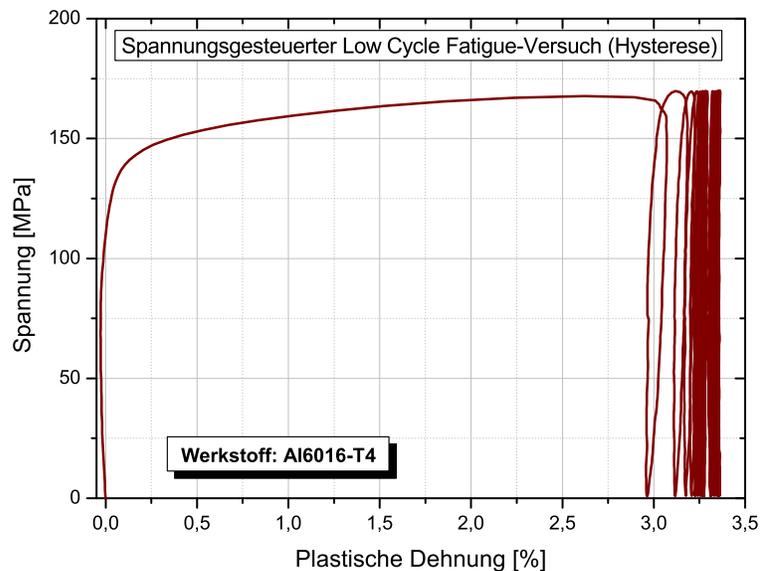


Abbildung 8.16: Spannungsgesteuerter LCF-Versuch, Hysterese

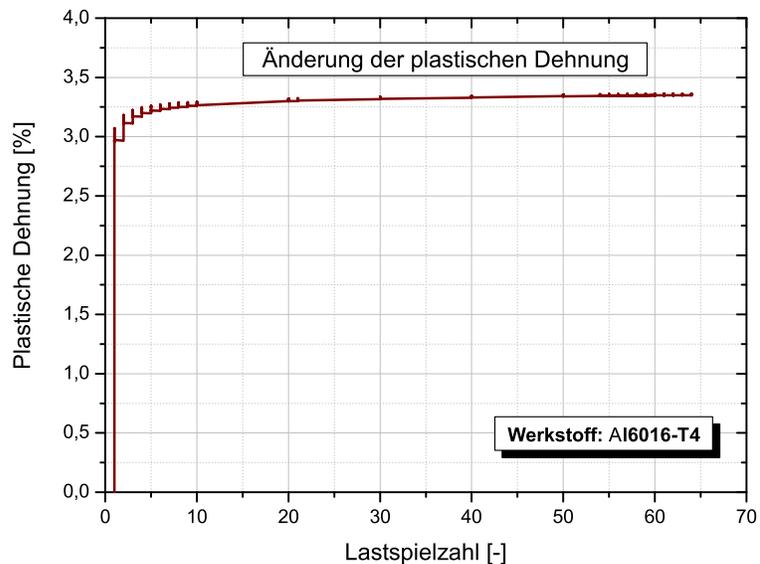


Abbildung 8.17: Änderung der plastischen Dehnung im LCF-Versuch

8.3 Einfluss der Mittelspannung auf das Ermüdungsverhalten

Im Wöhlerdiagramm trägt man Messwerte bei konstantem Spannungsverhältnis auf. Führt man Versuche mit einer größeren Mittelspannung durch, so verschiebt sich die Kurve zu geringer ertragbaren Spannungsamplituden. Für die Ermittlung der Schwingfestigkeit für unterschiedliche Mittelspannungen bietet sich die Verwendung von Dauerfestigkeitsdiagrammen an, die die Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von der Mittelspannung darstellen. Dadurch wird vermieden, dass eine Vielzahl an Wöhlerlinien aufgenommen werden. Beim Dauerfestigkeitsdiagramm nach Haigh wird die Spannungsamplitude σ_{Da} über der Mittelspannung σ_m aufgetragen.

Der Einfluss der Mittelspannung σ_m bzw. des Spannungsverhältnisses auf das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen wird durch die Mittelspannungsempfindlichkeit M berücksichtigt [Sch67]

8.3.1 Einfluss der Mittelspannung auf den Werkstoff DC06

Für die Charakterisierung der Mittelspannungsempfindlichkeit wurden zwei Wöhlerlinien bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ und $R = 0$ ermittelt. Aus der ermittelten Wöhlerlinien wurde der Einfluss der Mittelspannung mittels Haigh Diagramm veranschaulicht, Abbildung 8.18. Die Versuche wurden an ungekerbten Proben durchgeführt. Die Mittelspannungsempfindlichkeit M wurde mittels Gleichung 3.26 berechnet.

Um die Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit des Verformungsgrades zu ermitteln wurde, basierend auf den vorher erstellten Beziehungen (Gleichung 8.5 und 8.8), die Schwingfestigkeit für unterschiedliche Verformungsgrade ermittelt. Der Zusammenhang zwischen M und dem Verformungsgrad ist in Abbildung 8.19 dargestellt. Diese Beziehung wird mittels Gleichung 8.14 beschrieben. Die Mittelspannungsempfindlichkeit steigt mit steigendem Verformungsgrad. Dies bestätigt die Theorie, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit mit der Festigkeit zunimmt.

$$M = \frac{11,9 \cdot \ln(VG) - 16,3}{34,1 \cdot \ln(VG) + 59,3} \quad (8.14)$$

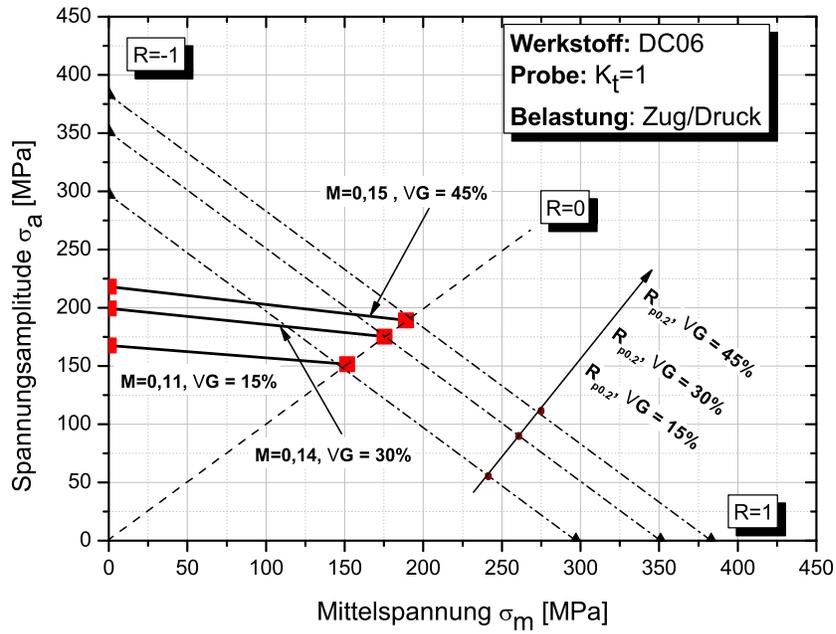


Abbildung 8.18: Haigh Diagramm unter einachsiger Zug/Druck Belastung, DC06

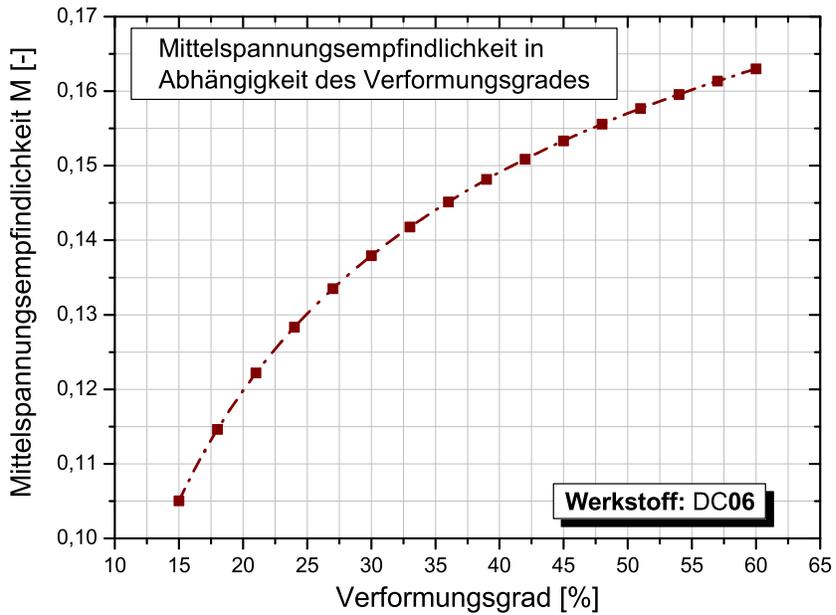


Abbildung 8.19: Einfluss des VG auf die Mittelspannungsempfindlichkeit von DC06

8.3.2 Einfluss der Mittelspannung auf den Werkstoff Al6016-T4

Für die Charakterisierung der Mittelspannungsempfindlichkeit wurden drei Wöhlerlinien bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$, $R = 0$ und $R = 0,5$ ermittelt. Die Versuche wurden an ungekerbten Proben durchgeführt. Die Mittelspannungsempfindlichkeit M wurde mittels Gleichung 3.26 ermittelt. Das Haigh Diagramm unter zyklischer Zug/Druck Belastung zeigt, dass die Spannungsamplitude, ausgewertet bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,5$, die Streckgrenze sogar im Bereich der Dauerfestigkeit überschritten hat, Abbildung 8.20. Dies zeigt eine Verfestigung des Werkstoffes Al6016-T4 unter zyklischer Belastung.

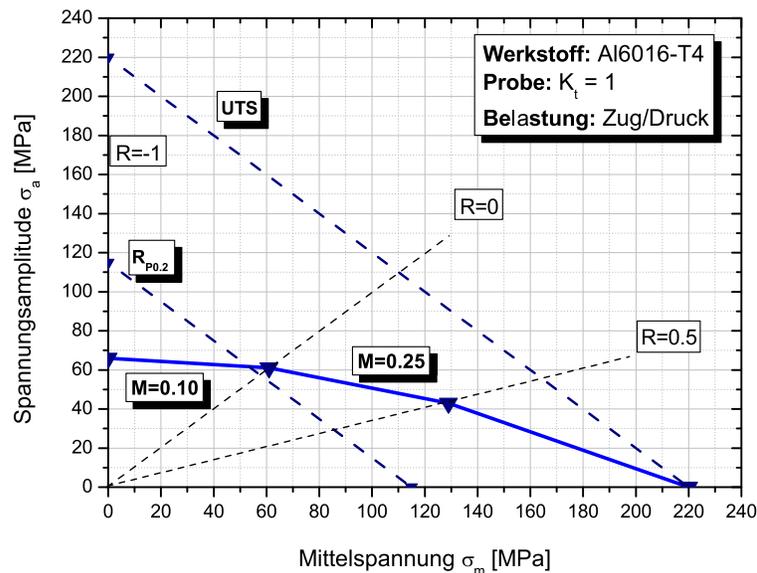


Abbildung 8.20: Haigh Diagramm unter einachsiger Zug/Druck Belastung, DC06

8.4 Einfluss der Walzrichtung

Die hier vorliegenden Werkstoffe (Al6016-T4 und DC06) sind zwar denen, die in der Arbeit von Srivatsan [Sri00] (siehe Kapitel 2) untersucht wurden, nicht ähnlich, dennoch gab diese Arbeit den Anreiz den Einfluss der Walzrichtung auf die statischen und zyklischen Eigenschaften zu untersuchen.

8.4.1 Einfluss der Walzrichtung auf Al6016-T4

Die Zugversuche zeigen keinen Einfluss der Walzrichtung auf die mechanischen Eigenschaften von Al6016-T4 im Anlieferungszustand, siehe Kapitel 6.5. Die Versuchsergebnisse zeigen geringen Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von Al6016, Abbildung 8.1. Somit wird vorausgesetzt, dass es keinen Einfluss des Verformungsgrades auf das isotrope Verhalten des Werkstoffes Al6016-T4 gibt.

8.4.2 Einfluss der Walzrichtung auf DC06

Es wurden Proben längs bzw. quer zur Walzrichtung (WR) bei einem Verformungsgrad von 25 % entnommen. Abbildung 8.21 zeigt einen geringeren Einfluss der Walzrichtung auf die statischen Festigkeitseigenschaften von DC06. Die Streckgrenze beträgt 336 MPa in Walzrichtung und 343 MPa quer zur Walzrichtung.

Die zyklischen Untersuchungen wurden zugschwellend bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche sind in Abbildung 8.22 abgebildet.

Die Schwingfestigkeit beträgt 163 MPa in WR und 165 MPa quer zur WR. Es ist nur ein marginaler Einfluss der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten von DC06 bei einem Verformungsgrad von 25 % bemerkbar.

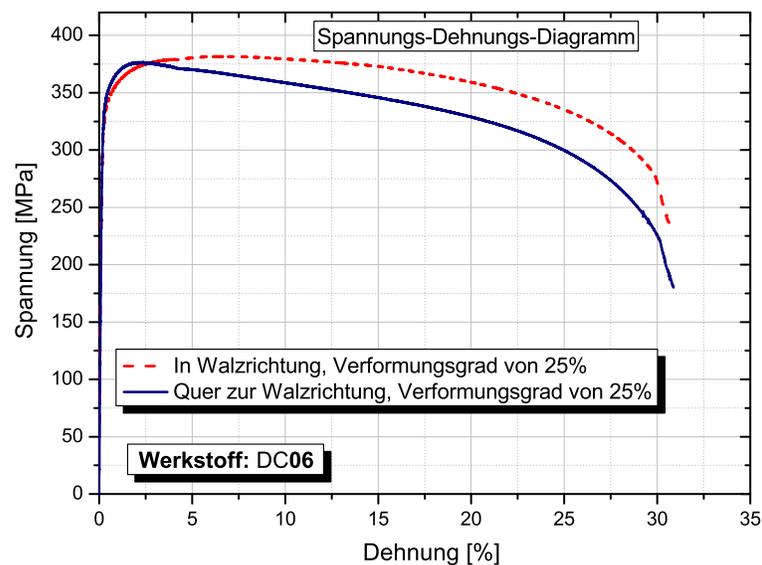


Abbildung 8.21: Einfluss der Walzrichtung auf die statischen Eigenschaften von DC06

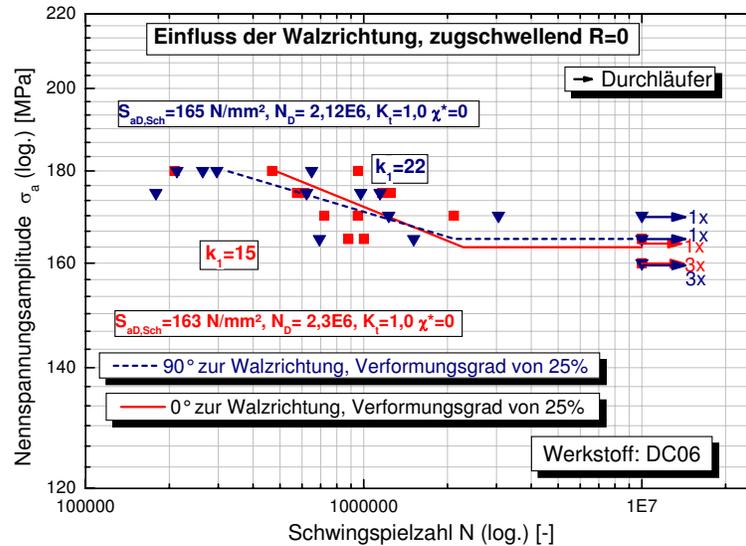


Abbildung 8.22: Einfluss der Walzrichtung auf die Schwingfestigkeit von DC06

8.5 Einfluss der Laststeigerung am Versuchsbeginn

Es wurden zyklische Versuche an DC06-Proben durchgeführt, wobei während der ersten Zyklen zu Versuchsbeginn die Last unterschiedlich schnell bis zur Nennbelastung erhöht wurde. Abhängig vom Gradienten der Laststeigerung sind unterschiedlich viele Lastzyklen nötig um den gewünschten Sollwert zu erreichen, Abbildung 8.23. Dies resultiert in einer unterschiedlichen Verfestigung, was sich auf die Schwingfestigkeitsergebnisse auswirkt. Mit 15 Proben wurde die Wöhlerlinie für zugschwellende Belastung mit $R = 0$ und rascher Laststeigerung abgeschätzt, Abbildung 8.24. Die Schwingfestigkeit ergibt sich zu $\sigma_{aD, sch} = 91 \text{ MPa}$. Die Ecklastspielzahl beträgt $N_D = 851000 \text{ LW}$ und die Steigung der Wöhlerlinie $k_1 = 5$. Für die Versuche bei langsamer Laststeigerung standen nur 5 Proben zur Verfügung.

Zur Abschätzung der Wöhlerlinie wurde daher angenommen, dass die Neigung k_1 für beide Wöhlerlinien gleich ist. Es ist erkennbar, dass die Proben bei einer langsamen Laststeigerung eine deutlich längere Lebensdauer aufweisen als bei einer raschen Laststeigerung. Dieser Effekt ist auf die Verfestigung der Probe während des Versuchsstarts zurückzuführen.

Gough [Gou24] hat den Einfluss der graduellen Laststeigerung auf die Lebensdauer von einem Weichstahl mit einer Dauerfestigkeit von 252 MPa untersucht. Zuerst wurden Proben direkt unterhalb der Dauerfestigkeit mit einer Spannung von 247 MPa bis $15 \cdot 10^6$ Lastwechsel geprüft. Danach wurde die Spannung schrittweise (3 MPa) erhöht. Die Schwingfestigkeit wurde auf 325 MPa gesteigert, was einer Steigerung von 28% entspricht.

Sinclair [Sin52] zeigte allerdings, dass nicht alle Werkstoffe diesen Effekt zeigen.

Der Einfluss der graduellen Laststeigerung war in diesem Projekt nicht vorgesehen und

wurde daher aus Zeitgründen im vorliegenden Simulationsmodell nicht berücksichtigt.

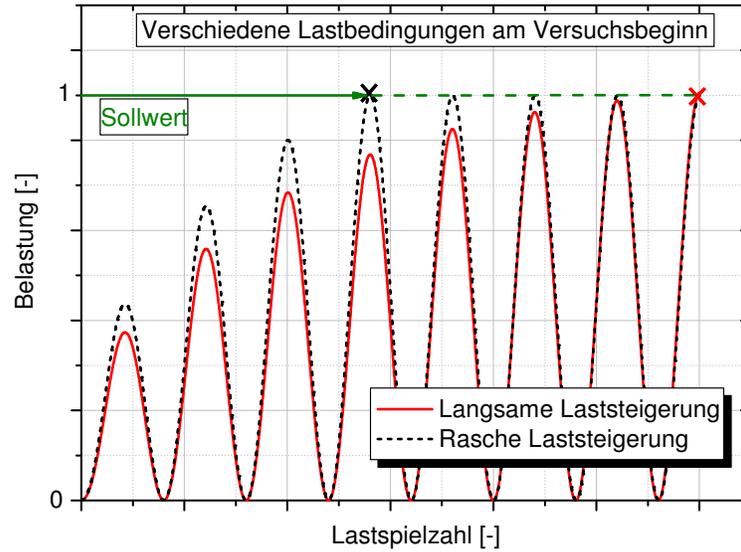


Abbildung 8.23: Verschiedene Lastbedingungen am Beginn der zyklischen Versuche, DC06

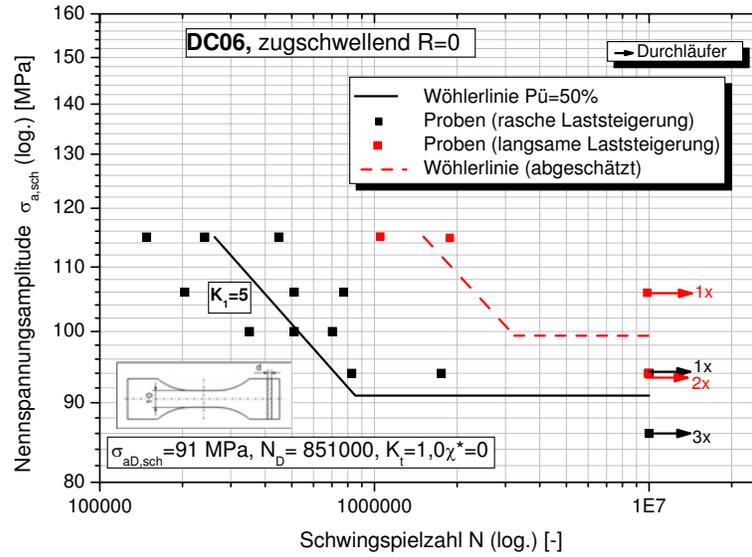


Abbildung 8.24: Gegenüberstellung der Schwingversuche bei langsamer und rascher Laststeigerung, DC06

8.6 Verformungsgrade der Einzelschichten des Werkstoffverbundes

In Kapitel 8 wurden verschiedene relevante Einflussgrößen auf die jeweilige Schicht des Werkstoffverbundes (WV) in Abhängigkeit des Verformungsgrades näher untersucht. Nach Herstellung des WV ist allerdings nur der gesamte Verformungsgrad (VG) bekannt. Daher ist es notwendig den VG der Einzelschichten in Abhängigkeit des gesamten VG des Werkstoffverbundes zu ermitteln. Es wurden WV-Proben mit unterschiedlichen VG gefertigt.

Die Stärke der Einzelschichten wurde mittels Laser-Konfokalmikroskop (LEXT) gemessen und der VG berechnet, Tabelle 8.1.

Abbildung 8.25 zeigt die Abhängigkeit des Verformungsgrades der Einzelschichten vom gesamten VG. Die ermittelten Daten beschreiben eine Linie, die durch den Ursprung geht. Der Verformungsgrad der Einzelschichten ist unterschiedlich. Dieser Effekt ist auf die unterschiedlichen E-Moduli zurückzuführen. Die Schicht mit niedrigem E-Modul (Al6016-Schicht) erfährt die größte Verformung, Gleichung 8.15 und 8.16.

Proben Nr.	Stärke [mm]		Verformungsgrad der Einzelschichten [%]		Verformungsgrad des WV [%]
	Al6016-T4	DC06	Al6016-T4	DC06	
VG27_01	1,38	1,93	31	22,8	27
VG33_01	1,21	1,80	39,5	28	33
VG40_01	1,07	1,62	46,5	35,2	40
VG48_01	0,96	1,43	52	42,8	48

Tabelle 8.1: Verformungsgrad der Einzelschichten und des Werkstoffverbundes

$$VG_{Stahl} = 0,87 \cdot VG_{gesamt} \quad (8.15)$$

$$VG_{Aluminium} = 1,14 \cdot VG_{gesamt} \quad (8.16)$$

8.7 Einfluss der Stützwirkung auf das Verhalten von DC06

Basierend auf den Untersuchungen im Kapitel 8.1 bzw. auf der Gleichung 8.8 und 8.11 wurden die Zugdruckwechselfestigkeit und die Biegewechselfestigkeit berechnet und einander gegenübergestellt, siehe Abbildung 8.26.

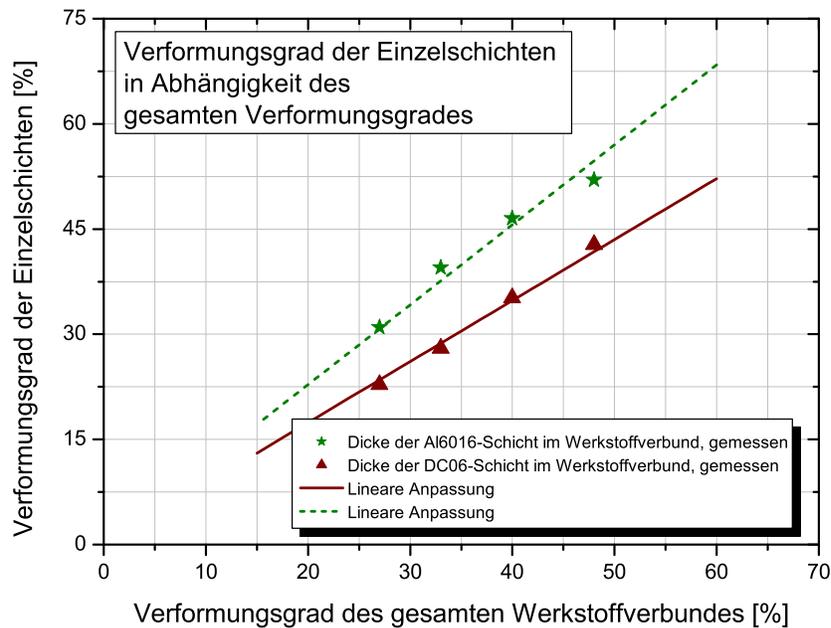


Abbildung 8.25: Verformungsgrad der Einzelschichten in Abhängigkeit des gesamten VG

Durch einen höheren Verformungsgrad kommt es zu einer zunehmenden Verfestigung in Kombination mit einer verringerten Bruchdehnung des Werkstoffes. Mit steigender Verfestigung nimmt die Stützwirkung zu. Bei geringen Verformungsgraden (20 %) ist keine Stützwirkung zu erwarten, siehe Abbildung 8.26. Die Kerbempfindlichkeit nimmt mit zunehmender Zähigkeit ab. Dies ist auf den leichten Ablauf der Fließvorgänge bei zähen Werkstoffen zurückzuführen.

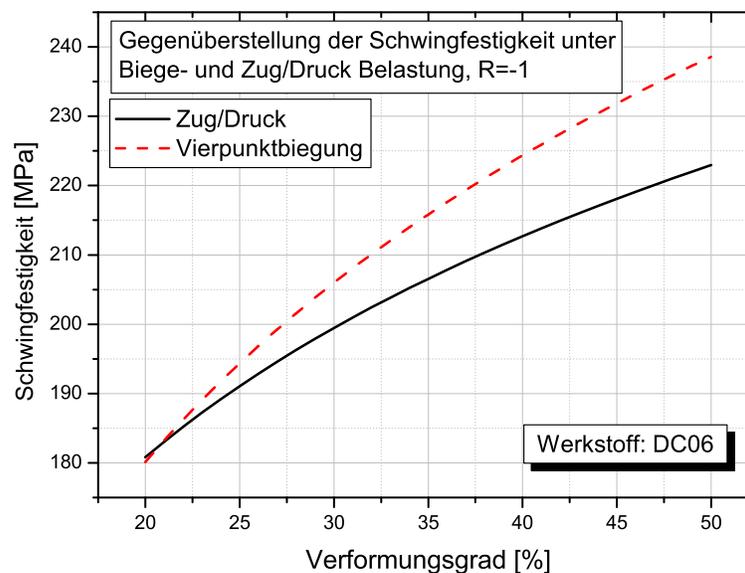


Abbildung 8.26: Vergleich der berechneten Zugdruck- und Biege-wechselfestigkeit

Kapitel 9

Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die FEM Berechnung

Um die Lebensdauer von Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden ermitteln zu können sind u.a Kenntnisse der lokalen Spannungen notwendig. Diese werden durch Simulation des Bauteils (z.B. Tiefziehsimulation) und des Belastungsvorgangs berechnet, siehe Kapitel 3.1. Für eine derartige Simulation wird das elastoplastische Verhalten (Fließkurve) des jeweiligen Werkstoffes benötigt. Das Hauptziel dieses Kapitels ist die Ermittlung eines Modells für die Generierung von Fließkurven des Werkstoffes DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades.

9.1 Fließkurve von Al6016-T4

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen marginalen Einfluss der unterschiedlichen Verformungsgrade auf die mechanischen Eigenschaften von Al6016-T4, Abbildung 8.1. Daher wird angenommen, dass das elastoplastische Verhalten des Aluminiums unabhängig vom Verformungsgrad während des Herstellungsprozesses des Werkstoffverbundes (Kaltpressschweißen, Kapitel 5) ist. Für die Tiefziehsimulation von Bauteilen aus dem Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund mit verschiedenen Verformungsgraden wird daher stets die gleiche Al-Fließkurve verwendet, Abbildung 9.1.

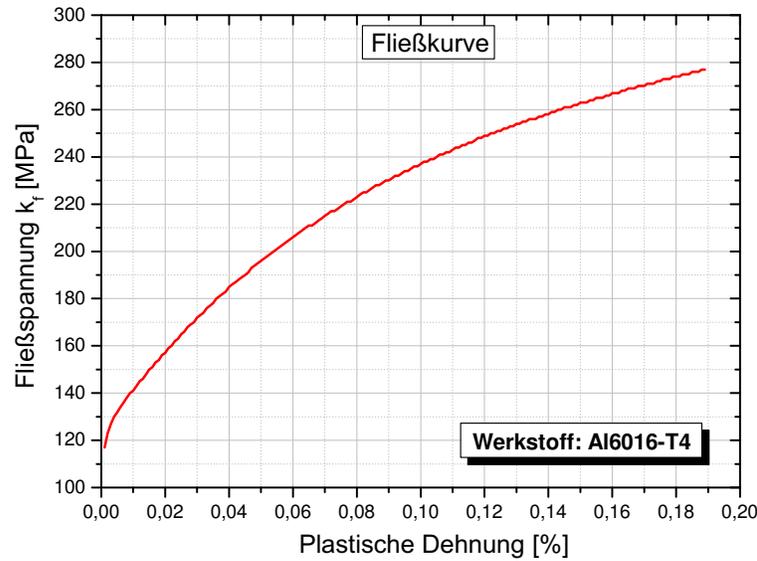


Abbildung 9.1: Fließkurve für Al6016-T4

9.2 Vorschlag des Verfassers zur Fließkurvenermittlung von DC06

Aufgrund des erheblichen Einflusses des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 war es notwendig die Fließkurve in Abhängigkeit des Verformungsgrades zu ermitteln. Ziel war es, aus einfachen Zugversuchen die Fließkurve in Abhängigkeit des Verformungsgrades zu generieren, Abbildung 9.2. Daher wurden aus den Zugversuchen die Streckgrenze $R_{p0,2}$, die Zugfestigkeit R_m , die Bruchspannung σ_B und die Bruchdehnung ε_B für unterschiedliche Verformungsgrade (16 %, 19 %, 25 % und 37 %) ermittelt, Abbildung 9.3.

Der Zusammenhang wurde anhand logarithmischer Gleichungen näherungsweise beschrieben, siehe Gleichung 9.1 bis 9.4.

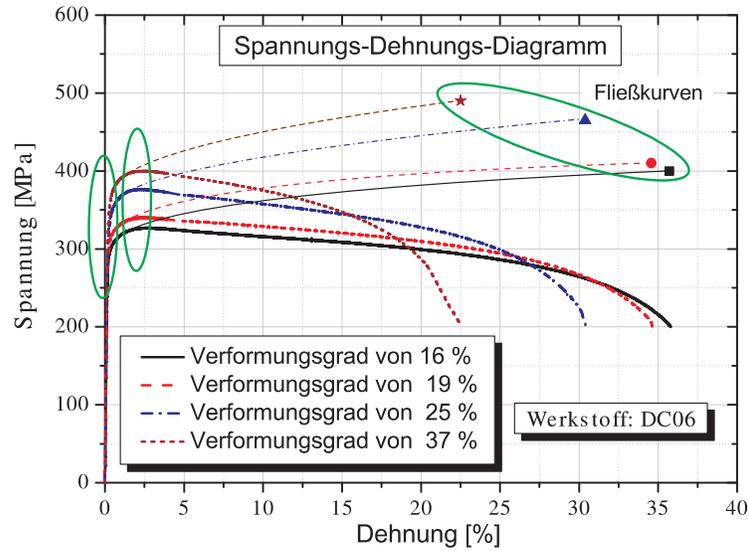


Abbildung 9.2: Schematische Vorgangsweise bei der Erstellung der DC06 Fließkurve

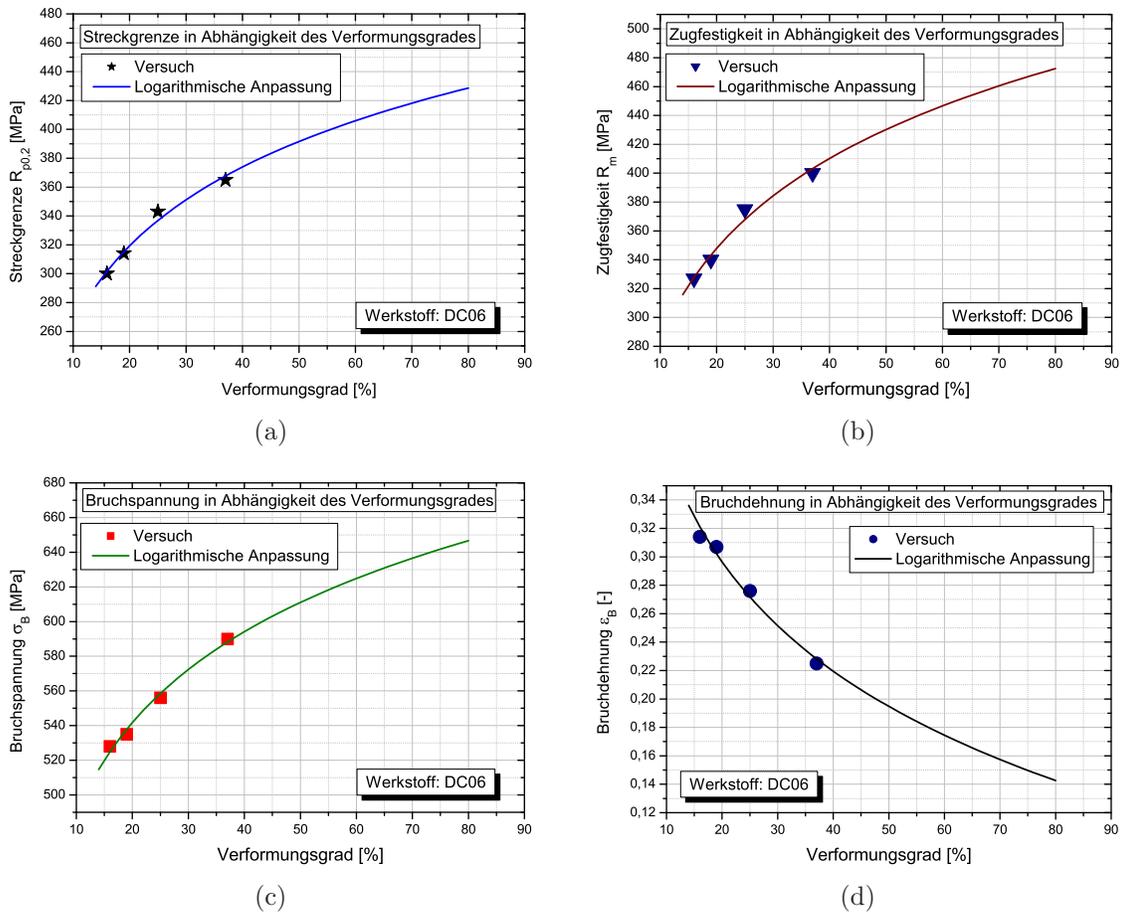


Abbildung 9.3: Einfluss des Verformungsgrades auf die
 (a) Streckgrenze, (b) Zugfestigkeit, (c) Bruchspannung, (d) Bruchdehnung

$$R_{p0.2} = 78,9 \cdot \ln(VG) + 82,9 \quad [MPa] \quad (9.1)$$

$$R_m = 89,9 \cdot \ln(VG) + 78,5 \quad [MPa] \quad (9.2)$$

$$\sigma_B = 75,7 \cdot \ln(VG) + 314,9 \quad [MPa] \quad (9.3)$$

$$\varepsilon_B = -0,111 \cdot \ln(VG) + 0,629 \quad [-] \quad (9.4)$$

Die wahre Bruchspannung wurde aus dem Quotienten der Bruchkraft und der unter dem Lichtelektronenmikroskop gemessenen Bruchfläche der Zugproben errechnet, Abbildung 9.4. Die Umrechnung der technischen Dehnung auf die wahre Dehnung wurde mittels Gleichung 9.5 durchgeführt. Für die Umrechnung der Zugfestigkeit wurde die Gleichung 9.6 genutzt [Arz06].

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (9.5)$$

$$k_f = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (9.6)$$

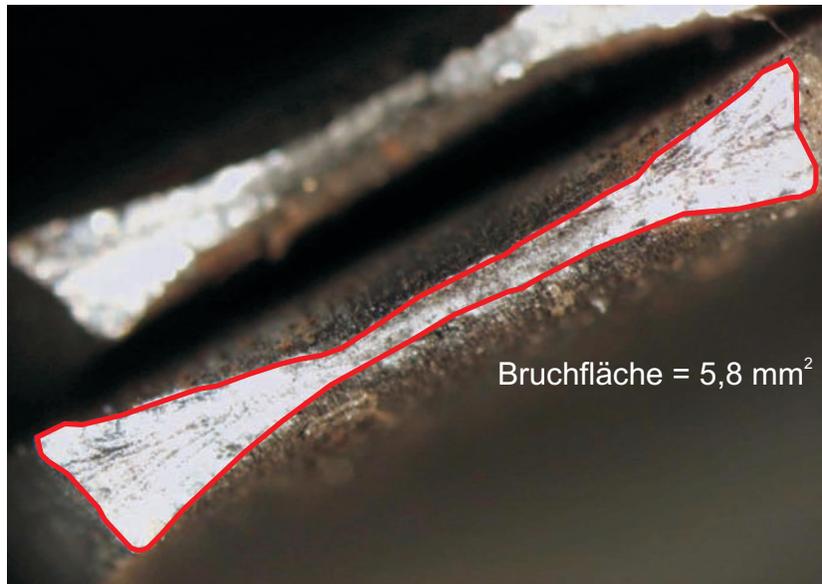


Abbildung 9.4: Beispiel einer Bruchflächenvermessung nach dem Zugversuch

Für die Herstellung des Werkstoffverbundes mittels Walzplattieren ist ein Verformungsgrad von über 15 % erforderlich, um eine Verbindung zwischen Stahl- und Aluminiumschicht zu gewährleisten. Daher werden bei der Modellerstellung für die Fließkurve nur die Verformungsgrade über 15 % herangezogen. Ermittelt man die Festigkeitskennwerte für einen beliebigen Verformungsgrad, könnten daraus die entsprechenden Fließkurven abgeleitet werden.

Auf Basis dieser ermittelten Werkstoffkennwerte und in Anlehnung an den Ansatz nach Swift/Krupkowski [Gro00] ist es gelungen ein Fließkurvenmodell von DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades zu ermitteln, Gleichung 9.7.

$$k_f = (78.9 \cdot \ln(VG) + 82,9) \cdot \left(0,8 + \frac{\varepsilon_p}{0,013}\right)^n \quad (9.7)$$

k_f stellt die Fließspannung dar und n ist der Verfestigungsexponent, Gleichung 9.8. Exemplarisch wurden hier für einen Verformungsgrad von 30% die drei Punkte $(R_{p0,2}, 0)$, $(\sigma_{UTS}, \varepsilon_{UTS})$ und $(\sigma_B, \varepsilon_B)$ ermittelt, Abbildung 9.5. Der Exponent n beschreibt im doppeltlogarithmischen Netz die Steigung der Geraden AB , Abbildung 9.6.

$$n = \frac{(\log(\sigma_B) - \log(\sigma_{UTS}))}{(\log(\varepsilon_B) - \log(\varepsilon_{UTS}))} \quad (9.8)$$

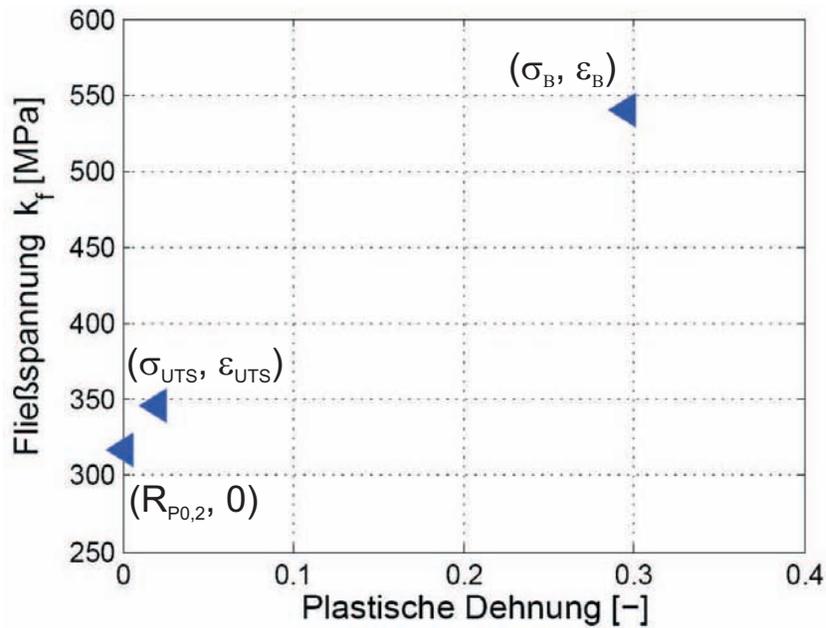


Abbildung 9.5: Darstellung der Fließkurve von DC06, linear

Mittels Gleichung 9.7 wird in Abbildung 9.7 die Fließkurve für einen Verformungsgrad von 30 % generiert.

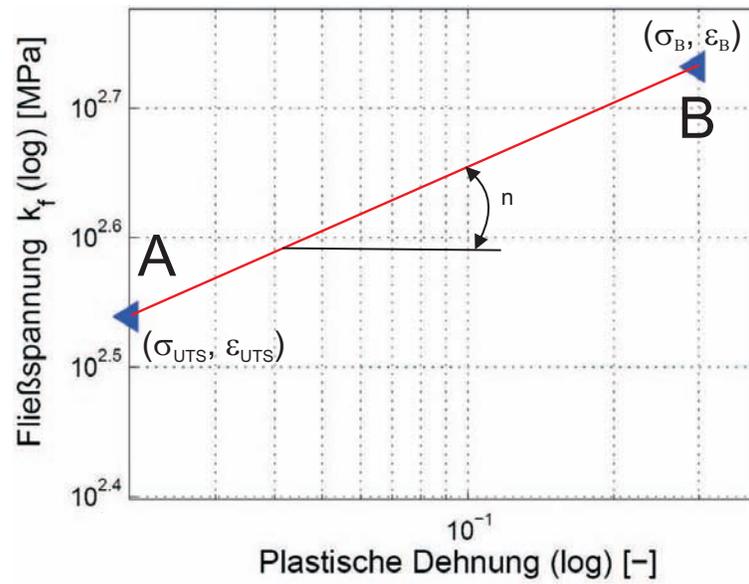


Abbildung 9.6: Darstellung der Fließkurve von DC06, doppeltlogarithmisch

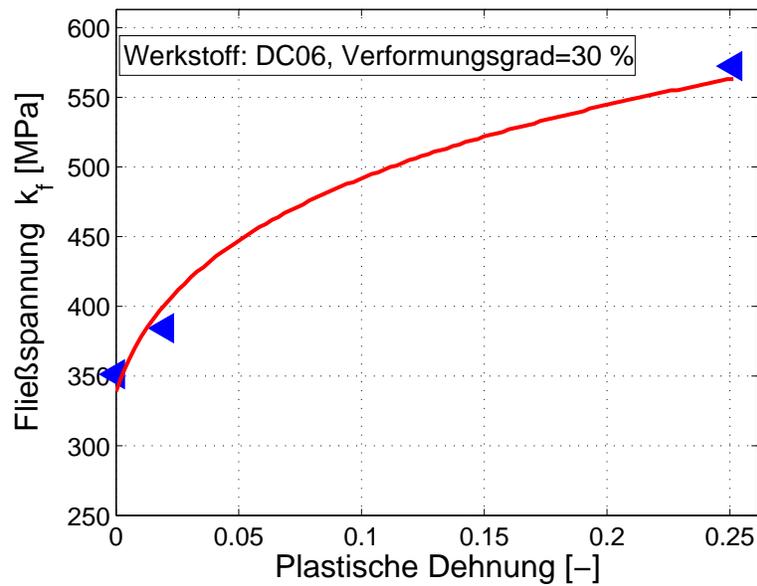


Abbildung 9.7: Fließkurve für DC06 bei einem Verformungsgrad von 30 %

9.3 Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche für die Fließkurvengenerierung

Für die einfache Generierung und Darstellung von Fließkurven in Abhängigkeit des Verformungsgrades wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) erstellt. Abbildung 9.8 zeigt ein Beispiel für einen Verformungsgrad von 30 %.

Die Benutzeroberfläche wurde in MATLAB[®] implementiert.

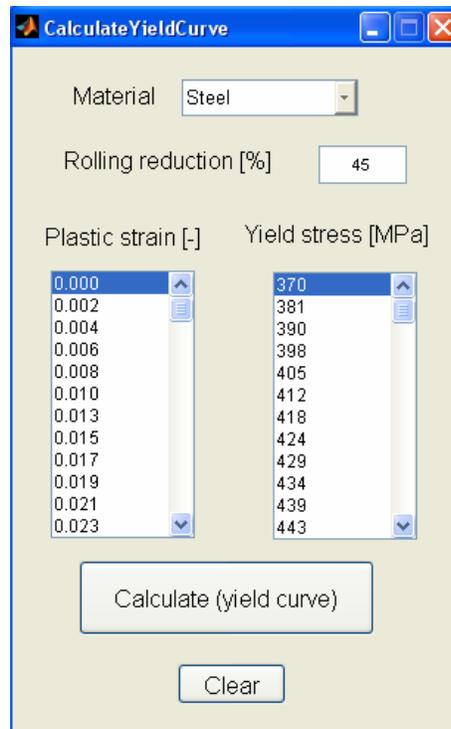


Abbildung 9.8: Grafische Benutzeroberfläche für die Generierung von Fließkurven

9.4 Gegenüberstellung unterschiedlicher Ansätze zur Fließkurvenermittlung

Den Verlauf der Fließkurven für verschiedene Verformungsgrade (20 % und 80 %) zeigt Abbildung 9.9 und 9.10. Im Bereich niedriger Verformungsgrade lässt sich sowohl nach dem Ansatz nach Swift als auch nach Voce (siehe Kapitel 3.7.2) das Verfestigungsverhalten von DC06 gut beschreiben. Bei höheren Verformungsgraden werden allerdings die beiden Ansätze ungenau. Der Vorschlag des Verfassers zeigt akzeptable Ergebnisse bei niedrigen Verformungsgraden und sehr gute Genauigkeit bei höheren Verformungsgraden, verglichen mit den anderen Fließansätzen.

Für die weiteren Simulationen wird die Fließkurve nach dem Vorschlag des Verfassers generiert.

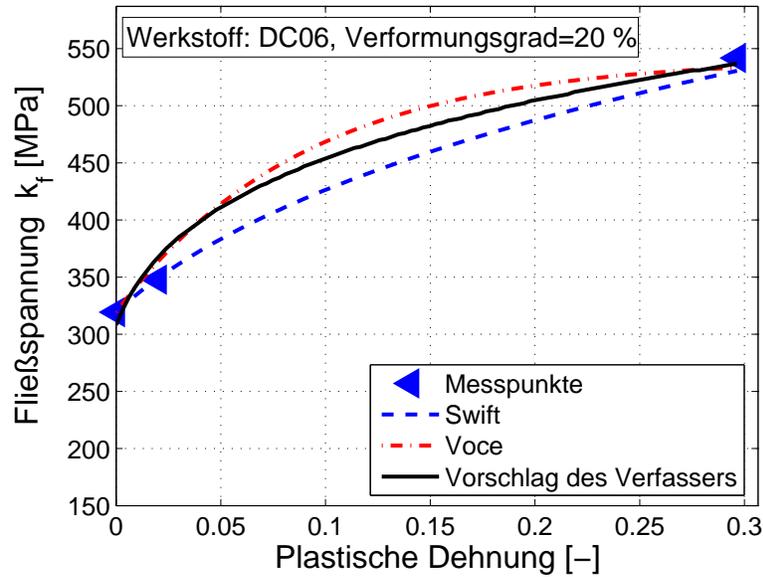


Abbildung 9.9: Vergleich verschiedener Fließansätze, Verformungsgrad von 20 %

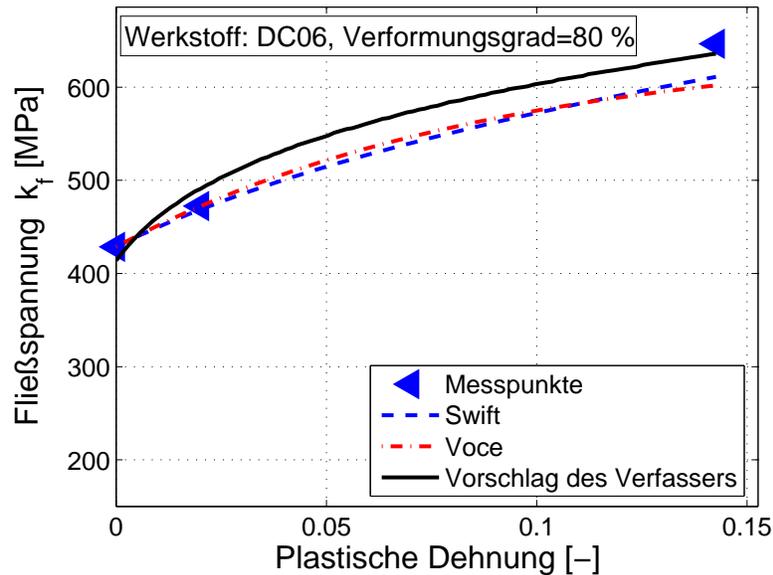


Abbildung 9.10: Vergleich verschiedener Fließansätze, Verformungsgrad von 80 %

Kapitel 10

Vorschlag eines Lebensdauerberechnungskonzeptes

Die bis jetzt durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schwingfestigkeit und die Fließkurve des Werkstoffverbundes stark von den Verformungsgraden abhängen. Soll eine Lebensdauerberechnung von tiefgezogenen Bauteilen aus diesem Werkstoffverbund durchgeführt werden, so muss die Festigkeitsberechnung auf den Ergebnissen einer Simulation beruhen, die nicht nur die Geometrie des Bauteiles sondern auch den Einfluss des Verformungsgrades berücksichtigt.

Abbildung 10.1 zeigt ein Berechnungskonzept zur Lebensdauerabschätzung von tiefgezogenen Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden.

Bei diesem Berechnungskonzept besteht zum ersten Mal die Möglichkeit, den Einfluss des Fertigungsprozesses (Verformungsgrad) auf die Lebensdauer von Bauteilen mithilfe einer Simulation zu berücksichtigen. Der Einfluss der Umformung auf das Ermüdungsverhalten wurde in [Mas00] untersucht und wird berücksichtigt.

Das Konzept für die Lebensdauerberechnung wird am Beispiel einer Rundsicke (Napf) vorgestellt, Abbildung 10.3(a).

Zunächst erfolgten mit Hilfe des vom Verfasser erstellten Fließkurvenmodells die elastoplastischen Berechnungen (Tiefziehsimulation), Abbildung 10.2. Als Ergebnis der Simulation liegen die Bauteilgeometrie und die Eigenspannungen vor.

Der Bauteil wird durch eine wechselnde Kraft F senkrecht zur Blechoberfläche beansprucht, Abbildung 10.3. Für jede Stelle im Bauteil werden die lokalen Spannungen und Dehnungen sowie der Umformgrad ermittelt.

Mit Hilfe der lokalen Spannungen, der lokalen Umformgrade und der Spannungswöhlerlinie, die wiederum vom Verformungsgrad abhängt, wird jedem Schwingspiel ein Schädigungsinhalt zugewiesen. Durch lineare Schadensakkumulation wird die Lebensdauer berechnet.

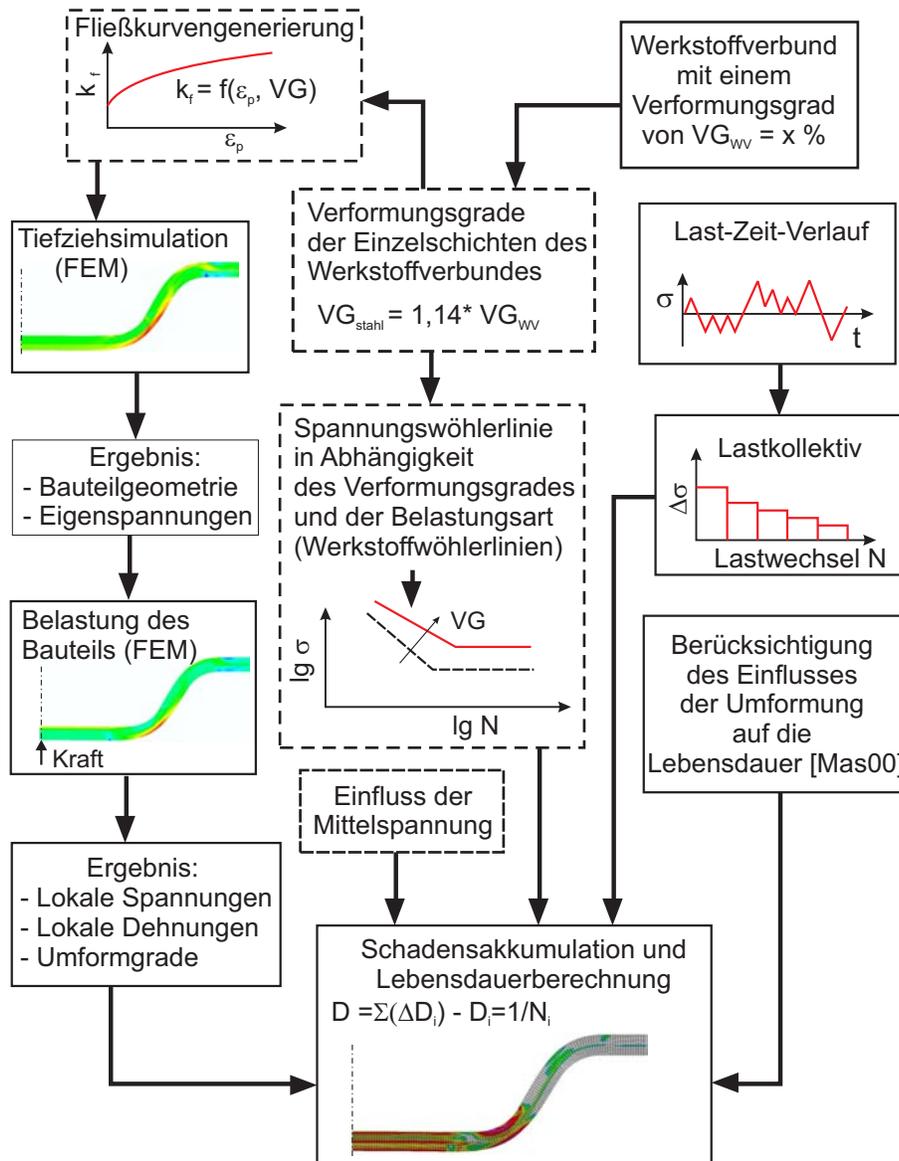


Abbildung 10.1: Berechnungskonzept für die Lebensdauer tiefgezogener Bauteile

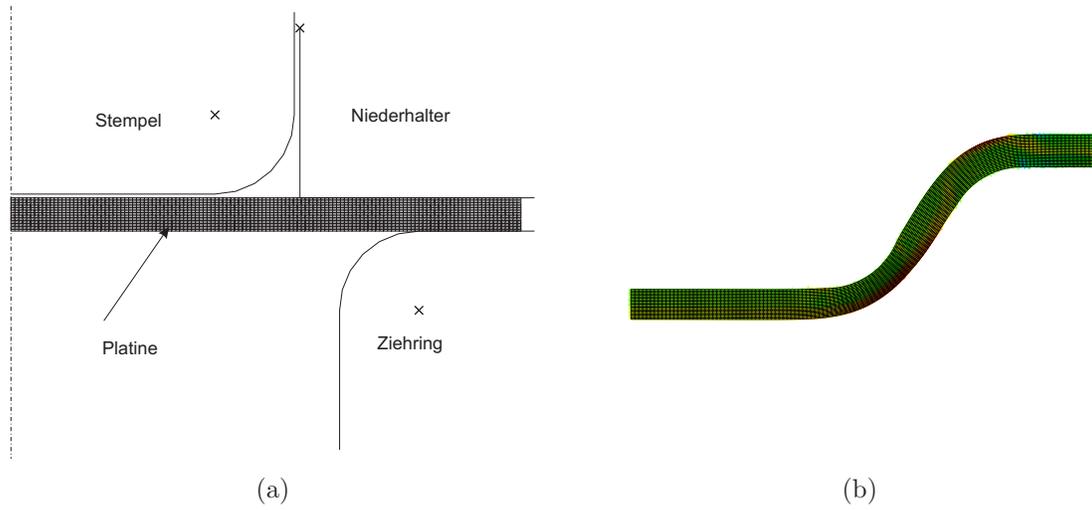


Abbildung 10.2: Achsensymmetrisches Modell der Werkstoffverbund-Platine
 (a) vor dem Tiefziehen
 (b) nach dem Tiefziehen (Verteilung der Eigenspannungen)

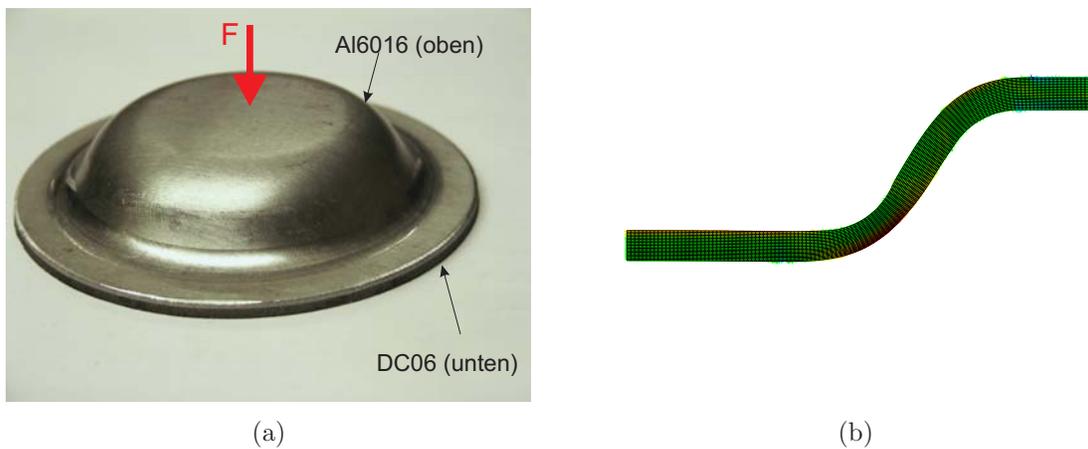


Abbildung 10.3: Dynamische Beanspruchung des Napfes
 (a) Einwirkung der Kraft
 (b) Verteilung der Hauptnormalspannungen

Kapitel 11

Verifikation der erstellten Modelle an Werkstoffverbund-Proben

11.1 Simulation der WV-Probe

Durch die Anwendung des Fließkurvenmodells, wie im Abschnitt 9.2 beschrieben, wurde die Fließkurve für den Werkstoff DC06 mittels Gleichung 9.7 bei einem Verformungsgrad von 42 % ermittelt, Abbildung 12.4. Die Fließkurve von Al6016-T4 ist unveränderlich (siehe Abschnitt 9.1). Abbildung 11.2 zeigt die Verteilung der Spannungen nach Belastung mit 6450 *N*.

11.2 Untersuchungen am Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund

Es wurden statische und zyklische Versuche an Werkstoffverbund-Proben mit unterschiedlichen Verformungsgraden durchgeführt.

11.2.1 Zugversuche

Abbildung 11.3 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche am Werkstoffverbund in unterschiedlichen Zuständen (Verformungsgrad von 27 %, 33 %, 40 % und 48 %). Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit steigen mit steigendem Verformungsgrad. Die Bruchdehnung nimmt allerdings bei Zunahme der Verformung ab.

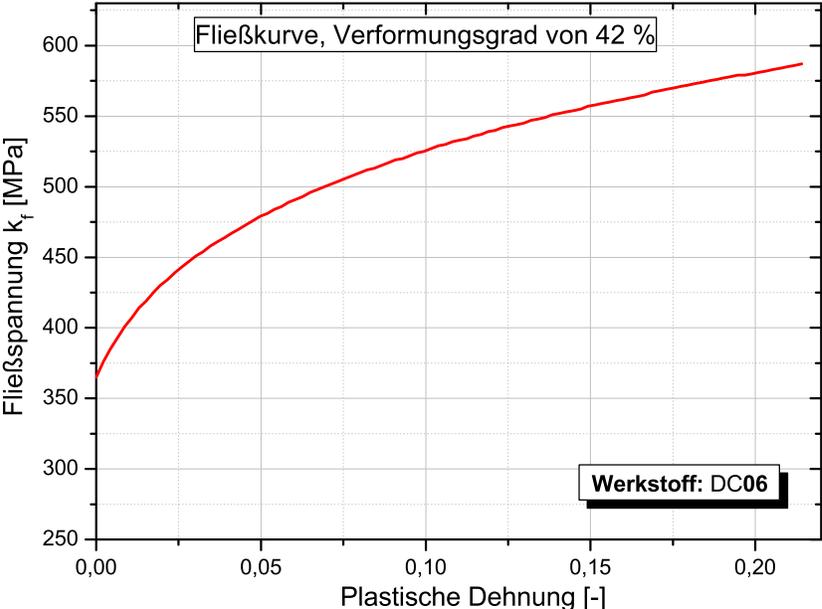


Abbildung 11.1: Fließkurve für DC06 bei einem Verformungsgrad von 42 %

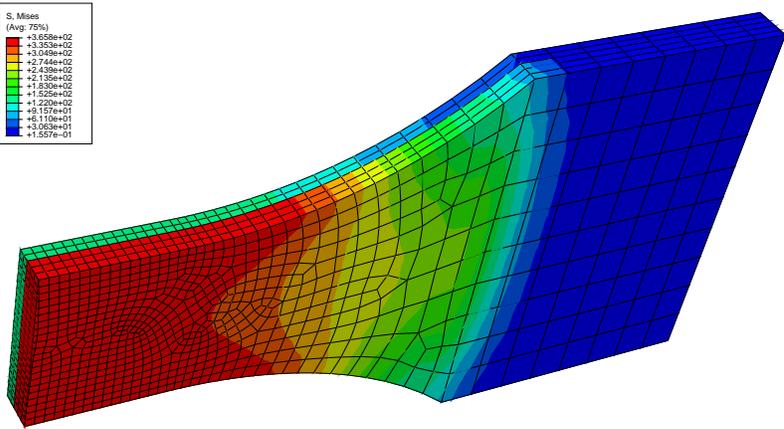


Abbildung 11.2: Spannungsverteilung an der WV-Probe

Die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 11.1 zusammengefasst.

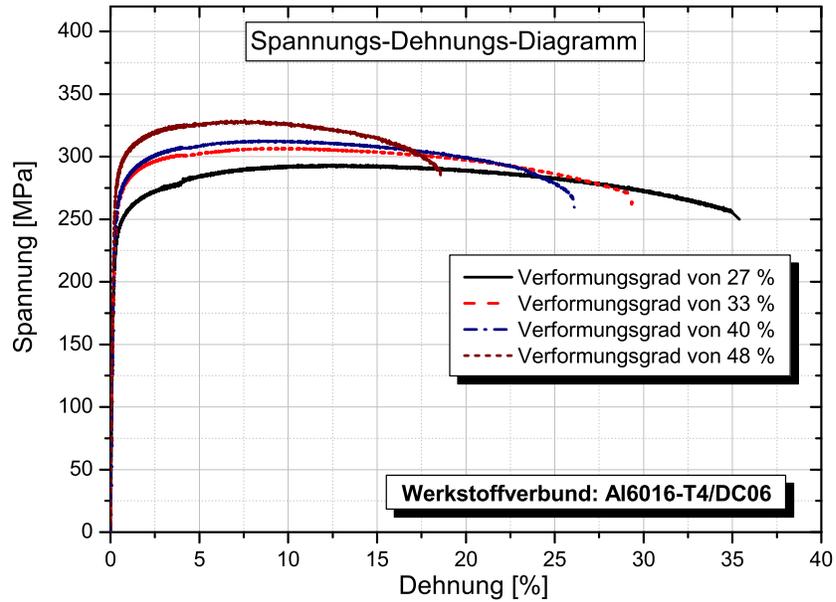


Abbildung 11.3: Zugversuch am Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund

Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund				
Verformungsgrad [%]	27	33	40	48
R_m [MPa]	293	311	317	333
$R_{p0,2}$ [MPa]	235	256	262	281
A_g [%]	12	9	8	7
E-Modul [MPa]	135000	140000	148000	163000

Tabelle 11.1: Ergebnisse der Zugversuche am Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund

11.2.2 Zyklische Untersuchungen

Abbildung 11.4 und 11.5 zeigen die Wöhlerlinien des Werkstoffverbundes bei einem Verformungsgrad von 40 % bzw. 48 %. Es ist eindeutig zu sehen, dass die zyklischen Eigenschaften mit zunehmendem Verformungsgrad steigen. Die Neigung der Zeitfestigkeitslinie wird größer.

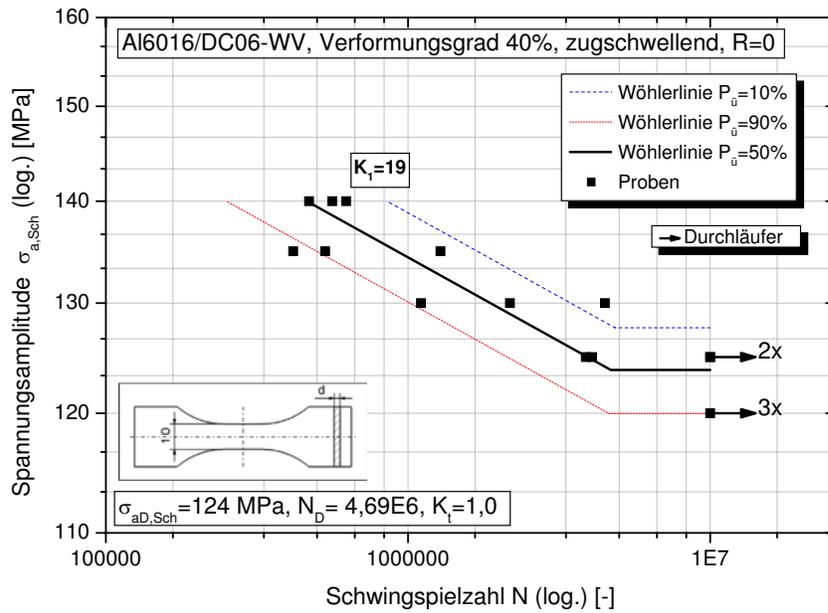


Abbildung 11.4: Anrisswöhlerlinie für Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund (VG von 40 %)

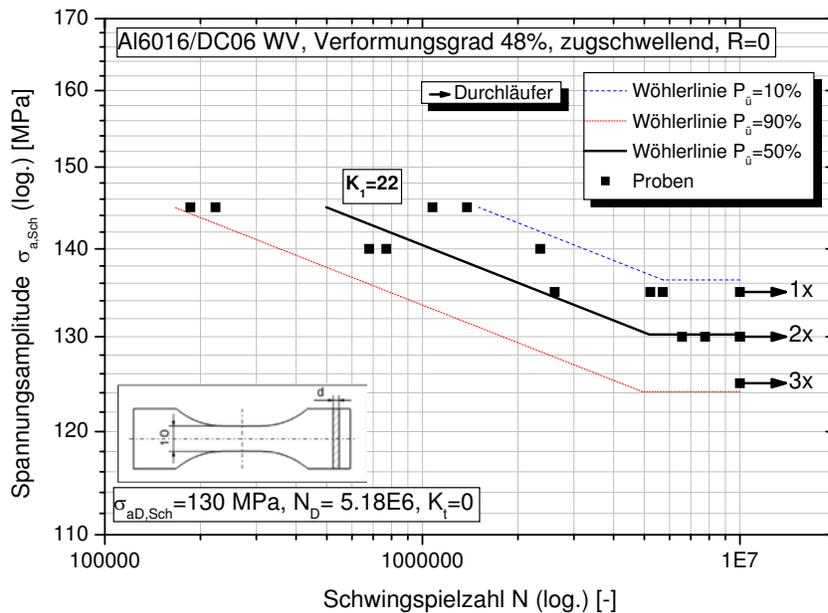


Abbildung 11.5: Anrisswöhlerlinie für Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund (VG von 48 %)

11.3 Schadensanalyse an WV-Proben

Die Versuche am Werkstoffverbund wurden bis zum Bruch durchgeführt. Der Bruch ist in allen Fällen von der DC06-Schicht ausgegangen, Abbildung 11.6. Zur Visualisierung der Rissausbreitung wurde bei einer Probe das Abschaltkriterium der Prüfmaschine so verändert, dass der Versuch vor dem vollständigen Probenbruch unterbrochen wurde, Abbildung 11.7.

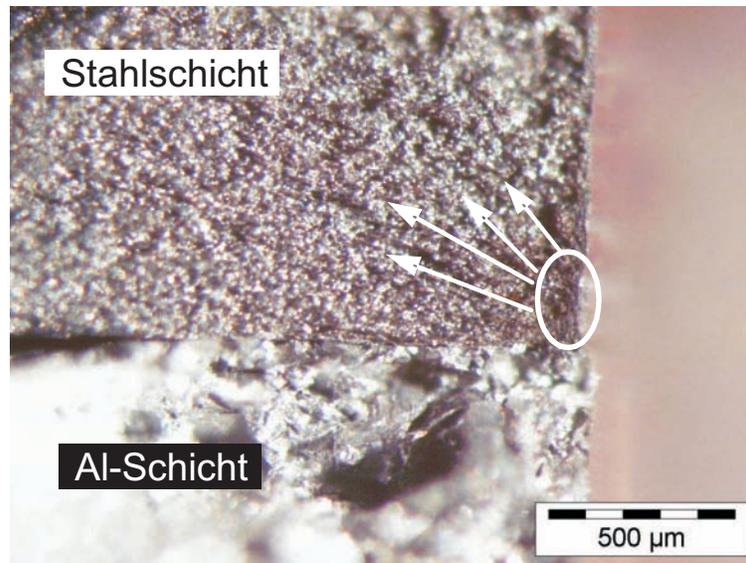


Abbildung 11.6: Bruchanalyse der WV-Probe, Bruchübersicht

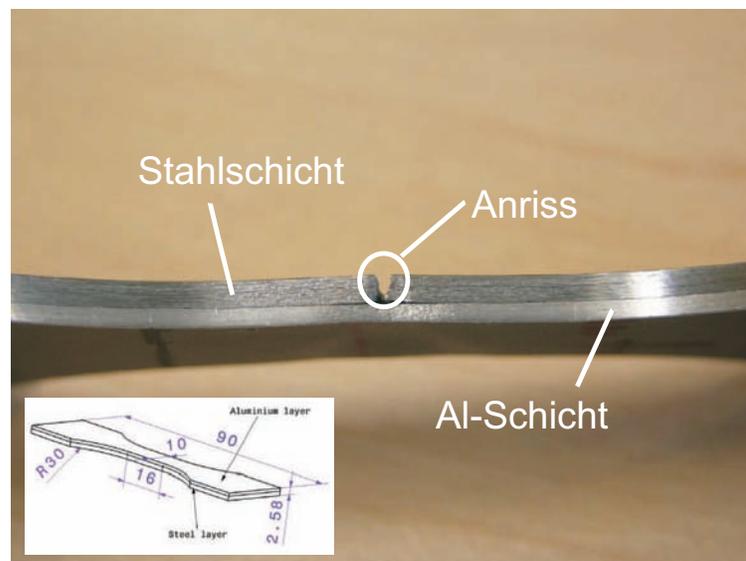


Abbildung 11.7: Anrissstelle der WV-Probe unter zyklischer Belastung

Im Folgenden wird versucht, den Schädigungsverlauf anhand theoretischer Überlegungen zu erklären. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass es unterhalb der Dauerfestigkeit zu keiner Werkstoffschädigung kommt und erst über der Dauerfestigkeit der Anriss an einem der Werkstoffpartner erfolgt. Der Wert der Dauerfestigkeit von Al6016-T4 ergibt sich unabhängig vom Verformungsgrad mit 62 MPa . Dies entspricht einer Dehnung von $0,08 \%$ im Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

Nimmt man die gleiche Dehnung auch für die Stahlschicht an, was der Realität bei einer Zug/Druck Belastung entspricht, so ergibt sich für einen Verformungsgrad von 19% bzw. 37% eine Spannung von 180 MPa bzw. 193 MPa im σ - ε Diagramm.

Anhand ermittelter Modelle der Dauerfestigkeit in Abhängigkeit des Verformungsgrades (Gleichung 8.5) erhalten wir für DC06 erst ab einem VG von 45% (äquivalent zu einem VG von 52% für den Werkstoffverbund) einen Spannungswert von über 193 MPa . Mit anderen Worten, die Schwingfestigkeit der DC06-Schicht wird, bis zu einem Verformungsgrad des Werkstoffverbundes von etwa 52% , immer früher erreicht als in der Aluminiumschicht. Erst ab einem VG von über 52% wird die Schwingfestigkeit der Aluminiumschicht erreicht, Abbildung 11.8.

Die zur Verfügung stehenden WV-Proben haben einen VG von maximal 48% . Bei diesen Proben geht der Anriss daher von der Stahlschicht aus.

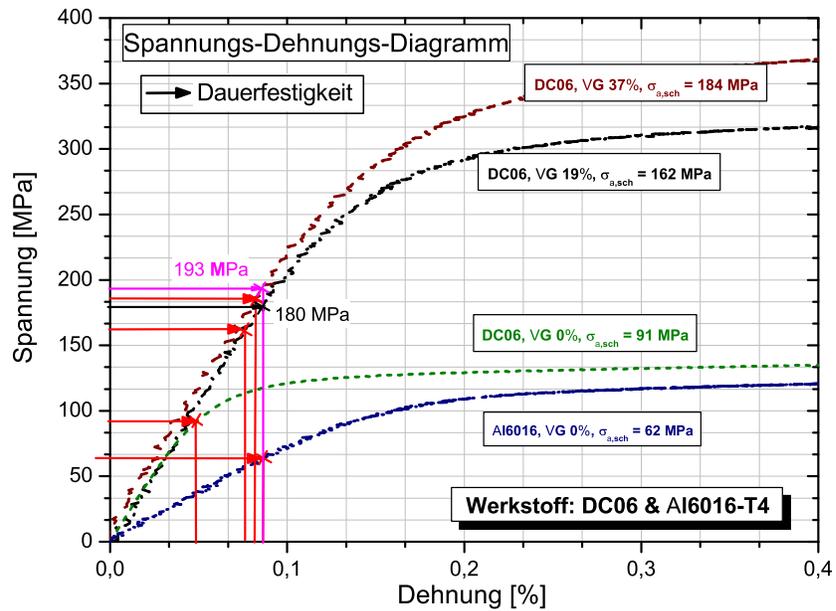


Abbildung 11.8: Schädigungsverlauf der WV-Proben unter zugschwellender Belastung

11.4 Vergleich Rechnung und Versuche

Die Lebensdauer von Proben aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden wurde rechnerisch mittels Softwarepaket FEMFAT[®] abgeschätzt (Abschnitt 3.8) und der in Versuchen ermittelten Lebensdauer gegenübergestellt. Die Verbindung zwischen beiden Schichten wurde als ideal angenommen.

Durch die Berücksichtigung des Verformungsgrades wurde eine beträchtliche Verbesserung der Treffsicherheit erreicht, Abbildung 11.9.

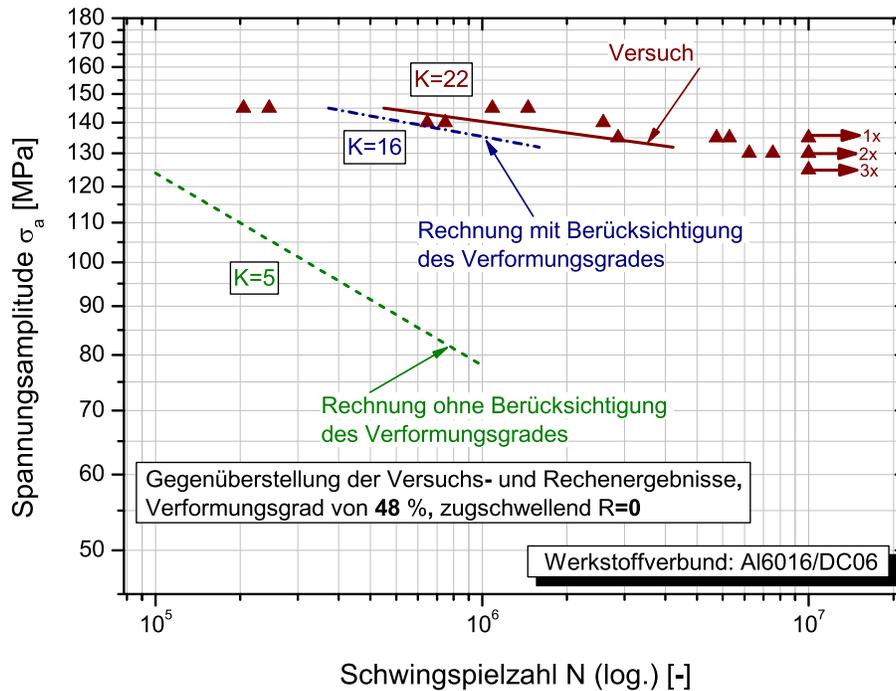


Abbildung 11.9: Gegenüberstellung der Versuchs- und Rechenergebnisse an WV-Proben

Kapitel 12

Verifikation der erstellten Modelle am Beispiel einer Rundsicke

12.1 Geometrie des Ersatzbauteiles

Im Fahrzeugkarosseriebau wird durch optimierte Dünoblechkonstruktionen nach konstruktivem Leichtbau gestrebt. Die Verwendung dünner Bleche zur Reduzierung des Gewichts führt nur dann zu einer ausreichenden Bauteilsteifigkeit, wenn Rippen oder Sicken in der Struktur vorgesehen werden. Als Sicken werden dabei gruben- und rinnenförmige Vertiefungen unterschiedlicher Gestalt bezeichnet, die die Steifigkeit von Blechen um ein Vielfaches erhöhen [Her96]. Die Tiefziehsimulation des Werkstoffverbundes wird am Beispiel einer Rundsicke durchgeführt, Abbildung 12.1 und 12.2 .



Abbildung 12.1: Geometrie des Ersatzbauteiles, Foto

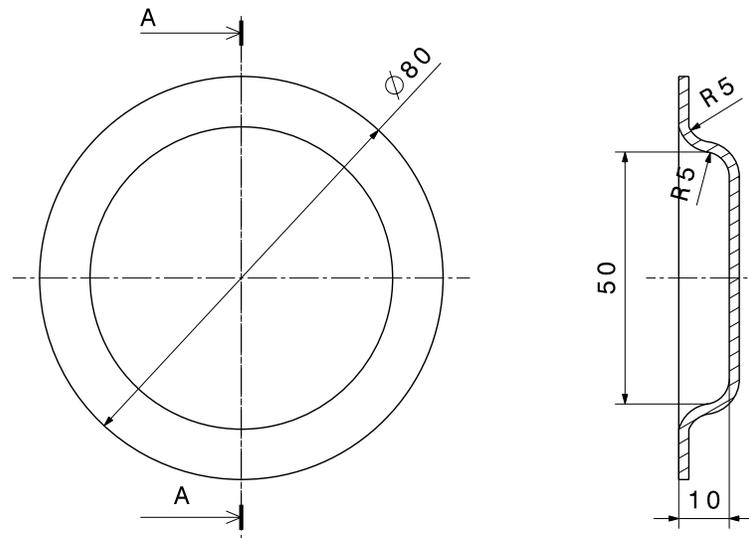


Abbildung 12.2: Geometrie des Ersatzbauteiles, CAD-Zeichnung

Für diese Simulation wird ein achsensymmetrisches Modell verwendet, Abbildung 12.3. Die Verbindungsschicht zwischen der Aluminium- und Stahlschicht wurde als optimal angenommen. Die Reibung zwischen Platte, Niederhalter und Ziehring wurde mit $\mu = 0,15$ angenommen. Um die Simulation zu vereinfachen wurde die Reibung zwischen Platine und Stempel vernachlässigt. Der Stempelweg betrug 14 mm .

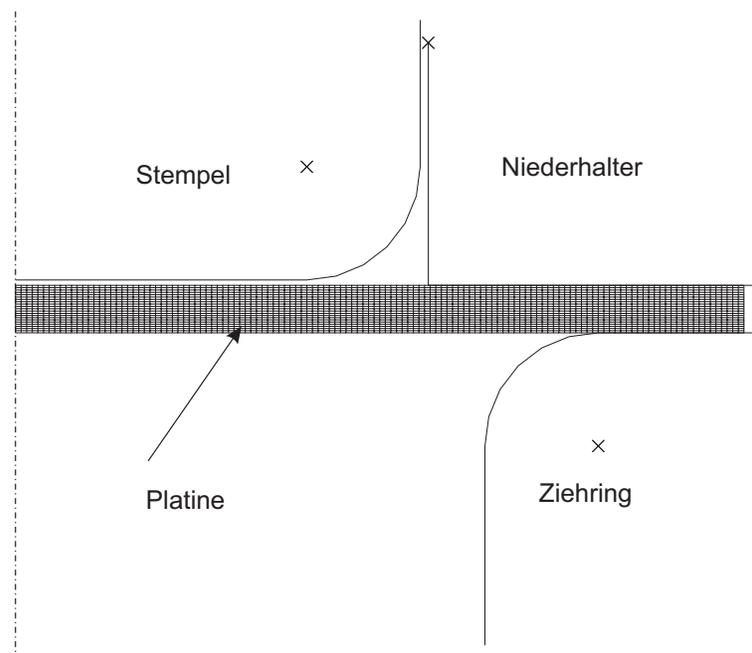


Abbildung 12.3: Achsensymmetrisches Modell der WV-Platine vor dem Tiefziehen

12.2 Simulation der Rundsicke

12.2.1 Fließkurve für unterschiedlichen Verformungsgrad

Durch die Anwendung des Fließkurvenmodells wie im Abschnitt 9.2 beschrieben, wurden die Fließkurven für den Werkstoff DC06 mittels Gleichung 9.7 bei einem Verformungsgrad von 35 % und 45 % ermittelt, Abbildung 12.4.

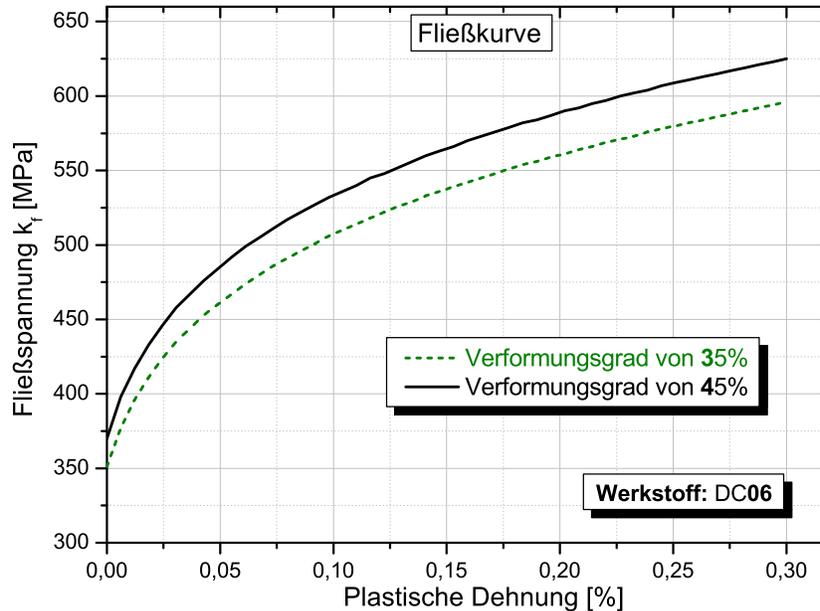


Abbildung 12.4: Fließkurve für unterschiedlichen Verformungsgrad (35 % und 45 %)

12.2.2 Eigenspannungen im Stahl bei unterschiedlichem VG

Durch die Erstellung eines Modells für die Generierung von Fließkurven in Abhängigkeit des Verformungsgrades (Abschnitt 9.2) ist man nun in der Lage eine elastisch-plastische FEM-Rechnung durchzuführen.

Um die Eigenspannungen zu ermitteln wurde der Stempel nach der Tiefziehsimulation zurückgefahren.

Abbildung 12.5 zeigt die Verteilung der Eigenspannungen im Werkstoffverbund unter Anwendung unterschiedlicher Fließkurven des Werkstoffes DC06 (Verformungsgrad von 35 % und 45 %). Die maximale Hauptspannung steigt von 272 MPa bei einem Verformungsgrad von 35 %, auf 313 MPa bei einem Verformungsgrad von 45 %.

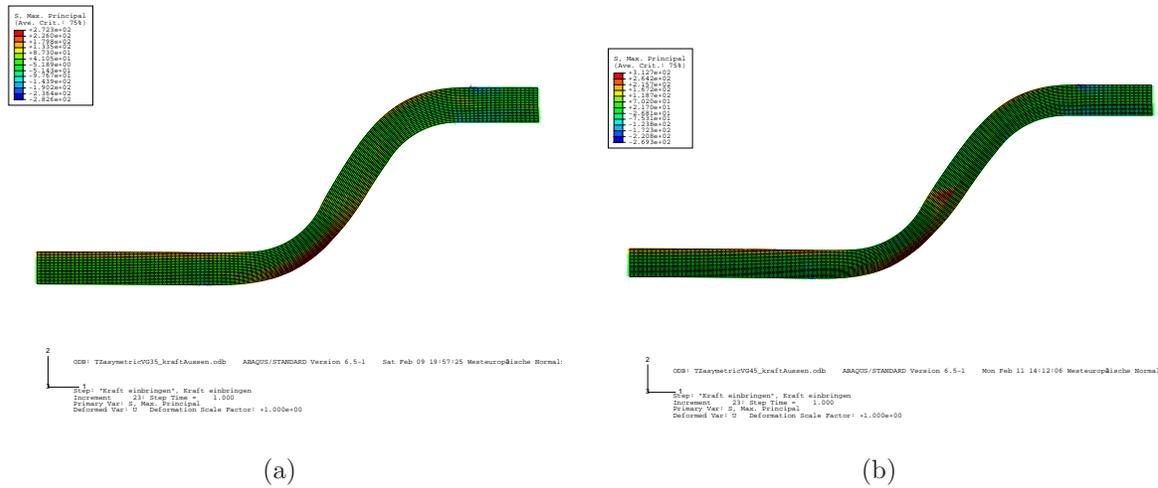


Abbildung 12.5: Eigenspannungen im Ersatzbauteil bei
 (a) 35 % Verformungsgrad, (b) 45 % Verformungsgrad

12.3 Ausdünnung des Werkstoffverbundes während des Tiefziehprozesses

Um die Richtigkeit der Ergebnisse der Simulation zu verifizieren wurde die Dickenänderung nach der Simulation des Tiefziehprozesses den gemessenen Ergebnissen gegenübergestellt, Abbildung 12.6. Die Ergebnisse zeigen sehr gute Übereinstimmung. Die maximale Ausdünnung von 12 % liegt am unteren Gewölbe des Napfes (Position B).

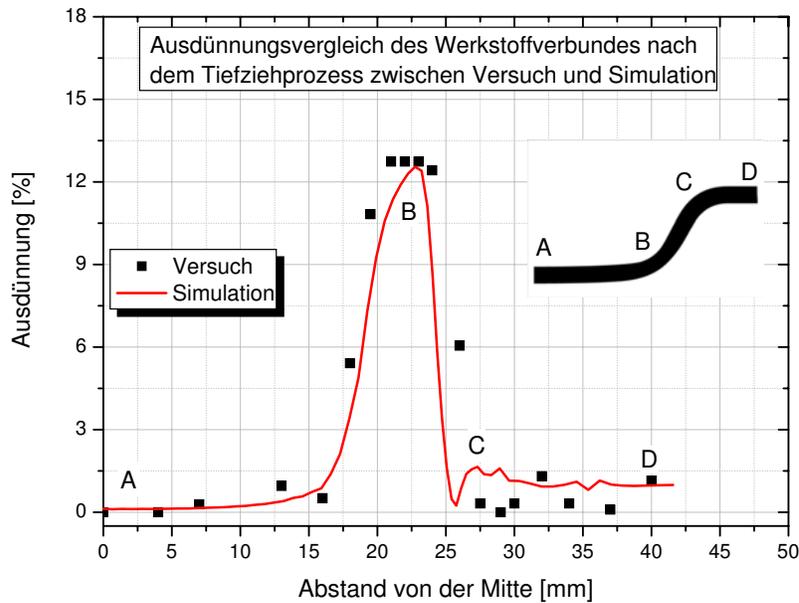


Abbildung 12.6: Ausdünnung nach dem Tiefziehen, Vergleich Versuch und Simulation

12.4 Einfluss des VG auf die Rückfederung von Bauteilen aus dem WV

Die Rückfederung resultiert aus dem elastischen Teil des Umformprozesses. Die in der Biegezone des Bauteiles auftretenden Druck- und Zugspannungen (Stauchungen und Streckungen) müssen durch Werkstoffverschiebung ausgeglichen werden. Wenn das zum Produzieren des Bauteils erforderliche Biegemoment weggenommen wird, springt das Blech um einen Winkel α zurück.

Die Rückfederung ist eine Funktion der Werkstoffeigenschaften, der Geometrie der Werkzeuge und der Vordehnung. Durch sachgemäße Anwendung von Werkstoff und Technologie kann die Rückfederung reduziert oder kompensiert werden [Kön95].

Die Simulation zeigt eine kleine Formabweichung durch die Rückfederung, Abbildung 12.7 und 12.8. Diese beträgt circa 0,9 % bei einem Verformungsgrad von 35 % und 0,8 % bei einem Verformungsgrad von 45 %. Allerdings hat der Verformungsgrad keinen wesentlichen Einfluss auf die Form des Bauteiles.

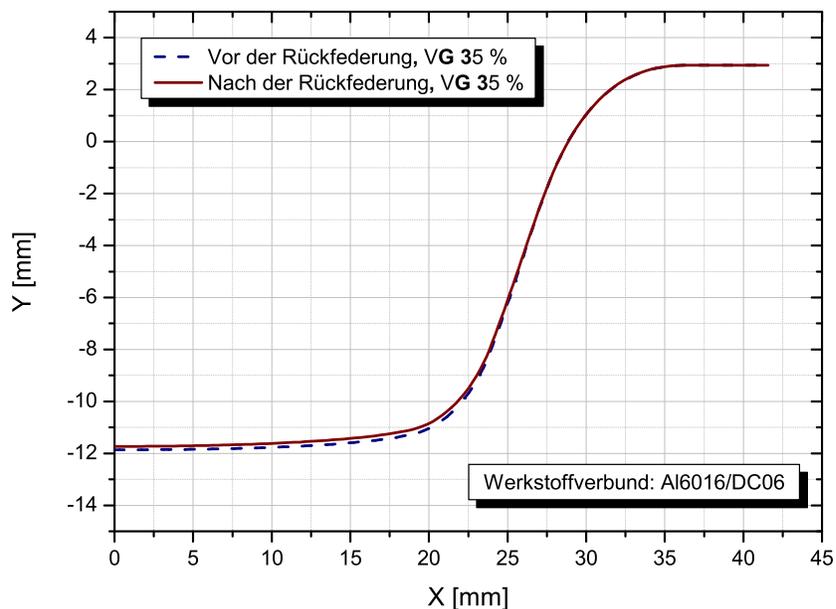


Abbildung 12.7: Rückfederung von Al6016/DC06 Werkstoffverbunden, VG 35 %

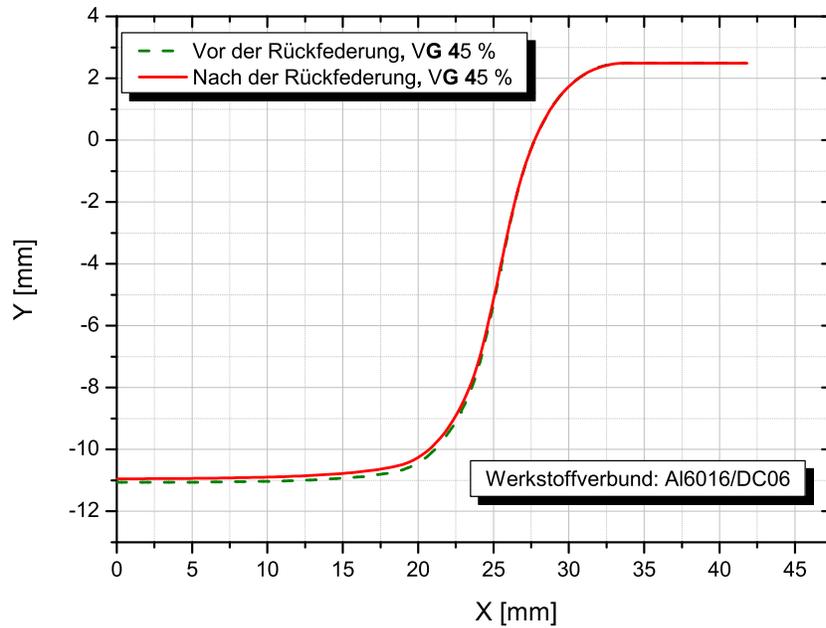


Abbildung 12.8: Rückfederung von Al6016/DC06 Werkstoffverbunden, VG 45 %

12.5 Versuche an der Rundsicke

Zur Verifizierung des Simulationsmodells wurden Versuche an bauteilähnlichen Proben unter Zugschwellbelastung ($R=0,1$) durchgeführt. Für diese Versuche wurde eine Vorrichtung konstruiert, Abbildung 12.9. Teil 1 wird zuerst mit vier Schrauben am unteren Querhaupt der Resonanzprüfmaschine (Kapitel 4.1) fixiert. Die bauteilähnliche Probe (Rundsicke) wird zwischen zwei Platten (Teil 2 und Teil 3) gespannt und es wird eine Kraft F eingeleitet.

Abbildung 12.10 zeigt den Versuchsaufbau für die zyklischen Untersuchungen an bauteilähnlichen Proben.

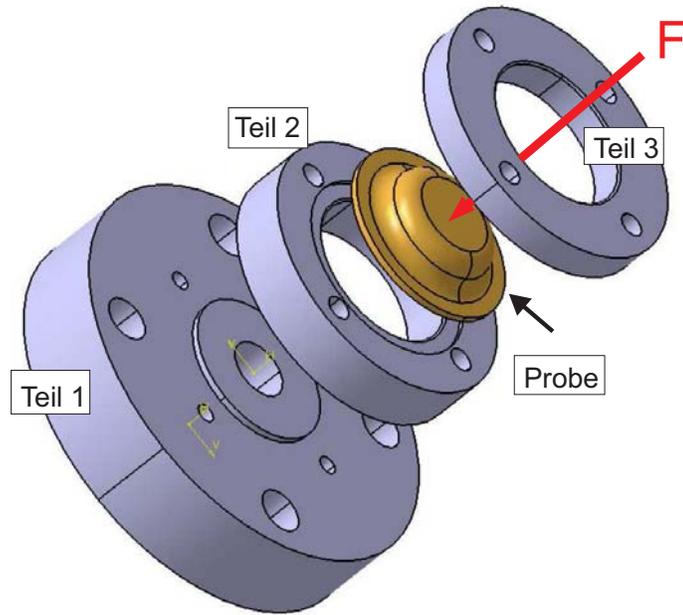


Abbildung 12.9: Vorrichtung für die Versuchsdurchführung an bauteilähnlichen Proben

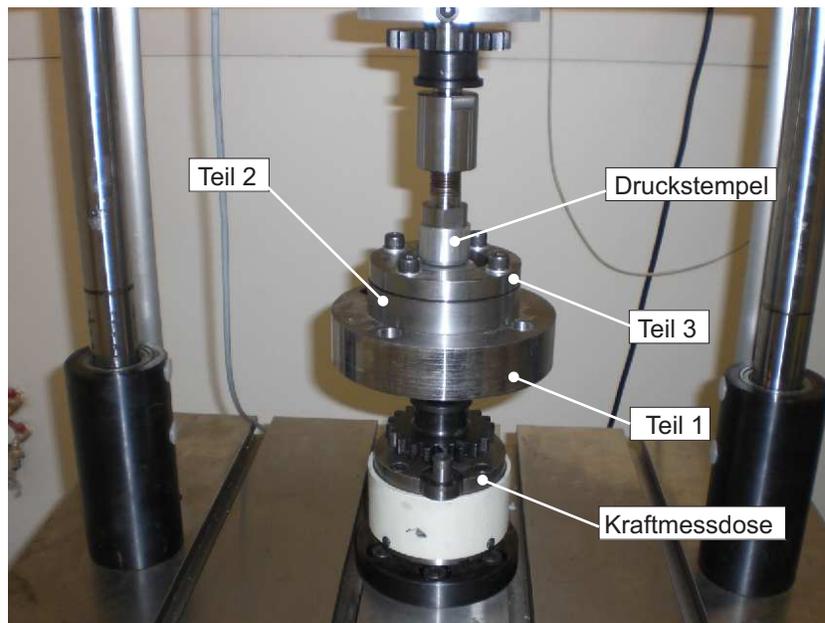


Abbildung 12.10: Versuchsaufbau

12.6 Schadensanalyse an Rundsicken

Die Versuchsergebnisse wurden den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Exemplarisch wurde hier ein Verformungsgrad von 35 % herangezogen. Die Formänderungsenergiehypothese (FEH) unterscheidet nicht zwischen Druck- bzw. Zugspannungen. Laut FEH verursachen sie die gleiche Schädigung. Die Versuche zeigen allerdings, dass die Zugspannungen größeres Schädigungspotential besitzen. Für die Erklärung der Schädigung an einer Rundsicke werden hier die maximalen Hauptspannungen herangezogen. Laut Simulation liegen die maximalen Spannungen in der Stahlschicht, an der inneren Seite der Rundsicke.

In der Aluminiumschicht befinden sich die maximalen Spannungen am unteren Gewölbe (Position B), siehe Abbildung 12.11. Zwischen Simulation und den Versuchen ist eine gute Übereinstimmung erkennbar, siehe Abbildung 12.12 und 12.13.

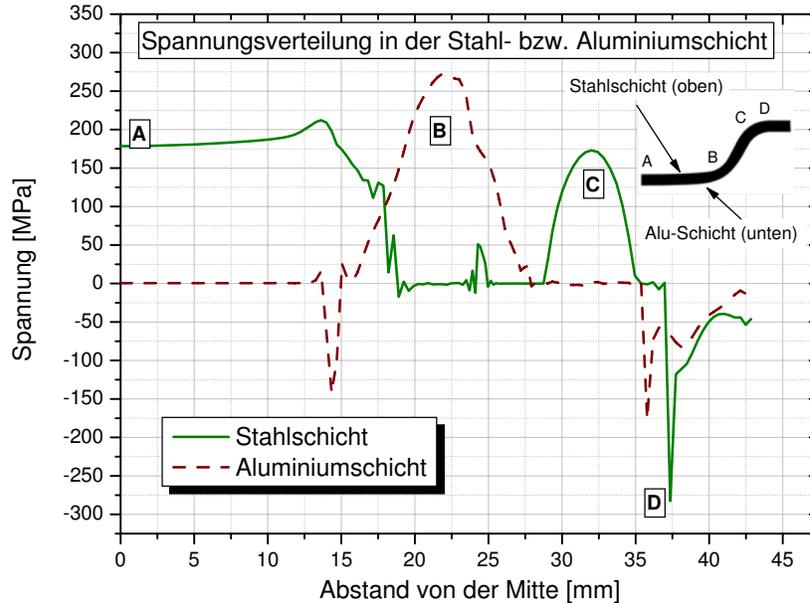


Abbildung 12.11: Spannungsverteilung in der Stahl- bzw. Aluminiumschicht, VG 35 %

Der Einfluss der Walzrichtung auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes DC06 wird in Abbildung 12.14 veranschaulicht.



Abbildung 12.12: Bruchübersicht der geschädigten Rundsicke, außen

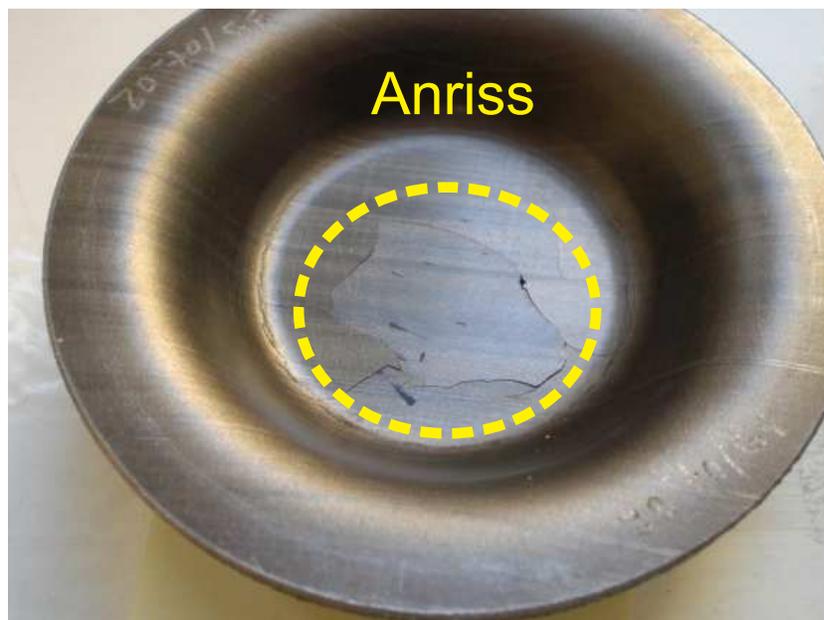


Abbildung 12.13: Bruchübersicht der geschädigten Rundsicke, innen

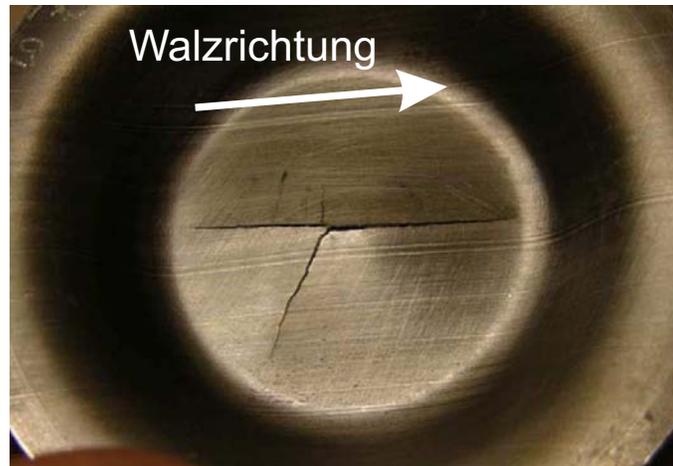


Abbildung 12.14: Richtung der Rissausbreitung (Anisotropie)

12.7 Vergleich Rechnung und Versuche

Die Verifikation des vorgeschlagene Simulationsmodells wurde am Beispiel einer Rundsicke (Napf) durchgeführt. Für die Lebensdauerberechnung wurde die Software FEMFAT[®] verwendet, siehe Abschnitt 3.8. Für die Lebensdauerberechnung wurden die Hauptspannungen herangezogen.

Die Lebensdauerberechnung zeigt eine beträchtliche Verbesserung der Treffsicherheit durch Berücksichtigung des Verformungsgrades. Durch Berücksichtigung des Umformgrades infolge des Tiefziehprozesses (lt. Masendorf) wird die Wöhlerlinie leicht nach rechts verschoben, Abbildung 12.16.

Abbildung 12.15 zeigt die Schädigungsverteilung bei einer Belastung von $F_a = 8000 \text{ N}$. Die Anrissstelle wurde sehr gut durch die Schädigungsberechnung vorhergesagt, siehe Abbildung 12.12 und 12.13.

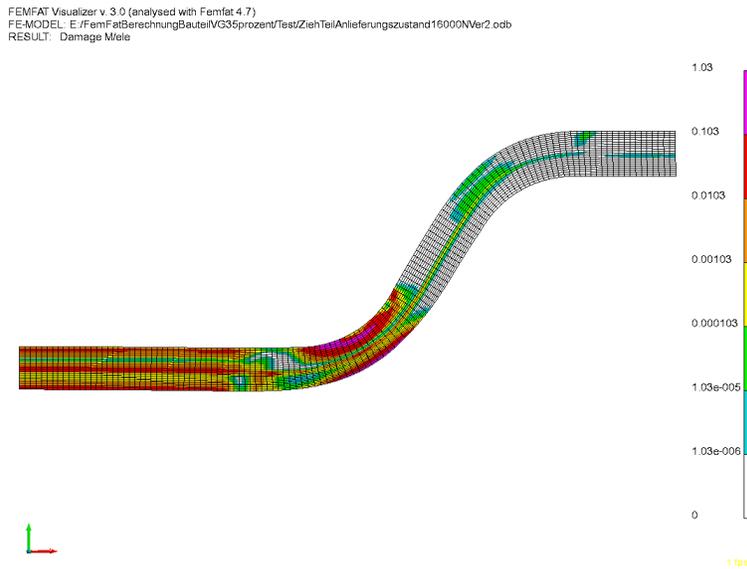


Abbildung 12.15: Schädigungsverteilung an bauteilähnlicher Probe (Napf)

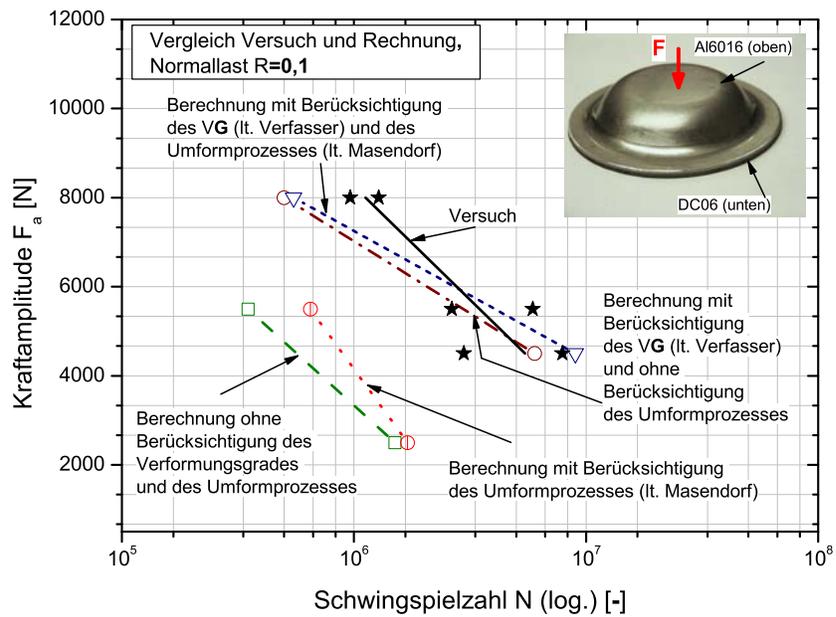


Abbildung 12.16: Gegenüberstellung der Versuchs- und Rechenergebnisse

Kapitel 13

Diskussion der Ergebnisse

Durch systematische Untersuchung der einzelnen Einflussfaktoren zeigt sich, dass der Herstellungsprozess des Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbundes einen erheblichen Einfluss auf die statischen als auch auf die zyklischen Eigenschaften hat. Das Verhalten des Werkstoffverbundes ist abhängig von der Dicke der Einzelkomponenten (Al6016-T4, DC06).

Um ein Berechnungsmodell, das unabhängig von der Dicke des Werkstoffverbundes ist, erstellen zu können, war es notwendig die Einzelkomponenten getrennt zu untersuchen. Der Werkstoffverbund wurde anschließend analysiert.

Basierend auf der Literatur bzw. auf eigenen Versuchen hat sich herauskristallisiert, dass eine Wärmebehandlung (Glühen bei 540 °C) des Werkstoffverbundes zu einer starken Haftfestigkeit führt. Während des Herstellungsprozesses des Werkstoffverbundes durch Kaltpressschweißen treten Verfestigungen auf. Aufgrund des Glühens bei 540 °C rekristallisiert der Werkstoff Al6016-T4, wodurch die Verfestigung, die durch den Herstellprozess (Kaltpressschweißen) des Werkstoffverbundes aufgetreten ist, wieder aufgehoben wird.

Hingegen verursacht die Temperatur von 540 °C keine Rekristallisation des Werkstoffes DC06. Somit bleibt der Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 erhalten.

Infolgedessen wurde der Einfluss des Verformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften von DC06 und somit auf die Eigenschaften des Werkstoffverbundes als der Haupteinflussfaktor betrachtet.

Um den Einfluss des Verformungsgrades auf die statischen und zyklischen Eigenschaften ermitteln zu können wurden Zug- und Ermüdungsversuche an Proben aus unterschiedlich vorverformten Platten durchgeführt.

Durch verschiedene Untersuchungen an den Einzelschichten des Werkstoffverbundes ist es gelungen den Einfluss des Verformungsgrades auf die zyklischen Eigenschaften zu quantifizieren.

Um tiefgezogene Bauteile aus diesem Werkstoffverbund mit beliebiger Dicke simulieren zu können, wurde für DC06 ein Modell zur Ermittlung der Fließkurve in Abhängigkeit des Verformungsgrades erstellt. Das vorgestellte Modell wurde den Ansätzen nach Swift und Voce gegenübergestellt. Im Bereich niedriger Verformungsgrade lässt sich das Verfe-

stignungsverhalten des DC06 sowohl nach dem Ansatz nach Swift als auch nach Voce gut beschreiben. Bei höheren Verformungsgraden werden allerdings die beiden Ansätze ungenau. Der Vorschlag des Verfassers zeigt gute Ergebnisse bei niedrigen Verformungsgraden und sehr gute Genauigkeit bei höheren Verformungsgraden, verglichen mit den anderen Fließansätzen.

Der Einfluss der Mittelspannung und Anisotropie wurden ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Allerdings bleibt deren Einfluss gegenüber dem Einfluss der Verformung während des Herstellungsprozesses marginal.

Für die Lebensdauerabschätzung von Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden wurde ein Berechnungsmodell erstellt. Dadurch wurde zum ersten Mal der Einfluss des Herstellungsprozesses (Verformungsgrad) auf die Lebensdauer berücksichtigt.

Das Konzept für die Lebensdauerberechnung wurde am Beispiel einer Rundsicke (Napf) verifiziert.

Die Lebensdauerberechnung zeigt beträchtliche Verbesserung der Treffsicherheit durch Berücksichtigung des Verformungsgrades.

Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse in Kombination mit den abgeleiteten Modellen bilden die Basis für eine gezielte Weiterentwicklung von Modellen für die Lebensdauerberechnung von Bauteilen aus Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden. Die Schadenanalyse zeigt einen großen Einfluss der Walzrichtung auf die Rissausbreitung. Dieser Einfluss wurde allerdings nicht ausreichend untersucht.

Für die Weiterentwicklung des Simulationsmodells für die Lebensdauerberechnung sind ausführliche Untersuchungen des Einflusses der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten notwendig. Um die allgemeine Verwendbarkeit dieses Modells zu gewährleisten, müssen auch andere Werkstoffe geprüft werden.

Kapitel 14

Publikationen des Verfassers

Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit des Verfassers auf dem Gebiet der Betriebsfestigkeit wurden während der Tätigkeit am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau folgende Publikationen veröffentlicht (B...schriftlicher Beitrag, V...Vortrag, P...Poster)

1. Fröschl J., Lamik A., Gódor I., Eichlseder W.: *The Influence of Multiaxial Loadings on the Fatigue Behaviour*, 22nd Danubia Adria Symposium, 28.09. -01.10.2005, Parma, Italien (B, P)
2. Fröschl J., Lamik A., Eichlseder W., Gódor I.: *Multiaxial Fatigue of Crank Shafts 4th DAAAM International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries*, Slavonski Brok, Croatia, 21-24.9.2005, Seite 37-42, ISBN 953-6048-29-9(B, V)
3. Fröschl J., Lamik A., Eichlseder W.: *Betrachtungen zur Schwingfestigkeit multiaxial beanspruchter Bauteile*, Tagungsband 1. Leobener Betriebsfestigkeitstage, Seite 159-174, Planneralm 8. bis 10. März 2006, ISBN 3-902544-00-7 (B, V)
4. Fröschl J., Lamik A., Eichlseder W.: *The Influence of Technological Effects and Multiaxial Loading on the Fatigue Strength of QT Steels*, Fatigue 2006, Atlanta, USA (B,V)
5. Leitner H., Lamik A., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *Schwingfestigkeitsverhalten von Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden*, Leichtmetalltage, 17.-18. Oktober 2006, Salzburg, Österreich (B,V)
6. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *An Investigation of the Cyclic Hardening Behaviour of an Aluminium-Steel Compound*, 23rd Danubia Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, Seite 171-172, ISBN 80-8070-589-5 (B,V)

7. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *Schwingfestigkeitsverhalten von Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbunden*, ESIS, Steyr 2006 (V)
8. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *A Study of the Fatigue Behaviour of an Aluminium Clad Steel Material Compound*, Strain, International Journal for Experimental Mechanics, 2006 (B)
9. Lamik A.: *Entwicklung eines Simulationsmodells für die Lebensdauerberechnung von Bauteilen aus Al/St Werkstoffverbund*, WerWasWo an der Montanuniversität Leoben, 2006 (P)
10. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *A characterisation of an aluminium-clad steel material compound*, Femfat User Meeting, Steyr 2007 (P)
11. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *Einfluss der Walzplattierung auf die zyklischen Kennwerte von Al6016-DC06 Werkstoffverbund*, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 14. bis 16. März 2007, Bremen, Deutschland (V)
12. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *Influence des procédés de fabrication sur la tenue en fatigue d'un composé en aluminium et acier*, Journées Annuelles SF2M, 30.-1. Juni 2007, École National Supérieure de Saint Etienne, France (B,V)
13. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W., Riemelmoser F.: *A concept for the fatigue life prediction of components from an aluminium-steel compound*, Seventh International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture, November 14-16 2007, Tampa, USA, Journal of ASTM International (B, V)
14. Lamik A., Leitner H., Eichlseder W.: *Lifetime Estimation of Components Manufactured from AA6016/FeP06 Material Compound*, 2nd Fatigue Symposium Leoben 2008, Montanuniversität-Leoben, Österreich, (B)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Dreidimensionale Darstellung der Mikrostruktur von Duplex-Stahl	5
2.2	Einfluss der Walzrichtung auf das Ermüdungsverhalten von Duplex Stahl	5
2.3	Einfluss der Walzrichtung auf die Schwingfestigkeit von Al7055	6
3.1	Lebensdauerberechnungskonzept auf Basis lokaler Spannungen	8
3.2	Wöhlerlinie für die Durchführung einer linearen Schadensakkumulation	9
3.3	Modifikationen der Wöhlerlinie, Miner Elementar und modifiziert nach Haibach	10
3.4	Modifikation der Wöhlerlinie nach Liu und Zenner	11
3.5	Beschreibung der Wöhlerlinie	12
3.6	Auftragung für eine auf mehreren Spannungshorizonten statistisch belegten Wöhlerlinie (Schemabild)	14
3.7	Auswertung für eine auf mehreren Spannungshorizonten statistisch belegten Wöhlerlinie (Schemabild)	14
3.8	Änderung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften	17
3.9	Haigh-Diagramm, Schematische Darstellung	18
3.10	Bezogenes Spannungsgefälle	19
3.11	Spannungsverteilung unter Zug/Druck- und Biegebelastung	20

3.12	Untersuchung der Verfestigung von DC06	22
3.13	Die vier häufig verwendeten Fließansätze	23
4.1	Prüfmaschinen	28
5.1	Mechanismus des Kaltpressschweißens (Schematisch)	30
5.2	Werkzeug für den Erichsen-Tiefungsversuch nach DIN 50101	31
5.3	Einfluss der Anlasstemperatur auf die Haftfestigkeit	32
5.4	Einfluss der AT und AZ auf die Festigkeit von Al/St/Al WV	33
5.5	Wärmebehandlung des Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbundes	34
6.1	Probengeometrie für Zugversuche	35
6.2	Skizze für die Entnahmeposition der Proben	36
6.3	Probengeometrie für die Schwingfestigkeitversuche	36
6.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von DC06	37
6.5	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Al6016-T4	38
6.6	Anrisswöhlerlinie des Werkstoffes Al6016-T4 im Anlieferungszustand	39
6.7	Anrisswöhlerlinie des Werkstoffes DC06 im Anlieferungszustand	39
7.1	Gefügeänderung durch das Walzen	40
7.2	Gefügeausbildung von DC06	41
7.3	Position der Härtemessstelle	42
7.4	Härte des Werkstoffes DC06 in Abhängigkeit des Verformungsgrades	42
8.1	Einfluss des VG auf die mechanischen Eigenschaften von Al6016-T4	44

8.2	Einfluss des VG auf die mechanischen Eigenschaften von DC06	44
8.3	Definition des Verformungsgrades	45
8.4	Anrisswöhlerlinie von DC06 in Abhängigkeit des VG, zugschwellend $R = 0$	47
8.5	Einfluss des VG auf das Ermüdungsverhalten von DC06, $R = 0$	48
8.6	Einfluss der Wärmebehandlung auf das Ermüdungsverhalten von DC06 . .	49
8.7	Anrisswöhlerlinie von DC06 in Abhängigkeit des VG, $R = -1$	49
8.8	Einfluss des VG auf das Ermüdungsverhalten von DC06, $R = -1$	50
8.9	Einspannvorrichtung für die Biegeversuche, $R = -1$	51
8.10	Anrisswöhlerlinie von DC06 in Abhängigkeit des VG, $R = -1$	51
8.11	Einfluss des VG auf das Ermüdungsverhalten von DC06, $R = -1$	52
8.12	Einfluss des VG auf das Ermüdungsverhalten von Al6016-T4	53
8.13	Spannungsgesteuerter LCF-Versuch, Hysterese	54
8.14	Änderung der plastischen Dehnung im LCF-Versuch	55
8.15	Zugversuche an DC06 Proben in verschiedenen Zuständen	55
8.16	Spannungsgesteuerter LCF-Versuch, Hysterese	56
8.17	Änderung der plastischen Dehnung im LCF-Versuch	56
8.18	Haigh Diagramm unter einachsiger Zug/Druck Belastung, DC06	58
8.19	Einfluss des VG auf die Mittelspannungsempfindlichkeit von DC06	58
8.20	Haigh Diagramm unter einachsiger Zug/Druck Belastung, DC06	59
8.21	Einfluss der Walzrichtung auf die statischen Eigenschaften von DC06 . . .	60
8.22	Einfluss der Walzrichtung auf die Schwingfestigkeit von DC06	61
8.23	Verschiedene Lastbedingungen am Beginn der zyklischen Versuche, DC06 .	62

8.24	Schwingversuche bei langsamer und rascher Laststeigerung, DC06	62
8.25	Verformungsgrad der Einzelschichten in Abhängigkeit des gesamten VG . . .	64
8.26	Vergleich der berechneten Zugdruck- und Biegewechselfestigkeit	64
9.1	Fließkurve für Al6016-T4	66
9.2	Schematische Vorgangsweise bei der Erstellung der DC06 Fließkurve	67
9.3	Einfluss des Verformungsgrades auf die statischen Festigkeitskennwerte . . .	67
9.4	Beispiel einer Bruchflächenabmessung nach dem Zugversuch	68
9.5	Darstellung der Fließkurve von DC06, linear	69
9.6	Darstellung der Fließkurve von DC06, doppeltlogarithmisch	70
9.7	Fließkurve für DC06 bei einem Verformungsgrad von 30 %	70
9.8	Grafische Benutzeroberfläche für die Generierung von Fließkurven	71
9.9	Vergleich verschiedener Fließansätze, Verformungsgrad von 20 %	72
9.10	Vergleich verschiedener Fließansätze, Verformungsgrad von 80 %	72
10.1	Berechnungskonzept für die Lebensdauer tiefgezogener Bauteile	74
10.2	Achsensymmetrisches Modell der Werkstoffverbund-Platine	75
10.3	Dynamische Beanspruchung des Napfes	75
11.1	Fließkurve für DC06 bei einem Verformungsgrad von 42 %	77
11.2	Spannungsverteilung an der WV-Probe	77
11.3	Zugversuch am Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund	78
11.4	Anrisswöhlerlinie für Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund (VG von 40 %) . .	79
11.5	Anrisswöhlerlinie für Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund (VG von 48 %) . .	79

11.6	Bruchanalyse der WV-Probe, Bruchübersicht	80
11.7	Anrissstelle der WV-Probe unter zyklischer Belastung	80
11.8	Schädigungsverlauf der WV-Proben unter zugschwellender Belastung . . .	81
11.9	Gegenüberstellung der Versuchs- und Rechenergebnisse an WV-Proben . .	82
12.1	Geometrie des Ersatzbauteiles, Foto	83
12.2	Geometrie des Ersatzbauteiles, CAD-Zeichnung	84
12.3	Achsensymmetrisches Modell der WV-Platine vor dem Tiefziehen	84
12.4	Fließkurve für unterschiedlichen Verformungsgrad (35 % und 45 %)	85
12.5	Eigenstressen im Ersatzbauteil bei 35 % und 45 % Verformungsgrad . .	86
12.6	Ausdünnung nach dem Tiefziehen, Vergleich Versuch und Simulation . . .	86
12.7	Rückfederung von Al6016/DC06 Werkstoffverbunden, VG 35 %	87
12.8	Rückfederung von Al6016/DC06 Werkstoffverbunden, VG 45 %	88
12.9	Vorrichtung für die Versuchsdurchführung an bauteilähnlichen Proben . . .	89
12.10	Versuchsaufbau	89
12.11	Spannungsverteilung in der Stahl- bzw. Aluminiumschicht, VG 35 % . . .	90
12.12	Bruchübersicht der geschädigten Rundsicke, außen	91
12.13	Bruchübersicht der geschädigten Rundsicke, innen	91
12.14	Schadensanalyse der bauteilähnlichen Proben	92
12.15	Schädigungsverteilung an bauteilähnlicher Probe (Napf)	93
12.16	Gegenüberstellung der Versuchs- und Rechenergebnisse	93

Tabellenverzeichnis

3.1	Typische Werte des Parameters n'' nach Swift	24
4.1	Chemische Zusammensetzung von DC06	28
4.2	Chemische Zusammensetzung von Al6016	28
6.1	Ergebnisse der Zugversuche an DC06	37
6.2	Ergebnisse der Zugversuche an Al6016-T4	38
8.1	Verformungsgrad der Einzelschichten und des Werkstoffverbundes	63
11.1	Ergebnisse der Zugversuche am Al6016-T4/DC06 Werkstoffverbund	78
A.1	Versuche an DC06 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$	112
A.2	Versuche an DC06, VG = 28 %, wechselnd $R = -1$	113
A.3	Versuche an DC06, VG = 26 %, Vierpunktbiegung $R = -1$	114
A.4	Versuche an DC06, VG = 32 %, Vierpunktbiegung $R = -1$	115
A.5	Versuche an DC06, VG = 22 %, wechselnd $R = -1$	116
A.6	Versuche an DC06, VG = 32 %, wechselnd $R = -1$	117
A.7	Versuche an DC06, VG = 19 %, zugschwellend $R = 0$	118

A.8	Versuche an DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$	119
A.9	Versuche an DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$ in Walzrichtung . . .	120
A.10	Versuche an DC06, VG = 37 %, zugschwellend $R = 0$	121
A.11	Versuche an Al6016-T4/DC06 WV, VG = 40 %, zugschwellend $R = 0$. .	122
A.12	Versuche am Al6016-T4/DC06 WV, VG = 48 %, zugschwellend $R = 0$. .	123
A.13	Versuche am Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$. .	124
A.14	Versuche an Al6016-T4, VG = 50 %, zugschwellend $R = 0$	125
A.15	Versuche an Al6016-T4, VG = 36 %, wechselnd $R = -1$	126
A.16	Versuche an Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0,5$.	127
A.17	Versuche am Al6016/DC06 WV, VG = 33 %, Vierpunktbiegung $R = -1$.	128

Literaturverzeichnis

- [Ake92] AKERET R.: Strangpreßnähte in Aluminiumprofilen, Teil II: Mikrostruktur und Qualitätsmerkmale. In: *Aluminium* 68 (1992), Nr. 11, S. 965–973. – ISSN 0002-6689
- [Arz06] ARZT E.: *Zugversuch*. 2006. – Universität Stuttgart, Institut für Metallkunde, Vorlesungsskriptum
- [Bar99] BARGEL H.-J., SCHULZE G.: *Werkstoffkunde*. 6. Auflage. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999. – ISBN 3-540-65456-9
- [Bay85] BAY N.: *Friction and adhesion in metal forming and cold welding*, Technical University of Denmark, Dissertation, 1985
- [Bic06] BICHLER C., BRANDECKER M., BUCHNER M., BUCHMAYR B.: Entwicklung von Walzplattierten Aluminium-Stahl Verbunden für die Umformung in der Automobilindustrie. In: *4. Ranshofener Leichtmetalltage* (2006), S. 233–249. – ISBN-13: 978-3-902092-04-5
- [Buc86] BUCKLEY D. H., FERRANTE J., PASHLEY M. D., SMITH J. R.: Solids in contact. In: *Materials Science and Engineering* 83 (1986), Nr. 2, S. 177–188. – ISSN 0025-5416
- [Buc05] BUCHNER B.: *Beurteilung der Umformbarkeit von Blechen durch die Ermittlung von r -Wert und n -Wert*. WS 2005. – Umformbarkeit metallischer Werkstoffe, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben
- [Buc08] BUCHNER M.: *Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit von Aluminium-Stahl-Verbundblechen*, Montanuniversität-Leoben, Lehrstuhl für Umformtechnik, Dissertation, Jänner 2008
- [Bux92] BUXBAUM O.: *Betriebsfestigkeit*. 2. Auflage. Verlag Stahleisen, 1992
- [Cav73] CAVE J. A. , WILLIAMS J.D.: The mechanism of cold pressure welding by rolling. In: *Journal of the institute of metals* 101 (1973), S. 203–207
- [Dan89] DANG VAN K., GRIVEAU B., MESSAGE O.: On a new multiaxial fatigue criterion, theory and application, Biaxial and Multiaxial Fatigue. In: *Mechanical Engineering publications* (1989), S. 479–496

- [Dan03a] DANESH MANESH H., KARIMI TAHERI A.: bond strength and formability of an aluminium-clad steel sheet. In: *Journal of Alloys and Compounds* 361 (2003), Oktober, S. 138–143
- [Dan03b] DANESH MANESH H., KARIMI TAHERI A.: The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminium clad steel sheet. In: *Materials and Design* 24 (2003), Dezember, S. 617–622
- [Dan05] DANESH MANESH H., KARIMI TAHERI A.: An investigation of deformation behavior and bonding strength of bimetal strip during rolling. In: *Mechanics of Materials* 37 (2005), S. 531–542
- [Die85] DIETMANN H.: Zur Berechnung von Kerbwirkungszahlen. In: *Konstruktion* 37 (1985), Nr. 2, S. 67–71
- [Dur56] DURST G.: A New Development in Metal Clading. In: *Journal of Metals* 8 (1956), Nr. 3, S. 328–333
- [Eic89] EICHLSEDER W.: *Rechnerische Lebensdaueranalyse von Nutzfahrzeugkomponenten mit der Finite Elemente Methode*, Technische Universität Graz, Dissertation, 1989
- [Eic02] EICHLSEDER W.: Fatigue analysis by local stress concept based on finite element results. In: *Computers and Structures* 80 (2002), S. 2109–2113
- [Eic07] EICHLSEDER W.: *Betriebsfestigkeit II. 2007.* – Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben 2007
- [EW05] EICHLSEDER W., Unger B.: Trends in der Betriebsfestigkeitssimulation. In: *Dünnwandige Strukturbauteile*. Berlin, Deutscher Verband für Materialforschung und -Prüfung, 2005
- [FKM94] FKM RICHTLINIE: Rechnergestützte Betriebsfestigkeitsbeurteilung / Forschungshefte FKM. Frankfurt am Main, August 1994 (134). – Forschungsbericht
- [FKM98] FKM RICHTLINIE: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*. Frankfurt am Main : VDMA Verlag GmbH, 1998. – ISBN 3–8163–0371–4
- [Frö82] FRÖMEL N., PAULUS M.: Modifiziertes Kaltwalzplattierverfahren. In: *Metall* 36 (1982), S. 771–773
- [Gou24] GOUGH H.: The fatigue of metals. In: *Scott, Greenwood and Son, London* (1924)
- [Gro00] GRONOSTAJSKI Z.: The constitutive equations for FEM analysis. In: *Journal of Materials Processing Technology* 106 (2000), S. 40–44

- [Gro01] GROSS D., SEELIG TH.: *Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. – ISBN 3-540-42203-X
- [Gud95] GUDEHUS H., ZENNER H.: *Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung*. Düsseldorf : Verlag Stahleisen, 1995
- [Gus96] GUSEK C.O., BLECK W., DAHL W.: Modelling of sheet metal testing. In: *Computational material science 7* (1996), S. 173–180
- [Hai02] HAIBACH E.: *Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – ISBN 3-540-43142-X
- [Hüc83] HÜCK M., THRAINER L., SCHÜTZ W.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss-Synthetische Wöhlerlinien / Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Bericht ABF. 1983 (11). – Forschungsbericht
- [Her96] HERRMANN F., KIEHN H., STÄBLEIN R.: Lebensdauer von Blechen mit Sicken / Forschungsvereinigung Automobiltechnik EV. Postfach 170563.60079 Frankfurt, Juni 1996 (128). – Forschungsbericht
- [Hor00] HORN H.: *Verfestigung und Rekristallisation*. 2000. – Vorlesungsskriptum Werkstoffkunde Teil 5, IWS-FH Hamburg
- [Kön95] KÖNIG W., KLOCKE F.: *Fertigungsverfahren Umformen*. 5. Auflage. Berlin : Springer Berlin Heidelberg New York, VDI Verlag, 1995. – ISBN 3-540-23650-3
- [Kul03] KULP S.: *Herstellung von Blechformteilen aus Reintitanwerkstoffen und hochlegierten rostfreien Stählen*, Fachbereich Maschinenbau der Universität Hannover, Dissertation, Juli 2003
- [Lan90] LANGE K.: *Umformtechnik, Blechbearbeitung*. Band 3. Berlin : Springer Verlag, 1990. – ISBN 3-540-50039-1
- [Lei01] LEITNER H.: *Simulation des Ermüdungsverhaltens von Aluminiumgusslegierungen*, Montanuniversität-Leoben, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Dissertation, November 2001
- [Mar03] MARQUARDT C., MASENDORF R., ZENNER H.: Berücksichtigung der Umformung bei der Lebensdauerabschätzung für Strukturen aus Feinblech. In: *Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V.* (2003), S. 41–80
- [Mas80] MASING W.: *Handbuch der Qualitätssicherung, Teil 3 : Statistische Verfahren*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1980
- [Mas00] MASENDORF R.: *Einfluss der Umformung auf die zyklischen Werkstoffkennwerte von Feinblech*, Technische Universität Clausthal, Dissertation, Mai 2000

-
- [Mat03] MATEO A., LLANES L., AKDUT N., STOLARZ J., ANGLADA M.: Anisotropy effects on the fatigue behaviour of rolled duplex stainless steels. In: *International Journal of Fatigue* 25 (2003), S. 481–488
- [McE62] MCEWAN K. J. B., MILNER D. R.: Pressure welding of dissimilar metals. In: *British welding journal* (July 1962), S. 406–420
- [Mer00] MERKEL M., THOMAS K.-H.: *Taschenbuch der Werkstoffe*. Leipzig : Fachbuchverlag, 2000
- [Min45] MINER M. A.: Cumulative damage in fatigue. In: *ASME, Journal of Applied Mechanics* 12 (1945), S. A159–A164
- [Mül01] MÜLDERS B.: *Modellierung der Verfestigung technischer Aluminiumlegierungen*, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der Technischen Hochschule Aachen, Dissertation, Juni 2001
- [Moh75] MOHAMED H. A., WASHBURN J.: Mechanism of Solid State Pressure Welding. In: *Welding Research Supplement* 54 (1975), Nr. 9, S. 302–310. – ISSN 0043-2296
- [Mon96] MONTHEILLET F.: Métallurgie en mise en forme. In: *Techniques de l'Ingenieur, Traité Matériaux métalliques* M600 (1996)
- [Mor96] MORI T., KURIMOTO S.: Press-formability of stainless steel and aluminum clad sheet. In: *Journal of Materials Processing Technology* 56 (1996), S. 242–253
- [Neu61] NEUBER H.: Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain-law. In: *Journal of Applied Mechanics* 28 (1961)
- [Nic62] NICHOLAS M. G., MILNER D. R.: Roll Bonding of Aluminium. In: *British Welding Journal* 9 (1962), Nr. 8, S. 469–475
- [Pal98] PALIN-LUC T., LASSERRE S.: An energy based criterium for high cycle multiaxial fatigue. In: *European Journal of Mechanics, A/Solids* 17 (1998), Nr. 2, S. 237–251
- [Pal05] PALIN-LUC T., MOREL F.: Critical plane concept and energy approach in multiaxial fatigue. In: *Materialprüfung* 47 (2005), S. 278–286
- [Pet51] PETERSEN C.: Die Vorgänge im zügig und wechselnd beanspruchten Metallgefüge. In: *Zeitschrift Metallkunde* 4 (1951), Nr. 43, S. 429–433
- [Pet52] PETERSEN C.: Die praktische Bestimmung von Formzahlen gekerbter Stäbe. In: *Forschung* (1952), Nr. 17, S. 16–20
- [Pöt00] PÖTTER K.J.: *Lebensdauerabschätzung ein- und mehrachsrig schwingend beanspruchter Bauteile*, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2000
-

- [Rad03] RADAJ D.: *Ermüdungsfestigkeit*. 2. Auflage. Berlin : Springer-Verlag Berlin, 2003
- [Rie05] RIEDLER M.: *Methodikfindung zur Simulation von thermomechanisch beanspruchten Motorbauteilen aus Aluminiumlegierungen*, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Dissertation, 2005
- [Ros64] ROSSOW E.: Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den normal scores entsprechenden Prozentpunkten. In: *Qualitätskontrolle* 9 (1964), Nr. 12, S. 146–147
- [RY98] ROCH Y., Duval J.L. M. Berard J.Y. J. Berard J.Y.: Coupled sheet metal forming and fatigue simulation. In: BEINNIAL CONGRESS 20th (Hrsg.) ; Benelux Deep Drawing Research Group (Veranst.): *Sheet metal forming beyond 2000*. Benva, Brussels, Belgium, June 17-19 1998
- [Sch67] SCHÜTZ W.: *Über eine Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und veränderlicher Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Bemessung von Flugzeugbauteilen*, Technische Universität München, Dissertation, 1967
- [See96] SEEGER T.: *Stahlbau Handbuch, Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise*. Köln : Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, 1996
- [Sem61] SEMENOV A. P.: The phenomenon of seizure and its investigation. In: *Wear* 4 (1961), Nr. 1, S. 1–9. – ISSN 0043-1648
- [Sie55] SIEBEL E., STIELER M.: Ungleichförmige Spannungsverteilung bei schwingender Beanspruchung. In: *VDI-Zeitschrift* (1955), Nr. 97, S. 121–126
- [Sin52] SINCLAIR G. M.: An investigation of the coxing effect in fatigue of metals. In: *ASTM Proc.* 52 (1952), S. 743–758
- [Sri00] SRIVATSAN T.S., ANAND S., SRIRAM S., VASUDEVAN V.K.: The high-cycle fatigue and fracture behavior of aluminium alloy 7055. In: *Materials Science & Engineering A* A281 (2000), S. 292–304
- [Ste02] STEINBECK G.: Untersuchung von IF-Stählen zum Verhalten unter dynamischer Beanspruchung / Stahl-Zentrum Verein Deutscher Eisenhüttenleute. 2002. – Fachausschußbericht 6.022
- [TGL75] TGL 19340: *Ermüdungsfestigkeit, Dauerfestigkeit der Maschinenelemente, Formzahlen und Kerbwirkungszahlen*. Berlin : Staatsverlag der DDR, Teil 04, 1975. – ISBN 3-8163-0371-4
- [Tru80] TRUSZKOWSKI W.: on physical meaning of the stress-strain relationship parameters in high strength polycrystalline metals. In: *Mémoires scientifiques de la Revue de métallurgie* 77 (1980), S. 193–201

- [Tyl63] TYLECOTE R. F., WYNNE E. J.: Effect of Heat Treatment on Cold Pressure Welds. In: *British Welding Journal* 10 (1963), Nr. 8, S. 385–394. – ISSN 0026-0542
- [Ung99] UNGER B.: FEMFAT Grundmodul. In: *TZS Steyr* (1999)
- [Voc48] VOCE E.: Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation. In: *Journal of the Institute of Metals* 74 (1948), S. 537–562
- [War69] WARTMANN R.: *Einführung in die mathematische Statistik*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York : Springer Verlag, 1969
- [Wei94] WEISSBACH W.: *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. 11. Auflage. Braunschweig, 1994. – ISBN 3-528-84019-6
- [Wel76] WELLINGER K., DIETMANN H.: *Festigkeitsberechnung- Grundlagen und technische Anwendung*. 3. Auflage. Stuttgart : Kröner-Verlag, 1976
- [Yah91] YAHIRO A., MASUI T., YOSHIDA T., DOI D.: Development of nonferrous clad plate and sheet by warm rolling with different temperature of materials. In: *ISIJ Int.* 31 (1991), S. 647–653

Anhang A

Tabellarische Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen

A.1 DC06 im Anlieferungszustand, zugschwellend

$R = 0$

DC06 Anlieferung	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm^2]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
St-70	79	2,875	115	448.500	10	2,5
St-65	79	2,35	94	1.750.700	10	2,5
St-71	79	2,35	94	10.000.000	10	2,5
St-67	79	2,875	115,0	148.100	10	2,5
St-66	79	2,65	106,0	772.400	10	2,5
St-72	79	2,15	86,0	10.000.000	10	2,5
St-58	79	2,65	106,0	510.800	10	2,5
St-59	79	2,15	86,0	10.000.000	10	2,5
St-60	79	2,15	86,0	10.000.000	10	2,5
St-58	79	2,65	106,0	204.000	10	2,5
St-61	79	2,875	115,0	241.100	10	2,5
St-62	79	2,35	94	827.000	10	2,5
St-63	79	2,5	100,0	702.500	10	2,5
St-64	79	2,5	100,0	510.800	10	2,5
St-68	79	2,5	100,0	350.700	10	2,5

Tabelle A.1: Versuche an DC06 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$

A.2 DC06, VG = 28 %, wechselnd $R = -1$

DC06 VG = 28 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V25 - 01	79	3,60	200,0	10.000.000	9,99	1,8
V25 - 02	79	4,33	240,0	200.600	10,02	1,8
V25 - 03	79	4,15	230,0	567.200	10,02	1,8
V25 - 04	79	4,33	240,0	292.500	10,03	1,8
V25 - 05	79	3,61	200,0	2.948.800	10,03	1,8
V25 - 06	79	3,41	190,0	10.000.000	9,96	1,8
V25 - 07	79	3,97	220,0	1.037.000	10,02	1,8
V25 - 08	79	3,43	190,0	10.000.000	10,02	1,8
V25 - 09	79	3,42	190,0	10.000.000	10	1,8
V25 - 10	79	3,77	210,0	915.400	9,97	1,8
V25 - 11	79	3,77	210,0	2.097.800	9,97	1,8
V25 - 01w	79	4,32	240,0	333.400	9,99	1,8
V25 - 06w	79	4,12	230,0	403.800	9,96	1,8
V25 - 08w	79	3,97	220,0	1.078.500	10,02	1,8
V25 - 09w	79	3,96	220,0	1.490.900	10	1,8
V25 - 12	79	3,60	200,0	3.973.300	10	1,8
V25 - 13	79	3,76	210,0	1.861.300	9,96	1,8

Tabelle A.2: Versuche an DC06, VG = 28 %, wechselnd $R = -1$

A.3 DC06, VG = 26 %, Vierpunktbiegung $R = -1$

DC06 VG = 26 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Stärke [mm]	Breite [mm]
Var59-01	96	0,184	260	1.292.400	1,84	10,01
Var59-02	96	0,155	220	1.256.030	1,84	9,99
Var59-03	96	0,155	220	2.630.000	1,84	10,00
Var59-04	96	0,134	190	10.000.000	1,84	10,00
Var59-05	96	0,141	200	3.796.200	1,84	9,99
Var59-06	96	0,212	300	186.800	1,84	10,00
Var59-07	96	0,212	300	899.400	1,84	10,01
Var59-08	96	0,184	260	709.400	1,84	10,01
Var59-09	96	0,134	190	10.000.000	1,84	9,99
Var59-10	96	0,155	220	1.160.000	1,84	9,97
Var59-11	96	0,141	200	4.358.700	1,84	9,97
Var59-12	96	0,141	200	2.100.000	1,84	9,99
Var59-14	96	0,134	190	10.000.000	1,84	10,00
Var59-13	96	0,212	300	767.800	1,84	10,02
Var59-04w	96	0,183	260	832.500	1,84	10,00
Var59-14w	96	0,183	260	610.500	1,84	10,00

Tabelle A.3: Versuche an DC06, VG = 26 %, Vierpunktbiegung $R = -1$

A.4 DC06, VG = 32 %, Vierpunktbiegung $R = -1$

DC06 VG = 32 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Stärke [mm]	Breite [mm]
Var23-01	95	0,206	340	211.400	1,71	9,95
Var23-02	95	0,207	340	386.000	1,71	10,01
Var23-03	95	0,159	260	428.800	1,71	10,04
Var23-04	95	0,135	220	3.942.700	1,71	10,04
Var23-05	95	0,134	220	4.920.800	1,71	9,99
Var23-06	95	0,147	240	920.800	1,71	10,05
Var23-07	95	0,135	220	2.355.100	1,71	10,05
Var23-09	95	0,122	200	10.000.000	1,71	10,03
Var23-10	95	0,183	300	361.100	1,71	9,99
Var23-11	95	0,158	260	1.685.200	1,71	9,98
Var23-12	95	0,159	260	890.800	1,71	10,02
Var23-13	95	0,121	200	10.000.000	1,71	9,94
Var23-13w	95	0,183	300	298.500	1,71	10,03
Var32-09w	68	0,183	300	761.200	1,71	10,00
Var32-14	54	0,145	240	2.103.300	1,71	9,91
Var32-15	95	0,145	240	1.042.800	1,71	9,94
Var32-16	85	0,207	340	401.500	1,71	10,00
Var23-08	95	0,120	200	10.000.000	1,71	9,93

Tabelle A.4: Versuche an DC06, VG = 32 %, Vierpunktbiegung $R = -1$

A.5 DC06, VG = 22 %, wechselnd $R = -1$

DC06 VG = 22 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V21-02	106	3,50	180,0	10.000.000	9,98	1,95
V21-03	106	3,69	190,0	3.633.100	9,97	1,95
V21-04	106	3,89	200,0	1.217.800	9,98	1,95
V21-05	106	4,28	220,0	659.400	9,98	1,95
V21-06	106	4,28	220,0	506.700	9,97	1,95
V21-07	106	4,09	210,0	501.700	9,98	1,95
V21-09	106	3,69	190,0	10.000.000	9,95	1,95
V21-10	106	4,10	210,0	972.100	10,01	1,95
V21-11	106	3,52	180,0	10.000.000	10,03	1,95
V21-12	106	3,51	180,0	10.000.000	10,01	1,95
V21-13	106	3,71	190,0	10.000.000	10	1,95
V21-14	78	3,89	200,0	2.545.200	9,97	1,95
V21-01w	78	4,28	220,0	212.000	9,97	1,95
V21-12w	78	4,49	230,0	236.100	10,01	1,95
V21-13w	78	4,49	230,0	405.500	10	1,95
V21-09w	78	4,46	230,0	173.500	9,95	1,95
V21-11w	78	3,91	200,0	1.684.700	10,03	1,95
V21-02w	78	4,09	210,0	390.900	9,98	1,95

Tabelle A.5: Versuche an DC06, VG = 22 %, wechselnd $R = -1$

A.6 DC06, VG = 32 %, wechselnd $R = -1$

DC06 VG = 32 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V31-01	79	4,03	240	234.900	9,89	1,8
V31-02	79	3,91	230	1.116.900	9,99	1,8
V31-04	79	3,41	200	10.000.000	10,02	1,8
V31-05	79	3,40	200	10.000.000	9,98	1,8
V31-06	79	3,39	200	10.000.000	9,96	1,8
V31-07	79	3,74	220	1.407.100	10	1,8
V31-08	79	3,74	220	2.489.700	10	1,8
V31-09	79	3,55	210	2.059.300	9,95	1,8
V31-10	79	3,56	210	4.218.700	10	1,8
V31-04w	79	4,09	240	418.000	10,02	1,8
V31-09w	79	4,06	240	328.900	9,95	1,8
V31-05w	79	3,91	230	391.700	9,98	1,8
V31-12	79	3,56	210	10.000.000	9,99	1,8
V31-13	79	3,75	220	1.140.700	10,02	1,8
V31-12	79	3,91	230	703.000	9,99	1,8

Tabelle A.6: Versuche an DC06, VG = 32 %, wechselnd $R = -1$

A.7 DC06, VG = 19 %, zugschwellend $R = 0$

DC06 VG = 19 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm^2]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V20-03	79	3,26	160,0	10.000.000	9,95	2,05
V20-04	79	3,39	165,0	1.394.600	10,01	2,05
V20-05	79	3,23	160,0	10.000.000	10	2,02
V20-06	79	3,56	175,0	702.300	9,93	2,05
V20-07	79	3,36	170,0	567.300	9,87	2
V20-08	79	3,53	175,0	240.600	9,94	2,03
V20-09	79	3,49	170,0	1.605.100	10,06	2,04
V20-10	79	3,32	165,0	2.106.700	9,86	2,04
V20-11	79	3,32	160,0	10.000.000	10,13	2,05
V20-12	79	3,43	165,0	369.000	10,13	2,05
V20-05w	79	3,43	170,0	358.800	10	2,02
V20-11w	79	3,63	175,0	185.200	10,13	2,05

Tabelle A.7: Versuche an DC06, VG = 19 %, zugschwellend $R = 0$

A.8 DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$, Quer zur Walzrichtung

DC06 VG = 25 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V22-01	79	3,04	165	692.800	9,9	1,86
V22-02	79	3,03	160	10.000.000	10,02	1,89
V22-03	79	3,04	165	10.000.000	9,9	1,86
V22-04	79	3,24	170	10.000.000	9,89	1,93
V22-05	79	3,31	175	975.300	10	1,89
V22-07	79	3,39	180	649.600	9,96	1,89
V22-08	79	3,38	180	296.300	9,95	1,89
V22-09	79	3,40	180	213.000	9,93	1,9
V22-10	79	3,19	170	3.049.400	9,89	1,9
V22-11	79	2,98	165	1.512.400	9,93	1,82
V22-12	79	2,90	160	10.000.000	9,89	1,83
V22-13	79	3,07	160	10.000.000	9,93	1,93
V22-02w	79	3,31	175	623.000	10,02	1,89
V22-12w	79	3,08	170	1.230.000	9,89	1,83
V22-03w	79	3,22	175	1.144.000	9,9	1,86
V22-04w	79	3,44	180	263.600	9,89	1,93
V22-13w	79	3,35	175	179.000	9,93	1,93

Tabelle A.8: Versuche an DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$

A.9 DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$ in Walzrichtung

DC06 VG = 25 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V58-01	79	3,10	180	468.100	9,91	1,84
V58-02	79	2,99	170	951.200	10,01	1,87
V58-03	79	2,87	165	10.000.000	10	1,85
V58-04	79	3,00	170	2.110.000	9,99	1,88
V58-05	79	3,10	175	575.000	10	1,88
V58-06	79	2,93	170	721.900	9,95	1,84
V58-07	79	2,89	165	881.000	9,98	1,87
V58-08	79	2,80	160	10.000.000	9,98	1,87
V58-09	79	2,91	165	1.000.800	10	1,88
V58-10	79	2,81	160	10.000.000	10	1,87
V58-11	79	2,78	160	10.000.000	9,96	1,86
V58-11w	79	3,06	175	612.100	9,96	1,86
V58-03w	79	3,15	180	208.700	10	1,85
V58-08w	79	3,17	180	953.500	9,98	1,87
V58-12	79	3,08	175	1.164.200	9,98	1,87
V58-13	79	3,08	175	1.250.700	9,98	1,87

Tabelle A.9: Versuche an DC06, VG = 25 %, zugschwellend $R = 0$ in Walzrichtung

A.10 DC06, VG = 37 %, zugschwellend $R = 0$

DC06 VG = 37 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V34-01	79	3,12	195	625.000	10,01	1,6
V34-02	79	2,90	190	2.257.000	9,77	1,56
V34-03	79	2,81	180	10.000.000	9,94	1,57
V34-04	79	2,94	190	728.800	9,91	1,56
V34-06	79	3,07	195	400.600	9,98	1,58
V34-07	79	3,03	190	1.506.000	9,97	1,6
V34-08	79	2,89	185	2.009.300	9,9	1,58
V34-09	79	2,80	180	10.000.000	9,86	1,58
V34-10	79	2,89	185	10.000.000	9,89	1,58
V34-11	79	2,82	180	10.000.000	9,9	1,58
V34-02w	79	2,82	185	10.000.000	9,77	1,56
V34-03w	79	3,04	195	1.167.000	9,94	1,57
V34-11w	79	3,13	200	350.800	9,9	1,58
V34-10w	79	3,13	200	417.400	9,89	1,58
V34-09w	79	3,12	200	306.400	9,86	1,58

Tabelle A.10: Versuche an DC06, VG = 37 %, zugschwellend $R = 0$

A.11 Al6016-T4/DC06 WV, VG = 40 %, zugschwellend $R = 0$

WV VG = 40 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
Var11-01	79	3,20	120,0	10.000.000	10,01	2,66
Var11-02	79	3,59	135,0	531.900	10,01	2,66
Var11-03	79	3,71	140,0	470.500	9,95	2,66
Var11-04	79	3,59	135,0	416.800	10,01	2,66
Var11-05	79	3,46	130,0	1.104.000	10,02	2,66
Var11-06	79	3,33	125,0	3.879.200	10,03	2,66
Var11-07	79	3,46	130,0	4.483.900	10,01	2,66
Var11-08	79	3,46	130,0	2.175.100	10	2,66
Var11-09	79	3,33	125,0	10.000.000	10,01	2,66
Var11-10	79	3,20	120,0	10.000.000	10,02	2,66
Var11-11	79	3,20	120,0	10.000.000	10,01	2,66
Var11-12	79	3,73	140,0	624.100	10,02	2,66
Var11-13	79	3,73	140,0	561.200	10,02	2,66
Var11-14	79	3,59	135,0	1.280.500	10,01	2,66
Var11-15	79	3,33	125,0	4.069.800	10,01	2,66
Var11-16	79	3,33	125,0	10.000.000	10,02	2,66

Tabelle A.11: Versuche an Al6016-T4/DC06 WV, VG = 40 %, zugschwellend $R = 0$

A.12 Al6016-T4/DC06 WV, VG = 48 %, zugschwellend $R = 0$

WV VG = 48 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
Var18-01	79	3,21	135,0	10.000.000	9,96	2,39
Var18-02	79	3,47	145,0	223.100	10,02	2,39
Var18-03	79	3,35	140,0	770.000	10	2,39
Var18-04	79	3,20	135,0	2.610.400	9,92	2,39
Var18-05	79	3,10	130,0	7.770.000	9,99	2,39
Var18-06	79	2,98	125,0	10.000.000	9,99	2,39
Var18-07	79	3,09	130,0	10.000.000	9,95	2,39
Var18-08	79	3,21	135,0	5.715.800	9,96	2,39
Var18-09	79	3,10	130,0	6.570.000	9,97	2,39
Var18-10	79	3,10	130,0	10.000.000	9,98	2,39
Var18-10W	79	3,46	145,0	185.900	9,98	2,39
Var18-13	79	3,23	135,0	5.220.000	10,01	2,39
Var18-01W	79	3,45	145,0	1.075.800	9,96	2,39
Var18-06W	79	3,34	140,0	2.350.000	9,99	2,39
Var18-11	79	2,97	125,0	10.000.000	9,93	2,39
Var18-12	79	2,92	125,0	10.000.000	9,76	2,39
Var18-12W	79	3,27	140,0	680.000	9,76	2,39
Var18-07W	79	3,45	145,0	1.381.800	9,95	2,39

Tabelle A.12: Versuche am Al6016-T4/DC06 WV, VG = 48 %, zugschwellend $R = 0$

A.13 Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$

Al6016-T4 Anlieferung	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm^2]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
Al-42	76	1,50	75	337.200	10	2
Al-41	76	1,24	62	1.528.900	10	2
Al-45	76	1,50	75	389.700	10	2
Al-46	76	1,24	62	2.018.500	10	2
Al-47	76	1,24	62	10.000.000	10	2
Al-49	76	1,64	82	123.000	10	2
Al-48	76	1,64	82	242.600	10	2
Al-50	76	1,10	55	10.000.000	10	2
Al-51	76	1,10	55	10.000.000	10	2
Al-52	76	1,50	75	630.900	10	2
Al-53	76	1,38	69	309.500	10	2
Al-54	76	1,38	69	594.300	10	2
Al-56W	76	1,64	82	128.000	10	2
Al-56	76	1,10	55	10.000.000	10	2

Tabelle A.13: Versuche am Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0$

A.14 Al6016-T4, VG = 50 %, zugschwellend $R = 0$

Al6016-T4 VG = 50 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm^2]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V48-01	72	0,66	65	1.248.900	9,98	1,02
V48-02	73	0,71	70	303.000	9,9	1,02
V48-03	73	0,83	82	169.200	9,97	1,02
V48-04	73	0,56	55	10.000.000	10	1,02
V48-05	73	0,56	55	10.000.000	9,91	1,02
V48-06	73	0,71	70	500.800	9,91	1,02
V48-07	73	0,65	65	1.041.900	9,86	1,02
V48-08	73	0,84	82	128.300	10	1,02
V48-09	73	0,55	55	10.000.000	9,86	1,02
V48-10	73	0,71	70	1.710.500	9,91	1,02
V48-11	73	0,84	82	310.000	10	1,02
V48-12	73	0,65	65	450.000	9,86	1,02

Tabelle A.14: Versuche an Al6016-T4, VG = 50 %, zugschwellend $R = 0$

A.15 Al6016-T4, VG = 36 %, wechselnd $R = -1$

Al6016-T4 VG = 36 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
V45-01	73	0,96	75	695.700	10,01	1,28
V45-02	73	0,83	65	3.879.100	10	1,28
V45-03	73	1,09	85	315.600	9,99	1,28
V45-04	73	1,09	85	140.100	9,99	1,28
V45-05	73	0,95	75	1.289.800	9,9	1,28
V45-06	73	0,82	65	1.787.700	9,9	1,28
V45-09	73	0,96	75	1.646.800	9,96	1,28
V45-08	73	1,08	85	511.600	9,94	1,28
V45-10	73	0,76	60	10.000.000	9,96	1,28
V45-11	73	0,77	60	10.000.000	10,01	1,28
V45-12	73	0,77	60	10.000.000	9,99	1,28
V45-13	73	0,83	65	1.271.600	9,98	1,28
V45-07	73	1,02	80	1.521.800	9,98	1,28
V45-11w	73	1,03	80	222.700	10,01	1,28
V45-12w	73	1,02	80	533.100	9,99	1,28

Tabelle A.15: Versuche an Al6016-T4, VG = 36 %, wechselnd $R = -1$

A.16 Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0,5$

Al6016-T4 Anlieferung	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm^2]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
ALWS-05	77	1,2	60,0	498.200	10	2
ALWS-04	77	1	50,0	3.017.700	10	2
ALWS-06	77	1,2	60,0	551.200	10	2
ALWS-07	77	1	50,0	1.358.300	10	2
ALWS-08	77	0,8	40,0	10.000.000	10	2
ALWS-10	77	1,2	60,0	324.300	10	2
ALWS-11	77	1	50,0	8.000.000	10	2
ALWS-12	77	1,1	55,0	1.031.100	10	2
ALWS-13	77	1,1	55,0	722.300	10	2
ALWS-14	77	0,9	45,0	10.000.000	10	2
ALWS-15	77	0,9	45,0	2.807.000	10	2
ALWS-16	77	0,9	45,0	4.207.100	10	2
ALWS-17	77	0,8	40,0	10.000.000	10	2
ALWS-18	77	0,8	40,0	10.000.000	10	2
ALWS-19	77	0,9	45,0	1.587.300	10	2
ALWS-20	77	1	50,0	2.350.400	10	2
ALWS-02	77	1,1	55,0	528.100	10	2

Tabelle A.16: Versuche an Al6016-T4 im Anlieferungszustand, zugschwellend $R = 0,5$

A.17 Al6016/DC06 WV, VG = 33 %, Vierpunktbiegung $R = -1$

WV VG = 33 %	f [Hz]	Kraft- amplitude [kN]	S_a [N/mm ²]	erreichte Schwingspielzahl	Breite [mm]	Stärke [mm]
Var6-01	102	0,318	170	4.273.400	9,97	3
Var6-02	102	0,392	210	1.718.500	9,96	3
Var6-12	102	0,394	210	3.166.200	10,01	3
Var6-13	102	0,469	250	872.100	10,01	3
Var6-03	99	0,392	210	1.851.400	9,96	3
Var6-04	99	0,318	170	10.000.000	9,97	3
Var6-04w	99	0,467	250	500.800	9,97	3
Var6-05	99	0,355	190	3.283.700	9,96	3
Var6-06	99	0,432	230	834.200	10,02	3
Var6-07	99	0,432	230	1.225.000	10,02	3
Var6-08	99	0,320	170	4.103.900	10,05	3
Var6-09	99	0,281	150	10.000.000	9,98	3
Var6-10	99	0,281	150	10.000.000	9,98	3
Var6-10w	99	0,430	230	1.448.200	9,98	3
Var6-11	99	0,280	150	10.000.000	9,96	3
Var6-11w	99	0,467	250	425.800	9,96	3
Var6-09w	99	0,468	250	155.000	9,98	3
Var6-12	99	0,355	190	2.583.400	9,96	3
Var6-13	99	0,355	190	983.300	9,96	3

Tabelle A.17: Versuche am Al6016/DC06 WV, VG = 33 %, Vierpunktbiegung $R = -1$