

FAT-Schriftenreihe 348

Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben "Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung" - 19824 N - der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung

Forschungsstelle

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität
München

Labor Werkstoff- und Fügetechnik, Hochschule Esslingen

Projektleiter

Prof. Wolfram Volk

Prof. Peter Häfele

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	V
Abstract	VI
Verzeichnis der Kurzzeichen	VII
Verzeichnis der Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Laserschneiden	3
2.2 Scherschneiden	5
2.2.1 Verfahrenseinteilung	5
2.2.2 Begriffserklärung und Verfahrensprinzip	6
2.2.3 Kräfte und Momente beim Scherschneiden	7
2.2.4 Schnittflächenkenngrößen	9
2.3 Nachschneiden	9
2.3.1 Verfahrenseinteilung	9
2.3.2 Verfahrensprinzip	10
2.3.3 Prozessziele und Prozessparameter	10
2.4 Kantenrisse	11
2.4.1 Definition und Folgen	11
2.4.2 Prüfverfahren zur Charakterisierung der Kantenrissempfindlichkeit	12
2.5 Betriebsfestigkeit	17
2.5.1 Kanteneinfluss	17
2.5.2 Kerbeeinfluss und dynamische Stützwirkung	18
2.5.3 Mittelspannungseinfluss	19
2.5.4 Einfluss variable Amplitude	20
2.6 Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept	21
3 Zielsetzung und Aufgabenstellung	25

4	Versuchs- und Messeinrichtungen	26
4.1	Mechanische Schnellläuferpresse (utg)	26
4.2	Universalprüfmaschine (utg und HS Esslingen)	27
4.3	Optisches 3D-Verformungsanalysesystem (utg)	28
4.4	Taktiles Oberflächenmessgerät (utg)	30
4.5	Laserkonfokalmikroskop (utg).....	30
4.6	Auflichtmikroskop (utg)	32
4.7	Mikrohärteprüfer (utg)	32
4.8	Schwingfestigkeitsversuch (HS Esslingen)	33
4.8.1	Spannungsgeregelte Versuche	34
4.8.2	Spannungsgeregelte Versuche mit variabler Amplitude.....	35
4.8.3	Dehnungsgeregelte Versuche.....	37
5	Versuchswerkstoffe	39
5.1	Aluminium EN AW-5182	39
5.2	Aluminium EN AW-6082	41
6	Probenherstellung	45
6.1	Zugproben-Scherschneidwerkzeug (utg)	45
6.2	Universal-Scherschneidwerkzeug (utg)	47
6.3	Polierte Proben (HS Esslingen).....	48
6.4	Laserstrahlgeschnittene Proben (HS Esslingen)	48
7	Versuchsplan	50
8	Versuchsdurchführung	54
8.1	Kantenrisszugversuche (utg).....	54
8.2	Kragenziehversuche (utg)	54
8.3	Mikrohärtemessungen (utg)	55
8.4	Rauheitsmessungen und Schnittflächentopographie (utg)	56
8.5	Geometrische Schnittflächenkenngrößen (utg).....	57

8.6	Schwingfestigkeitsversuche (HS Esslingen)	57
8.6.1	Spannungsgeregelte Versuche	57
8.6.2	Dehnungsgeregelte Versuche	59
9	Versuchsergebnisse Umformkantenrisse	62
9.1	Strategie Schneiden 1 (offener Schnitt)	62
9.1.1	Versuche mit nicht vorgedehnten Proben	62
9.1.2	Einfluss der Probenvordehnung	65
9.2	Strategie Schneiden 1G (geschlossener Schnitt)	72
9.3	Strategie Schneiden 2 (Beschichtung)	75
9.4	Strategie Schneiden 3 (Kaltaufschweißungen)	79
9.5	Strategie Schneiden 4 (zweistufiges Scherschneiden)	83
9.6	Strategie Schneiden 5 (frühzeitige Rissinitiierung)	89
9.7	Strategie Laserschneiden	92
9.8	Zusammenfassung der Kantenrissempfindlichkeit bei allen Strategien	94
9.9	Validierung der Ergebnisse aus dem <i>EFTT</i> durch Kragenziehversuche	96
10	Diskussion Umformkantenrisse	99
11	Kanteneinfluss auf quasistatische Kennwerte	102
12	Versuchsergebnisse Schwingfestigkeitsversuche	106
13	Diskussion Schwingfestigkeitsversuche	109
13.1	Spannungsgeregelte Versuche	109
13.1.1	Vorreckungseinfluss	109
13.1.2	Kerbeinfluss	114
13.1.3	Mittelspannungseinfluss	121
13.1.4	Kanteneinfluss	128
13.1.5	Einfluss variabler Amplituden	136
13.2	Einfluss Wärmebehandlung	143
13.3	Dehnungsgeregelte Versuche	145

13.3.1	Kanteneinfluss.....	146
13.3.2	Werkstoffvergleich	151
13.3.3	Einfluss Sekundärglattschnitt.....	156
13.4	Fraktographie	160
13.5	Übertragbarkeit und Korrelationsfaktoren	166
14	Einfluss der Schneidstrategie auf Kantenrissempfindlichkeit und Betriebsfestigkeit.....	176
15	Zusammenfassung und Ausblick	178
16	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU.....	179
16.1	Nutzen der Forschungsergebnisse in KMU	179
16.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU.....	179
16.3	Industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse.....	180
17	Verwendung der Zuwendung Forschungsstelle 1 (utg, TU München)	181
18	Verwendung der Zuwendung Forschungsstelle 2 (HS Esslingen)	182
19	Plan zum Ergebnistransfer.....	183
20	Förderhinweis.....	185
A.	Abbildungsverzeichnis	186
B.	Tabellenverzeichnis	199
C.	Normenverzeichnis.....	203
D.	Literaturverzeichnis.....	204
E.	Versuchsergebnisse spannungsgeregelt.....	210
F.	Versuchsergebnisse dehnungsgeregelt	257

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wird der Einfluss der Schneidstrategie auf das Restumformvermögen sowie die Betriebsfestigkeit der schergeschnittenen Kante untersucht. Dazu werden Proben aus den Aluminiumlegierungen EN AW-5182 und EN AW-6082 mit einer Blechdicke von jeweils 1,5 mm gefertigt. Hierzu kommen fünf verschiedene Scherschneidstrategien zum Einsatz, welche einer Laserstrahlschneidvariante sowie dem gefrästen und polierten Referenzzustand gegenübergestellt werden.

Zur Beurteilung der Kantenrissempfindlichkeit werden *Edge-Fracture-Tensile-Tests* und Krageziehversuche durchgeführt. Die Untersuchung des Einflusses auf die Betriebsfestigkeit erfolgt anhand der Ergebnisse spannungs- und dehnungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuche. Sowohl das Restumformvermögen, bestimmt durch die Kantenrissempfindlichkeit, als auch das Verhalten unter schwingender Beanspruchung zeigen eine starke Abhängigkeit vom vorliegenden Kantenzustand. Dieser wird durch die Eigenschaften der Kante in Form von Rauheit, Aufhärtung und Geometrie beschrieben und ist wiederum abhängig von der Wahl der Schneidstrategie und -parameter. Dabei kann sich zwischen der Kantenrissempfindlichkeit und dem Betriebsfestigkeitsverhalten auch ein Zielkonflikt einstellen. So kann eine Aufhärtung im Nahbereich der schergeschnittenen Kante die Kantenrissempfindlichkeit bei Umformvorgängen erhöhen, wohingegen im hcf-Bereich (high cycle fatigue) einer Schwingbeanspruchung die Lebensdauer positiv beeinflusst wird. Um den Zielkonflikt zu lösen, ist die Wahl der Schneidstrategie somit abhängig vom Umformgrad des herzustellenden Bauteils und dessen zu erwartenden Belastungen im Betrieb zu treffen.

Weiterhin ist die Schneidstrategie auch werkstoffabhängig anzupassen. Rauheit, Aufhärtung und Kantengeometrie können sich je nach gewähltem Blechwerkstoff unterscheiden. Die Wahl einer ungeeigneten Schneidstrategie kann dabei unerwünschte Effekte wie die Ausbildung von Sekundärglattschnitt hervorrufen, welcher neben einer erhöhten Aufhärtung auch geometrische Unstetigkeiten an der Schnittfläche zur Folge haben kann. Auch die Verwendung von kaltaufgeschweißten Aktivelementen ist möglichst zu vermeiden, da sich diese negativ auf die Kantenrissempfindlichkeit der schergeschnittenen Kante auswirken können.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse kann die Güte von Herstellbarkeits- und Betriebsfestigkeitsanalysen verbessert werden.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

Abstract

In this project, the influence of the cutting strategy on the residual formability and the fatigue strength of the sheared edge is examined. Samples are produced from the aluminum alloys EN AW-5182 and EN AW-6082, each with a sheet thickness of 1.5 mm. To study the influence of the cutting strategy, five different shear-cutting variants and one laser-cutting variant are compared with the milled and polished reference condition.

To evaluate the sensitivity to edge cracks, *Edge-Fracture-Tensile-Tests* and collar forming tests are carried out. The influence on the fatigue strength is investigated on the basis of the results of stress- and strain-controlled fatigue tests. Both, the residual formability of the edge, described by the edge crack sensitivity, and the behavior under fatigue loading show a strong dependency on the edge condition. This is described by the properties of the edge in terms of roughness, hardening and geometry and is in turn dependent on the choice of cutting strategy and parameters. A conflict of objectives can arise between the edge crack sensitivity and the fatigue strength behavior. Hardening in the near-surface region of the shear cut edge can increase the sensitivity to edge cracks during forming operations, whereas in the hcf-range (high cycle fatigue) of a fatigue loading the service life is positively influenced. In order to resolve the conflict of objectives, the choice of the cutting strategy must therefore be made depending on the degree of deformation of the component edge to ensure manufacturing and its expected loading during operation.

Furthermore, the cutting strategy must also be adapted depending on the material. Roughness, hardening and edge geometry can differ depending on the sheet material used. The choice of an unsuitable cutting strategy can cause undesirable effects such as the formation of a secondary clean-cut, which, in addition to increased hardening, can also result in geometrical discontinuities on the cut surface. The use of cold-welded active elements should also be avoided, as these can have a negative effect on the edge crack sensitivity of the sheared edge.

The knowledge gained can improve the quality of manufacturability and fatigue strength analyses.

The research goal was achieved.

Verzeichnis der Kurzzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	%	Bruchdehnung
A _g	%	Gleichmaßdehnung
b	-	Zyklischer Schwingfestigkeitsexponent
c	-	Zyklischer Duktilitätsexponent
D	-	Schadenssumme
D ₀	mm	Lochdurchmesser vor Versuchsdurchführung
D _{ges}	-	Gesamtschädigung
D _h	mm	Lochdurchmesser nach Aufweitung
D _{zul}	-	Zulässige Schadenssumme
E	GPa	Elastizitätsmodul
F _{NH}	N	Niederhalterkraft
F _S	N	Schneidkraft
F _{S,max}	N	max. Schneidkraft
h _B	mm	Bruchflächenhöhe
h _E	mm	Kanteneinzugshöhe
h _G	mm	Grathöhe
h _S	mm	Glattschnitthöhe
Δh	μm	max. Höhengsprung
k	-	Neigungsexponent der Wöhlerlinie
k	-	Mittelspannungskorrekturfaktor
K'	MPa	Zykl. Verfestigungskoeffizient
K _{ec}	-	Kantenrissempfindlichkeitsfaktor
K _t	-	Kerbwirkungszahl
K _t	-	Kerbformzahl
L ₀	mm	Anfangsmesslänge
M _σ	-	Mittelspannungsempfindlichkeit
n	-	Dynamische Stützzahl (auch n _σ)
n'	-	Zyklischer Verfestigungsexponent
N	-	Schwingspielzahl
P _A	%	Ausfallswahrscheinlichkeit
r	μm	Schneidkantenradius
r _N	μm	Schneidkantenradius beim Nachschneiden
r _V	μm	Schneidkantenradius beim Vorschneiden
R	-	Lastverhältnis
R _B	MPa	Bruchspannung
R _{eH}	MPa	Obere Streckgrenze
R _m	MPa	Zugfestigkeit

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
R_{mk}	MPa	Kerbzugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
s	mm	Blechdicke
T_N	-	Streuspanne
u	mm	Schneidspalt
u_{rel}	%	relativer Schneidspalt
$u_{rel,nach}$	%	relativer Schneidspalt beim Nachschneiden
$u_{rel,vor}$	%	relativer Schneidspalt beim Vorschneiden
W_B	J	Energieaufnahme bis Bruch
W_M	J	Energieaufnahme bis Maximalkraft
z	mm	Nachschneidzugabe
β	$^\circ$	Bruchflächenwinkel
ε	%	Dehnung
ε_a	%	Dehnungsamplitude
ε_f'	%	Zyklischer Duktilitätskoeffizient
λ	%	Lochaufweitungsverhältnis
λ_c	μm	Grenzwellenlänge
φ_1	-	logarithmische Hauptformänderung
φ_2	-	logarithmische Nebenformänderung
φ_3	-	logarithmische Blechausdünnung
φ_{global}	-	Logarithmische Formänderung über Messstrecke gemittelt
φ_{Span}	$^\circ$	Spanwinkel
σ	MPa	Spannung
σ_a	MPa	Spannungsamplitude
σ_{an}	MPa	Nennspannungsamplitude
σ_f'	MPa	Zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_n	MPa	Nennspannung
σ_o	MPa	Oberspannung
σ_u	MPa	Unterspannung

Verzeichnis der Abkürzungen

AlMg	Aluminium-Magnesium
AlMgSi	Aluminium-Magnesium-Silizium
ASTM	American Society for Testing and Materials (Normungsorganisation)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung (Normungsorganisation)
DLC	Diamond-like Carbon
EFTT	Edge-Fracture-Tensile-Test (Kantenrisszugversuch)
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
FLC	Forming Limit Curve (Grenzformänderungskurve)
HE	Hochschule Esslingen
HET	Hole Expansion Test (Lochaufweitungsversuch)
HV	Vickershärte
ISO	Internationale Organisation für Normung (Normungsorganisation)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LED	Light-emitting diode (Leuchtdiode)
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
PKW	Personenkraftwagen
PLC	Portevin-Le-Chatelier(-Effekt)
utg	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

Seit 2009 unterliegen PKW in der EU einer CO₂-Regulierung. Zur Erreichung eines durchschnittlichen Flottenverbrauches von 95 g CO₂/km ab 2021 wird schon seit einigen Jahren intensiv an alternativen Antriebsformen wie der Elektromobilität oder an der Weiterentwicklung von Leichtbaustrategien gearbeitet. Diese Entwicklungen werden umso wichtiger, da bis 2030 weitere drastische Reduzierungen des zulässigen CO₂-Ausstoßes in Planung sind. (VDA, 2020)

Zur Erreichung dieser Ziele wird vermehrt das Leichtbaupotential von Aluminiumwerkstoffen genutzt, welche sich im Vergleich zu Stahl durch ihre geringere Dichte auszeichnen. Die ebenfalls geringere Steifigkeit solcher Leichtbaumetalle wird oftmals durch den Einsatz größerer Blechdicken kompensiert. Die eingeschränkte Umformbarkeit von Aluminiumwerkstoffen stellt dabei eine Herausforderung dar, da schon bei der Produktentwicklung und -auslegung sowohl die Rissentstehung bei der Blechumformung an der Bauteilkante als auch das Bauteilversagen im Lebenszyklus durch einen von der Kante ausgehenden Schwingungsriß verhindert werden muss.

In der Serienproduktion stellt das Fertigungsverfahren Scherschneiden das bevorzugte Trennverfahren dar, da eine Integration in mehrstufige Schneid- und Umformwerkzeuge bei hoher Wirtschaftlichkeit möglich ist. Die Eigenschaften der Bauteilkanten werden dabei signifikant durch den Trennprozess beziehungsweise durch die gewählte Scherschneidstrategie sowie die Schneidparameter beeinflusst. So weisen schergeschnittene Kanten in der Regel eine nicht perfekt senkrechte, in mehrere Bereiche unterteilte Schnittflächengeometrie auf. Auch eine Schädigung des Werkstoffgefüges im Kantenbereich sowie ein reduziertes Formänderungsvermögen durch die beim Trennprozess in den Werkstoff eingebrachte Umformung sind mögliche Folgen. Letztere äußert sich durch eine im Vergleich zur Werkstoffgrundhärte erhöhte Aufhärtung des Bleches nahe der Schnittkante.

Bei der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen ergeben sich im Vergleich zu Stahl weitere Herausforderungen, die bei der Planung des Fertigungsprozesses berücksichtigt werden müssen. So erfordert die große Adhäsionsneigung der Werkstoffpaarung Aluminium – Stahl, die zu einer Bildung von Kaltaufschweißungen an den Werkzeugaktivelementen führen kann, oftmals spezielle Gegenmaßnahmen. Eine übliche Maßnahme ist beispielsweise die Verwendung von Werkzeugbeschichtungen. Auch durch eine Modifizierung der Schneidkantengeometrie kann die Flitterbildung reduziert werden, die einen unerwünschten Effekt beim Beschneiden von Aluminiumblech darstellt (Volk und Krinninger, 2018).

Untersuchungen haben gezeigt, dass die durch das Scherschneiden bedingten Kanteneigenschaften sowohl die Kantenrissempfindlichkeit bei der Blechumformung als auch die Bauteillebensdauer unter zyklischer Beanspruchung signifikant beeinflussen (Feistle, Golle und Volk, 2015), (Dittmann und Pätzold, 2018). Somit ist eine simultane Betrachtung des Einflusses der Schneidstrategie auf die kantenrissfreie Herstellbarkeit sowie auf die Betriebsfestigkeit des Bauteils sinnvoll und notwendig, um eine hinreichende Teilequalität sicherzustellen.

Im Rahmen dieses Projektes erfolgen Analysen zur Umformbarkeit und zur Betriebsfestigkeit definiert hergestellter Blechkanten aus Aluminium. Dabei wird vorrangig der Einfluss verschiedener Scherschneidstrategien ermittelt, wobei insbesondere aluminiumspezifische Strategien wie beschichtete Aktivelemente, modifizierte Schneidkantengeometrien oder der ungünstige Fall von kaltaufgeschweißten Aktivelementen Berücksichtigung finden. Des Weiteren werden neben schergeschnittenen Kanten auch gefräste und polierte Referenzkanten mit minimaler Schädigung sowie laserstrahlgesehntene Kanten untersucht, welche häufig bei Prototypenbauteilen anzutreffen sind.

2 Stand der Technik

2.1 Laserschneiden

Das Laserstrahlschneiden wird in Blatt 8 der VDI-Richtlinie 2906 beschrieben. Das Verfahrensprinzip beruht darauf, dass der fokussierte Laserstrahl den Spaltwerkstoff erwärmt und somit zu dessen Umwandlung in die flüssige oder dampfförmige Phase beiträgt. Der koaxial zum Laserstrahl geführte Schneidgasstrahl entfernt durch Impulsübertragung den Spaltwerkstoff, indem die Schmelze ausgeblasen wird. (VDI 2906-8)

Es gibt unterschiedliche Laserstrahlschneidverfahren. Für die Herstellung der laserstrahlgeschnittenen Proben wird im Rahmen dieses Projektes das Laserstrahlschmelzschnneiden eingesetzt, bei dem die erforderliche Prozessenergie allein von der Laserstrahlung zugeführt wird und der Schneidgasstrahl den aufgeschmolzenen Werkstoff austreibt (VDI 2906-8). Zur Vermeidung von Oxidation an den Schnittkanten während des Schneidprozesses wird ein Inertgas als Schneidgas verwendet, wobei im vorliegenden Fall Stickstoff dient.

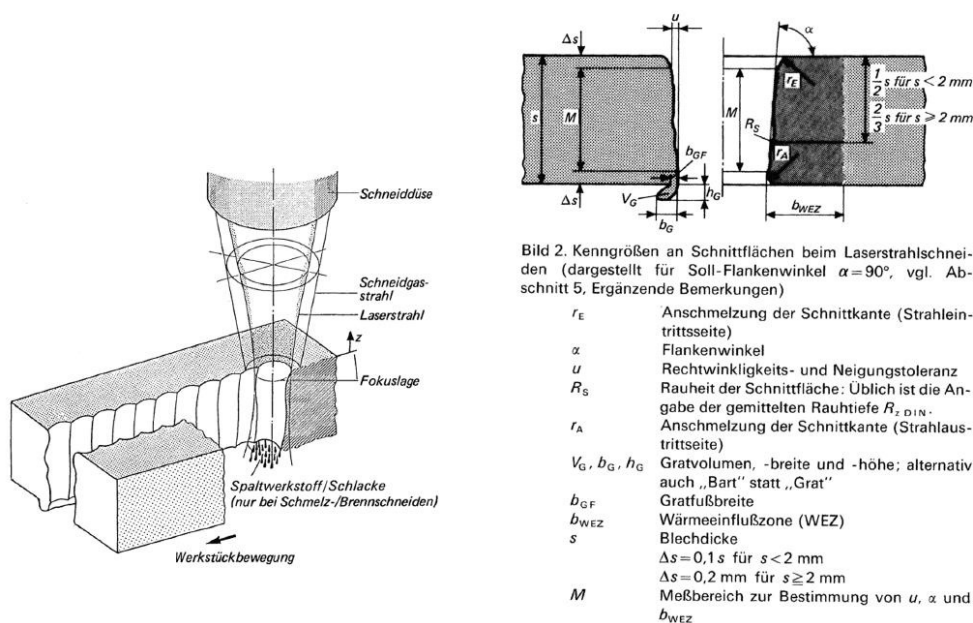


Bild 2. Kenngrößen an Schnittflächen beim Laserstrahlschneiden (dargestellt für Soll-Flankenwinkel $\alpha=90^\circ$, vgl. Abschnitt 5, Ergänzende Bemerkungen)

r_E	Anschmelzung der Schnittkante (Strahltrittsseite)
α	Flankenwinkel
u	Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz
R_S	Rauheit der Schnittfläche: Üblich ist die Angabe der gemittelten Rauhtiefe R_z DIN.
r_A	Anschmelzung der Schnittkante (Strahlaustrittsseite)
V_G, b_G, h_G	Gratvolumen, -breite und -höhe; alternativ auch „Bart“ statt „Grat“
b_{GF}	Gratfußbreite
b_{WEZ}	Wärmeinflusszone (WEZ)
s	Blechdicke
	$\Delta s = 0,1 s$ für $s < 2$ mm
	$\Delta s = 0,2$ mm für $s \geq 2$ mm
M	Meßbereich zur Bestimmung von u, α und b_{WEZ}

Die Darstellung ist nicht maßstabsgerecht und gilt für Innen- und Außenkonturen.

Abbildung 2-1: Links: Prinzip des Laserstrahlschneidens, Rechts: Kenngrößen an Schnittflächen beim Laserstrahlschneiden, nach (VDI 2906-8)

Abbildung 2-1 zeigt schematisch das Prinzip des Laserstrahlschneidens und die Kenngrößen der laserstrahlgeschnittenen Kante. Charakteristisch für das Laserstrahlschneiden ist die durch die linke Seite der Abbildung angedeutete Riefenstruktur der Schneidkante. In Verbindung mit dieser steht die Rauheit der Kantenoberfläche. Weitere wichtige Kantenmerkmale sind der Grat,

welcher auf der Laseraustrittsseite entstehen kann, sowie die Wärmeeinflusszone. Je nach Werkstoff und dessen chemischer Zusammensetzung kann es in der Randzone der Kante zu einer (Gefüge-)Veränderung kommen, welche beispielsweise zu einer Aufhärtung führen kann.

Bei Stahlwerkstoffen mit ausreichend hohem Kohlenstoffgehalt entsteht in der Randschicht ein martensitisches Gefüge, welches eine höhere Härte besitzt als beispielsweise ein dual-phasiges Grundgefüge (Dittmann und Pätzold, 2018). Wie Abbildung 2-2 zeigt, kann auch bei Aluminiumlegierungen in Kantennähe eine Gefügeveränderung infolge des Laserstrahlschneidens auftreten. Im dargestellten Fall, der Laserschneidkante der Legierung EN AW-6082 aus diesem Projekt, ist die Randzone dabei mit $< 20 \mu\text{m}$ jedoch vergleichsweise dünn. Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnte für die laserstrahlgeschnittenen Kanten der Legierungen EN AW-6082 und EN AW-5182 keine signifikante Aufhärtung festgestellt werden. Mit Blick auf Abbildung 2-2, könnte dies jedoch auch an der dünnen Randschicht liegen. Deren Breite ist deutlich geringer als der erforderliche Randabstand bei der normgerechten Durchführung einer Mikrohärteprüfung. Die Härteeindrücke befinden sich also nicht in der Randschicht.

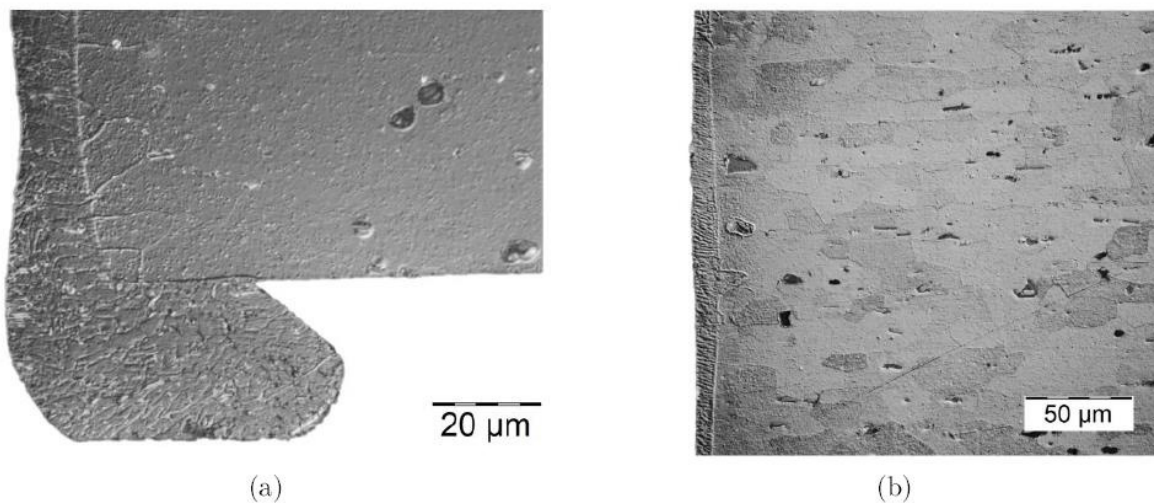


Abbildung 2-2: a) Randzone und Gratbereich einer laserstrahlgeschnittenen Probe, geätzt mit NaOH 10%ig; b) Randzone und Gefüge einer laserstrahlgeschnittenen Probe, Farbätzen nach Weck; EN AW-6082

In der Literatur finden sich dagegen Beispiele dafür, dass eine Laserbehandlung durchaus zu einer Aufhärtung von Aluminiumknetlegierungen führen kann. Sei es infolge des Laserstrahlschneidens, oder aber durch den gezielten Einsatz von laser shock peening zur Steigerung der Festigkeit oder der Verschleißbeständigkeit. (Bachhofer, 2000), (Rubio-González, Ocana, et al., 2004), (Borowski, Bartkowiak, 2010), (Sánchez-Santana, Rubio-González, et al., 2006).

2.2 Scherschneiden

2.2.1 Verfahrenseinteilung

Das Fertigungsverfahren Scherschneiden ist nach DIN 8580 der 3. Hauptgruppe (Trennen) zuzuordnen. Trennen beschreibt das Fertigen durch Ändern der Form eines festen Körpers, wobei der Zusammenhalt örtlich vollständig aufgelöst wird (Doege und Behrens, 2010). Innerhalb dieser Hauptgruppe wird es zum Zerteilen (Gruppe 3.1) gezählt und bildet die Untergruppe 3.1.1 (DIN 8588). Dabei ist Scherschneiden als das Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen, definiert.

Weiter lässt sich das Scherschneiden in zwei Arten einteilen: Dem Verfahren mit offener beziehungsweise mit geschlossener Schnittlinie. Beim ersten kreuzt die Schnittkontur die Werkstückberandung, beim zweiten nicht (Lange, 1990).

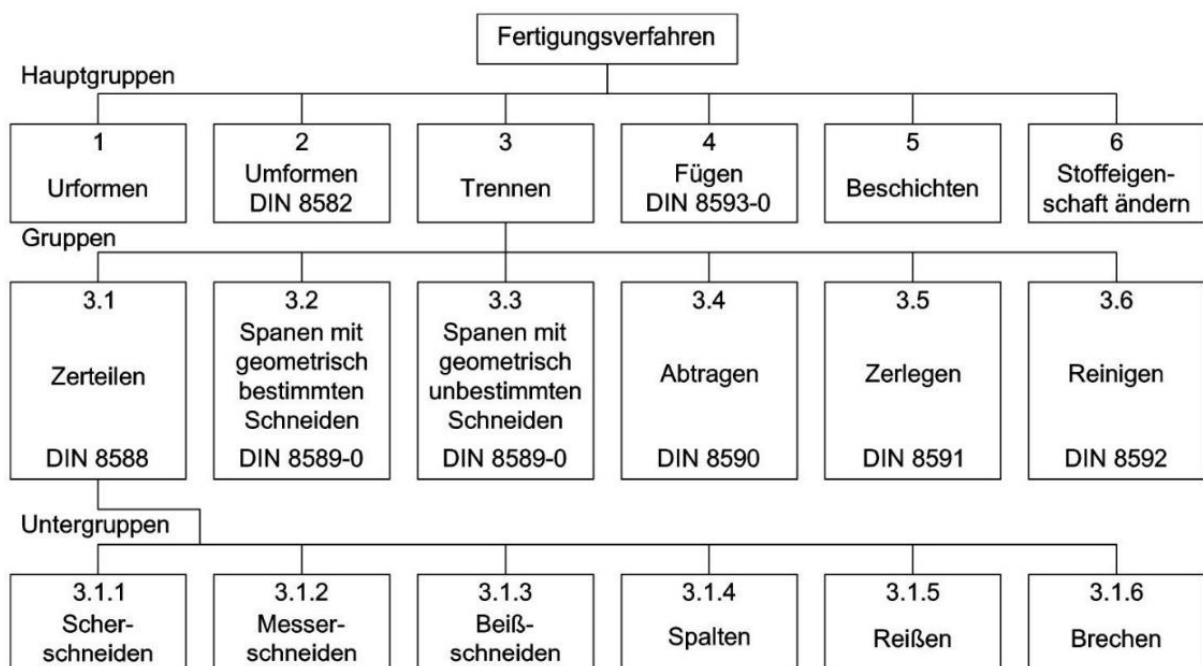


Abbildung 2-3: Einordnung des Scherschneidens nach DIN 8588

Neben dem Scherschneiden existieren noch weitere Methoden zum mechanischen Zerteilen von Material, wie beispielsweise Messerschneiden, Beißschneiden oder Reißen. Jedoch ist von allen zerteilenden Verfahren in der metallverarbeitenden Industrie das Scherschneiden die am weitesten verbreitete Blechbearbeitung (Fritz und Schulze, 2012). Typische Einsatzgebiete für schergeschnittene Teile finden sich in der Automobilindustrie (z.B. Karosseriebleche), Elektroindustrie (z.B. Stator- und Rotorbleche) oder in der Hausgeräteindustrie (z.B. Gehäuse von Haushaltsgeräten). (König und Klocke, 1995)

2.2.2 Begriffserklärung und Verfahrensprinzip

Die für den Scherschneidvorgang wichtigsten Elemente Stempel, Matrize und Niederhalter sind in Abbildung 2-4 dargestellt. Dabei erfolgt die Blechtrennung durch eine gegenseitige Relativbewegung von Stempel und Matrize. Bei den folgenden Ausführungen wird die Matrize als statisch betrachtet, während der Stempel bewegt wird. In der Regel wird zusätzlich ein Niederhalter verwendet, um ein Abheben des Bleches während des Scherschneidvorgangs zu verhindern. Ein wesentlicher Parameter beim Scherschneiden ist der verwendete Schneidspalt. Dieser beschreibt den umlaufend gleichmäßigen Abstand zwischen den beiden Schneidkanten von Stempel und Matrize senkrecht zur Schneidebene gemessen und wird oftmals als relativer Schneidspalt, bezogen auf die Blechdicke, angegeben. Dazu erhält er das Formelzeichen u_{rel} . Die Schneidebene ist im hier betrachteten Fall die Fläche, in der sich die Schneide während des Schneidvorgangs bewegt (DIN 8588).

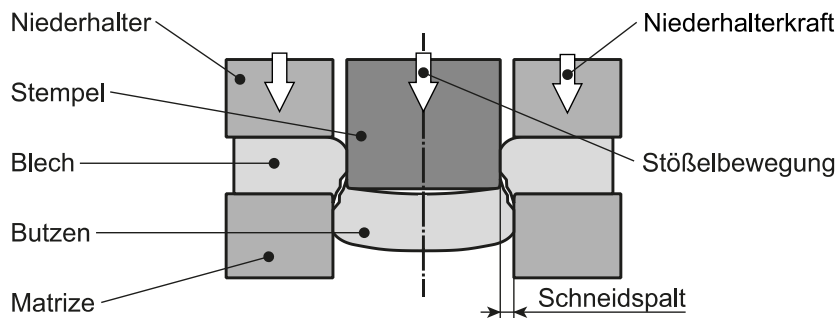


Abbildung 2-4: Verfahrensprinzip des Scherschneidens mit geschlossener Schnittlinie nach Hoffmann, Neugebauer und Spur (2012)

Im Folgenden wird der Schneidprozess am Beispiel des vollkantig-drückenden Scherschneidens mit geschlossener Schnittlinie erläutert. Dabei kann der Prozess in fünf charakteristische Phasen unterteilt werden (Hoffmann, Neugebauer und Spur, 2012). Diese sind in Abbildung 2-5 dargestellt.

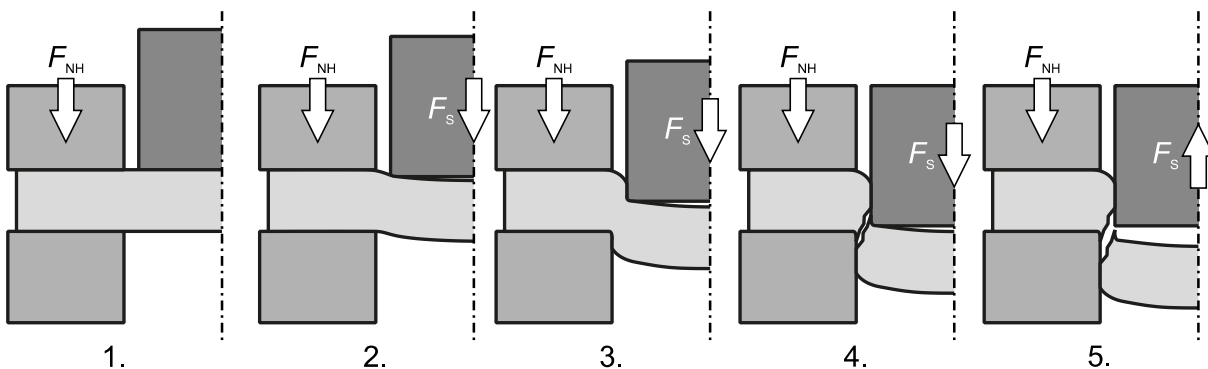


Abbildung 2-5: Phasen des Scherschneidvorgangs nach Hoffmann, Neugebauer und Spur (2012)

1. Nach dem Aufsetzen des Niederhalters auf das Blech wird dieses mit der konstanten Niederhalterkraft F_{NH} fixiert. Anschließend erfolgt eine Stempelbewegung in Richtung Blech bis ein Kontakt zwischen Stempel und Blech besteht.
2. Der Stempel verformt den Werkstoff zunächst elastisch, wobei ein Biegemoment erzeugt wird. Dieses führt im Bereich, in dem der Niederhalter nicht entgegenwirkt, zu einer Durchbiegung des Bleches. Zudem treten auch im Werkzeug und im Pressegestell elastische Verformungen aufgrund der Prozesskräfte auf.
3. Sobald das elastische Verformungsvermögen des Werkstoffes ausgeschöpft ist, beginnt dieser zu fließen. Hierbei resultiert der Scherspannungszustand in einer plastischen Verformung. Zudem bildet sich in dieser Phase sowohl am Stanzgitter als auch am Butzen der Kanteneinzug und Glattschnitt an der Schnittfläche aus. Zum Ende dieser Phase kann die maximale Schneidkraft gemessen werden.
4. Wenn die maximale Schubspannung im Scherbereich zwischen Stempel und Matrize die Schubbruchgrenze übersteigt, kommt es zur Rissbildung im Blech. Die Risse breiten sich, abhängig von den gewählten Prozessparametern, von Stempel- oder Matrize aus und wachsen ins Innere des Werkstoffs. Sobald sich die Anrisse vereinigen führt dies zum Abtrennen des Schnittteils.
5. Nach der Werkstofftrennung wird die im System gespeicherte elastische Energie abrupt frei, wodurch Schwingungen angeregt werden. Dieses Phänomen wird auch als Schnittschlag bezeichnet. Wenn der untere Totpunkt durchlaufen ist, erfolgt der Stempelrückzug. Durch die elastische Rückfederung des Stanzgitters kann eine Presspassung zwischen Stempel und Stanzgitter entstehen, was eine Rückzugkraft des Stempels zur Folge hat. Die Höhe dieser Kraft ist abhängig von den Schneidparametern.

2.2.3 Kräfte und Momente beim Scherschneiden

Die beim Scherschneiden wirkenden Kräfte können in einen horizontalen und einen vertikalen Anteil unterteilt werden. Sämtliche in der Schneidebene wirkenden Kraftkomponenten sind in Abbildung 2-6 dargestellt.

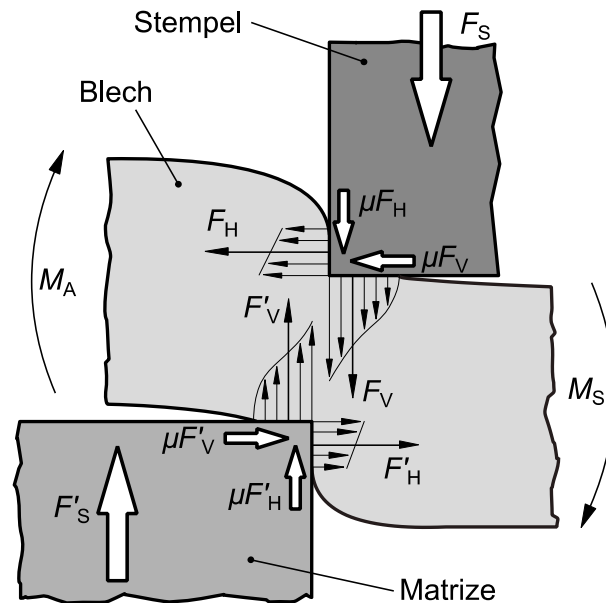


Abbildung 2-6: Kräfte und Momente beim Scherschneiden nach Lange (1990) und Romanowski (1959)

Die vertikale Komponente wird in der Regel vereinfacht als Schneidkraft bezeichnet. Sie ist nach (Klocke und König, 2006) von der Blechdicke, der Länge der Schnittlinie, der Scherfestigkeit des Blechwerkstoffs, dem Schneidspalt, der Geometrie der Schnittlinie, dem Verschleißzustand der Aktivelemente und dem verwendeten Schmierstoff abhängig.

Der Verlauf der vertikalen Kraftkomponente beim Scherschneiden (Schneidkraft) kann aus Abbildung 2-7 entnommen werden. Auch hier kann eine Unterteilung der Kraft-Zeit-Kurve entsprechend der fünf charakteristischen Phasen vorgenommen werden.

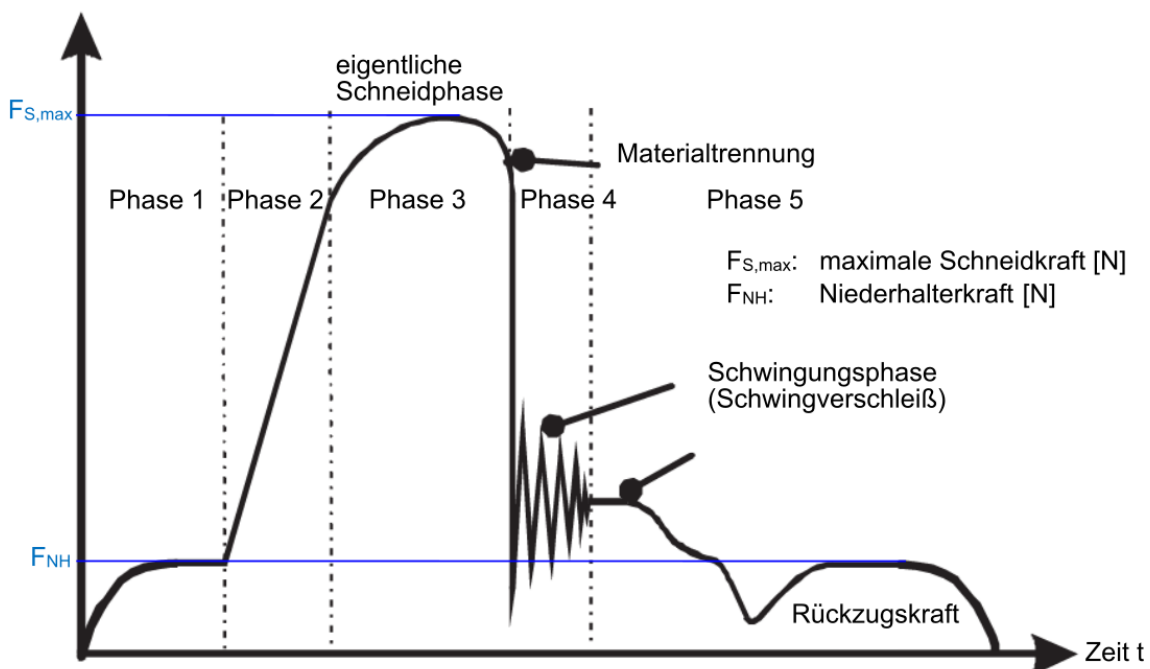


Abbildung 2-7: Kraft-Zeit-Verlauf beim Scherschneiden nach Doege und Behrens (2010)

2.2.4 Schnittflächenkenngrößen

Jede durch Scherschneiden erzeugte Bauteilkante weist eine charakteristische Schnittfläche auf. Nach der VDI-Richtlinie 2906-1 bis -5 kann diese in unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden. Dabei wird zwischen den vier Bereichen Kanteneinzug, Glattschnittzone, Bruchzone und Grat unterschieden. Die geometrischen Kenngrößen der Schnittfläche sind in Abbildung 2-8 dargestellt.

Neben der Ausbildung der Schnittflächengeometrie führt der Schneidprozess auch zu einer Härtesteigerung im Bereich der Scherzone, was auf die Kaltverfestigung während des Schervorgangs zurückgeführt werden kann. Folglich weisen schergeschnittene Bauteilkanten einen verfestigten Randbereich auf. (Hörmann, 2008)

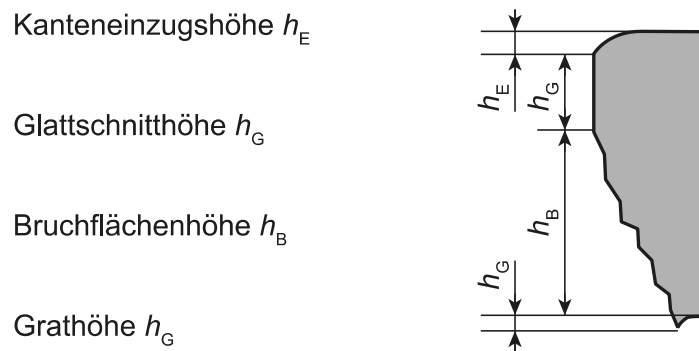


Abbildung 2-8: Schnittflächenausprägung nach VDI 2906-1

2.3 Nachschneiden

2.3.1 Verfahreenseinteilung

Das Nachschneiden – auch als zweistufiges Scherschneiden bezeichnet – wird gemäß DIN 8588 der Hauptgruppe Trennen und der Gruppe Zerteilen als spezielles Fertigungsverfahren aus dem Bereich der Schneidverfahren zugeordnet. Das Nachschneiden wird hier als „Beschneiden schmaler Ränder von vorgearbeiteten Flächen zum Herstellen sauberer und maßhaltiger Außen- und Innenformen“ definiert (DIN 8588). Weiter konkretisiert wird das Verfahren durch die VDI-Richtlinie 2906-3. Diese beschreibt, dass das Nachschneiden zum Ziel hat „maßhaltige Außen- und Innenformen mit glatten, möglichst einriss- und abrissfreien Schnittflächen mit verbessertem Traganteil zu erzeugen“.

Beim Nachschneiden kann unterschieden werden, ob der Stempel ausschließlich eine geradlinige Hubbewegung ausführt oder ob diese noch mit einer zusätzlichen Schwingbewegung überlagert wird. Zudem differenziert man hinsichtlich der Bearbeitungsrichtung zum vorausgegangenen Vorschneiden, zwischen dem sogenannten gleich- bzw. gegenläufigen Nachschneiden. (Hoffmann, Neugebauer und Spur, 2012)

2.3.2 Verfahrensprinzip

Im Allgemeinen ähnelt das Nachschneiden dem Normalschneiden in weiten Teilen, da auch für das Nachschneiden Schneidstempel, Matrize und gegebenenfalls ein Niederhalter benötigt werden. Das Nachschneiden besteht zumeist aus zwei Schneidoperationen. Zunächst wird die Sollgeometrie mit einem Aufmaß, der sogenannten Nachschneidzugabe z , durch einen Normalschneidprozess geschnitten. In der weiteren Prozessfolge wird diese Nachschneidzugabe z im zweiten Schneidprozess – dem Nachschneiden – abgeschabt und so die gewünschte Endgeometrie gefertigt. (Gläsner und Hoffmann, 2018), (Hoffmann, Neugebauer und Spur, 2012)

Die Prozesse beim Nachschneiden lassen sich dabei in dieselben Phasen wie beim Normalschneiden einteilen (vgl. Kapitel 2.2.2). (Gläsner et al., 2015a)

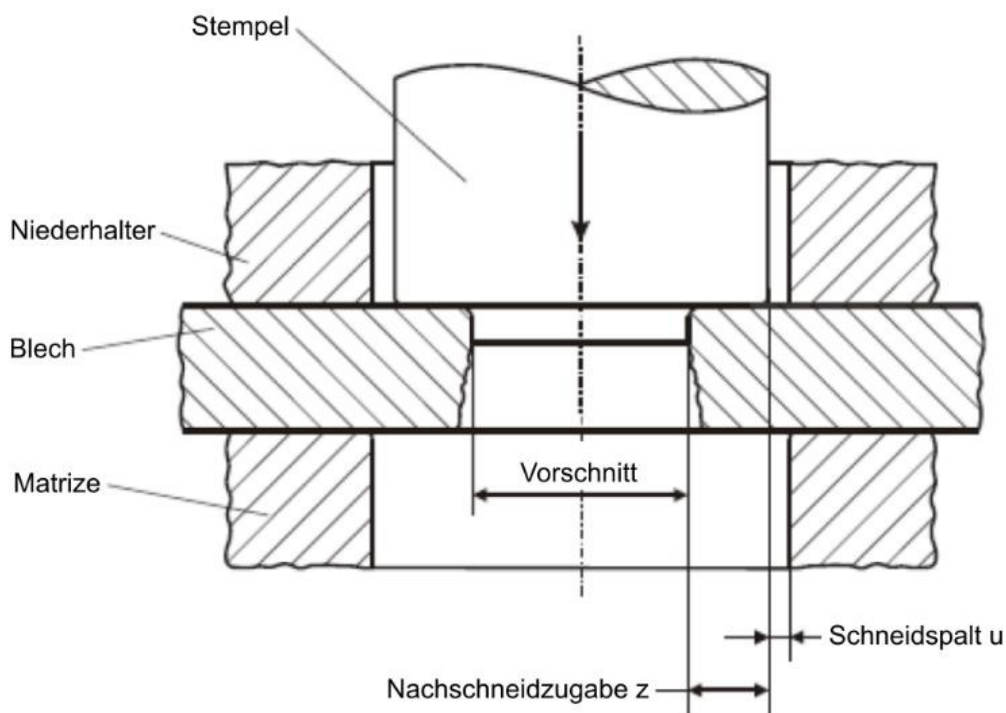


Abbildung 2-9: Verfahrensprinzip des Nachschneidens nach Gläsner et al. (2015a)

2.3.3 Prozessziele und Prozessparameter

In der Literatur wird häufig als Motivation für den Einsatz des Nachschneidens eine verbesserte Form-, Maß-, Lage- und Oberflächengüte genannt. So ist es möglich durch das Nachschneiden Schnittflächen mit einem hohen Glattschnittanteil – respektive geringem Bruchflächenanteil – und einem Bruchflächenwinkel β von nahezu 90° zu erreichen, um diese als Funktionsfläche ohne zusätzliche Bearbeitung einsetzen zu können. (Guidi, 1965)

Weitere Untersuchungen zeigen, dass neben den Schnittflächen auch die Kantenrissensitivität verbessert werden kann. So konnte nachgewiesen werden, dass durch die Anwendung des zweistufigen Scherschneidens bei Stahlwerkstoffen die Werkstoffschädigung im Bereich der Schnittkanten deutlich reduziert und dadurch das Aufweitungsverhältnis λ der Blechwerkstoffe im Lochaufweitungsversuch um bis zu 100 % erhöht werden kann. (Gläsner et al., 2013)

Die erreichbaren Schnittflächen hängen von zahlreichen Parametern wie dem Blechwerkstoff, der geometrischen Form des Schnittteils, dem Schneidspalt u (beim Nachschneiden), der Vorschneidrichtung, der Nachschneidzugabe z , dem Spanwinkel φ_{span} und dem potentiellen Einsatz einer Schwingungsüberlagerung ab. (Hoffmann, Neugebauer und Spur, 2012)

Unter all diesen Parametern nehmen der Schneidspalt u (analog definiert zum Normalschneiden) und die Nachschneidzugabe z eine hervorgehobene Stellung ein (Gläsner et al., 2015a).

2.4 Kantenrisse

2.4.1 Definition und Folgen

Eine Möglichkeit das Formänderungsvermögen eines Blechwerkstoffs zu bewerten, stellt die Grenzformänderungskurve (Forming Limit Curve, FLC) im Grenzformänderungsschaubild dar. Dabei werden die Hauptformänderungen φ_1 eines Bauteils über den dazugehörigen Nebenformänderungen φ_2 aufgetragen. Allerdings zeigen vorangegangene Untersuchungen, dass schergeschnittene Bauteilkanten meist unterhalb der FLC bei niedrigeren Hauptformänderungen durch Kantenrisse versagen, da das lokale Formänderungsvermögen des Werkstoffs bereits durch das Scherschneiden vermindert wurde. Die Grenzformänderungskurve ist somit nur für unversehrte Materialien gültig und kann bei der Bewertung schergeschnittener Bauteile nur bedingt verwendet werden. (Gläsner et al., 2015a)

Wenn umgeformte Bauteile Kantenrisse aufweisen, stellen diese in der Regel Ausschuss dar. Auch wenn durch Nacharbeit eine weitere Verwendbarkeit erreicht werden kann, ist dies mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden und senkt die Wirtschaftlichkeit der Fertigungsprozesskette. Somit muss bereits bei der Konstruktion des Bauteils sowie der dafür erforderlichen Scherschneid- und Umformwerkzeuge das reduzierte Formänderungsvermögen an den schergeschnittenen Bauteilkanten berücksichtigt werden. Ein neues Werkzeug, welches kantenriss-behaftete Bauteile produziert, führt zu einem erhöhten Werkzeugeinarbeitsaufwand oder gar zur Notwendigkeit einer Umkonstruktion von Bauteil und Werkzeug. Neben den dadurch verursachten Kosten sind solche Prozesse oftmals zeitintensiv und gefährden den geplanten Serienstart.

Zudem besteht das Risiko, dass instabile Prozesse Bauteile mit unentdeckten Kantenrissen zur Folge haben. Dadurch kann die Bauteilfestigkeit von der bei der Bauteilauslegung ermittelten Festigkeit abweichen und zu einem vorzeitigen Versagen im späteren Lebenszyklus führen. Auch im Crashfall können unentdeckte Kantenrisse bei Strukturbauteilen ein unkalkulierbares Sicherheitsrisiko darstellen.

2.4.2 Prüfverfahren zur Charakterisierung der Kantenrissempfindlichkeit

Zur Bestimmung der Kantenrissempfindlichkeit von schergeschnittenen Bauteilkanten wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen experimentellen Verfahren entwickelt. Diese lassen sich anhand des Reibungszustandes (reibungsbefahet oder reibungsfrei), der Versuchsrichtung (in der Blechebene, aus der Blechebene heraus) oder anhand des Detektierverfahrens (z.B. optisch ohne Kameraunterstützung, optisch mit Kameraunterstützung, Kraftsignal) einteilen.

Aufgrund der großen Anzahl an verschiedenen Prüfverfahren soll im Folgenden nur eine Auswahl der relevantesten Verfahren vorgestellt werden.

Lochaufweitungsversuch

Der Lochaufweitungsversuch (Hole Expansion Test, HET) nach ISO 16630 stellt derzeit das einzige genormte Prüfverfahren dar, um die Kantenrissempfindlichkeit von schergeschnittenen Probenkanten zu bestimmen. Er ist reibungsbefahet, die Versuchsrichtung ist aus der Blechebene heraus und die Rissdetektion erfolgt optisch ohne Kameraunterstützung. Der Versuch gliedert sich im Wesentlichen in zwei Schritte. Zunächst wird ein Loch mit einem Durchmesser von 10 mm durch Scherschneiden die Probenplatte eingebracht, wobei ein relativer Schneidspalt von $u_{rel} = 12\%$ gewählt wird. Anschließend wird die Lochung durch einen konischen Stempel (Kopfkegelwinkel 60°) aufgeweitet. Der Grat befindet sich hierbei an der vom Stempel abgewandten Seite und die Stempelgeschwindigkeit ist auf 1,0 mm/s festgelegt. Der Aufweitungsprozess wird vom Bediener gestoppt, sobald dieser Risse ausgehend von der Schnittkante detektiert. (Gläsner et al., 2015a), (Gläsner et al., 2015b), (Feistle et al., 2017)

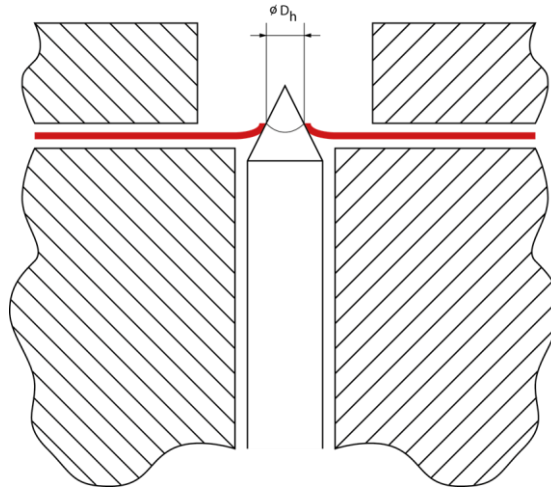


Abbildung 2-10: Verfahrensprinzip des Lochaufweitungsversuchs (ZwickRoell, 2020a)

Die Ergebnisgröße dieses Tests stellt das erzielbare Lochaufweitungsverhältnis λ dar:

$$\lambda = \frac{D_h - D_0}{D_0} \times 100 \%$$

- λ Lochaufweitungsverhältnis [%]
- D_h Lochdurchmesser bei Rissbeginn [mm]
- D_0 Lochdurchmesser vor Versuchsdurchführung [mm]

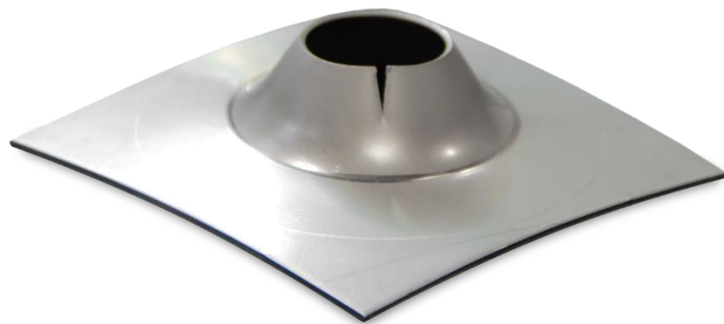


Abbildung 2-11: Rissausbildung nach Lochaufweitungsversuch (ZwickRoell, 2020a)

Die Ergebnisse des Lochaufweitungsversuchs nach ISO 16630 weisen in der Regel eine hohe Streuung auf. Gründe hierfür sind einerseits die oftmals schwierige Reproduzierbarkeit der entstehenden Schnittflächen beim Lochen mit unterschiedlichen Werkzeugen, andererseits das auf subjektiver Einschätzung basierende Stoppen der Messung. (Gläsner et al., 2015a) Um den Einfluss des Bedieners zu eliminieren, wurde das Prüfverfahren zum Beispiel mit dem Nakajima-Test mit Loch weiterentwickelt.

Nakajima-Test mit Loch

Der Nakajima-Test mit Loch gleicht in weiten Teilen dem Lochaufweitungsversuch nach ISO 16630. Dabei wird der konische Stempel zur Lochaufweitung jedoch durch einen hemisphärischen Nakajima Stempel mit einem Stempeldurchmesser von 100 mm ersetzt.

In die Platine wird zunächst zentrisch ein Loch mit einem Durchmesser von 20 mm geschnitten (Schneidspalt $u_{rel} = 12\%$). Anschließend wird die Probe im Versuchsaufbau so eingespannt, dass das Loch mittig über dem Zenit des Stempels ausgerichtet ist, wobei sich der Grat ebenfalls auf der vom Stempel abgewandten Seite befindet. Die Stempelgeschwindigkeit während des Testvorgangs beträgt $\leq 1,0$ mm/s und der Versuch wird vom Bediener gestoppt, sobald ein Anriss an der Kante erkennbar ist. Dabei tritt der Riss im Gegensatz zum HET oftmals plötzlich auf. Abschließend kann das Lochaufweitungsverhältnis λ analog zur Vorgehensweise beim Lochaufweitungsversuch bestimmt werden. (Gläsner et al., 2015b)

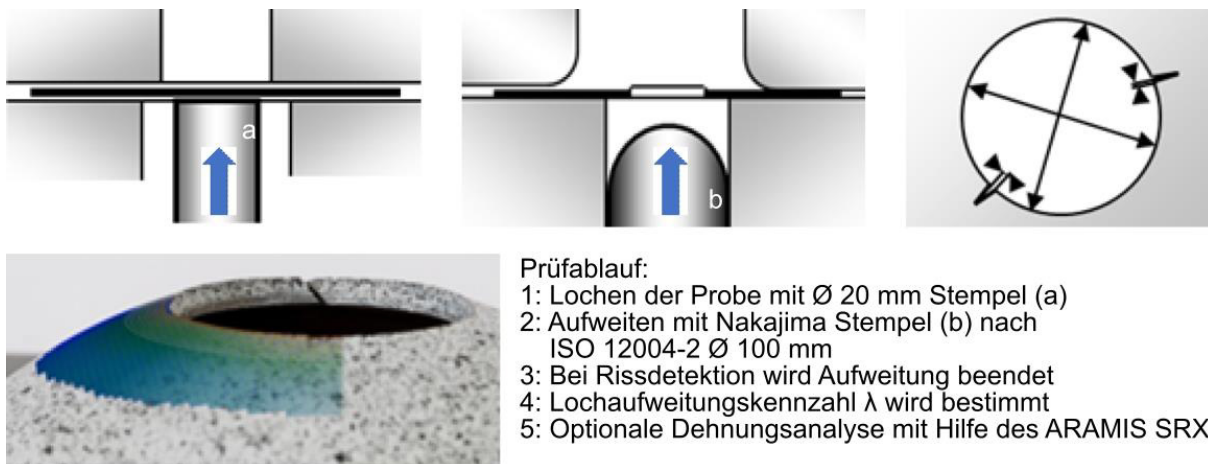


Abbildung 2-12: Nakajima-Test mit Loch nach Gläsner et al. (2015b)

Ein bedeutender Vorteil dieses Versuchs liegt darin, dass der Umformvorgang mit Hilfe eines kamerabasierten optischen Messsystems aufgenommen werden kann. Anschließend kann eine Analyse der lokalen Dehnungen im Bereich der schergeschnittenen Kante über die Dauer des Aufweiteversuchs hinweg durchgeführt werden. Auch eine objektivierte Ermittlung des Lochaufweitungsverhältnisses ist durch die Definition eines Risskriteriums möglich. (Gläsner et al., 2015b)

Edge-Fracture-Tensile-Test

Der *Edge-Fracture-Tensile-Test* (EFTT; auch als Kantenrisszugversuch bezeichnet) wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU München zur Charakterisierung der Kantenrissempfindlichkeit entwickelt (Feistle, Golle und Volk, 2015), (Feistle et al., 2016). Dabei wird eine Zugprobe unter einer einachsigen Zugbeanspruchung analog zum Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 bis zum Versagen gedehnt. Im Gegensatz zu den zuvor genannten

Verfahren zeichnet sich diese Testmethode durch ihre Reibungsfreiheit aus, was zu einer geringen Streuung der Versuchsergebnisse und einer hohen Wiederholgenauigkeit beiträgt (Feistle et al., 2016).

Die Kantenrisszugproben sind durch ihre symmetrische Form mit einem 60 mm langen und 10 mm breiten parallelen Prüfbereich charakterisiert (siehe Abbildung 2-13). Hierbei wird eine Probenkante mit einem schädigungsarmen Trennprozess wie beispielsweise Fräsen, der keine Kantenrissempfindlichkeit hervorruft, hergestellt, während die gegenüberliegende Probenkante schergeschnitten wird. Mit Hilfe eines modular aufgebauten Werkzeuges ist es dabei möglich, die zu untersuchende Schneidstrategie mit Schneidparametern wie Schneidspalt oder Schneidkantenradius individuell einzustellen (vgl. auch Kapitel 6.1). Auch eine Untersuchung sowohl von geschlossenen als auch offenen Schnittlinien ist durch eine Anpassung der Ausgangsgeometrie der Platine möglich. Die Vorgehensweise hierzu ist in Abbildung 2-13 auf der linken Seite für eine geschlossene und auf der rechten Seite für eine offene Schnittlinie dargestellt. Neben den halbseitig schergeschnittenen Kantenrisszugproben werden auch noch beidseitig gefräste Referenzproben gefertigt.

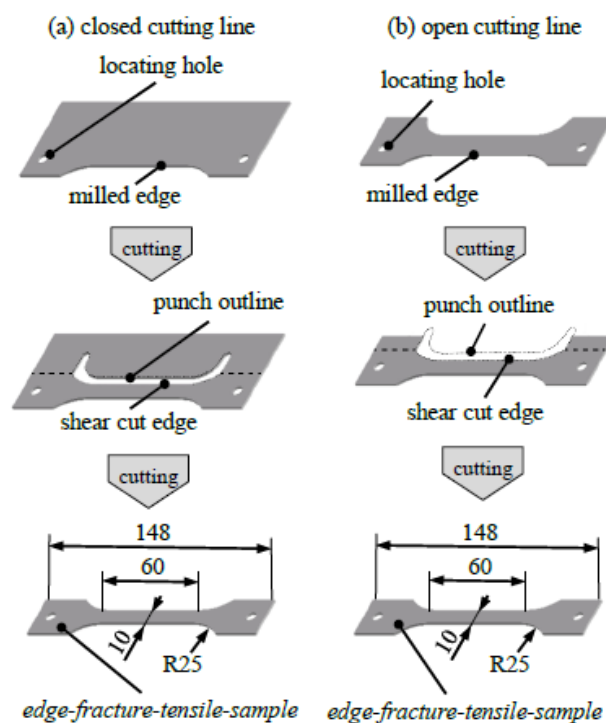


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Probengeometrie (Feistle et al., 2016)

Beim Zugversuch ist ein Versagen der Proben entweder durch einen duktilen Verformungsbruch aus der Probenmitte oder aufgrund eines Kantenrisses an der schergeschnittenen Kante möglich. Zur Unterscheidung dieser Fälle und zur Ermittlung der Dehnungsverteilung kommt das optische Messsystem ARAMIS SRX der Firma GOM GmbH, Braunschweig, zum Einsatz.

Mit Hilfe dieses Systems kann die logarithmische Hauptformänderung φ_1 sowohl bei Probenbruch als auch bei Beginn der lokalen Einschnürung ermittelt werden. Zur Bestimmung der letzteren wird die zeitliche Auswertemethode nach Volk und Hora (2011) herangezogen (siehe Kapitel 8.1).

Ein Vergleich der erzielbaren logarithmischen Hauptformänderung der halbseitig schergeschnittenen Probe mit der logarithmischen Hauptformänderung der beidseitig gefrästen Referenzprobe liefert den Kantenrissempfindlichkeitsfaktor K_{ec} . Dieser wird anhand folgender Gleichung ermittelt:

$$K_{ec} = \frac{\varphi_{1,Probe}}{\varphi_{1,Ref}}$$

K_{ec} Kantenrissempfindlichkeitsfaktor [-]

$\varphi_{1,Probe}$ Logarithmische Hauptformänderung bei Beginn lokaler Einschnürung der halbseitig schergeschnittenen Kantenrisszugprobe [-]

$\varphi_{1,Ref}$ Logarithmische Hauptformänderung bei Beginn lokaler Einschnürung der beidseitig gefrästen Referenzprobe [-]

Die Kantenrissempfindlichkeit bei Stählen kann anhand empirisch ermittelter Grenzwerte des Kantenrissempfindlichkeitsfaktors eingeteilt werden:

$0,9 < K_{ec} \leq 1,0$	kantenrissunempfindlich
$0,8 < K_{ec} \leq 0,9$	kantenrissgefährdet
$K_{ec} \leq 0,8$	kantenrissempfindlich

Diese Grenzwerte wurden am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen durch Vergleiche des berechneten Kantenrissempfindlichkeitsfaktors mit der Versagensart der Probe bei einer Vielzahl von untersuchten Stahllegierungen empirisch festgelegt. Die Versagensart bzw. der Ausgangsort des Versagens – Probenkante oder Probenmitte – wurde dabei anhand der mit dem ARAMIS-System bestimmten Dehnungsverteilung ermittelt.

2.5 Betriebsfestigkeit

In diesem Abschnitt sollen relevante Inhalte aus dem Stand der Technik zum Betriebsfestigkeitsverhalten vorgestellt werden, die für dieses Forschungsprojekt als relevant betrachtet werden. Neben dem Kanteneinfluss, dem Kerbeinfluss und dem Einfluss von Mittelspannungen, wird auch auf den Einfluss einer Beanspruchung mit variabler Amplitude und die Schadenssumme eingegangen.

2.5.1 Kanteneinfluss

Der Kanteneinfluss ist geprägt durch eine fertigungsbedingte Beeinflussung der Oberflächentopographie, des Verfestigungszustands, des Eigenspannungszustands und der Mikrostruktur (Liu, 2001), (Meurling, Melander, et al., 2001).

Der Einfluss der Oberflächenrauheit wird oft als die Wirkung von Mikrokerben interpretiert, welche mit Spannungsüberhöhungen und ausgeprägten plastischen Dehnungskonzentrationen einhergehen (Radaj und Vormwald, 2007). Hieraus resultiert eine negative, die Lebensdauer herabsetzende Wirkung. Der Rauheitseinfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten wird häufig in Abhängigkeit von der gemittelten Rautiefe als Faktor beschrieben und auf Seite der Beanspruchbarkeit (Wöhlerlinie) berücksichtigt. Beispiele hierfür finden sich in den FKM-Richtlinien. Dabei nimmt die Empfindlichkeit gegenüber Rauheit mit steigender Werkstofffestigkeit bzw. mit der damit in der Regel einhergehenden Abnahme der Duktilität zu.

In der Praxis tritt der Rauheitseinfluss in aller Regel nicht isoliert auf. Er geht zumeist mit Ver- oder Entfestigungen oder Eigenspannungen einher (Haibach, 2006), (Radaj und Vormwald, 2007). Es ist allgemein bekannt, dass eine verfestigte Randschicht v. a. im hcf-Bereich einen positiven, die Lebensdauer verlängernden Einfluss hat. Dieser positive Effekt wird beispielsweise beim Kugelstrahlen oder Randschichthärten gezielt genutzt. Auch hier ist der Einfluss jedoch mit dem Auftreten von Eigenspannungen überlagert. Der Einfluss einer Verfestigung nimmt dabei mit steigender Werkstofffestigkeit ab. Eine verfestigte Randschicht in Verbindung mit Eigenspannungen kann neben einer ungleichmäßigen plastischen Umformung, beispielsweise durch Scherschneiden, auch durch einen thermischen Einfluss erzeugt werden, wie er beim Laserstrahlschneiden auftritt.

In der Praxis ist Ermüdung ein nur unzureichend entkoppelbares Vielparameterproblem. Insbesondere wird bei praxisrelevanten Untersuchungsergebnissen selten zwischen den Einflüssen von Rauigkeitsänderung, Werkstoffverfestigung und Eigenspannungsbildung an der Oberfläche unterschieden.“ (Radaj und Vormwald, 2007). Ein solcher, praktischer Fall ist auch der Kantenzustand scher- oder laserstrahlgeschnittener Kanten. Dabei verhalten sich die Einflüsse von Rauheit und Verfestigung jedoch nicht konstant. Sie sind meist lastabhängig. Wie Beispiele

aus der Literatur zeigen (Dittmann und Pätzold, 2018), ist der Rauheitseinfluss vor allem maßgebend im Bereich dominant elastischer Beanspruchung. Hier wirkt sich der negative, lebensdauerverkürzende Einfluss der Mikrokerben voll umfänglich aus. Es kommt zu einem Abfall der Beanspruchbarkeit gegenüber dem polierten Grundwerkstoffzustand. Dagegen wirkt sich eine Verfestigung eher im Bereich höherer Beanspruchungen aus. Bei spannungsgeregelten Versuchen können die Zeitfestigkeitsgeraden scher- oder laserstrahlgeschnittener Stahlbleche teils diejenigen der polierten Kanten schneiden. Dies bedeutet, dass durch eine Verfestigung die Lebensdauer teilweise gegenüber dem Grundwerkstoffzustand verbessert ist, die Zeitfestigkeitsgerade liegt in Teilen oberhalb der der polierten Kante. (Thomas, Whittaker, et al., 2011), (Thomas, 2012).

In Bereichen hoher plastischer Dehnungsanteile wirkt sich eine Verfestigung dagegen eher negativ aus. So ist bekannt, dass die Dehnungs-Wöhlerlinie von Schneidkanten im Bereich hoher plastischer Dehnungsanteile durch ein verringertes Umformvermögen infolge einer Verfestigung gegenüber der polierten Kante abfällt. (Dittmann und Pätzold, 2018).

2.5.2 Kerbeinfluss und dynamische Stützwirkung

Nahezu jedes Fahrwerks- oder Karosseriebauteil, das aus Feiblechen gefertigt wird, verfügt über geometrische Kerben. Diese führen unter anderem zu einer Spannungsüberhöhung und stehen somit im Fokus einer Betrachtung und Bewertung des Betriebsfestigkeitsverhaltens.

Für Fälle mit einfacher Geometrie lassen sich Kerbformzahlen definieren. Diese werden aus dem Verhältnis der maximal auftretenden (Kerb)Spannung σ_{max} und der Nennspannung σ_n gebildet.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

Bei zyklischer Beanspruchung zeigt sich oftmals, dass der Quotient der Nennspannungsamplitude einer ungekerbten und einer gekerbten Probe kleiner ist, als die Kerbformzahl K_t . Dieser Quotient wird als Kerbwirkungszahl K_f bezeichnet.

$$K_f = \frac{\sigma_{a,ungekerbt}(N)}{\sigma_{a,gekerbt}(N)}$$

Dies bedeutet, dass sich eine örtliche Spannungsüberhöhung im Kerbgrund unter schwingender Beanspruchung schwächer auswirkt als unter quasistatischer Beanspruchung. Dieses Phänomen wird als dynamische Stützwirkung bezeichnet und die dynamische Stützzahl zu dessen Beschreibung ist definiert zu

$$n_{\sigma} = \frac{K_t}{K_f}$$

Sie ist abhängig vom Spannungsgradienten im Kerbgrund und damit auch von der Kerbgeometrie. Weitere Einflussfaktoren sind der Werkstoff und die Größe des Bauteils. Nähere Beschreibungen zur dynamischen Stützwirkung finden sich in (Liu, 2000).

Eine Abschätzung der dynamischen Stützwirkung anhand der unterschiedlichen Einflussgrößen kann beispielsweise anhand der FKM-Richtlinie erfolgen. Die Ergebnisse aus (Dittmann und Pätzold, 2018) zeigen jedoch, dass die Werte der Richtlinie für Feibleche oftmals zu konservativ sind.

2.5.3 Mittelspannungseinfluss

Wie zuvor beschrieben, ist das Betriebsfestigkeitsverhalten ein Vielparameterproblem. Neben dem Bauteilzustand (Rauheit, Verfestigung etc.) und dessen Geometrie (Kerben), wird es auch von der äußeren Belastung beeinflusst. Zusätzlich zur Amplitude ist auch die angreifende überlagerte Mittellast relevant.

Mit steigender positiver Mittelspannung verschiebt sich die Beanspruchbarkeit des Werkstoffes hin zu kleineren Spannungsamplituden. Ein Maß zur Beschreibung des Einflusses von Mittelspannungen besteht in der Definition einer werkstoffabhängigen Mittelspannungsempfindlichkeit M . Die Definition der Mittelspannungsempfindlichkeit ist anhand des Dauerfestigkeitschaubilds nach Haigh gut beschreibbar, vergleiche Abbildung 2-14. Sie beschreibt die Neigung der Geraden zwischen der Wechselfestigkeit σ_w ($R = -1$) und der Schwellfestigkeit ($R = 0$), welche auf der Winkelhalbierenden des ersten Quadranten liegt.

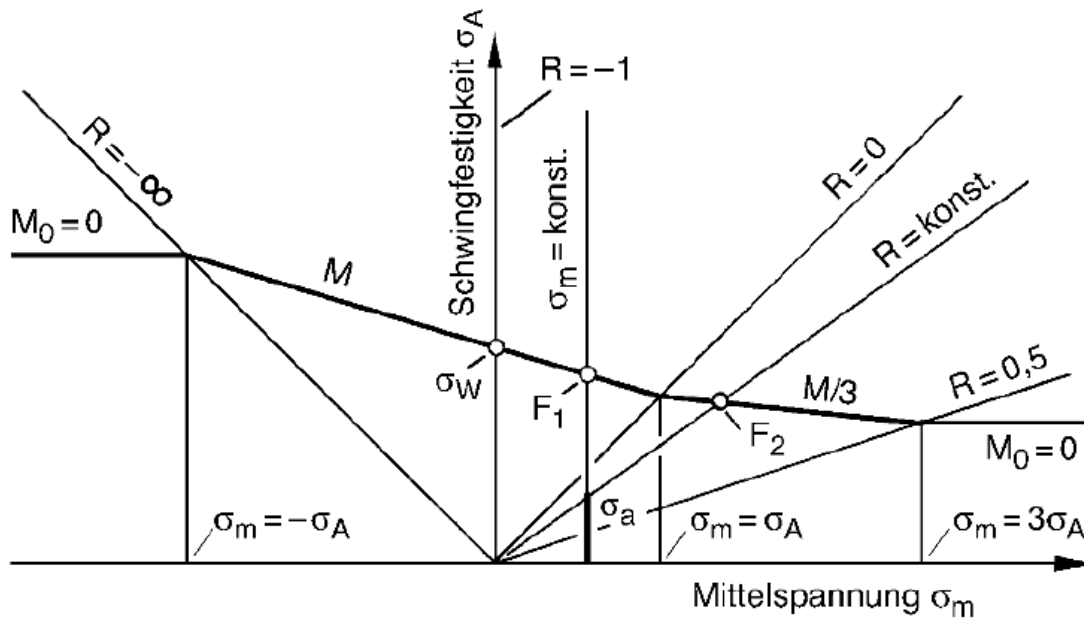


Abbildung 2-14: Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh, (Radaj und Vormwald, 2007)

2.5.4 Einfluss variable Amplitude

Die meisten Bauteile sind im Betrieb Belastungen mit variabler Amplitude ausgesetzt. Es ist bekannt, dass sich das Schwingfestigkeitsverhalten zwischen Beanspruchung mit konstanter und variabler Amplitude unterscheiden kann.

So wird in (Sonsino und Streicher, 2009) gezeigt, dass sich die Beanspruchung mit variabler Amplitude einer Eisengusslegierung gegenüber einer Beanspruchung mit konstanter Lastamplitude anders auswirkt. Das Schwingfestigkeitsverhalten ist verbessert. Im Gegensatz hierzu zeigt (Yildirim, Marquis und Sonsino, 2016), dass der positive Einfluss von in Schweißnähten eingebrachten Druckeigenspannungen unter konstanter schwingender Last größer ausfällt als für eine Beanspruchung mit variabler Amplitude.

Die erreichbare Lebensdauer von Versuchen unter variabler Amplitude ist neben der Höhe des Kollektivhöchstwertes (höchste Beanspruchung in der Last-Zeit-Folge) auch vom Umfang und der Form des Kollektivs abhängig (Haibach, 2006). Letztere beschreibt die Häufigkeit von Schwingspielen einer bestimmten Größe innerhalb der Betriebsbeanspruchung.

Neben der Lebensdauer wird davon auch die zulässige Schadenssumme beeinflusst. Also die nach einer Schadensakkumulation, vergleiche nächsten Abschnitt, berechnete Schadenssumme zum Zeitpunkt des Versagens. Wie (Fitzka und Mayer, 2016) zeigt, nimmt die zulässige Schadenssumme mit zunehmender Blocklänge zu. Die Blocklänge beschreibt dabei die durch Blöcke beschriebene Häufigkeit der Schwingspiele einer bestimmten Amplitude.

Für metallische Bauteile tritt das Versagen häufig im Bereich einer zulässigen Schadenssumme um $D_{zul} = 0,3$ auf. Wie eine umfangreiche Auswertung von Versuchsergebnissen zeigt, streut die zulässige Schadenssumme für unterschiedliche Bauteile und Beanspruchungsarten zwischen $D = 0,1 \dots 10$. (Haibach, 2006).

Zur Auswirkung einer Beanspruchung mit variablen Amplituden im Zusammenhang mit einem Kanteneinfluss finden sich in der Literatur keine Ergebnisse. Deshalb soll dies im Rahmen dieses Projekts näher betrachtet werden.

2.6 Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Durchführung einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung. Neben dem Nennspannungs-, Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept gibt es das Örtliche Dehnungs- und das Bruchmechanische Konzept. Allen diesen Konzepten gemein ist die Beschreibung der Beanspruchbarkeit und der Beanspruchung sowie deren rechnerische Gegenüberstellung.

Für dieses Forschungsvorhaben ist besonders das Örtliche Dehnungskonzept relevant, da dieses im Fahrzeugsektor zunehmend Verbreitung für die Auslegung von Fahrwerks- und Karosseriebauteilen findet. Deshalb soll es nachfolgend näher beschrieben werden.

Der Grundgedanke des Örtlichen Dehnungskonzepts besagt, dass das Anrissverhalten einer glatten, d. h. ungekerbten, dehnungsgeregelt beanspruchten Probe auf das Verhalten im Kerbgrund eines Bauteils übertragen werden kann. Demnach lässt sich die Anrisslebensdauer beliebiger Bauteile durch die Dehnungs-Wöhlerlinie des zugehörigen Werkstoffes beschreiben. Umfangreichere Informationen zum Örtlichen Dehnungs-Konzept finden sich beispielsweise in (Haibach, 2006) oder (Radaj und Vormwald, 2007). Abbildung 2-15 gibt eine schematische Darstellung des Konzepts.

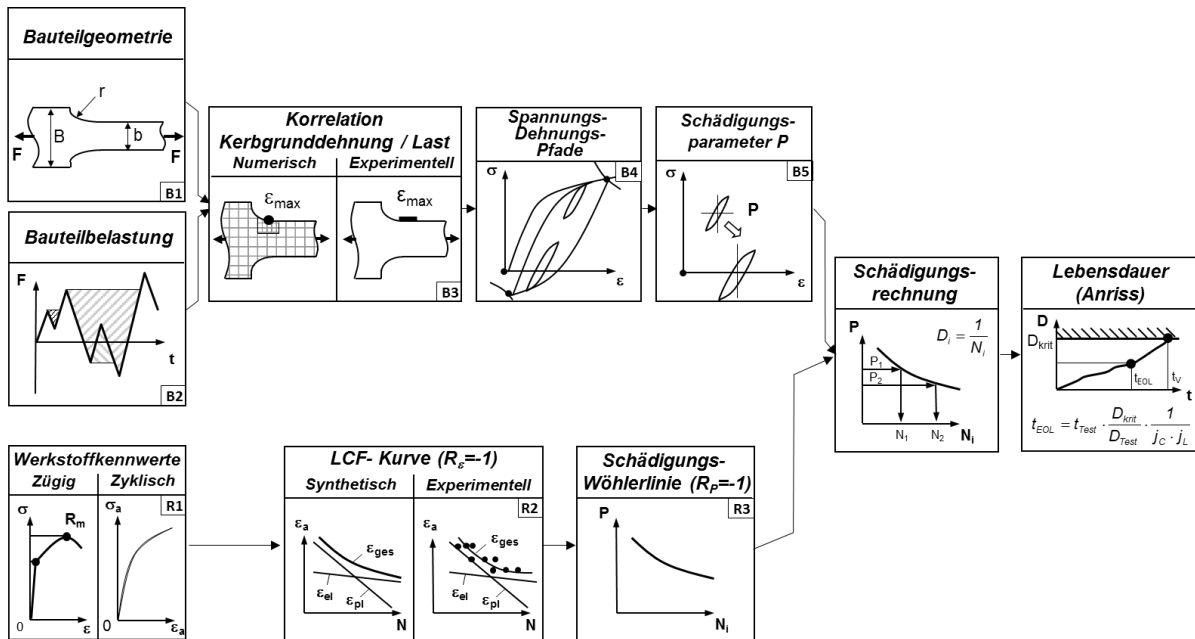


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung des Örtlichen Dehnungskonzepts nach (Häfele und Thum, 2020)

Auf der Seite der Beanspruchung, oberer Pfad in der schematischen Darstellung, werden im Kerbgrund des Bauteils aus der äußeren Belastung die örtlichen Spannungs-Dehnungs-Pfade konstruiert. Die geläufigste Kerbnäherungsbeziehung ist die Variante nach Neuber, welche als Neuber-Hyperbel bezeichnet wird.

$$\frac{\sigma_n^2 \cdot K_t^2}{E} = \frac{\sigma_{max\,elast.}^2}{E} = \sigma \cdot \epsilon = konst.$$

Wie durch Abbildung 2-16 schematisch veranschaulicht, wird mittels der Neuber-Hyperbel die lokale (Kerb-)Spannung und (Kerb-)Dehnung aus einer linear-elastischen Berechnung und der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve des Werkstoffes bestimmt.

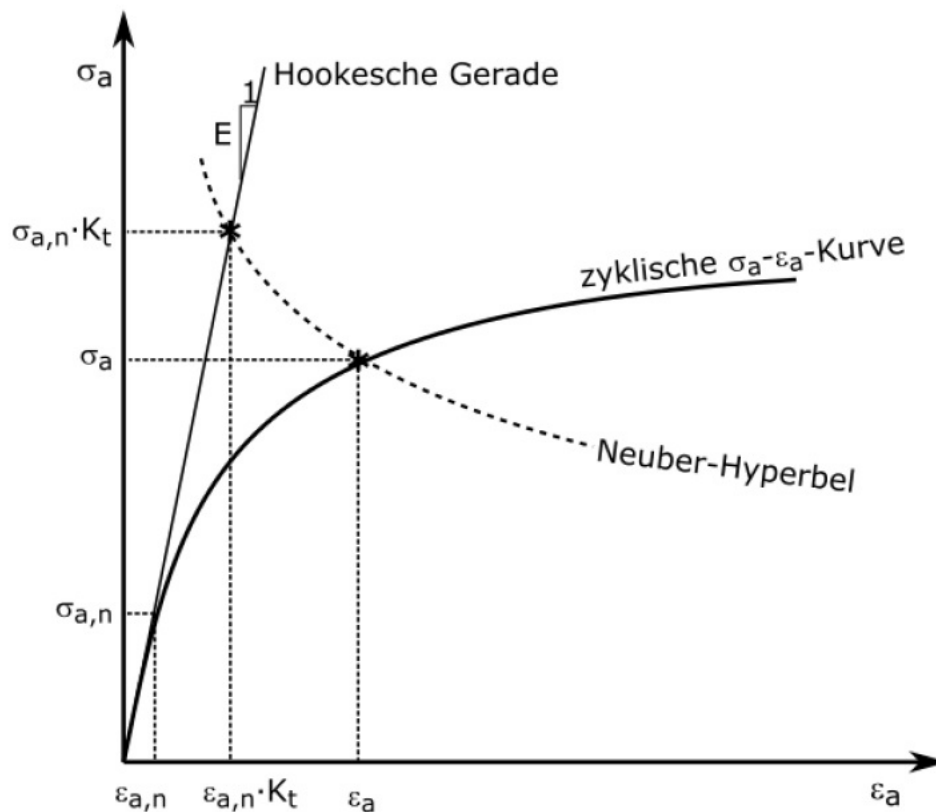


Abbildung 2-16: Schematische Darstellung der Neuber-Hyperbel, (Dittmann und Pätzold, 2018)

Da die Dehnungs-Wöhlerlinie, welche die Beanspruchbarkeit beschreibt, im allgemeinen Fall nur für den rein-wechselnden Lastfall ($R = -1$) vorliegt, Bauteile jedoch im Betrieb auch andere Lastverhältnisse erfahren, müssen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit in sogenannte Schädigungsparameter überführt werden. Diese dienen im Wesentlichen der Berücksichtigung von Mittellasten ungleich Null.

Es gibt eine Vielzahl an verschiedenen Schädigungsparametern. Der geläufigste ist die Variante nach Smith, Watson und Topper. Dabei wird die Beanspruchung zu

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_o \cdot \varepsilon_a \cdot E} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot \varepsilon_a \cdot E}$$

aus der Oberspannung σ_o , der Mittelspannung σ_m , der Dehnungsamplitude ε_a und dem Elastizitätsmodul E bestimmt.

Die Beanspruchbarkeit wird entsprechend durch eine Schädigungsparameter-Wöhlerlinie beschrieben, deren Gleichung aus den zyklischen Kennwerten abgeleitet wird.

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma'_f(2N)^{2b} + E \cdot \varepsilon'_f \cdot \sigma'_f(2N)^{b+c}}$$

Der Schädigungsparameter P_{SWT} nach Smith, Watson und Topper ist jedoch dafür bekannt, die Mittelspannungsempfindlichkeit des Werkstoffes nicht immer gut beschreiben zu können. Eine

gängige Variation, die auch in die Nichtlineare Version der FKM-Richtlinie Einzug gefunden hat, ist eine Weiterentwicklung derjenigen nach Bergmann.

$$P_{Bergmann} = \sqrt{(\sigma_a + k \cdot \sigma_m) \cdot \varepsilon_a \cdot E}$$

Diese gewichtet den Mittelspannungseinfluss mit Hilfe des k-Faktors, welcher gemäß der FKM-Richtlinie aus der Mittelspannungsempfindlichkeit M_σ bestimmt wird.

$$k = \begin{cases} M_\sigma \cdot (M_\sigma + 2); & \text{für } \sigma_m \geq 0 \\ \frac{M_\sigma}{3} \cdot \left(\frac{M_\sigma}{3} + 2\right); & \text{für } \sigma_m < 0 \end{cases}$$

Unabhängig vom Konzept der rechnerischen Lebensdauerabschätzung erfolgt eine Gegenüberstellung der Beanspruchung mit der Beanspruchbarkeit häufig im Rahmen einer linearen Schadensakkumulation nach der Palmgren-Miner-Regel.

$$D_{ges} = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

Diese summiert die Teilschädigungen D_i zu einer Gesamtschädigung D_{ges} auf. Die Teilschädigungen berechnen sich aus dem Quotienten der zu ertragenden Schwingspiele (Beanspruchung) n_i und der ertragbaren Schwingspielzahl (Beanspruchbarkeit) N_i für den jeweiligen Lasthorizont. Zumeist wird dann das Versagen des Bauteils für eine kritische Schadenssumme von $D_{crit} = 1$ angenommen. In der Praxis weicht die kritische Schadenssumme jedoch sehr häufig vom Theoriewert Eins ab. Mehr hierzu beispielsweise in (Haibach, 2006).

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Das Ziel des Projekts ist die Bestimmung des Einflusses der Schneidstrategie sowohl auf das Restumformvermögen als auch auf die Betriebsfestigkeit schergeschnittener Kanten von Aluminiumblechbauteilen. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse soll eine Verbesserung der Genauigkeit von rechnerischen Herstellbarkeits- und Betriebsfestigkeitsanalysen ermöglicht werden. Dies trägt zu einer Kosten- und Zeitreduktion sowie zu einer Erhöhung der Bauteilkomplexität im Rahmen der Bauteilauslegung bei.

Zur Ermittlung des Einflusses der Scherschneidstrategie werden *EFTT*-Proben und Schwingproben mit verschiedenen Schneidstrategien aus Aluminiumlegierungen der 5000er und 6000er Legierungsgruppen hergestellt und untersucht. Die Schneidstrategien umfassen offene und geschlossene Schnittlinien, einstufigen- und zweistufigen Beschnitt, verschiedene Schneidkantenzustände mit scharfkantigen oder kaltaufgeschweißten Stempeln, beschichteten Stempeln oder Stempeln mit abgesetzter, das Aluminiumblech vorbeigenden Schneidkanten zur Reduzierung der Flitterbildung. Des Weiteren werden Proben mit gefrästen und polierten Kanten im Kantenrisszugversuch und Schwingfestigkeitsversuch untersucht, um einen Referenzzustand mit einer minimalen Kantenschädigung abzubilden. In Kombination mit verschiedenen Schneidstrategien wird zudem der Einfluss unterschiedlicher Kerbfaktoren unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung bestimmt, indem die Geometrie der Schwingproben entsprechend modifiziert wird.

Zur Validierung der Ergebnisse aus dem Kantenrisszugversuch sollen Kragenziehbauteile hergestellt werden, da Kragen häufig in Strukturbauteilen zur Aufnahme von Lagern angetroffen werden können.

Eine Ableitung optimierter Schneidstrategien zur Erhöhung des Restumformvermögens und der Betriebsfestigkeit von Blechbauteilen aus Aluminium rundet die Untersuchungen ab.

4 Versuchs- und Messeinrichtungen

4.1 Mechanische Schnellläuferpresse (utg)

Die mechanische Schnellläuferpresse BSTA 1600-181 der Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz, kann eine Nennpresskraft von 1600 kN aufbringen. Die Ausführung des Pressenrahmens in geschlossener Vier-Säulen-Bauweise ermöglicht auch Anwendungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen. Der Stößelantrieb erfolgt über einen Kurbeltrieb mit einer Exzenterwelle, welche quer zur Bandlaufebene angeordnet ist. Durch ein Hebelsystem werden die Prozesskräfte gleichmäßig im System verteilt. Dieses Hebelsystem, ein vollständiger Masseausgleich sowie minimale Lagerspiele ermöglichen eine hohe Wiederholgenauigkeit und Präzision bei gleichzeitig geringer Werkzeugbeanspruchung. Der Hubzahlbereich erstreckt sich bis maximal 600 Hüben pro Minute. (Bruderer AG, 2020)



Abbildung 4-1: Bruderer Stanzautomat BSTA 1600-181 (Bruderer UK Ltd., 2020)

Für die Probenherstellung wird die Schnellläuferpresse mit einem hochsteifen Scherschneidwerkzeug mit einer Hubzahl von 50 Hüben pro Minute im Einzelhub betrieben. Tabelle 4-1 fasst die technischen Daten des Stanzautomaten zusammen.

Tabelle 4-1: Technische Daten der Schnellläuferpresse (Bruderer AG, 2020)

Kenngroße	BSTA 1600-181
Nennkraft [kN]	1600
Max. Hubzahl [1/min]	600
Hubhöhe [mm]	19, 26, 40, 55, 68, 80, 90, 96, 100
Stößelverstellweg [mm]	89
Werkzeugeinbauhöhe [mm]	268 – 385
Aufspannplattenfläche [mm x mm]	1790 x 1070

4.2 Universalprüfmaschine (utg und HS Esslingen)

Für die Zugversuche am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen wird eine Universalprüfmaschine des Typs Z150 der Firma ZwickRoell, Ulm, verwendet. Die Maschine zeichnet sich durch einen besonders steifen und belastbaren Lastrahmen mit großflächigen mechanischen Verbindungen aus und kann eine maximale Prüfkraft von 150 kN aufbringen. Die Traversenführung ist sehr präzise gestaltet, um unerwünschte Nebeneffekte zu minimieren und die Genauigkeit zu erhöhen. Der Traversengeschwindigkeitsbereich erstreckt sich von 0,0001 mm/min bis zu 900 mm/min. Die Steuerung der Maschine erfolgt über die Steuerungselektronik testControll II. Die Konfiguration der Prüfung mit Eingabe aller Prüfungsparameter erfolgt über einen separaten PC unter Verwendung der Software TestXpert III. Diese kommt auch für die Versuchsüberwachung und Auswertung zum Einsatz. (ZwickRoell, 2020b)

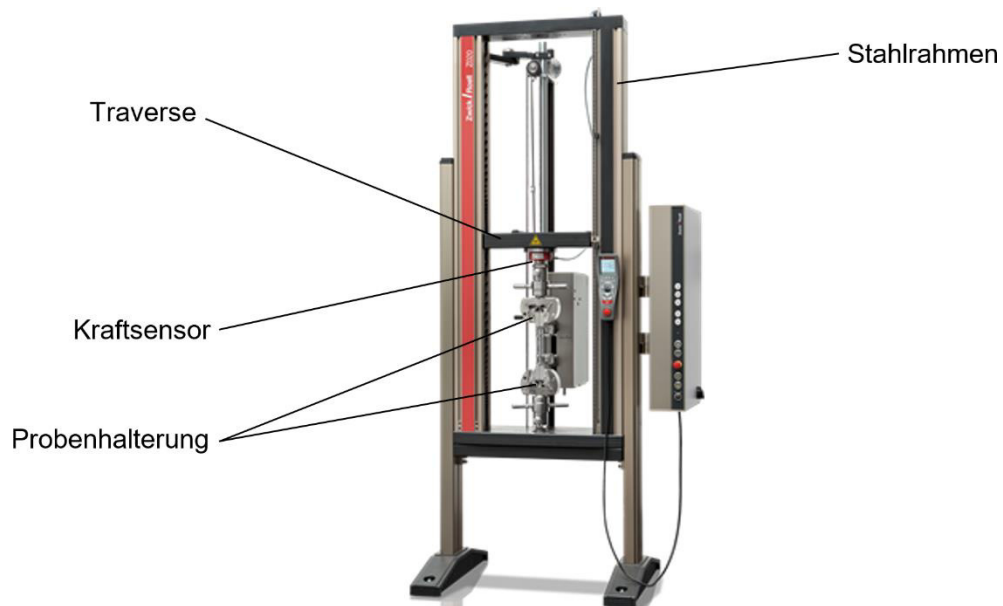


Abbildung 4-2: Universalprüfmaschine ZwickRoell Z150 (ZwickRoell, 2020b)

Tabelle 4-2: Technische Daten der Universalprüfmaschine (ZwickRoell, 2020b)

Kenngroße	ZwickRoell Z150
Nennkraft [kN]	150
Prüfraum [mm]	640 x 1535
Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	0,0001 - 900
Rücklaufgeschwindigkeit [mm/min]	1500
Antriebsleistung [W]	4000

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgt am Labor Werkstoff- und Fügetechnik (HS Esslingen) auf einer Universalprüfmaschine Z100 des gleichen Herstellers. Hierfür wird ein biege-kompensierter Feindehnungsaufnehmer Mini MF2 der Mess- & Feinwerktechnik GmbH mit einer Messlänge von 20 mm verwendet.

Die quasistatischen Zug- und Kerbzugversuche zur Beurteilung des Kanteneinflusses auf die statischen Kennwerte werden ebenfalls auf dieser Maschine durchgeführt. Die Versuche an ungekerbten Proben orientieren sich an DIN EN ISO 6892-1 Verfahren A. Verwendet wird die Probengeometrie der Schwingproben. Die Kerbzugversuche werden mit einer Vorkraft von 500 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Ausgehend von einer freien Länge von 80 mm, werden Kraft und Traversenweg aufgezeichnet. Anschließend kann aus der Maximalkraft und dem Anfangsquerschnitt die Kerbzugfestigkeit berechnet werden. Die Verformungsarbeit bis zur Maximalkraft bzw. bis Bruch ergibt sich aus der Fläche unterhalb des Kraft-Weg-Diagramms.

4.3 Optisches 3D-Verformungsanalysesystem (utg)

Zur Verformungsmessung wird das optische 3D-Messsystem ARAMIS SRX der Firma GOM GmbH, Braunschweig, verwendet. Mit diesem können Verformungen, Starrkörperbewegungen und das dynamische Verhalten von Messobjekten analysiert, berechnet, dokumentiert und anschließend grafisch dargestellt werden.

Das System besteht im Wesentlichen aus einem Stativ mit hochauflösenden Kameras, einer Anwendungssoftware ARAMIS Professional Live, einer LED-Probenbeleuchtung, einem Laserpointer für optimale Sensorausrichtung, einem Sensor-Steuergerät sowie einem Hochleistungscomputer. Auf dem Stativ sind je nach Messaufgabe entweder eine oder zwei Kameras montiert. Im Falle einer dreidimensionalen Messung, wie sie im Rahmen des Projektes angewandt wird, kommen zwei Kameras zum Einsatz, welche in einem definierten Abstand und unter einem definierten Winkel zueinander angeordnet sind. Vor der Messung werden die Kameras auf die Position der zu vermessenden Probe kalibriert. Da der Kontrast der Oberfläche oftmals zu niedrig ist, wird die Probenoberfläche in der Regel zusätzlich behandelt. Eine Möglichkeit ist dabei das Aufbringen eines stochastischen Farbsprühmusters, damit das optische Messsystem die Probenoberfläche bei ansonsten ungenügender Strukturierung besser erkennen kann.

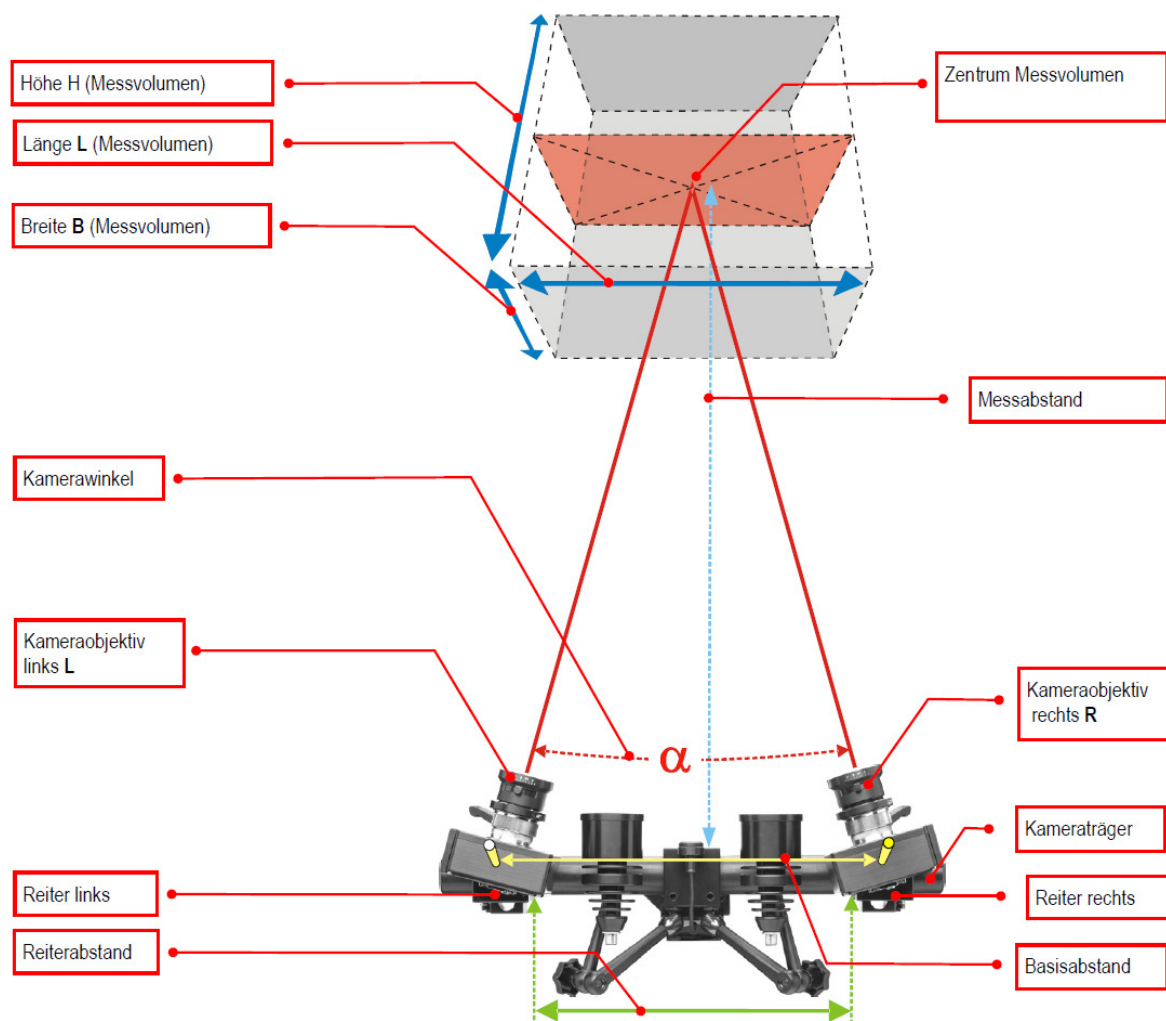


Abbildung 4-3: Prinzipieller Aufbau des Messsystems GOM ARAMIS (GOM GmbH, 2013)

Während einer Deformationsmessung wird der zeitliche Verlauf der Messprobe von beiden Kameras aufgenommen. Hierzu werden kontinuierlich Bilder in einer vordefinierten Frequenz von dem Messobjekt gespeichert. Mithilfe der Anwendungssoftware können auf den aufgenommenen Bildern über das stochastische Farbsprühmuster Facetten erzeugt werden, welche die späteren Messpunkte darstellen. Das System kann diese über die gesamte Messung eindeutig über die ihnen zugeordneten Grauwerte aus dem stochastisch verteilten Muster identifizieren. Durch die Verwendung zweier Kameras werden die Facettenpunkte sowohl auf dem linken als auch auf dem rechten Kamerabild erkannt. Aus jedem 2D-Punkt (linkes und rechtes Kamerabild) kann ein Beobachtungsstrahl, ausgehend von den Kameras zum Messpunkt ermittelt werden. Die Software berechnet anschließend über Triangulation den Schnittpunkt beider Strahlen und generiert dadurch aus den beiden 2D-Punkten einen 3D-Punkt.

Durch einen Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Koordinaten mehrerer Messpunkte können durch das System Verschiebungen, Dehnungen und weitere abgeleitete Größen bestimmt werden. Auf Basis von Verschiebungsfeldern von auf der Probe definierten Facetten können die Hauptformänderung φ_1 und die Nebenformänderung φ_2 lokal aufgelöst auf der Probenoberfläche berechnet werden. Über die Volumenkonstanz des Körpers kann zudem die Ausdünnung φ_3 des Bleches ermittelt werden.

Zur besseren Veranschaulichung überlagert das System die aufgenommenen Kamerabilder mit Falschfarbenbildern, um die Analyseergebnisse wie zum Beispiel Dehnungsverteilungen möglichst übersichtlich darzustellen. (GOM GmbH, 2013), (GOM GmbH, 2016), (GOM GmbH, 2017)

4.4 Taktils Oberflächenmessgerät (utg)

Die Schnittflächenkenngrößen werden auf einem taktilen Oberflächenmessplatz des Typs MarSurf XCR 20 mit einer PCV 200 Vorschubeinheit der Firma Mahr GmbH, Göttingen, ermittelt. Dieses nach dem Tastschnittverfahren arbeitende Messgerät weist eine Auflösung von $0,5 \mu\text{m}$ in z-Richtung bei einer Tastarmlänge von 350 mm auf. Mit Hilfe der Software MarWin XC20 können die Messergebnisse ausgewertet werden. Abbildung 4-4 zeigt den Aufbau zur Konturmessung nach dem Tastschnittverfahren.



Abbildung 4-4: Konturmessgerät Mahr MarSurf XCR 20

4.5 Laserkonfokalmikroskop (utg)

Zur Ermittlung der Oberflächenrauheit der schergeschnittenen Probenkanten wird ein Laserkonfokal-Mikroskop vom Typ VK-X150 der Firma Keyence, Osaka, Japan, verwendet. Das Messsystem besteht aus einem Mikroskop mit hochauflösenden Objektiven, einem motorbetriebenen Objektisch und der dazugehörigen Steuerung. (Keyence, 2018a)

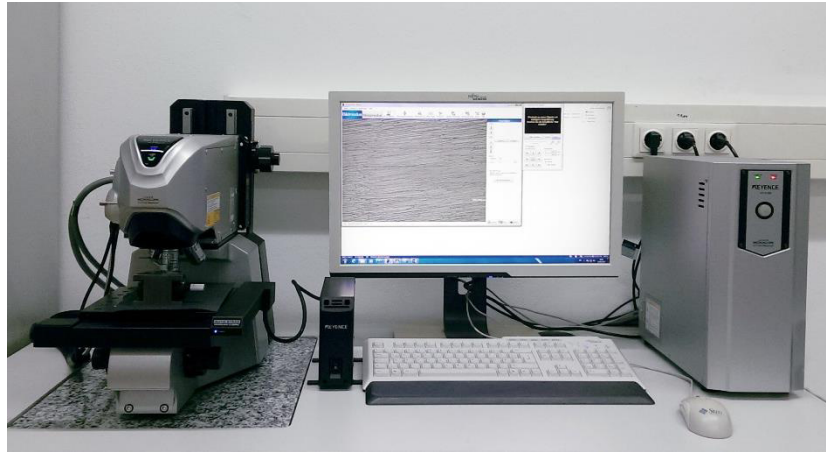


Abbildung 4-5: Laserkonfokal-Mikroskop Keyence VK-X150

Durch Laserabtastung werden kontaktlos sehr präzise dreidimensionale Oberflächendaten ermittelt. Hierzu tastet der Laser die Oberfläche des Messobjektes in x- und y-Richtung ab. Das von jedem Punkt auf der Probenoberfläche reflektierte Laserlicht geht durch einen halbdurchlässigen Spiegel und trifft auf einen Fotorezeptor. Dieser registriert die Intensität der empfangenen Reflexion und speichert diese mit der aktuellen Höhenposition der Linse für jeden Oberflächenpunkt ab. Nachdem die Oberfläche komplett abgetastet ist, wird das Objektiv um eine festgelegte Schrittweite in z-Richtung verschoben und der Abtastvorgang wiederholt. Die Lichtintensität jedes Punktes wird mit der Intensität der vorherigen Messung verglichen. Ist die neue Lichtintensität höher, werden die Daten mit den aktuellen Werten überschrieben. Am Ende der Messung liegen für jeden Bildpixel ein Wert für die maximale Lichtintensität und die dazugehörige Linsenhöhe vor, woraus ein Höhenprofil der Probenoberfläche generiert werden kann. (Keyence, 2018a), (Keyence, 2018b)

Mithilfe einer Auswertesoftware können anschließend aus den Höhenprofilen die Rauheitskenngrößen auf der Probenoberfläche ermittelt werden. Eine Zusammenfassung der technischen Daten des Mikroskops ist in Tabelle 4-3 gegeben. (Keyence, 2015)

Tabelle 4-3: Technische Daten des Laserkonfokal-Mikroskops (Keyence, 2015)

Kenngröße	Keyence VK-X150
Gesamtvergrößerung [-]	bis zu 19200-fach
Bildfeld [μm]	16 - 5400
Bildrate [Hz]	4 - 120
Auflösung in Höhenrichtung [nm]	5
Auflösung in Ebene [nm]	10
Wellenlänge Laser [nm]	658

4.6 Auflichtmikroskop (utg)

Für optische lichtmikroskopische Aufnahmen wird das Digitalmikroskop VHX-2000 der Firma Keyence, Osaka, Japan, verwendet. Mit einem Objektiv des Typs VH-Z20R können Aufnahmen mit 20 bis 200-facher Vergrößerung erstellt werden. Dieses gewährleistet bei einer hohen Auflösung von bis zu 500 nm eine große Tiefenschärfe. Die Ausrichtung der Probe erfolgt über einen verfahrbaren X-Y-Tisch, welcher über ein Bedienpanel bedient wird. (Keyence, 2012)



Abbildung 4-6: Auflichtmikroskop Keyence VHX-2000

4.7 Mikrohärteprüfer (utg)

Die Härtemessungen im Bereich der Schnittkante werden mit dem Intentationshärtesystem AMH-43 der Firma LECO Instrumente, Mönchengladbach, durchgeführt. Dabei dringt ein Prüfdiamant nach Vickers mit einer zuvor definierten Prüfkraft in das Material ein. Die Prüfkraft reicht von HV 0,001 bis HV 1,0 und kann stufenweise ausgewählt werden. Ist der Eindruck erfolgt, so wird dieser anschließend durch eine digitale Kamera vermessen. Die Erstellung der Eindrücke sowie die Vermessung der Diagonalen d_1 und d_2 der Eindrücke auf der Probenoberfläche findet vollautomatisiert statt. Dabei werden die einzelnen Messpunkte über einen elektronisch geregelten X-Y-Probentisch angefahren und die Objektive (5-fache, 10-fache und 50-fache Vergrößerung) beziehungsweise der Prüfkörper über ein automatisiertes Drehen des Revolvers ausgewählt. Die Steuerung des Härtemessers und die anschließende Auswertung erfolgt durch die dazugehörige Software AMH-43. (LECO, 2005)



Abbildung 4-7: Mikrohärteprüfer LECO AMH-43

4.8 Schwingfestigkeitsversuch (HS Esslingen)

Nachstehende Abbildung 4-8 zeigt die Geometrien der verwendeten Schwingproben. Die jeweils relevanten Bereiche für den Kantenzustand (poliert, laserstrahl- und schergeschnitten) sind hervorgehoben.

Die Geometrie der ungekerbten Probenvariante ($K_t = 1$) ist an die Vorgaben der Richtlinie VDA239-300 angelehnt und wird für spannungs- und dehnungsgeregelte Versuche eingesetzt. Die beiden Kerbvarianten werden nur spannungsgeregelt geprüft. Alle Proben werden mit der Längsachse (entspricht der Beanspruchungsrichtung) quer zur Walzrichtung gefertigt. Diese Entnahmerichtung entspricht der schwächsten Richtung des durch den Walzprozess anisotropen Werkstoffes.

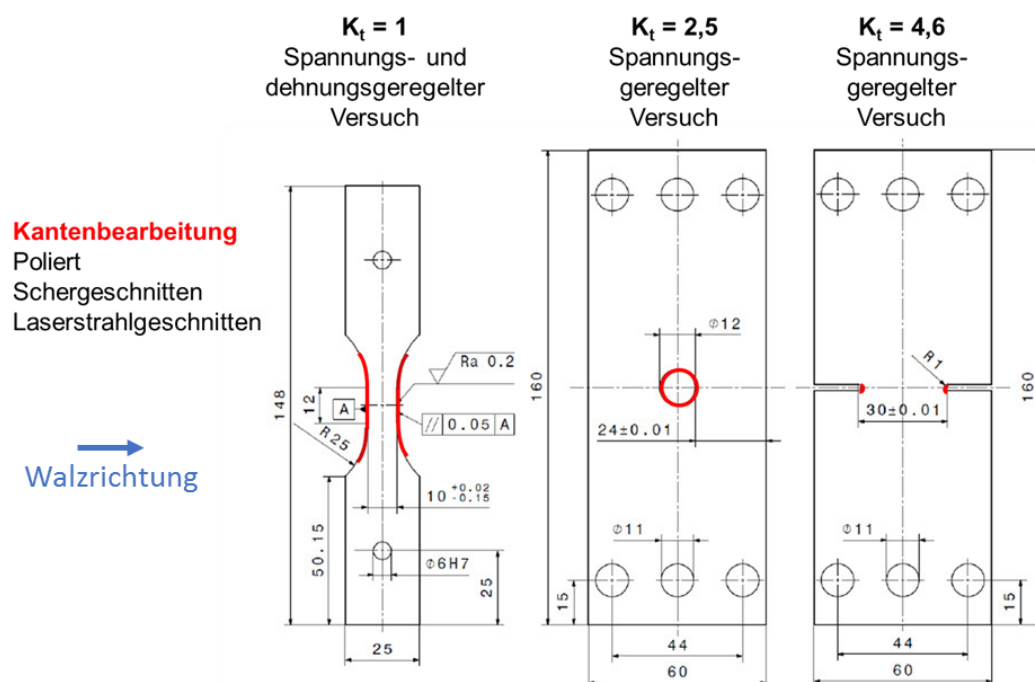


Abbildung 4-8: Geometrien der verwendeten Schwingproben mit hervorgehobenen relevanten Kantenbereichen

4.8.1 Spannungsgeregelte Versuche

Die spannungsgeregelten Versuche werden auf einer motorisch erregten 100 kN-Resonanzprüfmaschine vom Typ SincoTec PowerSwing 100 durchgeführt. Durch Abbildung 4-9 ist ein exemplarischer Aufbau gegeben. Die für die Versuche mit wechselnder Beanspruchung ($R = -1$) zwingend erforderliche Knickstütze ist in Anlehnung an die VDA-Empfehlung 239-300 mit einer PTFE-Folie beschichtet, um Reibung zu reduzieren. Für Versuche mit zugschwellender Beanspruchung könnte die Knickstütze entfallen, da ohne Druckbeanspruchung kein Knickrisiko der Proben besteht. Um den potentiellen Einfluss durch Reibung o. Ä. jedoch konstant zu halten, werden auch diese Versuche mit Knickstütze durchgeführt.

Abbildung 4-9 zeigt exemplarisch den Aufbau für die ungekerbte Probenvariante. Für die beiden Kerbvarianten wird der Aufbau entsprechend der Einspanngeometrie angepasst.

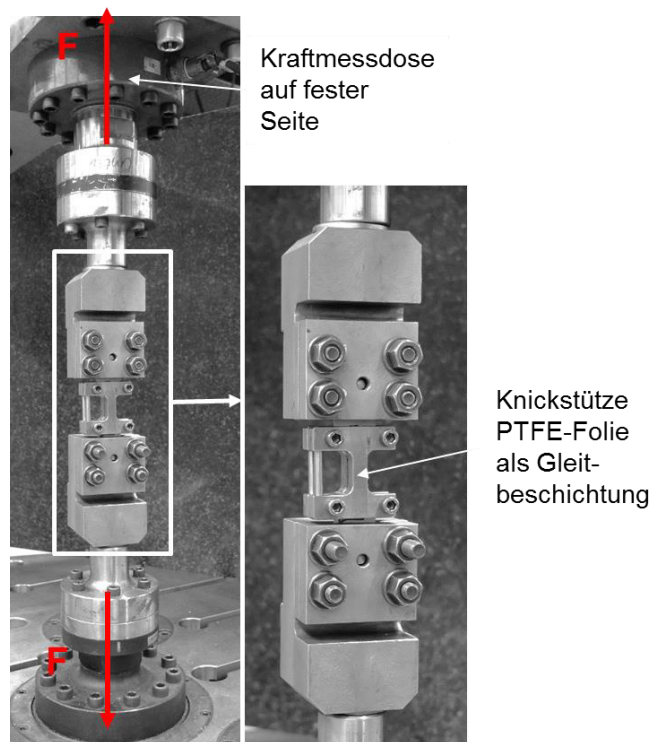


Abbildung 4-9: Exemplarischer Aufbau der spannungsgeregelten Versuche anhand einer ungekerbten Schwingprobe ($K_1 = 1$)

Als Versagenskriterium wird für alle spannungsgeregelt durchgeführten Versuche ein Abfall der Prüffrequenz von 1 Hz festgelegt. Konzeptionell stellt sich bei diesem Typ Prüfmaschine die Prüffrequenz abhängig von der Federrate und den Massen des schwingungsfähigen Systems, bestehend aus Maschine, Aufbau und Probe ein. Durch einen anwachsenden Schwingungsriss erhöht sich die Nachgiebigkeit der Probe, wodurch die Resonanzfrequenz abnimmt. Der gewählte Frequenzabfall von 1 Hz entspricht einem Erfahrungswert, für den ein zuverlässiger Anriss der Probe gewährleistet werden kann.

Dabei ist die Prüffrequenz ($f = 40 \dots 52 \text{ Hz}$) und die Länge des Schwingungsrisses zum Zeitpunkt des Versuchsabbruchs abhängig von der Probengeometrie. Letzterer Einfluss ist auf die unterschiedliche, von der Probengeometrie abhängige Rissfortschrittsrate zurück zu führen. Diese ist für die ungekerbte Probe am größten, vergleiche Abbildung 4-10.

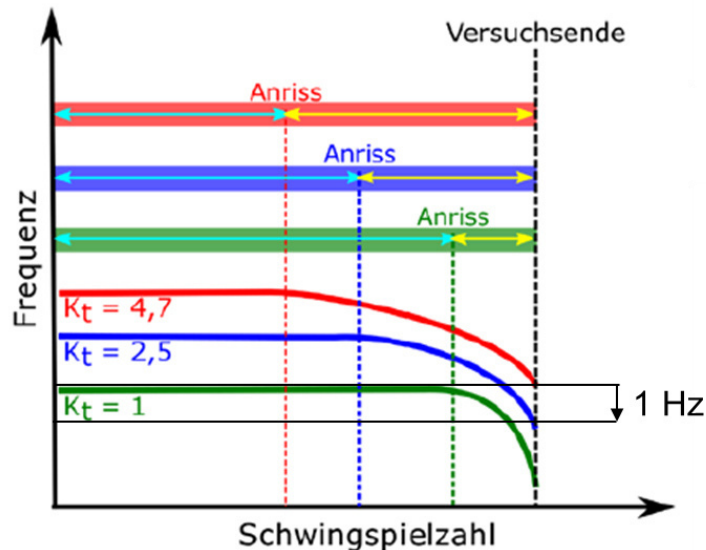


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Verlaufs der Versuchsfrequenz über der Schwingenspielzahl (Dittmann und Pätzold, 2018)

Die Auswertung der spannungsgeregelten Versuche erfolgt nur im Zeitfestigkeitsgebiet. Die Auswertung wird im Teil zur Versuchsdurchführung näher beschrieben. Eine Auswertung im Übergangsbereich zur sogenannten Dauerfestigkeit wird mangels entsprechender Versuchsbelegung nicht durchgeführt. Untersuchungsschwerpunkt des Forschungsvorhabens war das Zeitfestigkeitsgebiet. Entsprechend werden nur die Zeitfestigkeitsgeraden dargestellt, vorhandene Durchläufer (Erreichen von $N = 10^7$ Schwingspielen) geben aber eine Einschätzung zum Ende des Zeitfestigkeitsgebiets.

4.8.2 Spannungsgeregelte Versuche mit variabler Amplitude

Alle Schwingfestigkeitsversuche mit variabler Beanspruchungsamplitude werden spannungsgeregelt rein-wechselnd ($R = -1$) durchgeführt. Die Versuchsaufbauten entsprechen denjenigen, die für die spannungsgeregelten Versuche mit konstanter Amplitude eingesetzt werden.

Es werden zwei verschiedene Prüfsysteme eingesetzt. Zum einen werden auf der zuvor beschriebenen Resonanzprüfmaschine Versuche mit einem geblockten Gauß-Kollektiv durchgeführt, vergleiche Teilbilder a) und b) der Abbildung 4-11. Das Gauß-Kollektiv wird durch Blöcke einer Mindestlänge von 500 Schwingspielen angenähert. Der Kollektivumfang beträgt 50.000 Schwingspiele. Durch Teilbild b) ist eine exemplarische Abfolge der Blöcke gegeben.

Der Vorteil der Durchführung von Versuchen mit variabler Amplitude auf einer Resonanzprüfmaschine liegt auf der ökonomischen Seite. Der Nachteil besteht darin, dass Nachfahrversuche mit schwingenspielweiser Änderung der Amplitude nicht durchgeführt werden können.

Deshalb werden zusätzlich Versuche mit synthetisch generierten Nachfahrsignalen aus einer Gauß-Verteilung auf einem servohydraulischen 15 kN-Prüfstand Bauart MTS durchgeführt, vergleiche Teilbild c) der Abbildung 4-11. Das verwendete Kollektiv hat einen Umfang von $H_0 = 10.000$ Schwingspielen.

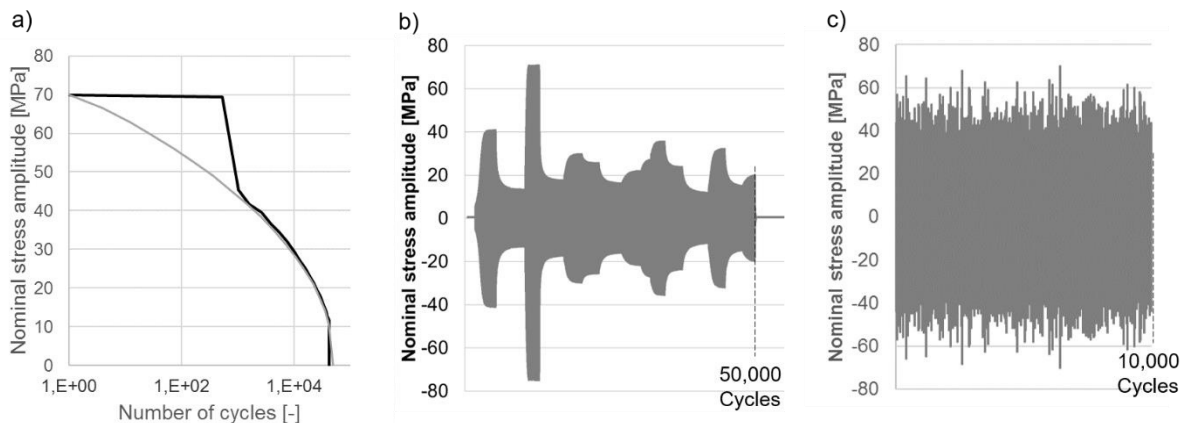


Abbildung 4-11: a) Exemplarischer Vergleich der Gauß-Verteilung und des geblockten Lastkollektivs mit 20 Blöcken einer Länge von min. 500 Schwingspielen und einem Kollektivumfang von 50.000 Schwingspielen, b) Blockprogramm der Resonanzprüfmaschine, c) Last-Zeit-Folge der Gauß-Verteilung mit 10.000 Schwingspielen ($R = -1$, $I = 1$), jeweils mit einem Kollektivhöchstwert von 70 MPa, (Thum und Häfele, 2020)

Für beide Prüfmethode wird eine Omission umgesetzt, d. h. Schwingspiele mit kleiner Amplitude, die mutmaßlich nicht zur Schädigung beitragen, werden im Rahmen der Versuchsführung gestrichen, aber dennoch gezählt. Hierdurch soll eine Versuchszeitverkürzung erreicht werden. Für die Versuche liegt der Omission-Wert bei konstant 15 MPa. Alle Schwingspiele mit einer geringeren Amplitude werden unabhängig vom Kollektivhöchstwert gezählt, aber nicht gefahren.

Die Auswertung erfolgt analog zu den Versuchen mit konstanter Amplitude. Aufgetragen werden die Kollektivhöchstwerte über der erreichten Schwingspielzahl. Für die Versuche des servohydraulischen Prüfstands wird das Abschaltkriterium auf eine Wegzunahme von 1 mm eingestellt.

4.8.3 Dehnungsgeregelte Versuche

Die dehnungsgeregelten Versuche werden auf einem servohydraulischen 16 kN Prüfzylinder Bauart Schenck mit einem Regler Controller FlexTest 2 Bauart MTS durchgeführt. Die Dehnung wird an der Probenkante mittels eines Dehnungsaufnehmers der Firma Sandner mit einer Messlänge von 10 mm gemessen. Abbildung 4-12 zeigt den Aufbau der dehnungsgeregelten Versuche. Die erforderliche Anpresskraft der Schneiden auf der Probenkante wird durch zwei elastische Fäden erreicht. Zusätzlich wird der Aufnehmer mit einem Tropfen Cyanacrylat-Klebstoff je Schneide gegen Verrutschen gesichert.

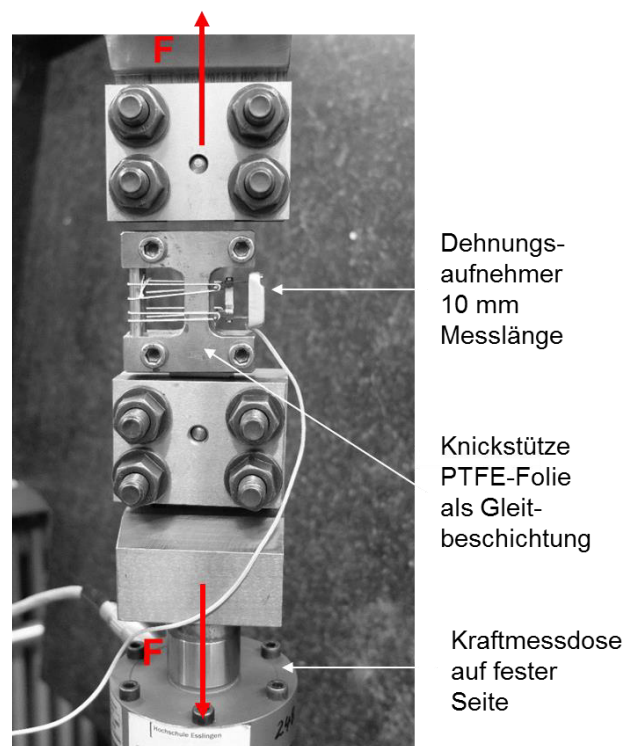


Abbildung 4-12: Aufbau der dehnungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche

Die Versuchsdurchführung und –auswertung erfolgt anhand der Empfehlung VDA239-300. Nach dieser ist der Anrisszeitpunkt definiert als die Schwingspielzahl, für die sich eine Änderung der stabilisierten Oberlast um 10 % einstellt. Durch Abbildung 4-13 ist eine schematische Darstellung für einen entfestigenden Werkstoff gegeben.

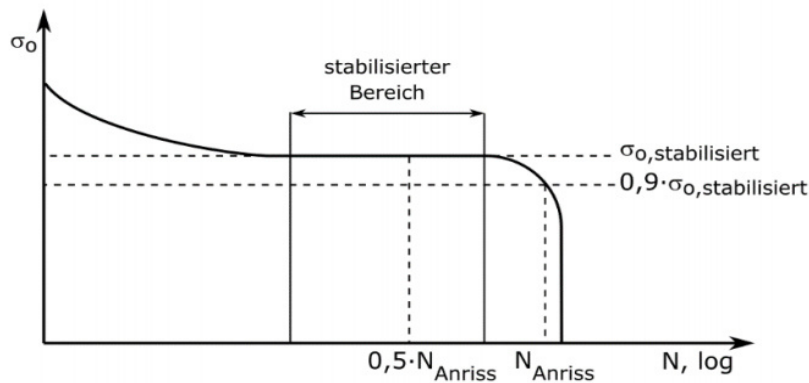


Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Auswertekriteriums der Anrisschwingspielzahl nach Empfehlung VDA239-300, entnommen aus (Dittmann und Pätzold, 2018)

Gemäß der Richtlinie VDA239-300 werden die Werte der Spannungsamplitude für die Auswertung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve bei halber Anrisschwingspielzahl abgelesen.

Die Bestimmung der zyklischen Kennwerte σ_f' und b für die elastische sowie der Kennwerte ε_f' und c für die plastische Gerade zur Beschreibung der Dehnungs-Wöhlerlinie erfolgt ebenfalls analog zur Richtlinie VDA239-300. Näheres zur Beschreibung der Dehnungs-Wöhlerlinie findet sich im Teil zur Versuchsdurchführung.

5 Versuchswerkstoffe

5.1 Aluminium EN AW-5182

Der Blechwerkstoff EN AW-5182 (AlMg_{4,5}Mn_{0,4}) wird im Zustand H 111 und mit einer Blechdicke von $s = 1,5$ mm untersucht. Hierbei handelt es sich um eine naturharte, nicht aushärtbare Aluminiumknetlegierung der 5xxx-Gruppe mit dem Hauptlegierungselement Magnesium. Der Magnesium-Gehalt legt das Festigkeitsspektrum der Legierung fest und erhöht dabei den Fließwiderstand sehr effizient bei Raumtemperatur, aber auch bei hohen Warmformgebungstemperaturen. Das wichtigste Nebenlegierungselement stellt Mangan dar, welches beim Produktionsprozess durch seine feine Ausscheidungsdispersion zur Steuerung der Gefügeeigenschaften verwendet wird. Neben Mangan besitzt die AlMg-Legierung zusätzlich kleinere Mengen an Chrom als Dispersionsbildner. Diese beiden Elemente wirken zusätzlich festigkeitssteigernd, werden aber primär eingesetzt, um das Korngefüge zu stabilisieren und die Rekristallisation zu steuern. Zusätzlich dienen diese der Stabilisierung des Entmischungsverhaltens. (Ostermann, 2014)

Zu den Eigenschaften dieser Legierung zählen eine hohe statische Festigkeit, gute Ermüdungseigenschaften, gute Kaltumformbarkeit, Korrosionsbeständigkeit, gute Schweißbarkeit sowie eine hohe Duktilität auch bei tiefen Temperaturen. Aufgrund dieser Vorteile und der Kombination aus hoher Festigkeit bei guter Umformbarkeit hat sich die Legierung EN AW-5182 im modernen Karosseriebau etabliert. Diese findet vermehrt Anwendung für Strukturteile. So wird beispielsweise das Innenblech von Aluminiummotorhauben häufig aus diesem Material gefertigt. Die Verwendung für Außenhautbauteile wird jedoch durch die Bildung von Fließfiguren und Oberflächeneffekten, bedingt durch den Portevin-Le-Chatelier-Effekt (PLC-Effekt), eingeschränkt, da diese selbst nach einer Lackierung noch deutlich erkennbar sind. (Ostermann, 2014), (Novelis, 2011)

In Tabelle 5-1 ist die Legierungszusammensetzung des Werkstoffs EN AW-5182 dargestellt. Diese wurde durch funkenspektrometrische Messungen mit einem Funkenspektrometer des Typs FOUNDRY-MASTER der Firma Worldwide Analytical Systems AG, Uedem, ermittelt.

Tabelle 5-1: Legierungszusammensetzung der Aluminiumlegierung EN AW-5182

Element	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	Ti	V
Gew.-%	Rest	5,05	0,12	0,28	0,03	0,30	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01

Die mechanischen Kennwerte des Blechwerkstoffs werden durch Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 mit gefrästen Flachzugproben der Form H20x80 ermittelt. Diese zeichnen

sich durch einen 20 mm breiten und 120 mm langen parallelen Prüfbereich aus, wobei die Anfangsmesslänge L_0 80 mm beträgt. Die mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 5-2 in Abhängigkeit der Orientierung zur Walzrichtung dargestellt. Der r-Wert bezeichnet hierbei den gemittelten r-Wert bis zur Gleichmaßdehnung.

Tabelle 5-2: Mechanische Kennwerte von EN AW-5182

Kennwert	Orientierung 0°	Orientierung 45°	Orientierung 90°
Obere Streckgrenze R_{eH} [MPa]	136,0	134,0	137,5
Zugfestigkeit R_m [MPa]	281,4	277,1	277,3
Bruchspannung R_B [MPa]	240,8	236,0	240,8
Gleichmaßdehnung A_g [%]	22,9	22,8	23,8
Bruchdehnung A [%]	26,6	25,3	25,8
r-Wert [-]	0,84	0,80	0,77
Elastizitätsmodul E [GPa]	-	-	70,7

Zur Untersuchung des Gefüges werden Schlibbilder des Blechwerkstoffes im nicht umgeformten Zustand angefertigt. Hierbei wird die Oberfläche teilweise auch geätzt, um Kontraste auf der Oberfläche besser hervorzuheben und so die Kornstruktur sichtbar zu machen.

In Abbildung 5-1 sind Mikroskopaufnahmen eines geätzten Schliffes der Aluminiumlegierung EN AW-5182 unter Verwendung eines zusätzlichen optischen Filters dargestellt. Hierbei kann festgestellt werden, dass die Korngröße nicht einheitlich verteilt ist, sondern sehr kleine Körner neben großen Körnern existieren. Die Körner weisen dabei eine relativ gleichmäßige Ausprägung sowohl in Walzrichtung als auch in der Blechdickenrichtung auf, wodurch kein Einfluss des Walzvorgangs auf die Kornform festgestellt werden kann. Die Größe der Körner liegt im Bereich zwischen etwa 4 μm bis 45 μm , was ASTM 6 - ASTM 13 entspricht.

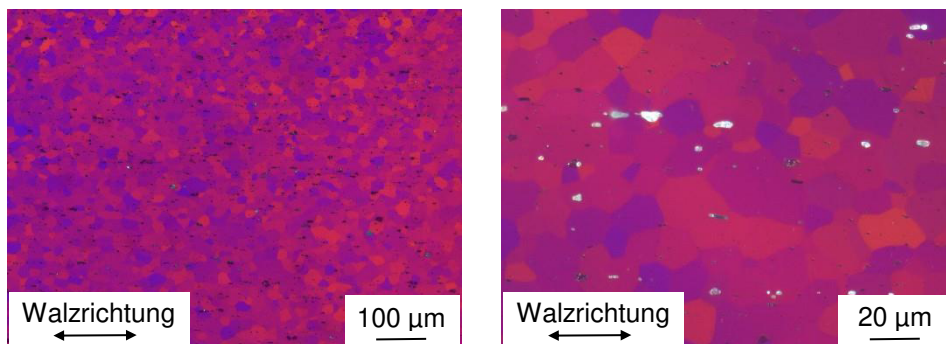


Abbildung 5-1: Kornstruktur der Aluminiumlegierung EN AW-5182

Ein Überblick über die Einschlüsse und Partikel, die im Werkstoff EN AW-5182 vorhanden sind, gibt Abbildung 5-2. Die Partikel sind sowohl innerhalb von Körnern als auch über Korngrenzen hinweg anzutreffen. Die durchschnittliche Länge der größeren Partikel in Walzrichtung beträgt etwa 15 μm , die durchschnittliche Höhe der größeren Partikel in Blechdickenrichtung

etwa 5-7 μm . Der prozentuale Anteil an Partikeln im Gefüge, der anhand von fünf unterschiedlichen Schliffaufnahmen ermittelt wurde, liegt bei 1,5 %.

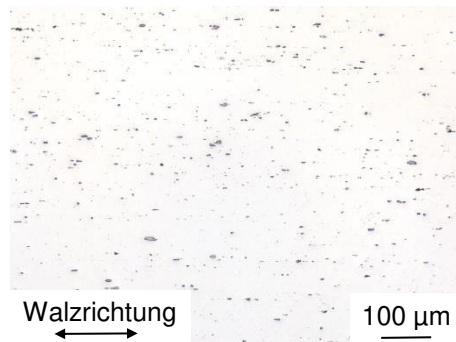


Abbildung 5-2: Einschlüsse und Partikel in der Aluminiumlegierung EN AW-5182

5.2 Aluminium EN AW-6082

Der Blechwerkstoff EN AW-6082 (AlSi1MgMn) wird im Zustand T4 und mit einer Blechdicke von $s = 1,5$ mm untersucht und ist den aushärtbaren Aluminiumlegierung zuzuordnen. Das beigeseetzte Silizium schafft in Verbindung mit Magnesium eine erhöhte Festigkeit des Werkstoffs. Aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften ist die Legierung daher vielseitig einsetzbar. (Wohnig, 2018)

Eine Besonderheit, die bei 6xxx-Aluminiumlegierungen angetroffen werden kann, sind Relaxationseffekte. So konnte in Untersuchungen von Meyers, Guimarães und Avilles (1979) durch zyklische, dehnungsgeregelte Belastung und Entlastung zylindrischer Zugproben aus einer EN AW-6061-Aluminiumlegierung (Zustand T6) gezeigt werden, dass die Fließspannung des Werkstoffs ansteigt, wenn zwischen den Belastungsphasen eine nur wenige Minuten andauernde Entlastungsphase erfolgt. Diese Beobachtungen können im Rahmen dieses Projektes bei zweistufigen Zugversuchen (Vordehnen und späteres Weiterdehnen bis zum Riss) bestätigt werden, wobei ebenfalls eine verbesserte Umformbarkeit im Vergleich zu einstufigen Zugversuchen (Dehnen aus dem unverformten Ausgangszustand bis zum Riss) festgestellt wird (vgl. Kapitel 9.1.2).

Der Werkstoff EN AW-6082 findet häufige Verwendung im Automobilsektor. Unter anderem wird er beispielsweise für Koppelquerlenker, geschmiedete Felgen oder in Form von Strangpressprofilen für Stoßdämpfer oder als Strukturteil für die Rohkarosserie verwendet. Im Gegensatz zu naturharten AlMg-Legierungen (wie EN AW-5182) kann die AlMgSi-Legierung auch für sichtbare Außenhautteile verwendet werden, da diese keine Fließfiguren ausbildet, die die Optik der Bauteiloberfläche beeinflussen könnten. (Ostermann, 2014)

In Tabelle 5-3 ist die Legierungszusammensetzung des Werkstoffs EN AW-6082 dargestellt. Diese wurde durch funkenspektrometrische Messungen mit einem Funkenspektrometer des Typs FOUNDRY-MASTER der Firma Worldwide Analytical Systems AG, Uedem, ermittelt.

Tabelle 5-3: Legierungszusammensetzung der Aluminiumlegierung EN AW-6082

Element	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	V	Ga
Gew.-%	Rest	0,70	1,27	0,21	0,02	0,57	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01

Die mechanischen Kennwerte des Blechwerkstoffs werden durch Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 mit gefrästen Flachzugproben der Form H20x80 ermittelt. Aufgrund des Datums des Prüfzertifikates der entsprechenden Charge muss davon ausgegangen werden, dass der Werkstoff bereits zu Beginn der Untersuchungen mehr als sechs Monate alt war. Da ab diesem Zeitpunkt keine weiteren Alterungsprozesse mehr im Werkstoff zu erwarten sind, können konstante mechanische Werkstoffeigenschaften über den Versuchszeitraum hinweg angenommen werden (Ostermann, 2014), (Timm, 2019). Dies wurde auch durch Zugversuche zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestätigt. Die Ergebnisse der Zugversuche für den Anlieferungszustand (T4, überaltert) sind in Tabelle 5-4 in Abhängigkeit der Orientierung zur Walzrichtung dargestellt. Alle Kantenrissuntersuchungen werden bei EN AW-6082 im Zustand T4 durchgeführt.

Tabelle 5-4: Mechanische Kennwerte von EN AW-6082 (Zustand T4, überaltert)

Kennwert	Orientierung 0°	Orientierung 45°	Orientierung 90°
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	161,8	153,7	155,1
Zugfestigkeit R_m [MPa]	266,1	257,8	260,8
Bruchspannung R_B [MPa]	243,1	234,9	244,6
Gleichmaßdehnung A_g [%]	19,0	19,4	19,1
Bruchdehnung A [%]	23,2	24,1	23,5
r-Wert [-]	0,60	0,72	0,68
Elastizitätsmodul E [GPa]	-	-	68,8

Gemäß VDA-Empfehlung 239-300 wird für die Prüfung zyklischer Kennwerte der Zustand W185 empfohlen. Diese Wärmebehandlung simuliert den Beschichtungs-Einbrennprozess und entspricht einer Wärmebehandlung bei 185 °C bei einer Temperatur-Haltedauer von 20 Minuten. Hierzu werden ebenfalls die mechanischen Kennwerte gefräster Flachzugproben der Form H20x80 ermittelt, welche zuvor einer W185-Wärmebehandlung unterzogen wurden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5-5 in Abhängigkeit der Orientierung zur Walzrichtung präsentiert. Es kann festgestellt werden, dass kein Einfluss der W185-Wärmebehandlung auf die mechanischen Kennwerte ersichtlich ist. Alle im Zustand W185 ermittelten Kennwerte liegen innerhalb der bei den Versuchen im Zustand T4 berechneten Standardabweichungen.

Diese Untersuchungsergebnisse werden durch Literaturquellen gestützt, die für den Werkstoff EN AW-6082 zur Aushärtung eine Wärmebehandlung von deutlich mehr als 20 Minuten Dauer empfehlen. So schlägt Ostermann (2014) für diese Aluminiumlegierung eine Wärmebehandlung bei 165 °C und einer Temperatur-Haltedauer von 10 Stunden vor.

Sämtliche im Rahmen des Projektes untersuchten Schwingproben aus EN AW-6082 werden dennoch im Zustand W185 untersucht, um der VDA-Empfehlung 239-300 zu folgen.

Tabelle 5-5: Mechanische Kennwerte von EN AW-6082 (Zustand nach W185)

Kennwert	Orientierung 0°	Orientierung 45°	Orientierung 90°
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	163,3	155,3	156,2
Zugfestigkeit R_m [MPa]	267,2	259,5	261,1
Bruchspannung R_B [MPa]	248,3	239,0	239,8
Gleichmaßdehnung A_g [%]	18,8	19,8	19,6
Bruchdehnung A [%]	23,1	25,0	24,8
r-Wert [-]	0,61	0,74	0,66

In Abbildung 5-3 sind Mikroskopaufnahmen eines geätzten Schliffes der Aluminiumlegierung EN AW-6082 unter Verwendung eines zusätzlichen optischen Filters dargestellt. Der Einfluss des Walzens ist ersichtlich, da die Körner tendenziell in Walzrichtung gestreckt sind. Die Größe der Körner in Walzrichtung liegt bei etwa 10-50 µm, in Blechdickenrichtung bei etwa 5-30 µm. Dies entspricht Korngrößen im Bereich von ASTM 6 - ASTM 12.

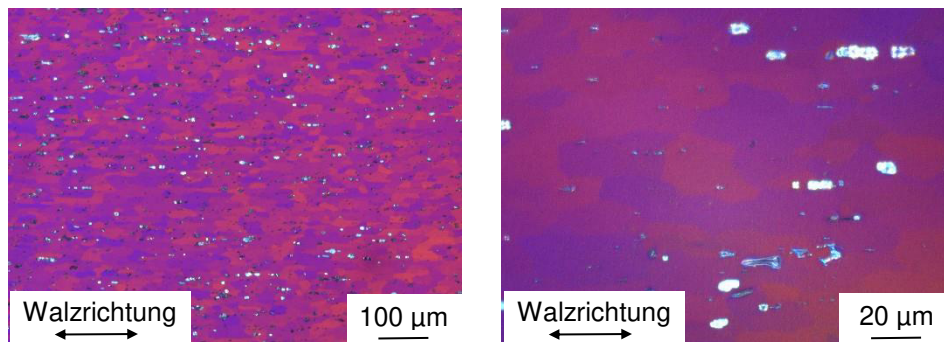


Abbildung 5-3: Kornstruktur der Aluminiumlegierung EN AW-6082

Ein Schriffbild, in welchem die Einschlüsse und Partikel im Werkstoff EN AW-6082 ersichtlich sind, ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Im Gegensatz zum Werkstoff EN AW-5182 sind die Partikel tendenziell eher zwischen den einzelnen Körnern beziehungsweise im Bereich der Korngrenzen angesiedelt. Die durchschnittliche Länge der größeren Partikel in Walzrichtung beträgt etwa 15 µm, die durchschnittliche Höhe der größeren Partikel in Blechdickenrichtung etwa 6-10 µm. Der prozentuale Anteil an Partikeln im Gefüge, der anhand von fünf unterschiedlichen Schriffaufnahmen ermittelt wurde, liegt bei 2,3 %.

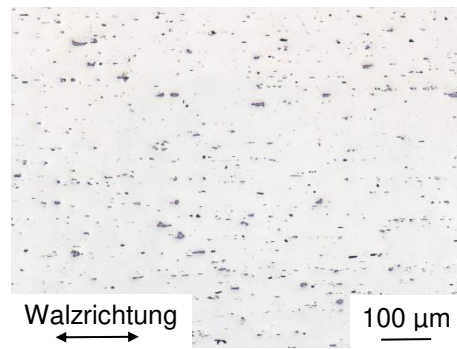


Abbildung 5-4: Einschlüsse und Partikel in der Aluminiumlegierung EN AW-6082

6 Probenherstellung

6.1 Zugproben-Scherschneidwerkzeug (utg)

Zur Herstellung der schergeschnittenen Kantenrisszugproben sowie der schergeschnittenen Schwingproben mit der Kerbformzahl $K_t = 1$ wird ein am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) entwickeltes Zugproben-Scherschneidwerkzeug verwendet. Der Einsatz einer 4-Säulen-Führung mit Kugelhäufigen und gehärteten Führungsbuchsen zur spielfreien Lagerung ermöglicht die Herstellung von hochpräzisen Geometrien. Eine hohe Werkzeugsteifigkeit garantiert eine exakte Positionierung der Schneidelemente. Mögliche Positionsabweichungen, welche durch Durchbiegung oder Verschiebungen im Schneidvorgang verursacht werden können, werden dadurch verhindert. (Feistle et al., 2017), (Feistle, Golle und Volk, 2015), (Lange, 1990)

Das Schneidwerkzeug lässt sich allgemein in die drei Ebenen Stempелеbene, Niederhalterebene und Matrizenebene unterteilen. Die Basis der Matrizenebene stellt die Grundplatte dar. An dieser sind die Säulenführungen und die Matrize montiert, welche beim Zusammenbau mittels Passstiften am Niederhalter ausgerichtet wird. In der Niederhalterebene bildet die Mittelbundplatte die Basis für alle weiteren Anbauten. Ein Anbauteil ist die Niederhalterplatte, die zur korrekten Positionierung mit der Mittelbundplatte verstiftet ist. Neben der Funktion als Blechniederhalter führt die Niederhalterplatte den Stempel hochgenau und stellt damit dessen exakte Positionierung sicher. Zudem sind in der Niederhalterplatte zwei Sucherstifte integriert. Diese greifen in die Sucherlöcher der Probenrohlinge und richten diese sowohl beim einstufigen als auch beim zweistufigen Schneiden exakt aus. Des Weiteren sind an der Mittelbundplatte die vier Führungssäulen des Werkzeuges angebracht. Um ein selbstständiges Öffnen des Werkzeuges nach dem Schneidvorgang zu ermöglichen werden zwischen Niederhalterebene und Matrizenebene vier Spiralfedern eingesetzt. Das Grundelement der Stempелеbene stellt die Kopfplatte dar. An ihr sind die Gasarmatur und die damit über Leitungen verbundenen Gasdruckfedern montiert, durch welche die Niederhalterkraft variabel einstellbar ist. Weitere Elemente an der Kopfplatte sind der Stempel mit Stempelaufsatz und die Druckplatte. Durch die gehärtete Druckplatte können die beim Scherschneidprozess entstehenden Druckkräfte gleichmäßig in die Kopfplatte eingeleitet werden. Ein Schnitt durch das Versuchswerkzeug ist in Abbildung 6-1 dargestellt. (Feistle et al., 2017)

Das Werkzeug ist für eine maximale Schneidkraft von 1119 kN ausgelegt, was der Herstellung einer Kantenrisszugprobe aus 6 mm dickem Stahl mit einer Zugfestigkeit von 1200 N/mm² entspricht. (Feistle et al., 2017)

Um unterschiedliche Schneidstrategien und Probengeometrien abzubilden, kann das Werkzeug mit verschiedenen individuell angefertigten Aktivelementen ausgestattet werden. Ein Überblick über die fünf im Rahmen des Projektes untersuchten Scherschneidstrategien ist in Kapitel 7 (Versuchsplan) in Tabelle 7-1 gegeben.

Sowohl zur Herstellung der Kantenrisszugproben als auch der Schwingproben mit der Kerbformzahl $K_f = 1$ werden Stempel mit einer Stempelbreite von 30 mm verwendet. Diese einheitliche Stempelbreite ist insbesondere beim geschlossenen Schnitt von Bedeutung, da dadurch die Steifigkeit des Butzens beeinflusst wird, welche wiederum Auswirkungen auf die Eigenschaften der Schnittfläche sowie der Schereinflusszone hat. In Abbildung 6-2 sind Stempel-Schneidaktivelemente für Kantenrisszugproben der Strategien Schneiden 1 (links) sowie Schneiden 5 (rechts) abgebildet.

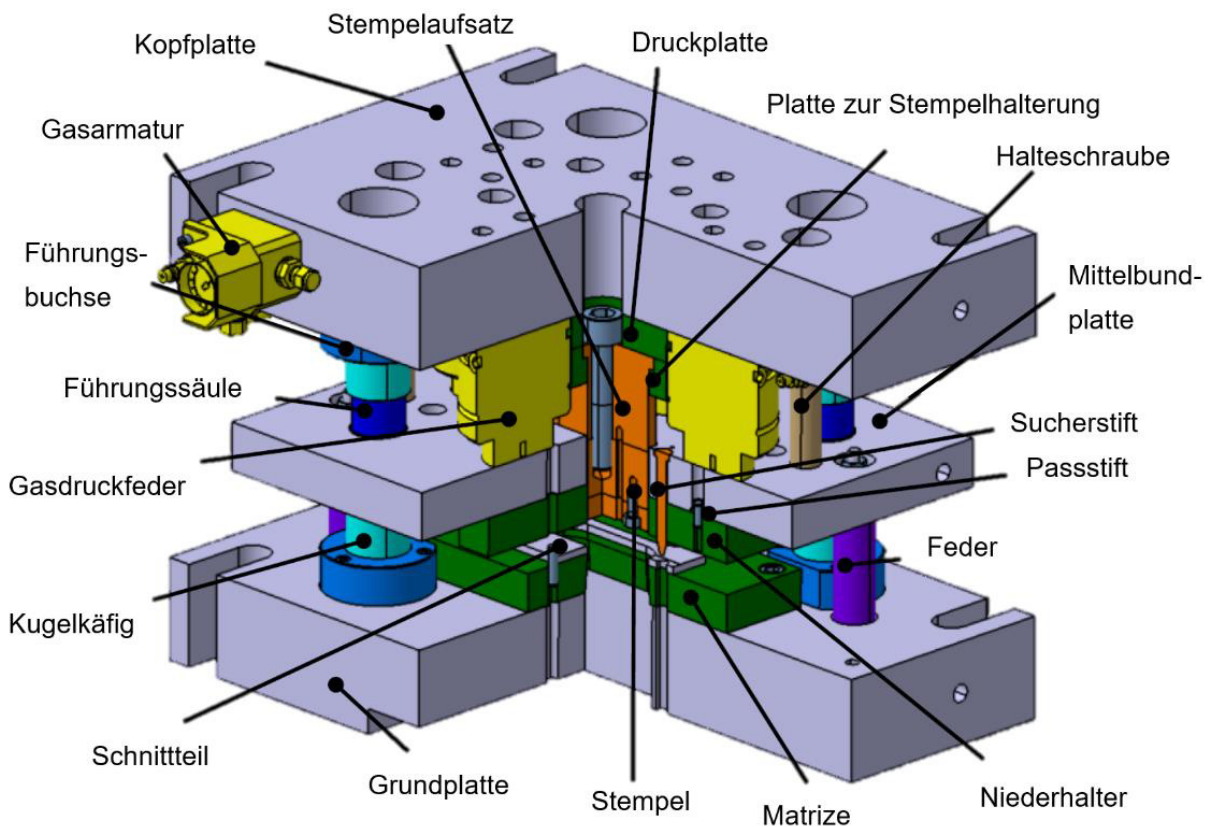


Abbildung 6-1: Schnitt durch das Zugproben-Scherschneidwerkzeug (Feistle et al., 2017)

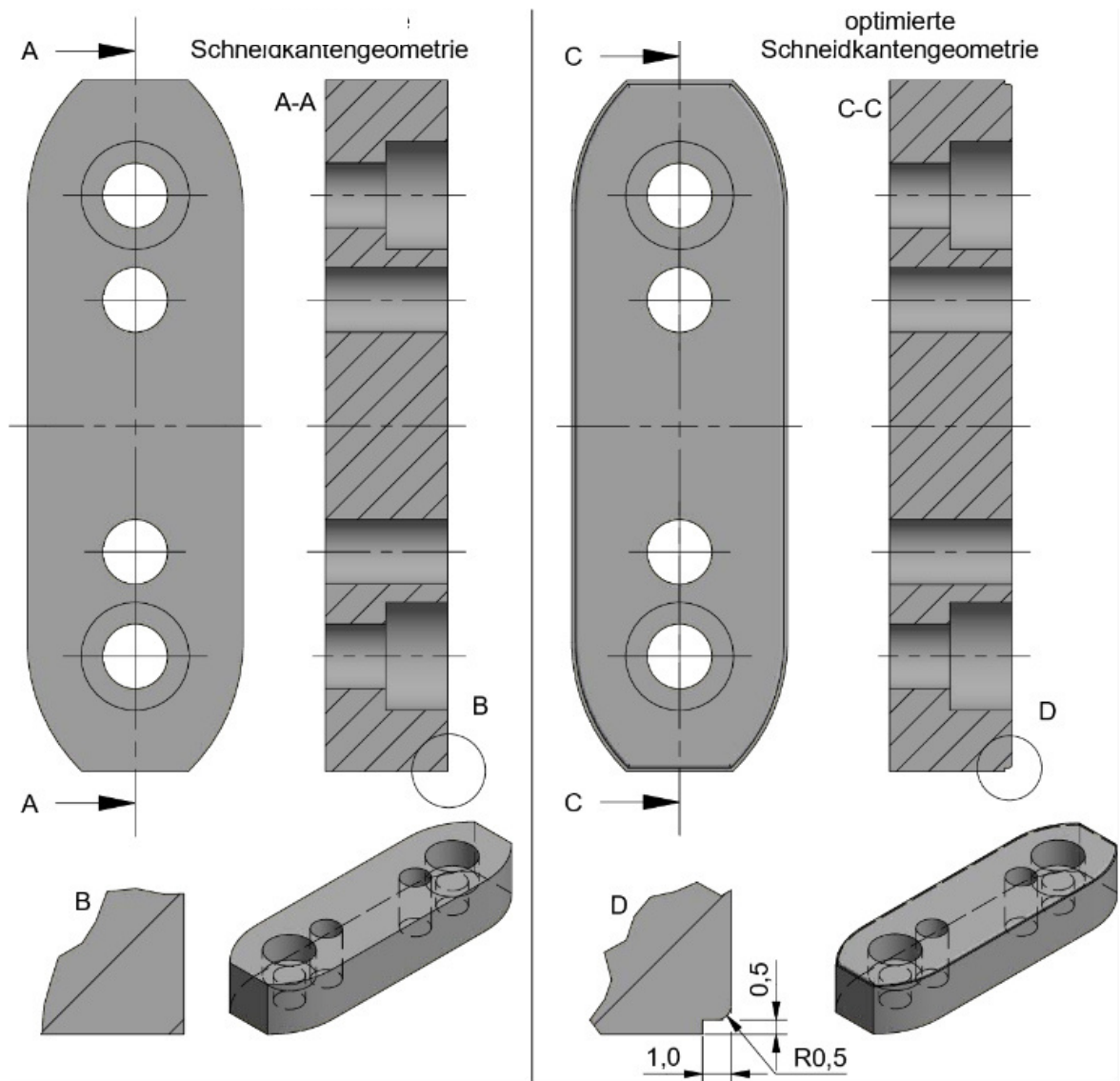


Abbildung 6-2: Stempel-Schneideaktivelemente für Kantenrisszugproben: Schneiden 1 (links) und Schneiden 5 (rechts)

6.2 Universal-Scherschneidwerkzeug (utg)

Die Fertigung der Schwingproben mit den Kerbformzahlen $K_t = 2,5$ und $K_t = 4,7$ erfolgt mit einem am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) entwickelten Universal-Scherschneidwerkzeug. Dieses Werkzeug zeichnet sich insbesondere durch seinen modularen Aufbau kombiniert mit hoher Präzision aus. Die drei Werkzeugebenen Stempellebene, Niederhalterebene und Matrizebene sind zueinander durch eine spielfreie 4-Säulen-Führung positioniert. Zudem wird der Schneidstempel durch eine in der Niederhalterebene verbaute Stempel-führung geführt. Der modulare Aufbau ermöglicht eine einfache Anpassung der Aktivelemente an die herzustellende Probengeometrie, weshalb mit diesem Werkzeug sowohl die kreisrunden Löcher für die Schwingproben mit Kerbformzahl $K_t = 2,5$, als auch die Langlöcher für die Proben mit Kerbformzahl $K_t = 4,7$ geschnitten werden können. Eine exakte Positionierung der

Ausschnitte wird durch Sucherstifte im Werkzeug ermöglicht, welche in die bereits zuvor eingebrachten Sucherlöcher der Ausgangsplatte eingreifen und diese entsprechend ausrichten. Das verwendete Universal-Scherschneidwerkzeug ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

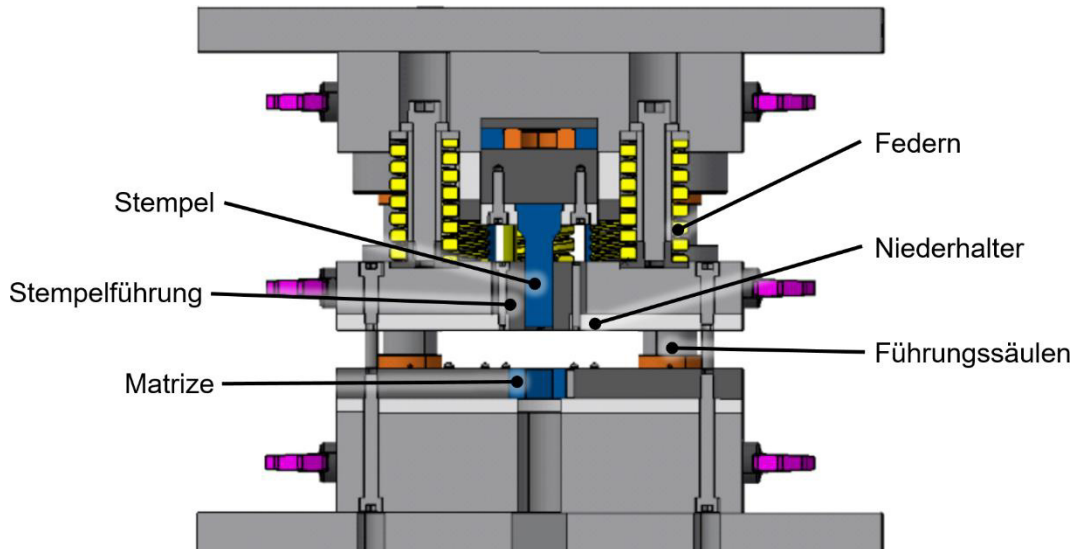


Abbildung 6-3: Schnitt durch das Universal-Scherschneidwerkzeug

6.3 Polierte Proben (HS Esslingen)

Die Proben, welche poliert werden sollen, werden zunächst spanend hergestellt. Die Kanten der ungekerbten Probe werden anschließend in Anlehnung an die Prüfrichtlinie VDA239-300 in mehreren Schritten manuell geschliffen und anschließend mit einem zylindrischen Filzstift (Durchmesser 25 mm) und Polierpaste poliert. Zielsetzung ist eine gemittelte Rautiefe R_z , die kleiner ist als jene der Walzoberfläche. Für die im vorliegenden Projekt betrachteten Al-Knetlegierungen weist die Walzoberfläche etwa eine gemittelte Rautiefe $R_z = 3 \mu\text{m}$ auf.

Final soll die polierte Kante rechtwinklig sein und die Ecken sind gleichmäßig zu verrunden. Der Eckradius soll dabei kleiner einem Viertel der Blechdicke sein.

Die Kante der Bohrung der Lochprobe ($K_t = 2,5$) wird analog bearbeitet, allerdings werden zylindrische Schleif- und Polierstifte mit einem Durchmesser von 12 mm eingesetzt.

Da die Kerbradien der Schlitzprobe ($K_t = 4,6$) zu klein sind, um den Kerbgrund polieren zu können, wird der Kerbgrund bei dieser Probenvariante lediglich an der Walzoberfläche entgratet.

6.4 Laserstrahlgeschnittene Proben (HS Esslingen)

Die laserstrahlgeschnittenen Proben werden alle auf einer Trumpf TruLaser Cell 3000 an der Hochschule Esslingen gefertigt. Die relevanten Schneidparameter sind: Maximale Leistung von 4 kW, 2 mm Düsendurchmesser, 1 mm Fokuslage, Schneidgas Stickstoff, 12 bar Gasdruck und

eine maximale Schnittgeschwindigkeit von 9,8 m/min. Es sei angemerkt, dass die Laserschneidanlage diese Parameter abhängig von der zu schneidenden Probengeometrie lokal anpasst, d. h. beispielsweise bei kleinen Radien eine Anpassung der Schnittgeschwindigkeit vornimmt. Für die Erstellung wird darauf geachtet, dass der Einstichpunkt des Laserstrahls, kennzeichnend für den Schneidbeginn, nicht im Bereich des Kerbgrundes der gekerbten Proben bzw. im parallelen Prüfbereich der ungekerbten Proben liegt.

Eine weitere Bearbeitung der Kanten der laserstrahlgeschnittenen Proben wurde nicht durchgeführt.

7 Versuchsplan

Die Untersuchungen zur Kantenrissempfindlichkeit beim Umformen sowie zur Schwingfestigkeit von schergeschnittenen Aluminiumproben folgten den in Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 dargestellten strukturierten Vorgehensweisen.



Abbildung 7-1: Versuchsplan utg

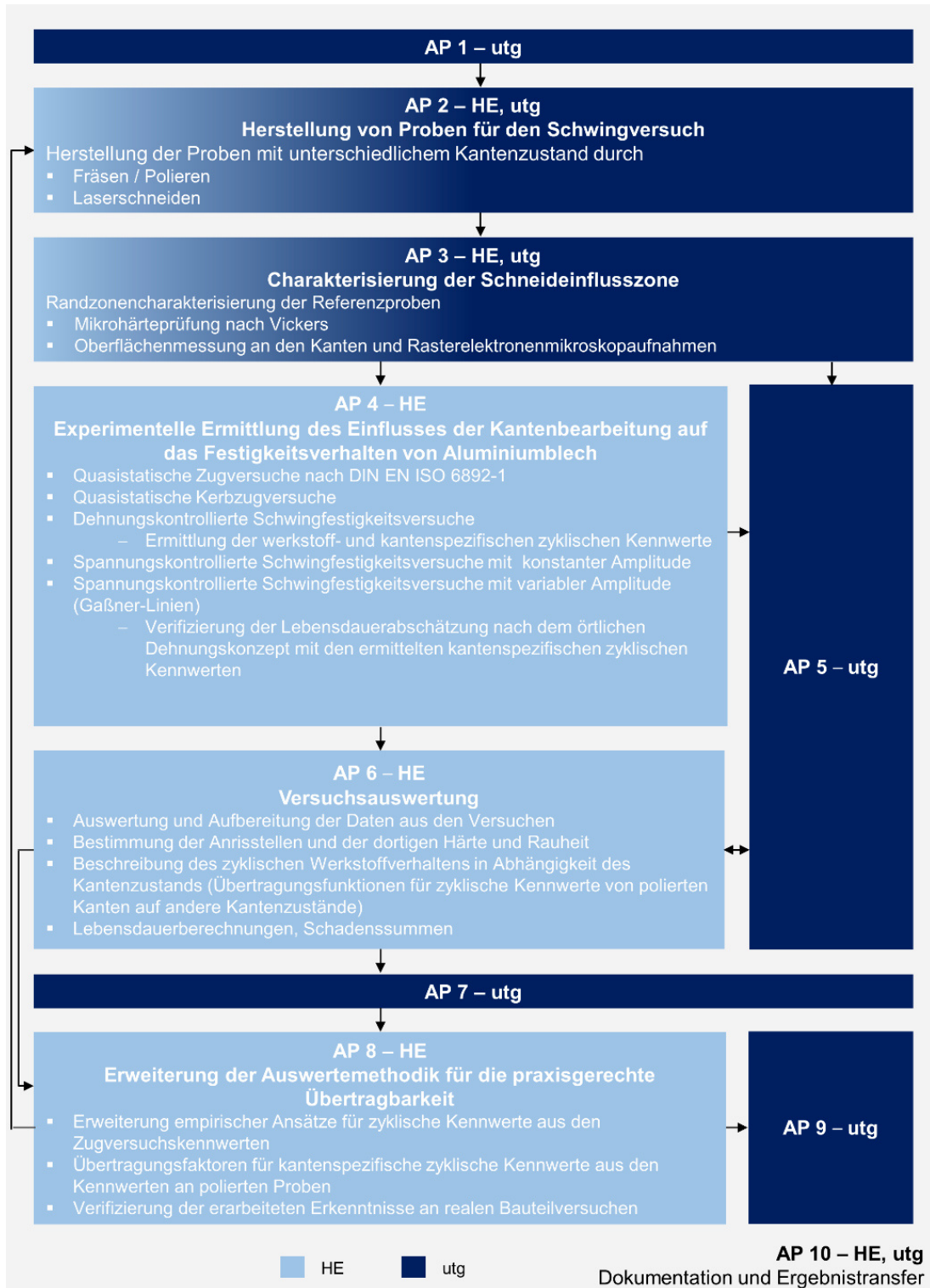


Abbildung 7-2: Versuchsplan Hochschule Esslingen (HE)

Ein Überblick über alle untersuchten Schneidstrategien sowie deren relevante Schneidparameter ist in Tabelle 7-1 gegeben.

Tabelle 7-1: Übersicht über die untersuchten Schneidstrategien

Schneidstrategie	Bezeichnung	Schneidparameter
Schneiden 1	Referenz	$U_{rel} = 10 \%$; $r < 10 \mu\text{m}$ offener Schnitt
Schneiden 1G	Referenz geschlossen	$U_{rel} = 10 \%$; $r < 10 \mu\text{m}$ geschlossener Schnitt
Schneiden 2	Beschichtung	$U_{rel} = 10 \%$; $r < 10 \mu\text{m}$; offener Schnitt Stempel DLC-beschichtet
Schneiden 3	Kaltauf- schweißungen	$U_{rel} = 10 \%$; $r < 10 \mu\text{m}$; offener Schnitt Stempel im Dauerhub kaltaufgeschweißt
Schneiden 4a	zweistufiges Scher- schneiden	$U_{rel,vor} = U_{rel,nach} = 10 \%$; $r_V < 10 \mu\text{m}$; Vorschneiden mit of- fennem Schnitt; $r_N < 10 \mu\text{m}$; $z = 0,3 \text{ mm}$
Schneiden 4b	zweistufiges Scher- schneiden	$U_{rel,vor} = U_{rel,nach} = 10 \%$; $r_V < 10 \mu\text{m}$; Vorschneiden mit of- fennem Schnitt; $r_N = 50 \mu\text{m}$; $z = 0,3 \text{ mm}$
Schneiden 5	frühzeitige Rissinitiie- rung	$U_{rel} = 10 \%$; $r < 10 \mu\text{m}$; offener Schnitt gestufter Stempel zur Blechvorbiegung
Laser	gelaserte Probenkante	4 kW maximale Leistung, 2 mm Düsendurchmesser, 1 mm Fokusslage, Schneidgas Stickstoff, 12 bar Gasdruck 9,8 m/min maximale Schnittgeschwindigkeit

Tabelle 7-2 gibt einen Überblick über die durchgeführten spannungs- und dehnungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche.

An Proben der Legierung EN AW-5182 (AA5182) wurden Versuchsreihen durchgeführt, die über die ursprüngliche Versuchsplanung hinausgehen. Dies war durch die verzögerte Bereitstellung der Legierung EN AW-6082 (AA6082) möglich.

Da Stichproben an polierten und laserstrahlgeschnittenen Proben der Legierung EN AW-6082 keinen Einfluss durch die Wärmebehandlung W185 nach VDA-Empfehlung VDA239-300 auf das Schwingfestigkeitsverhalten zeigten, wurden die Schwingfestigkeitsversuche an polierten und laserstrahlgeschnittenen Proben ohne Wärmebehandlung durchgeführt (Zustand bei Anlieferung ist T4).

8 Versuchsdurchführung

8.1 Kantenrisszugversuche (utg)

Im Rahmen der Kantenrisszugversuche werden sowohl einseitig schergeschnittene Kantenrisszugproben als auch beidseitig gefräste Referenzproben auf der Universalprüfmaschine Z150 der Firma ZwickRoell, Ulm, mit einer konstanten Dehnrates von 0,004 1/s bis zum Versagen gedehnt (je Schneidstrategie mindestens 10 Proben). Zur örtlich und zeitlich aufgelösten Ermittlung der Blechumformgrade wird die Probe über die komplette Dauer des Zugversuchs hinweg mit den beiden Kameras des optischen 3D-Verformungsanalyse-Systems Aramis der Firma GOM, Braunschweig, mit einer Frequenz von 15 Hz aufgenommen. Um die Erzeugung von Facetten durch die Software zu ermöglichen, wird zuvor ein kontrastreiches stochastisches Farbsprühmuster auf der Blechoberfläche aufgebracht. Bei der Auswertung wird im letzten Kamerabild vor Bruch der Oberflächenpunkt mit der maximalen Blechdurchdünnung (Verformungsbruch) bzw. mit dem größten Vergleichsumformgrad am Rand (Kantenriss) bestimmt. Anschließend wird für diesen Punkt der zeitliche Verlauf der Umformhistorie (Hauptumformgrad, Nebenumformgrad und Blechdurchdünnung) ermittelt. Um den Hauptumformgrad bei Beginn der plastischen Instabilität zu ermitteln, wird die zeitliche Auswertemethode nach Volk und Hora (2011) herangezogen.

8.2 Kragenziehversuche (utg)

Zur Validierung der Ergebnisse aus dem Kantenrisszugversuch werden für ausgewählte Schneidstrategien Kragenziehversuche durchgeführt. Dafür werden zunächst mit einem Scherschneidwerkzeug die Versuchsproben mit einem kreisrunden Loch (Durchmesser 50 mm) der jeweiligen Schneidstrategie gefertigt. Anschließend wird das Loch mit einem separaten Kragenziehwerkzeug auf verschiedene diskrete Kragendurchmesser aufgeweitet, wobei für jeden Durchmesser ein eigener Satz Aktivelemente (Stempel mit Stempelführung und Matrize) benötigt wird. Um übermäßigem Werkzeugverschleiß entgegenzuwirken, wird zusätzlicher Schmierstoff auf die Blechoberfläche aufgebracht. Die Breite des Ziehspaltes beträgt bei allen Aufweitedurchmessern umlaufend konstant 3,5 mm und die Ziehrichtung des Kragens wird so gewählt, dass sich der Grat auf der dem Stempel abgewandten Seite befindet. Die Einteilung der auf verschiedene Durchmesser aufgeweiteten Krägen in Gutteile und Schlechteile erfolgt mittels Sichtprüfung, wobei ein durchgehender Riss an der schergeschnittenen Kante über die ganze Blechdicke als Versagenskriterium definiert wird.

Das im Versuch realisierte Lochaufweitungsverhältnis berechnet sich zu:

$$\lambda = \frac{D_h - D_0}{D_0} \times 100 \%$$

- λ Lochaufweitungsverhältnis [%]
 D_h Durchmesser des Kragenziehstempels [mm]
 D_0 Lochdurchmesser vor Versuchsdurchführung [mm]

In Abbildung 8-1 ist das für die Versuche verwendete Scherschneidwerkzeug sowie das Kragenziehwerkzeug dargestellt.

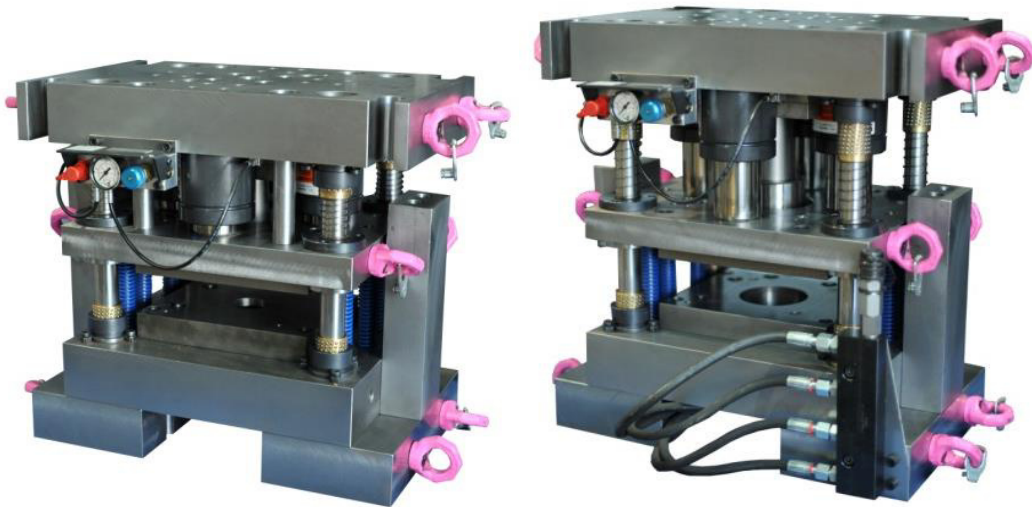


Abbildung 8-1: Scherschneidwerkzeug (links) und Kragenziehwerkzeug (rechts)

8.3 Mikrohärtemessungen (utg)

Die durch den Scherschneidprozess bedingte Aufhärtung in der Schereinflusszone wird anhand von Mikrohärtemessungen untersucht. Dabei werden je Schneidstrategie mindestens drei Proben an unterschiedlichen Positionen quer aus einer Kantenrisszugprobe entnommen. Diese Probenstücke werden mit einem Polyesterharz eingebettet und über einen mehrstufigen Prozess geschliffen und poliert, bis eine Politurkörnung von 3 μm erreicht ist.

Die Vickershärtemessungen erfolgen automatisiert mit dem Mikrohärteprüfer AMH-43 der Firma LECO Instrumente, Mönchengladbach, wobei eine nach DIN EN ISO 6507 genormte quadratische Diamantpyramide mit einer Prüfkraft von HV 0,025 und einer Lasthaltezeit von 13 Sekunden anhand eines zuvor festgelegten Prüfrasters in die Probenoberfläche gedrückt wird. Die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten des Prüfrasters sowie die Abstände zwischen Messpunkten und dem Rand der Probe entsprechen den Vorgaben nach DIN EN ISO 6507-1, wobei die Härteprüfungen bis in eine Blechtiefe von 2,0 mm, gemessen ab der Glattschnittfläche, vorgenommen werden. Das zur Positionierung der Eindrücke verwendete Prüfraster ist in Abbildung 8-2 zu sehen.

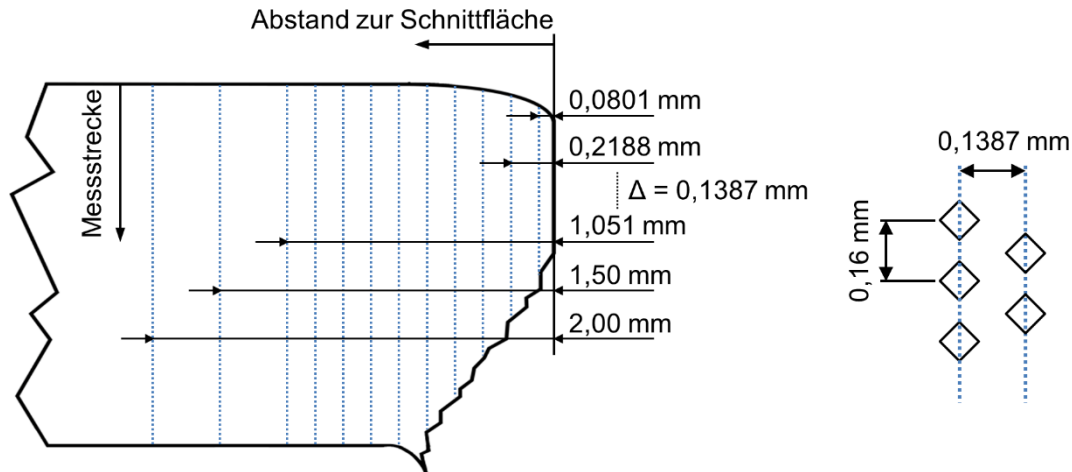


Abbildung 8-2: Prüfraster für die Mikrohärteeindrücke

8.4 Rauheitsmessungen und Schnittflächentopographie (utg)

Die Ermittlung der Rauheiten im Glattschnitt- und im Bruchbereich der Schnittflächen sowie die Messung der Längshöhensprünge an den kritischen Bereichen erfolgt mit Hilfe eines Laserkonfokalmikroskops des Typs VK-X150 der Firma Keyence, Osaka, Japan. Hierzu wird die Schnittfläche über die komplette Blechdicke und einer Breite von mindestens 2300 μm durch einen Laser abgetastet und ein 3-dimensionales Modell der Oberflächenstruktur erstellt.

Die Messungen der Rauheiten im Glattschnitt- und im Bruchbereich erfolgen separat an mindestens zwei verschiedenen Kantenrisszugproben, wobei jeweils 30 zur Kante parallele Messlinien gleichmäßig über den gesamten Messbereich verteilt werden. Zur Bestimmung der gemittelten Rautiefe R_z wird die Grenzwellenlänge λ_c gemäß DIN EN ISO 4288 gewählt.

Die Längshöhensprünge werden ebenfalls anhand der aufgenommenen Mikroskopaufnahmen mit einer Mindestbreite von 2300 μm bestimmt. Dabei wird das Höhenprofil an den kritischen Bereichen der Schnittfläche (Übergang (Sekundär-)Glattschnitt – Bruch) an mehreren zur Kante parallelen Messlinien ermittelt. Innerhalb dieser Höhenprofile wird anschließend der maximale Höhengsprung Δh bestimmt. Dies ist in Abbildung 8-3 beispielhaft illustriert.

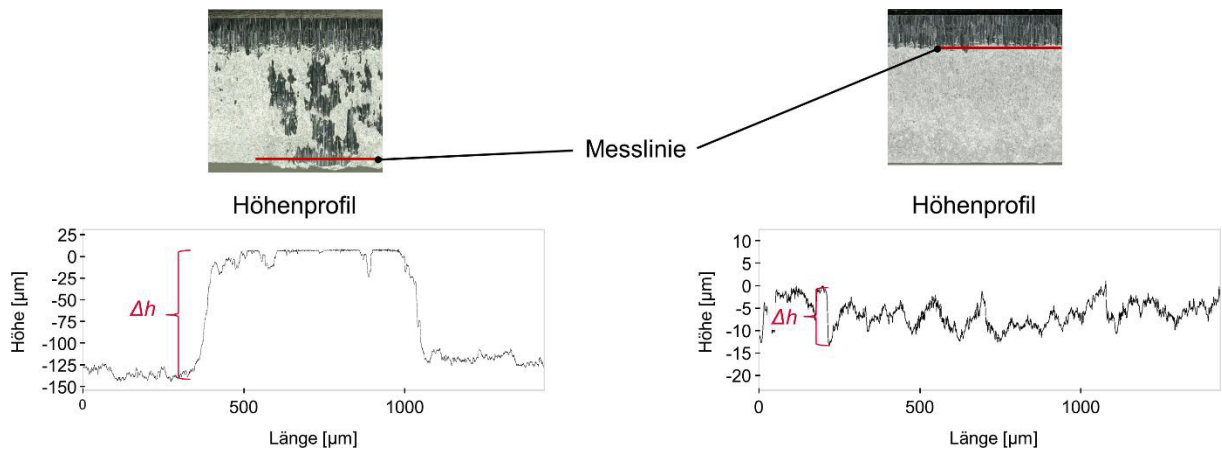


Abbildung 8-3: Ermittlung des maximalen Höhengsprungs Δh im Bereich Sekundärglattschnitt/Bruch (links) und im Bereich Glattschnitt/Bruch (rechts)

8.5 Geometrische Schnittflächenkenngrößen (utg)

Die charakteristischen Anteile der sich beim Scherschneiden ausbildenden Schnittflächenkontur werden mit Hilfe des taktilen Oberflächenmessgerätes MarSurf XCR 20 mit einer PCV 200 Vorschubeinheit der Firma Mahr GmbH, Göttingen, ermittelt. Dazu werden zu jeder Schneidstrategie drei Proben an jeweils drei verschiedenen Messstellen – in der Probenmitte und jeweils 25 mm zu jeder Seite versetzt – vermessen. Anhand des sich daraus ergebenden 2D-Messprofils werden die Schnittflächenkenngrößen gemäß VDI-Richtlinie 2906-1 bestimmt.

8.6 Schwingfestigkeitsversuche (HS Esslingen)

8.6.1 Spannungsgeregelte Versuche

Die Ergebnisse der spannungsgeregelten Versuche, nach August Wöhler auch als Wöhler-Versuche bezeichnet, werden als Wöhlerlinie dargestellt. Bei doppeltlogarithmischer Auftragung ergibt sich im Zeitfestigkeitsgebiet eine Gerade, vergleiche Abbildung 8-4. Diese gibt auch die übliche mathematische Beschreibung.

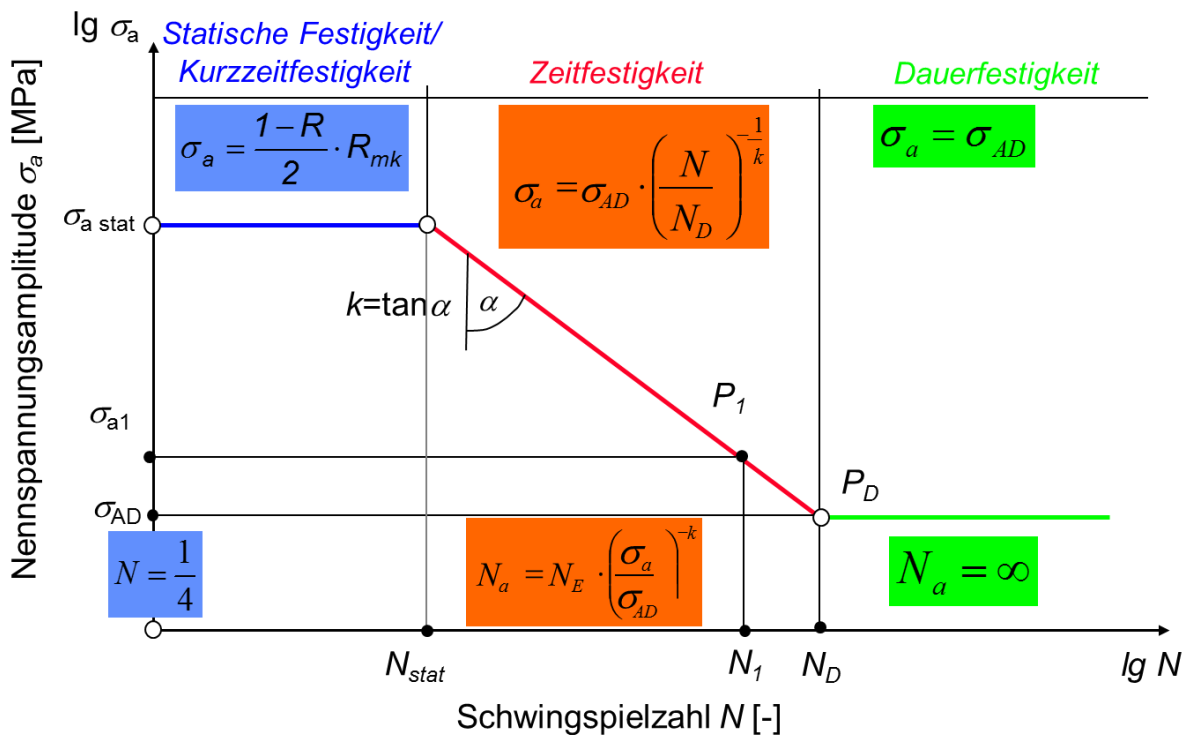


Abbildung 8-4: Schematische Darstellung und mathematische Beschreibung der Wöhlerlinie Typ I, (Häfele und Thum, 2020)

Untersuchungsschwerpunkt des Forschungsvorhabens ist das Zeitfestigkeitsgebiet. Entsprechend wird dieser Bereich mit 16-18 Versuchspunkten auf drei bis vier Lasthorizonten belegt. Anschließend werden nur die Zeitfestigkeitsgeraden dargestellt, die nach dem Perlenschnurverfahren ausgewertet werden. Die jeweils ein bis zwei durchgeführten Durchläufer, d. h. Versuche, welche die Grenzwahlzahl von $N = 10^7$ ohne erkennbaren Anriss erreichen, geben jedoch einen Eindruck zum Schwingfestigkeitsverhalten im Übergangsbereich zur sogenannten Dauerfestigkeit. Für Aluminium-Werkstoffe ist hier mit dem Wöhlerlinien-Typ II zu rechnen. Es tritt also kein horizontaler Verlauf der Wöhlerlinie oberhalb des Abknickpunktes auf. Stattdessen fällt sie weiter ab, wenngleich auch mit verringerter Neigung, d. h. flacherem Verlauf.

Für das Perlenschnurverfahren werden auf mehreren Lasthorizonten Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt. Aus einer linearen Regression der Versuche, welche zum Versagen führten (Anriss oder Bruch) erfolgt die Wöhlerlinie in Form der Zeitfestigkeitsgerade für eine Ausfallswahrscheinlichkeit von $P_A = 50\%$ (Müller, 2015). Die Zeitfestigkeitsgerade beschreibt also die Lebensdauer, bis zu welcher die Hälfte der Proben unter Beanspruchung mit einer konstanten Spannungsschwingungsbereich ausgefallen ist. Alle Schwingfestigkeitsversuche unterliegen einer statistischen Streuung. Es ist üblich diese mit Hilfe der Streuspanne T_N zu beschreiben. Diese ist definiert als das Verhältnis der Lebensdauern mit 10 %iger ($N_{PA=10\%}$) und 90 %iger ($N_{PA=90\%}$) Ausfallswahrscheinlichkeit.

$$T_N = \frac{N_{P_A=90\%}}{N_{P_A=10\%}}$$

Im Rahmen des Perlenschnurverfahrens wird eine über den gesamten Last- bzw. Schwingspielzahlbereich konstante Streuspanne der Zeitfestigkeitsgeraden angenommen. Diese wird, unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung, aus der Standardabweichung der Stichprobe bestimmt. Hierfür werden alle Versuchspunkte parallel entlang der 50 %-Wöhlerlinie auf einen gemeinsamen Lasthorizont verschoben (Müller, 2015).

Jede Wöhlerlinie gilt immer nur für einen definierten Werkstoff- und Kantenzustand, sowie für ein konstantes Spannungsverhältnis R . Dies ist definiert als das Verhältnis der Unterspannung σ_u zur Oberspannung σ_o

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

und beschreibt damit auch das Verhältnis aus Mittelspannung σ_m und Spannungsamplitude σ_a . Nähere Informationen zum Mittelspannungseinfluss finden sich im Abschnitt zum Stand der Technik.

Für die Versuche mit variabler Amplitude unterscheidet sich das Auswerteverfahren nicht von denen mit konstanter Amplitude. Es werden mehrere Versuche je Kollektivhöchstwert durchgeführt. Um Lebensdauerlinien, das Pendant zur Wöhlerlinie, erstellen zu können, werden die Lastkollektive in Lastrichtung skaliert. Dabei wird jedoch der Omission-Wert auf einem konstanten Niveau gehalten. Dies folgt der Annahme, dass es sich beim Omission-Wert um eine Art Werkstoffkennwert handelt und wird einer prozentualen Angabe bezogen auf den Kollektivhöchstwert vorgezogen.

8.6.2 Dehnungsgeregelte Versuche

Wie auch für die Wöhlerlinie der spannungsgeregelten Versuche, werden mehrere dehnungsgeregelte Versuche je Lasthorizont durchgeführt. Die Anzahl und Verteilung orientiert sich nach der Richtlinie VDA239-300 und liegt bei etwa drei Versuchen auf vier verschiedenen Dehnungshorizonten.

Im Gegensatz zu den spannungsgeregelten Versuchen, ergibt sich für die Gesamtdehnungswöhlerlinie jedoch auch im doppeltlogarithmischen Maßstab keine Gerade. Diese ergibt sich aus der Summe des elastischen und plastischen Anteils der Dehnungsamplitude und wird mathematisch zumeist durch die Manson-Coffin-Beziehung beschrieben.

$$\varepsilon_{a,ges} = \varepsilon_{a,elastisch} + \varepsilon_{a,plastisch} = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N)^b + \varepsilon_f' \cdot (2N)^c$$

Die getrennten, elastischen und plastischen Anteile der Dehnungsamplitude ergeben dagegen über der Schwingungszahl aufgetragen im doppellogarithmischen Diagramm Geraden. Die elastische und die plastische Gerade. Beide Geraden werden durch eine Regression aus den Versuchsergebnissen bestimmt. Näheres hierzu findet sich in der VDA-Richtlinie VDA239-300. Nach dieser erfolgt auch die Bestimmung der zyklischen Kennwerte σ_f' und b für die elastische sowie der Kennwerte ε_f' und c für die plastische Gerade zur Beschreibung der Dehnungs-Wöhlerlinie. Eine Definition ist durch die schematische Darstellung in Abbildung 8-5 gegeben.

Neben der Dehnungs-Wöhlerlinie wird aus den dehnungsgeregelten Versuchen auch die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve gewonnen, welche in der Regel nach der Ramberg-Osgood-Beziehung beschrieben wird. Auch diese summiert die elastischen und plastischen Teile der Dehnungsamplitude auf.

$$\varepsilon_{a,ges} = \varepsilon_{a,elastisch} + \varepsilon_{a,plastisch} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{-1/n'}$$

Dabei können die Kennwerte K' und n' aus den sogenannten Kompatibilitätsbeziehungen bestimmt werden.

$$n' = b/c$$

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^{n'}}$$

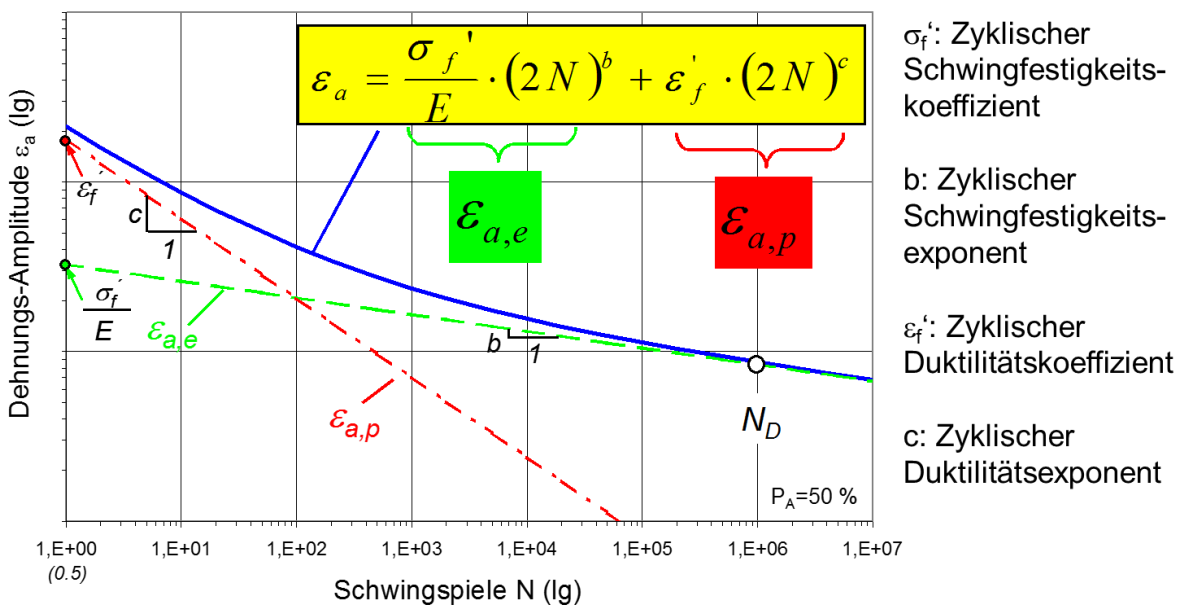


Abbildung 8-5: Schematische Darstellung und mathematische Definition der Dehnungs-Wöhlerlinie, (Häfele und Thum, 2020)

Die schematische Darstellung in Abbildung 8-6 zeigt die Definition der Kennwerte der Ramberg-Osgood-Beziehung zur Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve.

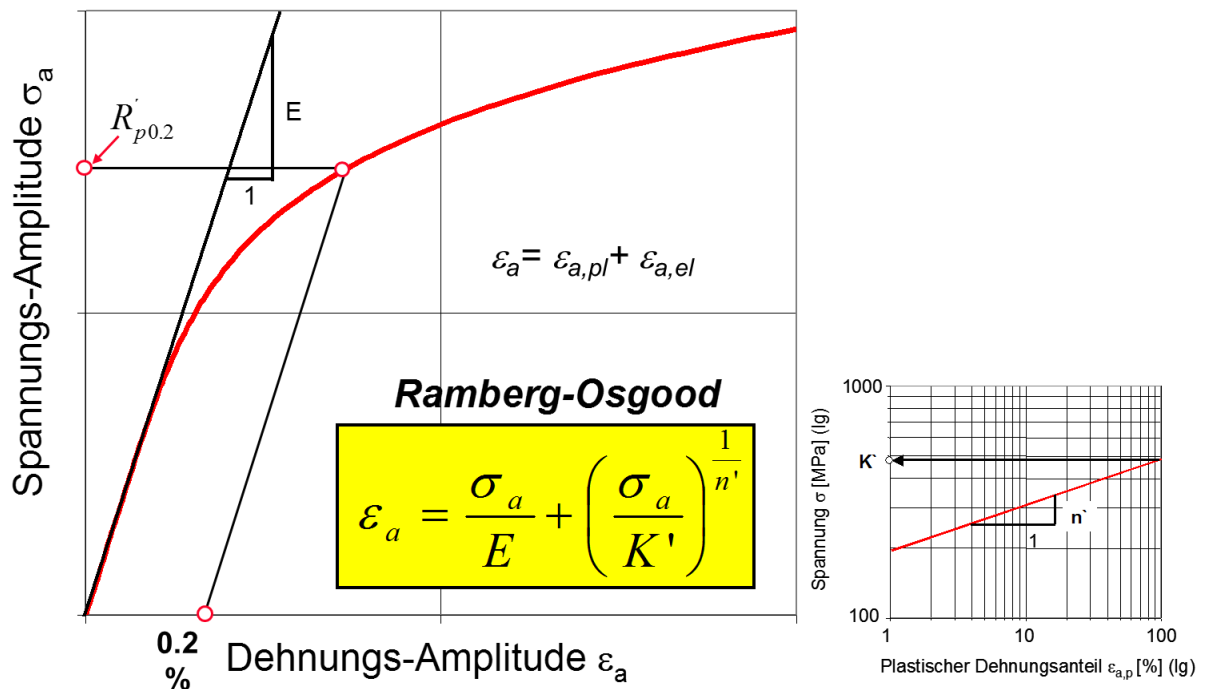


Abbildung 8-6: Schematische Darstellung und mathematische Definition der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve, (Häfele und Thum, 2020)

Wie im Diskussionsteil gezeigt werden wird, weisen die nach der Kompatibilität ausgewerteten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven teils deutliche Abweichungen zu den experimentellen Ergebnissen auf. Dies wird mit der Nichterfüllung der Kompatibilität bei Proben mit einer fertigungsbedingten Randschicht begründet. Aufgrund dieser Abweichungen werden zusätzlich zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven aus einer separaten Regression der Versuchsergebnisse angegeben.

Hierfür werden die experimentell bestimmten Versuchspunkte (Spannungsamplitude und plastische Dehnungsamplitude) über einander aufgetragen und durch eine Potenzfunktion angenähert. Der zyklische Verfestigungsexponent n' ergibt sich als Steigung des in doppeltlogarithmischer Auftragung linearen Verlaufs. Der zyklische Verfestigungskoeffizient K' entspricht dem Wert der Spannungsamplitude bei einer Extrapolation bis zu einer plastischen Dehnungsamplitude von 100 %.

9 Versuchsergebnisse Umformkantenrisse

9.1 Strategie Schneiden 1 (offener Schnitt)

9.1.1 Versuche mit nicht vorgedehnten Proben

Die Strategie Schneiden 1 bezeichnet das Scherschneiden im offenen Schnitt (Abfallbreite 7,5 mm) mit einem Schneidspalt von 0,15 mm, was auf die Blechdicke von 1,5 mm bezogen einen relativen Schneidspalt von $u_{\text{rel}} = 10 \%$ bedeutet. Die Schneidkanten sind dabei scharfkantig und weisen einen Schneidkantenradius $< 10 \mu\text{m}$ auf.

Mikroskopaufnahmen der resultierenden Schnittflächen sind in Abbildung 9-1 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts) abgebildet. Die prozentuale Aufteilung der Schnittfläche in Kanteneinzug, Glattschnitt und Bruchfläche sowie die resultierenden Bruchwinkel und die Grathöhe sind in Abbildung 9-2 dargestellt. Hierbei sind die Anteile von Kanteneinzug und Glattschnitt beim Werkstoff EN AW-5182 höher im Vergleich zu EN AW-6082, was auf die größere Gleichmaß- und Bruchdehnung bei dieser Aluminiumlegierung zurückgeführt werden kann. Aufgrund der scharfkantigen Aktivelemente ist sowohl bei EN AW-5182 als auch bei EN AW-6082 so gut wie kein Grat an den Schnittflächen vorhanden.

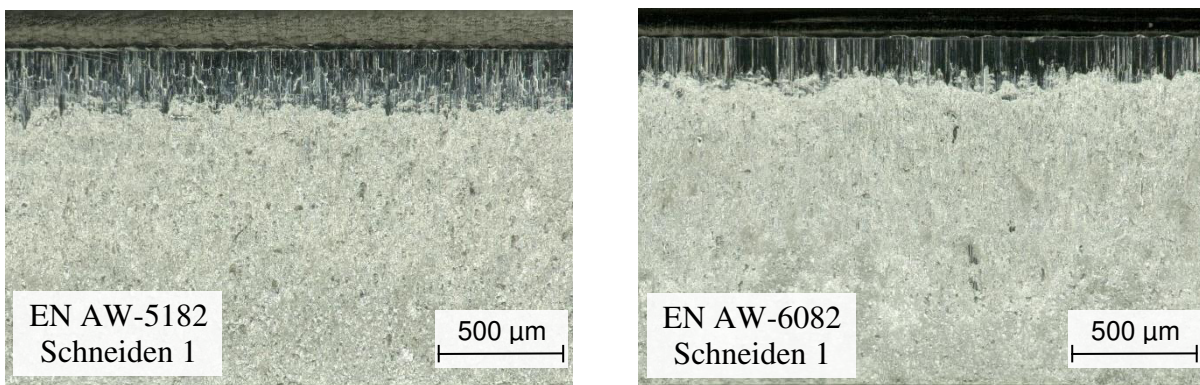


Abbildung 9-1: Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen bei Strategie Schneiden 1 von EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen am Glattschnitt und an der Bruchfläche sind in Abbildung 9-3 gezeigt. Die Rauheiten bei beiden Werkstoffen liegen dabei auf ähnlichen Niveaus, wobei die Glattschnittrauheit bei EN AW-6082 etwas geringer ist, während bei EN AW-5182 die Bruchflächenrauheit niedriger ist.

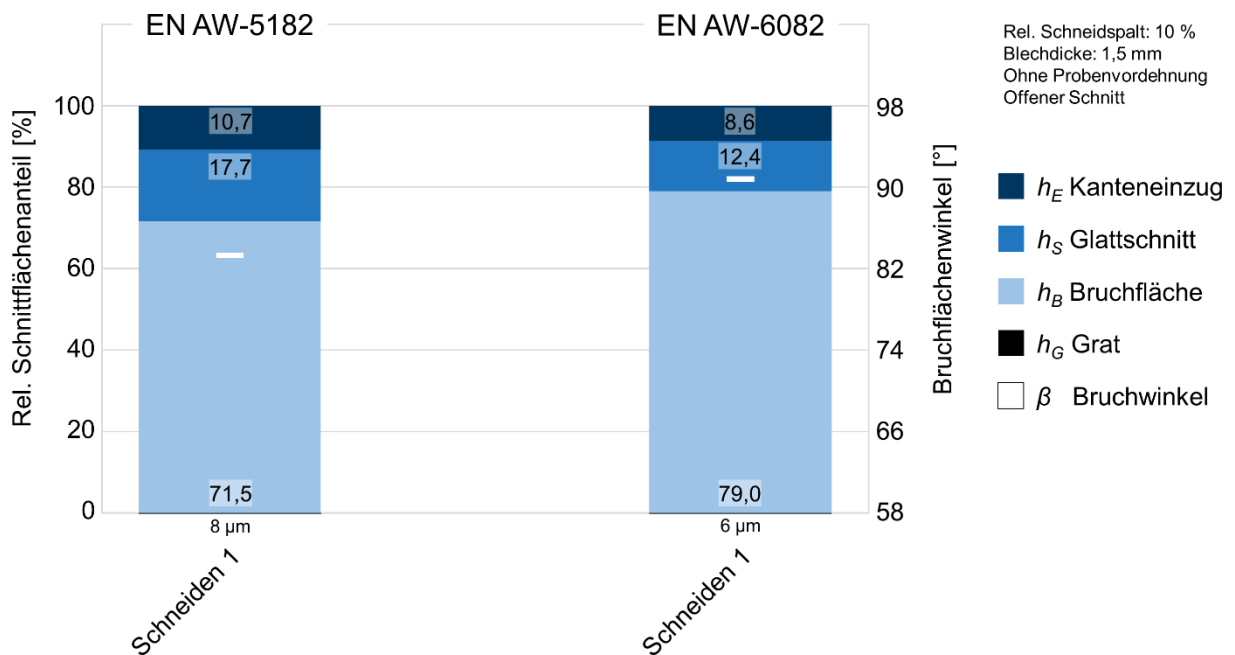


Abbildung 9-2: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die Schnittflächenkenngrößen

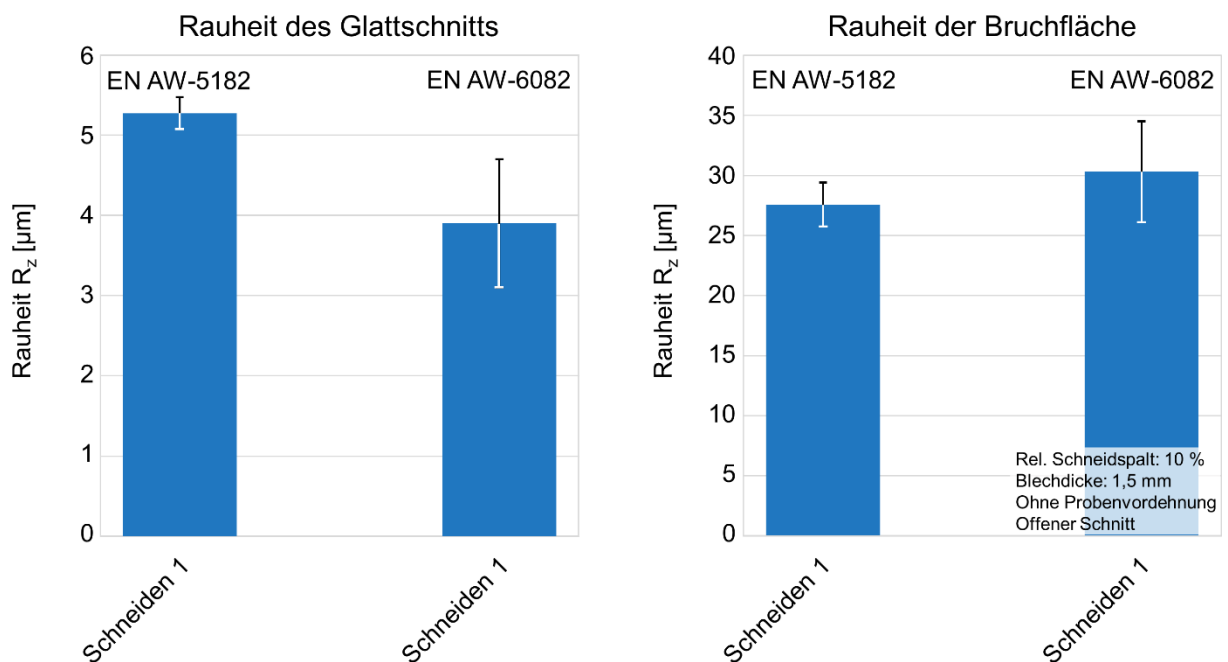


Abbildung 9-3: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die Schnittflächenrauheiten

Ein Vergleich zwischen der Grundhärte des unverformten Werkstoffs mit der maximalen Aufhärtung in der Scherzone ist in Abbildung 9-4 gegeben. Die durchschnittliche Grundhärte von EN AW-5182 liegt bei 75,4 HV_{0,025} und von EN AW-6082 bei 82,1 HV_{0,025}, die maximale Aufhärtung von EN AW-5182 bei 109,0 HV_{0,025} und von EN AW-6082 bei 111,7 HV_{0,025}. Zusätzlich sind für die mit Strategie Schneiden 1 schergeschnittenen Kanten Falschfarbenbilder zur Veranschaulichung der Härteverteilung im Bereich der Scherzone gegeben. Hierbei ist ersichtlich, dass die maximale Aufhärtung im Bereich des Glattschnitts anzutreffen ist, wobei die

höchsten Härtewerte in der Regel am unteren Ende des Glattschnitts am Übergang zur Bruchzone gemessen werden. Insbesondere beim Werkstoff EN AW-5182 ist die Aufhärtetiefe im oberen Bereich der Schnittfläche am größten, was auf die Ausbildung des Kanteneinzugs zurückgeführt werden kann. Die Tiefe der aufgehärteten Zone beträgt bei EN AW-5182 ca. 0,75 mm (im Bereich des Kanteneinzugs bis etwa 1,0 mm) und bei EN AW-6082 ca. 0,6 mm.

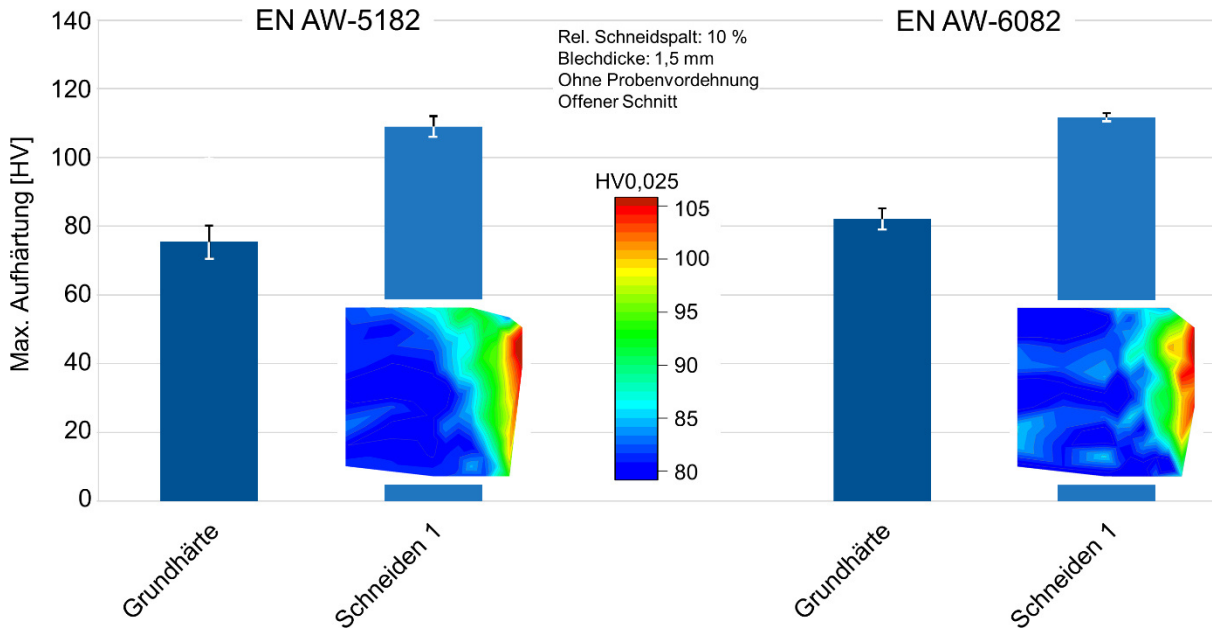


Abbildung 9-4: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die max. Aufhärtung der Scherzone

Das realisierbare Hauptformänderungsvermögen φ_1 zu Beginn der plastischen Instabilität mit beidseitig gefrästen Referenzproben beträgt bei EN AW-5182 $\varphi_1 = 0,301$ und bei EN AW-6082 $\varphi_1 = 0,293$ (siehe Abbildung 9-5). Bei den mit Strategie Schneiden 1 halbseitig schergeschnittenen *EFTT*-Proben reduziert sich das erreichbare Hauptformänderungsvermögen um 12 % auf $\varphi_1 = 0,265$ (EN AW-5182) bzw. um 4 % auf $\varphi_1 = 0,280$ (EN AW-6082). Die daraus resultierenden Kantenrissempfindlichkeitsfaktoren betragen $K_{ec} = 0,88$ für EN AW-5182 und $K_{ec} = 0,96$ für EN AW-6082. Somit ist eine mit Strategie Schneiden 1 schergeschnittene Kante aus EN AW-5182 als kantenrissegefährdet einzustufen, während die Strategie Schneiden 1 beim Werkstoff EN AW-6082 keine Kantenrissempfindlichkeit zur Folge hat.

Für die Untersuchung aller weiteren Schneidstrategien sollen die Ergebnisse aus Strategie Schneiden 1 als Referenz herangezogen werden, da diese einen industriell weit verbreiteten Stand der Technik abbildet. Ebenfalls wird auch bei den anderen Schneidstrategien das Hauptformänderungsvermögen bei Beginn der lokalen Instabilität als Versagenskriterium herangezogen, welches anhand der in Kapitel 8.1 erläuterten Vorgehensweise ermittelt wird.

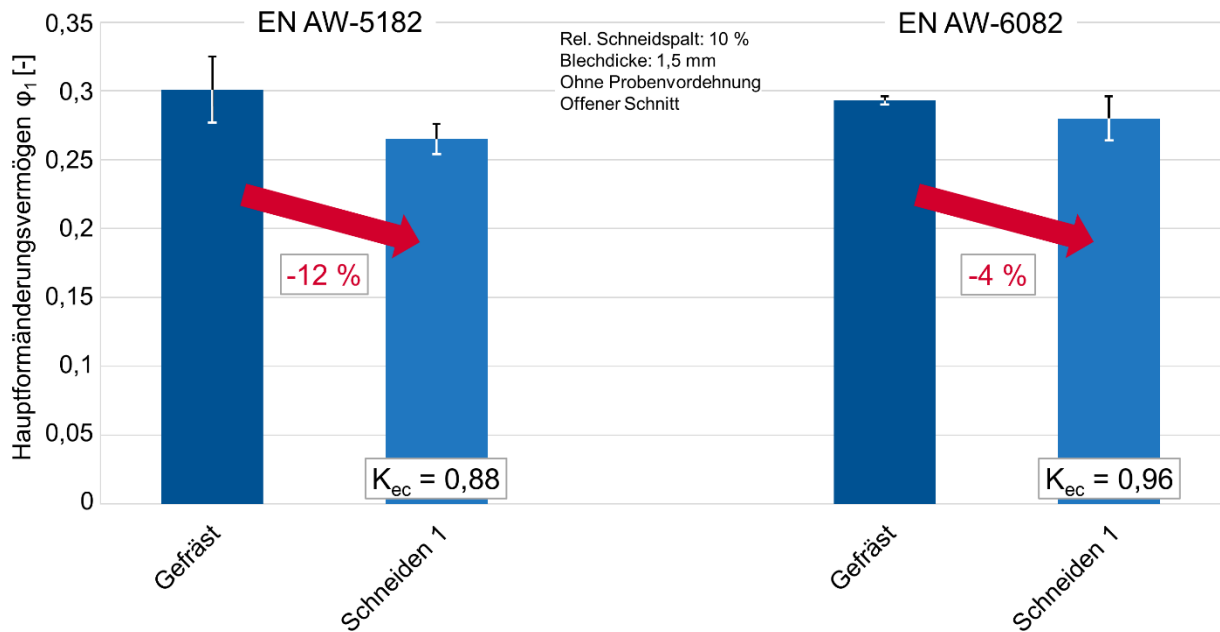


Abbildung 9-5: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.1.2 Einfluss der Probenvordehnung

Zur Herstellung einachsiger vorgedehnter Kantenrisszugproben werden die Ausgangsplatinen vor dem Scherschneiden mit einer Universalprüfmaschine des Typs Z150 der Firma ZwickRoell, Ulm, gedehnt. Die Versuche erfolgten dehnungsgesteuert, wobei die Dehnung im relevanten Probenbereich mit dem optischen Messsystem laserXtens der Firma ZwickRoell anhand von zwei virtuellen Markern auf der Blechoberfläche ermittelt wird. Zur Validierung der Dehnung werden einzelne Proben zusätzlich mit dem optischen 3D-Verformungsanalysestystem ARAMIS SRX der Firma GOM GmbH, Braunschweig, untersucht. Hierbei kann die durch das Messsystem laserXtens ermittelte Dehnung grundsätzlich bestätigt werden, wobei beim Werkstoff EN AW-5182 eine Anomalie auftritt. Während die Hauptformänderung beim Werkstoff EN AW-6082 homogen über das Blech verteilt ist, sind beim Werkstoff EN AW-5182 bedingt durch den PLC-Effekt Scherbänder mit unterschiedlichen Dehnungen ersichtlich. In Abbildung 9-6 ist die Dehnungsverteilung für eine globale, über die Messstrecke zwischen den beiden virtuellen Markern gemittelte wahre Dehnung von $\varphi_{1,global} = 0,2$ dargestellt. Lokale Abweichungen der Dehnung von etwa $\pm 0,03$ sind dabei durchaus üblich.

Für alle folgenden Untersuchungen mit vorgedehnten Proben bezeichnet die Probenvordehnung dabei jeweils die globale, über die Probenlänge gemittelte wahre Dehnung φ_{global} .

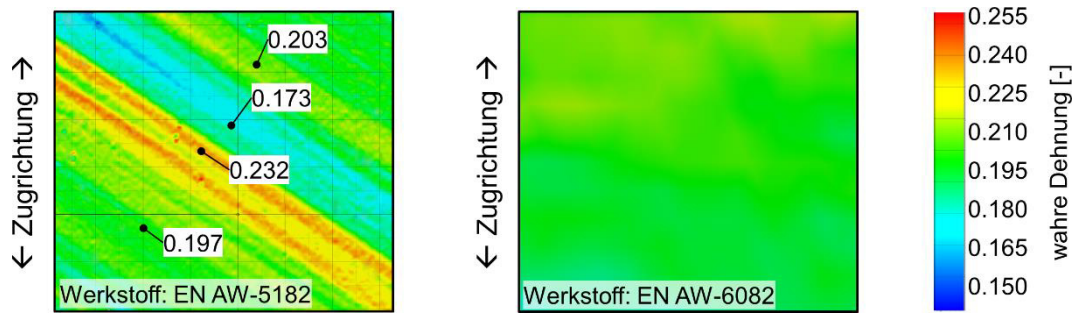


Abbildung 9-6: Dehnungsverteilung nach dem Vordehnen auf $\varphi_{global} = 0,2$:
EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)

EN-AW 5182

In Abbildung 9-7 sind Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen verschieden vorgedehnter Kantenrisszugproben aus EN AW-5182 bei Strategie Schneiden 1 gezeigt.

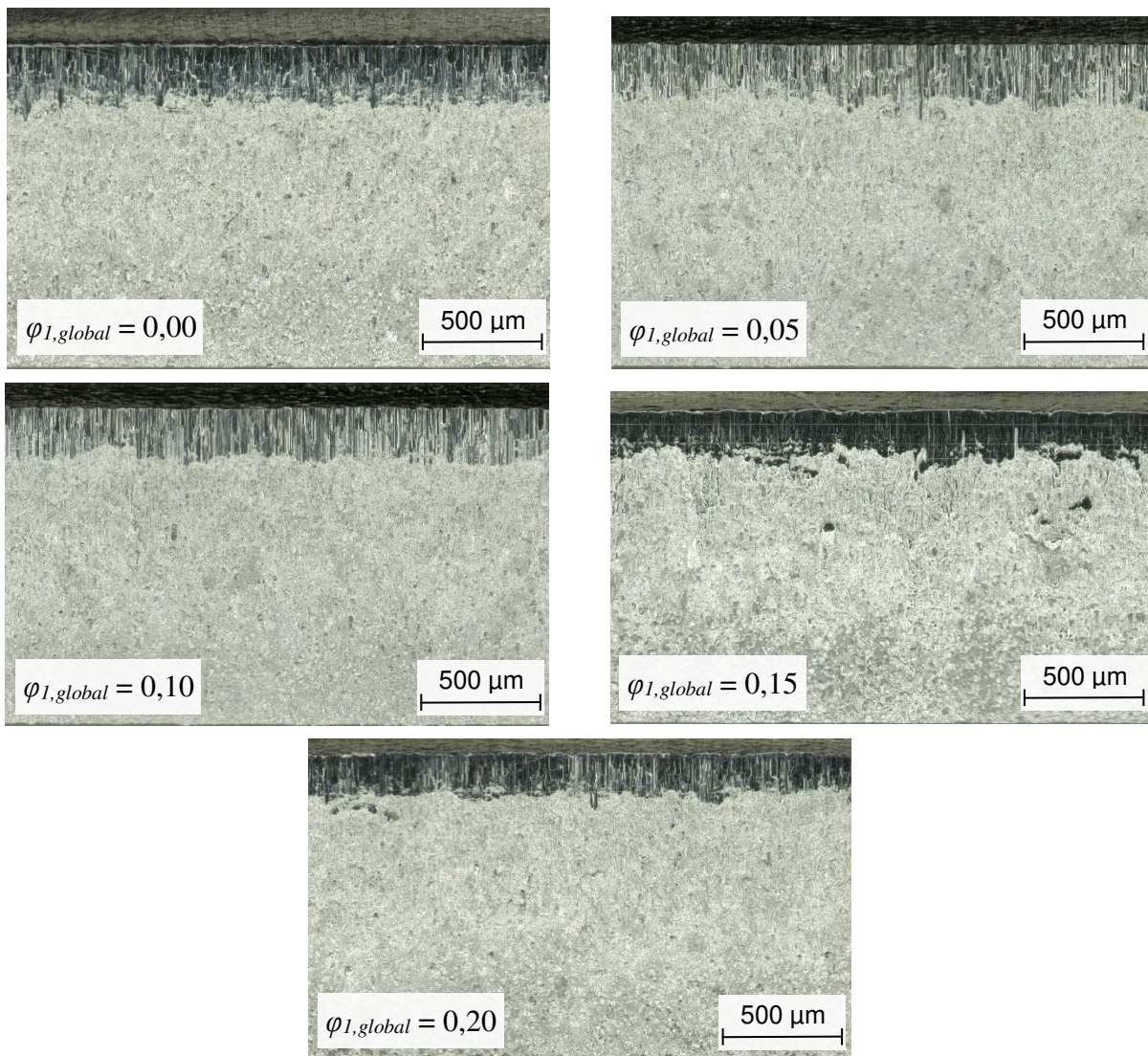


Abbildung 9-7: Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen bei unterschiedlichen Probenvordehnungen bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1

Eine Analyse der Blechdicke sowie der Schnittflächenkenngrößen bei unterschiedlich vorgedehnten Proben ist in Abbildung 9-8 gegeben. Hierbei kann eine lineare Abnahme der Blechdicke bei steigender Probenvordehnung ermittelt werden. Zudem reduziert sich auch der prozentuale Anteil des Kanteneinzugs sowie des Glattschnitts beim Scherschneiden vorgedehnter Bleche mit steigender Probenvordehnung, während der Anteil der Bruchfläche entsprechend anwächst. Dies kann auf eine frühere Rissinitiierung beim Schneiden vorgedehnter Bleche zurückgeführt werden, da diese aufgrund der beim Vordehnen eingebrachten Kaltverfestigung ein reduziertes Formänderungsvermögen besitzen.

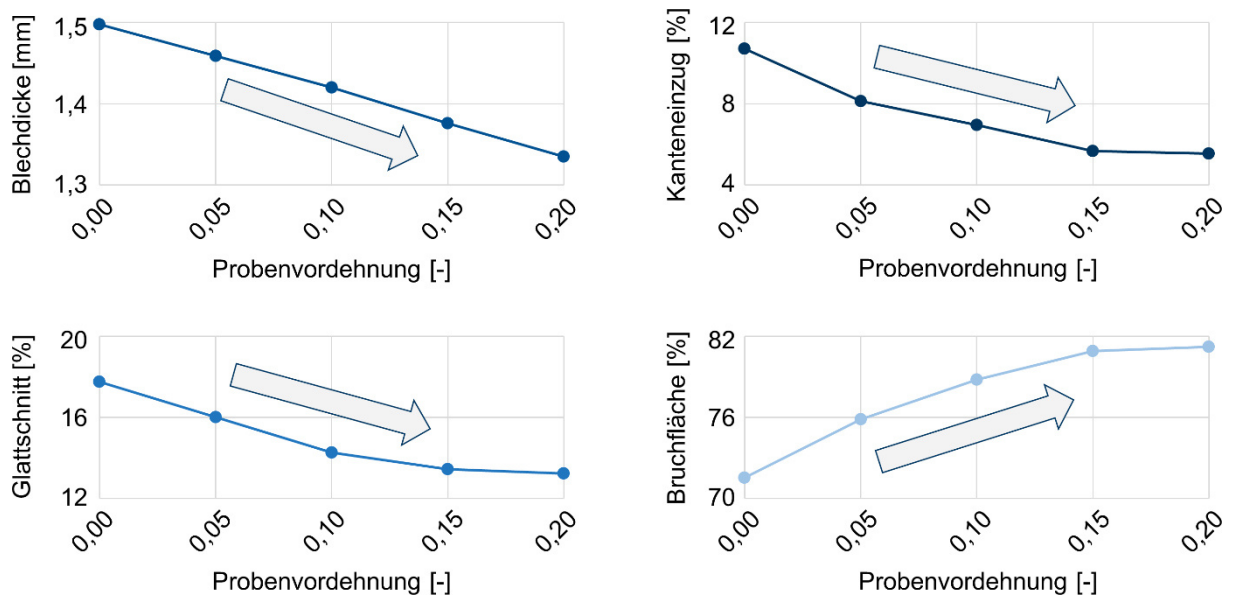


Abbildung 9-8: Einfluss der Probenvordehnung auf die Blechdicke und die Schnittflächenkenngrößen bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1

Die Mikrohärtemessungen an der schergeschnittenen Kante ergeben, dass kein Einfluss des Vordehnens auf die maximale Aufhärtung im Bereich der Scherzone festgestellt werden kann (Abbildung 9-9). Die Mittelwerte der maximalen Aufhärtung liegen für alle untersuchten Vordehnungen im Bereich zwischen $108,0 \text{ HV}_{0,025}$ und $112,3 \text{ HV}_{0,025}$. Wie auch schon bei der nicht vorgedehnten Probenkante ist die maximale Aufhärtung im Bereich des Glattschnitts anzutreffen, da der Werkstoff in diesem Bereich die größte Umformung erfährt.

Außerdem ist in Abbildung 9-9 ersichtlich, dass die Vordehnung eine Erhöhung der Werkstoffgrundhärte außerhalb der durch das Scherschneiden beeinflussten Scherzone zur Folge hat. Diese Aufhärtung ist eine Folge der beim Vordehnen eingebrachten Kaltverfestigung. Die Kombination aus annähernd gleichbleibender maximaler Aufhärtung und dem Anstieg der Grundhärte bei Vordehnung ergibt ein reduziertes Aufhärteverhältnis bei vorgedehnnten Proben, welches sich aus dem Quotienten aus maximaler Aufhärtung und der Grundhärte berechnet (siehe Abbildung 9-10). Während das Aufhärteverhältnis bei nicht vorgedehnnten Proben bei 1,45 liegt, beträgt das Verhältnis bei einer Probenvordehnung von 0,2 nur noch 1,06.

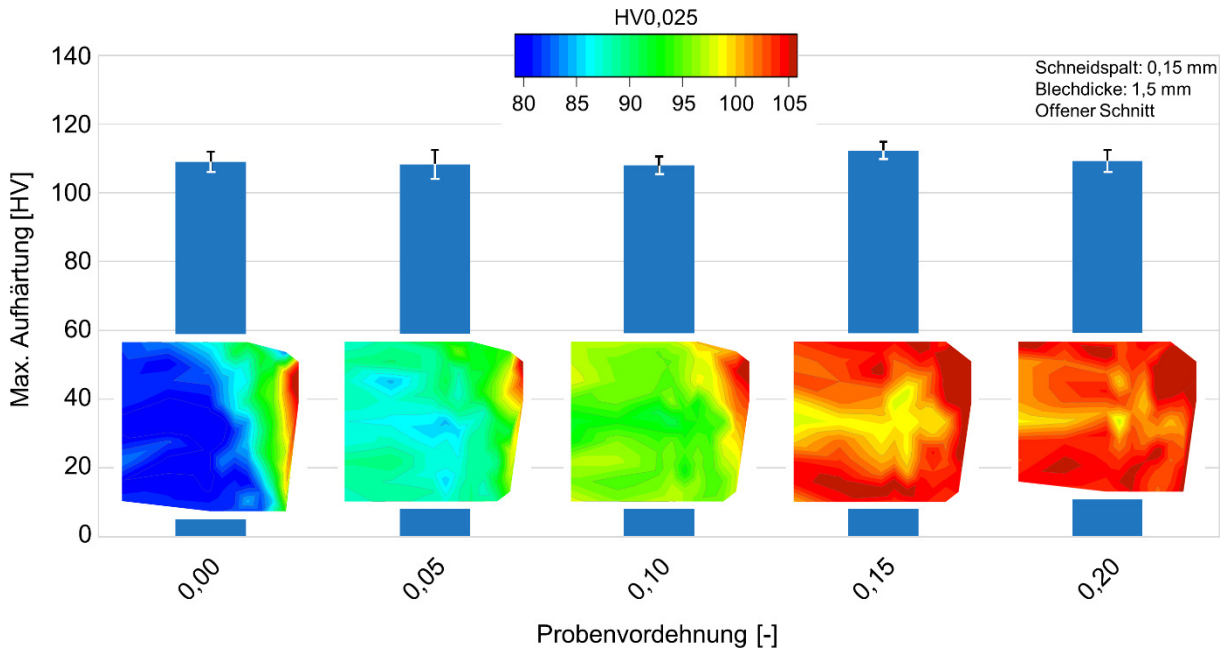


Abbildung 9-9: Einfluss der Probenvordehnung auf die max. Aufhärtung der Scherzone bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1

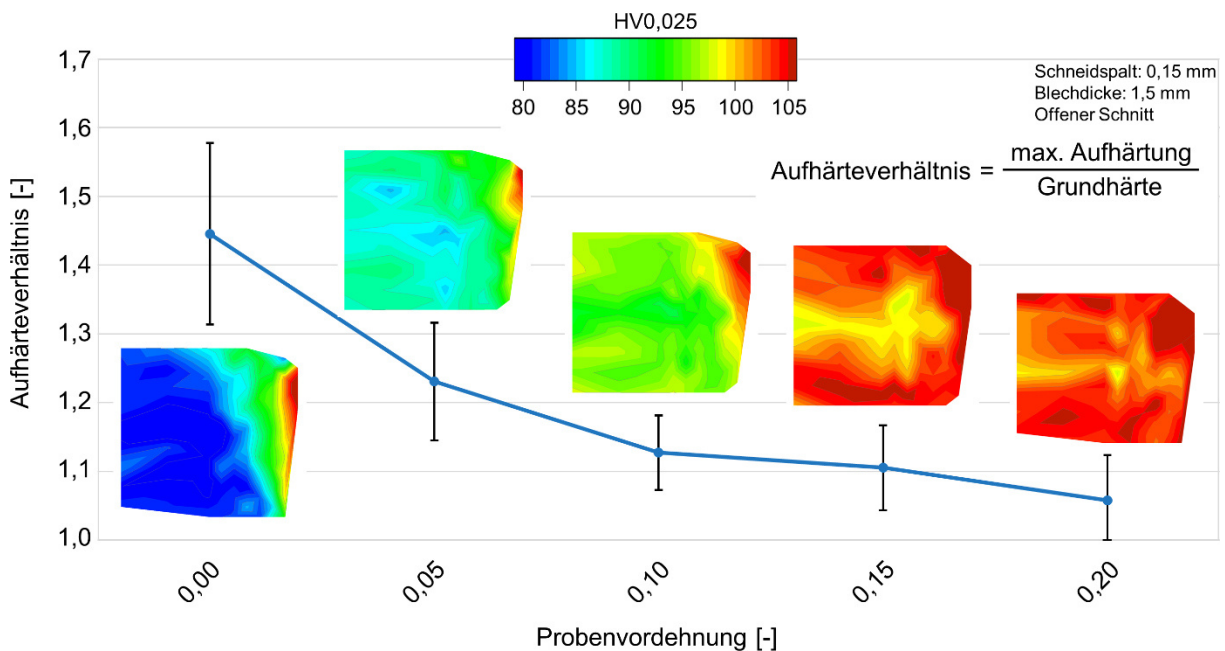


Abbildung 9-10: Einfluss der Probenvordehnung auf das Aufhärteverhältnis bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1

Die Durchführung von Kantenrisszugversuchen mit verschiedenen vorgedehten Proben aus EN AW-5182 ergibt eine leichte Reduzierung der Kantenrissempfindlichkeit bei Vordehnung, wobei das Hauptformänderungsvermögen bei Beginn lokaler Einschnürung der halbseitig schergeschnittenen Proben jeweils mit dem Hauptformänderungsvermögen der vorgedehten, beidseitig gefrästen Referenzproben verglichen wird (siehe Abbildung 9-11). Die bereits bei der Probenvordehnung eingebrachte Hauptformänderung wird in diesem Fall bei der Berech-

nung des Kantenrissempfindlichkeitsfaktors nicht berücksichtigt. Während bei den nicht vorgedehnten Proben der Kantenrissempfindlichkeitsfaktor bei 0,88 liegt, werden für alle untersuchten Vordehnungsstufen Kantenrissempfindlichkeitsfaktoren zwischen 0,91 und 0,92 ermittelt.

Zudem fällt auf, dass die Summe des Hauptformänderungsvermögens der vorgedehnten gefrästen Referenzproben und der jeweiligen Probenvordehnung größer ist als das Hauptformänderungsvermögen bei nicht vorgedehnten Referenzproben. Es wäre zu erwarten, dass das erreichbare Hauptformänderungsvermögen im einstufigen Zugversuch gleich groß ist wie bei einer zweistufigen, uniaxialen Umformung, sofern zwischen den Umformschritten keine Änderung der Umformrichtung relativ zur Walzrichtung erfolgt (Volk et al., 2020), (Graf und Hosford, 1994). Der Grund für die höheren Werte bei zweistufiger Umformung ist in der unterschiedlichen Messmethodik zur Ermittlung der Umformgrade beim Vor- und Weiterdehnen zu suchen. Während beim Vordehnen eine globale, über die Messstrecke gemittelte Formänderung bestimmt wird, wird das Formänderungsvermögen beim Weiterdehnen lokal am Ort der Einschnürung ermittelt. Dabei bleibt die wahre lokale Formänderung an der Position des späteren Einschnürens nach dem Vordehnen unbekannt, da aufgrund des PLC-Effektes deutliche Abweichungen zwischen lokaler und globaler Dehnung bei vorgedehnten Proben aus EN AW-5182 auftreten können (vgl. Abbildung 9-6).

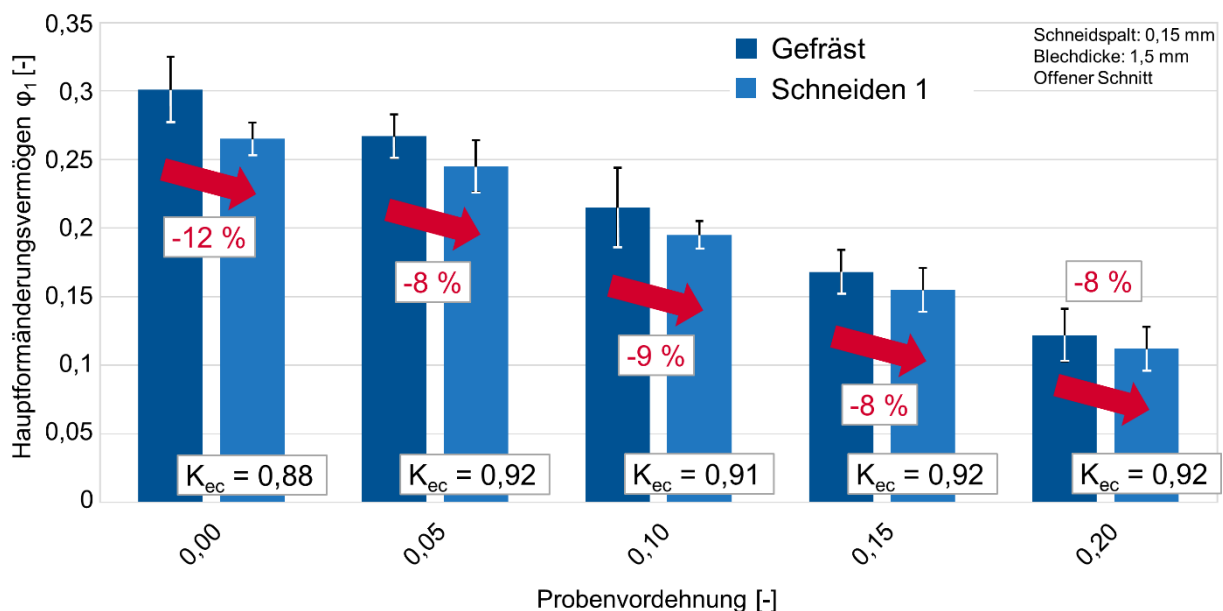


Abbildung 9-11: Einfluss der Probenvordehnung auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1

EN-AW-6082

Die Schnittflächen der nicht vorgedehnten Kantenrisszugprobe sowie der mit $\phi_1 = 0,1$ uniaxial vorgedehnten Probe aus EN AW-6082 sind in Abbildung 9-12 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass

beim Scherschneiden des vorgedehnten Werkstoffs Sekundärglattschnitt auftritt. Dieser Sekundärglattschnitt beim offenen Schnitt ist auf eine anfängliche Rissausbreitung in Richtung des Stempels zurückzuführen, wobei der Bruch erst im unteren Bereich des Blechs zur Matrzenschneidkante läuft. Hieraus resultiert eine bauchige Bruchfläche, bei der das über die Bewegungsbahn des Stempels überstehende Material von diesem abgeschabt wird. Die Rissausbreitung in Stempelrichtung ist in Abbildung 9-13 bildlich dargestellt.

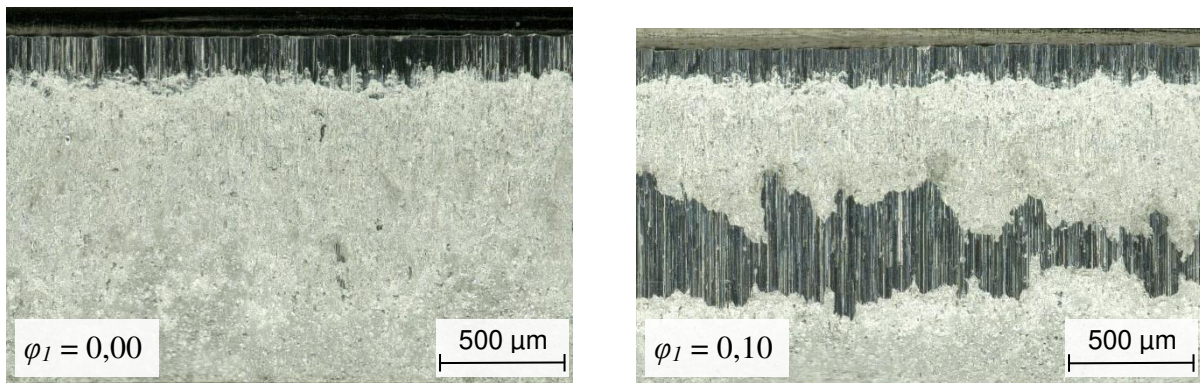


Abbildung 9-12: Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen bei unterschiedlichen Probenvor-dehnungen bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 1

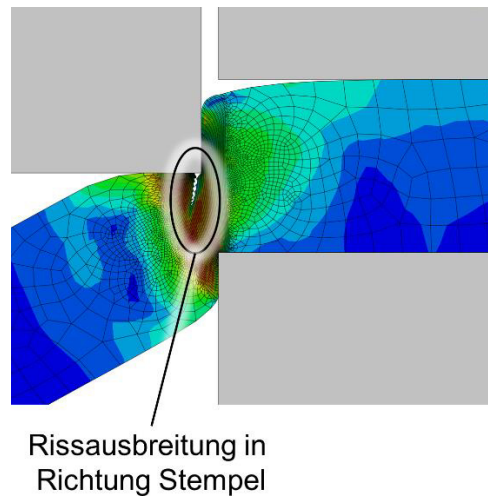


Abbildung 9-13: Entstehung von Sekundärglattschnitt beim offenen Schnitt aufgrund einer Rissausbreitung in Richtung des Stempels

Mikrohärtemessungen ergeben für die mit $\varphi_1 = 0,1$ vorgedehnte Probe eine etwas höhere maximale Aufhärtung mit $117,7 \text{ HV}_{0,025}$, verglichen mit $111,7 \text{ HV}_{0,025}$ bei der nicht vorgedehnten Probe (Abbildung 9-14). Die maximale Aufhärtung unterscheidet sich dabei im Glattschnitt sowie im Sekundärglattschnitt nicht wesentlich.

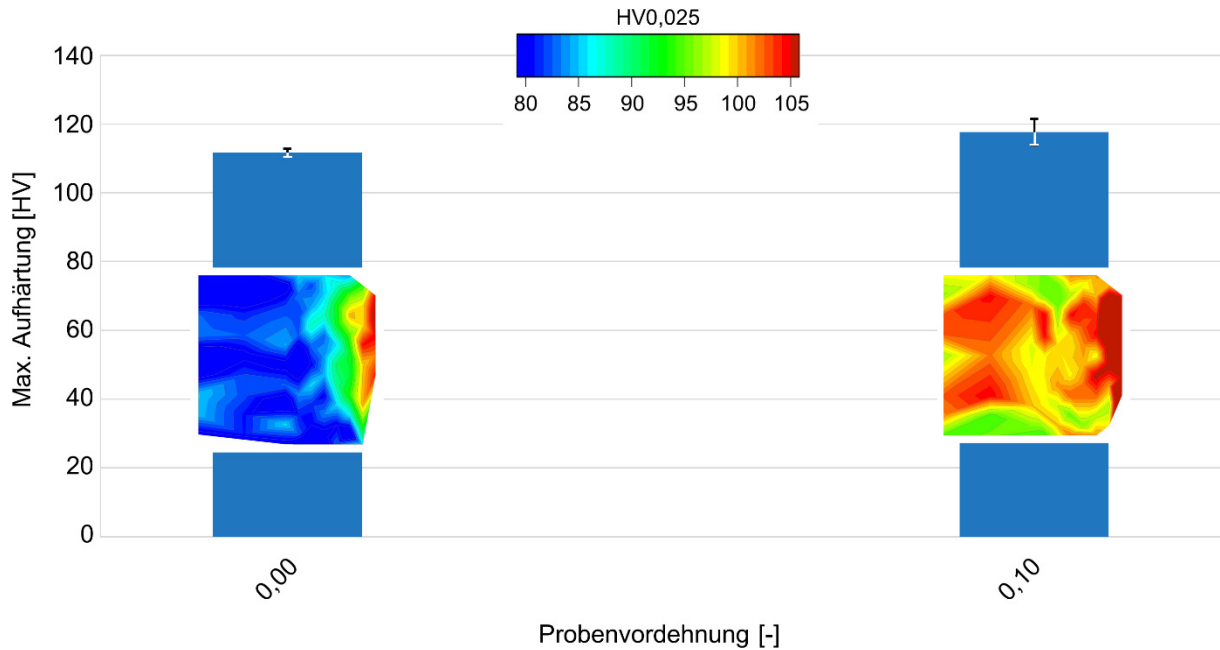


Abbildung 9-14: Einfluss der Probenvordehnung auf die max. Aufhärtung der Scherzone bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 1

Eine Messung der maximalen Längshöhensprünge parallel zur Schnittkante am Übergangsbereich Glattschnitt – Bruch (Probe $\varphi_1 = 0,0$) sowie Sekundärglattschnitt – Bruch (Probe $\varphi = 0,1$) ergibt Werte von $12 \mu\text{m}$ bei $\varphi_1 = 0,0$ sowie von $30 \mu\text{m}$ bei $\varphi_1 = 0,1$. Ein Vergleich mit den Längshöhensprüngen bei Proben aus EN AW-5182 ergibt ähnliche Werte (EN AW-5182: $18 \mu\text{m}$ bei $\varphi_1 = 0,0$ und $32 \mu\text{m}$ bei $\varphi_1 = 0,1$), obwohl beim Scherschneiden von EN AW-5182 auch bei vorgedehnten Proben kein Sekundärglattschnitt zu verzeichnen ist.

Untersuchungen zur Kantenrissempfindlichkeit zeigen für die mit $\varphi_1 = 0,1$ vorgedehnte Probe einen Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von 0,94, während bei der nicht vorgedehnten Probe der Kantenrissempfindlichkeitsfaktor 0,96 beträgt (siehe Abbildung 9-15). Dabei wird der Kantenrissempfindlichkeitsfaktor wieder jeweils in Relation zur Referenzprobe der entsprechenden Vordehnung ermittelt. Somit ist auch die mit $\varphi_1 = 0,1$ vorgedehnte Probe als kantenrissunempfindlich einzustufen.

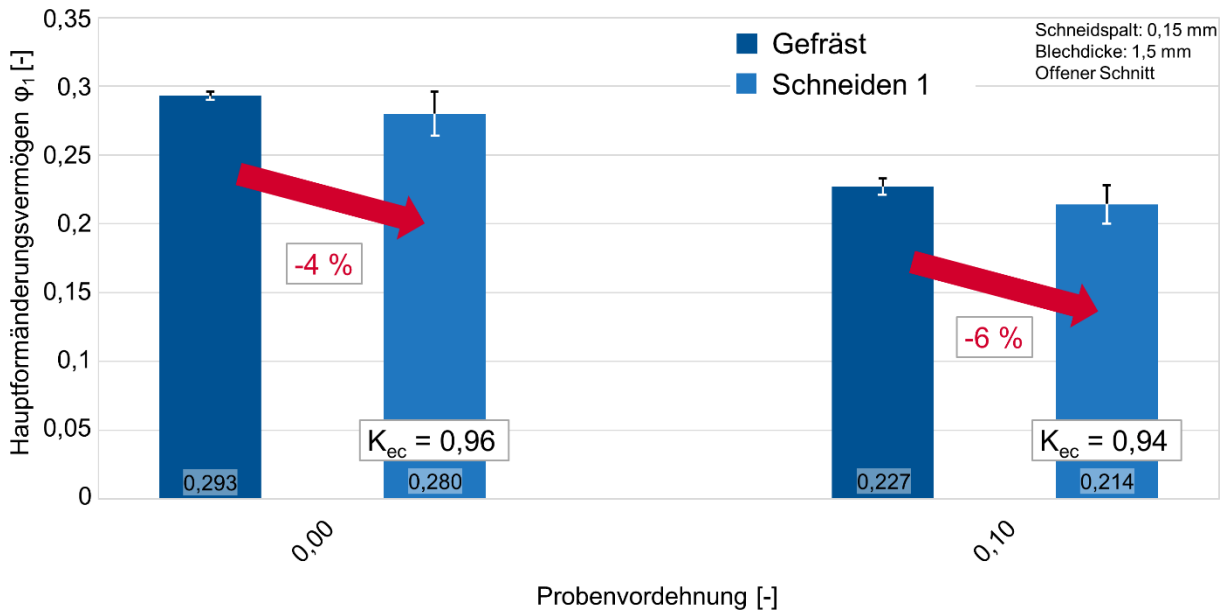


Abbildung 9-15: Einfluss der Probenvordehnung auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 1

Unter Miteinbeziehung der uniaxialen Probenvordehnung von $\varphi_1 = 0,1$ zeigt sich, dass beim zweistufigen Dehnen der Referenzprobe in Summe höhere Umformgrade erreicht werden als beim einstufigen Dehnen. Da im Gegensatz zum Werkstoff EN AW-5182 bei EN AW-6082 kein PLC-Effekt auftritt, können die in Kapitel 9.1.2 – Abschnitt EN AW-5182 – erläuterten Gründe für eine Überhöhung des Umformgrades ausgeschlossen werden. Vielmehr sind die bei 6xxx-Aluminiumlegierungen auftretenden Relaxationseffekte als ursächlich anzusehen (Meyers, Guimarães und Avelles, 1979). Da die Vordehnung, Herstellung und Prüfung der auf $\varphi_1 = 0,1$ uniaxial vorgedehnten Proben (Gefräst und Schneiden 1) jeweils zum gleichen Zeitpunkt erfolgte, ist eine Vergleichbarkeit zwischen vorgedehnten Referenzproben und schergeschnittenen Proben gegeben. Der Zeitraum zwischen der Probenvordehnung und den Kantenrisszugversuchen betrug dabei etwa drei Monate.

9.2 Strategie Schneiden 1G (geschlossener Schnitt)

Die Kantenrisszugproben der Strategie Schneiden 1G werden im geschlossenen Schnitt mit einer Butzenbreite von 30 mm hergestellt. Ein Vergleich der resultierenden Schnittflächen mit den Schnittflächen im offenen Schnitt (Strategie Schneiden 1) ist in Abbildung 9-16 gegeben, ein Vergleich der Schnittflächenkenngrößen in Abbildung 9-17. Während sich die Schnittflächenkenngrößen beim Werkstoff EN AW-6082 im offenen und geschlossenen Schnitt nicht wesentlich unterscheiden, hat der geschlossene Schnitt beim Werkstoff EN AW-5182 einen etwas vergrößerten Kanteneinzug und eine Reduzierung des Glattschnittanteils zur Folge.

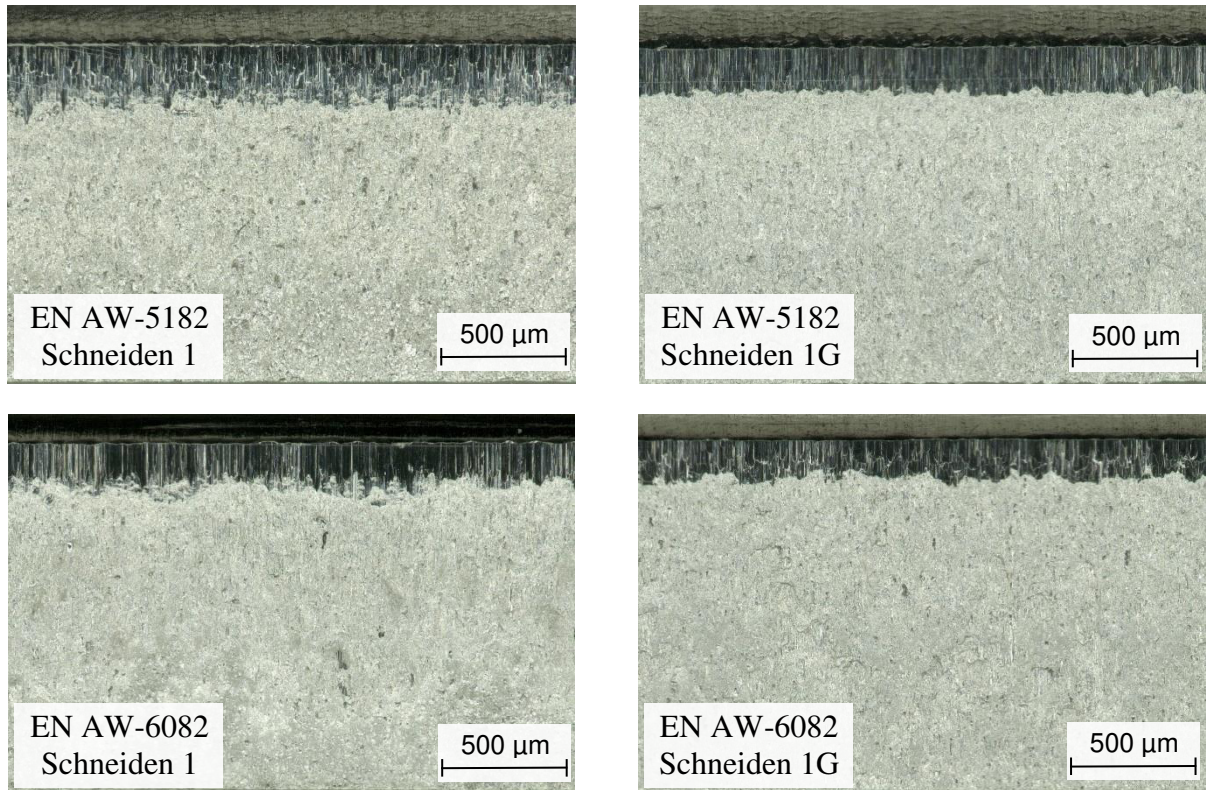


Abbildung 9-16: Vergleich der Schnittflächen von Strategie Schneiden 1 und Schneiden 1G bei EN AW-5182 (oben) und EN AW-6082 (unten)

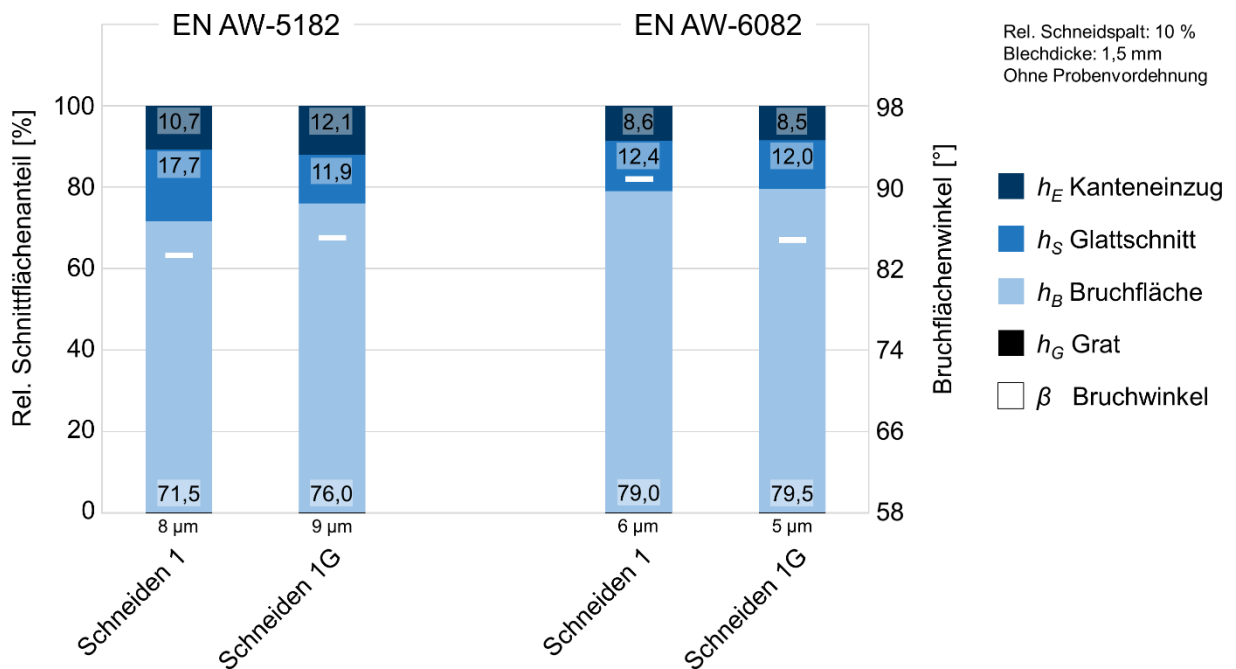


Abbildung 9-17: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die Schnittflächenkenngrößen

Der geschlossene Schnitt resultiert beim Werkstoff EN AW-5182 in einer reduzierten Rauheit des Glattschnitts, während die Glattschnitt Rauheit bei EN AW-6082 leicht ansteigt (siehe Abbildung 9-18). Die Rauheiten der Bruchfläche sind beim geschlossenen Schnitt sowohl bei EN AW-5182 als auch bei EN AW-6082 etwas höher als beim offenen Schnitt.

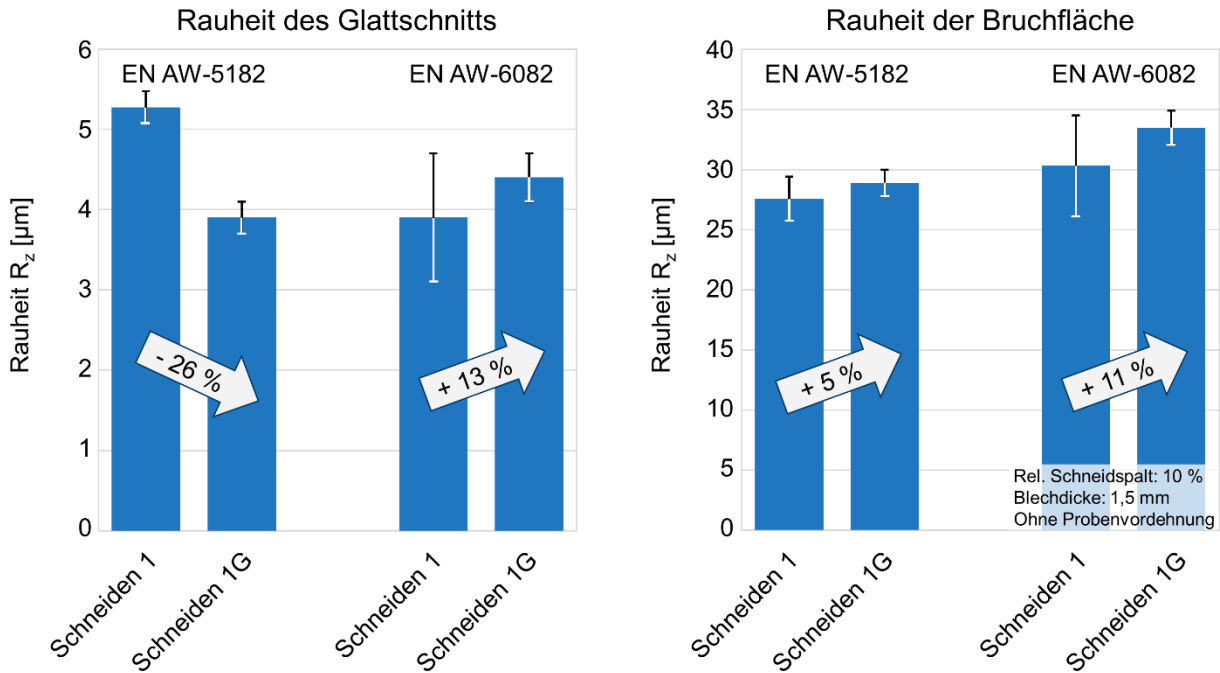


Abbildung 9-18: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die Schnittflächenrauheiten

Im Vergleich zum offenen Schnitt hat ein geschlossener Schnitt bei beiden untersuchten Aluminiumlegierungen eine Erhöhung der maximalen Aufhärtung im Bereich der Scherzone zur Folge (siehe Abbildung 9-19).

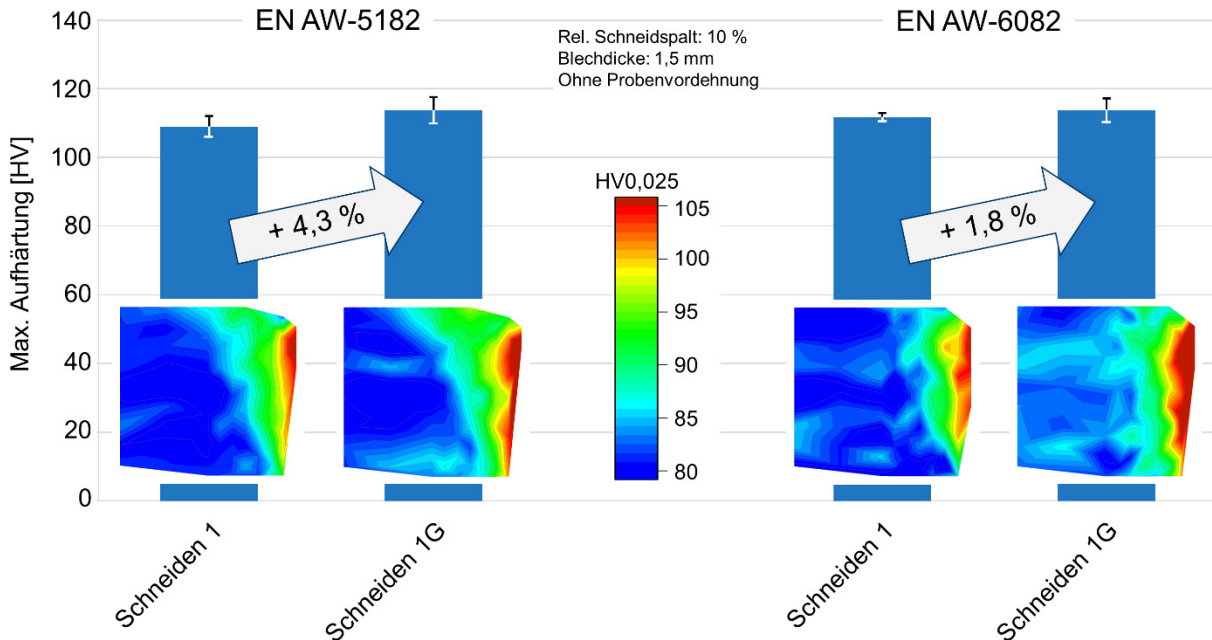


Abbildung 9-19: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die max. Aufhärtung der Scherzone

Ein Vergleich der Formänderungsvermögen an der Kante in Abhängigkeit der Schnittliniengeometrie (offen/geschlossen) ergibt ein reduziertes Formänderungsvermögen bei Verwendung eines geschlossenen Schnittes (Schneiden 1G), siehe Abbildung 9-20. Während der Kantenrissempfindlichkeitsfaktor bei EN AW-5182 nur leicht von $K_{ec} = 0,88$ auf $K_{ec} = 0,87$ sinkt, ist bei

EN AW-6082 eine stärkere Abnahme zu verzeichnen ($K_{ec} = 0,96$ im offenen Schnitt zu $K_{ec} = 0,90$ im geschlossenen Schnitt).

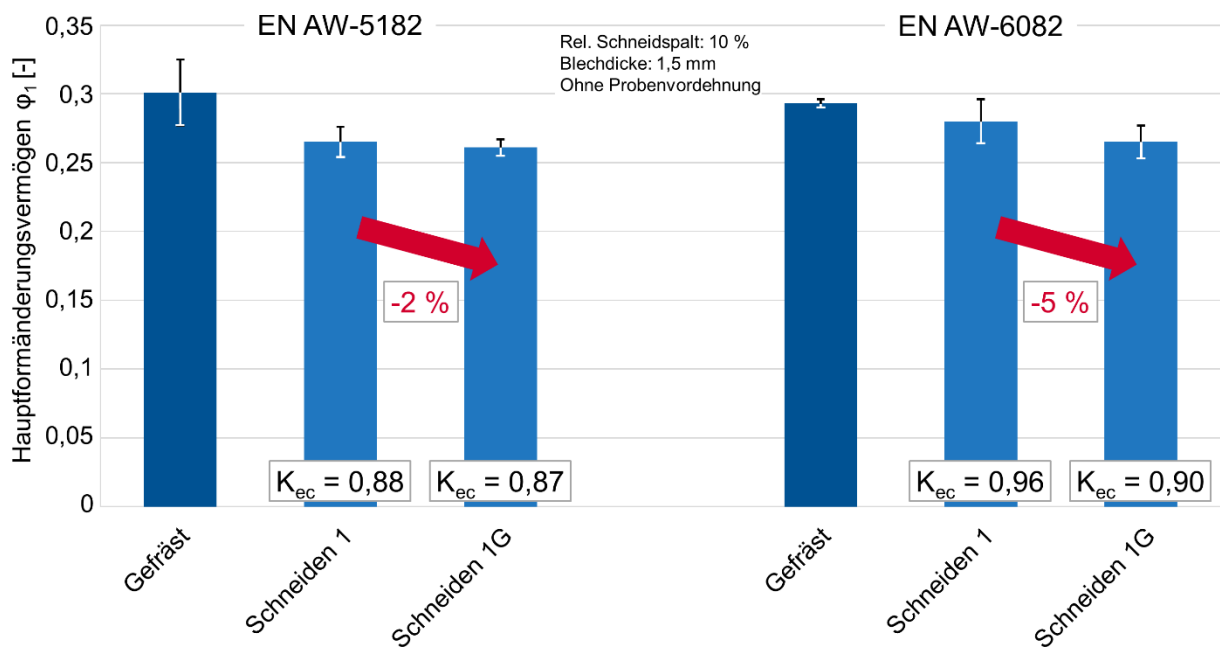


Abbildung 9-20: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.3 Strategie Schneiden 2 (Beschichtung)

Für die Probenherstellung mit der Strategie Schneiden 2 kommt ein Stempel zum Einsatz, welcher mit einer Diamond-like Carbon (DLC) –Beschichtung, Typ Balinit DLC MF, der Firma Oerlikon, Pfäffikon (Schweiz), versehen wurde. Die Dicke der Beschichtung beträgt lediglich $1,7 \mu\text{m}$, weshalb der Schneidkantenradius auch bei dieser Strategie scharfkantig ($r < 10 \mu\text{m}$) ausgeführt werden kann. Mikroskopaufnahmen der resultierenden Schnittflächen bei nicht vorgedehnten Proben ($\varphi_I = 0,0$) sind in Abbildung 9-21 für beide untersuchten Blechwerkstoffe dargestellt. Hierbei wird bei EN AW-6082 ungleichmäßiger, insel förmig auftretender Sekundärglattschnitt beobachtet, was auf die in Abbildung 9-13 illustrierten Mechanismen zurückgeführt werden kann.

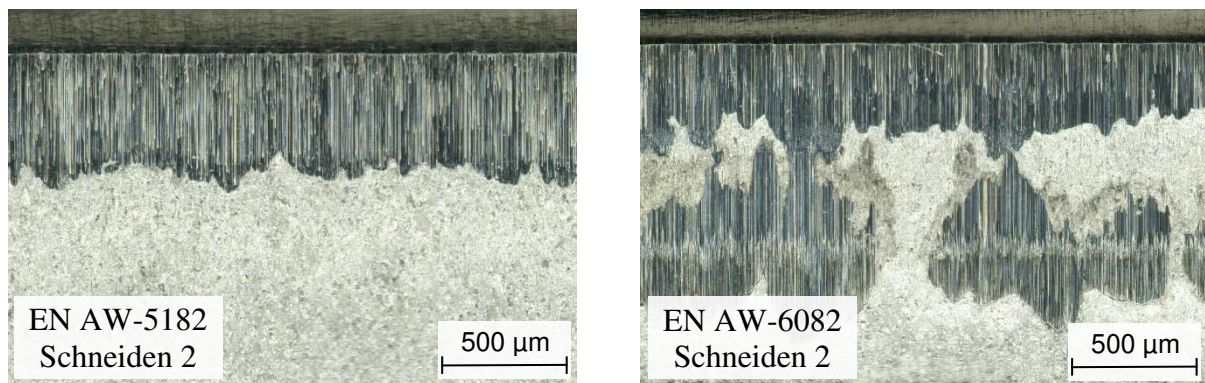


Abbildung 9-21: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 2 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)

Die Schnittflächenkenngrößen bei Verwendung des DLC-beschichteten Stempels sind in Abbildung 9-22 dargestellt. So hat der beschichtete Stempel bei EN AW-5182 als auch bei EN AW-6082 eine Erhöhung des Glattschnittanteils um 75 % respektive 80 % zur Folge. Damit einher geht ein vergrößerter Kanteneinzuganteil, während der Bruchflächenanteil entsprechend sinkt. Ein Einfluss der Stempelbeschichtung auf die Grathöhe kann nicht festgestellt werden.

Eine Erklärung für den vergrößerten Glattschnittanteil kann in der reduzierten Oberflächenrauheit des beschichteten Stempels gefunden werden. Diese verringert die Reibung zwischen Stempel und Blech und ermöglicht beim Schneiden so ein längeres plastisches Fließen des Werkstoffs, bevor das Formänderungsvermögen ausgeschöpft ist und durch Rissbildung die Materialtrennung erfolgt.

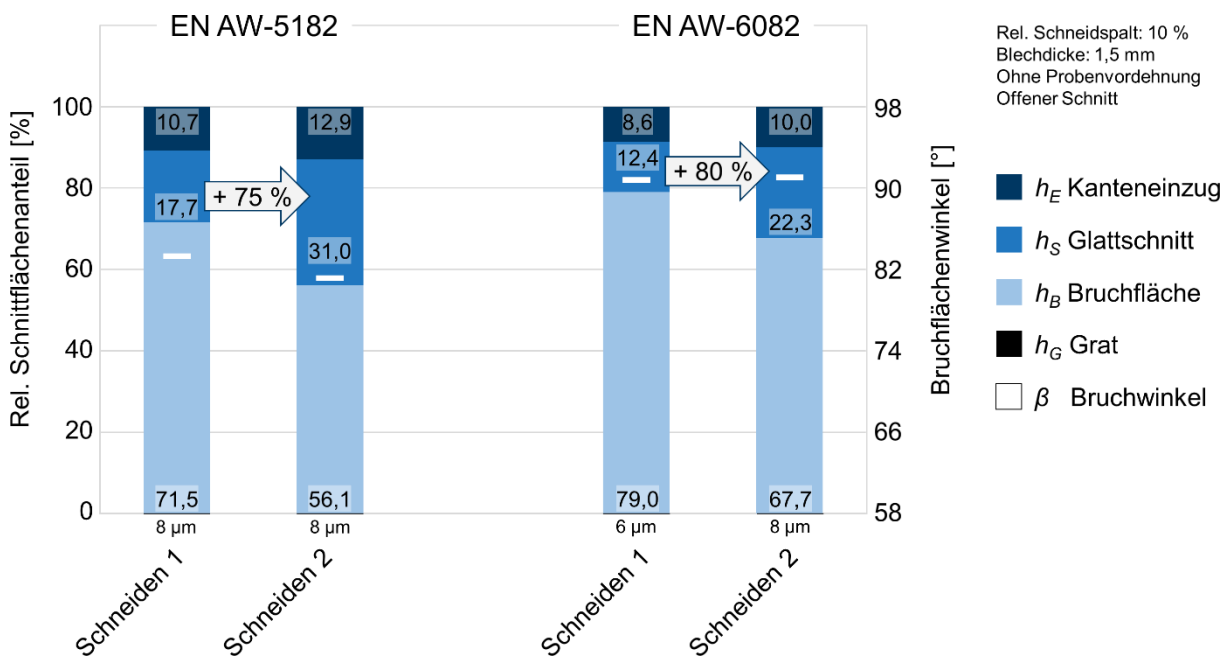


Abbildung 9-22: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Schnittflächenkenngrößen

Die geringere Oberflächenrauheit des beschichteten Stempels spiegelt sich auch in der Rauheit der Glattschnittfläche wider, die im Vergleich zu Strategie Schneiden 1 ebenfalls niedrigere Werte annimmt (siehe Abbildung 9-23). Auch an der Bruchfläche können bei beiden Aluminiumlegierungen mit beschichtetem Stempel geringere Rauheiten gemessen werden. Dabei wird angenommen, dass durch das längere plastische Fließen und dem daraus resultierenden verkleinerten Restquerschnitt eine stärkere Lokalisierung der Spannungen im Bereich der späteren Bruchfläche erfolgt, was sich wiederum in einer reduzierten Rauheit der Bruchoberfläche äußert.

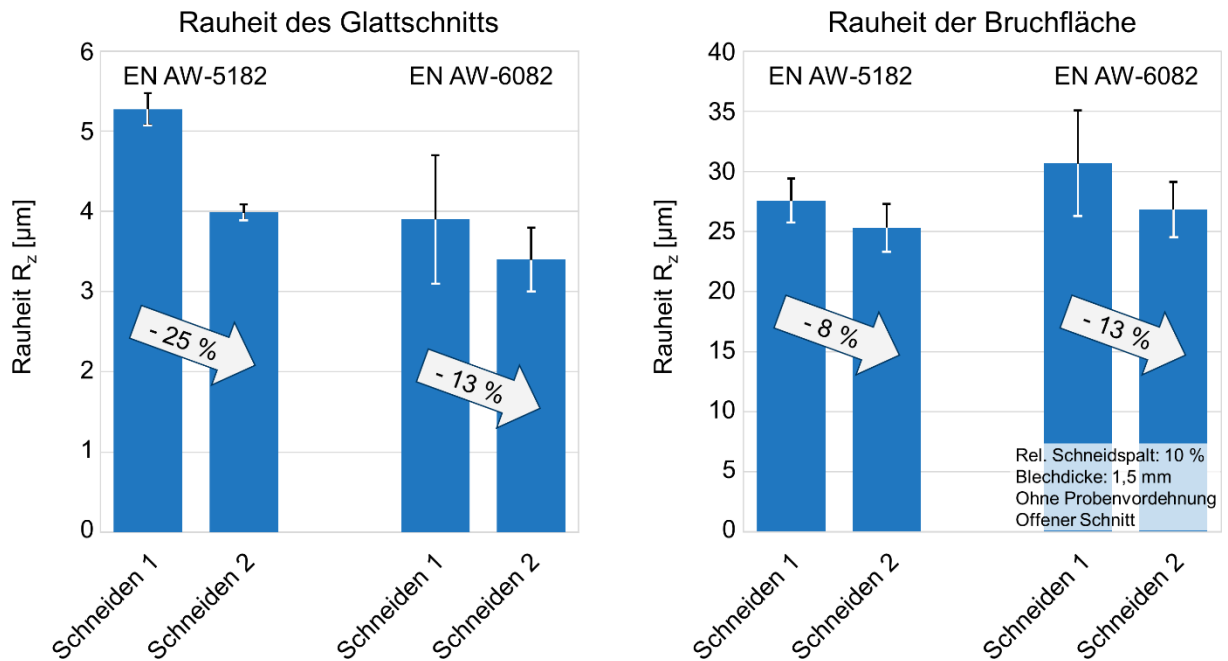


Abbildung 9-23: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Schnittflächenrauheiten

In Abbildung 9-24 ist ein Vergleich der maximalen Höhengsprünge an der Schnittfläche für Strategie Schneiden 1 und Schneiden 2 gegeben, die entsprechend der Vorgehensweise aus Kapitel 8.4 ermittelt wurden. Während die Messung für beide Strategien beim Werkstoff EN AW-5182 sowie für Strategie Schneiden 1 bei EN AW-6082 im Übergangsbereich zwischen Glattschnitt und Bruchfläche erfolgte, liegt die Messlinie bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 2 im Bereich des inselförmig auftretenden Sekundärglattschnitts. Am Übergangsbereich zwischen Sekundärglattschnitt und Bruch können im Vergleich zu den anderen Konfigurationen deutlich größere Höhengsprünge bis zu $\Delta h = 75 \mu\text{m}$ beobachtet werden weshalb an diesen Stellen eine erhöhte Kerbwirkung auftritt.

Beim Werkstoff EN AW-5182 hat der beschichtete Stempel eine Reduzierung der maximal ermittelten Höhengsprünge von $\Delta h = 18 \mu\text{m}$ auf $\Delta h = 14 \mu\text{m}$ zur Folge, was auf einen gleichmäßigeren Übergang zwischen Glattschnitt und Bruchfläche zurückgeführt werden kann.

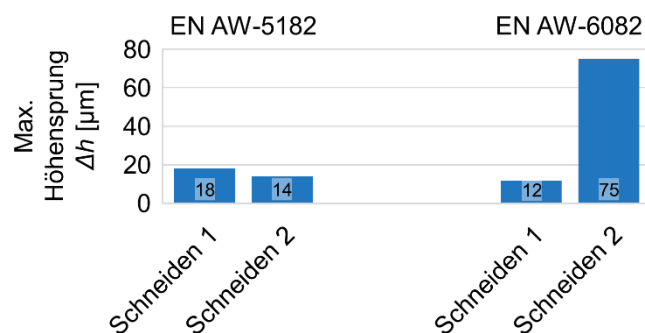


Abbildung 9-24: Vergleich der maximalen Höhengsprünge am Übergang (Sekundär-) Glattschnitt – Bruch

Die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen für den beschichteten Stempel werden in Abbildung 9-25 präsentiert. Dabei kann mit dem beschichteten Stempel bei beiden untersuchten Aluminiumlegierungen eine erhöhte maximale Aufhärtung an der Schnittfläche festgestellt werden. Während die maximale Aufhärtung bei EN AW-5182 um 8 % anwächst, beträgt der Anstieg bei EN AW-6082 lediglich 2,7 %. Zudem können beim Werkstoff EN AW-6082 zwei Zonen mit maximaler Aufhärtung an der Schnittfläche ermittelt werden. Die obere Zone befindet sich dabei im Bereich des (Primär-) Glattschnitts, die untere Zone im Bereich des Sekundärglattschnitts.

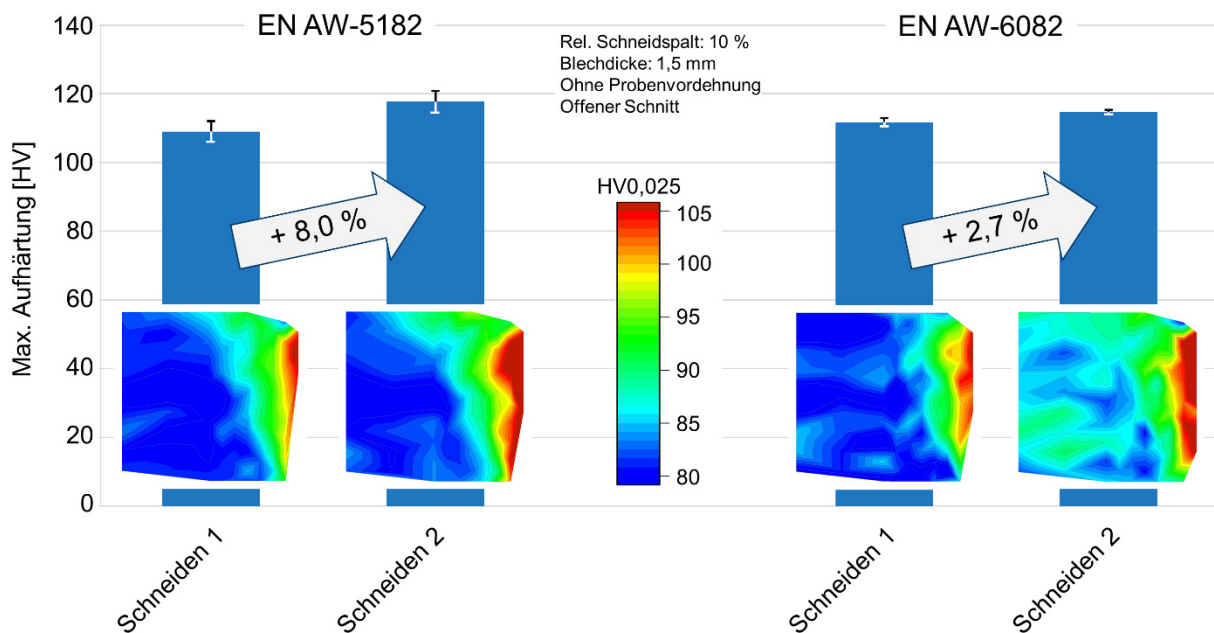


Abbildung 9-25: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die max. Aufhärtung der Scherzone

Der Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Kantenrissempfindlichkeit ist in Abbildung 9-26 gezeigt. Dabei kann bei EN AW-5182 mit beschichtetem Stempel ein höheres Hauptformänderungsvermögen bei Beginn lokaler Einschnürung im Vergleich zu Strategie Schneiden 1 beobachtet werden. Während Schneiden 1 einen Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,88$ aufweist, steigt dieser mit Strategie Schneiden 2 auf $K_{ec} = 0,92$. Somit kann die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-5182 durch die Verwendung eines beschichteten Stempels unter den gegebenen Randbedingungen reduziert werden.

Im Gegensatz dazu verringert sich bei EN AW-6082 das Hauptformänderungsvermögen der mit Strategie Schneiden 2 geschnittenen Kante um 12 %. Der bei Schneiden 1 ursprünglich kantenrissunempfindliche Werkstoff ist für Strategie Schneiden 2 als kantenrissgefährdet einzustufen. Gründe für die verringerte Umformbarkeit der Kante können in einer Kombination aus hoher Aufhärtung am Sekundärglattschnitt gepaart mit der Kerbwirkung im Übergangsbereich Sekundärglattschnitt/Bruch gefunden werden.

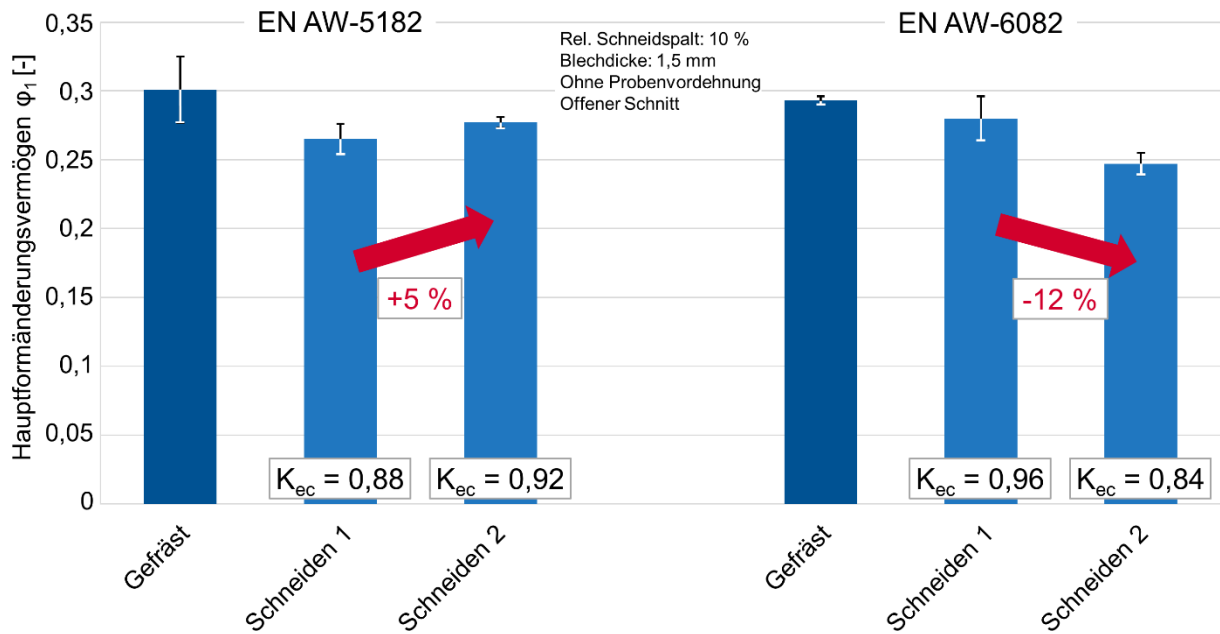


Abbildung 9-26: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.4 Strategie Schneiden 3 (Kaltaufschweißungen)

Zur Untersuchung des Einflusses von Kaltaufschweißungen am Stempel auf die Eigenschaften der Schnittkanten werden zunächst Adhäsionen durch Dauerhubversuche generiert. Hierzu wird die Oberflächenstruktur des Schneidstempels initial mit Hilfe des Laserkonfokalmikroskopes VK-X150 der Firma Keyence, Osaka, Japan, vermessen, um den Zustand ohne Kaltaufschweißungen zu dokumentieren. Anschließend werden Dauerhubversuche durchgeführt, wobei der Stempel nach verschiedenen Hubzahlintervallen ausgebaut und erneut vermessen wird. Ein Maximum an Adhäsionen kann nach 2500 Hüben festgestellt werden. Mikroskopaufnahmen des vorderen Bereichs der Stempelmantelfläche (Nähe Schneidkante) sind in Abbildung 9-27 dargestellt. Hierbei sind die Adhäsionen nach 2500 Hüben auch optisch ersichtlichen.

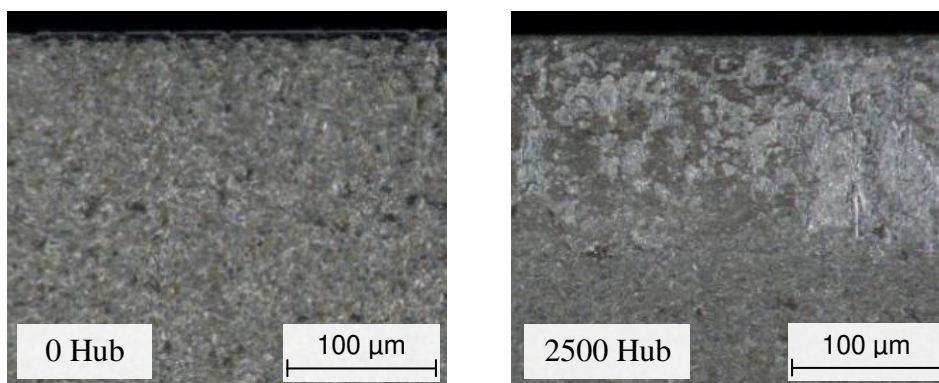


Abbildung 9-27: Vergleich der Stempelmantelflächen bei 0 Hub (links) und mit Kaltaufschweißungen bei 2500 Hub (rechts)

Die Quantifizierung des Adhäsionsvolumens erfolgt anhand einer Gegenüberstellung der Oberflächentopographie bei 2500 Hüben mit der Oberflächentopographie ohne Kaltaufschweißungen aus den Messungen mit dem Laserkonfokalmikroskop. Durch Vergleich mit einer „Null-ebene“ ohne Adhäsionen, welche außerhalb des von Kaltaufschweißungen betroffenen Gebietes liegt, wird nach 2500 Hüben ein bezogenes Adhäsionsvolumen von $0,433 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ im Bereich der vorderen Stempelmantelfläche ermittelt.

Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen, welche mit einem Stempel mit Kaltaufschweißungen hergestellt wurden, sind in Abbildung 9-28 gezeigt. Während bei EN AW-6082 keine wesentliche Änderung des Glattschnittanteils bei Schneiden 3 im Vergleich mit Strategie Schneiden 1 festgestellt werden kann, zeigt die Schnittfläche für Schneiden 3 bei EN AW-5182 einen um 7 % reduzierten Glattschnittanteil (Abbildung 9-29).

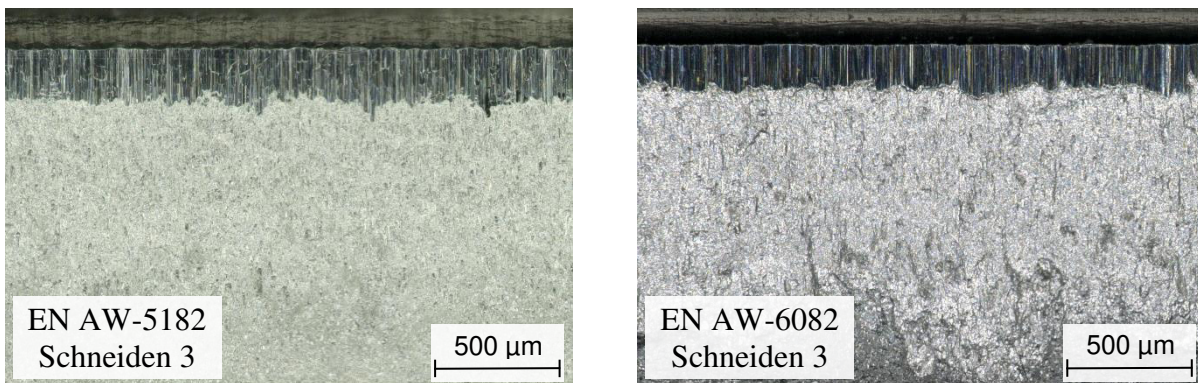


Abbildung 9-28: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 3 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)

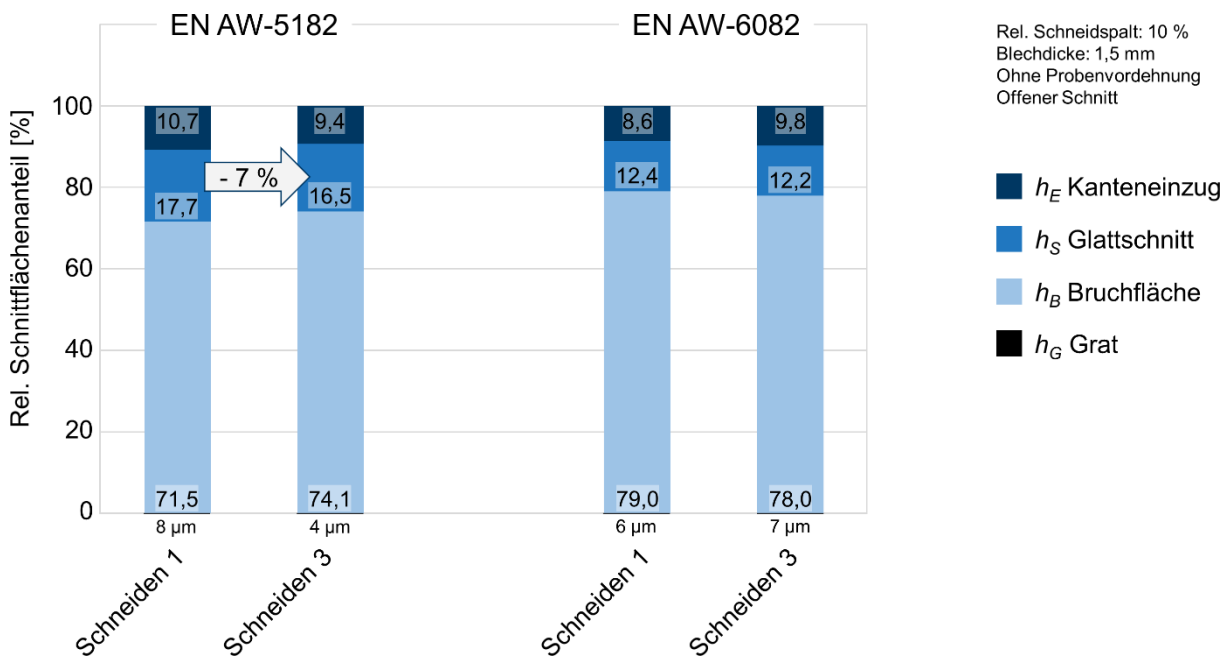


Abbildung 9-29: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Schnittflächenkenngrößen

Rauheitsmessungen ergeben, dass bei Verwendung des kaltaufgeschweißten Stempels sowohl bei EN AW-5182 als auch bei EN AW-6082 erhöhte Rauheiten an der Glattschnittfläche zu verzeichnen sind (Abbildung 9-30). Dies kann direkt auf die Kaltaufschweißungen auf der Stempelmantelfläche zurückgeführt werden, welche die Oberflächenrauheit des Stempels erhöhen. Da beim Scherschneiden ein direkter Kontakt zwischen Glattschnitt und Stempelmantelfläche besteht, spiegelt sich dies entsprechend in einer erhöhten Glattschnittrauheit wider. Mikroskopaufnahmen zum Vergleich der Glattschnittoberfläche bei EN AW-5182 für Schneiden 1 und Schneiden 3 sind in Abbildung 9-31 gezeigt. Der Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Rauheit der Bruchfläche ist bei den beiden untersuchten Aluminiumlegierungen nicht einheitlich. Während bei EN AW-5182 eine geringfügige Reduzierung der Rauheit im Vergleich zu Strategie Schneiden 1 zu verzeichnen ist, steigt die Rauheit der Bruchfläche bei EN AW-6082 für Strategie Schneiden 3 an.

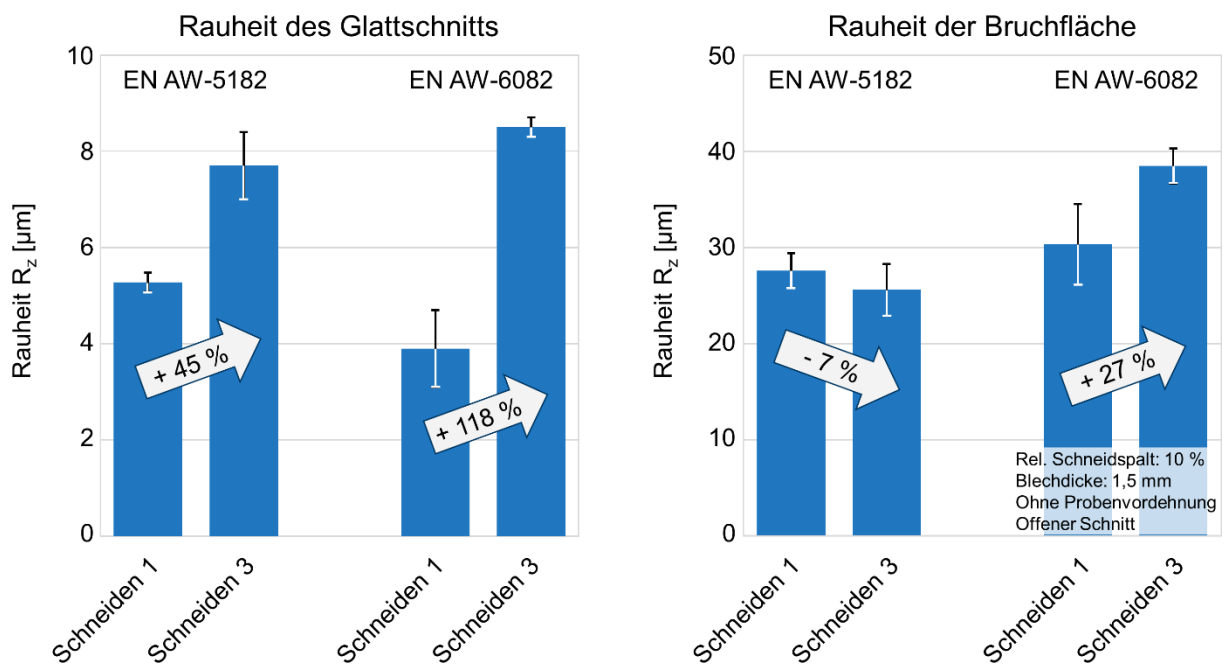


Abbildung 9-30: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Schnittflächenrauheiten

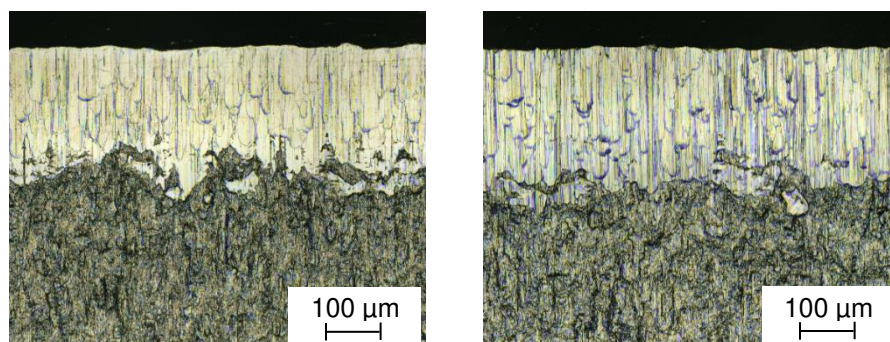


Abbildung 9-31: Unterschiedliche Rauheiten des Glattschnitts bei Schneiden 1 (links) und Schneiden 3 (rechts) für EN AW-5182

Ebenso sind die Auswirkungen des kaltaufgeschweißten Stempels auf die ermittelten maximalen Aufhärtungen im Bereich der Schereinflusszone nicht einheitlich. Während bei EN AW-6082 keine merkliche Änderung der maximalen Aufhärtung festgestellt wird, nimmt bei EN AW-5182 die maximale Härte im vorderen Bereich der Schereinflusszone etwas ab, wobei sich die Fehlerbalken der Standardabweichungen der Strategien Schneiden 1 und Schneiden 3 noch teilweise überdecken (Abbildung 9-32). Es ist jedoch anzunehmen, dass im unmittelbaren Nahbereich des Glattschnitts noch höhere Härten auftreten, als die durch die Mikrohärtprüfung in der ersten Messlinie ermittelten Werte. Da bei den Mikrohärtprüfungen verfahrensbedingt jedoch ein Mindestabstand zwischen der vordersten Messlinie und dem Rand der Probe (Glattschnittfläche) von etwa 80 µm eingehalten werden muss (vgl. Abbildung 8-2) können mögliche Effekte durch adhäsionsbedingte Mikroriefen im Glattschnitt auf die Aufhärtung nicht nachgewiesen werden.

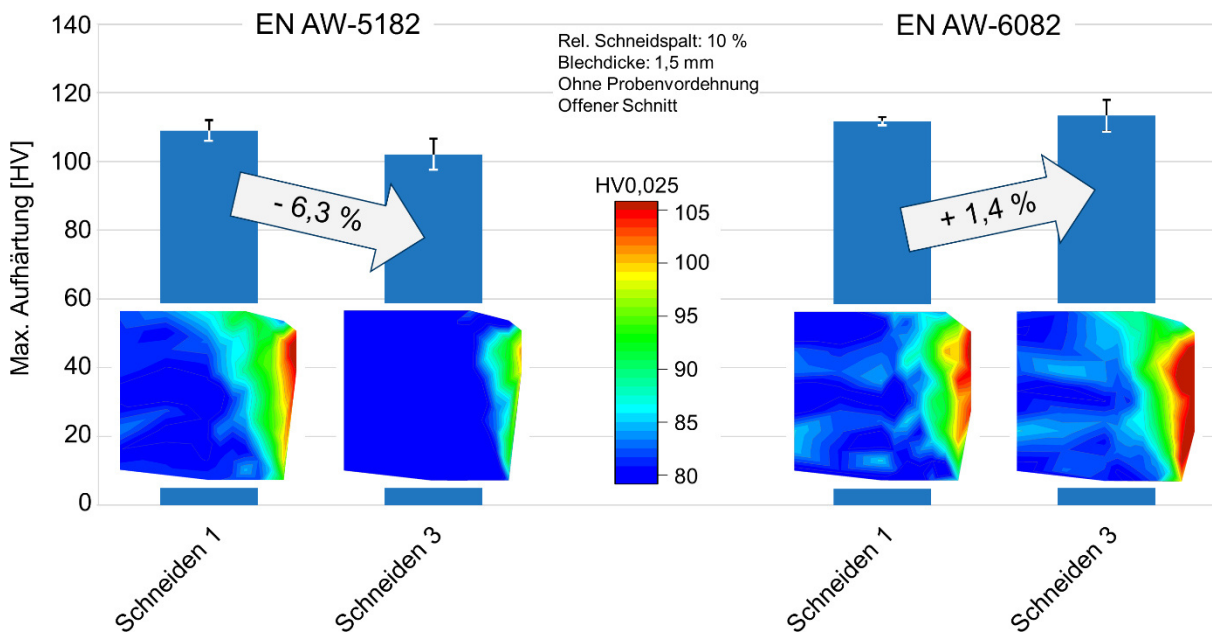


Abbildung 9-32: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die max. Aufhärtung der Scherzone

Der Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Kantenrissempfindlichkeit ist in Abbildung 9-33 für beide untersuchte Aluminiumlegierungen dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die Proben aus EN AW-5182, welche mit einem kaltaufgeschweißten Stempel gefertigt wurden, ein signifikant reduziertes Restumformvermögen aufweisen im Vergleich zu den gefrästen Referenzproben beziehungsweise den mit Strategie Schneiden 1 hergestellten Proben. Während bei Strategie Schneiden 1 ein Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,88$ ermittelt wird, verringert sich dieser bei Strategie Schneiden 3 auf $K_{ec} = 0,78$. Auch bei EN AW-6082 reduziert sich das Hauptformänderungsvermögen bei Beginn lokaler Einschnürung bei Strategie Schneiden 3 um 4 %, verglichen mit der Strategie Schneiden 1. Hieraus resultiert eine Abnahme des Kantenrissempfindlichkeitsfaktors von $K_{ec} = 0,96$ (Schneiden 1) auf $K_{ec} = 0,92$ (Schneiden 3).

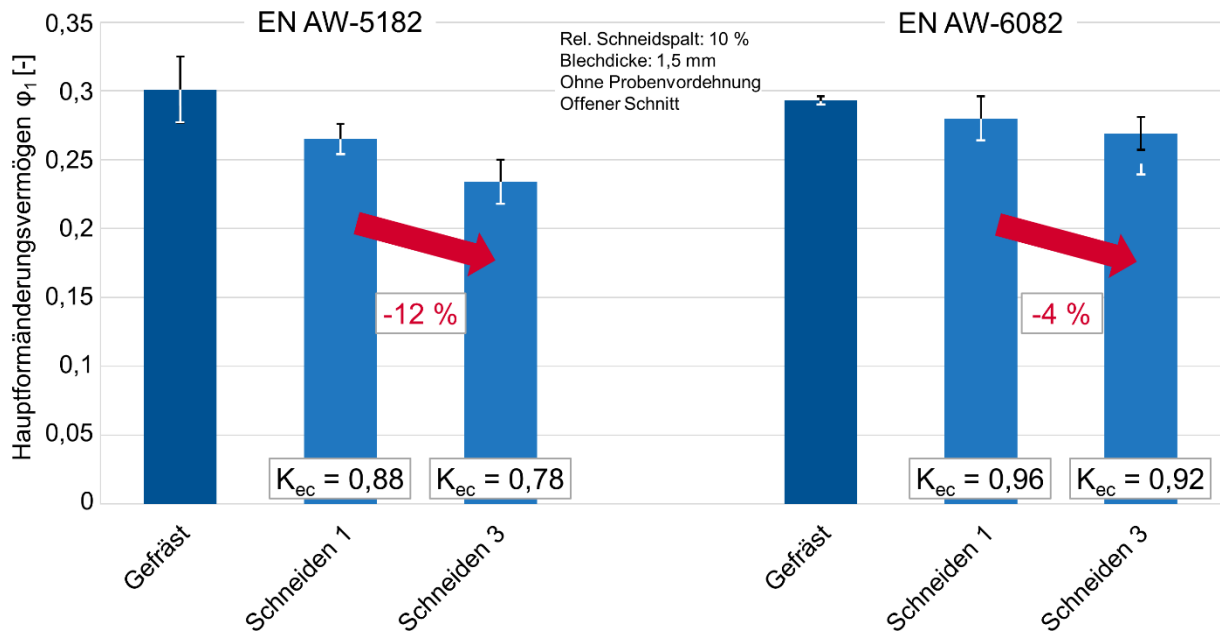


Abbildung 9-33: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.5 Strategie Schneiden 4 (zweistufiges Scherschneiden)

Vorausgegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass das Restumformvermögen an der Kante durch einen zwei- oder mehrstufigen Schneidprozess bei Stahlwerkstoffen verbessert werden kann (Feistle et al., 2018), (Pätzold et al., 2018). Im Rahmen dieser Schneidstrategie soll überprüft werden, ob auch bei Aluminiumwerkstoffen eine Reduzierung der Kantenrissempfindlichkeit durch einen zweistufigen Scherschneidprozess realisiert werden kann. Hierzu soll eine optimale Nachschneidzugabe z ermittelt werden, wobei als Rahmenbedingung der relative Schneidspalt sowohl beim Vor- als auch beim Nachschneiden konstant $u_{rel} = 10\%$ beträgt (analog zu den anderen Schneidstrategien) und der Schneidkantenradius r stets scharfkantig ($r < 10\ \mu\text{m}$) ausgeführt werden soll (Ausnahme: zur Vermeidung von Sekundärglattschnitt wird bei EN AW-5182 beim Nachschneiden auch ein Schneidkantenradius von $r_N = 50\ \mu\text{m}$ untersucht).

Die Ermittlung der optimalen Nachschneidzugabe z unter den gegebenen Rahmenbedingungen erfolgt in Vorversuchen, wobei zunächst Kantenrisszugproben mit einem Offset auf einer Probeenseite in Höhe der Nachschneidzugabe durch Fräsen gefertigt werden. Anschließend wird dieser Offset mit einem scharfkantigen Stempel ($r < 10\ \mu\text{m}$) analog zur Strategie Schneiden 1 abgeschnitten, sodass die fertige Kantenrisszugprobe mit einer Probenbreite von 10 mm entsteht. Jeweils drei nachgeschchnittene Proben mit Offsets ($\hat{=}$ Nachschneidzugaben) zwischen 0,1 mm und 1,5 mm werden schließlich einem Kantenrisszugversuch unterzogen und die Nachschneidzugabe mit der geringsten Kantenrissempfindlichkeit bestimmt. Hierbei werden die besten Ergebnisse mit einer (vorgefrästen) Nachschneidzugabe von 0,3 mm erzielt, weshalb

Schneidaktivelemente für das Vorschneiden mit diesem Offset konstruiert und hergestellt werden.

Mikroskopaufnahmen der resultierenden Schnittflächen, welche durch einen zweistufigen Scherschneidprozess (Vorschneiden und Nachschneiden) mit einer Nachschneidzugabe von 0,3 mm gefertigt wurden ($u_{rel,vor} = u_{rel,nach} = 10\%$), sind in Abbildung 9-34 gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass beim zweistufigen Scherschneiden von EN AW-5182 mit $r_N < 10\ \mu\text{m}$ (Schneiden 4a) in der Bruchfläche inselförmig Sekundärglattschnitt eingelagert ist (Schneiden 4a, Abbildung 9-34, oben links), während bei EN AW-6082 mit $r_N < 10\ \mu\text{m}$ dieser unerwünschte Effekt nicht auftritt (Abbildung 9-34, unten). Der Sekundärglattschnitt beim Nachschneiden von EN AW-5182 kann verhindert werden, indem beim Nachschneiden ein vergrößerter Schneidkantenradius am Stempel von $r_N = 50\ \mu\text{m}$ verwendet wird (Schneiden 4b, Abbildung 9-34, oben rechts).

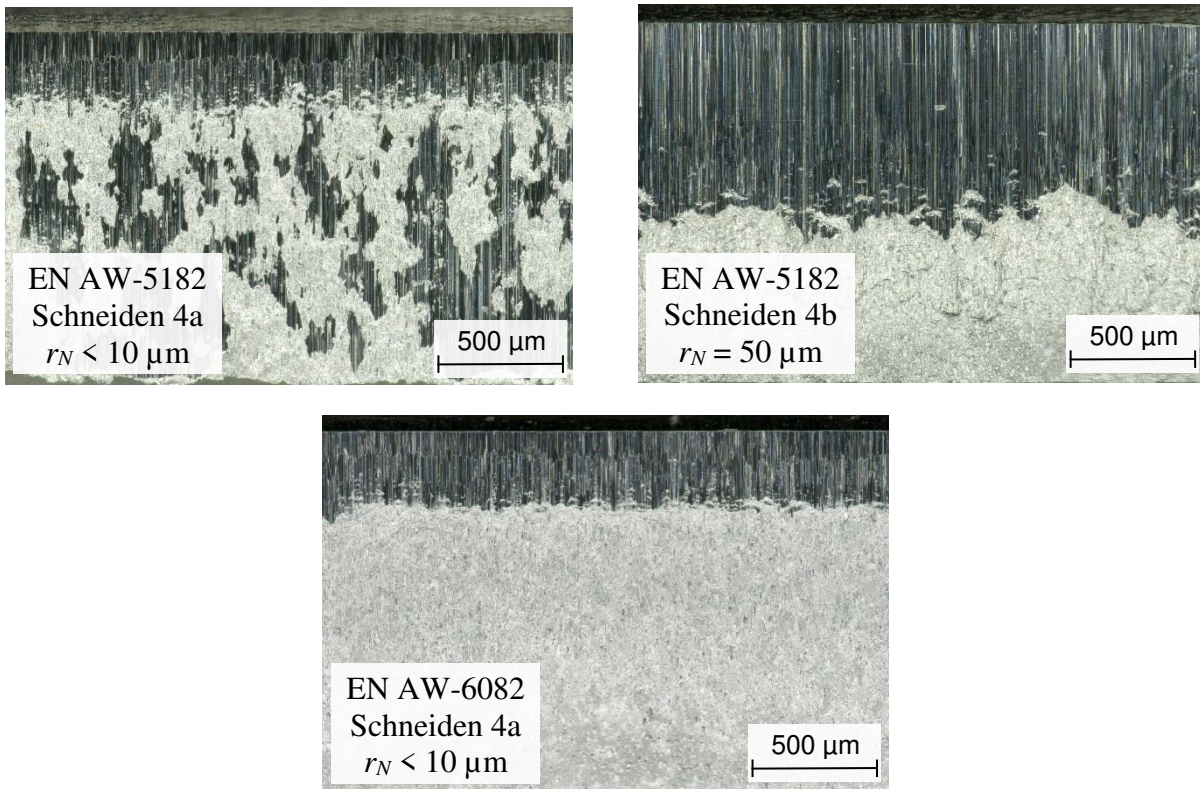


Abbildung 9-34: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 4 für EN AW-5182 mit scharfkantigem Stempel nachgeschnitten (oben links), EN AW-5182 mit $50\ \mu\text{m}$ Schneidkantenradius nachgeschnitten (oben rechts) und EN AW-6082 mit scharfkantigem Stempel nachgeschnitten (unten)

Ursächlich für die Entstehung des Sekundärglattschnittes ist die Richtung der Rissausbreitung beim Nachschneiden. Während in den Vorversuchen beim Nachschneiden der mit einem Offset von 0,3 mm vorgefrästen Proben die Rissausbreitung in Richtung der Schneidkante der Matrize erfolgt (Abbildung 9-35, links) und somit kein Sekundärglattschnitt gebildet wird, erfolgt die Rissausbreitung beim Nachschneiden der vorgeschneittenen Proben in Richtung der Bruchfläche

(Abbildung 9-35, rechts). Das über die Bewegungsebene des Stempels überstehende Material wird anschließend von diesem abgeschabt und der Sekundärglattschnitt wird gebildet.

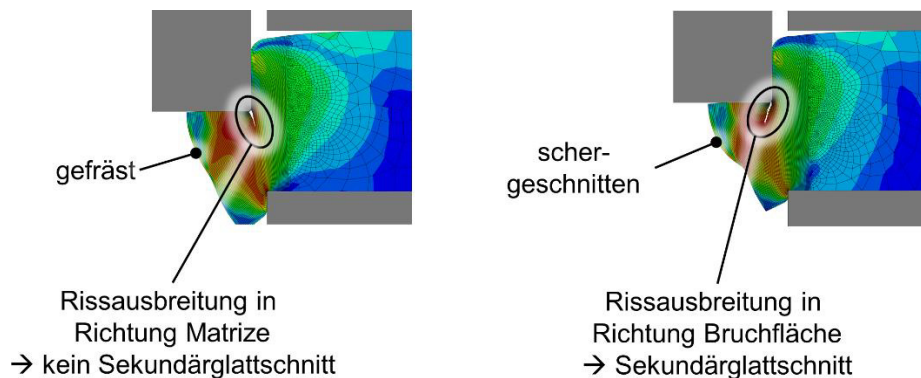


Abbildung 9-35: Vergleich Nachschneiden mit vorgefräster (links) und vorgeschchnittener Kante (rechts)

Im Vergleich zur Strategie Schneiden 1 ruft das zweistufige Scherschneiden eine Vergrößerung des Glattschnittanteils hervor. Während beim Nachschneiden mit scharfkantigem Stempel ($r_N < 10 \mu\text{m}$) der Glattschnittanteil um 27 % (EN AW-5182) respektive 47 % (EN AW-6082) anwächst, ist beim Nachschneiden von EN AW-5182 mit einem Schneidkantenradius von $r_N = 50 \mu\text{m}$ ein Anstieg des Glattschnittanteils von 211 % zu verzeichnen (Abbildung 9-36). Gleichzeitig wird sowohl für Strategie Schneiden 4a als auch Schneiden 4b eine Reduzierung des Anteils des Kanteneinzugs im Vergleich zu Schneiden 1 beobachtet. Während das Nachschneiden von EN AW-6082 mit scharfkantigem Stempel (Schneiden 4a) keinen Einfluss auf die Grathöhe aufweist, ruft Strategie Schneiden 4a bei EN AW-5182 einen sehr ausgeprägten Grat mit einer durchschnittlichen Grathöhe von $278 \mu\text{m}$ hervor. Dieser übermäßige Grat kann durch eine Vergrößerung des Schneidkantenradius beim Nachschneiden auf $r_N = 50 \mu\text{m}$ vermieden werden (Schneiden 4b).

Der in Abbildung 9-34 ersichtliche Sekundärglattschnitt bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 4a zeigt auch Auswirkungen auf die maximalen Höhengsprünge, welche an der Schnittkante parallel zur Blechoberfläche ermittelt werden können. Während bei den Konfigurationen ohne Sekundärglattschnitt kein wesentlicher Unterschied zu Strategie Schneiden 1 festgestellt wird, weist Strategie Schneiden 4a bei EN AW-5182 am Übergang zwischen Sekundärglattschnitt und Bruchfläche deutliche Stufen auf (Abbildung 9-37).

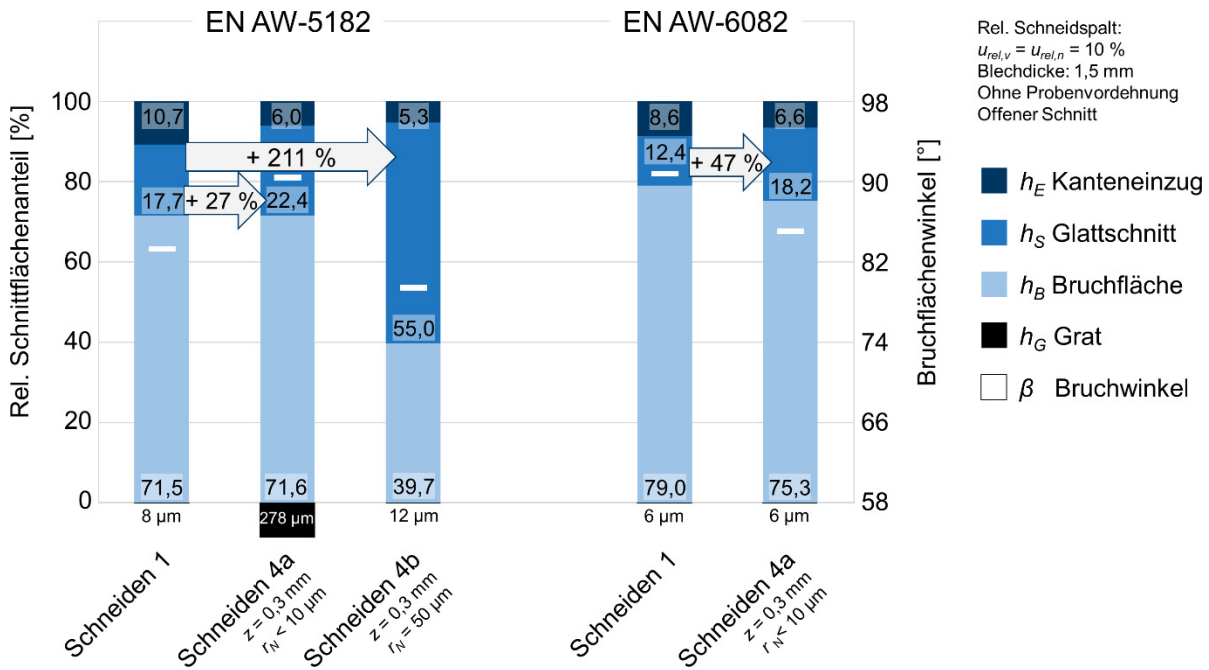


Abbildung 9-36: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die Schnittflächenkenngrößen

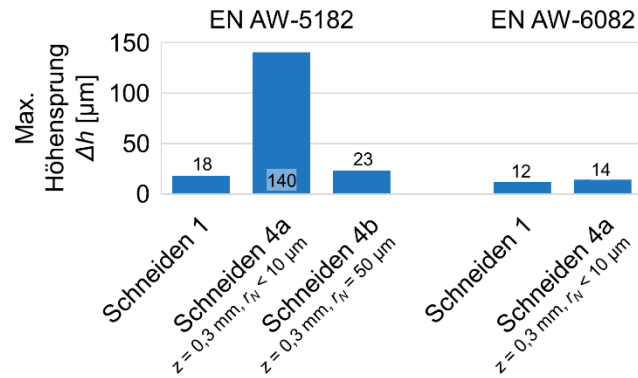


Abbildung 9-37: Vergleich der maximalen Höhengsprünge am Übergang (Sekundär-) Glattschnitt – Bruch

Die gemessenen Rauheiten der Glattschnitt- sowie der Bruchflächen beim zweistufigen Schneiden sind in Abbildung 9-38 gezeigt. Das Nachschneiden hat bei EN AW-5182 sowohl mit $r_N < 10 \mu\text{m}$ als auch mit $r_N = 50 \mu\text{m}$ eine Reduzierung der Glattschnitt Rauheit auf $R_z = 3,1 \mu\text{m}$ zur Folge, wobei bei EN AW-6082 die Rauheit des Glattschnitts im Vergleich mit Schneiden 1 nahezu unverändert bleibt. Der Einfluss des zweistufigen Schneidens auf die Bruchflächenrauheit ist uneinheitlich. Während Strategie Schneiden 4a bei beiden untersuchten Aluminiumlegierungen eine Reduzierung der Rauheit an der Bruchfläche bewirkt, erhöht sich die Bruchflächenrauheit beim Nachschneiden von EN AW-5182 mit einem auf $r_N = 50 \mu\text{m}$ verrundeten Stempel (Schneiden 4b).

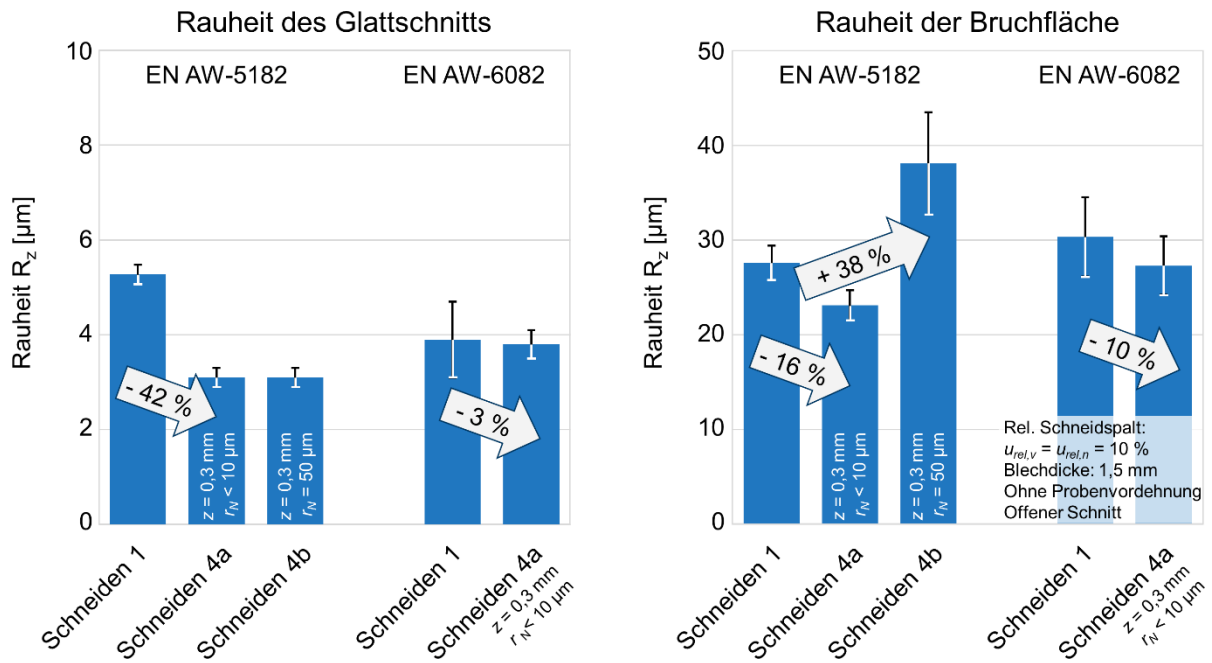


Abbildung 9-38: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die Schnittflächenrauheiten

Die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen im Bereich der Schereinflusszone sind für das zwei-stufige Scherschneiden in Abbildung 9-39 präsentiert. Es kann festgestellt werden, dass Strategie Schneiden 4a bei EN AW-5182 eine Erhöhung der maximalen Aufhärtung um 12,3 % hervorruft. Die höchsten Härten werden dabei im Bereich des Sekundärglattschnitts und des Grats gemessen, wohingegen die Aufhärtung im Bereich des Primärglattschnitts im Vergleich zur Strategie Schneiden 1 geringere Werte annimmt. Bei EN AW-6082 und Strategie Schneiden 4a reduziert sich nicht nur die maximale Aufhärtung um 4,0 %, auch die aufgehärtete Randzone wird im Vergleich zu Strategie Schneiden 1 etwas kleiner. Strategie Schneiden 4b hat bei EN AW-5182 eine Reduzierung der maximalen Aufhärtung von 13,4 % zur Folge und auch die Tiefe der aufgehärteten Randzone nimmt deutlich ab. Die im Bereich des Primärglattschnitts in der ersten Messlinie ermittelten Härten sind dabei zwischen Strategie Schneiden 4a und Schneiden 4b in etwa vergleichbar.

Der Einfluss des Nachschneidens auf die Kantenrissempfindlichkeit kann aus Abbildung 9-40 entnommen werden. Hierbei zeigt Strategie Schneiden 4a bei EN AW-5182 eine Erhöhung der Kantenrissempfindlichkeit im Vergleich zur Referenzstrategie Schneiden 1. Während der Kantenrissempfindlichkeitsfaktor bei Schneiden 1 bei $K_{ec} = 0,88$ liegt, reduziert sich dieser zu $K_{ec} = 0,80$ bei Schneiden 4a. Beim Nachschneiden mit verrundeter Schneidkante (Strategie Schneiden 4b) kann bei EN AW-5182 eine deutliche Reduzierung der Kantenrissempfindlichkeit mit einem Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,96$ erreicht werden. Das erzielbare Hauptformänderungsvermögen des auch bei Strategie Schneiden 1 schon kantenrissunempfindliche Werkstoffs EN AW-6082 kann durch einen zweistufigen Schneidprozess mit Strategie

Schneiden 4a weiter erhöht werden. Somit wird ein Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,98$ (im Vergleich zu $K_{ec} = 0,96$ bei Schneiden 1) erreicht.

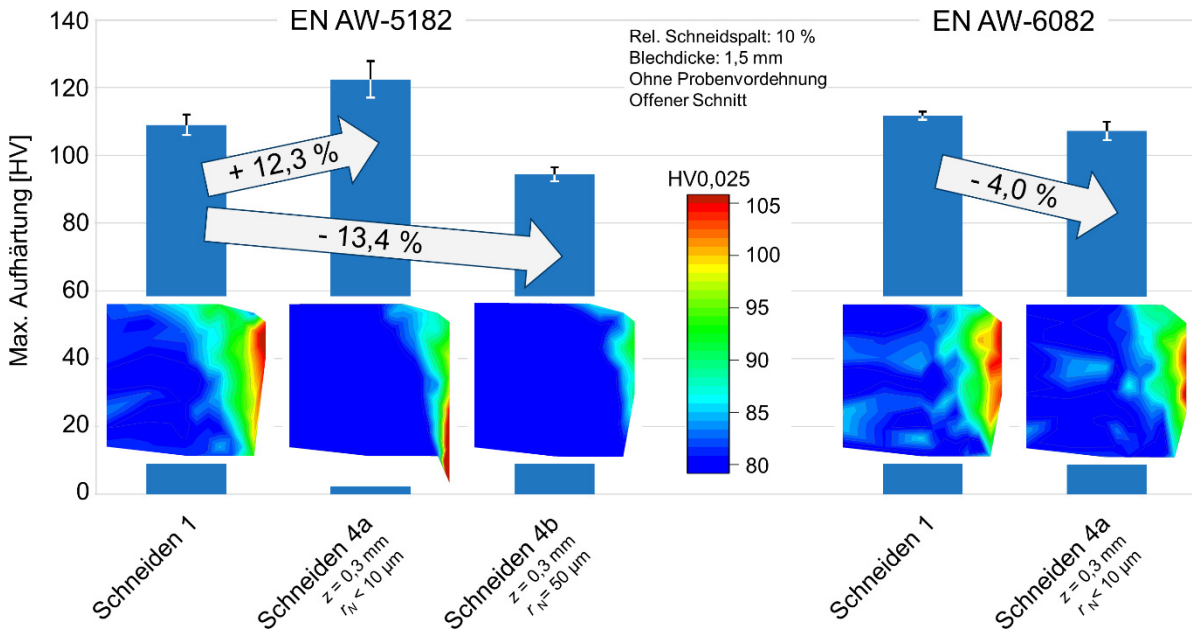


Abbildung 9-39: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die max. Aufhärtung der Scherzone

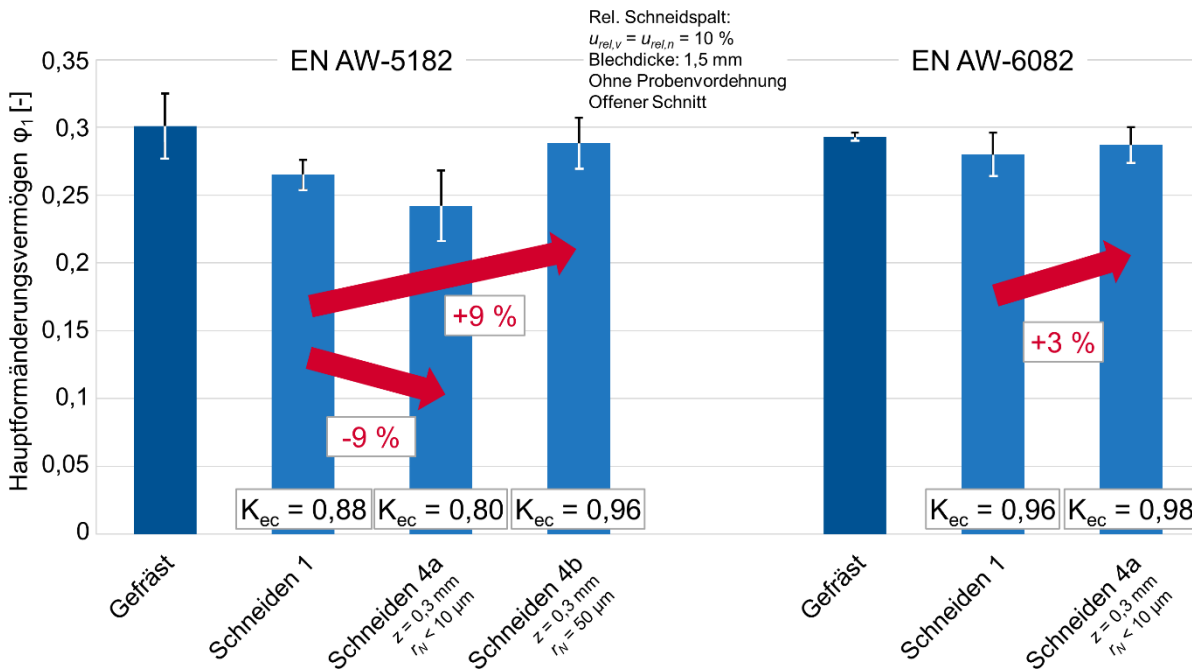


Abbildung 9-40: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.6 Strategie Schneiden 5 (frühzeitige Rissinitiierung)

Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Reduzierung der Flitterbildung beim Beschneiden von Aluminiumblechen wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) eine modifizierte Schneidkante am Stempel entwickelt, die eine frühzeitige Rissinitiierung hervorruft und somit den Glattschnittanteil reduziert (Volk und Krinninger, 2018). Im Folgenden soll mit der in Abbildung 9-41 dargestellten modifizierten Schneidkantengeometrie der Einfluss einer frühzeitigen Rissinitiierung beim Scherschneiden auf die Kantenrissempfindlichkeit untersucht werden. Die modifizierte Schneidkante zeichnet sich durch eine gestufte Geometrie aus, wobei die Höhe der Stufe 1,0 mm, die Breite der Stufe 0,5 mm und der Radius an der oberen Stufenkante 0,5 mm beträgt. Die eigentliche Schneidkante ist scharfkantig ausgeführt.

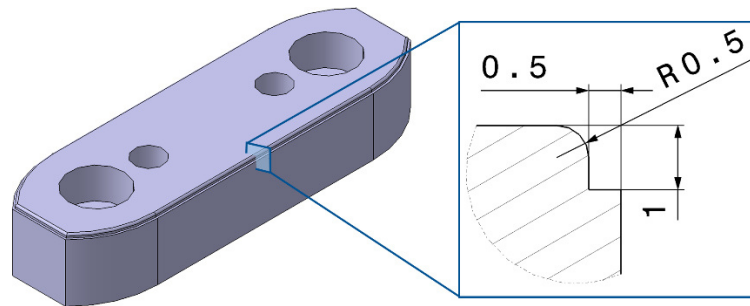


Abbildung 9-41: Gestufte Schneidkante am Stempel zur Reduzierung des Glattschnittanteils

Mikroskopaufnahmen der mit dieser Strategie erzeugten Schnittflächen sind in Abbildung 9-42 gezeigt. Im Vergleich zu Strategie Schneiden 1 kann der Glattschnittanteil wie beabsichtigt verringert werden, wobei die Reduzierung mit -45 % bei EN AW-5182 deutlich stärker als bei EN AW-6082 (-8 %) ausfällt (Abbildung 9-43). Durch das Vorbiegen des Bleches vor dem eigentlichen Schneiden erhöht sich der Kanteneinzugsanteil um 52 % bei EN AW-5182 respektive um 30 % bei EN AW-6082. Ein Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die resultierende Grathöhe an der Schnittfläche kann nicht festgestellt werden.

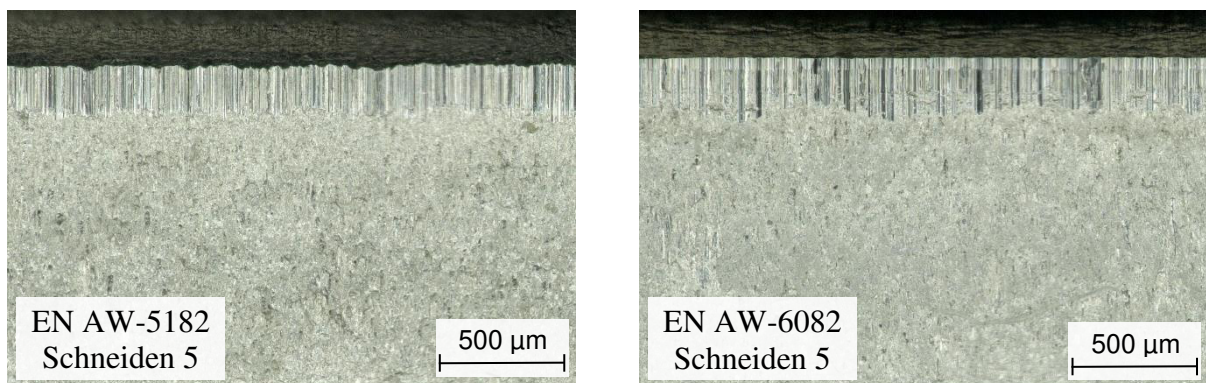


Abbildung 9-42: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 5 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)

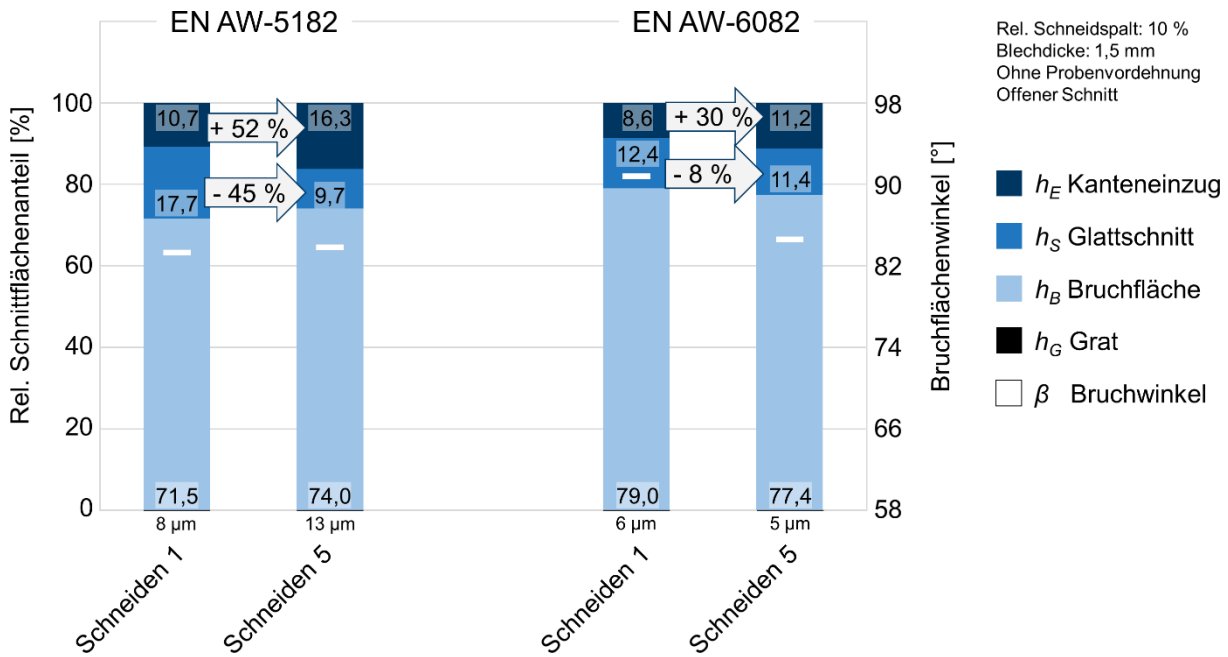


Abbildung 9-43: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Schnittflächenkenngrößen

Rauheitsmessungen ergeben für Strategie Schneiden 5 erhöhte Rauheiten an der Glattschnittfläche (Abbildung 9-44). Die Rautiefe R_z vergrößert sich im Vergleich zur Referenzstrategie Schneiden 1 bei EN AW-5182 um 125 %, bei EN AW-6082 um 126 %. Ebenso hat die Verwendung des gestuften Stempels um 15 % (EN AW-5182) bzw. um 14 % (EN AW-6082) höhere Rauheiten an der Bruchfläche zur Folge.

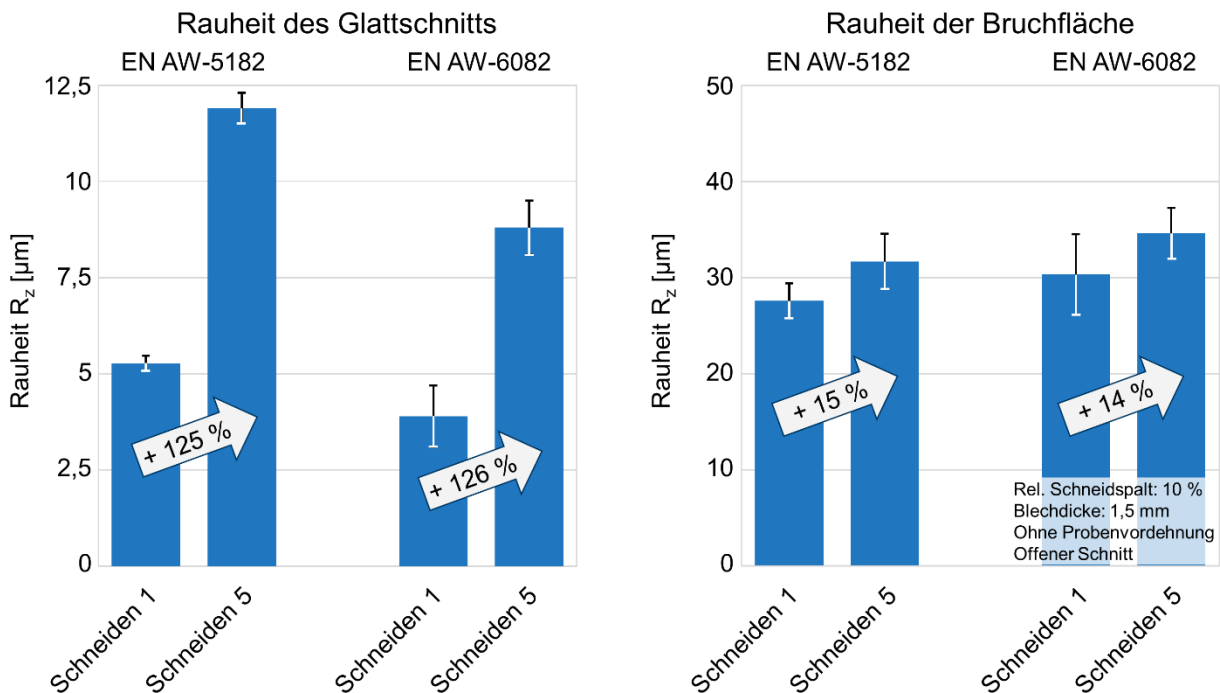


Abbildung 9-44: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Schnittflächenrauheiten

Die maximale Aufhärtung in der Scherzone erhöht sich mit Strategie Schneiden 5 bei EN AW-5182 um 3,0 %, während bei EN AW-6082 eine Reduzierung von 0,6 % zu verzeichnen ist

(siehe Abbildung 9-45). Auffällig ist, dass die maximale Aufhärtung bei beiden untersuchten Legierungen nicht mehr am Übergangsbereich zwischen Glattschnitt und Bruchfläche auftritt, sondern im Bereich der Bruchfläche lokalisiert werden kann.

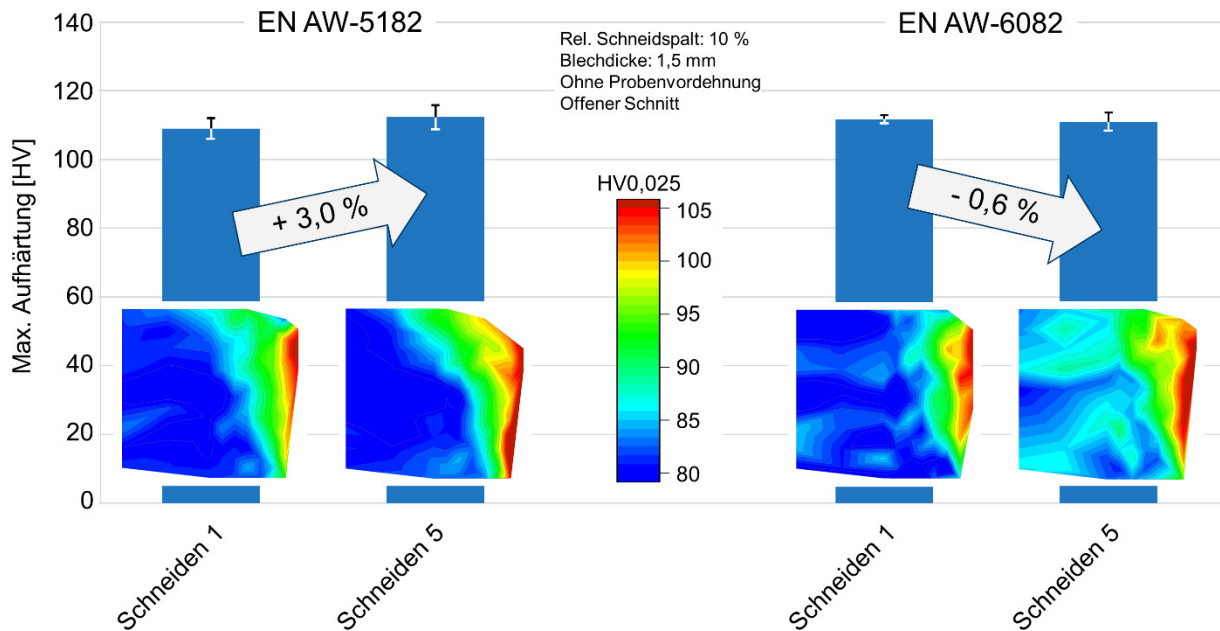


Abbildung 9-45: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die max. Aufhärtung der Scherzone

Der Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Kantenrissempfindlichkeit wird in Abbildung 9-46 präsentiert. Hierbei zeigt die mit dem gestuften Stempel geschnittene Kante ein reduziertes Hauptformänderungsvermögen, welches bei EN AW-5182 um 5 % geringer und bei EN AW-6082 um 14 % geringer im Vergleich zu Strategie Schneiden 1 ausfällt. Der Kantenrissempfindlichkeitsfaktor verringert sich bei EN AW-5182 auf $K_{ec} = 0,84$ und der bei Strategie Schneiden 1 kantenrissunempfindliche Werkstoff EN AW-6082 ist bei Strategie Schneiden 5 mit einem Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,82$ als kantenrissgefährdet einzustufen.

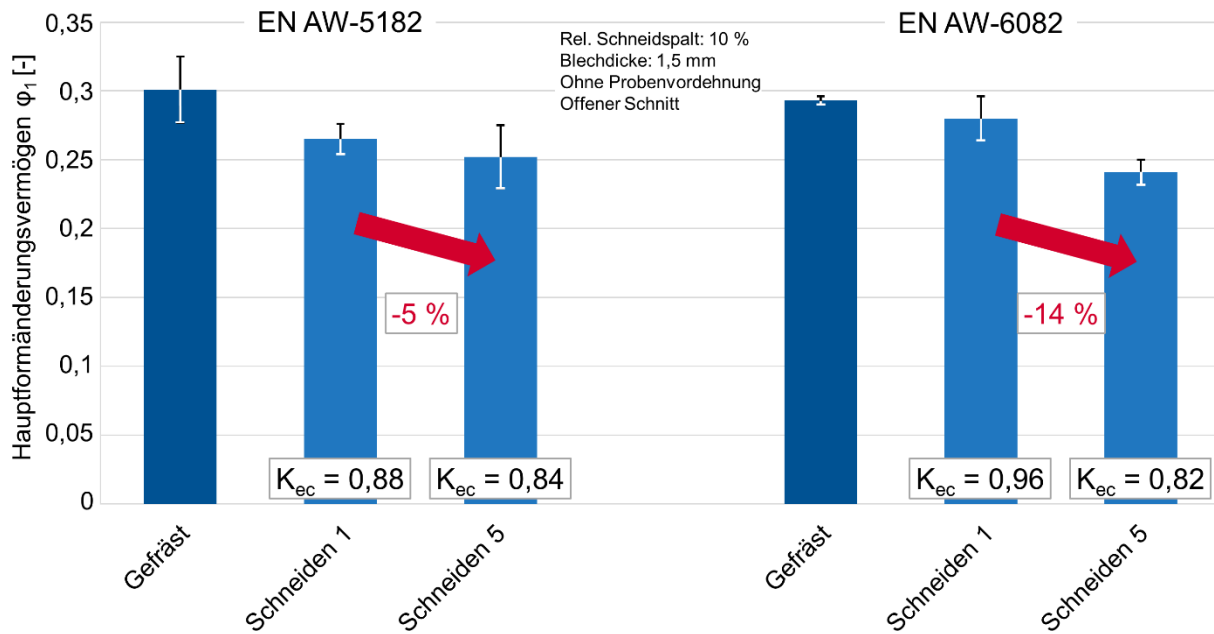


Abbildung 9-46: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.7 Strategie Laserschneiden

Das charakteristische Riefenmuster der laserstrahlgeschnittenen Schnittflächen ist auf den Mikroskopaufnahmen in Abbildung 9-47 ersichtlich. Eine Folge dieser Oberflächenstruktur sind deutlich erhöhte Rauheiten der laserstrahlgeschnittenen Kanten im Vergleich zu den Rauheiten an der Bruchfläche bei der Referenzstrategie Schneiden 1 (siehe Abbildung 9-48).

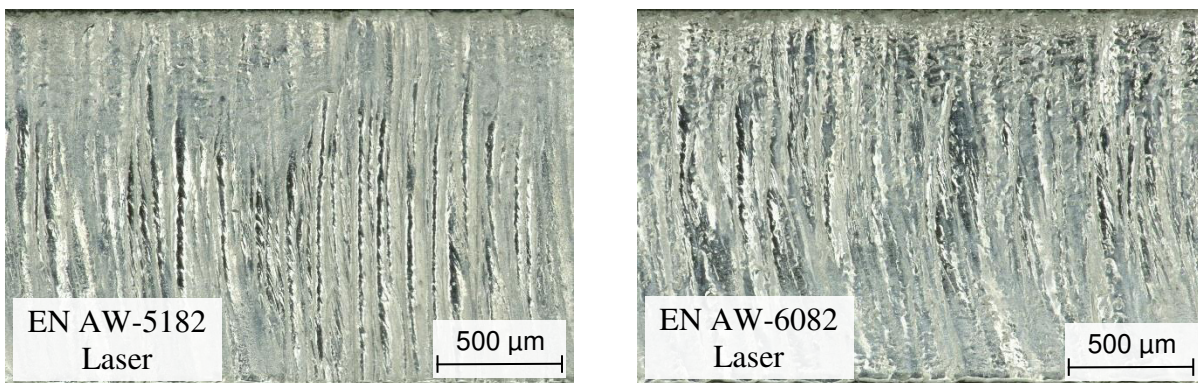


Abbildung 9-47: Schnittflächen beim Laserschneiden für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)

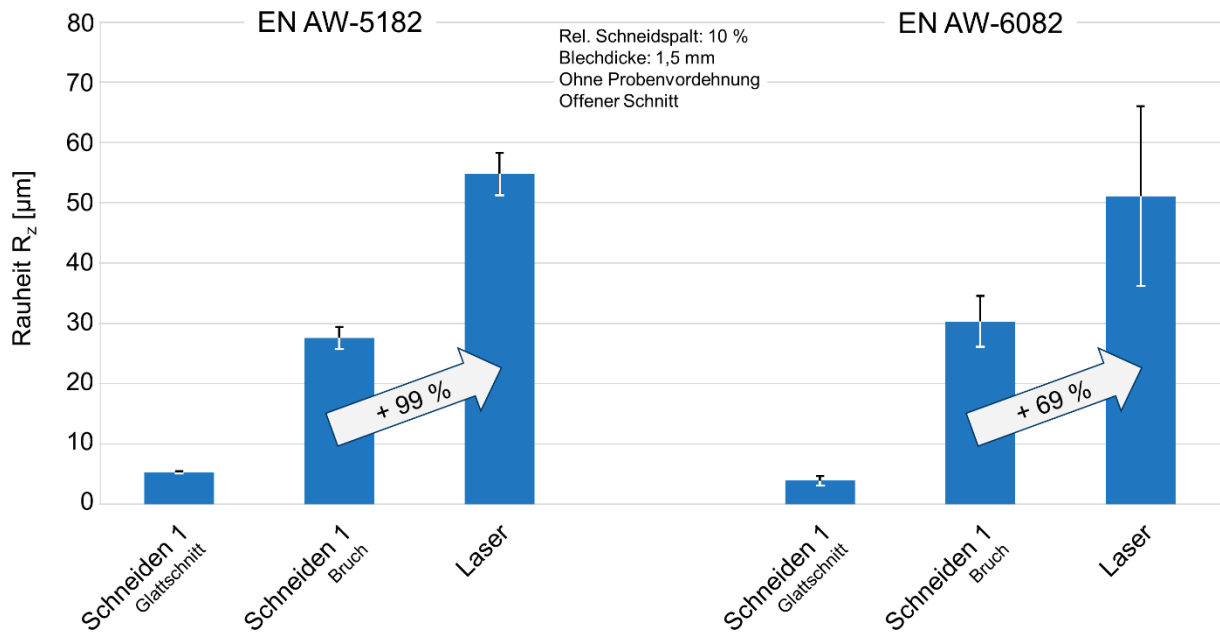


Abbildung 9-48: Einfluss des Laserschneidens auf die Schnittflächenrauheiten

Mikrohärtemessungen im Kantenbereich der laserstrahlgeschnittenen Proben zeigen, dass durch den Trennprozess mittels Laser keine Aufhärtung in den Werkstoff eingebracht wird und die Härten auch an der Kante der Grundhärte des jeweiligen Werkstoffs entsprechen. Im Vergleich mit der maximalen Aufhärtung bei der Strategie Schneiden 1 bedeutet dies eine Reduzierung um 26,3 % bei EN AW-5182 und um 24,3 % bei EN AW-6082.

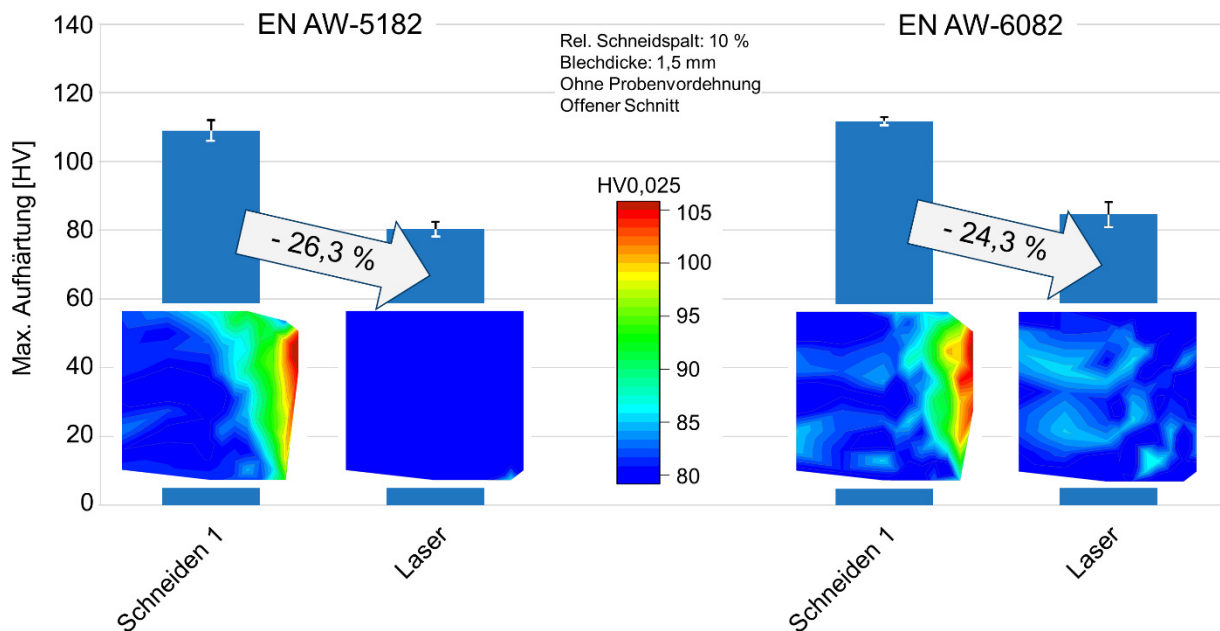


Abbildung 9-49: Einfluss des Laserschneidens auf die max. Aufhärtung an der Kante

Kantenrisszugversuche mit halbseitig laserstrahlgeschnittenen Proben erzielen Hauptumformvermögen, welche den der beidseitig gefrästen Referenzproben entsprechen (siehe Abbildung 9-50). Dies spiegelt sich auch in den ermittelten Kantenrissempfindlichkeitsfaktoren wieder,

die mit $K_{ec} = 0,98$ (EN AW-5182) und $K_{ec} = 0,99$ (EN AW-6082) nahe 1 liegen. Somit zeigen die untersuchten laserstrahlgeschnittenen Kanten keinerlei Kantenrissempfindlichkeit.

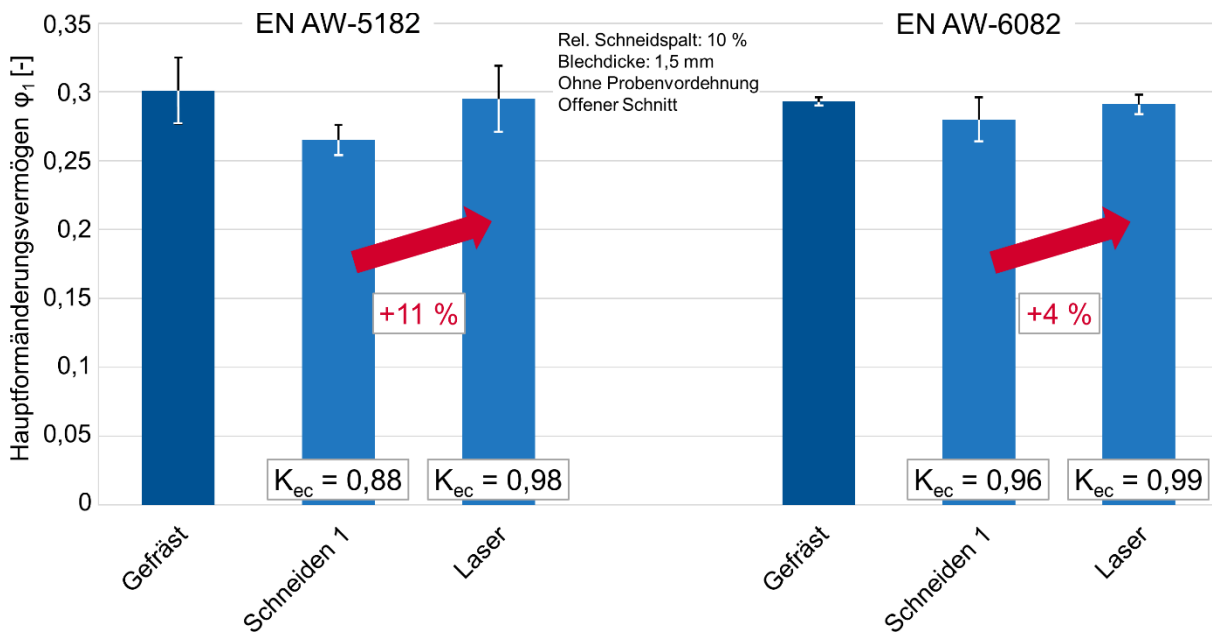


Abbildung 9-50: Einfluss des Laserschneidens auf die Kantenrissempfindlichkeit

9.8 Zusammenfassung der Kantenrissempfindlichkeit bei allen Strategien

Eine Gegenüberstellung der erreichbaren Hauptformänderungsvermögen bei Beginn lokaler Einschnürung sowie der entsprechenden Kantenrissempfindlichkeitsfaktoren ist für alle untersuchten Schneidstrategien für EN AW-5182 in Abbildung 9-51 und für EN AW-6082 in Abbildung 9-52 gegeben.

Das größte Hauptformänderungsvermögen wird erwartungsgemäß bei beiden untersuchten Aluminiumlegierungen mit der beidseitig gefrästen Referenzprobe erzielt, bei welcher keinerlei Kantenrissempfindlichkeit zu verzeichnen ist.

Beim Werkstoff EN AW-5182 wird die geringste Kantenrissempfindlichkeit mit der gelaserten Schnittfläche ermittelt ($K_{ec} = 0,98$). Auch der zweistufige Scherschneidprozess mit angepasstem Schneidkantenradius beim Nachschneiden zur Vermeidung von Sekundärglattschnitt (Schneiden 4b) erzielt mit einem Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,96$ sehr gute Ergebnisse. Die drittgeringste Kantenrissempfindlichkeit wird bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 2 (DLC-beschichteter Stempel) erreicht ($K_{ec} = 0,92$). Es folgen die Referenzstrategie Schneiden 1 im offenen Schnitt ($K_{ec} = 0,88$) und Schneiden 1 im geschlossenen Schnitt ($K_{ec} = 0,87$). Eine Erhöhung der Kantenrissempfindlichkeit im Vergleich zur Referenz Schneiden 1 wird mit der gestuften Schneidkante (Schneiden 5) mit einem Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,84$ beobachtet. Auch der zweistufige Schneidprozess mit scharfer

Schneidkante beim Nachschneiden (Schneiden 4a), bei welchem Sekundärglattschnitt zu verzeichnen ist, weist mit $K_{ec} = 0,80$ eine erhöhte Kantenrissegefahr auf. Die schlechtesten Ergebnisse zeigt Strategie Schneiden 3 mit einem kaltaufgeschweißten Stempel, wobei mit $K_{ec} = 0,78$ der niedrigste und somit ungünstigste Kantenrissempfindlichkeitsfaktor aller Versuchsreihen registriert wird.

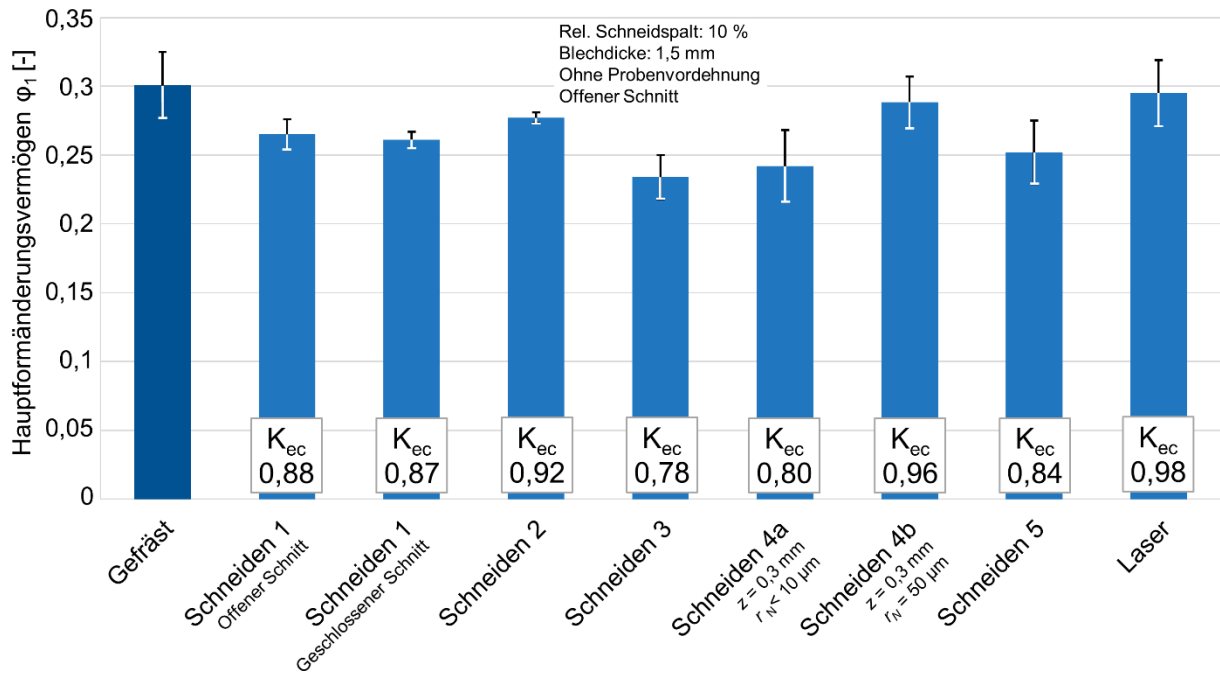


Abbildung 9-51: Einfluss der Schneidstrategie auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-5182

Beim Werkstoff EN AW-6082 wird das größte Hauptformänderungsvermögen ebenfalls mit der halbseitig gelaserten Probe erzielt, welche mit einem Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,99$ ein nahezu identisches Formänderungsvermögen wie die beidseitig gefräste Referenzprobe aufweist. Ebenfalls werden mit dem zweistufigen Schneidprozess (Schneiden 4a) bei einem Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,98$ sehr gute Ergebnisse erzielt. Auch die Referenzstrategie Schneiden 1 im offenen Schnitt zeigt bei EN AW-6082 keine Kantenrissempfindlichkeit ($K_{ec} = 0,96$). Eine Reduzierung des Kantenrissempfindlichkeitsfaktors im Vergleich zur Referenz Schneiden 1 (offener Schnitt) ist bei den Strategien Schneiden 3 (Stempel mit Kaltaufschweißungen, $K_{ec} = 0,92$) und Schneiden 1 im geschlossenen Schnitt ($K_{ec} = 0,90$) zu verzeichnen. Schneiden 2 bewirkt einen Kantenrissempfindlichkeitsfaktor von $K_{ec} = 0,84$, weshalb EN AW-6082 in Kombination mit dieser Strategie als kantenrissegefährdet einzustufen ist. Die größte Kantenrissempfindlichkeit wurde beim Werkstoff EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 5 ermittelt ($K_{ec} = 0,82$).

Anhand der in Abbildung 9-52 präsentierten Ergebnisse zeigt sich, dass ein vermeintlich kantenrisseunempfindlicher Werkstoff wie EN AW-6082 - mit Referenzstrategie Schneiden 1 im

offenen Schnitt geschnitten - bei der Wahl einer ungeeigneten Schneidstrategie auch anfällig für Kantenrisse werden kann.

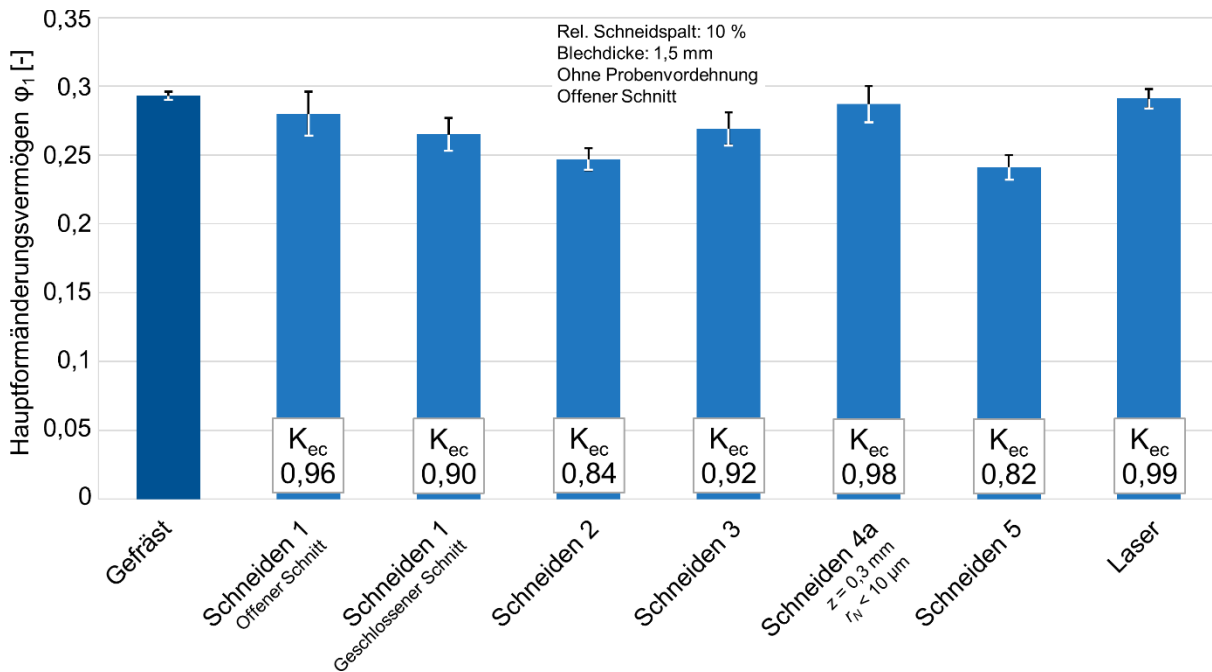


Abbildung 9-52: Einfluss der Schneidstrategie auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-6082

9.9 Validierung der Ergebnisse aus dem EFTT durch Kragenziehversuche

Zur Validierung der Ergebnisse aus dem Kantenrisszugversuch werden Kragenziehversuche mit ausgewählten Schneidstrategien durchgeführt (vergleiche auch Kapitel 8.2). Hierfür werden die Strategien Schneiden 1 mit geschlossenem Schnitt - im Folgenden als Schneiden 1G bezeichnet - für beide Aluminiumlegierungen und Strategie Schneiden 4a (zweistufiges Scherschneiden, Nachschneiden mit scharfkantigen Aktivelementen) für EN AW-6082 ausgewählt, da bei diesem Werkstoff kein Sekundärglattschnitt zu verzeichnen war. Es erfolgen je Schneidstrategie bis zu zehn Versuche für jedes diskrete Lochaufweitungsverhältnis. Eine Einteilung der erzeugten Bauteile in Gut- und Schlechteile in Abhängigkeit des Lochaufweitungsverhältnisses λ ist in Abbildung 9-53 gegeben. Hierbei sind Lochaufweitungsverhältnisse, bei welchen überwiegend Gutteile festgestellt werden, grün eingefärbt, andernfalls werden diese mit roter Farbe hinterlegt.

Bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1G kann nach zuvor erläuteter Einordnungslogik ein Lochaufweitungsverhältnis von bis zu $\lambda = 40 \%$ erzielt werden, wobei 100 % Gutteile noch bei einem Lochaufweitungsverhältnis von $\lambda = 35 \%$ festgestellt werden. Strategie Schneiden 1G bei EN AW-6082 ermöglicht Lochaufweitungsverhältnisse von bis zu $\lambda = 25 \%$. Hierbei werden auch 100 % Gutteile ermittelt. Die Anwendung des zweistufigen Scherschneidprozesses Strategie Schneiden 4a verbessert bei EN AW-6082 im Vergleich zu Schneiden 1G das

erzielbare Lochaufweitungsverhältnis nach der Einteilungslogik auf $\lambda = 30\%$. Dabei werden von zehn Versuchsproben jedoch nur sechs Gutteile erzielt, was darauf schließen lässt, dass das tatsächliche Lochaufweitungsverhältnis mit 100 % Gutteilen zwischen den Lochaufweitungsverhältnissen von $\lambda = 25\%$ und $\lambda = 30\%$ zu verorten ist. Eine genauere Eingrenzung ist aufgrund der Versuchsmethodik beim Kragenziehversuch mit diskreten, werkzeugabhängigen Lochaufweitungsverhältnissen nicht möglich.

λ	EN AW-5182 Schneiden 1G			EN AW-6082 Schneiden 1G			EN AW-6082 Schneiden 4a	
	Gut	Schlecht		Gut	Schlecht		Gut	Schlecht
5 %								
10 %	5	0		5	0		5	0
15 %								
20 %	5	0		5	0		5	0
25 %				10	0		10	0
30 %	5	0		1	9		6	4
35 %	10	0					0	5
40 %	7	3						
45 %	0	5						
50 %								

Abbildung 9-53: Erreichbares Lochaufweitungsverhältnis in Abhängigkeit des Werkstoffes und der Schneidstrategie

Eine Gegenüberstellung zwischen den erzielbaren Hauptformänderungsvermögen an der Bauteilkante im Kantenrisszugversuch (*EFTT*) und in den Kragenziehversuchen ist in Abbildung 9-54 gegeben. Hierbei ist ein Vergleich des Hauptformänderungsvermögens bei Beginn lokaler Einschnürung (Kantenrisszugversuch) mit dem Hauptformänderungsvermögen bei Bruch (Kragenziehversuch) zulässig, da die Berechnung des Umformgrades beim Kragenziehversuch über das erreichte Lochaufweitungsverhältnis und somit über den kompletten Kragenumfang erfolgt. Sobald an einer Stelle am Kragen eine lokale Instabilität auftritt, konzentriert sich die plastische Umformung auf diesen Bereich, während alle anderen Bereiche in einen elastischen Zustand zurückfallen. Somit führt eine lokale Einschnürung zwar zu einem weiteren Anstieg des Hauptumformgrades im Bereich der Instabilität, das über den kompletten Kantenumfang ermittelte Lochaufweitungsverhältnis erhöht sich jedoch nicht in gleichem Umfang.

Es zeigt sich, dass eine Vorhersage der kantenrissfreien Herstellbarkeit der Kragen mit dem Hauptformänderungsvermögen φ_1 aus dem Kantenrisszugversuch möglich ist. Während beim Werkstoff EN AW-6082 das erzielbare Lochaufweitungsverhältnis recht genau durch den Kantenrisszugversuch vorhergesagt wird, ist beim Werkstoff EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1G noch ein Sicherheitspuffer zwischen dem Hauptformänderungsvermögen aus dem *EFTT* und den Ergebnissen aus dem Kragenziehversuch zu verzeichnen. Diese Differenz wird

auf ein ausgeprägteres Umformvermögen bei EN AW-5182 nach Beginn der lokalen Einschnürung im Vergleich zu EN AW-6082 zurückgeführt. Während die Differenz der Hauptumformgrade zwischen Beginn lokaler Einschnürung und Bruch aus dem Kantenrisszugversuch für Strategie Schneiden 1G bei EN AW-6082 durchschnittlich 0,129 ergibt, beträgt diese bei EN AW-5182 0,219.

Da beim Werkstoff EN AW-6082 durch den *EFTT* eine vergleichbar genaue Vorhersage des erreichbaren Hauptumformungsvermögens ohne derartigen Sicherheitspuffer erfolgt, ist es ratsam, die Ausprägung des Fehlerbalkens aus dem *EFTT* zur Einbeziehung von statistischen Schwankungen bei der Auslegung von Umformprozessen zu berücksichtigen.

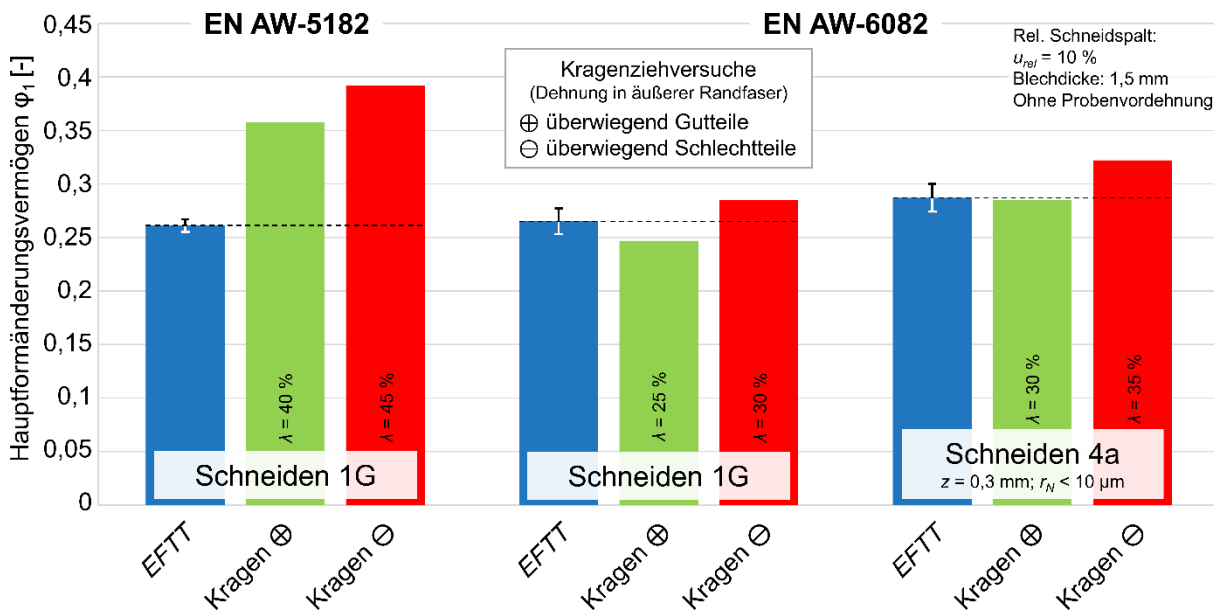


Abbildung 9-54: Vergleich der Hauptumformungsvermögen aus dem Edge-Fracture-Tensile-Test mit den Kragenziehversuchen

10 Diskussion Umformkantenrisse

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Restumformvermögen an schergeschnittenen Kanten und somit die Kantenrissempfindlichkeit bei Aluminiumlegierungen neben dem verwendeten Werkstoff stark von den Kanteneigenschaften abhängig sind. Dabei kann die Kantenrissempfindlichkeit sowohl bei der untersuchten Legierung EN AW-5182 aus der 5000er Serie als auch bei EN AW-6082 aus der 6000er Serie auf gleiche Charakteristika der schergeschnittenen Kante zurückgeführt werden. Jedoch wird ebenfalls festgestellt, dass eine gleiche Schneidstrategie mit gleichen Schneidparametern nicht zwangsläufig auch gleiche Kanteneigenschaften bei verschiedenen Blechwerkstoffen aus Aluminium hervorrufen muss. Hierbei wird auf das Auftreten von Sekundärglattschnitt verwiesen, welcher neben der Schneidstrategie auch vom Blechwerkstoff abhängig ist. Vergleiche hierzu die Ergebnisse der Strategien Schneiden 2 (Kapitel 9.3) und Schneiden 4 (Kapitel 9.5).

Als wesentlicher Faktor für die Kantenrissempfindlichkeit wird das Aufhärteverhältnis an der schergeschnittenen Kante ausgemacht. Dieses bezeichnet das Verhältnis zwischen der maximal ermittelten Härte in der Scherzone und der Grundhärte des Werkstoffs außerhalb der durch das Scherschneiden beeinflussten Zone. So zeigen laserstrahlgeschnittene Kanten, welche bei beiden Aluminiumlegierungen keinerlei messbare Aufhärtung im Vergleich zur Härte des Grundwerkstoffs aufweisen, eine nahezu identische Umformbarkeit wie die gefrästen Referenzkanten. Hierbei ist unerheblich, dass an den gelaserten Kanten die mit Abstand höchsten Rauheiten aller untersuchten Schneidstrategien ermittelt werden (vgl. Kapitel 9.7). Ebenso kann durch eine zweistufige Schneidstrategie mit angepassten Schneidparametern wie Nachschneidzugabe, Schneidspalt und Schneidkantenradius, bei welchen kein Sekundärglattschnitt zu verzeichnen ist, eine Reduzierung der Aufhärtung in der Scherzone realisiert werden. Eine solche Strategie kann ebenfalls in einer verbesserten Umformbarkeit der schergeschnittenen Kante resultieren (vgl. Strategie Schneiden 4, Kapitel 9.5). Im Gegenzug führt eine erhöhte Aufhärtung an der Kante, die beispielsweise beim geschlossenen Schnitt (Kapitel 9.2) oder bei Schnittflächen mit Sekundärglattschnitt (Schneiden 4a bei EN AW-5182, Kapitel 9.5) festgestellt werden kann, zu einer gesteigerten Kantenrissempfindlichkeit.

Ein weiterer Faktor, der die Kantenrissempfindlichkeit in Kombination mit einer Aufhärtung in der Scherzone erheblich beeinflussen kann, sind geometrische Unstetigkeiten der Schnittfläche. Diese können Höhengsprünge - parallel zur Schnittkante gemessen - hervorrufen. Ein charakteristisches Beispiel hierfür ist unregelmäßiger, inselförmig in die Bruchfläche eingelagerter Sekundärglattschnitt (vgl. Kapitel 9.3 und 9.5). Ein vergleichsweise regelmäßiges, über die komplette Breite der Schnittfläche verlaufendes Sekundärglattschnitt-Band (Abbildung 9-12) zeigt bei EN AW-6082 (uniaxiale Vordehnung $\varphi_1 = 0,1$) im Gegensatz dazu keine nennenswert

größeren Höhengsprünge im Vergleich zur Schnittfläche bei der um $\varphi_I = 0,1$ uniaxial vorgedehnten Variante von EN AW-5182 (Kapitel 9.1.2). Da eine unregelmäßige Oberflächenstruktur der Schnittfläche keine Kantenrissempfindlichkeit aufweist, sofern keine Aufhärtung vorhanden ist (vgl. Strategie Laser, Kapitel 9.7), sind die parallel zur Schnittkante verlaufenden Höhengsprünge insbesondere am Übergangsbereich zwischen Glattschnitt- und Bruchfläche beziehungsweise Sekundärglattschnitt- und Bruchfläche von Bedeutung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Bereich in der Regel die größte Aufhärtung gemessen wird. Die an den geometrischen Unstetigkeiten erzeugte Kerbwirkung kann somit in Kombination mit einer Aufhärtung des Werkstoffs im Kantenbereich zu einer erhöhten Kantenrissempfindlichkeit beitragen.

Der Einfluss der Schnittflächenrauheit auf die Kantenrissempfindlichkeit kann nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Es wird angenommen, dass die Rauheit ähnlich wie die geometrischen Unstetigkeiten im Zusammenspiel mit der Werkstoffaufhärtung einen Einfluss auf das Restumformvermögen an der Kante nehmen kann. Da die maximale Aufhärtung in der Regel im unteren Bereich des Glattschnitts anzutreffen ist, dominieren die Höhengsprünge bzw. geometrischen Unstetigkeiten am unregelmäßigen Übergang zwischen Glattschnitt- und Bruchfläche gegenüber der vergleichsweise geringen Rauheit der Glattschnittfläche. Ein Sonderfall kann bei Strategie Schneiden 5 beobachtet werden (Kapitel 9.6): Durch das Vorbiegen des Abfallstückes vor dem eigentlichen Schneidvorgang verschiebt sich die Position der maximalen Aufhärtung in den Bereich der Bruchfläche, welche eine deutlich höhere Rauheit als die Glattschnittfläche aufweist. Tatsächlich ist bei diesen Schnittkanten auch ein geringeres Restumformpotential und somit eine höhere Kantenrissempfindlichkeit festzustellen.

Die teilweise stark erhöhte Kantenrissempfindlichkeit von Schnittkanten, welche mit kaltaufgeschweißtem Stempel hergestellt wurden, kann bei einer Analyse der Messergebnisse nicht auf die zuvor präsentierten Einflussfaktoren Aufhärtung und geometrische Unstetigkeiten zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 9-32). Lediglich eine erhöhte Rauheit der Glattschnittfläche ist zu verzeichnen (Abbildung 9-30). Hierbei ist anzunehmen, dass an den Mikroriefen der Glattschnittfläche lokal begrenzt deutlich höhere Aufhärtungen auftreten, als durch die Mikrohärtmessungen an den untersuchten diskreten Messpositionen entlang der Zugprobe detektiert werden. Somit wäre die Kantenrissempfindlichkeit bei diesen Schnittkanten ebenfalls auf die Faktoren Aufhärtung und Kerbwirkung durch die erhöhte Glattschnitttrauheit an den Riefen zurückzuführen. Ein Nachweis dieser These konnte jedoch aufgrund der zur Verfügung stehenden Messmethodik nicht erbracht werden.

Ein nennenswerter Einfluss einer uniaxialen Vorumformung auf die Umformbarkeit der schergeschnittenen Kante kann beim mit Strategie Schneiden 1 kantenrissunempfindlichen Werkstoff EN AW-6082 nicht festgestellt werden (siehe Abbildung 9-15, Kapitel 9.1.2). Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass eine Vorumformung auch die Blechdicke reduziert und somit der relative, auf die Blechdicke bezogene, Schneidspalt anwächst, sofern der absolute Schneidspalt konstant gehalten wird. Dies kann geänderte Kanteneigenschaften und somit andere Kantenrissempfindlichkeiten hervorrufen. Eine Bewertung der Auswirkungen einer einachsigen Probenvordehnung auf das Kantenrissverhalten bei EN AW-5182 ist aufgrund der lokal stark unterschiedlichen Dehnungsverteilung als Folge des PLC-Effektes bei diesem Werkstoff nicht möglich (vgl. Kapitel 9.1.2).

11 Kanteneinfluss auf quasistatische Kennwerte

Nachfolgend werden die Ergebnisse der quasistatischen Versuche angeführt und diskutiert.

Tabelle 11-1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche an ungekerbten Schwingproben (Geometrie nach VDA239-300) mit polierter, laserstrahl- und schergeschnittener (Schneiden 1) Kante. Es handelt sich um die Mittelwerte aus drei durchgeführten Versuchen je Variante.

Tabelle 11-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche an ungekerbten Schwingproben

Zusammenfassung quasistatische Versuche, Schwingproben nach VDA239-300						
Werkstoff	Kantenbearbeitung		Zugfestigkeit R_m [MPa]	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Gleichmaßdehnung A_g [%]	Bruchdehnung A_{12} [%]
AA5182	poliert	Mittelwert	274	129	21,3	30,4
		Standardabweichung	2,3	3,4	3,4	2,0
	Schneiden 1	Mittelwert	273	137	20,0	30,2
		Standardabweichung	0,9	1,8	0,9	1,3
	Laser	Mittelwert	276	120	21,5	31,4
		Standardabweichung	2,8	13,4	2,4	3,5
AA6082	poliert	Mittelwert	269	155	19,0	27,4
		Standardabweichung	1,1	3,1	1,2	2,5
	Schneiden 1	Mittelwert	265	161	18,7	27,7
		Standardabweichung	1,5	2,3	0,6	0,5
	Laser	Mittelwert	260	151	19,6	27,8
		Standardabweichung	2,4	0,7	0,4	0,5

Im Vergleich mit den Ergebnissen an Normzugproben, sind die Mittelwerte für Zugfestigkeit, 0,2%-Dehngrenze und Gleichmaßdehnung für die nicht normgerechte Probengeometrie etwas höher. Ein direkter Vergleich, insbesondere der Bruchdehnung, macht auf Grund der stark unterschiedlichen Ausgangs- und Messlänge jedoch keinen Sinn. Ein Relativvergleich der Ergebnisse der Versuche an den Schwingproben mit unterschiedlichen Kantenzuständen ist aber möglich.

Bruchdehnung, Gleichmaßdehnung und Zugfestigkeit scheinen näherungsweise nicht durch den Kantenzustand beeinflusst zu werden. Es ist davon auszugehen, dass diese quasistatischen Kennwerte maßgeblich durch den dominanten Kern der Probe vorgegeben werden, deshalb ähneln die Ergebnisse für die beiden Schneidkanten denen des Grundwerkstoffes. Der Einfluss der dünnen Randschicht auf diese Kennwerte ist folglich vernachlässigbar. Ein etwas anderes Bild zeichnet sich für die 0,2%-Dehngrenze ab. Diese scheint sich durch das Scherschneiden

geringfügig zu erhöhen. Für beide Legierungen ist eine Zunahme um etwa 6 % erkennbar. Ein Zusammenhang zur Verfestigung infolge des Schneidprozesses ist naheliegend. Für die laserstrahlgeschnittene Kante sind die Werte dagegen etwas geringer (3 – 7 %), als für den Grundwerkstoff (polierter Zustand).

Abgesehen vom Einfluss des Kantenzustands, geht aus Tabelle 11-1 hervor, dass die Legierung AA5182 (EN AW-5182) eine höhere Zugfestigkeit besitzt, als die Legierung AA6082 (EN AW-6082). Die 0,2%-Dehngrenze ist jedoch bei der 6xxx-Legierung deutlich höher, als bei der 5xxx-Legierung. Gleichmaß- und Bruchdehnung unterscheiden sich kaum.

Durch Tabelle 11-2 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der quasistatischen Kerbzugversuche gegeben. Die freie Einspannlänge beträgt 80 mm.

Tabelle 11-2: Zusammenfassung der quasistatischen Kerbzugversuche

Zusammenfassung quasistatische Kerbzugversuche										
Werkstoff	Kantenbearbeitung		$K_t = 2,5$				$K_t = 4,6$			
			Maximalkraft F_{max} [kN]	Kerbzugfestigkeit R_{mk} [MPa]	Arbeitsaufnahme bis Bruch W_B [J]	Arbeitsaufnahme bis F_{max} W_M [J]	Maximalkraft F_{max} [kN]	Kerbzugfestigkeit R_{mk} [MPa]	Arbeitsaufnahme bis Bruch W_B [J]	Arbeitsaufnahme bis F_{max} W_M [J]
AA5182	poliert	Mittelwert	17,6	244	134,7	123,2	10,7	239	36,5	29,5
		Standardabw.	0,1	0,8	1,3	1,5	0,1	1,3	0,5	0,7
	Schneiden 1	Mittelwert	17,7	246	120,4	103,6				
		Standardabw.	0,2	2,8	4,2	6,3				
	Laser	Mittelwert	16,9	235	125,7	102,3	11,1	246	37,7	29,9
		Standardabw.	0,3	4,5	4,8	7,8	0,2	3,4	1,2	1,8
AA6082	poliert	Mittelwert	17,2	238	90,0	84,3	10,9	242	24,2	19,2
		Standardabw.	0,1	0,8	1,4	1,0	0,1	1,3	0,3	0,3
	Schneiden 1	Mittelwert	17,5	243	73,5	62,8	11,4	253	21,8	16,6
		Standardabw.	0,1	1,4	1,7	2,5	0,2	4,4	0,2	0,4
	Laser	Mittelwert	17,0	237	87,8	81,5	10,8	241	24,3	19,4
		Standardabw.	0,1	0,8	0,2	0,6	0,1	1,3	0,8	1,0

Es ist erkennbar, dass der Einfluss des Kantenzustands auf die Kerbzugfestigkeit R_{mk} bei den laserstrahlgeschnittenen Kanten in den meisten Fällen gering ausfällt. Für die schergeschnittenen Kanten konnten dagegen für beide betrachteten Werkstoffe und Kerbgeometrien eine Steigerung der Kerbzugfestigkeit festgestellt werden.

Ein deutlicherer Einfluss ist jedoch für die Arbeitsaufnahme bis Maximalkraft bzw. Bruch erkennbar (jeweils gesamte Arbeit, elastisch und plastisch). Diese entsprechen den Flächen unterhalb der Kraft-Weg-Kurven bis Erreichen der Maximalkraft bzw. Bruch. Für die laserstrahlgeschnittenen Kanten ist teilweise eine Verringerung feststellbar, teils entsprechen die Ergebnisse aber auch den Werten der polierten Proben. Hieraus ergibt sich, dass der Einfluss des Laserstrahlschneidens nur teilweise einen Einfluss auf die (Rest)Umformbarkeit des Werkstoffes nimmt. Für die schergeschnittenen Kanten ist dagegen für jede untersuchte Variante eine Abnahme der Arbeitsaufnahme gegenüber des Grundwerkstoffes (polierte Kante) feststellbar, welche für ein verringertes Restumformvermögen des Werkstoffes infolge der vorhandenen plastischen Umformung des Scherschneidens spricht.

Durch Abbildung 11-1 und Abbildung 11-2 sind exemplarische Verläufe der Kraft-Weg-Kurven aus den Kerbzugversuchen an polierten, laserstrahl- und schergeschnittenen Proben der Legierung EN AW-6082 mit den Kerbformzahlen $K_t = 2,5$ bzw. $K_t = 4,6$ gegeben.

Die Abnahme der Fläche unterhalb der Kurve (entspricht der Arbeitsaufnahme) ist jeweils insbesondere für die schergeschnittene Variante gut erkennbar. Es ist auch ersichtlich, dass die Unterschiede der Flächeninhalte zwischen polierter und schergeschnittener Kante hauptsächlich durch den unterschiedlichen Maschinenweg verursacht werden. Dies kann mit der Umformbarkeit gedeutet werden. Für die schergeschnittene Kante ist diese geringer, als für die polierte. Demnach ist die erreichbare Verlängerung der Probe geringer.

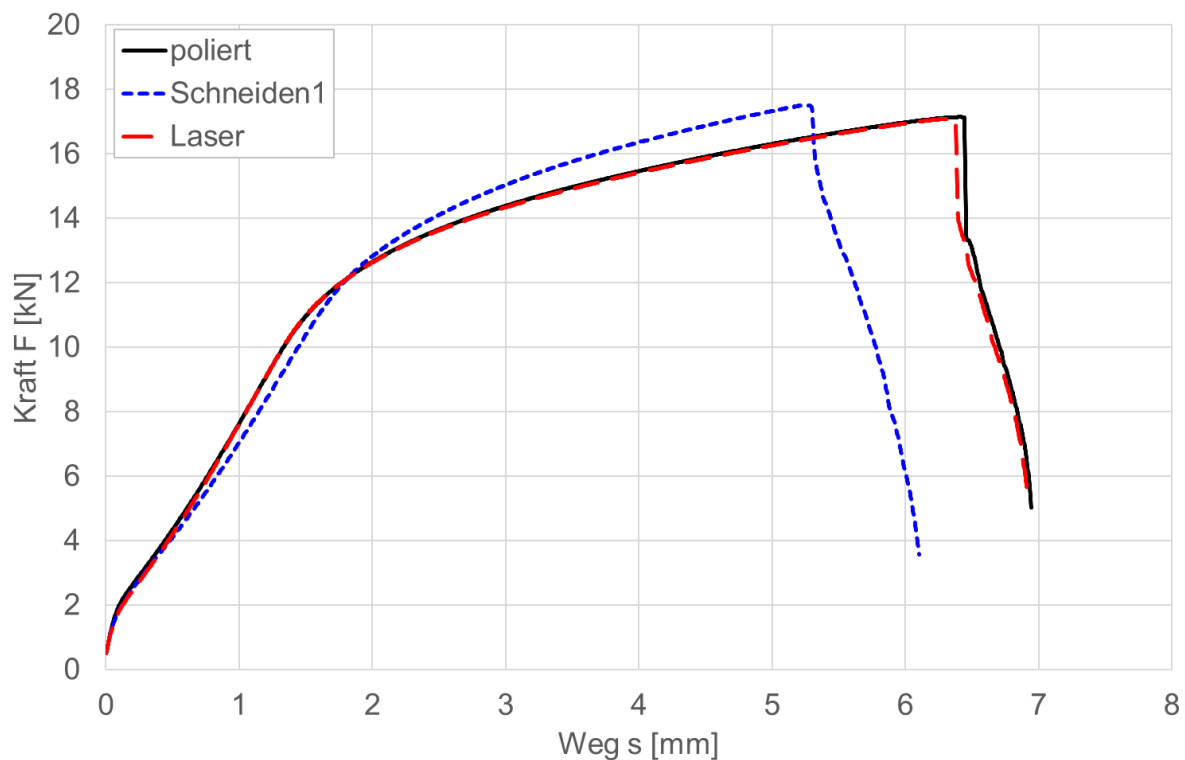


Abbildung 11-1: Exemplarische Verläufe für Kraft-Weg-Diagramm der Kerbzugversuche an polierten, laserstrahl- und schergeschnittenen Kerbproben ($K_t = 2,5$) aus EN AW-6082

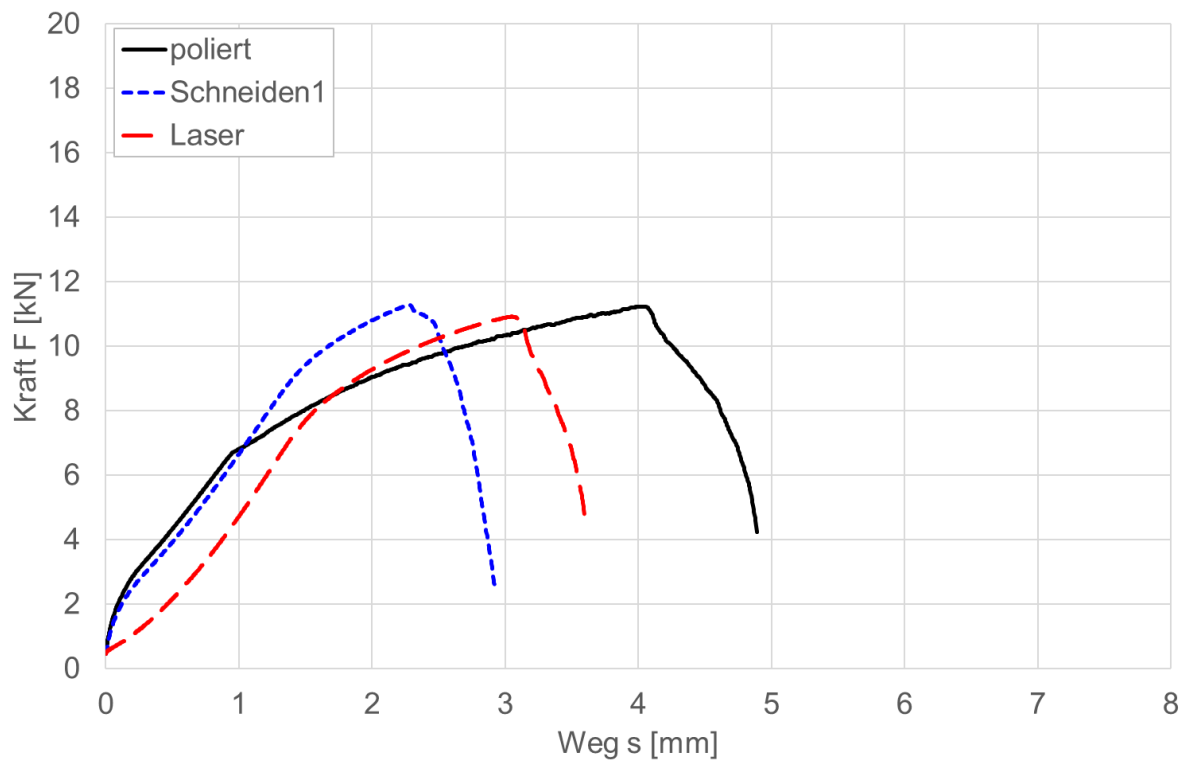


Abbildung 11-2: Exemplarische Verläufe für Kraft-Weg-Diagramm der Kerbzugversuche an polierten, laserstrahl- und schergeschrittenen Kerbproben ($K_1 = 4,6$) aus EN AW-6082

12 Versuchsergebnisse Schwingfestigkeitsversuche

Eine Auflistung der einzelnen Versuchspunkte der spannungs- bzw. dehnungsgeregelten Versuche sowie die hieraus abgeleiteten Beanspruchbarkeitskennlinien (Wöhlerlinien) können dem Anhang entnommen werden.

Die Auswertung der spannungsgeregelten Versuche erfolgt nur im Zeitfestigkeitsgebiet und nach dem Perlenschnurverfahren. Eine Auswertung im Übergangsbereich zur sogenannten Dauerfestigkeit wird mangels entsprechender Versuchsbelegung nicht durchgeführt. Untersuchungsschwerpunkt des Forschungsvorhabens war das Zeitfestigkeitsgebiet. Entsprechend werden nur die Zeitfestigkeitsgeraden dargestellt, vorhandene Durchläufer (Erreichen von $N = 10^7$ Schwingspielen) geben aber eine Einschätzung zum Ende des Zeitfestigkeitsgebiets. Tabelle 12-2 fasst die ermittelten Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden zusammen.

Durch Tabelle 12-1 und Tabelle 12-3 ist eine Zusammenfassung der Kennwerte der Lebensdauerlinien für Beanspruchung mit Blockprogramm bzw. Gauß-Signal gegeben.

Tabelle 12-1: Zusammenfassung der Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden der durchgeführten Gaßner-Versuche mit Blockprogramm, $P_A = 50\%$

Zusammenfassung Gaßner-Versuch, Blockprogramm ($H_0 = 50,000$)						
	Werkstoff	R-Verhältnis	K_t	poliert	Laser	Schneiden 1
Neigungsexponent k [-]	EN AW-5182	-1	1.0	8.5	4.1	3.4
	EN AW-6082		2.5	7.5	4.9	5.8
Streuspanne $T_N = N_{90} / N_{10}$ [-]	EN AW-5182		1.0	1.6	2.1	1.6
	EN AW-6082		2.5	1.6	2.7	1.7
Ertragbare Nennspannungsamplitude bei $N=4E6$ $\sigma_{an,N=4E6}$ [MPa]	EN AW-5182		1.0	185	134	142
	EN AW-6082		2.5	91	84	92

Tabelle 12-2: Zusammenfassung der Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden der durchgeführten Wöhlerversuche, $P_A = 50\%$

Zusammenfassung spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch im Anlieferungszustand													
Werkstoff	Kantenbearbeitung	$\varphi, [-]$	Lastamplitude	R-Verhältnis [-]	$K_f = 1$			$K_f = 2,5$			$K_f = 4,6$		
					Neigungs-exponent $k [-]$	Streu-spanne $T_N [-]$	Ertragbare Nettonenn-spannungs-amplitude bei $N=1E6$ $\sigma_{an, N=1E6, P=50\%}$ [MPa]	Neigungs-exponent $k [-]$	Streu-spanne $T_N [-]$	Ertragbare Nettonenn-spannungs-amplitude bei $N=1E6$ $\sigma_{an, N=1E6, P=50\%}$ [MPa]	Neigungs-exponent $k [-]$	Streu-spanne $T_N [-]$	Ertragbare Nettonenn-spannungs-amplitude bei $N=1E6$ $\sigma_{an, N=1E6, P=50\%}$ [MPa]
AA5182	poliert	0	konstant	-1	7,1	2,9	113	8,1	1,5	61			
		0,2	konstant	-1	7,0	1,8	128						
	Schneiden 1	0	konstant	-1	4,6	2,0	70	4,6	1,4	59, N=2E5			
		0,2	konstant	-1	4,0	1,9	66						
	Laser	0	konstant	-1	4,7	2,4	70	4,3	1,4	42			
		0,2	konstant	0,1	5,0	2,3	104, N=2E5	5,4	1,7	47, N=2E5			
	poliert	0	konstant	-1	7,2	1,5	119	7,9	1,6	61			
		0,1	konstant	0,1				8,3	1,8	51			39
		0,1	konstant	-1									
	AA6082	Schneiden 1	0	konstant	-1	3,9	2,7	95, N=2E5	5,6	1,5	52		
0,1			konstant	0,1				6,3	2,3	48, N=2E5			39
Schneiden 2		0	konstant	-1	4,5	3,2	113, N=2E5	5,8	1,8	71, N=2E5			
		0,1	konstant	-1									
Schneiden 3		0	konstant	-1	5,1	4,6	83	5,7	1,6	51			
Schneiden 4	0	konstant	-1	5,1	1,7	77	5,5	1,5	48				
	0,1	konstant	-1										
	0,1	konstant	-1	4,7	3,8	109, N=2E5							
Laser	0	konstant	-1	5,1	2,0	80	5,1	2,0	44				
	0,1	konstant	0,1				4,6	1,9	47, N=2E5			32	
	0,1	konstant	-1	5,1	2,5	80							

Tabelle 12-3: Zusammenfassung der Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden der durchgeführten Gaßner-Versuche mit Gauß-Signal, $P_A = 50\%$

Zusammenfassung Gaßner-Versuch, Gauß-Signal ($H_0 = 10.000$)						
	Werkstoff	R-Verhältnis	K_t	poliert	Laser	Schneiden 1
Neigungsexponent k [-]	EN AW-5182	-1	2.5	8.8	6.4	8.0
	EN AW-6082			12.7	6.2	7.8
Streuspanne $T_N = N_{90} / N_{10}$ [-]	EN AW-5182			2.2	1.7	2.4
	EN AW-6082			3.3	2.0	1.3
Ertragbare Nennspannungsamplitude bei $N=4E6$ $\sigma_{an,N=4E6}$ [MPa]	EN AW-5182			87	72	82
	EN AW-6082			94	76	88

Durch Tabelle 12-4 ist eine Übersicht über die aus den dehnungsgeregelten Versuchen bestimmten zyklischen Kennwerte gegeben. Die Auswertung der dehnungsgeregelten Versuche bezieht sich auf die VDA-Richtlinie VDA239-300. Für die Bestimmung des zyklischen Verfestigungskoeffizienten K' und des zyklischen Verfestigungsexponenten n' werden jedoch zwei Methoden durchgeführt. Zum einen werden die beiden Kennwerte nach der Kompatibilitätsbeziehung bestimmt. Zum anderen wird eine separate Regression durchgeführt, näheres hierzu im Abschnitt zur Versuchsdurchführung.

Tabelle 12-4: Zusammenfassung der zyklischen Kennwerte aus den dehnungsgeregelten Versuchen, $P_A = 50\%$

Zusammenfassung dehnungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch										
Werkstoff	Kantenbearbeitung	Zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient σ'_i [MPa]	Zyklischer Schwingfestigkeits-exponent b [-]	Zyklischer Duktilitätskoeffizient ϵ'_i [m/m]	Zyklischer Duktilitäts-exponent c [-]	E-Modul E [GPa]	Kompatibilitätsbeziehung		Regression	
							Zyklischer Verfestigungskoeffizient K' [MPa]	Zyklischer Verfestigungsexponent n' [-]	Zyklischer Verfestigungskoeffizient K' [MPa]	Zyklischer Verfestigungsexponent n' [-]
AA5182	poliert	770,9	-0,1249	2,786	-0,9271	70,7	672	0,135	533	0,098
	Schneiden 1	1385,6	-0,2040	4,212	-1,0487	70*	1047	0,195	569	0,110
	Schneiden 2	1242,2	-0,1891	2,002	-0,9173	70*	1077	0,206	594	0,117
	Schneiden 4	1270,6	-0,1936	0,550	-0,7972	70*	1469	0,243	1077	0,203
	Schneiden	919,5	-0,1657	0,610	-0,8261	70*	1015	0,200	693	0,143
	Laser	906,8	-0,1560	4,355	-1,0794	70,2	733	0,145	601	0,115
AA6082	poliert	754,7	-0,1282	5,881	-1,0029	68,8	602	0,128	372	0,057
	Schneiden 1	896,2	-0,1708	7,212	-1,1363	70*	666	0,150	393	0,076
	Schneiden 2	825,3	-0,1644	17,183	-1,3299	70*	581	0,124	415	0,072
	Schneiden 3	750,6	-0,1472	6,631	-1,1824	70*	593	0,125	415	0,069
	Schneiden 4	816,6	-0,1629	5,823	-1,1307	70*	634	0,144	369	0,058
	Schneiden 5	700,4	-0,1496	3,566	-1,0490	70*	584	0,143	411	0,084
	Laser	821,1	-0,1529	7,696	-1,0989	69,6	618	0,139	448	0,092

* Vorgabewert 70 GPa für Aluminium

13 Diskussion Schwingfestigkeitsversuche

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Versuchsergebnisse der spannungs- und dehnungs-geregelten Schwingfestigkeitsuntersuchungen diskutiert.

13.1 Spannungsgeregelte Versuche

Für die spannungsgeregelten Versuche werden der Vorreckungseinfluss ($\phi_1 \neq 0$, $\phi_2 = \phi_3 = 0$), der Kerbeinfluss, der Einfluss von Mittelspannungen, der Kanteneinfluss und der Einfluss einer Beanspruchung mit variabler Amplitude betrachtet. Für die dehnungsgeregelten Versuche wird der Einfluss des Kantenzustandes diskutiert.

13.1.1 Vorreckungseinfluss

Die Untersuchung des Vorreckungseinflusses auf das Schwingfestigkeitsverhalten erfolgt für beide Werkstoffe anhand der ungekerbten Proben ($K_t = 1$) bei spannungsgeregelter Versuchsführung ($R = -1$), allerdings nur für die Kantenzustände poliert, Schneiden 1 (Scherschneiden) und laserstrahlgeschnitten. Die angegebenen Nennspannungsamplituden beziehen sich auf den Nettoquerschnitt der Probe, also auf den Querschnitt im gereckten Zustand. Die Dicke der unverformten Proben beträgt $t = 1,5$ mm, die der vorgereckten liegt etwa bei $t = 1,4$ mm. Die dargestellten Wöhlerlinien repräsentieren eine Ausfallswahrscheinlichkeit von $P_A = 50\%$.

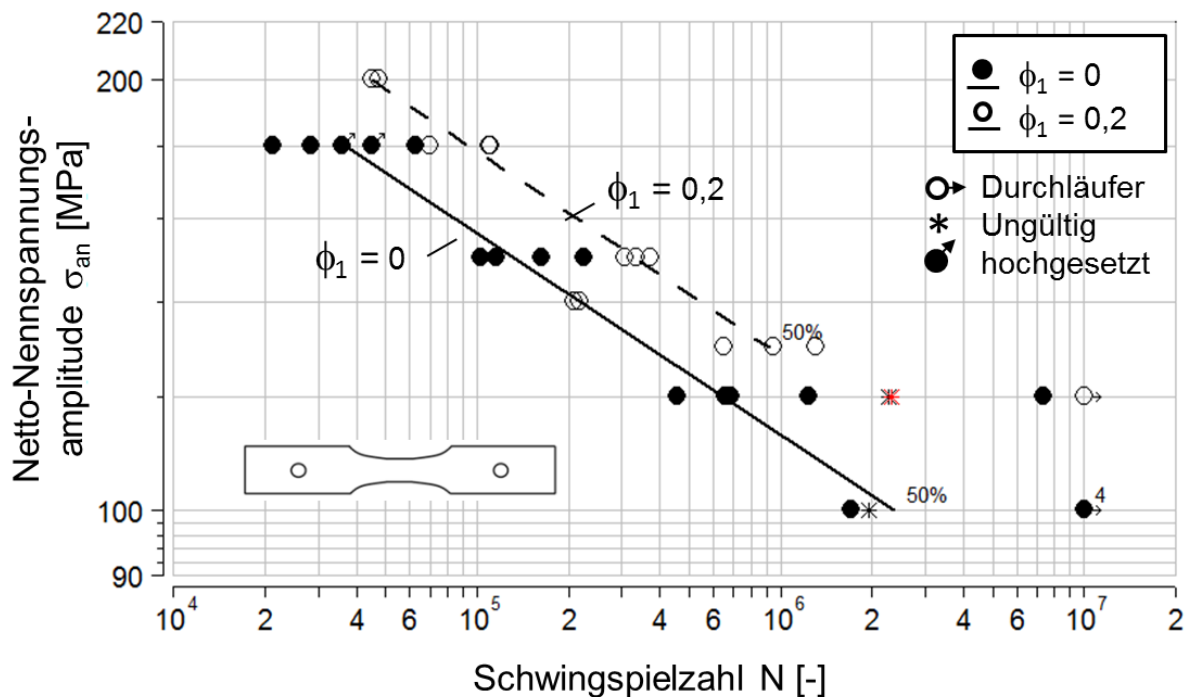


Abbildung 13-1: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$

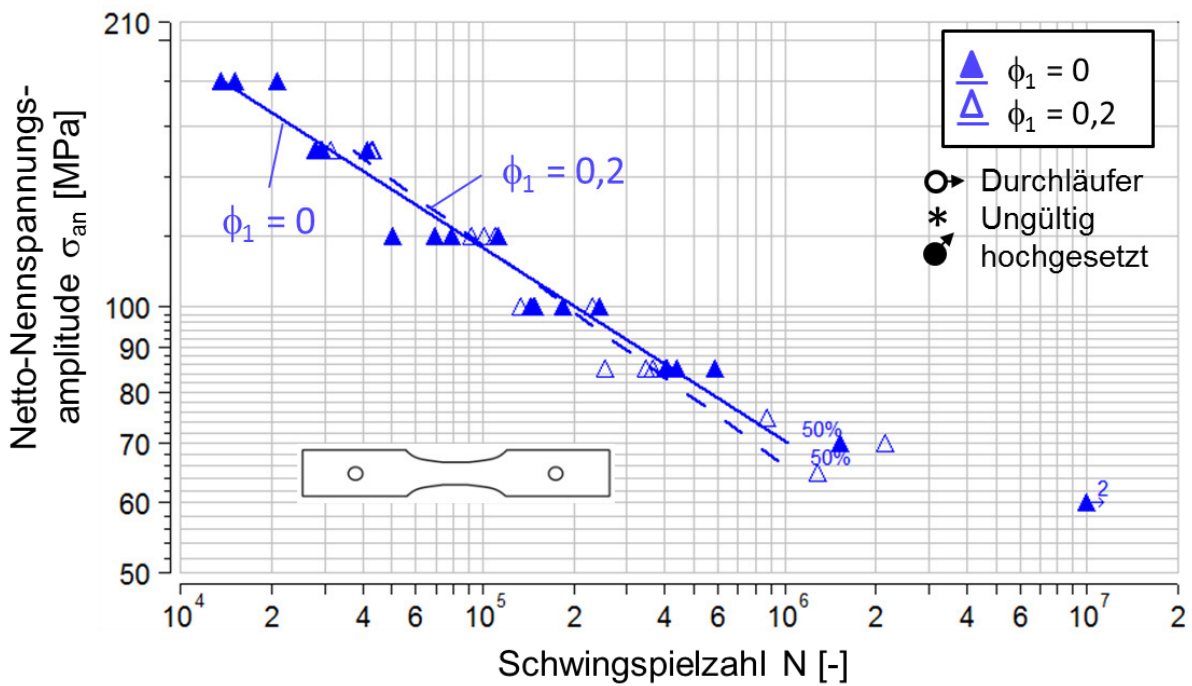


Abbildung 13-2: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA5182 Schnitten I, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$

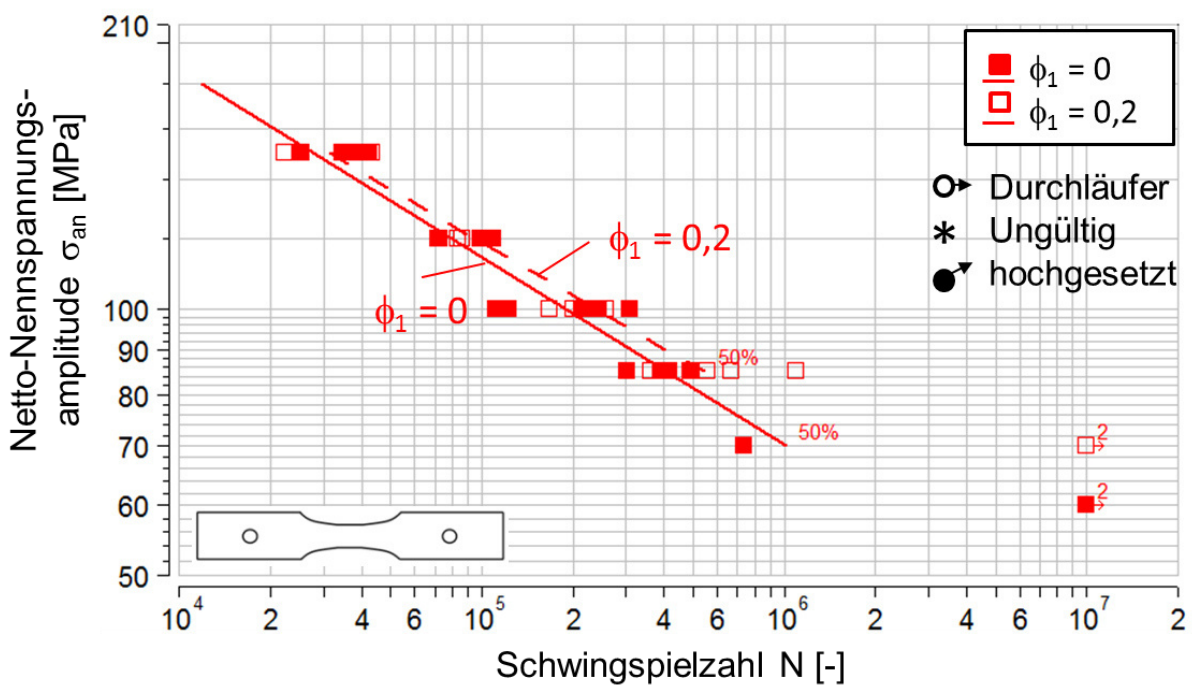


Abbildung 13-3: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA5182 Laserstrahlschnitten, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Durch Abbildung 13-1, Abbildung 13-2 und Abbildung 13-3 ist der Einfluss des Vorreckungseinflusses auf die Zeitfestigkeitsgerade der Aluminiumknetlegierung AA5182 gegeben. Verglichen werden die Zeitfestigkeitsgeraden für die Umformgrade $\phi_1 = 0$ und $\phi_1 = 0,2$.

Für den polierten Kantenzustand ist für die vorverformte Variante eine näherungsweise parallele Anhebung der Zeitfestigkeitsgeraden um einen Faktor 1,13 gegenüber der des Grundwerkstoffes erkennbar. Im Bereich der sogenannten Dauerfestigkeit deutet sich durch die Lage der Durchläufer (Probe ohne erkennbaren Anriss erreichte 10^7 Schwingspiele) ebenfalls eine Steigerung der Schwingfestigkeit an. Dies wäre im Einklang mit der Literatur, kann hier durch die Belegung der Wöhlerlinie jedoch nicht näher untersucht werden.

Für den laserstrahl- und schergeschnittenen Kantenzustand ist hingegen nahezu kein Einfluss durch eine Vorreckung erkennbar. Die Unterschiede zwischen den Zeitfestigkeitsgeraden sind vernachlässigbar. Eine Aussage zum Übergangsbereich zur sogenannten Dauerfestigkeit ist wiederum aufgrund der Belegung der Wöhlerlinie nicht möglich. Es wird vermutet, dass der Einfluss einer Vorverformung bei den beiden Schneidkanten durch den Verfestigungszustand im Kantennahbereich vernachlässigbar ausfällt. Speziell durch das Scherschneiden tritt eine hohe lokale Umformung und somit Verfestigung des Werkstoffes in Kantennähe auf, vergleiche die Ergebnisse der Mikrohärtemessungen. Der für das Schwingfestigkeitsverhalten maßgebende Kantenbereich erfährt demnach durch ein weiteres Vorrecken keine signifikante weitere Festigkeitssteigerung. Auf der anderen Seite wird durch die Verfestigung infolge des Scherschneidens jedoch das weitere Umformvermögen des Werkstoffes lokal herabgesetzt, wodurch sich die Kantenrissempfindlichkeit verändern kann.

Eine Stichprobe mit der laserstrahlgeschnittenen Kante unter dehnungsgeregelter Versuchsführung zeigt ebenfalls keinen Einfluss einer Vorreckung auf die erreichbare Lebensdauer.

Durch Abbildung 13-4 bis Abbildung 13-6 ist der Einfluss des Vorreckens für die Aluminiumknetlegierung AA6082 gegeben. Auch hier werden nur die Zeitfestigkeitsgeraden für die Umformgrade $\varphi_1 = 0$ und $\varphi_1 = 0,1$ miteinander verglichen.

Es ist zu erkennen, dass sich für den laserstrahlgeschnittenen Zustand, Abbildung 13-6, durch ein Vorrecken ebenfalls keinerlei Einfluss auf die Zeitfestigkeitsgerade ergibt. Für die polierte Kante ist, wie auch für die Legierung AA5182, eine Verbesserung des Schwingfestigkeitsverhaltens erkennbar. Dabei ist die Zeitfestigkeitsgerade der vorgereckten Variante jedoch nicht parallel verschoben. Während die Lebensdauer auf dem höchsten belegten Lasthorizont vergleichbar ist, ist sie im unteren Prüfbereich um etwa 50 % gegenüber dem Grundwerkstoff gesteigert.

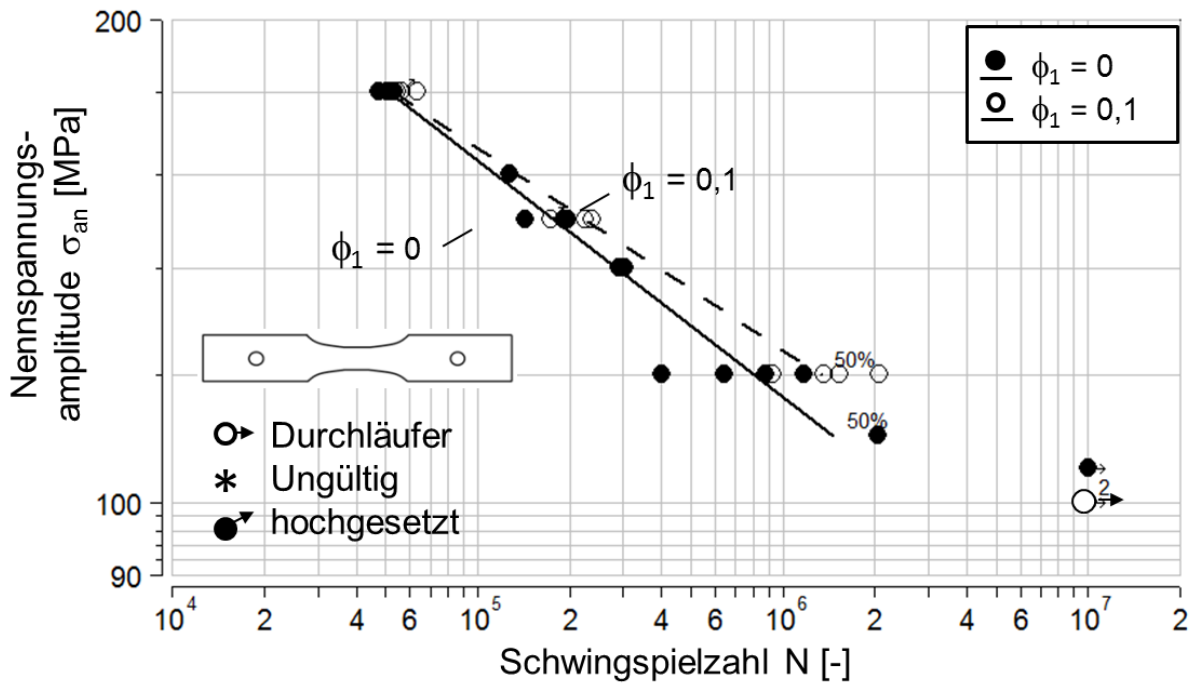


Abbildung 13-4: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$

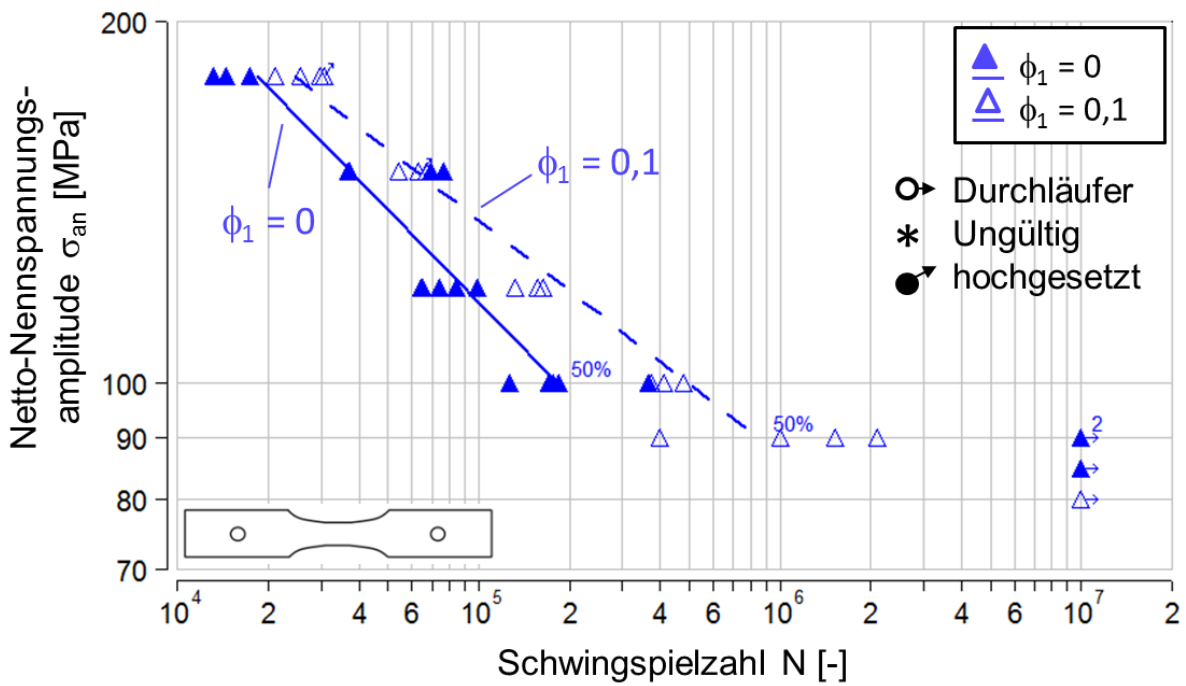


Abbildung 13-5: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$

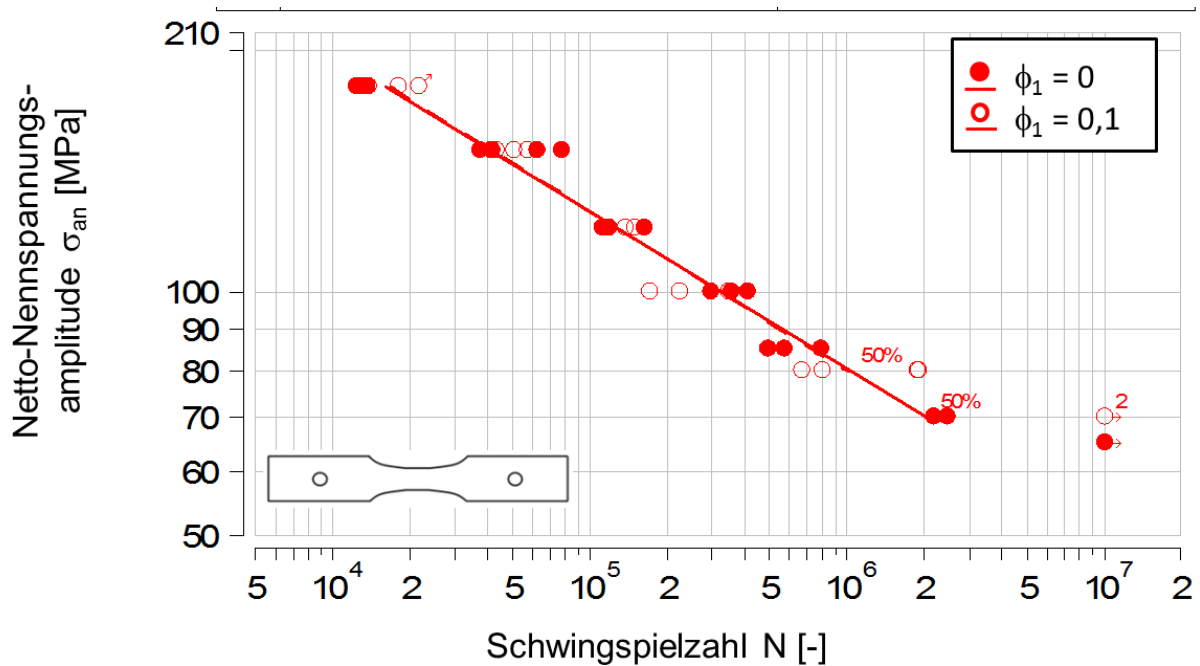


Abbildung 13-6: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Ein ähnliches Verhalten ist für die schergeschnittene Variante erkennbar, vergleiche Abbildung 13-5. Demnach ist für die Legierung AA6082 im Gegensatz zur Legierung AA5182 ein Einfluss des Vorreckens auf die Zeitfestigkeitsgerade erkennbar. Dies dürfte allerdings nicht auf die unterschiedlichen Legierungen zurückzuführen sein, sondern auf die unterschiedlichen Vorreckungsgrade. Die Bruchdehnung beider Legierungen liegt etwas über 20 %. Demnach ist das Restumformvermögen der Legierung AA5182 mit 20 %iger Vorreckung nur noch gering. Dementsprechend kann durch das Scherschneiden keine Festigkeitssteigerung innerhalb der Randschicht mehr erzielt werden. Bei der Legierung AA6082, welche mit 10 % vorgereckt wurde, ist dagegen noch eine Festigkeitssteigerung möglich, da das Umformvermögen noch nicht gänzlich ausgeschöpft ist.

Tabelle 13-1 zeigt eine Zusammenfassung der Auswertung des Einflusses einer Vorreckung auf die Zeitfestigkeitsgerade bei $N = 200.000$ Schwingspielen. Wie erkennbar ist, verlaufen die beiden Zeitfestigkeitsgeraden der vorgereckten und ungereckten Variante dabei nicht immer parallel. Dabei verläuft die Zeitfestigkeitsgerade der ungereckten Variante tendenziell steiler, d. h. beide Wöhlerlinien nähern sich im Bereich der oberen belegten Lasthorizonte einander an. Der Vorreckungseinfluss ist in diesen Fällen demnach lastabhängig und nimmt mit steigender Lastamplitude ab.

Tabelle 13-1: Zusammenfassung des Einflusses einer Vorreckung bei $N = 200.000$ Schwingspielen,
 $R = -1, K_t = 1, P_A = 50 \%$

Einfluss Umformgrad, spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch							
Werkstoff	Kantenbearbeitung	φ_1 [-]	Lastamplitude	R-Verhältnis [-]	$K_t = 1$		
					N [-]	$k_{P=50\%, \text{vorgereckt}} / k_{P=50\%, \text{ungereckt}} [-]$	$\sigma_{an, P=50\%, \text{vorgereckt}} / \sigma_{an, P=50\%, \text{ungereckt}} [-]$
AA5182	Poliert	0,2	konstant	-1	2,00E+05	0,99	1,14
	Schneiden 1	0,2	konstant	-1		0,87	0,99
	Laser	0,2	konstant	-1		1,06	1,06
AA6082	Poliert	0,1	konstant	-1		1,10	1,02
	Schneiden 1	0,1	konstant	-1		1,31	1,25
	Laser	0,1	konstant	-1		1,00	1,00

13.1.2 Kerbeinfluss

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der geometrischen Kerben auf die Zeitfestigkeitsgerade diskutiert. Stellvertretend wird die Kerbwirkungszahl ($K_f = \sigma_{an, ungeredt}(N) / \sigma_{an, geredt}(N)$) für eine vorgegebene Schwingspielzahl von $N = 200.000$ bestimmt und anschließend hieraus die experimentelle dynamische Stützzahl ($n = K_t / K_f$) ermittelt. Nach der FKM-Richtlinie erfolgt eine Auswertung der dynamischen Stützzahl für eine Schwingspielzahl von $N = 10^6$. Für einen Vergleich aller Versuchsreihen wird hiervon abgewichen, da nicht alle Versuchsreihen eine Zeitfestigkeitsgerade bis 1 Mio. Schwingspiele aufweisen.

Durch Abbildung 13-7 bis Abbildung 13-9 sind die Vergleiche für die Legierung AA5182 gegeben. Es ist erkennbar, dass die Kerbwirkungszahl K_f für beide Schneidvarianten (Schneiden 1 und laserstrahlgeschnitten) etwas geringer ausfällt, als für die polierte Kante, wobei die Nennspannungs-Wöhlerlinien der beiden Kerbvarianten jeweils etwa parallel verlaufen. Entsprechend fällt die dynamische Stützzahl, ermittelt aus den experimentellen Versuchsergebnissen, für die Schneidkanten etwas größer aus.

Ein analoges Verhalten kann für beide Kerbgeometrien der Legierung AA6082 festgestellt werden. Auch hier ergibt sich eine Zunahme der experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahl für die Schneidkanten.

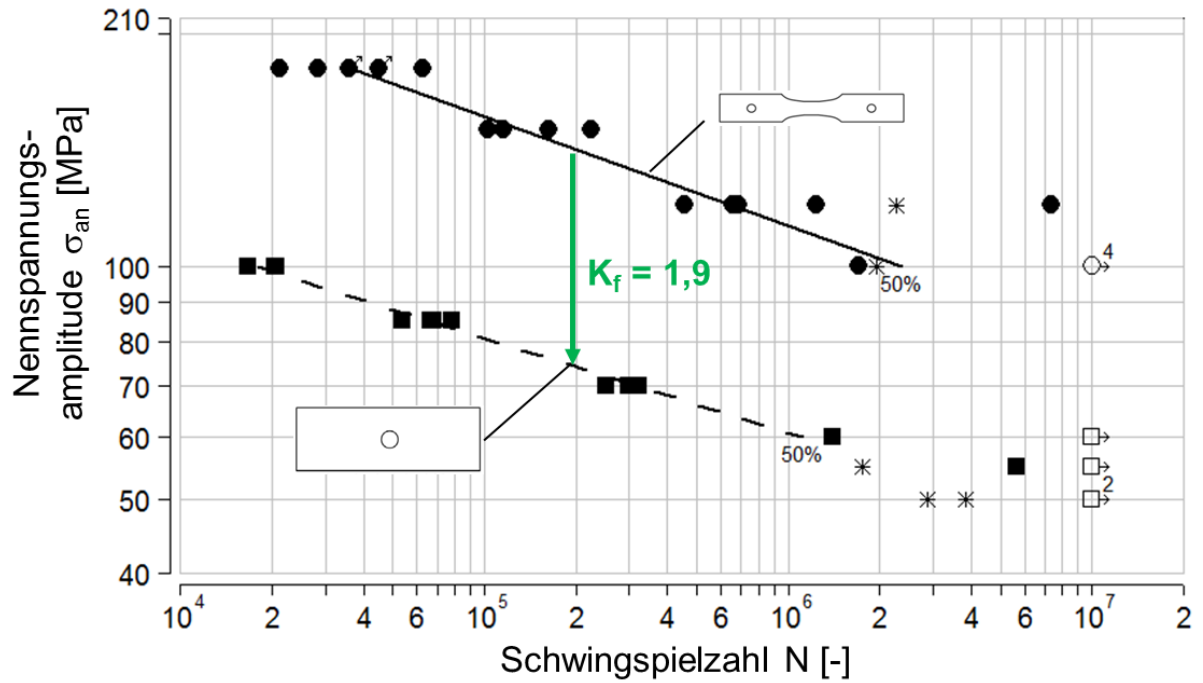


Abbildung 13-7: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA5182 poliert, $R = -1$, $P_A = 50 \%$

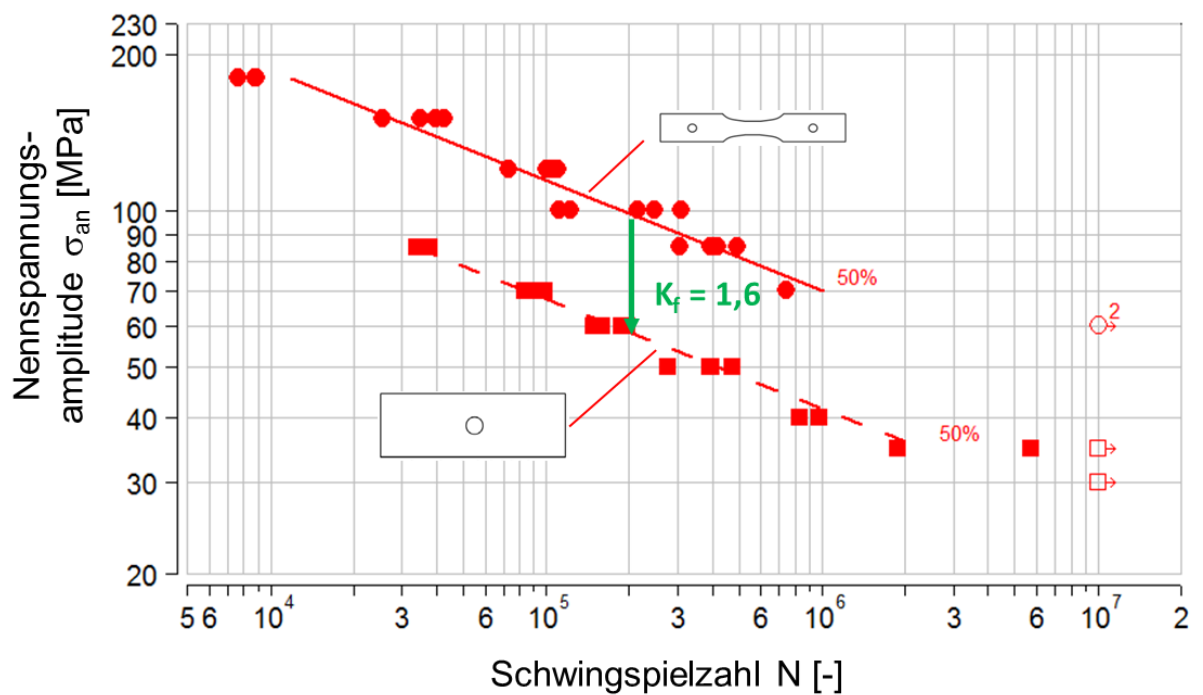


Abbildung 13-8: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA5182 Laserstrahlschneiden, $R = -1$, $P_A = 50 \%$

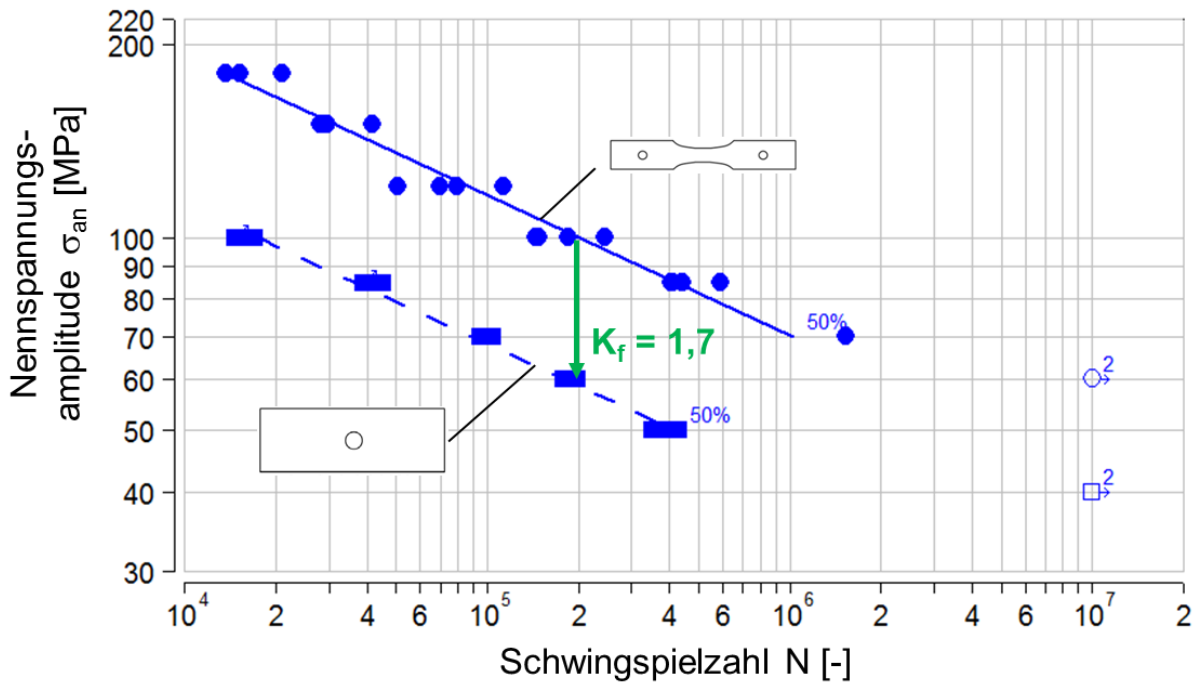


Abbildung 13-9: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA5182 Schneiden 1, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Abbildung 13-10 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der experimentell ermittelten dynamischen Stützzahlen für alle betrachteten Kantenzustände und Kerbgeometrien beider Werkstoffe. Die Werte können Tabelle 13-2 entnommen werden. Tabelle 13-3 stellt dem die, sofern möglich, ausgewerteten Ergebnisse für eine Schwingspielzahl von $N = 1$ Mio. gegenüber. Die Unterschiede fallen bei der scharf gekerbten Probengeometrie ($K_t = 4,6$) deutlich größer aus, als für die milde Kerbgeometrie ($K_t = 2,5$). Dies liegt daran, dass die Zeitfestigkeitsgeraden der ungekerbten Probe und die der Probe mit $K_t = 2,5$ keine großen Neigungsunterschiede aufweisen. Sie verlaufen ansatzweise parallel. Demgegenüber, verlaufen die Zeitfestigkeitsgeraden der Kerbvariante $K_t = 4,6$ steiler als die der ungekerbten Variante. Hierdurch nimmt die Kerbwirkungszahl mit zunehmender Schwingspielzahl zu und die Beträge der dynamischen Stützzahl entsprechend ab.

Die Auswertungen für die Legierung AA6082 sind durch Abbildung 13-11 bis Abbildung 13-16 gegeben.

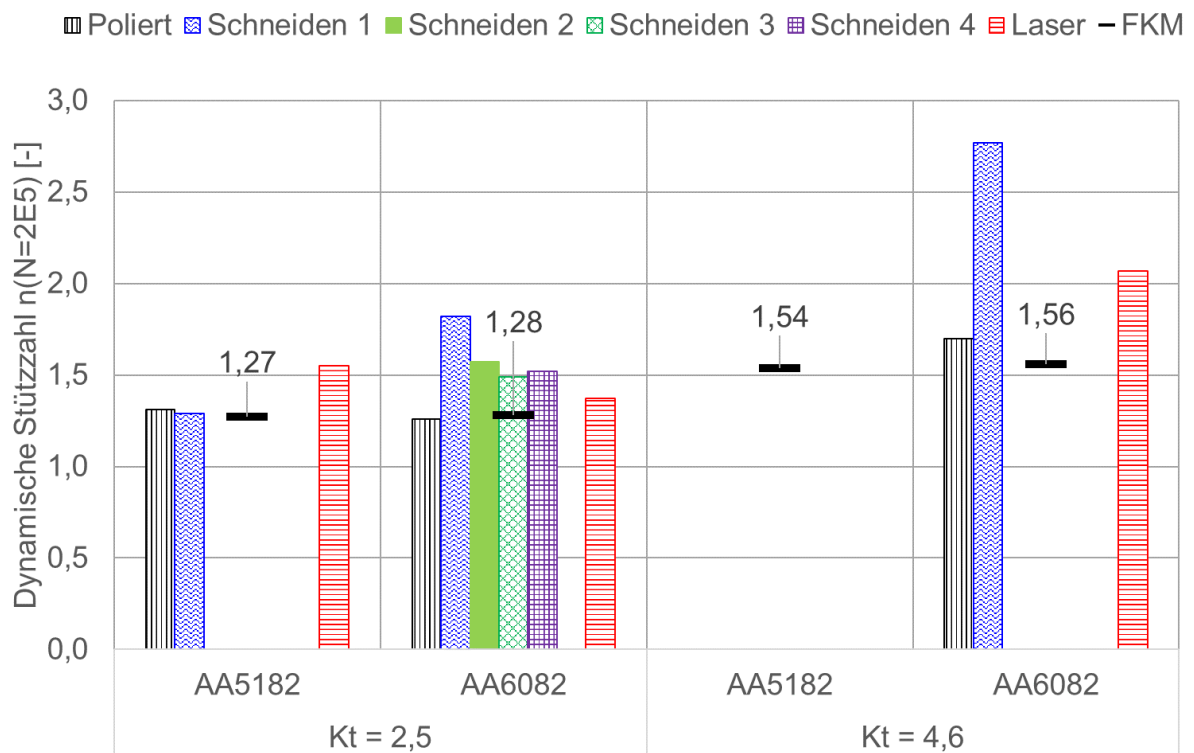


Abbildung 13-10: Vergleich der bei $N = 2E5$ experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahlen mit den Werten nach FKM-Richtlinie

Demnach kann gefolgert werden, dass eine Beeinflussung der dynamischen Stützwirkung durch eine vorliegende Schneidkante auftritt. Im vorliegenden Fall weisen laserstrahl- oder scherge-schnittene Kanten eine größere dynamische Stützzahl auf, als polierte Kanten. Diese Erkenntnis ist für eine rechnerische Lebensdauerabschätzung oder einen rechnerischen Lebensdauernachweis entscheidend, da die dynamische Stützzahl bekanntermaßen einen signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse besitzt.

Weiterhin zeigt Abbildung 13-10 eine Gegenüberstellung der experimentellen Auswertung mit den dynamischen Stützzahlen nach der FKM-Richtlinie. Es zeigt sich, dass die nach der Richtlinie abgeschätzten Werte für die milde Kerbe ($K_t = 2,5$) bei beiden Werkstoffen gut mit den Ergebnissen der polierten Kante übereinstimmen. Für die scharfe Kerbe ($K_t = 4,6$) wird die Stützzahl der Legierung AA6082 etwas unterschätzt. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Werte der dynamischen Stützzahlen für die Schneidkanten teils erheblich über den Werten der FKM-Richtlinie liegen. Für die scharf gekerbte Geometrie der Variante Schneiden 1 wird die dynamische Stützzahl etwa um einen Faktor 1,8 unterschätzt.

Die erwartete Zunahme der Werte der dynamischen Stützzahl mit zunehmender Kerbschärfe wird unabhängig vom Kantenzustand bestätigt.

Tabelle 13-2: Zusammenfassung der experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahlen bei $N = 2E5$

Kerbeinfluss, spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch													
Werkstoff	Kantenbearbeitung	φ_1 [-]	Lastamplitude	R-Verhältnis [-]	$K_t = 2,5$			$K_t = 4,6$					
					Schwingspielzahl N	Kerbwirkungszahl bei N [-]	Dynamische Stützzahl bei N [-]	Schwingspielzahl N	Kerbwirkungszahl bei N [-]	Dynamische Stützzahl bei N [-]			
AA5182	Poliert	0	konstant	-1	2,00E+05	1,91	1,31	2,00E+05	2,71	1,70			
	Schneiden 1	0	konstant	-1		1,68	1,49						
	Laser	0	konstant	-1		1,61	1,55						
AA6082	Poliert	0	konstant	-1		1,99	1,26				2,00E+05	1,66	2,77
	Schneiden 1	0	konstant	-1		1,37	1,82						
	Schneiden 2	0	konstant	-1		1,59	1,57						
	Schneiden 3	0	konstant	-1	1,68	1,49							
	Schneiden 4	0	konstant	-1	1,64	1,52							
Laser	0	konstant	-1	2,00E+05	1,82	1,37	2,00E+05	2,22	2,07				

Tabelle 13-3: Zusammenfassung der experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahlen bei $N = 1E6$

Kerbeinfluss, spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch													
Werkstoff	Kantenbearbeitung	φ_1 [-]	Lastamplitude	R-Verhältnis [-]	$K_t = 2,5$			$K_t = 4,6$					
					Schwingspielzahl N	Kerbwirkungszahl bei N [-]	Dynamische Stützzahl bei N [-]	Schwingspielzahl N	Kerbwirkungszahl bei N [-]	Dynamische Stützzahl bei N [-]			
AA5182	Poliert	0	konstant	-1	1,00E+06	1,85	1,35	1,00E+06	3,05	1,51			
	Schneiden 1	0	konstant	-1		-	-						
	Laser	0	konstant	-1		1,67	1,50						
AA6082	Poliert	0	konstant	-1		1,95	1,28				1,00E+06	-	-
	Schneiden 1	0	konstant	-1		-	-						
	Schneiden 2	0	konstant	-1		-	-						
	Schneiden 3	0	konstant	-1	1,63	1,53							
	Schneiden 4	0	konstant	-1	1,60	1,56							
Laser	0	konstant	-1	1,00E+06	1,82	1,37	1,00E+06	2,50	1,84				

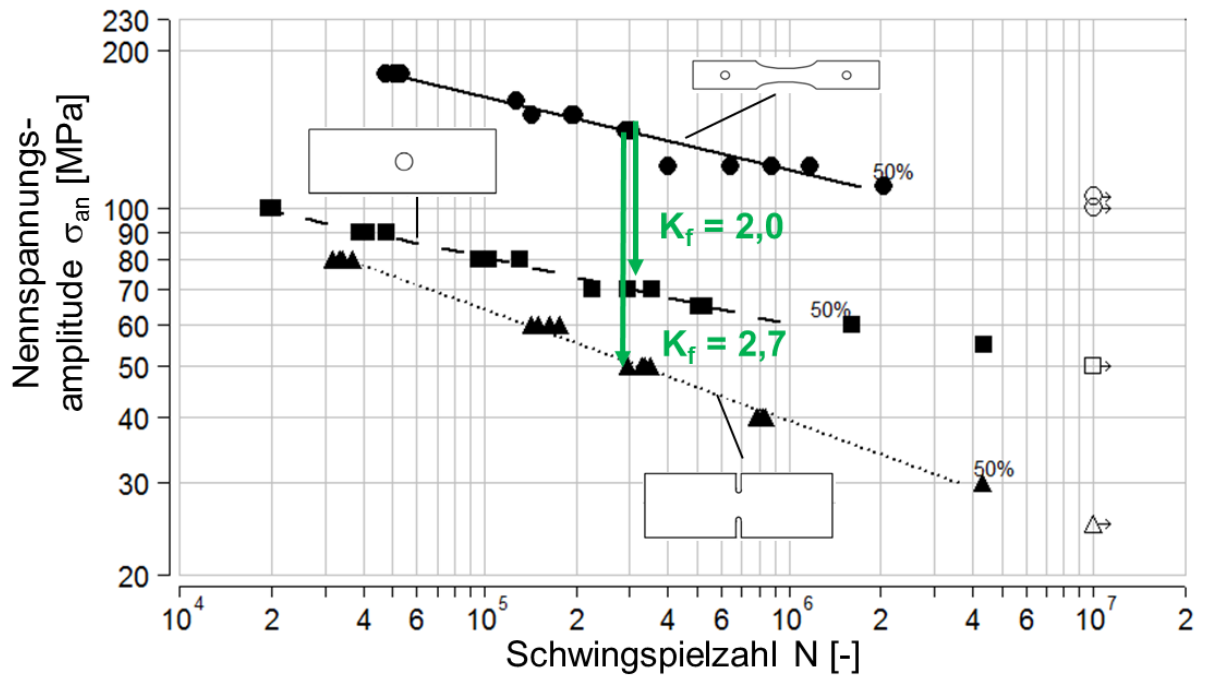


Abbildung 13-11: Wöhler-Diagramm Kerbeeinfluss, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$

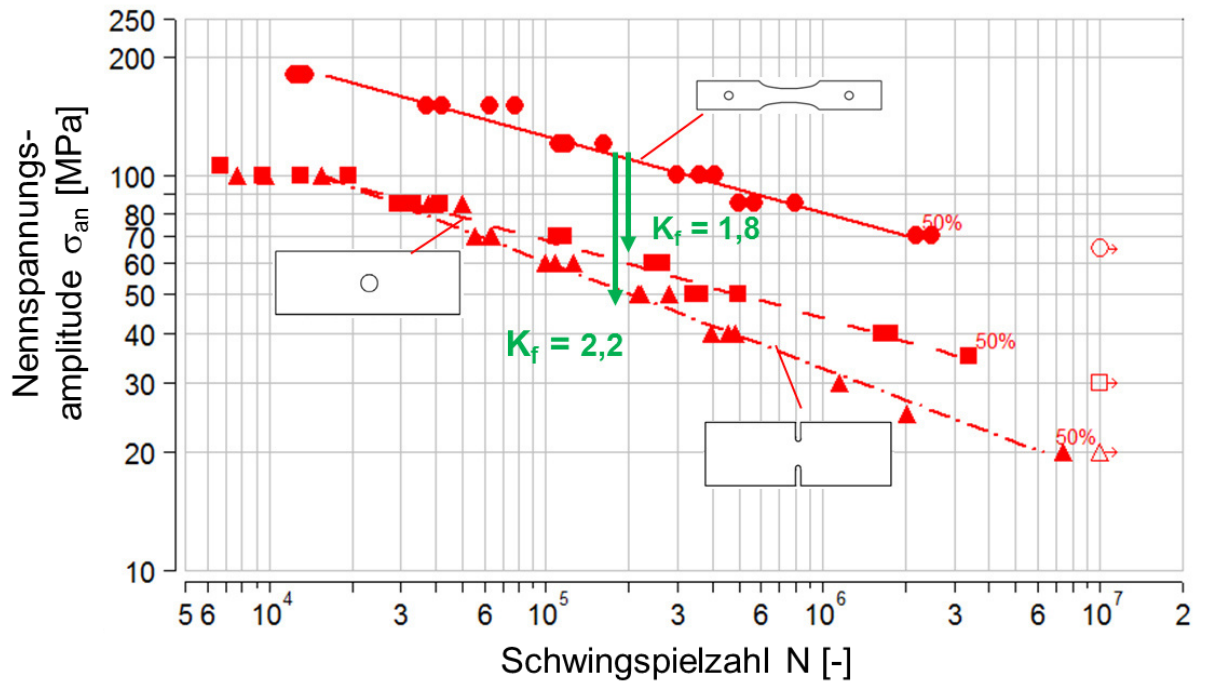


Abbildung 13-12: Wöhler-Diagramm Kerbeeinfluss, AA6082 Laserstrahlschneiden, $R = -1$, $P_A = 50\%$

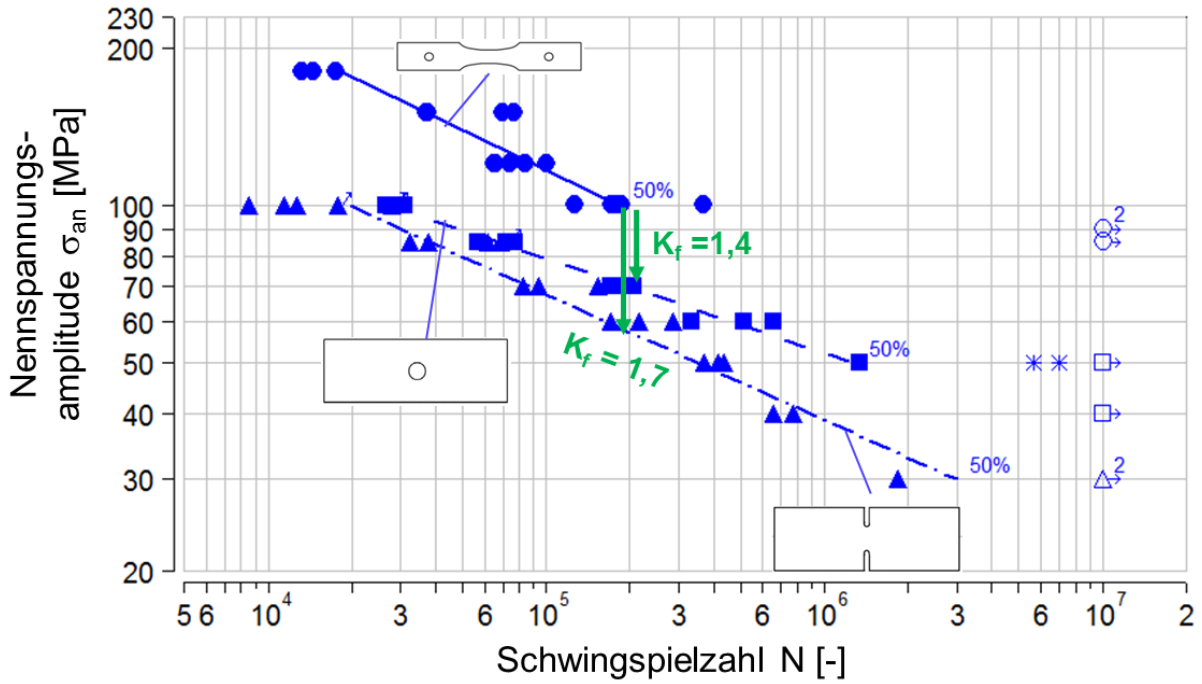


Abbildung 13-13: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Schneiden 1, $R = -1$, $P_A = 50\%$

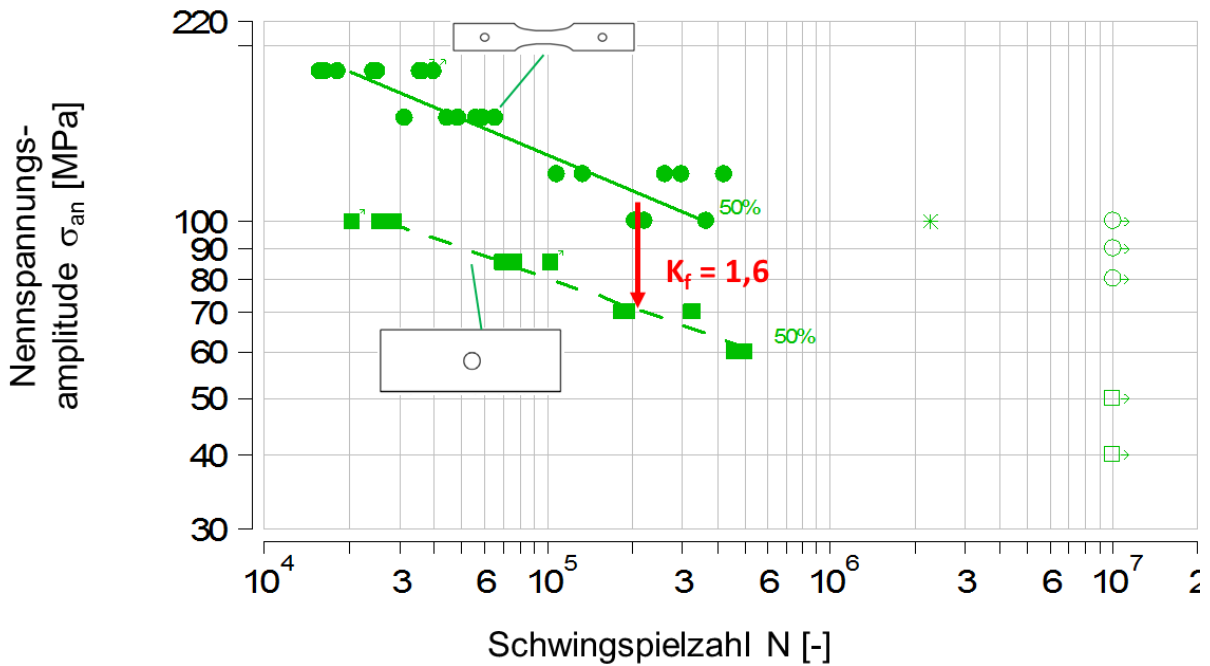


Abbildung 13-14: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Schneiden 2, $R = -1$, $P_A = 50\%$

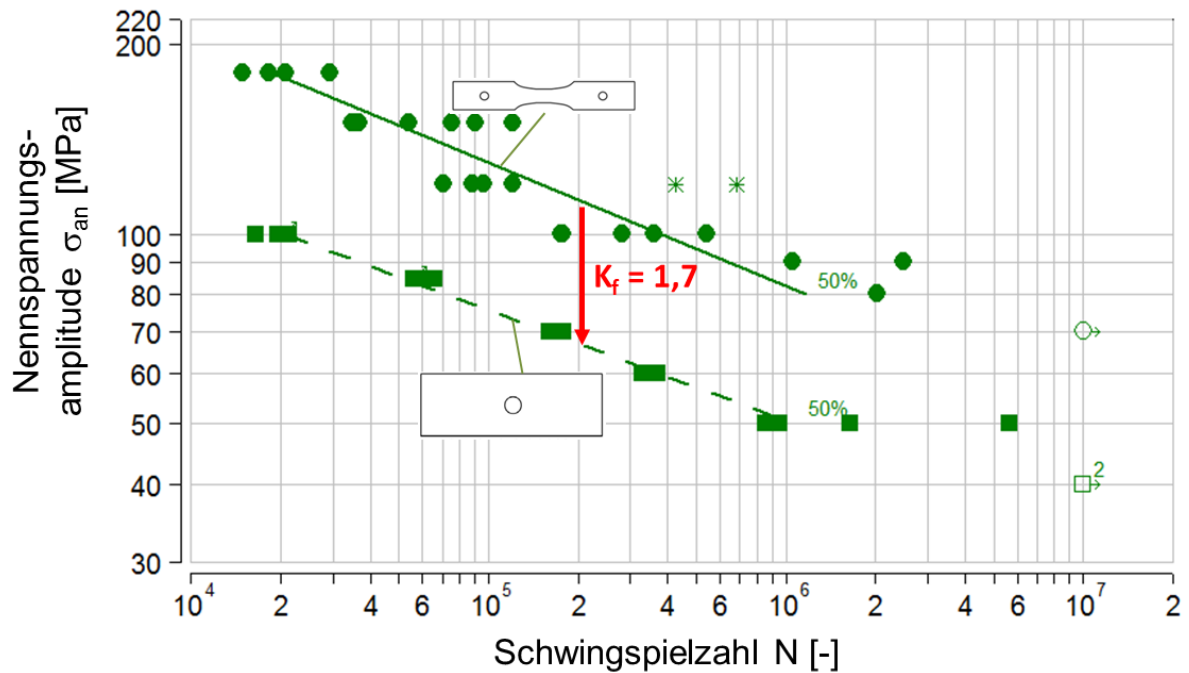


Abbildung 13-15: Wöhler-Diagramm Kerbeeinfluss, AA6082 Schneiden 3, $R = -1$, $P_A = 50\%$

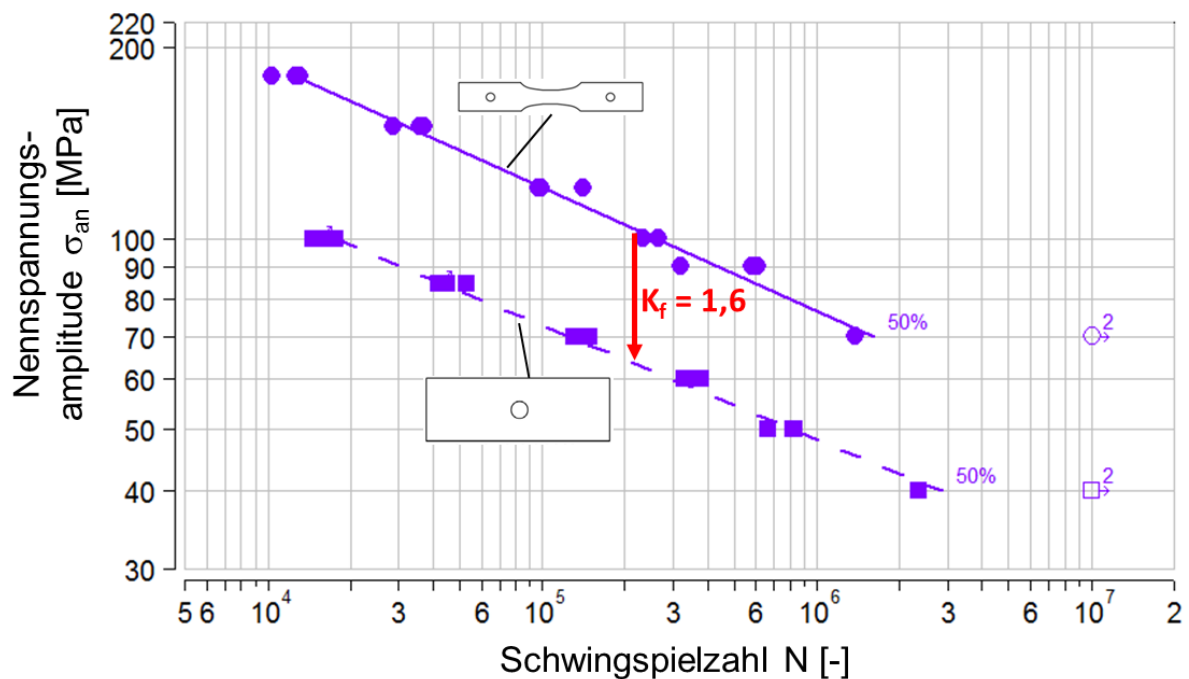


Abbildung 13-16: Wöhler-Diagramm Kerbeeinfluss, AA6082 Schneiden 4a, $R = -1$, $P_A = 50\%$

13.1.3 Mittelspannungseinfluss

Der Einfluss einer Mittelspannung wird im Rahmen dieses Projektes nur für die mildgekerbten Proben ($K_t = 2,5$) der Legierung AA6082 mit polierter sowie laserstrahl- und schergeschnittener (Schneiden 1) Kante untersucht. Abbildung 13-17 zeigt jedoch zusätzlich den Einfluss für die

laserstrahlgeschnittene Variante der Legierung AA5182. Die zugehörige Versuchsreihe für das R-Verhältnis $R = 0,1$ wurde abweichend von der Versuchsmatrix zusätzlich durchgeführt.

Wie vorgesehen, werden die Versuchsreihen mit den Lastverhältnissen $R = 0,1$ und $R = -1$ für die Legierung AA6082 miteinander verglichen. Durch Abbildung 13-18 bis Abbildung 13-20 sind die entsprechenden Wöhlerdiagramme für Ausfallswahrscheinlichkeiten von $P_A = 50\%$ gegeben und Tabelle 13-4 fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen. Wie zuvor beim Kerbeeinfluss, werden die Quotienten $\sigma_{an,P=50\%,R=0,1} / \sigma_{an,P=50\%,R=-1}$ aus den Nennspannungsamplitude bei $N = 200.000$ Schwingspielen gebildet. Zusätzlich werden in Tabelle 13-4 die Quotienten der Neigungsexponenten k mit aufgeführt. Es ist erkennbar, dass die beiden Zeitfestigkeitsgeraden der Lastverhältnisse $R = -1$ und $R = 0,1$ nicht parallel verlaufen. Für die laserstrahlgeschnittene Variante der Legierung AA6082 ändert sich der Quotient der Nennspannungsamplituden für $N = 1$ Mio. Schwingspiele nur geringfügig. Er beträgt $0,75$. Für $N = 200.000$ Schwingspiele wird ein Quotient von $0,78$ ermittelt.

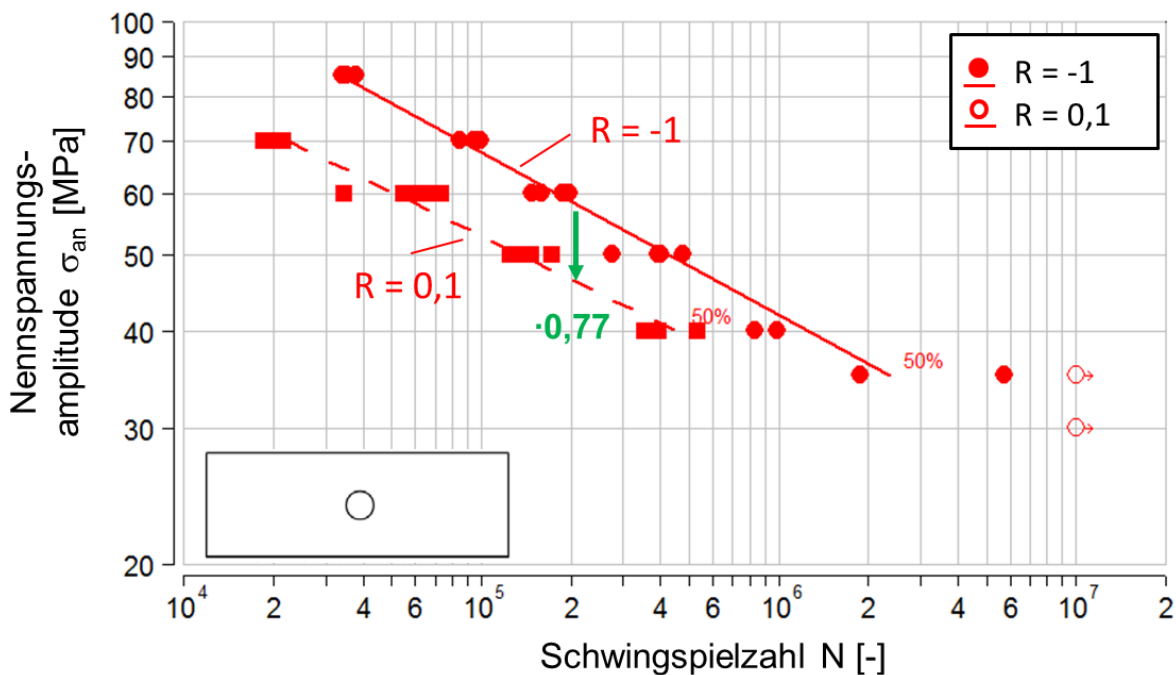


Abbildung 13-17: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$

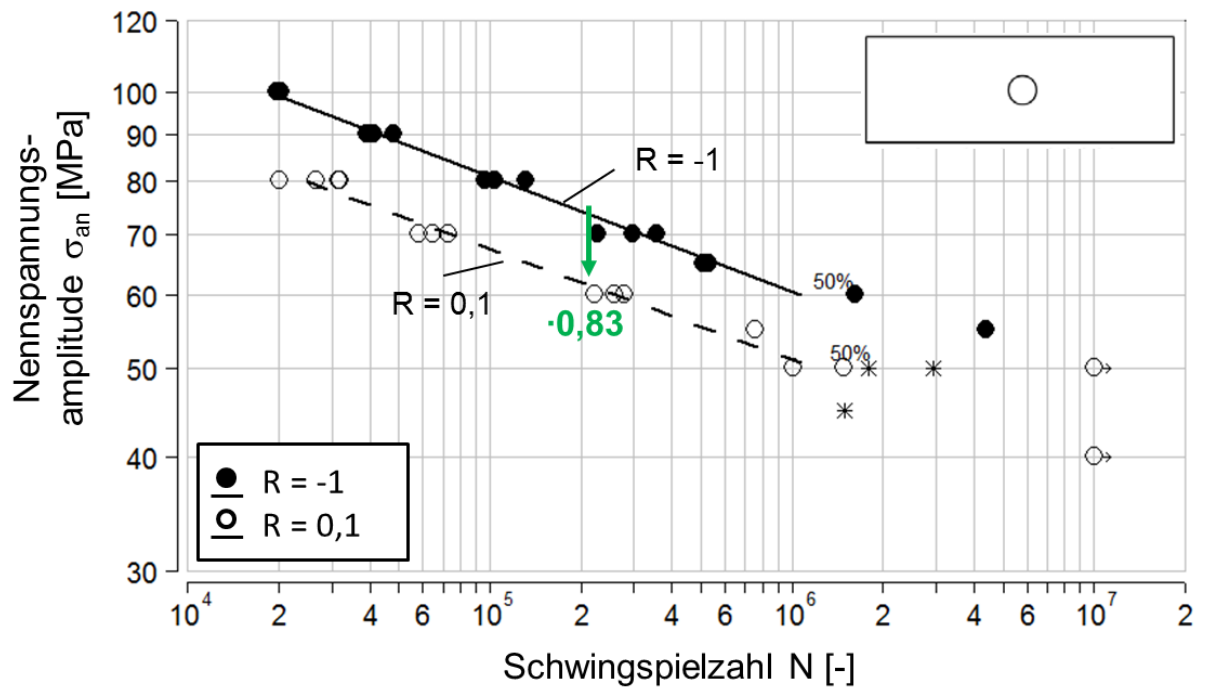


Abbildung 13-18: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$

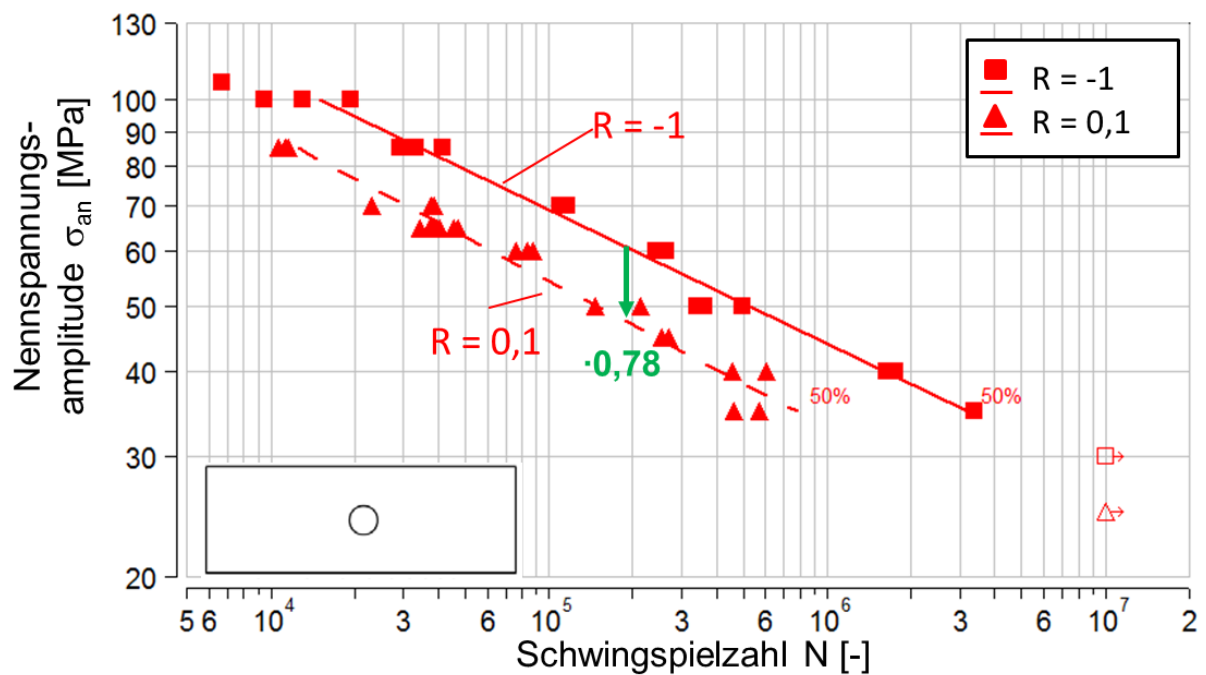


Abbildung 13-19: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$

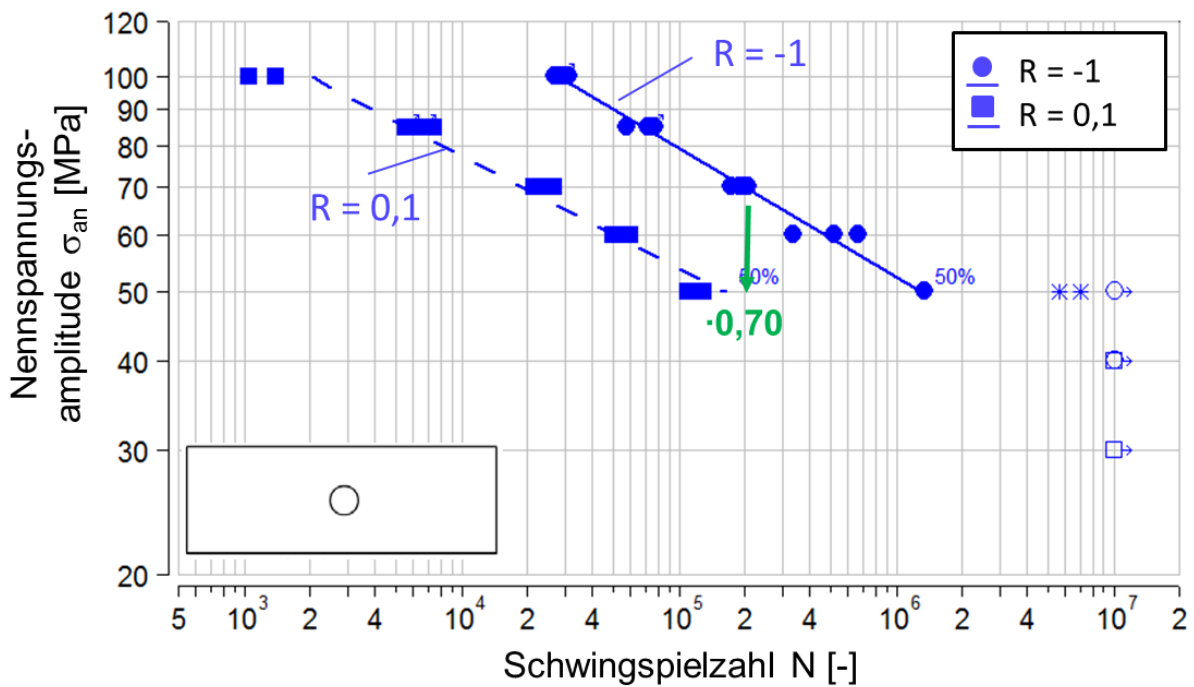


Abbildung 13-20: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$

Tabelle 13-4: Zusammenfassung der Auswertung des Einflusses einer Mittelspannung bei spannungsgeregelten Versuchen an Kerbproben ($K_t = 2,5$)

Mittelspannungseinfluss, spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch								
Werkstoff	Kantenbearbeitung	Kerbformzahl K_t [-]	Lastamplitude	Schwingspielzahl N	$k_{P=50\%, R=0,1} / k_{P=50\%, R=-1}$	$\sigma_{an, P=50\%, R=-1}$ [MPa]	$\sigma_{an, P=50\%, R=0,1}$ [MPa]	$\sigma_{an, P=50\%, R=0,1} / \sigma_{an, P=50\%, R=-1}$ [-]
AA5182	Poliert	2,5	konstant	2,00E+05				
	Schneiden 1							
Laser	1,26				61	47	0,77	
AA6082	Poliert				1,05	75	62	0,83
	Schneiden 1				1,13	69	48	0,70
	Schneiden 2							
	Schneiden 3							
	Schneiden 4							
	Schneiden 5							
	Laser	0,90	60	47	0,78			

Es ist erkennbar, dass sich der Einfluss einer Mittelspannung für die laserstrahl- bzw. schergeschnittene Kante gegenüber jenem der polierten Kante erhöht. Dies wird auch aus dem Zeitfestigkeitsschaubild nach Haigh in Abbildung 13-21 ersichtlich. Die gedachte Linie zwischen den beiden eingetragenen Punkten eines Kantenzustands verläuft für die Schneidkanten steiler, als für die polierte Variante. Dementsprechend weisen die Schneidkanten eine vergrößerte Mittelspannungsempfindlichkeit auf. Dabei ist der Verlauf der gedachten Linie für die schergeschnittene Kante steiler als für die Laserschnitt-Kante, was darauf hindeutet, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit für die Scherschneidkante am größten ausfällt.

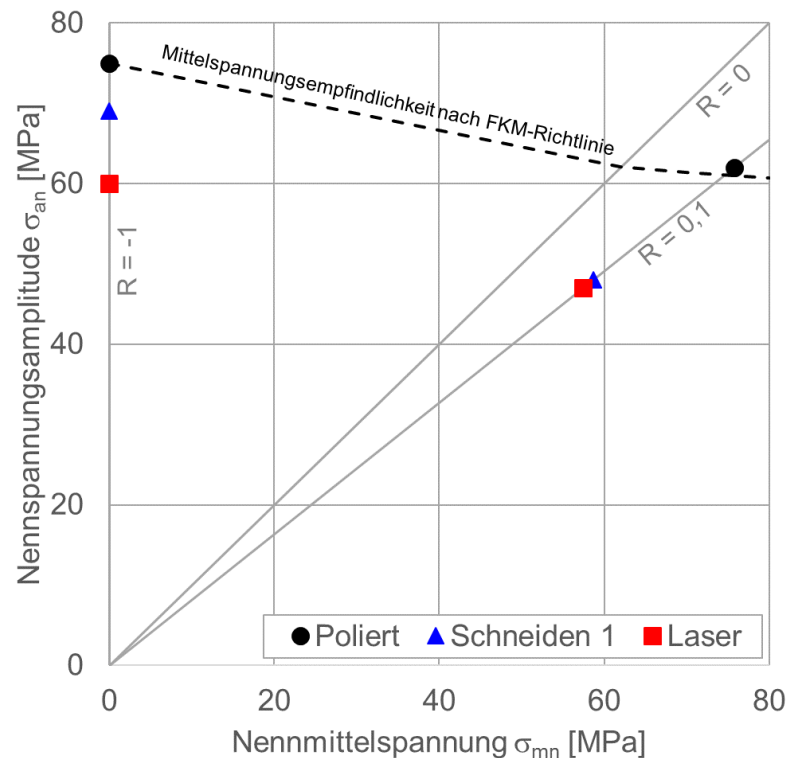


Abbildung 13-21: Zeitfestigkeitsschaubild nach Haigh für AA6082, $K_t = 2,5$, $N = 2E5$ Schwingspiele

Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Festigkeitssteigerung der Randschicht nahe der Schneidkante infolge des Schneidprozesses. Die Mittelspannungsempfindlichkeit nimmt bekanntermaßen mit steigender Festigkeit zu. Eine weitere Erklärung ist die Überlagerung der Last-Mittelspannung mit vorhandenen Eigenspannungen im Kantennahbereich. Nach gängiger Annahme können Eigenspannungen als Mittelspannungen interpretiert werden, weisen jedoch bekanntermaßen eine von der Mittelspannungsempfindlichkeit abweichende Eigenspannungsempfindlichkeit auf. (Haibach, 2006), (Radaj und Vormwald, 2007), (Hollmann, 2004), (Kleemann und Zenner, 2006), (Weich, 2008).

Der Einfluss für die laserstrahlgeschnittene Kante fällt gering aus. Für die gelaserten Kanten der Legierung AA6082 konnte keine Aufhärtung festgestellt werden. Treten zudem keine signifikanten Gefügeveränderungen auf, so ist damit zu rechnen, dass auch keine betragsmäßig hohen Eigenspannungen vorhanden sind, welche Einfluss auf die Mittelspannungsempfindlichkeit nehmen können.

Anders sieht das für die schergeschnittene Kante aus. Auch wenn keine Eigenspannungsmessungen vorliegen, kann mit großer Sicherheit gesagt werden, dass durch die hohe inhomogene plastische Umformung der Randschicht Eigenspannungen erzeugt wurden. Durch die dann auftretende Überlagerung der Eigenspannungen mit der eigentlichen Lastmittelspannung, ändert sich die Mittelspannungsempfindlichkeit. Hier wird sie größer.

Hierbei sollte definitiv beachtet werden, dass ein wesentlicher Unterschied zwischen Eigenspannungen und Lastmittelspannungen darin besteht, dass Eigenspannungen infolge plastischer Verformung, als auch durch lokal über-elastische Schwingbeanspruchung, abgebaut werden können. Hieraus folgt, dass der Einfluss vorliegender Eigenspannungen auf die Mittelspannungsempfindlichkeit sicherlich lastabhängig ist.

Weiterhin zeigt Abbildung 13-21 eine Gegenüberstellung mit der Mittelspannungsempfindlichkeit nach der FKM-Richtlinie. Diese beträgt für die betrachtete Legierung AA6082 $M_\sigma = 0,21$. An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Abschätzung nach FKM-Richtlinie eigentlich auf eine Schwingspielzahl von $N = 10^6$ bezieht und nicht, wie hier ausgewertet, auf $N = 200.000$ Schwingspiele. Wie vorangegangen gezeigt, ist aber nur mit einem geringen Unterschied zwischen den beiden Schwingspielzahlen zu rechnen, da die Neigungsunterschiede der beiden Zeitfestigkeitsgeraden mit $R = -1$ und $R = 0,1$ nicht groß ausfallen.

Ein entsprechender Verlauf ist ausgehend von der Wechselfestigkeit der polierten Kerbprobe mit in das Zeitfestigkeitsschaubild eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die abgeschätzte Mittelspannungsempfindlichkeit für die polierte Kante gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt, vergleiche Abbildung 13-22. Für diese wurden die Mittelspannungsempfindlichkeiten aus den beiden vorliegenden Datenpunkten iterativ berechnet, auf Grundlage der Annahme, dass die Neigung zwischen der Ursprungsgeraden für $R = -1$ und $R = 0$ gleich $-M_\sigma$ sei und jene zwischen $R = 0$ und $R = 0,1$ $-M_\sigma/3$.

Für die polierte Kante ergibt sich eine berechnete Mittelspannungsempfindlichkeit von $M_\sigma = 0,19$ ($0,21$ nach FKM). Die Werte der Schneidkanten fallen mit $M_\sigma = 0,26$ für die laserstrahl-geschnittene Kante und $M_\sigma = 0,40$ für die Scherschneidkante etwas bzw. deutlich größer aus.

Anschaulich ersichtlich wird der Einfluss des Spannungs-Verhältnisses R im Zusammenhang mit dem Kanteneinfluss auch anhand der Abbildung 13-23. Diese zeigt die Abminderungsfaktoren für den Kanteneinfluss der laserstrahl- bzw. schergeschnittenen Kerbproben ($K_t = 2,5$) der Legierung AA6082 gegenüber der polierten Kante. Demnach wirkt sich der Kanteneinfluss bei $R = 0,1$ stärker auf die ertragbare Nennspannungsamplitude für $N = 200.000$ Schwingspiele aus, als bei $R = -1$.

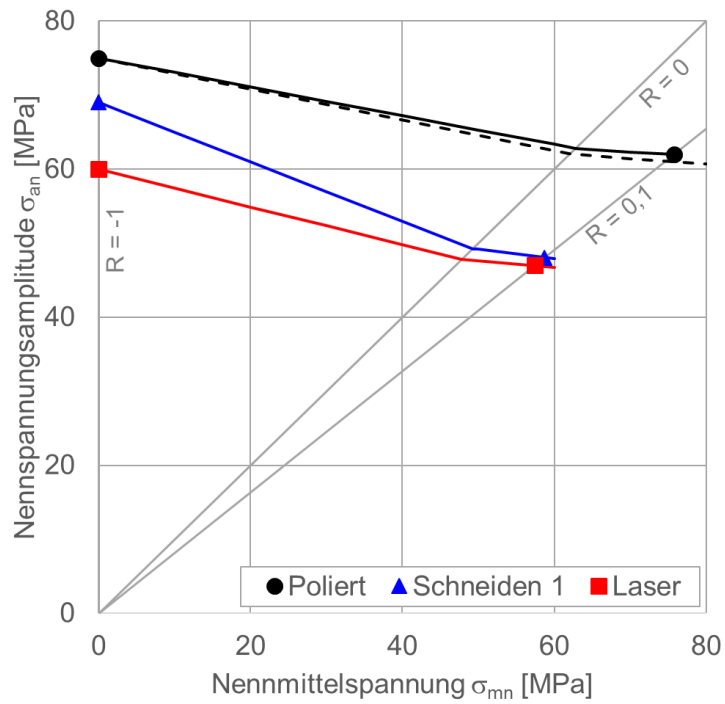


Abbildung 13-22: Zeitfestigkeitsschaubild nach Haigh für AA6082, $K_t = 2,5$, $N = 2E5$ Schwingspiele mit ausgewerteten Mittelspannungsempfindlichkeiten

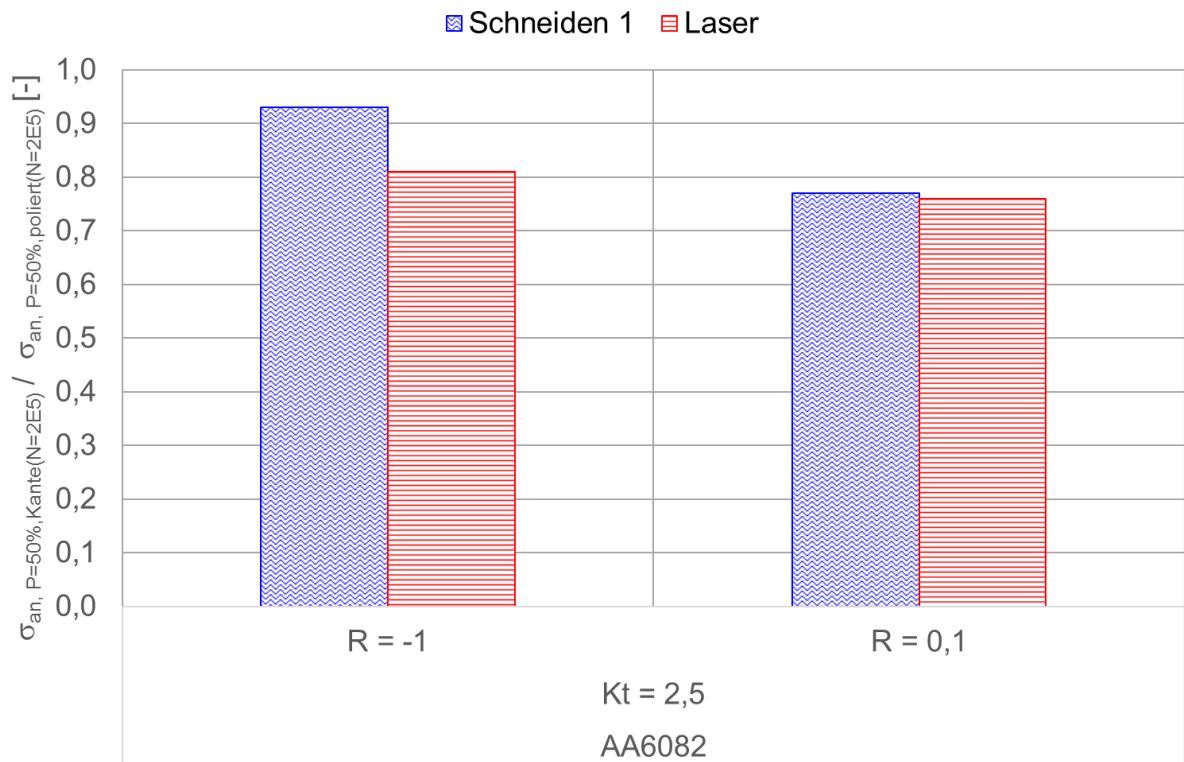


Abbildung 13-23: Kanteneinflussfaktor (bei $N = 2E5$ Schwingspielen) abhängig vom Spannungs-Verhältnis R , EN AW-6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$

13.1.4 Kanteneinfluss

Nachfolgend wird der Einfluss des Kantenzustands auf das Schwingfestigkeitsverhalten ungekerbter und gekerbter Proben unter spannungsgeregelter Beanspruchung erläutert.

Abbildung 13-24 zeigt den Kanteneinfluss für die ungekerbten Proben der Legierung AA5182 für rein wechselnde ($R = -1$) spannungsgeregelte Versuchsführung. Erwartungsgemäß erzielt die polierte Variante die mit Abstand höchste Lebensdauer.

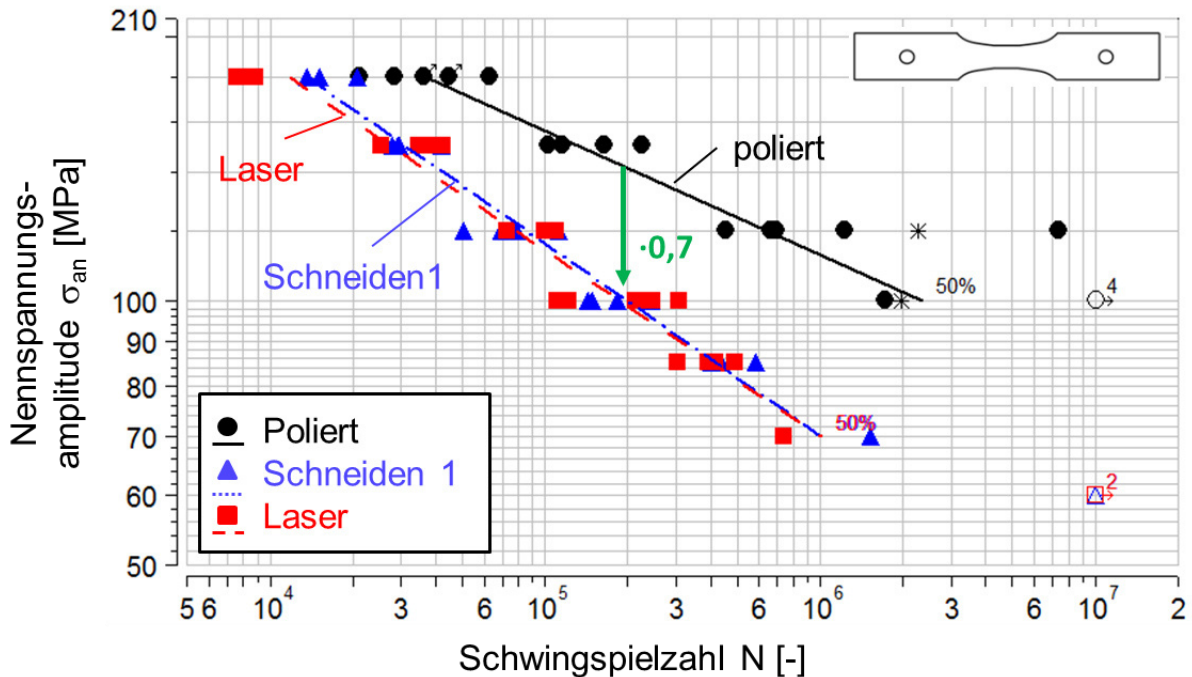


Abbildung 13-24: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA5182, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Die Lebensdauer der laserstrahl- und schergeschnittenen (Schneiden 1) Kante ist demgegenüber deutlich verringert. Bei einer Schwingspielzahl von $N = 200.000$ ist die ertragbare Nennspannungsamplitude gegenüber der polierten Kante um 30 % reduziert. Auffällig ist, dass beide Schneidvarianten ein sehr vergleichbares Schwingfestigkeitsverhalten zeigen. Die Nennspannungs-Wöhlerlinien unterscheiden sich kaum. Dies ist auf die sehr ähnlichen Rauheitswerte zurückzuführen, die im Bereich der dominant elastischen Beanspruchung den ausschlaggebenden Einfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten darstellen. Für die oberen Lasthorizonte ist ein leicht verbessertes Schwingfestigkeitsverhalten der schergeschnittenen Variante erkennbar. Dies ist wahrscheinlich auf die Aufhärtung der Randschicht durch die plastische Umformung infolge des Scherschneidens zurück zu führen.

Wie Abbildung 13-25 zeigt, fällt dieser Trend für die Beanspruchung mit variabler Amplitude noch etwas deutlicher aus. Dieser Lastfall wird in einem nachfolgenden Abschnitt näher betrachtet.

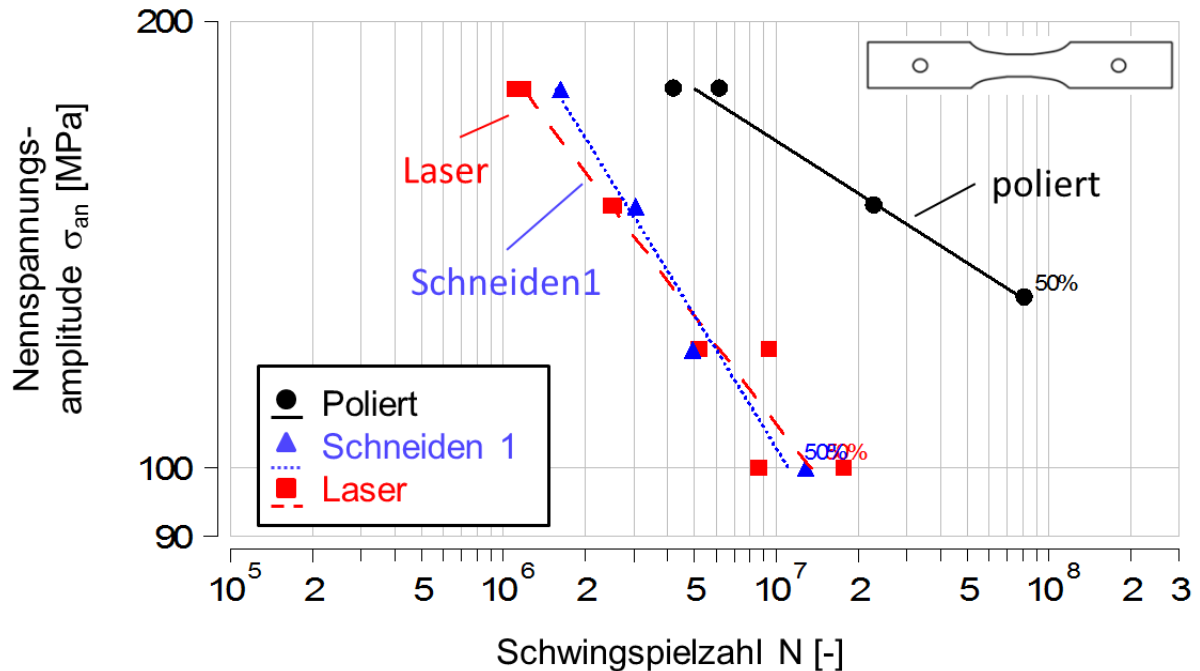


Abbildung 13-25: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA5182, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Abbildung 13-26 zeigt die Ergebnisse für die gekerbten Proben ($K_t = 2,5$) der Legierung AA5182, ebenfalls für rein wechselnde Beanspruchung ($R = -1$). Auch hier ist die Lebensdauer der polierten Kante größer als die der beiden Schneidvarianten. Der Unterschied zwischen polierter Kante und Schneidkante fällt allerdings geringer aus, als für die ungekerbte Probengeometrie. Der Abminderungsfaktor gegenüber der polierten Kante beträgt ca. 0,8 ($N = 200.000$). Dies ist auf die dominante überlagerte Makrokerbwirkung durch die geometrische Kerbe zurück zu führen. Zudem fällt auf, dass die drei Nennspannungs-Wöhlerlinien für die gekerbte Geometrie noch deutlicher gegen einen gemeinsamen Schnittpunkt streben, als das für die ungekerbten Proben der Fall ist. Dies steht in Verbindung mit der statischen Festigkeit (Zugfestigkeit bzw. Kerbzugfestigkeit), die näherungsweise nicht vom Kantenzustand beeinflusst wird. Dem entsprechend verlaufen die Zeitfestigkeitsgeraden der Schneidvarianten steiler als die der polierten Kante. Mit anderen Worten, je höher die lokale Beanspruchung ist, desto geringer wirkt sich der Kanteneinfluss aus. Dies hängt mit einer Abstumpfung der Mikrokerbwirkung des Rauheitsprofils (Blunting) zusammen, da es vermehrt zu einem Fließen im Grund der Mikrokerben kommt.

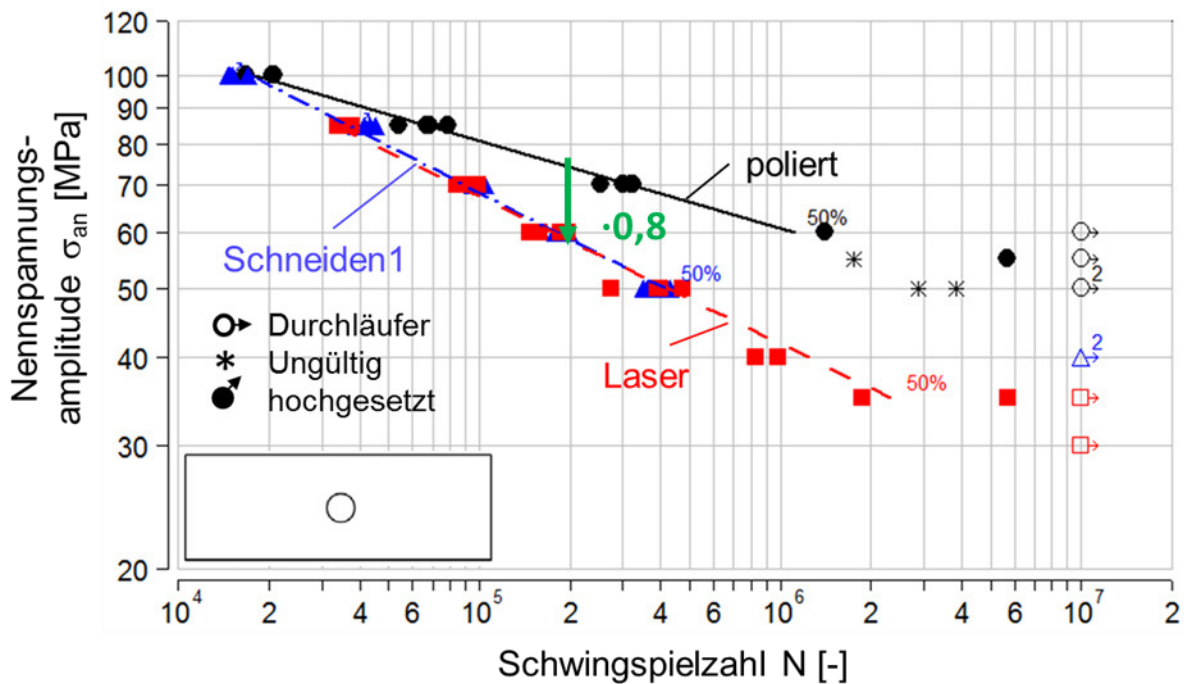


Abbildung 13-26: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA5182, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Untersuchung des Kanteneinflusses der Legierung AA6082 unter spannungsgeregelter Versuchsführung diskutiert.

Abbildung 13-27 zeigt die Ergebnisse für die ungekerbte Probengeometrie unter rein wechselnder Beanspruchung ($R = -1$). Die höchste Lebensdauer erreicht wiederum die polierte Kante. Die Zeitfestigkeitsgeraden der Schneidvarianten (Schneiden 1 bis 5 und Laser) unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Die Abminderungsfaktoren der ertragbaren Nennspannungsamplitude bei $N = 200.000$ Schwingspielen streuen zwischen 0,95 (Schneiden 2) und 0,71 (Schneiden 4). Die laserstrahlgeschnittene Kante liegt dabei mit einem Faktor von 0,74 am unteren Ende, d. h. der Kanteneinfluss wirkt sich hier tendenziell stärker aus als für die meisten Scherschneidvarianten. Begründet wird dies mit der vergleichsweise hohen Rauheit der Schneidkante. Auffällig ist, dass die Referenzvariante Schneiden 1 gegenüber den anderen Scherschneidstrategien eine deutlich abweichende Neigung aufweist. Überraschend liegt die Zeitfestigkeitsgerade der Strategie Schneiden 2 hier bei den höchsten Lebensdauern aller Schneidvarianten. Es scheint, dass sich der Einfluss des auftretenden Sekundärglattschnitts hier im Vergleich zu den dehnungsgeregelten Versuchen nicht signifikant negativ auswirkt. Mehr hierzu folgt im Rahmen der Diskussion der dehnungsgeregelten Versuche.

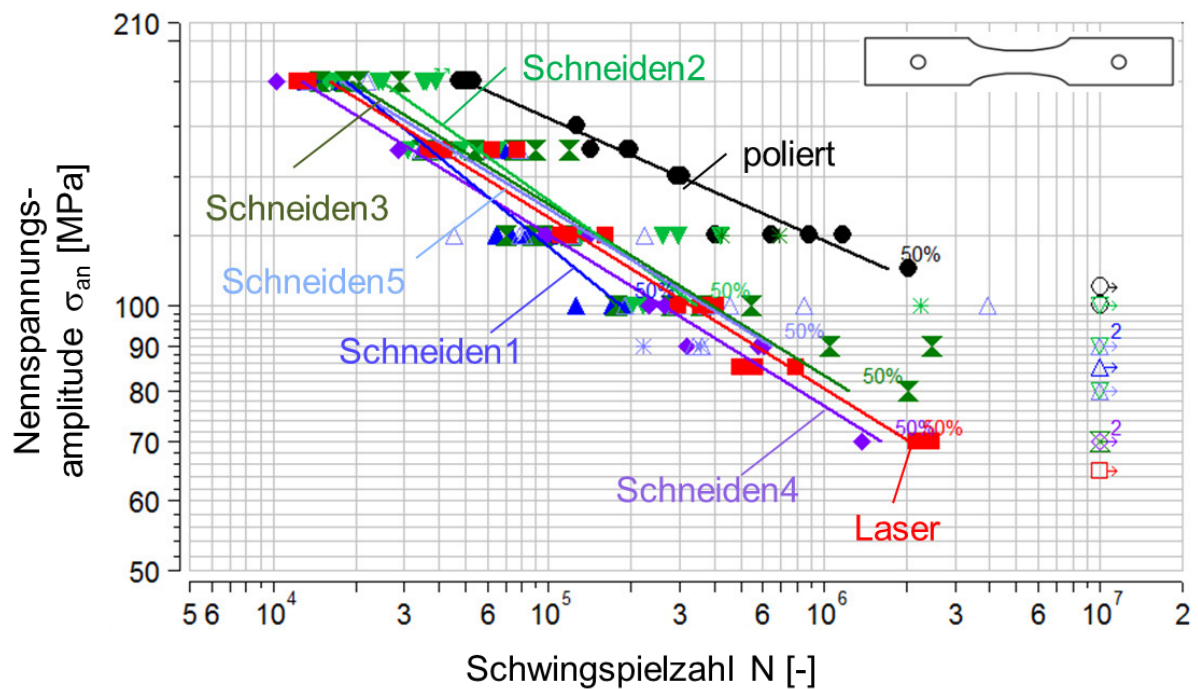


Abbildung 13-27: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA6082, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Abgesehen von einem eher gering ausfallenden Einfluss auf die Zeitfestigkeitsgeraden, zeichnet sich eine deutlich signifikantere Beeinflussung der Durchläufer-Horizonte ab. Zielsetzung des Forschungsprojekts war nicht die Bestimmung des Schwingfestigkeitsverhaltens im vhf-Bereich, sondern der Zeitfestigkeitsgeraden (hcf-Bereich). Deshalb sind die Versuchsreihen in diesem Bereich nicht statistisch hinreichend belegt, allerdings unterscheiden sich die ermittelten Durchläufer-Horizonte (Erreichen von $N = 10^7$ Schwingspielen ohne erkennbaren Anriss) der einzelnen Kantenzustände teils deutlich voneinander. Die Scherschneidkanten liegen im Bereich zwischen der polierten und der laserstrahlgeschnittenen Kante, welcher eine Spannweite um einen Faktor von 1,5 ausmacht.

Eine ähnliche Spannweite weisen die Durchläufer-Horizonte der gekerbten Proben ($K_t = 2,5$) auf, vergleiche Abbildung 13-28. Auch hier ist der Wert für die laserstrahlgeschnittene Kante am schlechtesten und jener der polierten am besten. Allerdings unterscheiden sich hier die Werte der Scherschneidvarianten kaum voneinander. Ebenso liegen die Zeitfestigkeitsgeraden wiederum dicht bei einander, wobei die laserstrahlgeschnittene Variante die schlechteste Lebensdauer aufweist und Schneiden 2 wiederum die beste. Die Faktoren der Scherschneidkanten (für $N = 200.000$) liegen zwischen 0,95 (Schneiden 2) und 0,86 (Schneiden 4). Der Kanteneinflussfaktor der laserstrahlgeschnittenen Kante beträgt 0,81.

Die Neigungen aller Schneidvarianten sind vergleichbar und, wie auch für die Legierung AA5182, steiler als bei polierter Kante. Auch für die Legierung AA6082 lässt sich ein Streben gegen ein gemeinsames, vom Kantenzustand näherungsweise unbeeinflusstes statisches Limit

erkennen. Auch hier wird der Kanteneinfluss durch die überlagerte Makrokerbwirkung der geometrischen Kerbe abgeschwächt.

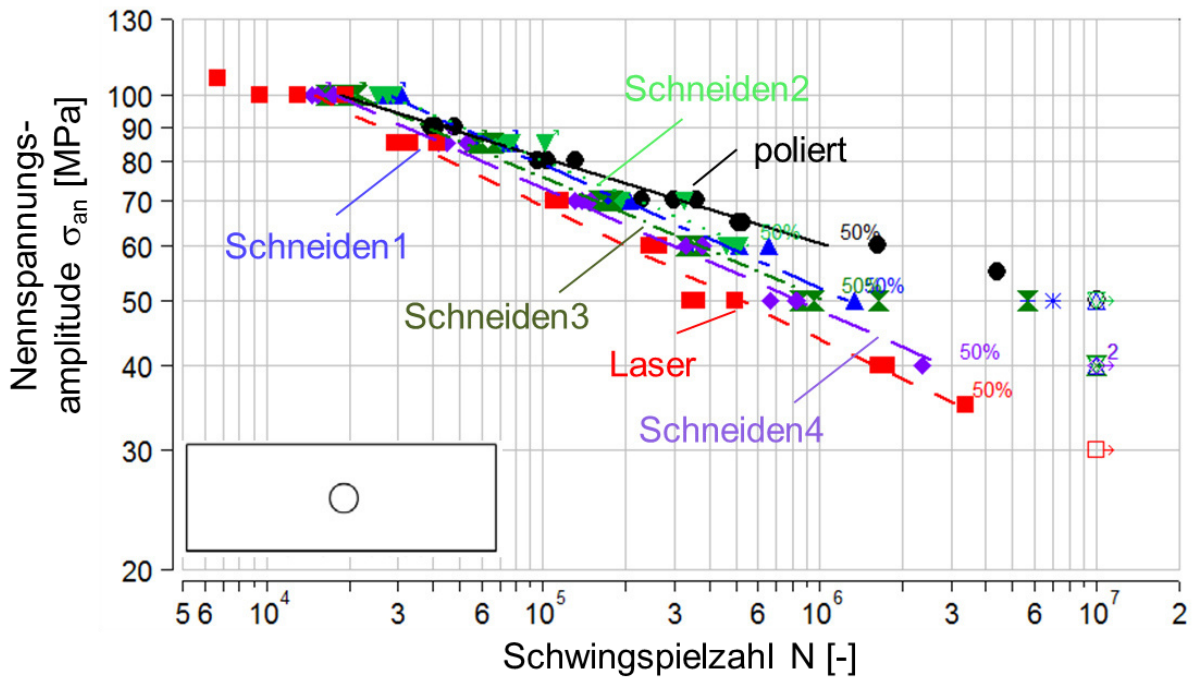


Abbildung 13-28: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA6082, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Noch deutlicher wird dies für die scharf gekerbten Proben ($K_t = 4,6$), vergleiche Abbildung 13-29. Die Kanteneinflussfaktoren ($N = 200.000$) betragen 0,90 für die laserstrahlgeschnittene Variante und 1,04 für die Variante Schneiden 1. Demnach ist die ertragbare Nennspannungsamplitude der Scherschneidkante gegenüber der polierten geringfügig erhöht. Als Ursache wird eine Kaltverfestigung des Kerbgrundes vermutet, die dem Rauheitseinfluss überlagert ist.

Wie auch für die 5xxx-Legierung, zeigt sich für die 6xxx-Legierung ein vergleichbarer Kanteneinfluss bei Beanspruchung mit variabler anstatt konstanter Amplitude, vergleiche Abbildung 13-30. Diese Aussage bezieht sich jedoch rein qualitativ auf die Anordnung der Wöhler- bzw. Lebensdauerlinien der einzelnen Kantenzustände zueinander. Mehr hierzu in einem nachfolgenden Abschnitt.

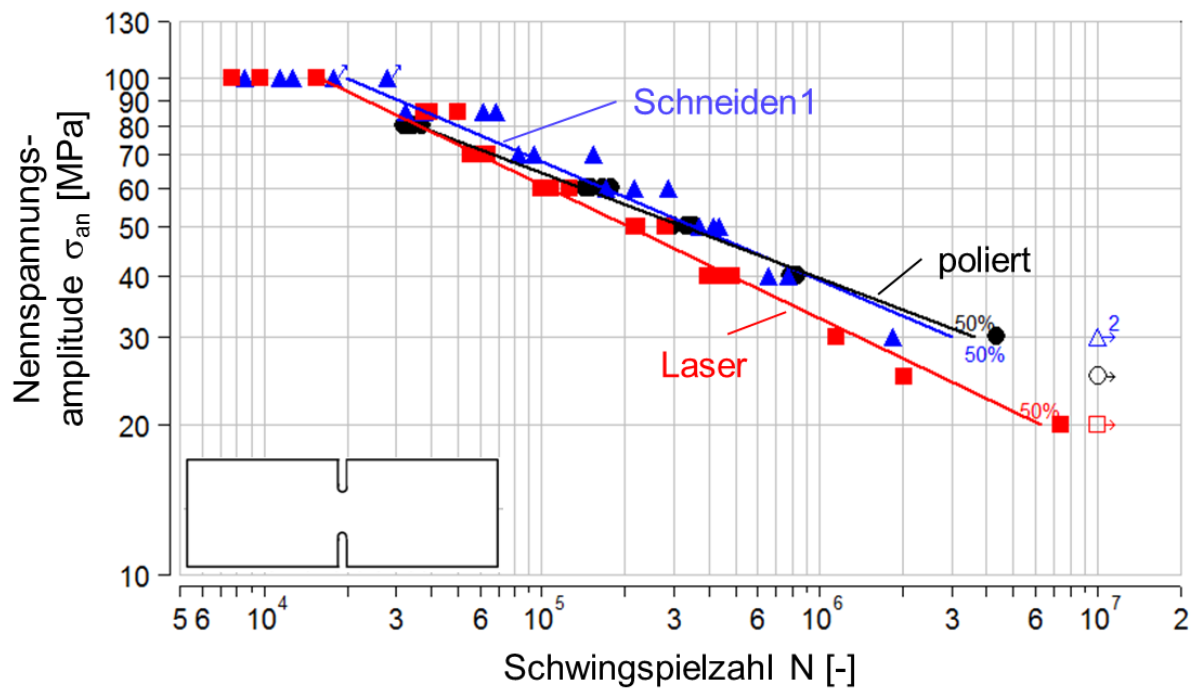


Abbildung 13-29: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA6082, $K_t = 4.6$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$

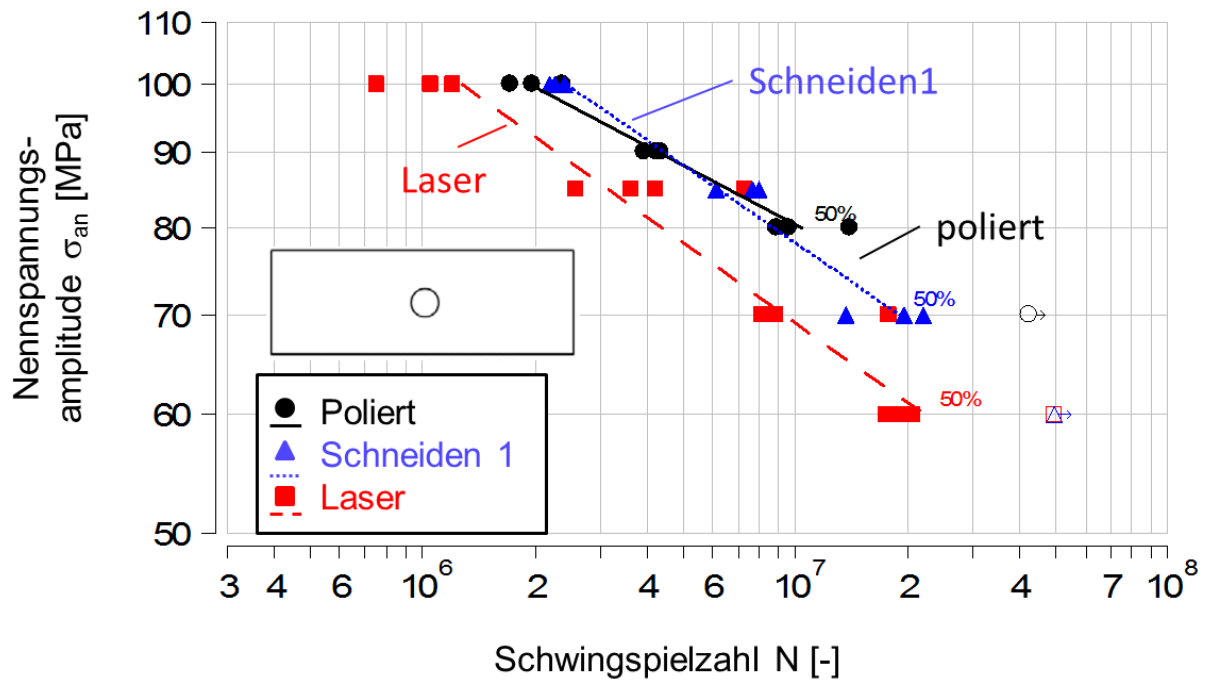


Abbildung 13-30: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$

Tabelle 13-5 fasst die ermittelten Kanteneinflussfaktoren der spannungsgeregelten einstufigen Versuche bei einer Schwingspielzahl von $N = 200.000$ zusammen und Abbildung 13-31 stellt diese einander grafisch gegenüber.

Durch Tabelle 13-6 ist ein Vergleich für eine Auswertung bei einer Schwingspielzahl von $N = 1$ Mio. gegeben, sofern diese möglich war. Die ermittelten Quotienten der Nennspannungsamplituden $\sigma_{an,P=50\%,Kante} / \sigma_{an,P=50\%,poliert}$ sind dabei für $N = 1$ Mio. Schwingspiele kleiner, als bei $N = 200.000$. Dies kann als eindeutiger Beweis für einen lastabhängigen Kanteneinfluss angesehen werden und ist mit der steileren Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden der Schneidkanten gegenüber der polierten Kante zu begründen.

Tabelle 13-5: Zusammenfassung der Kanteneinflussfaktoren der spannungsgeregelten Versuche mit konstanter Lastamplitude für $N = 200.000$ Schwingspiele, $P_A = 50\%$

Kanteneinfluss, spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch									
Werkstoff	Kantenbearbeitung	φ_1 [-]	R-Verhältnis [-]	$K_t = 1$		$K_t = 2,5$		$K_t = 4,6$	
				Schwingspielzahl N	$\sigma_{an, P=50\%,Kante(N)} / \sigma_{an, P=50\%,poliert(N)}$ [-]	Schwingspielzahl N	$\sigma_{an, P=50\%,Kante(N)} / \sigma_{an, P=50\%,poliert(N)}$ [-]	Schwingspielzahl N	$\sigma_{an, P=50\%,Kante(N)} / \sigma_{an, P=50\%,poliert(N)}$ [-]
AA5182	Schneiden 1	0	-1	2,00E+05	0,70	2,00E+05	0,80	2,00E+05	
	Laser	0	-1		0,70		0,82		
AA6082	Schneiden 1	0	-1	2,00E+05	0,80	2,00E+05	0,93	2,00E+05	1,04
			0,1				0,77		
	Schneiden 2	0	-1		0,95		0,95		
	Schneiden 3	0	-1		0,76		0,90		
	Schneiden 4	0	-1		0,71		0,86		
	Schneiden 5	0	-1		0,92				
	Laser	0	-1		0,74		0,81		
		0,1		0,76					

Tabelle 13-6: Zusammenfassung der Kanteneinflussfaktoren der spannungsgeregelten Versuche mit konstanter Lastamplitude für $N = 1.000.000$ Schwingspiele, $P_A = 50\%$

Kanteneinfluss, spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch									
Werkstoff	Kantenbearbeitung	φ_1 [-]	R-Verhältnis [-]	$K_t = 1$		$K_t = 2,5$		$K_t = 4,6$	
				Schwingspielzahl N	$\sigma_{an, P=50\%,Kante(N)} / \sigma_{an, P=50\%,poliert(N)}$ [-]	Schwingspielzahl N	$\sigma_{an, P=50\%,Kante(N)} / \sigma_{an, P=50\%,poliert(N)}$ [-]	Schwingspielzahl N	$\sigma_{an, P=50\%,Kante(N)} / \sigma_{an, P=50\%,poliert(N)}$ [-]
AA5182	Schneiden 1	0	-1	1,00E+06	0,62	1,00E+06	-	1,00E+06	
	Laser	0	-1		0,62		0,69		
AA6082	Schneiden 1	0	-1	1,00E+06	-	1,00E+06	0,85	1,00E+06	1,00
			0,1				-		
	Schneiden 2	0	-1		-		-		
	Schneiden 3	0	-1		0,70		0,84		
	Schneiden 4	0	-1		0,65		0,79		
	Schneiden 5	0	-1		-				
	Laser	0	-1		0,67		0,72		
		0,1		-					

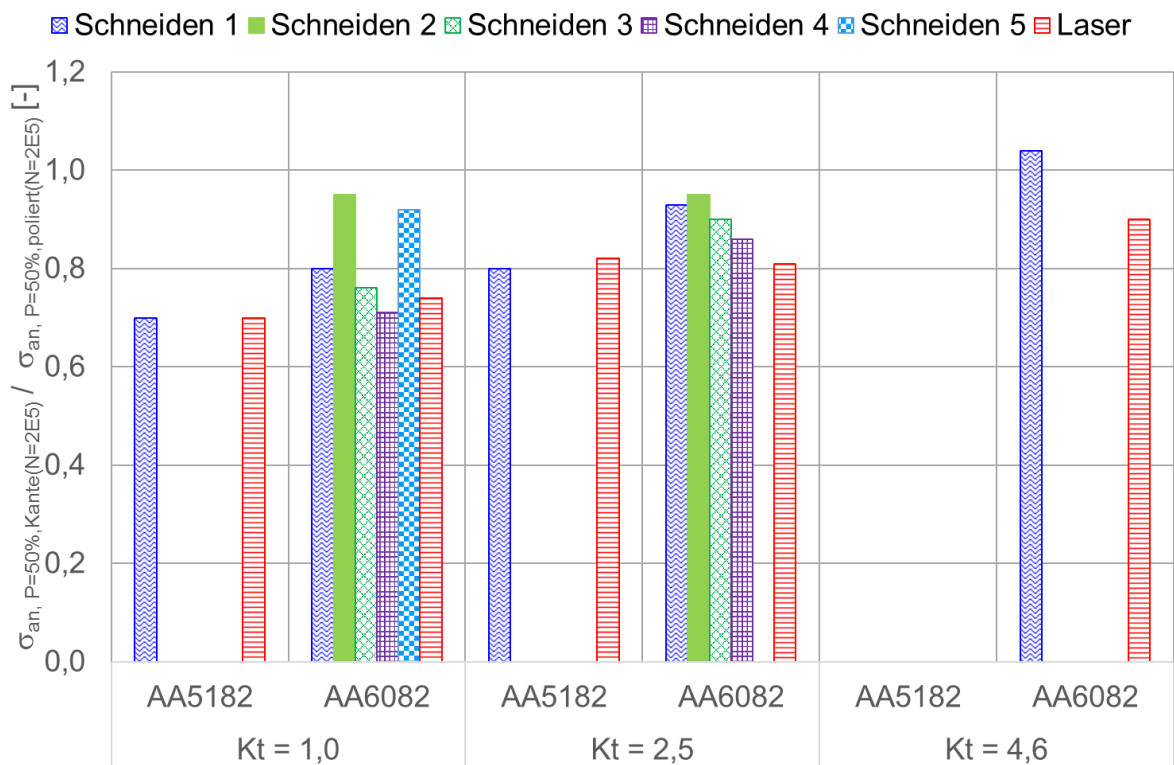


Abbildung 13-31: Darstellung der Kanteneinflussfaktoren ($N = 200.000$ Schwingspiele) der spannungsgeregelten Versuche, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Zusammenfassend können mehrere Erkenntnisse abgeleitet werden. Zum einen fällt für alle betrachteten Versuchsreihen der Kanteneinfluss für die laserstrahlgeschnittene Kante tendenziell mit am größten aus. Für diese Variante wurden tendenziell die betragsmäßig geringsten Faktoren ermittelt. Begründet wird dies mit der vergleichsweise hohen Oberflächenrauheit der laserstrahlgeschnittenen Kanten, welche auf die gewählten Laserschneidparameter zurückzuführen ist.

Weiterhin wird klar ersichtlich, dass die Faktoren mit zunehmender Kerbschärfe zunehmen. Dies spiegelt den überlagerten Einfluss der Makrokerbwirkung wieder. Mit steigender Kerbschärfe und, daraus resultierend, steigender lokaler Beanspruchung im Kerbgrund, nimmt der Einfluss der Oberflächenrauheit (Mikrokerbwirkung) ab. Folglich verringert sich der Kanteneinfluss mit zunehmender Kerbschärfe bzw. zunehmender lokaler Beanspruchung. Ausgenommen hiervon ist der Einfluss einer überlagerten Lastmittelspannung. Wie zuvor gezeigt werden konnte, wirkt sich dieser negativ auf die ertragbare Nennspannungsamplitude aus.

13.1.5 Einfluss variabler Amplituden

Die Treffsicherheit von Auslegungskonzepten hängt im Wesentlichen von der Übertragbarkeit zwischen an Proben ermittelten Kennwerten und tatsächlichen Bauteilen ab. Ein Aspekt, der für die Übertragbarkeit relevant sein kann, ist der Einfluss durch Beanspruchung mit variabler Amplitude. Die meisten Bauteile erfahren im Betrieb eine Beanspruchung mit variabler Amplitude und/ oder Mittellast. Im Vergleich hierzu werden die meisten Schwingfestigkeitsuntersuchungen mittels konstanter (einstufiger) Beanspruchungsamplitude durchgeführt. Im Rahmen dieses Projektes ist entscheidend, ob sich ein an Proben unter Beanspruchung mit konstanter Amplitude ermittelter Kanteneinfluss auf eine Beanspruchung mit zeitlich veränderlicher Amplitude übertragen lässt, oder wie dieser gegebenenfalls korrigiert und angepasst werden muss.

Durch Abbildung 13-32 und Abbildung 13-33 sind die Ergebnisse der Versuche mit variabler Amplitude (Blockprogramm) denen mit konstanter Amplitude gegenüber gestellt. Wie bereits in einem vorangegangenen Abschnitt angeführt, zeigt sich qualitativ die gleiche Anordnung der jeweiligen Linien zueinander. Ähnlich verhält es sich bei den Versuchen, welche mit einem Gauß-Signal durchgeführt wurden. Die entsprechenden Gegenüberstellungen sind durch Abbildung 13-34 und Abbildung 13-35 gegeben.

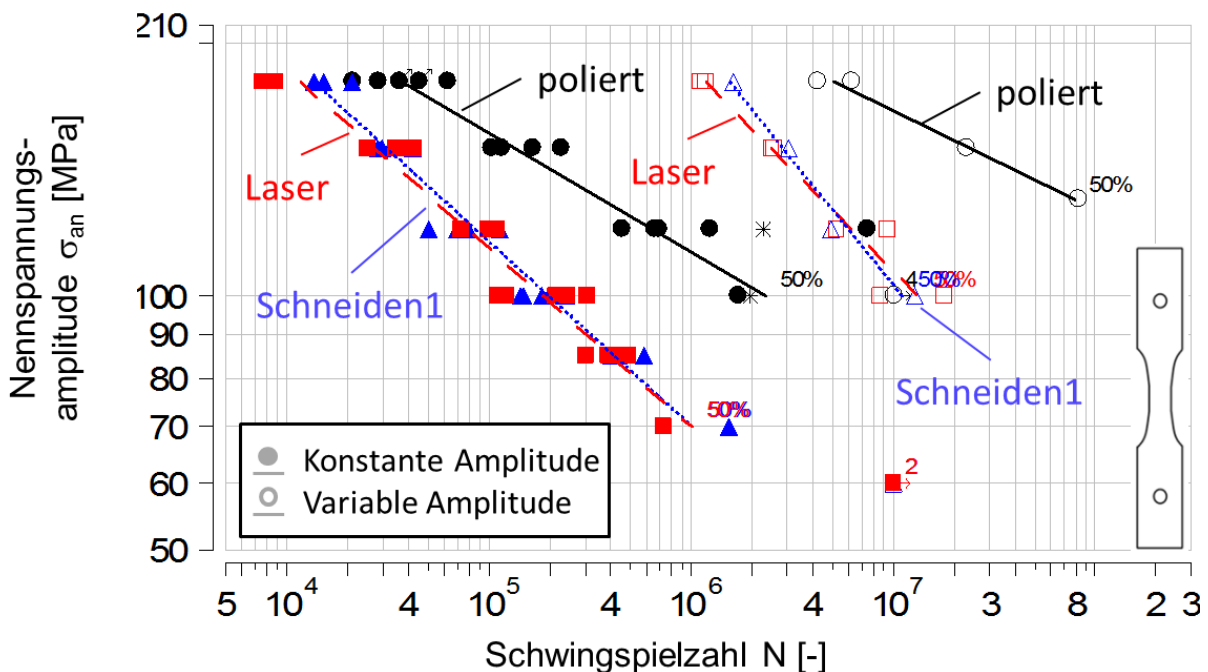


Abbildung 13-32: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA5182, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

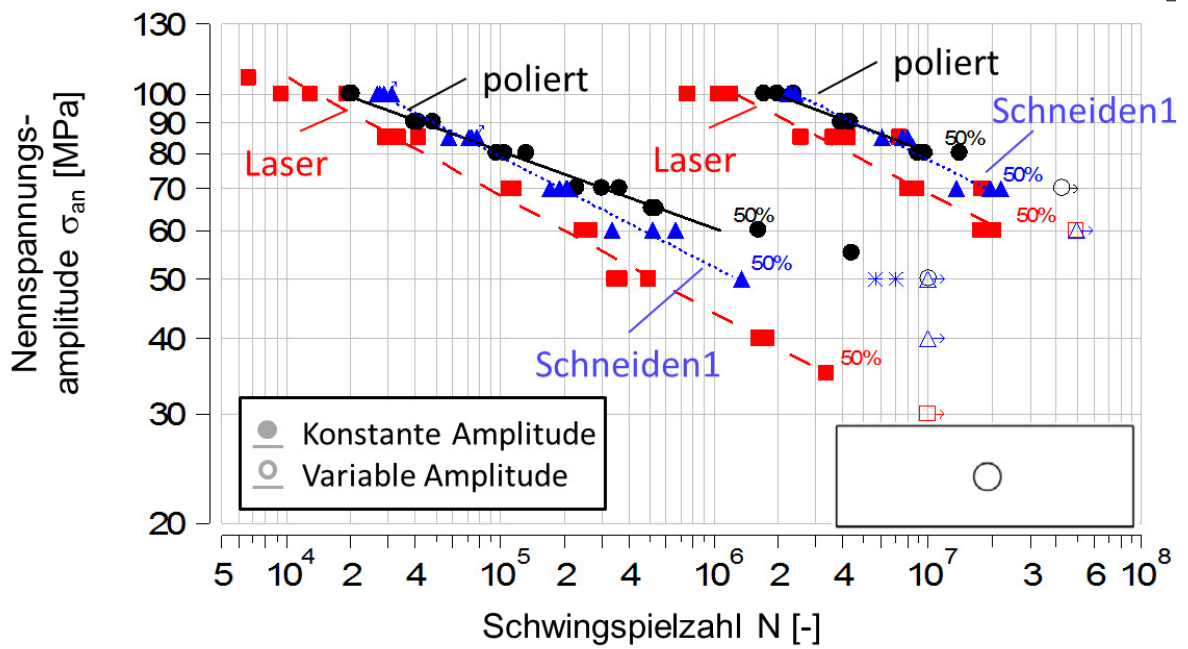


Abbildung 13-33: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$

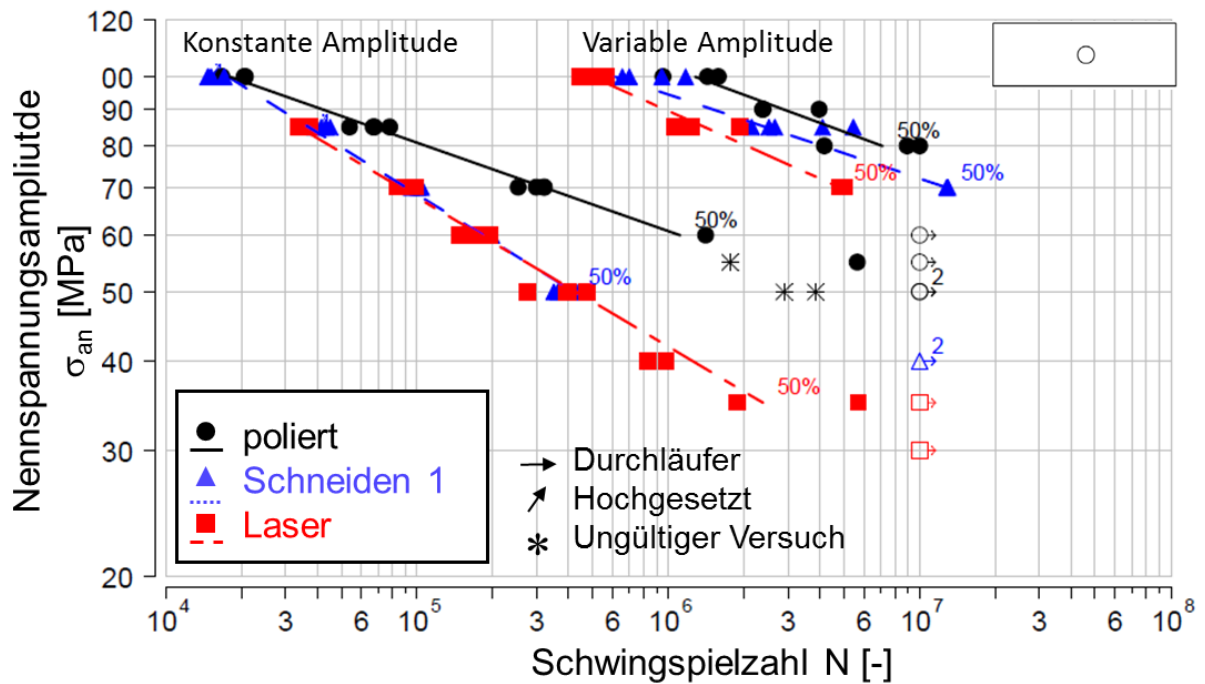


Abbildung 13-34: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Gauß-Signal, AA5182, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$

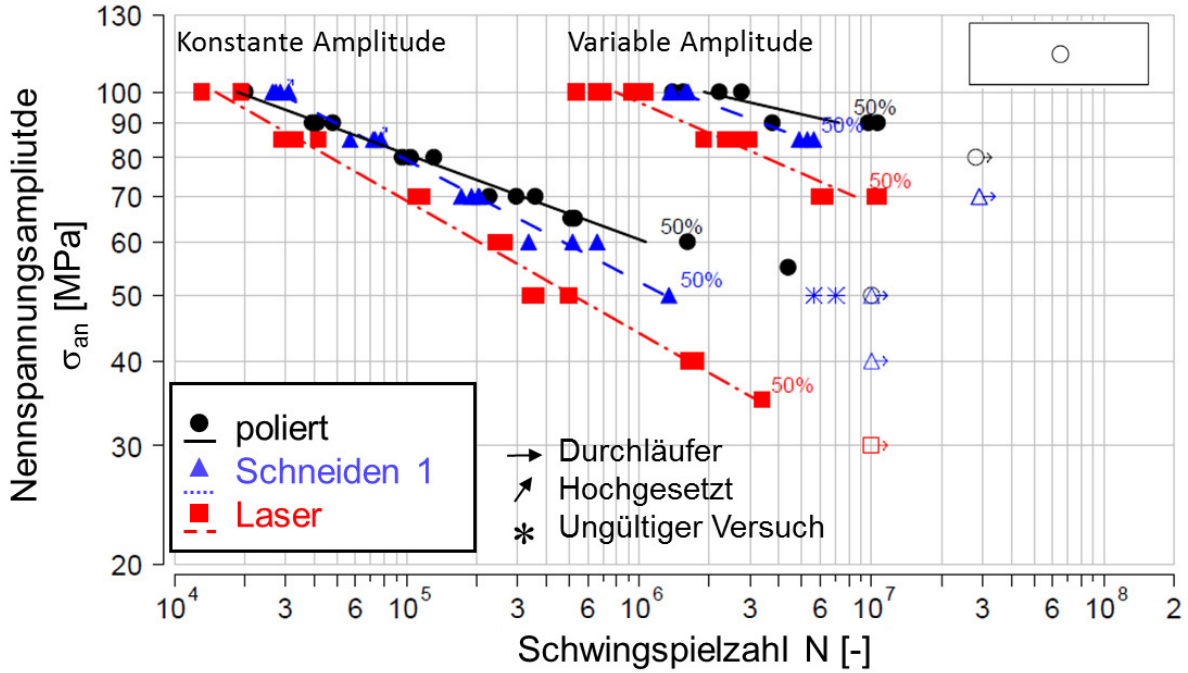


Abbildung 13-35: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Gauß-Signal, AA6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Eine quantitative Bewertung erfolgt anhand des in (Thum und Häfele, 2020) vorgestellten Auswerteverfahrens. Durch Abbildung 13-36 ist eine schematische Darstellung gegeben. Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse der Auswertungen wurden in (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020), (Thum und Häfele, 2020) veröffentlicht.

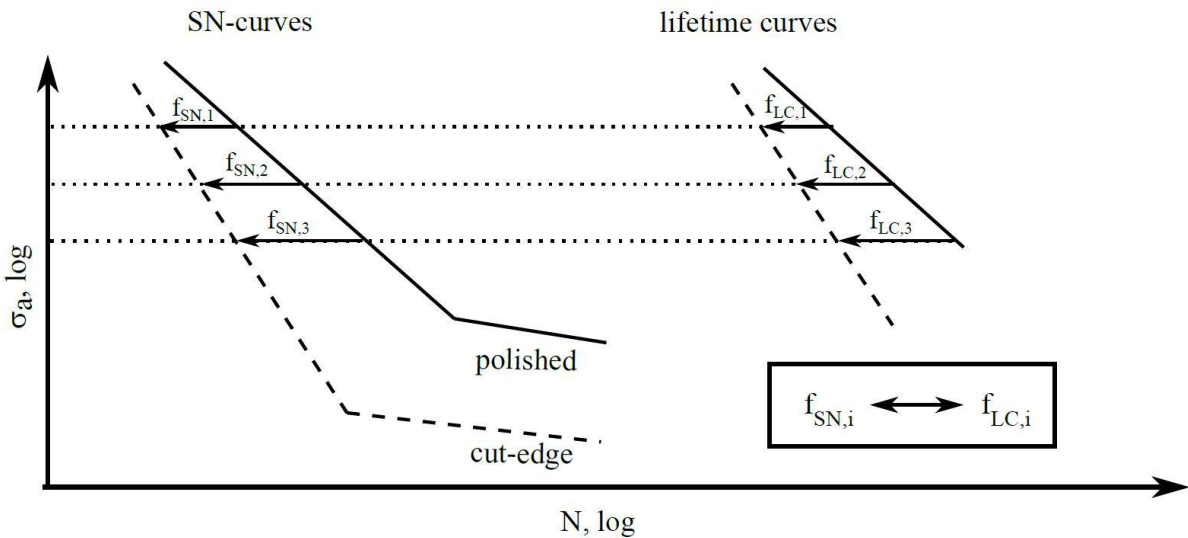


Abbildung 13-36: Schematische Darstellung des Auswerteverfahrens für den Vergleich des Kanteneinfluss bei Wöhler- und Lebensdauerlinien, (Thum und Häfele, 2020)

Für drei gemeinsame Lasthorizonte werden die Faktoren $f_{SN,i} = \frac{N_{SN-curve,Schneidkante,i}}{N_{SN-curve,poliert,i}}$ und $f_{LC,i} = \frac{N_{lifetime-curve,Schneidkante,i}}{N_{lifetime-curve,poliert,i}}$ gebildet und miteinander verglichen. Stimmen die Faktoren horizontweise miteinander überein, so ist eine Übertragbarkeit des Kanteneinflusses von Beanspruchung mit konstanter Amplitude auf eine Beanspruchung mit variabler Amplitude möglich. Durch Abbildung 13-37 und Abbildung 13-38 ist eine Gegenüberstellung des nach dieser Methode ausgewerteten Kanteneinflusses gegeben. Es ist erkennbar, dass die Ausprägung des Kanteneinflusses abhängig von der Höhe der Beanspruchung ist. Dies ist auf die unterschiedlichen Neigungen der polierten und laserstrahl- sowie schergeschnittenen Wöhler- bzw. Lebensdauerlinien zurück zu führen. Weiterhin wird ersichtlich, dass eine Übertragbarkeit des Kanteneinflusses von Beanspruchung mit konstanter Amplitude auf eine Beanspruchung mit variabler Amplitude nicht uneingeschränkt möglich ist. In den meisten Fällen führt eine solche Übertragung zu nicht-konservativen Vorhersagen.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass sich der Kantenzustand auch auf die berechneten Schädigungssummen auswirkt. Hierfür werden im Rahmen einer linearen Schadensakkumulation Schadenssummen nach Miner-Elementar und Miner-Modifiziert (Haibach) aus den Versuchsergebnissen berechnet. Die Ergebnisse für die Gauß-Signale sind durch Abbildung 13-39 gegeben. Aus dieser geht hervor, dass die zulässige Schadenssumme für den polierten Zustand am geringsten ausfällt. Sie liegt dabei in einem aus der Literatur bekannten üblichen Bereich um $D = 0,3$ (Miner-Modifiziert). Für die beiden Schneidkanten (Laser und Schneiden 1) erhöht sich die zulässige Schadenssumme gegenüber dem polierten Zustand. Dabei weist die schergeschnittene Variante (Schneiden 1) die höchsten Werte auf.

Erwartungsgemäß fallen die zulässigen Schadenssummen der Modifikation Miner-Elementar größer aus, als für Miner-Modifiziert.

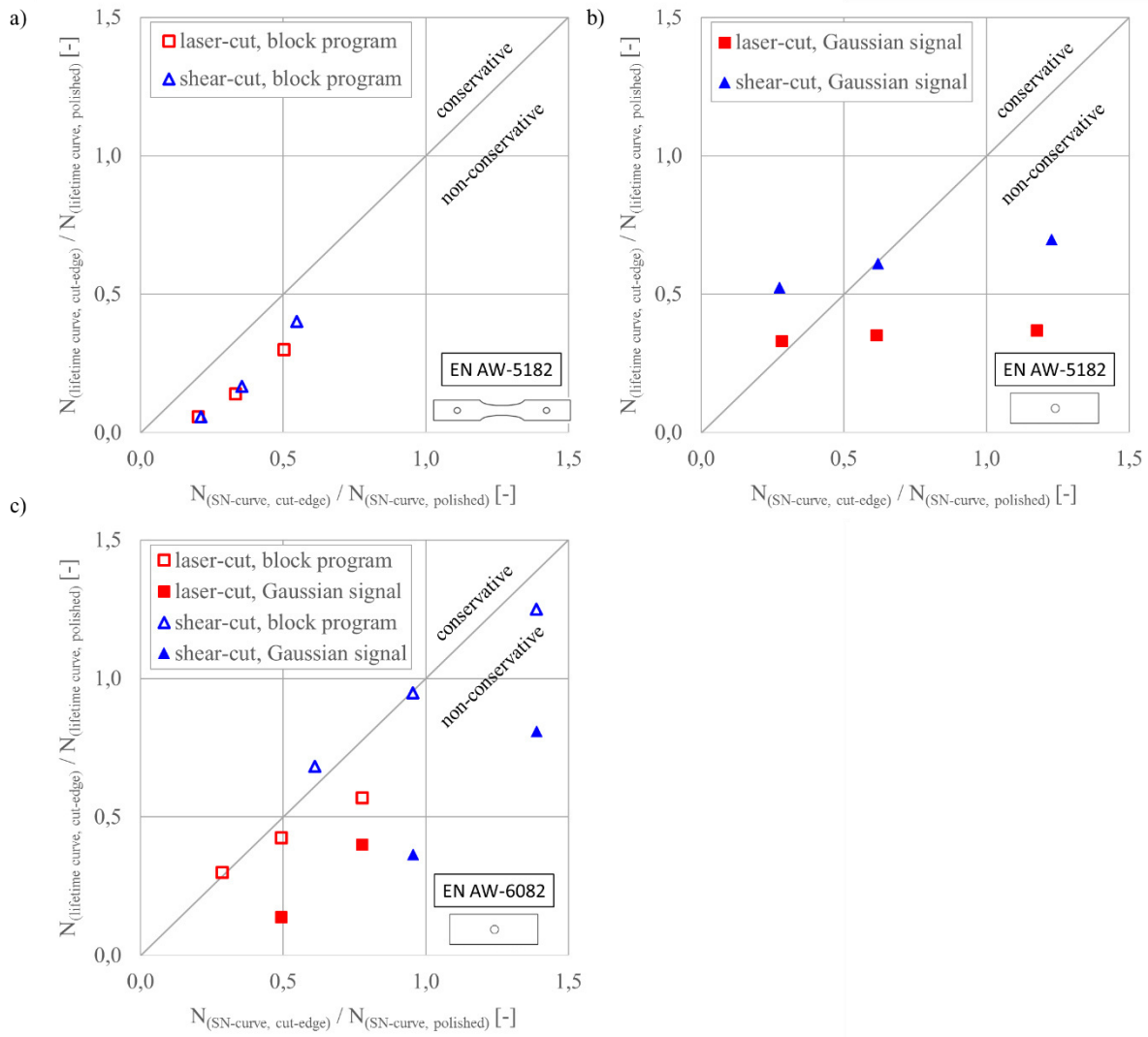


Abbildung 13-37: Vergleich des Kanteneinflusses für variable und konstante Lastamplitude, nach (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020)

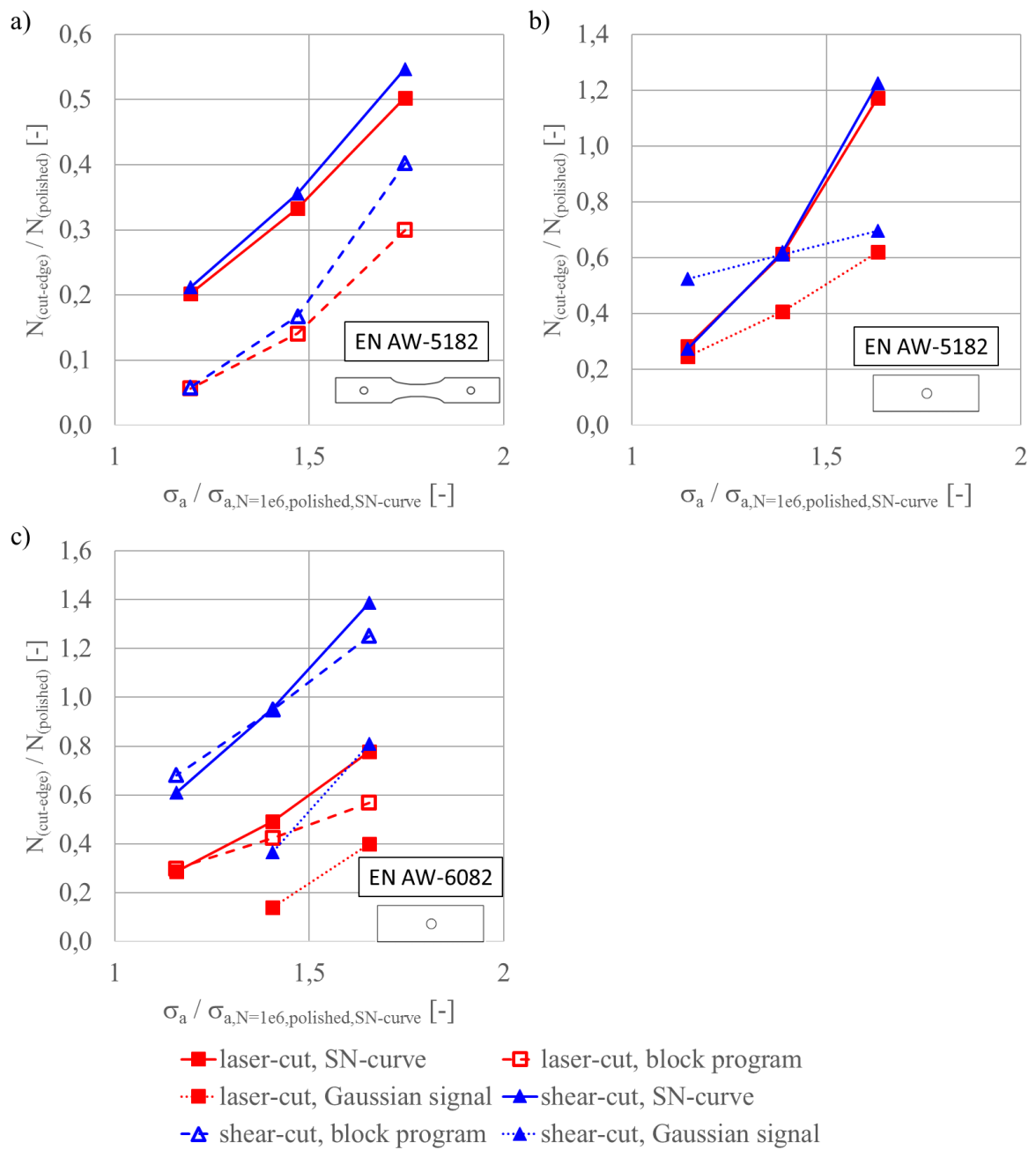


Abbildung 13-38: Vergleich des Kanteneinflusses für variable und konstante Beanspruchungsamplitude abhängig von der Höhe der Lastamplitude, nach (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020)

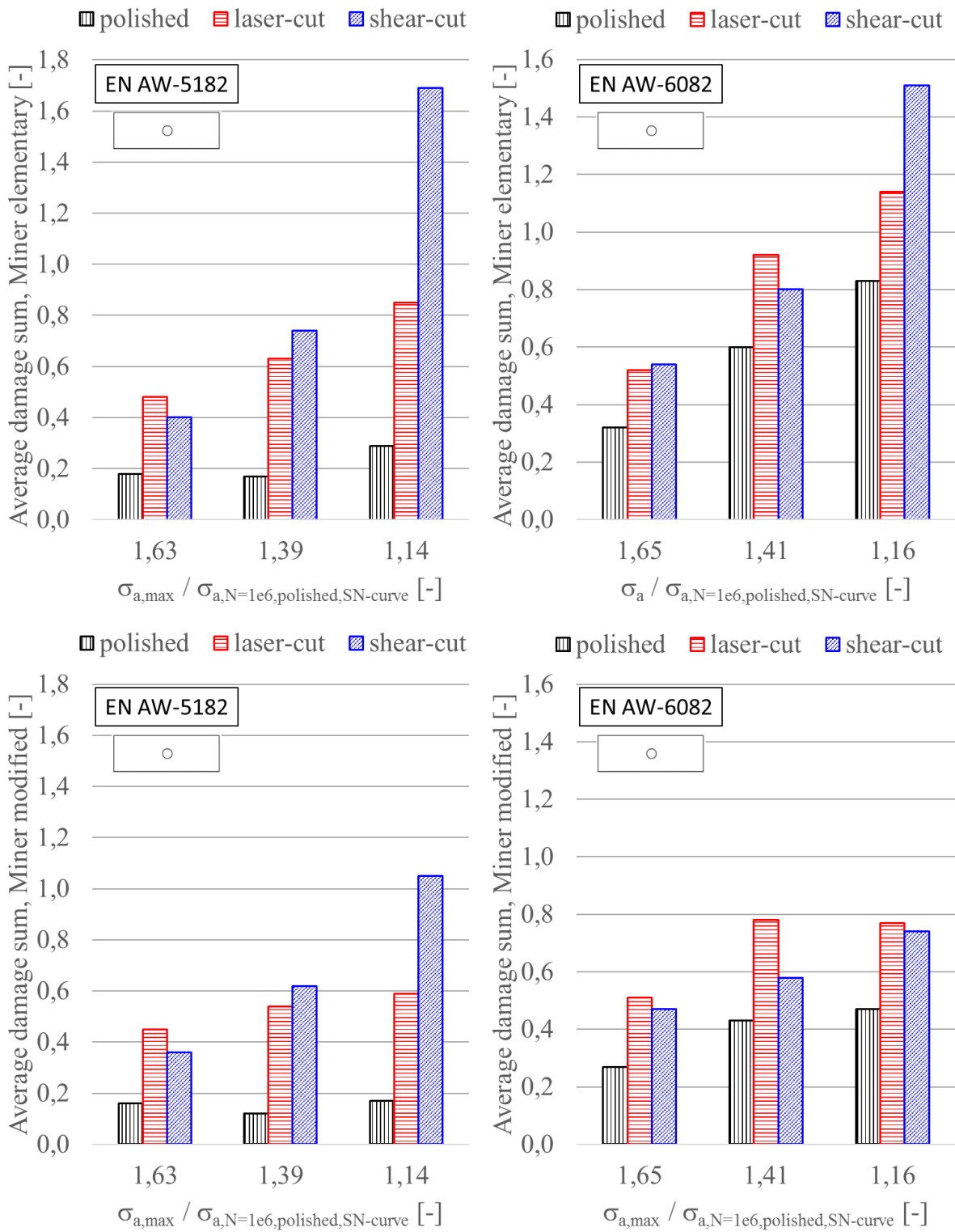


Abbildung 13-39: Einfluss des Kantenzustands auf die berechneten kritischen Schadenssummen nach Miner-Elementar (oben) und Miner-Modifiziert (unten), $R = -1$, Gauß-Signal, $H_0 = 10.000$, $I = 1$, nach (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020)

Als Konsequenz für eine rechnerische Lebensdauerabschätzung einer Beanspruchung mit variabler Amplitude ergibt sich, dass der Kanteneinfluss unterschätzt wird, wenn zur Beschreibung

Faktoren aus Versuchsreihen mit konstanter Amplitude herangezogen werden. Die vorhergesagten Lebensdauern liegen dann auf der nicht-konservativen Seite.

Weiterhin muss beachtet werden, dass sich die zulässigen Schadenssummen der Schneidkanten (laserstrahl- und schergeschnitten) gegenüber denen des polierten Zustands erhöhen. Dieser Umstand führt jedoch zu konservativen Vorhersagen, da das Bauteilversagen für zu kleine Schadenssummen angenommen werden würde. Allerdings wird hierdurch Potenzial für Leichtbau verschenkt. Die Auslegung ist unter Umständen zu konservativ.

Als Ursache für einen erhöhten Kanteneinfluss bei Beanspruchung mit variabler Amplitude wird die erhöhte Anzahl an Schwingspielen mit niedrigen Lastamplituden vermutet. Speziell im unteren, dominant elastischen Lastbereich wirken sich insbesondere der Einfluss der erhöhten Rauheit stark auf das Schwingfestigkeitsverhalten und die erzielbare Lebensdauer aus.

Wie aus beispielsweise (*Fitzka und Mayer, 2016*) bekannt ist, erhöht sich auch hier die zulässige Schadenssumme der Versuche mit Blockprogramm gegenüber denen mit Gauß-Signal. Während sich für die Versuche mit Gauß-Signal Werte zwischen $D = 0,2$ und $D = 0,8$ einstellen, werden für Versuche mit Blockprogramm Werte zwischen $D = 1,0$ und $D = 1,2$ erreicht. Jeweils im polierten Zustand. Eine Abhängigkeit vom Kantenzustand ist auch für das Blockprogramm feststellbar. Auch hier weisen die Schneidkanten höhere Werte auf als die polierte Kante.

Für beide Varianten zeigt sich zudem tendenziell eine Zunahme der zulässigen Schadenssummen mit Abnahme des Kollektivhöchstwertes. Dies geht für das Gauß-Signal auch aus Abbildung 13-39 hervor.

13.2 Einfluss Wärmebehandlung

Die Feinbleche der Knetlegierung EN AW-6082 liegen zur Anlieferung im Zustand T4 vor. Im Gegensatz zur naturharten Legierung EN AW-5182, wird für die 6xxx-Legierung eine Wärmebehandlung W185 (185 °C, 20 min) in Anlehnung an die Empfehlung VDA239-300 durchgeführt.

Alle schergeschnittenen Proben der Legierung AA6082 werden dieser Wärmebehandlung unterzogen. Anhand der polierten und laserstrahlgeschnittenen ungekerbten Proben, sowie einer Stichprobe des Referenzschnitts (Schneiden 1) wird der Einfluss der Wärmebehandlung auf das Schwingfestigkeitsverhalten untersucht.

Wie Abbildung 13-40 zeigt, wirkt sich die Wärmebehandlung W185 kaum auf das Schwingfestigkeitsverhalten der polierten Proben aus. Die Verläufe der beiden ermittelten Dehnungswöhlerlinien (mit und ohne W185) stimmen näherungsweise miteinander überein. Weiterhin

dargestellt ist der Einfluss für die laserstrahlgeschnittene Kante. Auch hier lässt sich kein signifikanter Einfluss feststellen. Die etwas geringere Lebensdauer im mittleren Bereich der Dehnungs-Wöhlerlinie wird statistischer Streuung zugesprochen, da die Lebensdauern im Bereich der hohen und niedrigen Dehnungsamplituden sehr gut übereinstimmend sind.

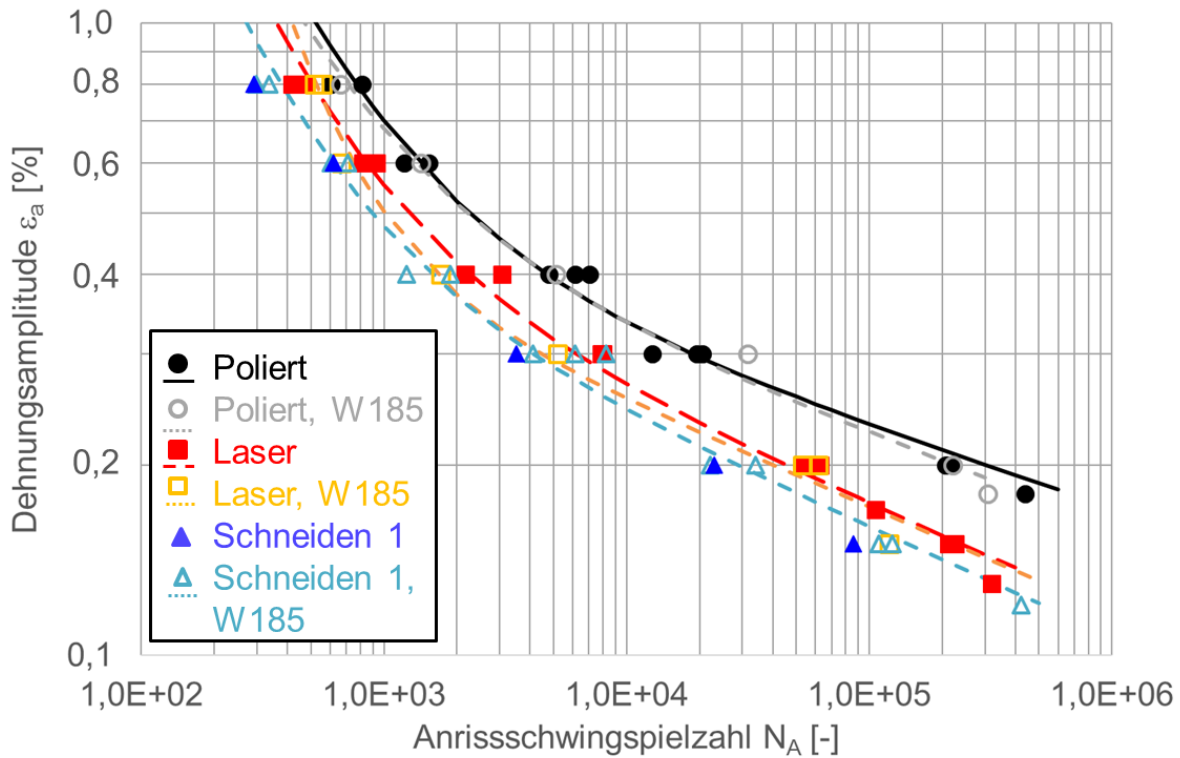


Abbildung 13-40: Einfluss Wärmebehandlung W185 auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA6082, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Abbildung 13-41 zeigt den Einfluss der Wärmebehandlung auf die Zeitfestigkeitsgerade der spannungsgeregelten Versuche. Es ist erkennbar, dass die Lebensdauer der ausgelagerten Variante gegenüber dem Anlieferungszustand (T4) etwas verringert ist. Die gegenläufige Tendenz lässt sich für die Stichprobe der schergeschnittenen Proben (Schneiden 1) erkennen, vergleiche Abbildung 13-40. Die nicht wärmebehandelten Versuchspunkte stimmen näherungsweise gut mit denen der Versuchsreihe mit W185 überein, liegen jedoch auf allen betrachteten Horizonten am linken Ende des Streubereichs. Eine sinnvolle Dehnungs-Wöhlerlinie lässt sich aufgrund der zu geringen Anzahl an Versuchspunkten nicht auswerten.

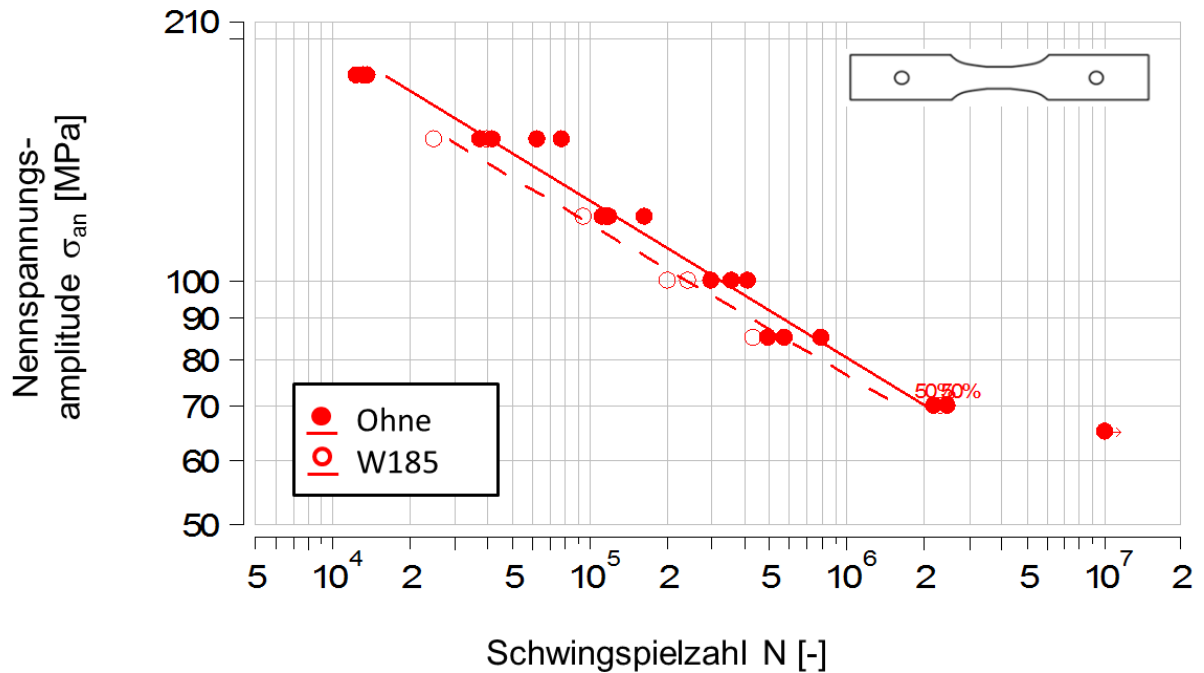


Abbildung 13-41: Wöhler-Diagramm Einfluss Wärmebehandlung W185, AA6082, $K_T = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Da diese Untersuchung keinen signifikanten Einfluss einer Wärmebehandlung W185 auf das Schwingfestigkeitsverhalten feststellen konnte, wurde für die polierten und laserstrahlgeschnittenen Proben im weiteren Versuchsablauf auf eine Wärmebehandlung verzichtet.

Für den nicht vorhandenen Einfluss kommen zwei mögliche Erklärungen in Frage. Zum einen ist es denkbar, dass die Temperatur und Auslagerungsdauer der Wärmebehandlung W185 (185 °C, 20 min) nicht ausreichen, um einen signifikanten Einfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten der Knetlegierung EN AW-6082 auszuüben. Zum anderen lagerten die Bleche im Zustand T4 vor der Weiterverarbeitung und Untersuchung über einen längeren Zeitraum bei Raumtemperatur. Demnach können Aushärtungsvorgänge bei Raumtemperatur während der Lagerzeit nicht ausgeschlossen werden. Der Werkstoff könnte bereits überaltert sein.

Speziell der nicht vorhandene Einfluss der Wärmebehandlung bei den polierten Kanten unterstützt die beiden zuvor getroffenen Annahmen. Für die laserstrahl- und schergeschnittenen Kanten zeigt sich ebenfalls kaum ein Einfluss durch die Wärmebehandlung.

13.3 Dehnungsgeregelte Versuche

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der dehnungsgeregelten Versuche diskutiert. Alle nachfolgend angegebenen zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, sowie die im Anhang geführten Werte der Kennwerte K' und n' beziehen sich dabei auf die separat durchgeführte Regression der Versuchspunkte. Dies kann anhand von Abbildung 13-42 erläutert werden. Hierin

dargestellt sind die Versuchspunkte der schergeschnittenen Proben der Legierung AA5182 zusammen mit einer separaten experimentellen Auswertung, sowie der nach Kompatibilität bestimmten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve.

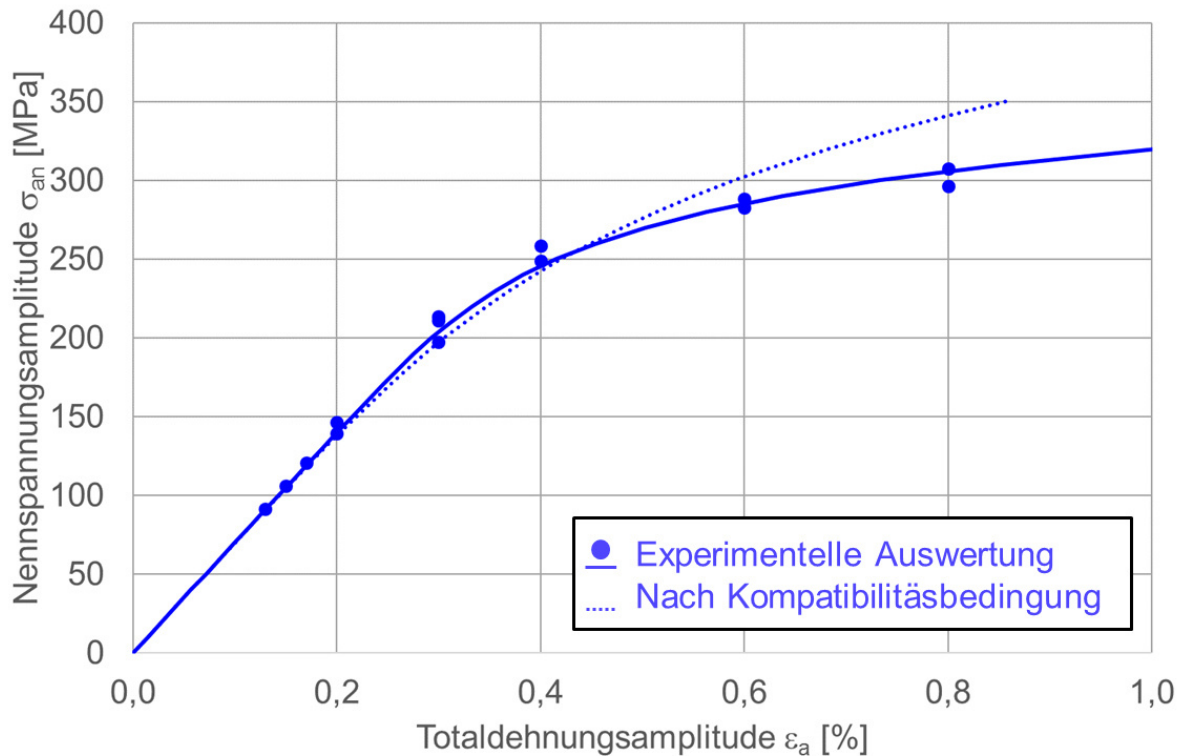


Abbildung 13-42: Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Kompatibilitätsbedingung und aus experimenteller Auswertung, AA5182 Schneiden 1

Es ist ersichtlich, dass die nach der Kompatibilitätsbedingung bestimmte Kurve die Versuchspunkte bei höheren Dehnungsamplituden nicht gut annähert. Dies ist mutmaßlich auf den Einfluss der Randschicht zurückzuführen. Während der Einfluss auf die Lebensdauer (Dehnungs-Wöhlerlinie) stark ausfallen kann, ist die dünne Randschicht für das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der gesamten Probe vernachlässigbar. Der Grundwerkstoff in Probenmitte dominiert das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der gesamten Probe. Demnach unterscheiden sich die beiden ausgewerteten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, da über die Kompatibilitätsbeziehung der Kanteneinfluss von der Dehnungs-Wöhlerlinie übertragen wird. Eine Beschreibung der dünnen Randschicht findet sich beispielsweise in (Haibach, 2006)

13.3.1 Kanteneinfluss

Durch die experimentelle Auswertung und die Begründung, dass der Randschichteinfluss auf das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten vernachlässigbar ausfällt, erklären sich auch die Ergebnisse in Abbildung 13-43 und Abbildung 13-45.

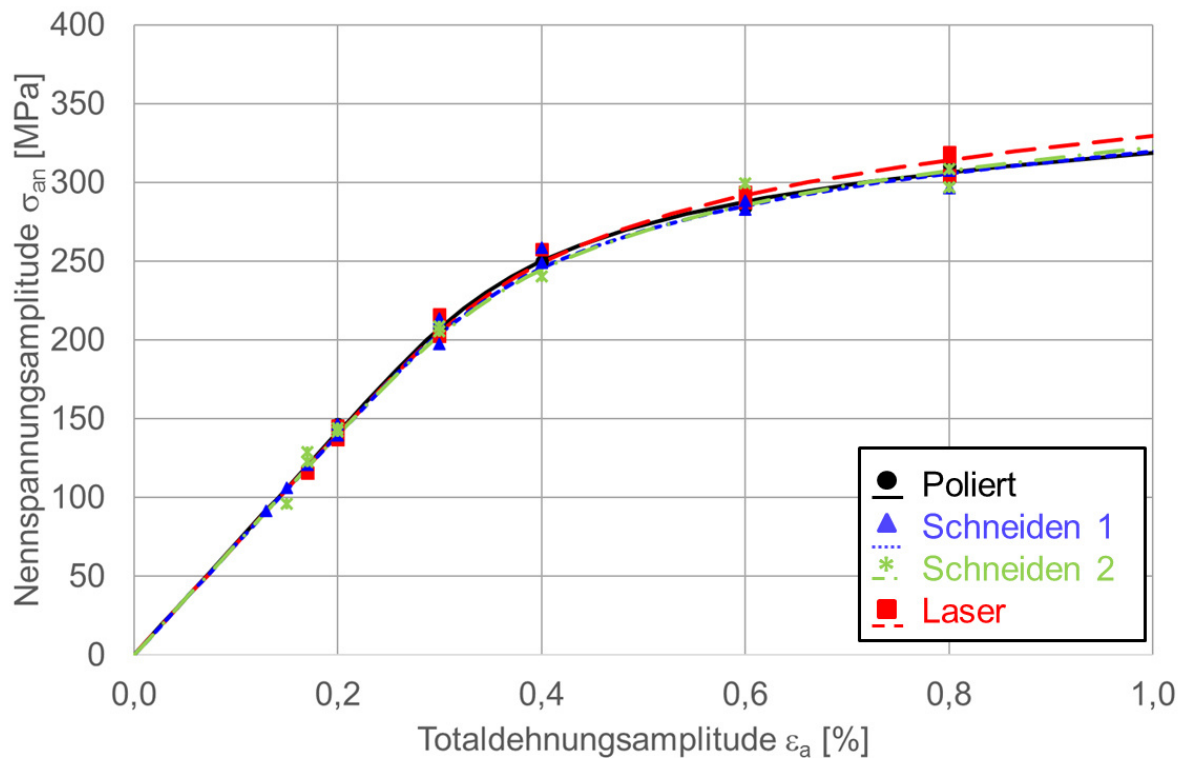


Abbildung 13-43: Kanteneinfluss auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (nicht nach Kompatibilität), AA5182, $R = -1$

Für beide Legierungen ist kein ausgeprägter Kanteneinfluss auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve erkennbar. Die etwas stärker ausfallenden Unterschiede bei der Legierung AA6082 sind dabei jedoch tatsächlich auf den Kanteneinfluss und die Auswertemethodik zurückzuführen. Dies zeigt sich anhand der Abbildung 13-48. Es ist ersichtlich, dass sich das Verfestigungsverhalten der dargestellten Kantenzustände poliert, laserstrahl- und scherge-schnitten bei gleicher Dehnungsamplitude quasi nicht unterscheidet. Auch hier dominiert der Grundwerkstoff in Probenmitte die dünne Randschicht. Bedingt durch den Kanteneinfluss unterscheiden sich jedoch die Anrisschwingspielzahlen. Durch die definitionsgemäße Auswertung der Spannungsamplitude bei halber Anrisschwingspielzahl unterscheiden sich die Werte demnach, da bei unterschiedlichen Verfestigungszuständen bzw. -zeitpunkten ausgewertet wird.

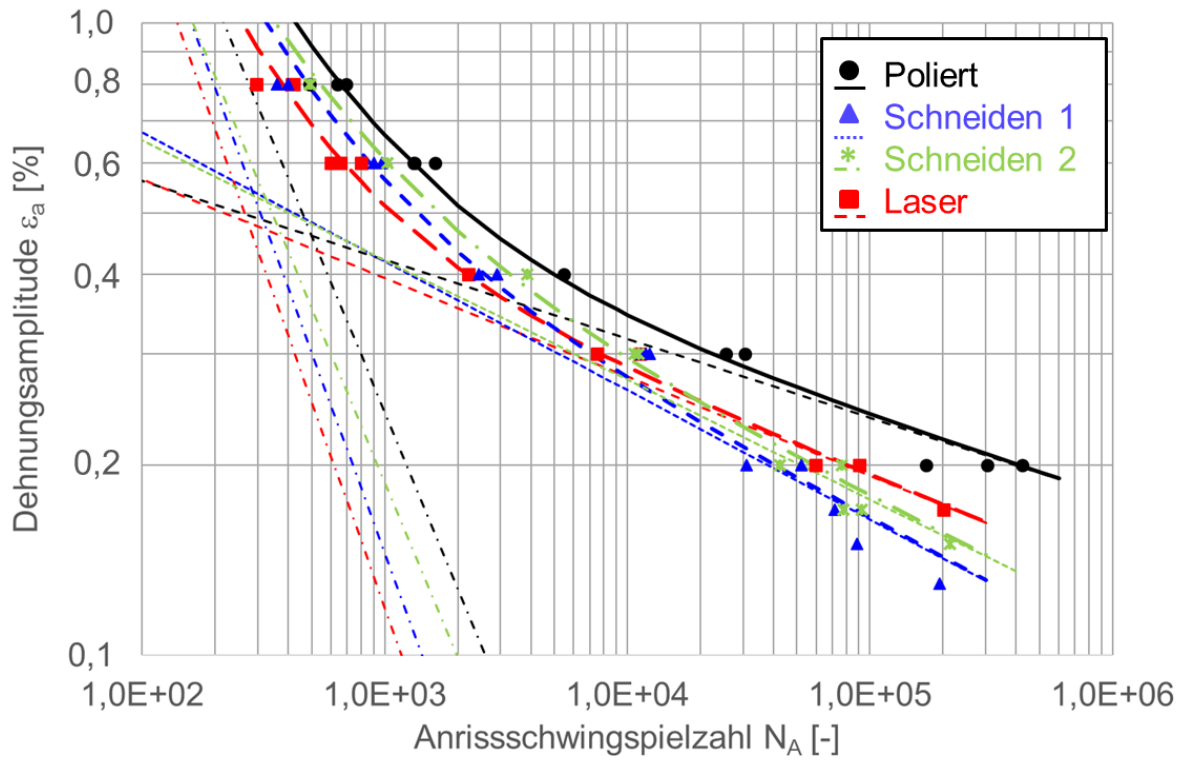


Abbildung 13-44: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA5182, $R = -1$, $P_A = 50\%$

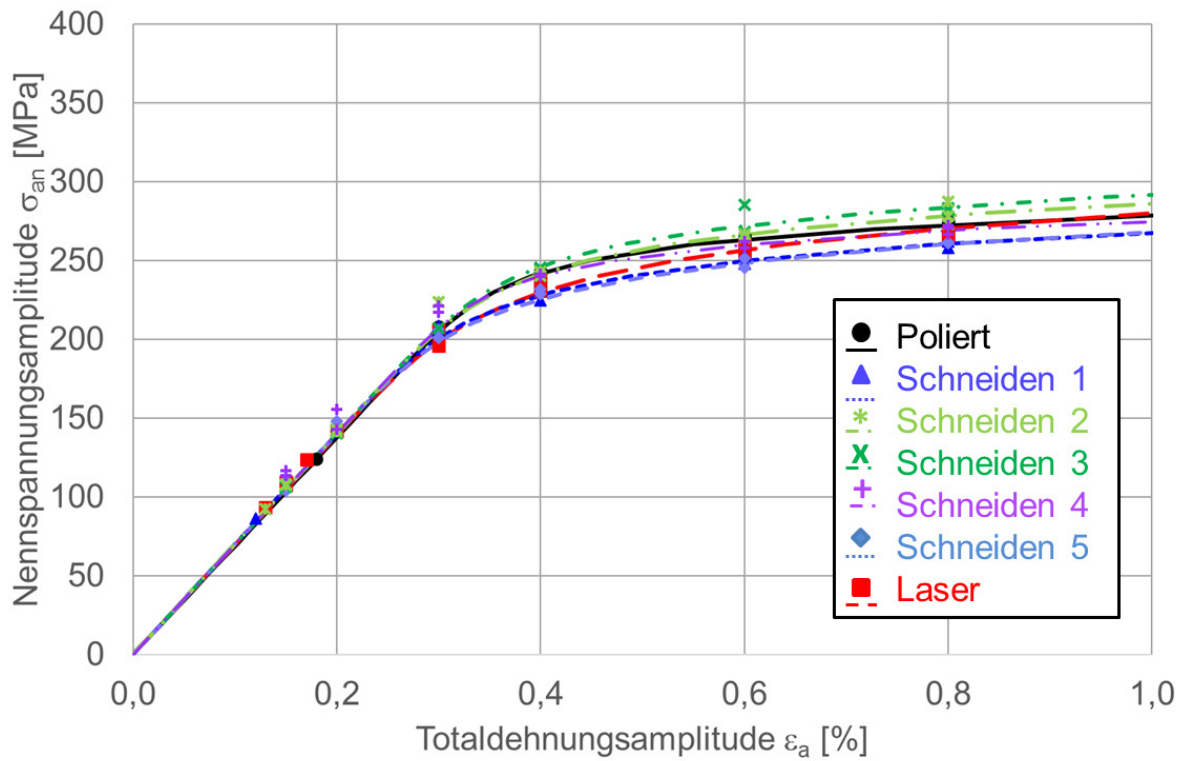


Abbildung 13-45: Kanteneinfluss auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (nicht nach Kompatibilität), AA6082, $R = -1$

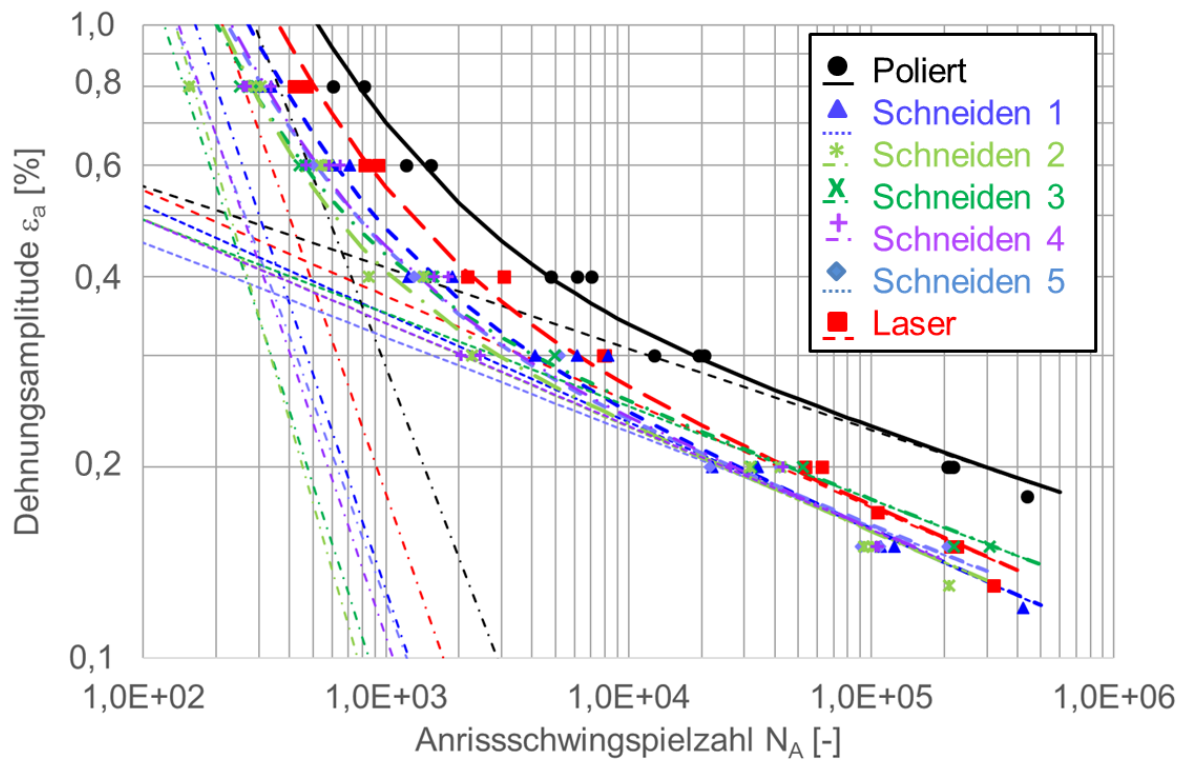


Abbildung 13-46: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA6082, $R = -1$, $P_A = 50$ %

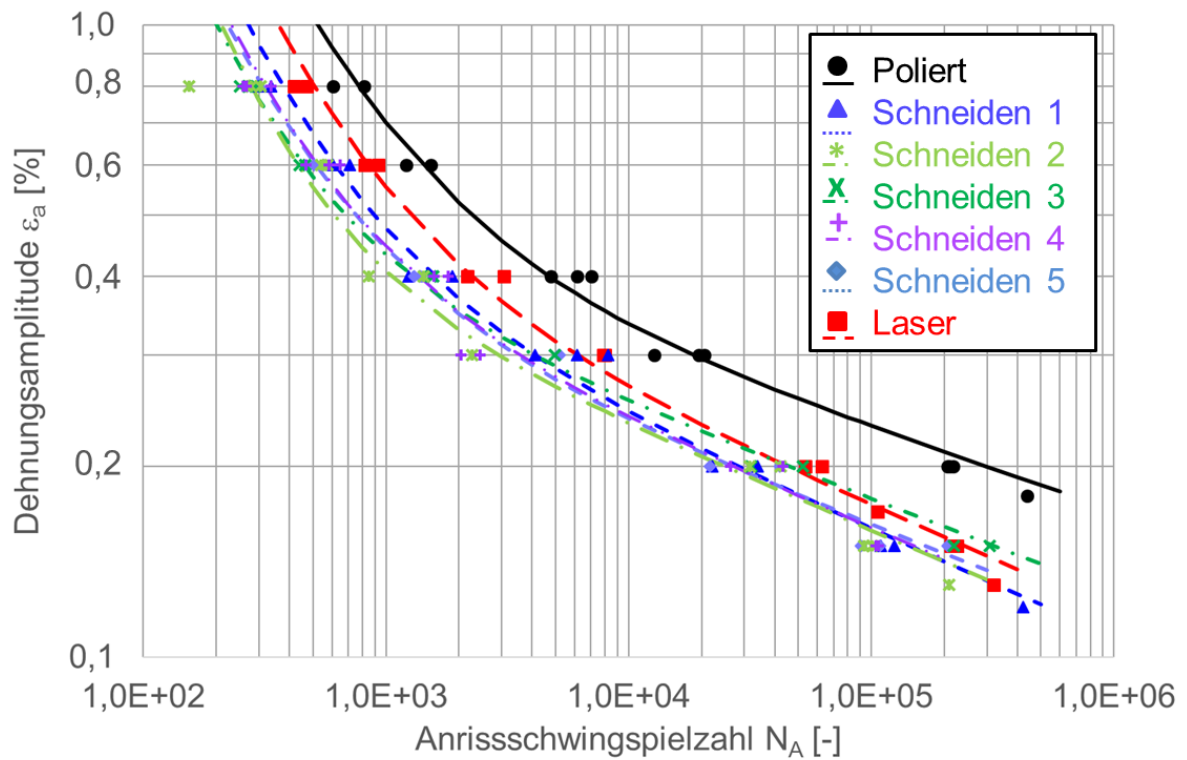


Abbildung 13-47: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA6082, $R = -1$, $P_A = 50$ %, ohne elastische und plastische Gerade

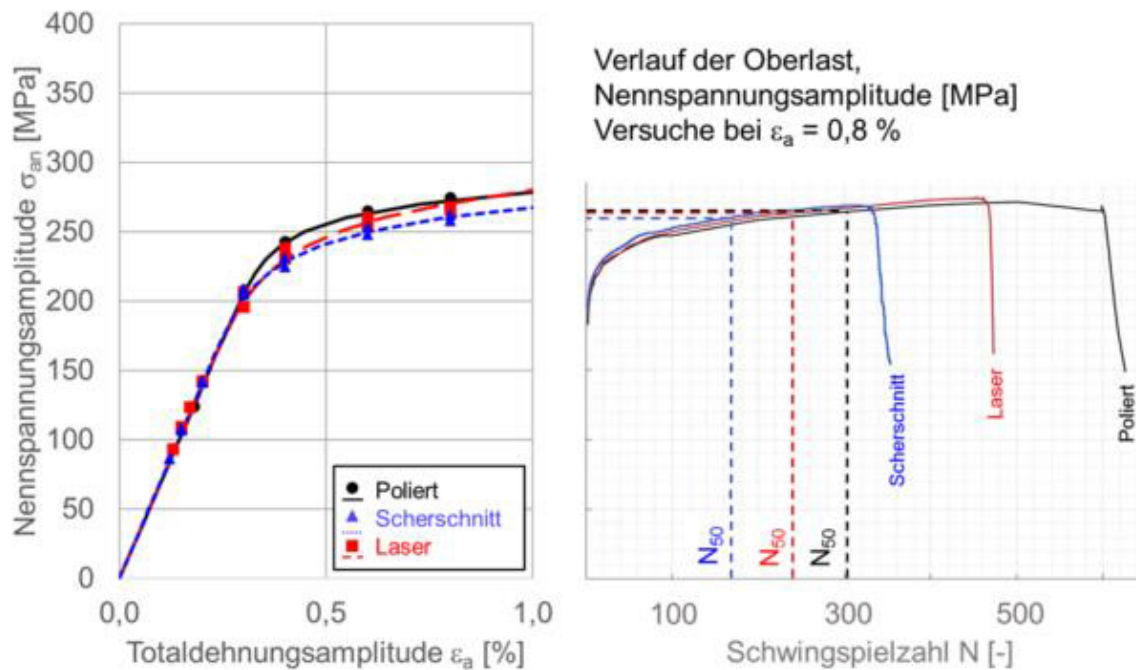


Abbildung 13-48: Einfluss des Kantenzustands auf die Versagenschwingspielzahl sowie die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve, (Thum und Häfele, 2019)

Für die Dehnungs-Wöhlerlinien ist im Vergleich zu den zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven für beide Legierungen ein klarer Kanteneinfluss erkennbar. Die höchste Beanspruchbarkeit weist erwartungsgemäß der polierte Zustand auf. Die laserstrahl- und schergeschnittenen Proben zeigen demgegenüber einen Abfall des Schwingfestigkeitsverhaltens. Tendenziell liegt dabei die Lebensdauer der laserstrahlgeschnittenen Variante oberhalb der schergeschnittenen Varianten, die ermittelten Rauheitswerte sind jedoch vergleichbar. Für die Legierung AA5182, Abbildung 13-44, liegen die beiden untersuchten Scherschneidvarianten (Schneiden 1 und 2) im dominant plastischen Bereich der Dehnungs-Wöhlerlinie oberhalb jener des laserstrahlgeschnittenen Zustands. Hierzu sei angemerkt, dass der untersuchte laserstrahlgeschnittene Zustand kein globales Optimum darstellt, d. h. durch eine mit viel Erfahrungswerten verbundene zeitaufwändige Parameteroptimierung wären bessere Resultate erzielbar.

Für die Legierung AA6082 fällt das unerwartet schlechte Abschneiden der Schneidvariante 2 auf, vergleiche Abbildung 13-46 und Abbildung 13-47. Begründet wird dies mit dem Auftreten eines Sekundärglattschnitts innerhalb der Schneidkante. Der nachstehende Werkstoffvergleich gibt entsprechende Hinweise hierfür. Ansonsten unterscheiden sich die unterschiedlichen Schneidstrategien Schneiden 1 bis Schneiden 5 in ihrem Schwingfestigkeitsverhalten nur unwesentlich voneinander. Lediglich der Anstieg der Beanspruchbarkeit im elastischen Bereich der Variante Schneiden 3 fällt auf, wohingegen die zugehörige Dehnungs-Wöhlerlinie im Bereich der oberen Lasthorizonte im Vergleich mit den anderen Scherschneidvarianten mit am

schlechtesten abschneidet. Eine nähere Erklärung hierfür kann nicht gefunden werden, da unklar ist, inwiefern die für Schneiden 3 provozierten Kaltaufschweißungen konstant vorlagen und das Schwingfestigkeitsverhalten somit in gleicher Weise beeinflussen.

13.3.2 Werkstoffvergleich

Wie durch Abbildung 13-49 bis Abbildung 13-52 gezeigt wird, liegt die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve der Legierung AA5182 für die Kantenzustände poliert, laserstrahl- und schergeschnitten (Schneiden 1 und 2) konstant oberhalb derer der Legierung AA6082. Dies ist auf die höhere Grundwerkstofffestigkeit der Legierung AA5182 zurück zu führen.

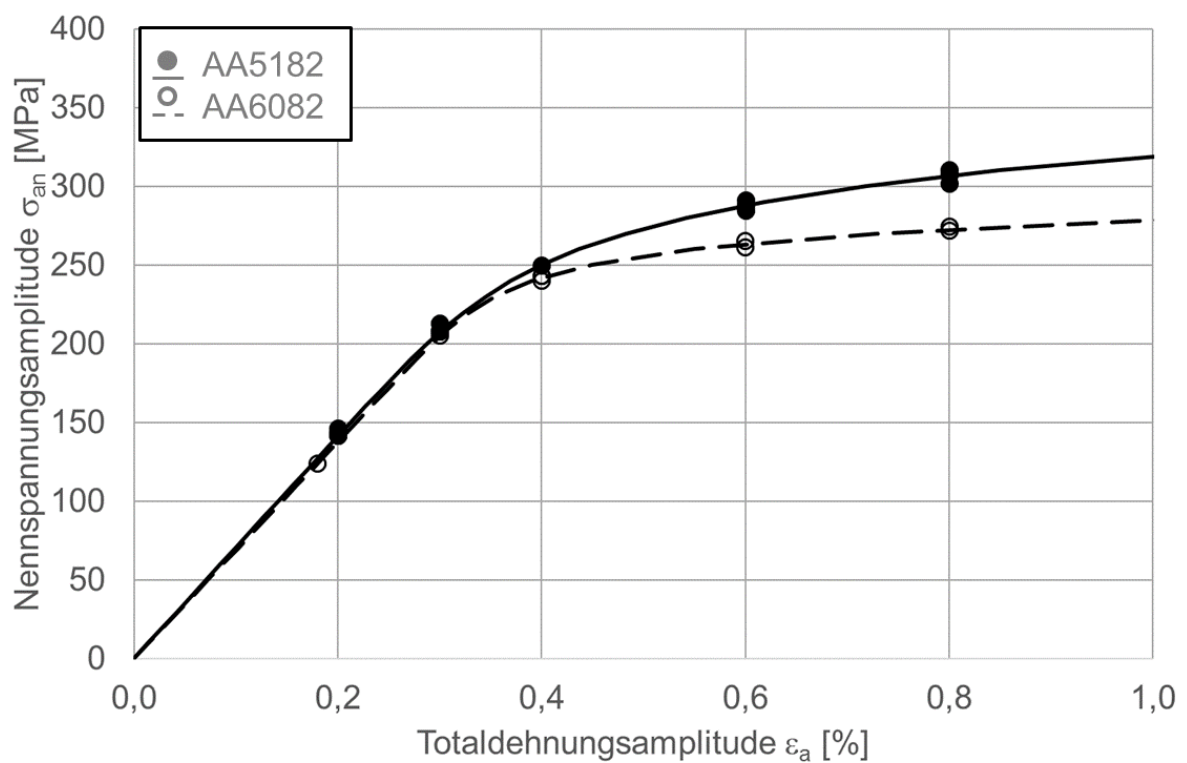


Abbildung 13-49: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, poliert

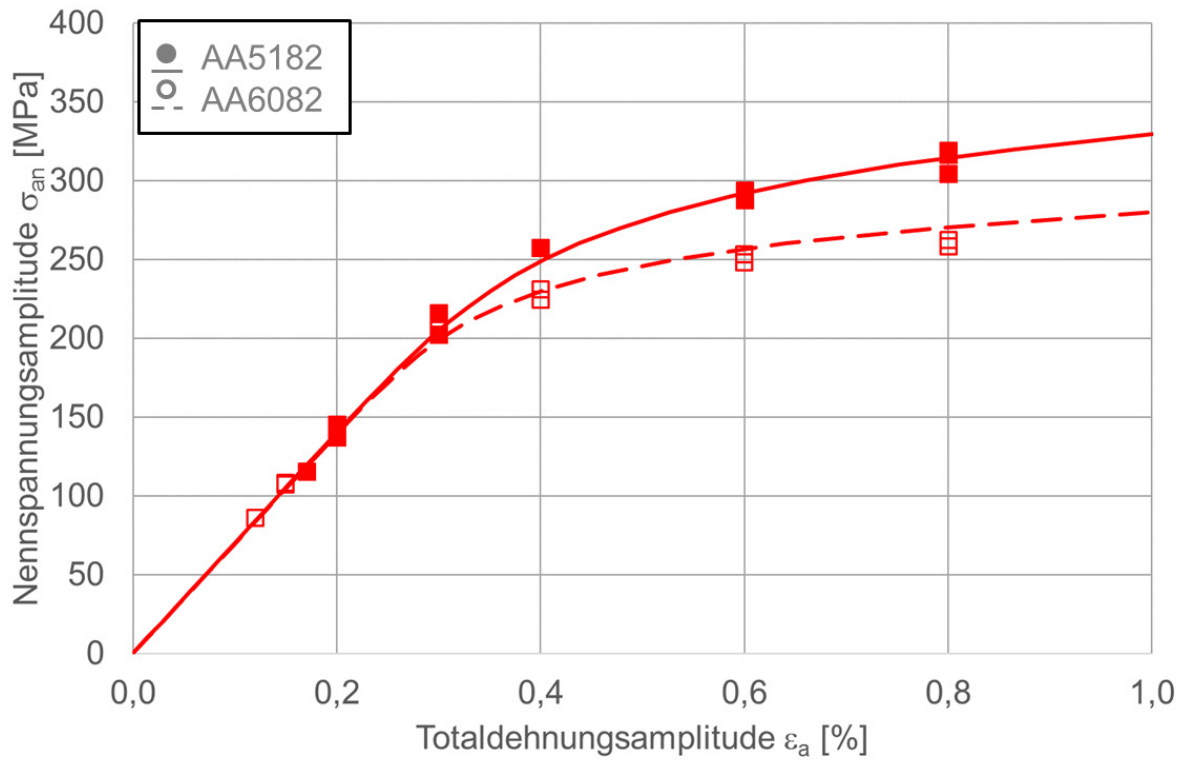


Abbildung 13-50: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, laserstrahlgeschnitten

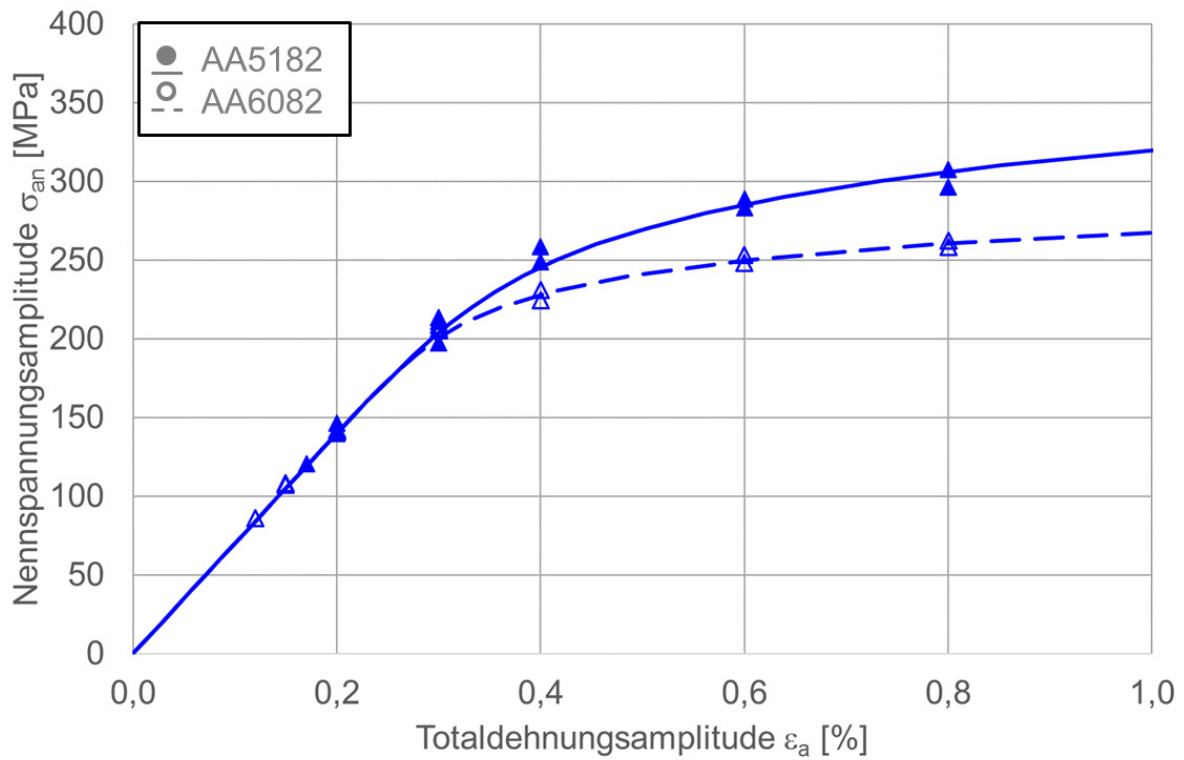


Abbildung 13-51: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Schneiden I

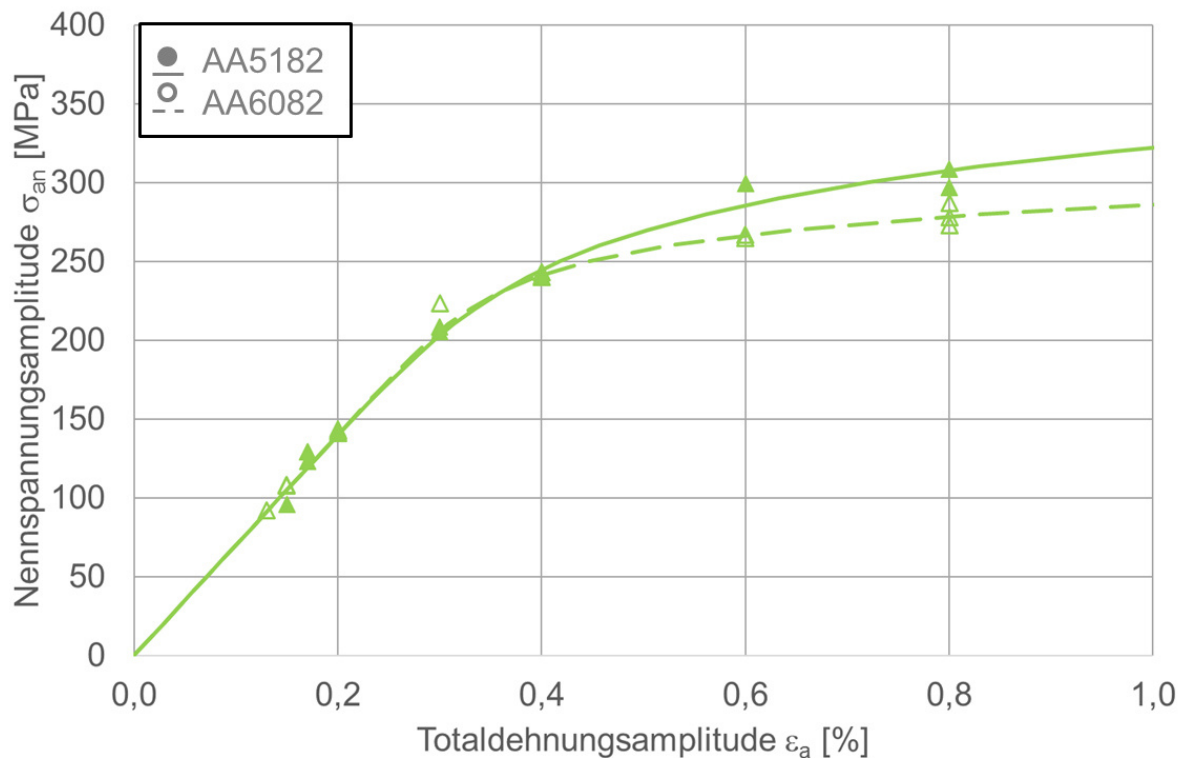


Abbildung 13-52: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Schneiden 2

Wie Abbildung 13-53 zeigt, weisen die beiden untersuchten Al-Knetlegierungen (AA5182 und AA6082) im polierten Zustand ein sehr vergleichbares Schwingfestigkeitsverhalten auf. Die Unterschiede zwischen den beiden ermittelten Dehnungs-Wöhlerlinien sind vernachlässigbar gering.

Für die laserstrahlgeschnittene Variante fällt der Unterschied deutlich größer aus, als für die polierte Kante, wenngleich er auch hier nicht signifikant ist, vergleiche Abbildung 13-54. Im dominant elastischen Bereich weist die Legierung AA5182 die höhere zyklische Beanspruchbarkeit auf. Dies ist möglicherweise auf die in Verbindung mit der festgestellten Aufhärtung gesteigerte Festigkeit zurück zu führen. Im dominant plastischen Bereich erweist sich dagegen die Legierung AA6082 als belastbarer. Die Lebensdauer ist etwas höher, als für die 5xxx-Variante. Im Umkehrschluss zum elastischen Bereich kann dies vermutlich auf die höhere (Rest)Duktilität der Legierung AA6082 zurückgeführt werden.

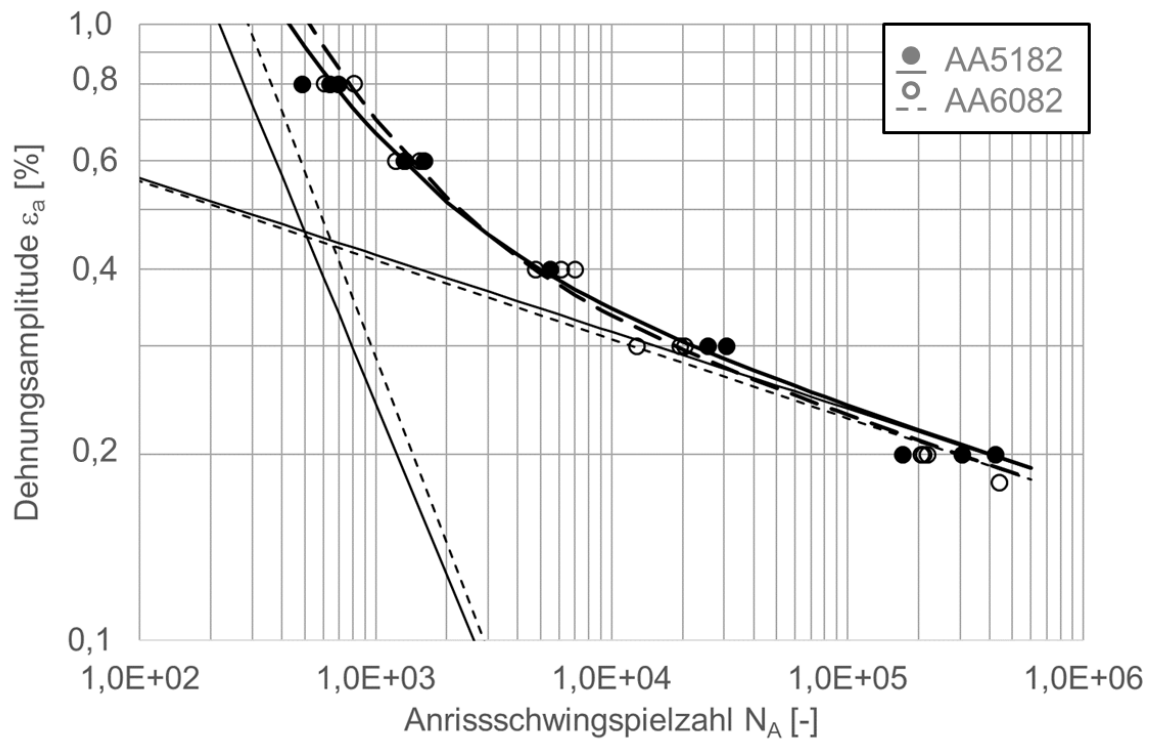


Abbildung 13-53: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$

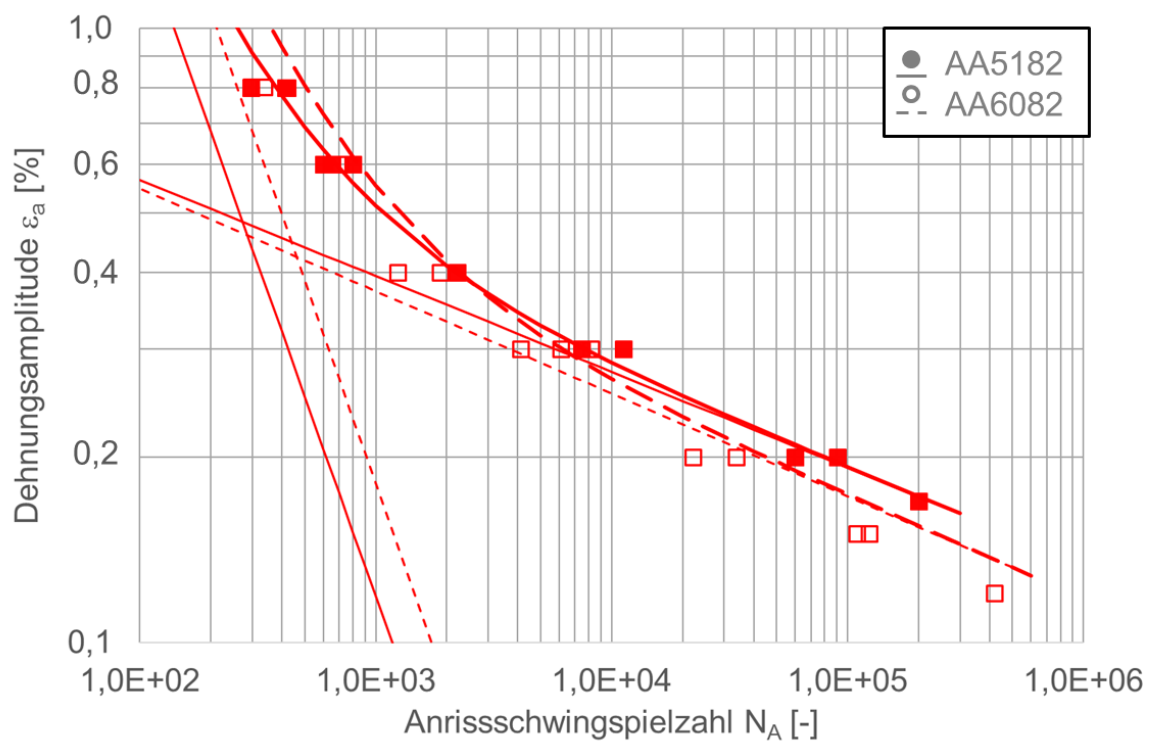


Abbildung 13-54: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, laserstrahlgeschnitten, $R = -1$, $P_A = 50\%$

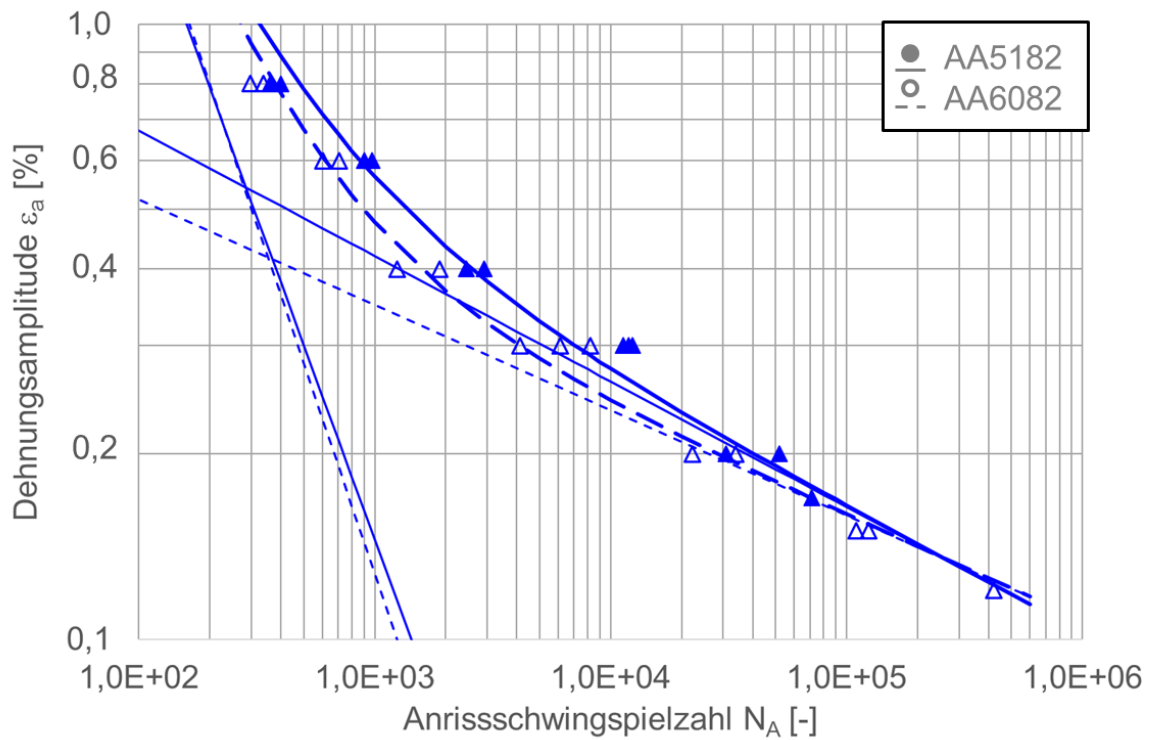


Abbildung 13-55: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, Schneiden 1, $R = -1$, $P_A = 50$ %

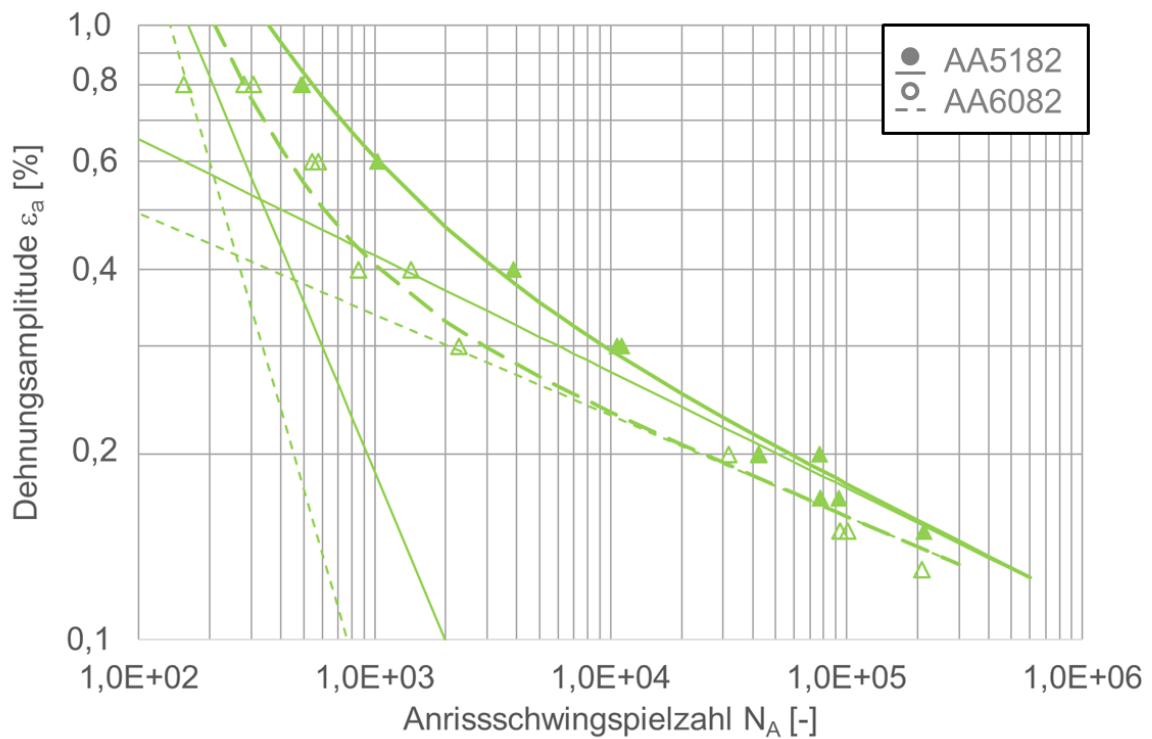


Abbildung 13-56: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, Schneiden 2, $R = -1$, $P_A = 50$ %

Wie Abbildung 13-55 zeigt, ist das Schwingfestigkeitsverhalten der beiden Legierungen im elastischen Bereich für die Variante Schneiden 1 wiederum vergleichbar. Mit höheren Dehnungsamplituden zeigt die 5xxx-Legierung gegenüber der 6xxx-Legierung erneut ein leicht verbessertes Schwingfestigkeitsverhalten. Die Lebensdauerzunahme liegt aber unterhalb einem Faktor von zwei. Deutlicher fällt der Unterschied für die Schneidvariante Schneiden 2 aus, vergleiche Abbildung 13-56. Hier beträgt der maximale Unterschied der Lebensdauer etwa einen Faktor von vier. Die erreichbare Lebensdauer der Legierung AA5182 ist über den gesamten untersuchten Bereich der Dehnungsamplitude deutlich größer, als für die Legierung AA6082.

Mit der Erkenntnis, dass sich die beiden Werkstoffe für die übrigen Kantenzustände sehr ähnlich verhalten, kann geschlossen werden, dass der Unterschied für Schneiden 2 auf den auftretenden Sekundärglattschnitt zurück zu führen ist. Dieser verschlechtert das Schwingfestigkeitsverhalten der Legierung AA6082 signifikant. Durch den scharfen Übergang zwischen Sekundärglattschnitt und Bruchbereich ist von einer hohen lokalen Mikrokerbwirkung auszugehen, die die Rissinitiierung begünstigt. Für schergeschnittene Kanten tritt der Anrissbeginn i. d. R. im Bruchbereich auf.

Dieses Beispiel zeigt, dass die materialbezogene Anpassung der Schneidparameter aus Sicht der Betriebsfestigkeit erforderlich ist. Beide Bleche wurden, bei gleicher Dicke, für alle Schneidvarianten mit identischen Parametern gefertigt. Für die dargestellten Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und Schneiden 1 wirkt sich der Einfluss des Werkstoffes nur gering auf die Schwingfestigkeit aus. Für die Variante Schneiden 2 fällt er dagegen signifikant aus.

Aus Sicht der Betriebsfestigkeit ist ein Sekundärglattschnitt demnach möglichst durch geeignete Anpassung der Scherschneidparameter zu vermeiden.

13.3.3 Einfluss Sekundärglattschnitt

Das Beispiel aus Abbildung 13-56 zeigt, dass ein auftretender Sekundärglattschnitt das Schwingfestigkeitsverhalten negativ beeinflussen kann. Diese Aussage lässt sich mit Hinblick auf die durch Abbildung 13-57 gezeigten Ergebnisse jedoch nicht generalisieren.

Bei der Legierung AA5182 konnte für das zweistufige Schneidverfahren Schneiden 4 (auch Schneiden 4a) ebenfalls Sekundärglattschnitt festgestellt werden. Daraufhin wurden die Schneidparameter angepasst, dies resultiert in der hier als Schneiden 4+ (auch Schneiden 4b) bezeichneten Variante. Wie aus Abbildung 13-57 hervorgeht, ist kein Unterschied im Schwingfestigkeitsverhalten der Varianten Schneiden 4 und Schneiden 4+ erkennbar. Hieraus kann gefolgert werden, dass sich der Einfluss eines Sekundärglattschnitts für diese Legierung und die verwendeten Parameter nicht auswirkt. Obwohl die ermittelten zyklischen Kennwerte für sich

genommen nicht vergleichbar sind, fallen die daraus berechneten Dehnungs-Wöhlerlinien nahezu deckungsgleich aus.

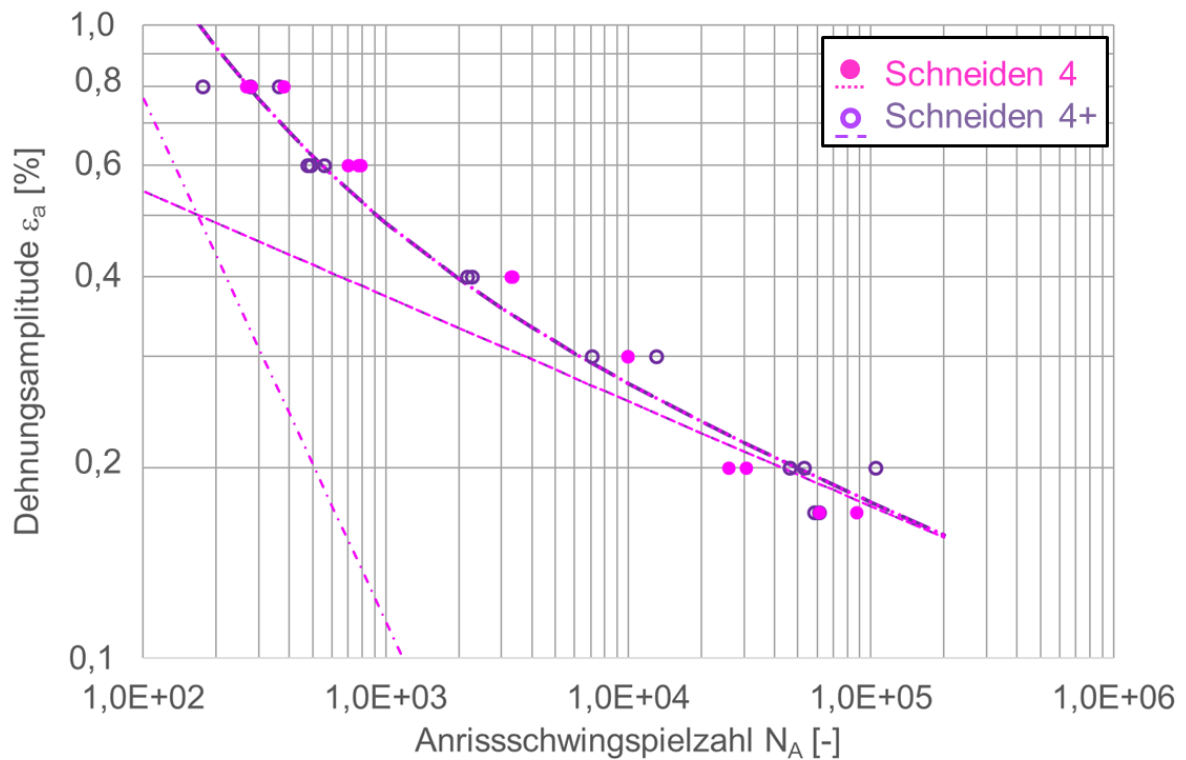


Abbildung 13-57: Vergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien AA5182 Schneiden 4 und Schneiden 4+, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Wird die Dehnungs-Wöhlerlinien der Variante Schneiden 4 mit den übrigen ermittelten Dehnungs-Wöhlerlinien der Legierung AA5182 verglichen, so fällt v. a. der Abfall im Bereich hoher plastischer Dehnungsamplituden auf, vergleiche Abbildung 13-58. Erkennbar ist dies an der Dehnungs-Wöhlerlinie selbst, sowie auch an der plastischen Geraden und dem Transition Point. Letzterer ist der Schnittpunkt der elastischen und plastischen Geraden und dient auch als Maß für die Duktilität eines Werkstoffes. Liegt der Schnittpunkt bei kleinerer Schwingspielzahl, so ist dies ein Anzeichen für eine geringere Duktilität. Dieser Einfluss ist wahrscheinlich auf die höheren plastischen Umformungen infolge des mehrstufigen Schneidprozesses zurück zu führen. Im Bereich der dominant elastischen Dehnungsamplituden ist das Schwingfestigkeitsverhalten der Varianten Schneiden 4 und Schneiden 4+ vergleichbar mit dem der Varianten Schneiden 1 und 2. Die elastischen Geraden sind vergleichbar.

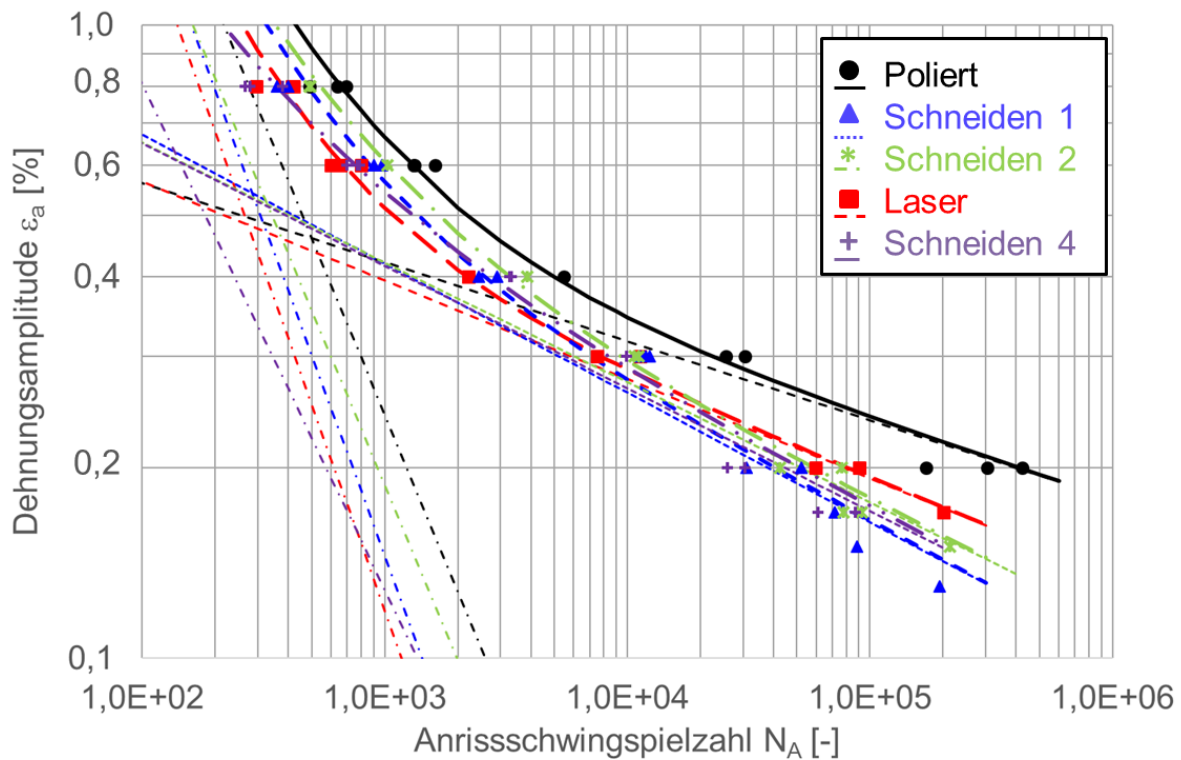


Abbildung 13-58: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA5182, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Dies geht auch nochmals aus Tabelle 13-7 hervor. Diese stellt die für $N = 20.000$ und $N = 200.000$ ausgewerteten Kanteneinflussfaktoren gegenüber. Hierfür wird bei der jeweiligen Schwingspielzahl der Quotient aus der Gesamtdehnungsamplitude des polierten Zustands mit der der Schneidkanten gebildet. Es ist erkennbar, dass sich die Faktoren zwischen den beiden Legierungen kaum voneinander unterscheiden, die Kantenzustände Schneiden 2 und 4 aufgrund des Sekundärglattschnitts nicht mit einbezogen. Zusätzlich ist ersichtlich, dass der Kanteneinfluss bei $N = 200.000$ Schwingspielen stärker ausfällt, als bei $N = 20.000$. Die Faktoren sind kleiner. Dies belegt eine Lastabhängigkeit des Kanteneinflusses. Er ist mit zunehmendem plastischen Anteil der Dehnungsamplitude geringer.

Eine grafische Gegenüberstellung der Faktoren ist durch Abbildung 13-59 gegeben. Diese verdeutlicht nochmals den größtenteils vergleichbaren Kanteneinfluss im Werkstoffvergleich.

Tabelle 13-7: Zusammenfassung der ausgewerteten Kanteneinflussfaktoren der dehnungsgeregelten Versuche

Zusammenfassung Kanteneinflussfaktoren dehnungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuch			
Werkstoff	Kantenbearbeitung	Kanteneinflussfaktor bei N=2e4	Kanteneinflussfaktor bei N=2e5
		$\epsilon_{a,\text{poliert},N=2e4} / \epsilon_{a,\text{Schneidkante},N=2e4} [-]$	$\epsilon_{a,\text{poliert},N=2e5} / \epsilon_{a,\text{Schneidkante},N=2e5} [-]$
AA5182	poliert	Referenz	
	Schneiden 1	0,76	0,65
	Schneiden 2	0,82	0,70
	Schneiden 4	0,80	0,68
	Schneiden	0,77	0,71
	Laser	0,82	0,78
AA6082	poliert	Referenz	
	Schneiden 1	0,73	0,68
	Schneiden 2	0,71	0,68
	Schneiden 3	0,78	0,77
	Schneiden 4	0,72	0,69
	Schneiden 5	0,72	0,70
	Laser	0,82	0,79

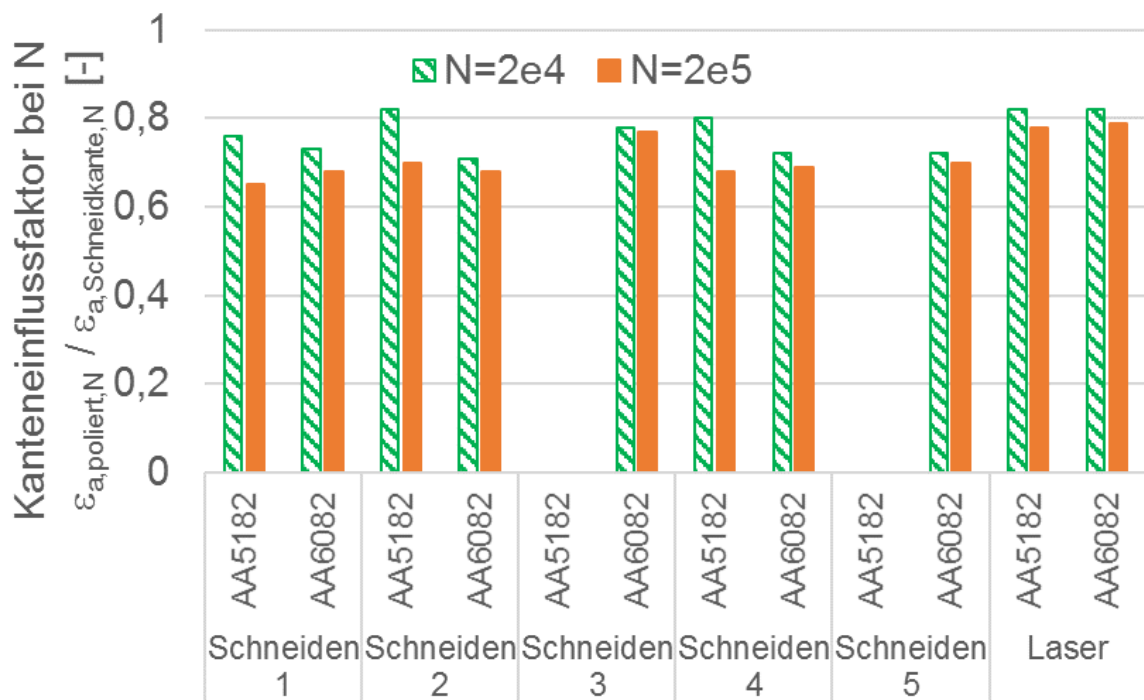


Abbildung 13-59: Gegenüberstellung der Kanteneinflussfaktoren abhängig von Kantenzustand und Werkstoff

13.4 Fraktographie

Die vorangegangenen Auswertungen zum Kanteneinfluss ließen zunächst außer Acht, ob das Versagen, d. h. die Anrissinitiierung, tatsächlich von der Probenkante ausgeht. Dies soll durch die nachfolgende Untersuchung der Schwingbruchflächen nachgeholt werden. Hierfür werden die Bruchflächen aller gültig geprüften Schwingproben mikroskopisch betrachtet und der Anrissort wird, sofern möglich, festgehalten. Aufgrund der größtenteils rein wechselnd ($R = -1$) durchgeführten Versuche, ist bei einem Teil der Schwingbruchflächen eine exakte Feststellung des Anrissortes nicht mehr möglich. Die Rissflanken sind durch das Schließen infolge der Wechselbeanspruchung teils zu stark beschädigt, um den Anrissort definitiv erkennen zu können.

Im Zusammenhang mit der Rissausgangsstelle interessiert auch der dort vorliegende Zustand in Form von Aufhärtung und Rauheit. Die Schwingproben wurden mit anderen Werkzeugen hergestellt, als die EFTT-Proben. Deshalb müssen an diesen separat Rauheits- und Härtemessungen durchgeführt werden. Ein Abgleich zeigt jedoch, dass die vorgestellten Ergebnisse der Versuche zu den Umformkantenrissen übernommen werden können. Die Werte der Schwingproben weichen nur im Rahmen der statistischen Streuung von diesen ab. Deshalb wird auf eine erneute Anführung der Ergebnisse verzichtet. Einzige Ausnahme hiervon stellt die Rauheitsmessung der laserstrahlgeschnittenen Proben dar. Für die EFTT-Proben wurden Rauheitswerte von $R_z = 50 \mu\text{m}$ bzw. $R_z = 50 \mu\text{m}$ für die Legierungen AA5182 bzw. AA6082 ermittelt. Für die ungekerbten Schwingproben wurden Rauheitswerte im Bereich $R_z = 30 \dots 40 \mu\text{m}$ gemessen. Für die Schwingproben ist die gemittelte Rauhtiefe der Schneidkante also etwas geringer, als für die EFTT-Proben und liegt auf einem mit den schergeschnittenen Proben vergleichbaren Niveau (bezogen auf Rauheit der Bruchfläche). Eine mögliche Erklärung hierfür besteht in der Probengeometrie. Der parallele Prüfbereich der EFTT-Proben ist länger, als der der Schwingprobe. Es ist wahrscheinlich, dass die Algorithmen des Lasers deshalb in diesem Bereich für die EFTT-Proben eine höhere Schnittgeschwindigkeit gewählt haben, welche sich in einer erhöhten Rauheit äußert. Der Vollständigkeit halber, seien auch noch die Rauheitswerte der polierten Kante angeführt. Die mittlere Rauhtiefe liegt unabhängig vom Werkstoff im Bereich $R_z = 1,5 \dots 3 \mu\text{m}$.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Schwingbruchversagen für die laserstrahlgeschnittenen Proben von der rauhen Schneidkante ausgeht. Für die schergeschnittenen Proben, unabhängig von der Wahl der Schneidparameter, häuft sich das Auftreten der Anrissstelle im Übergangsbereich zwischen Glattschnitt und Bruchfläche der Scherschneidkante, wobei der Riss immer im Bruchbereich der Kante liegt. Dies ist der Ort, an dem hohe Rauheitswerte und große Aufhärtungen infolge des Schneidprozesses auf einander treffen. Zudem

kommt an dieser Stelle das Auftreten eines Bruchflächenwinkels hinzu. Bei den polierten Kanten geht der Schwingungsriss in der Regel von der Walzoberfläche aus. Diese weist gemäß der Herstellung in Anlehnung an die Richtlinie VDA239-300 eine höhere Rauheit auf, als die polierte Kante. Bei einem Teil der polierten Proben lässt sich dennoch ein Anriss ausgehend von der Kantenfläche ausmachen. Dies ist vermutlich auf vereinzelt schlechtere Polierqualität zurück zu führen. Die Rauheitswerte der Walzoberfläche und der polierten Kante liegen mit $R_{z,Kante} = 1,5 \mu\text{m}$ und $R_{z,Walzoberfläche} = 3 \mu\text{m}$ (bspw. für AA5182) nicht weit auseinander. Ein Einfluss auf die Anrisschwingspielzahl konnte dabei jedoch nicht festgestellt werden, sodass beide Varianten als gültig betrachtet werden konnten. Abbildung 13-60 zeigt eine zusammenfassende schematische Darstellung der Anrissorte. Diese gelten für beide untersuchten Al-Knetlegierungen.



Abbildung 13-60: Schematische Darstellung der Anrissorte für (v. l.) polierte, schergeschnittene und laserstrahlgeschnittene Kante

Unabhängig vom Kantenbearbeitungszustand, konnte für beide Legierungen keine Abhängigkeit des Rissausgangsortes von der Höhe der Lastamplitude festgestellt werden. Der Anrissort verändert sich folglich nicht über der Last bzw. der erreichten Lebensdauer. Dies spiegelt sich auch in den ausgewerteten Dehnungs-Wöhlerlinien wider. Die Punkte aller belegten Dehnungsamplituden-Horizonte werden gut angenähert. Zum Vergleich, aus (Dittmann und Pätzold, 2018) ist bekannt, dass sich der Anrissort der laserstrahlgeschnittenen Kanten für einen Teil der dort betrachteten Stahlfeinbleche abhängig von der Last von der Kante an die Walzoberfläche verlagert hat. Hieraus resultierend, unterscheiden sich die Schädigungs- bzw. Rissbildungsmechanismen im LCF- und HCF-Bereich der Dehnungs-Wöhlerlinie (Trennung am Transition Point: Links liegt der LCF-, rechts der HCF-Bereich). Dies hat zur Folge, dass nicht alle Versuchspunkte gut durch die berechnete Dehnungs-Wöhlerlinie angenähert werden.

Durch Tabelle 13-8 ist eine Auswahl an mikroskopischen Aufnahmen der Bruchflächen der dehnungsgeregelten Versuche gegeben. Das Schädigungsverhalten der spannungsgeregelt geprüften ungekerbten Proben verhält sich analog dazu. Durch Abbildung 13-61 links wird die Ebene der betrachteten Bruchfläche verdeutlicht.

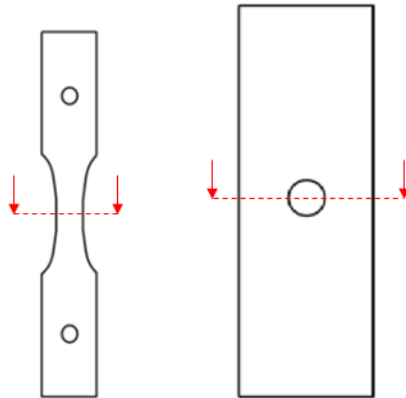
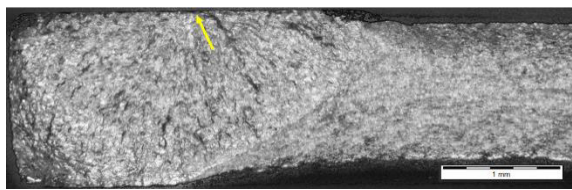
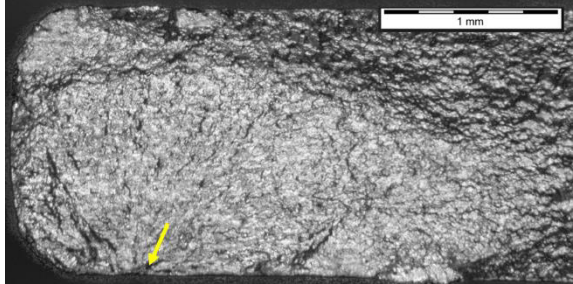
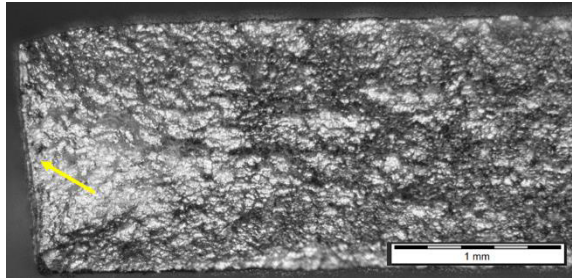
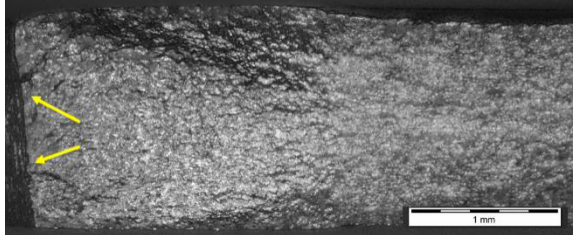
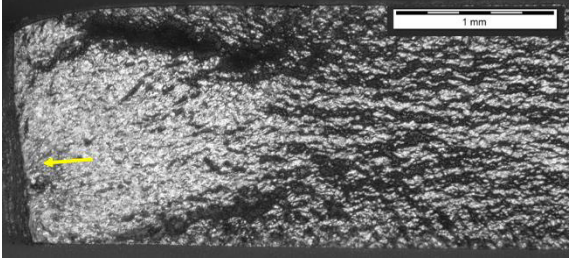
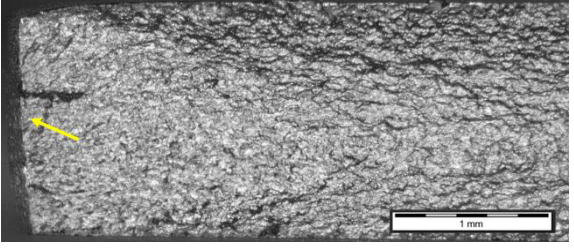
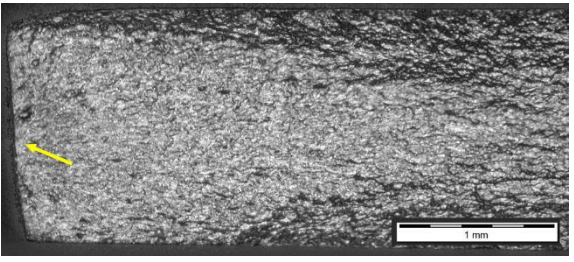
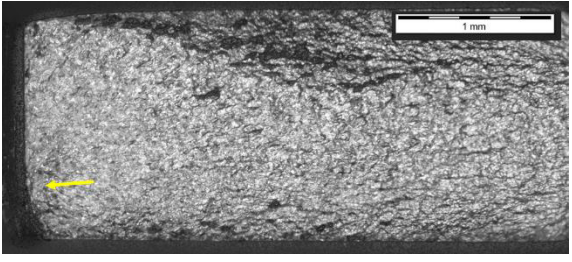
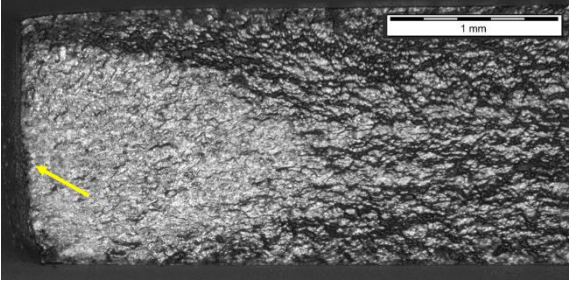
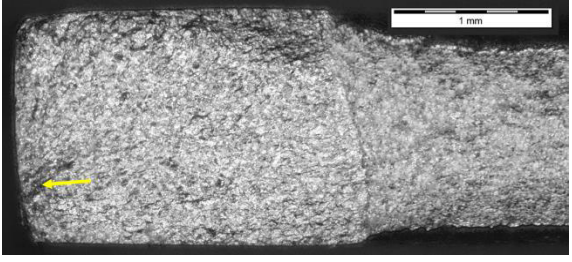
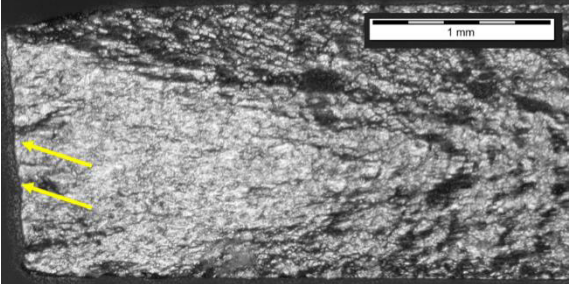
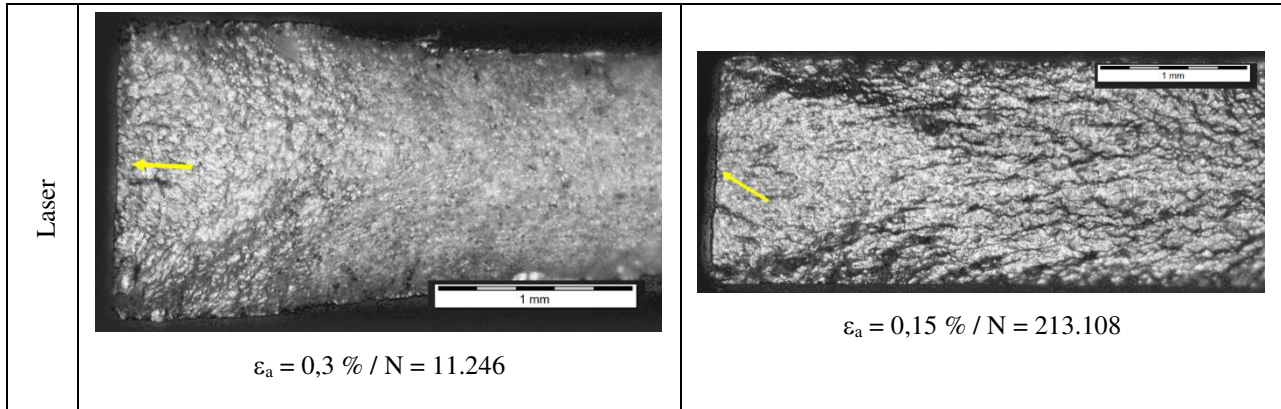


Abbildung 13-61: Schematische Darstellung zur Verdeutlichung der Lage der betrachteten Bruchflächen der ungekerbten (links) und gekerbten (rechts) Schwingprobe

Tabelle 13-8: Exemplarische Mikroskopaufnahmen der Schwingbruchflächen der dehnungsgeregelten Versuche, Schneidrichtung von oben nach unten

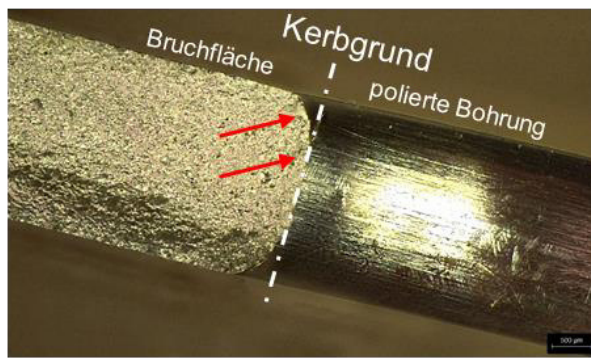
Kante	EN AW-5182	EN AW-6082
Poliert	 <p>$\epsilon_a = 0,3 \% / N = 30.619$</p>	 <p>$\epsilon_a = 0,4 \% / N = 7.008$</p>
Schneiden 1	 <p>$\epsilon_a = 0,8 \% / N = 401$</p>	 <p>$\epsilon_a = 0,8 \% / N = 297$</p>

Schneiden 2	 <p>$\epsilon_a = 0,17 \% / N = 92.512$</p>	 <p>$\epsilon_a = 0,2 \% / N = 42.364$</p>
Schneiden 3	-	 <p>$\epsilon_a = 0,8 \% / N = 270$</p>
Schneiden 4a	 <p>$\epsilon_a = 0,17 \% / N = 61.235$</p>	 <p>$\epsilon_a = 0,6 \% / N = 584$</p>
Schneiden 4b	 <p>$\epsilon_a = 0,2 \% / N = 53.026$</p>	-
Schneiden 5	-	 <p>$\epsilon_a = 0,2 \% / N = 21.577$</p>

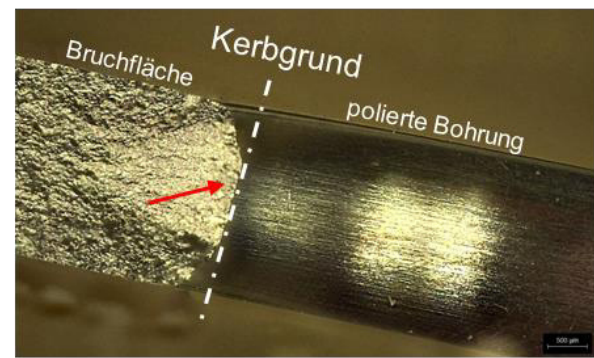


Bei den Bruchflächen der Variante Schneiden 2 der Legierung AA6082 konnte kein Zusammenhang zwischen der Bruchausgangfläche und dem auftretenden Sekundärglattschnitt festgestellt werden. Wie auch für die anderen Scherschneidvarianten, häuft sich der Rissausgangsort im Bereich des Übergangs zwischen (Primär)Glattschnitt- und Bruchbereich der Schneidkante. Eine Korrelation des Rissausgangsortes zu Bereichen mit Sekundärglattschnitt kann nicht erkannt werden. Gleiches gilt für die Variante Schneiden 4a der Legierung AA5182. Auch hier ist keine Korrelation des Rissausgangsortes zu auftretendem Sekundärglattschnitt feststellbar. Im Vergleich mit der Variante Schneiden 4b konnte kein geändertes Schwingfestigkeitsverhalten festgestellt werden. Die beiden ermittelten Dehnungs-Wöhlerlinien verlaufen deckungsgleich, was durch identische Rissausgangsorte bestärkt wird.

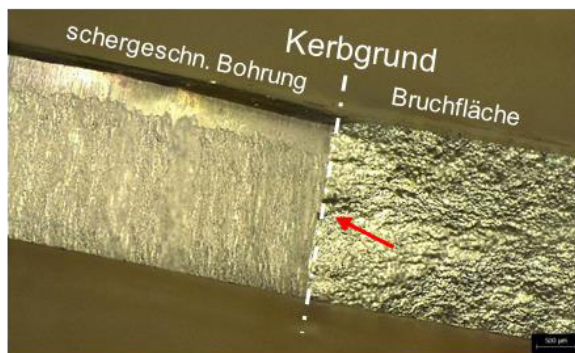
Die Bruchflächen der spannungsgeregelt rein-wechselnd ($R = -1$) geprüften Kerbproben sind durch das wiederholte Schließen der Rissflanken zu sehr aufgearbeitet, als dass eine genaue Aussage zum Rissausgangsort möglich wäre. Folglich werden nachstehend nur die Rissausgangsorte der zug-schwellend ($R = 0,1$) geprüften Kerbproben der Legierung EN AW-6082 betrachtet. Durch Abbildung 13-61 rechts wird die Lage der betrachteten Bruchflächen verdeutlicht und durch Abbildung 13-62 ist eine exemplarische Übersicht gegeben.



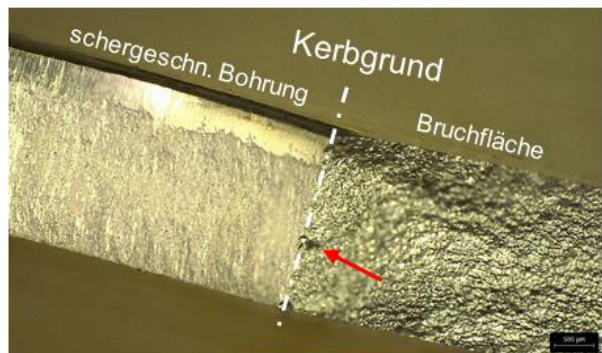
$$\sigma_{an} = 60 \text{ MPa}, N = 2,57 \cdot 10^5$$



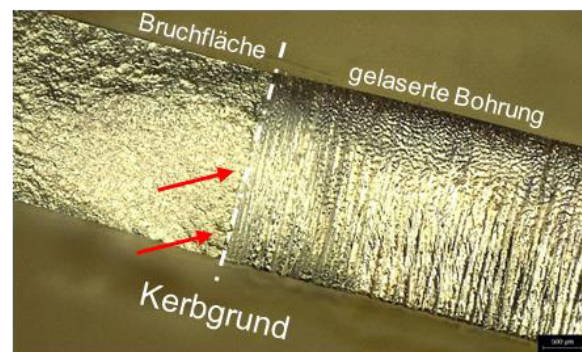
$$\sigma_{an} = 60 \text{ MPa}, N = 2,20 \cdot 10^5$$



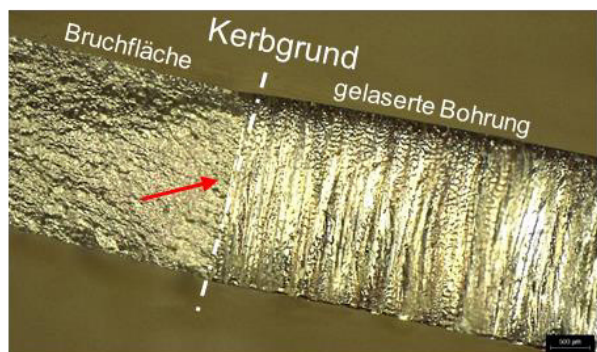
$$\sigma_{an} = 70 \text{ MPa}, N = 2,65 \cdot 10^4$$



$$\sigma_{an} = 60 \text{ MPa}, N = 4,99 \cdot 10^4$$



$$\sigma_{an} = 65 \text{ MPa}, N = 4,54 \cdot 10^4$$



$$\sigma_{an} = 65 \text{ MPa}, N = 3,73 \cdot 10^4$$

Abbildung 13-62: Exemplarische Darstellungen der Rissausgangsorte für die gekerbten ($K_t = 2,5$) Proben, AA6082, spannungsgeregelt, $R = 0,1$

Es ist erkennbar, dass sich der Rissausgangsort der polierten Kante von der Walzoberfläche tendenziell an die Kante im Kerbgrund verlagert. Als Ursache wird vermutet, dass die erreichte gemittelte Rauhtiefe R_z innerhalb der Bohrung etwas größer ist als die der Walzoberfläche. Dies ist auf den erschwerten Poliervorgang innerhalb der Bohrung zurück zu führen. Zusätzlich ist erkennbar, dass die Ecken der Kanten stärker verrundet sind, als für die ungekerbten Proben. Davon abgesehen, ist durch die Spannungsüberhöhung infolge der geometrischen Kerbe die Kantenfläche höher beansprucht, als die Walzoberfläche.

Bei der schergeschnittenen Probenvariante (Schneiden 1) liegt der Anrissort innerhalb der Bruchfläche der Scherschneidkante. Im Vergleich mit den ungekerbten Proben liegen die Rissausgangsorte jedoch weiter unterhalb des Übergangs zum Glattschnittbereich. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass es sich bei den dargestellten Lochproben um einen geschlossenen Schnitt handelt, wohingegen die ungekerbten Proben in einem offenen Schnitt gefertigt wurden. Die Schneidbedingungen sind also nicht vollständig identisch.

Für die laserstrahlgeschnittenen Proben liegt der Anrissort wiederum im Kantenbereich. Eine Konzentration auf die Lasereintritts- oder -austrittsseite ist auch hier nicht erkennbar.

Für die gekerbten Proben ist, wie auch zuvor bei den ungekerbten Proben, keine Abhängigkeit des Rissausgangsortes von der Höhe der Beanspruchungsamplitude feststellbar. Der Anrissort verändert sich nicht.

Die Bruchflächen der unter wechselnder Beanspruchung ($R = -1$) durchgeführten Schwingversuche geben keine Anhaltspunkte dafür, dass sich die Lage des Anrissortes gegenüber den Schwellversuchen verändert. Dies gilt für beide untersuchten Knetlegierungen und auch für die durchgeführten Versuche mit variabler Amplitude.

13.5 Übertragbarkeit und Korrelationsfaktoren

Wie die zuvor beschriebenen und diskutierten Ergebnisse zeigen, besitzt der Kanteneinfluss auch bei den beiden untersuchten Aluminiumknetlegierungen EN AW-5182 und EN AW-6082 T4 einen Einfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten. Die Lebensdauer scher- und laserstrahlgeschnittener Proben ist gegenüber der Lebensdauer der polierten Probe verringert. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Scherschneidvarianten unterscheiden sich dabei kaum voneinander. Nachfolgend wird daher stellvertretend für alle betrachteten Schneidparametersätze nur die Variante Schneiden 1 berücksichtigt.

Der Aufbau eines Korrelationsmodells, das beispielsweise die vier zyklischen Kennwerte der Dehnungs-Wöhlerlinie mit der Werkstoffzugfestigkeit korreliert, ist nur eingeschränkt möglich. Dies liegt daran, dass sich die beiden untersuchten Legierungen in ihrer Festigkeit nur geringfügig und im Schwingfestigkeitsverhalten kaum unterscheiden. Zudem liegen nur zwei Punkte je Kantenzustand vor (einer je Werkstoff). Die Bildung einer Regression mit zwei dicht bei einander liegenden Punkten ist nicht sinnvoll. Stattdessen werden nachfolgend gewonnene Erkenntnisse beschrieben, die zu einer Verbesserung der Ergebnisse einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept führen können.

Weiterhin ist die Übertragbarkeit mangels verwendbarer Bauteilversuche nur eingeschränkt untersuchbar. Anstelle von realen oder Prinzipbauteilen, können nur die Ergebnisse der Kerbproben als Ersatz herangezogen werden.

Bezogen auf die dehnungsgeregelten Versuche ist die Übertragbarkeit vom polierten Zustand auf eine Schneidkante zweiteilig. Zum einen ist die Übertragbarkeit der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve zu betrachten und zum anderen die der Dehnungs-Wöhlerlinie.

Wie die diskutierten Ergebnisse zeigen, besteht kein bzw. lediglich ein vernachlässigbarer Einfluss des Kantenzustands auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Die entstehenden verfestigten oder thermisch beeinflussten Bereiche nahe der Schneidkante sind nur als dünne Randschicht ausgeprägt und beeinflussen daher das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der gesamten Probe nahezu nicht. Es wird vom Grundwerkstoff in Probenmitte dominiert, dessen Eigenschaften sich durch die betrachteten Schneidprozesse nicht verändert. Diese Aussage bezieht sich auf die separat ausgewerteten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven ohne Berücksichtigung der Kompatibilitätsbeziehungen, welche für Proben mit Randschicht keine Gültigkeit besitzen. Weiterhin bezieht sich diese Aussage nur auf den für die Dehnungs-Wöhlerlinie relevanten Bereich der Dehnung (bis ca. 1 %). Oberhalb kann es durchaus zu einem Einfluss kommen, so erhöht sich beispielsweise die Kantenrissempfindlichkeit.

Hieraus lässt sich ableiten, dass sich für rechnerische Lebensdauerabschätzungen nach dem Örtlichen Dehnungskonzept in guter Näherung unabhängig vom Kantenzustand die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve des Grundwerkstoffes verwenden lässt.

Demnach muss der Unterschied der Lebensdauer der verschiedenen Kantenzustände im Rahmen der rechnerischen Lebensdauerabschätzung nur auf der Seite der Beanspruchbarkeit berücksichtigt werden. Die Dehnungs-Wöhlerlinie muss angepasst werden.

Wie die Ergebnisse gezeigt haben, verringert sich die Lebensdauer der Schneidkanten gegenüber der polierten Kante. Dabei ist die Dehnungs-Wöhlerlinie der Schneidkanten jedoch nicht gegenüber derjenigen der polierten Proben proportional verschoben, weil der Kanteneinfluss eine Lastabhängigkeit aufweist. Im Bereich der dominant plastischen Dehnungsamplituden ist die reduzierte Umformbarkeit des Werkstoffes infolge der Schneidverfestigung maßgebend. Im dominant elastischen Lastbereich dominiert dagegen der Einfluss der Oberflächenrauheit an den Schneidkanten. Die Lastabhängigkeit des letzteren Einflusses lässt sich sehr gut an den gegenüber dem polierten Zustand verdrehten elastischen Geraden der Dehnungs-Wöhlerlinien mit Schneidkante erkennen, vergleiche Abbildung 13-44 und Abbildung 13-47.

Für die Beurteilung der Übertragbarkeit wird die kommerzielle Software winLIFE eingesetzt. Zunächst wird eine Lebensdauerberechnung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept durchgeführt. Hierfür wird eine lineare Schadensakkumulation nach Miner verwendet und die kritische Schadenssumme (Festlegung Versagen) wird zu $D_{crit} = 1$ gesetzt. Als Kerbnäherungsverfahren wird die Neuber-Regel verwendet und der Schädigungsparameter P_{SWT} nach Smith, Watson und Topper wird angewendet.

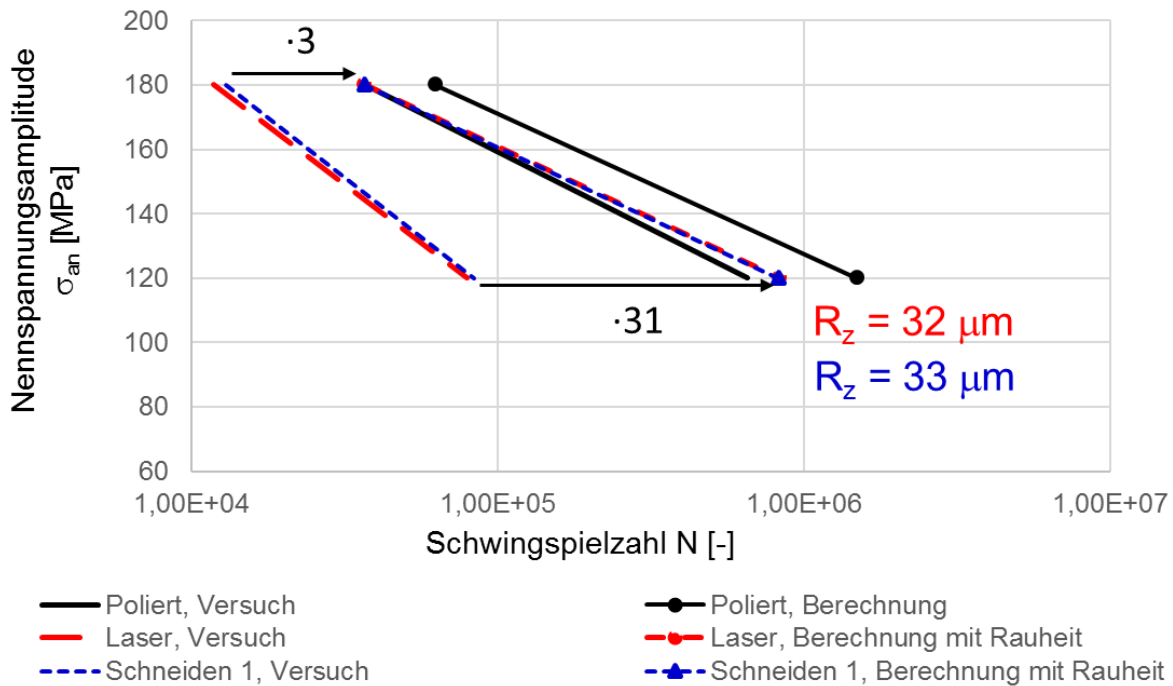


Abbildung 13-63: Vergleich von Versuch und Berechnung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082, ungekerbte Probe, $R = -1$, $P_A = 50\%$

Abbildung 13-63 zeigt das Ergebnis einer Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept für die ungekerbten Proben der Legierung AA6082. Verglichen werden jeweils die experimentell ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden der spannungsgeregelten Versuche an ungekerbten Proben mit den Berechnungsergebnissen. Für diese wird zunächst der polierte Zustand mit der zugehörigen polierten Dehnungs-Wöhlerlinie nachgerechnet. Wie erkennbar ist, führt die Berechnung zu einer leichten Überschätzung der experimentellen Lebensdauer. Dieses Ergebnis ist jedoch zweitrangig. Der Vergleich für die beiden Schneidkanten (Schneiden 1 und Laser) ist relevanter. Hierfür wurde die Dehnungs-Wöhlerlinie bzw. die Schädigungsparameter-Wöhlerlinie des polierten Zustands jeweils um einen Rauheitsfaktor basierend auf den R_z -Werten korrigiert, indem sie proportional in Lastrichtung verschoben, d. h. abgesenkt wurde.

Der Abgleich mit den Versuchsergebnissen offenbart zwei Probleme. Zum einen wird die Lebensdauer deutlich überschätzt, d. h. im Umkehrschluss wird der Kanteneinfluss deutlich unterschätzt. Weiterhin ist erkennbar, dass die Abweichung abhängig von der Höhe der Beanspruchungsamplitude ist. Es ist erkennbar, dass die Zeitfestigkeitsgeraden der um den Rauheitseinfluss angepassten Berechnungsergebnisse der beiden Schneidkanten gegenüber dem polierten Ergebnis proportional bzw. parallel verschoben sind. Wie im Diskussionsteil gezeigt wurde, verlaufen die experimentellen Zeitfestigkeitsgeraden der Schneidkanten jedoch steiler als die des polierten Zustands. Hieraus resultiert, dass die Abweichung für die unteren Lastbereiche deutlich größer ausfällt.

Es lassen sich zwei Erkenntnisse gewinnen. Zum einen ist die Berücksichtigung des reinen Rauheitseinflusses in den meisten Fällen nicht ausreichend. Dies begründet sich damit, dass speziell bei den schergeschnittenen Proben auch ein Einfluss durch die vorliegende Randschicht besteht, der beim Rauheitsfaktor nicht miterfasst wird.

Zum anderen wird klar, dass der Kanteneinfluss nicht gut durch einen konstanten Faktor beschrieben werden kann. Er ist lastabhängig. Dieser Ansatz orientiert sich an der FKM-Richtlinie und ist nach dieser eigentlich auch nur für den Bereich der Dauerfestigkeit gedacht, wird mangels Alternative jedoch häufig auf den gesamten Schwingfestigkeitsbereich angewendet.

Demgegenüber deutlich verbesserte Vorhersagegenauigkeiten entstehen, wenn für die Berechnung der Schneidkanten die jeweiligen zugehörigen zyklischen Kennwerte, d. h. die zugehörige Dehnungs-Wöhlerlinie verwendet wird. Abbildung 13-64 verdeutlicht dies anhand eines Vergleichs der experimentellen Zeitfestigkeitsgeraden der spannungsgeregelten Versuche an ungekerbten laserstrahl- und schergeschnittenen Proben der Legierung AA6082 mit den Berechnungsergebnissen unter Verwendung der zugehörigen Dehnungs-Wöhlerlinien. Die Treffsicherheit der Vorhersagen ist gut. Eine gewisse Abweichung ist jedoch auch hier feststellbar. Diese kann mehrere Ursachen haben. So können Unterschiede zwischen den spannungs- und dehnungsgeregelten Versuchen, welche auf Maschinen unterschiedlicher Funktionsweise durchgeführt wurden, nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Weiterhin ist auch eine statistische Streuung nicht auszuschließen.

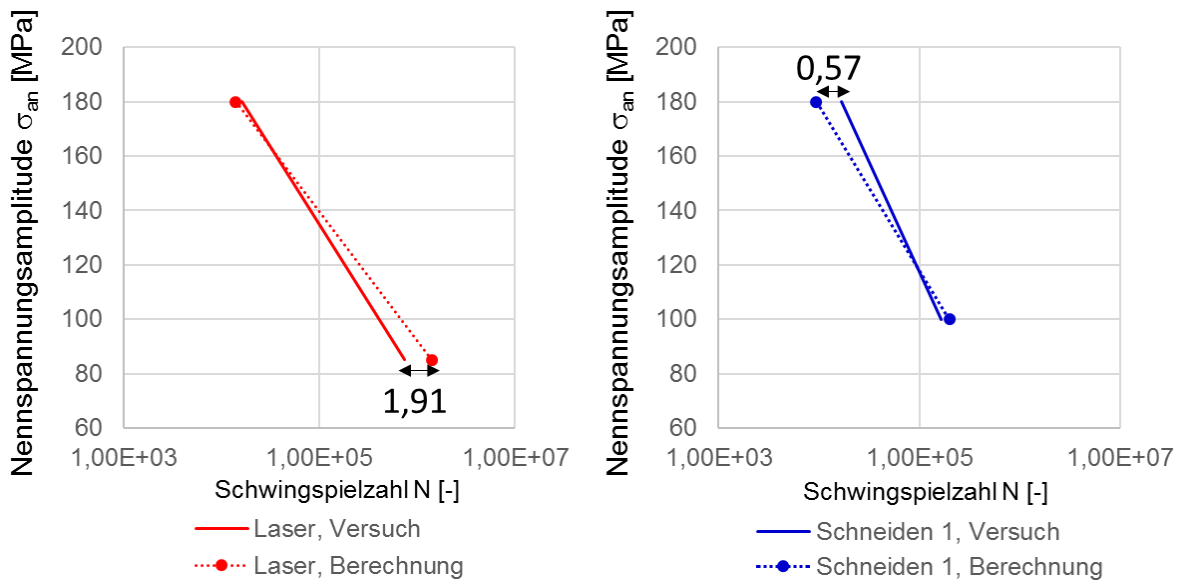


Abbildung 13-64: Vergleich von Versuch und Berechnung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082, ungekehrte Probe, $R = -1$, $P_A = 50\%$, zyklische Kennwerte des jeweiligen Kantenzustands

Anstelle der Berücksichtigung des Kanteneinflusses über einen reinen Rauheitsfaktor, können auch die aus den Versuchsergebnissen bestimmten Kanteneinflussfaktoren aus Tabelle 13-7 verwendet werden. Diese zeigen eine klare Lastabhängigkeit. Wird diese nicht berücksichtigt, so müssen die Faktoren aus dem dominant elastischen Bereich übernommen werden. In Tabelle 13-7 sind dies die Faktoren bei $N = 200.000$ Schwingspielen. Dies ist erforderlich, um konservative Lebensdauervorhersagen zu erhalten. Im Bereich der dominant plastischen Dehnungsamplituden wird dadurch die Lebensdauer jedoch unterschätzt, da der Kanteneinfluss hier geringer ausfällt.

Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich für die Berücksichtigung der dynamischen Stützwirkung. Klassischerweise wird auch diese als konstanter Faktor über den gesamten Schwingspielzahlbereich auf die Schädigungsparameter-Wöhlerlinie aufgeschlagen, d. h. die Schädigungsparameter-Wöhlerlinie wird um einen konstanten Faktor in Lastrichtung verschoben. Durch Abbildung 13-65 ist ein Beispiel für eine Berechnung der Lochprobe ($K_t = 2,5$) der Legierung AA6082 mit polierter Kante gegeben. Die Rechnung wurde dreimal ausgeführt. Zunächst ohne Berücksichtigung der dynamischen Stützwirkung ($n_\sigma = 1$). Es ist erkennbar, dass die erreichbare Lebensdauer deutlich unterschätzt wird. Folglich ist die Einbeziehung der dynamischen Stützwirkung in eine rechnerische Lebensdauerabschätzung unumgänglich.

Die beiden weiteren Rechnungen wurden mit Stützzahlen durchgeführt, die für $N = 200.000$ bzw. $N = 1.000.000$ Schwingspiele aus den Ergebnissen der spannungsgeregelten Versuche

abgeleitet wurden. In diesem Fall werden die Versuchsergebnisse durch beide Rechenergebnisse gut angenähert. Trotzdem ist bereits erkennbar, dass die rechnerischen Zeitfestigkeitsgeraden eine andere Neigung aufweisen als die der Versuchsergebnisse. Weiterhin ist erkennbar, dass sich bereits kleine Änderungen der dynamischen Stützzahl n_σ deutlich auf die berechnete Lebensdauer auswirken.

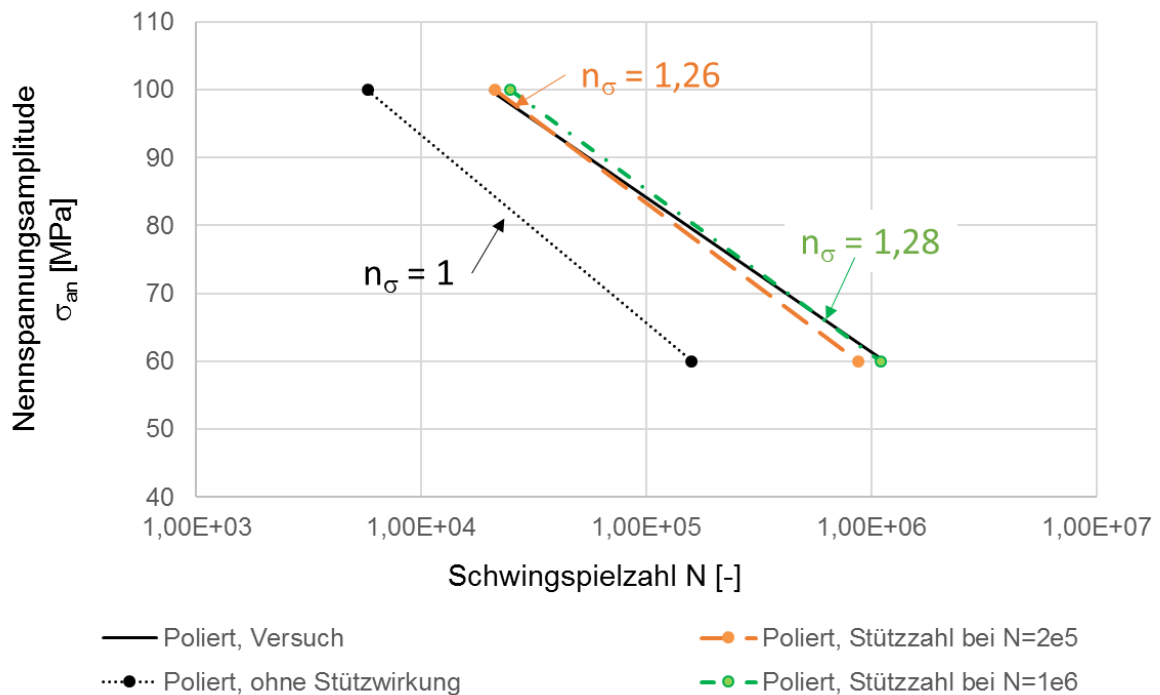


Abbildung 13-65: Einfluss einer konstanten dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 2,5$

Deutlicher wird dies für die scharfgekerbte Probe ($K_t = 4,6$) des polierten Zustands, vergleiche Abbildung 13-66. Hier sind die Neigungsunterschiede klar erkennbar. Zudem wird ersichtlich, dass die Berechnung mit der experimentellen Stützzahl für $N = 200.000$ bei dieser Schwingspielzahl mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt. Gleiches gilt entsprechend für die Berechnung für $N = 1.000.000$. Es wird ersichtlich, dass die dynamische Stützwirkung lastabhängig ist. Sie nimmt mit sinkender Beanspruchungsamplitude ab. Dies liegt daran, dass die Zeitfestigkeitsgeraden der gekerbten und ungekerbten Proben tendenziell mit zunehmender Beanspruchungsamplitude zusammenlaufen.

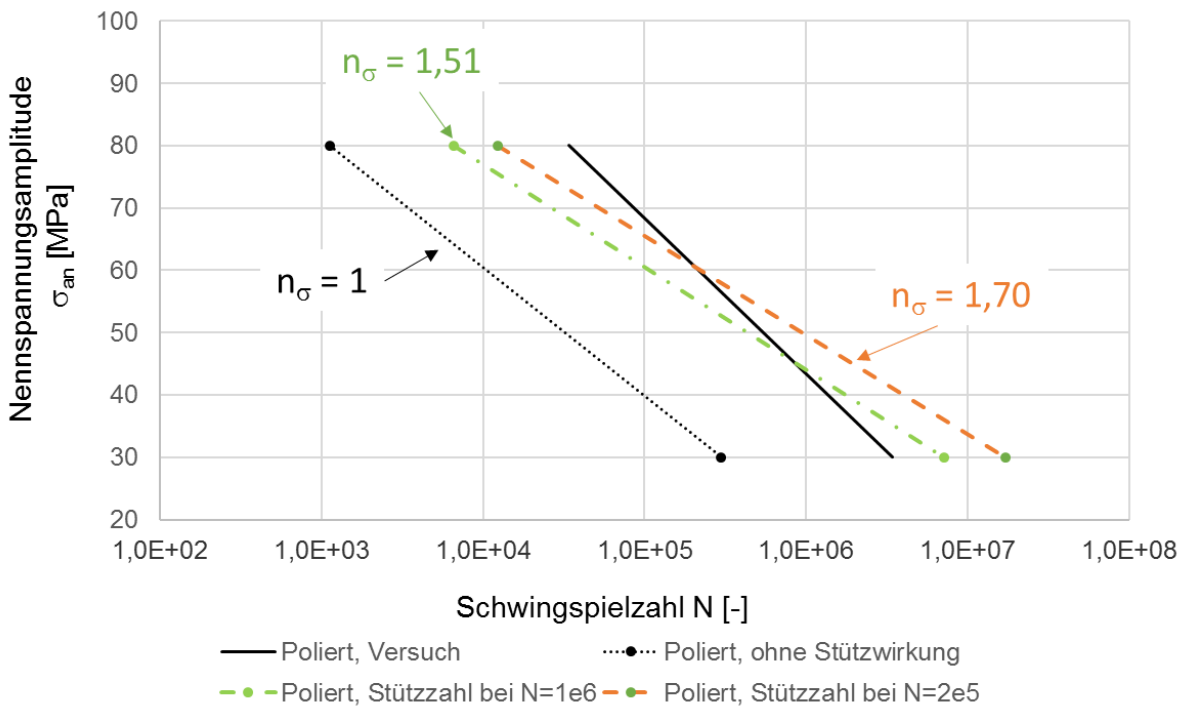


Abbildung 13-66: Einfluss einer konstanten dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 4,6$

Wie durch Abbildung 13-67 gezeigt wird, kann durch eine variable (lastabhängige) dynamische Stützzahl eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit erreicht werden. Dargestellt ist die Interpolation der berechneten Zeitfestigkeitsgeraden aus zwei Stützstellen für die scharf gekerbte ($K_t = 4,6$) polierte Probe der Legierung AA6082. Die Lebensdauer auf dem oberen Horizont wurde mit der Stützzahl für $N = 200.000$ Schwingspiele berechnet und die auf dem unteren Horizont entsprechend mit der Stützzahl für $N = 1.000.000$ Schwingspiele. Abbildung 13-68 zeigt entsprechendes für die laserstrahlgeschnittene Kante und bestätigt damit, dass eine lastabhängige Berücksichtigung der dynamischen Stützwirkung die Vorhersagegenauigkeit der abgeschätzten rechnerischen Lebensdauer verbessern kann.

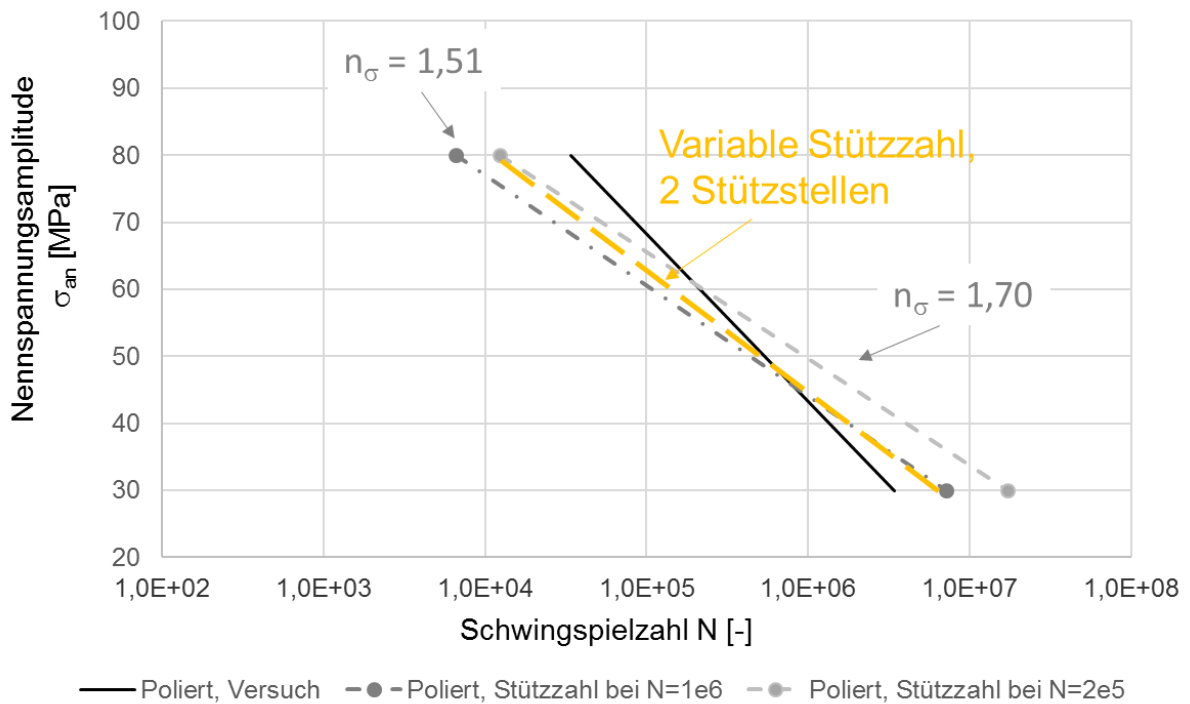


Abbildung 13-67: Beispiel für den Einfluss einer variablen dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 4,6$

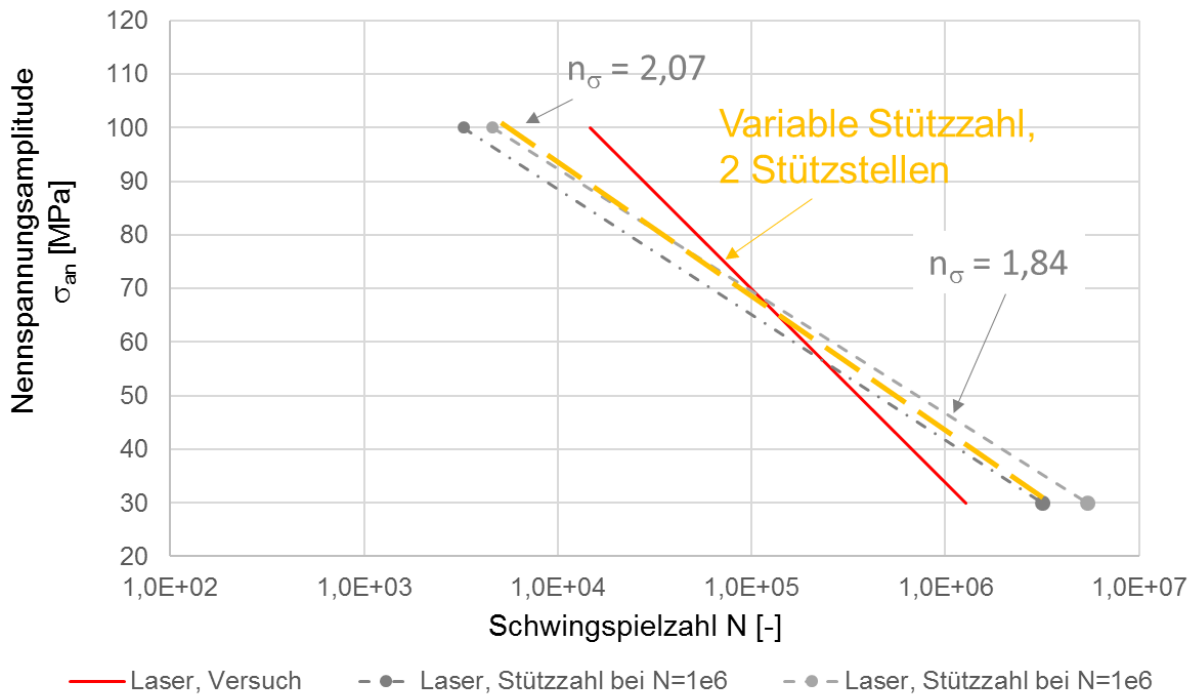


Abbildung 13-68: Beispiel für den Einfluss einer variablen dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 Laser, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 4,6$

Diese Aussage lässt sich allerdings nicht vollständig verallgemeinern. Dies kann anhand des Extrembeispiels aus Abbildung 13-69 verdeutlicht werden. Dargestellt ist die rechnerische Le-

bensdauerabschätzung für die milde Kerbe ($K_t = 2,5$) der Legierung AA6082 mit laserstrahlgeschnittener Kante. Für diesen Fall entfällt die Möglichkeit einer lastabhängigen Wahl der dynamischen Stützzahl, da die beiden Zeitfestigkeitsgeraden der ungekerbten und gekerbten Proben nahezu parallel verlaufen, vergleiche Abbildung 13-12. Hieraus resultiert, dass die dynamische Stützzahl unabhängig von der Schwingspielzahl bzw. Lastamplitude näherungsweise konstant ist.

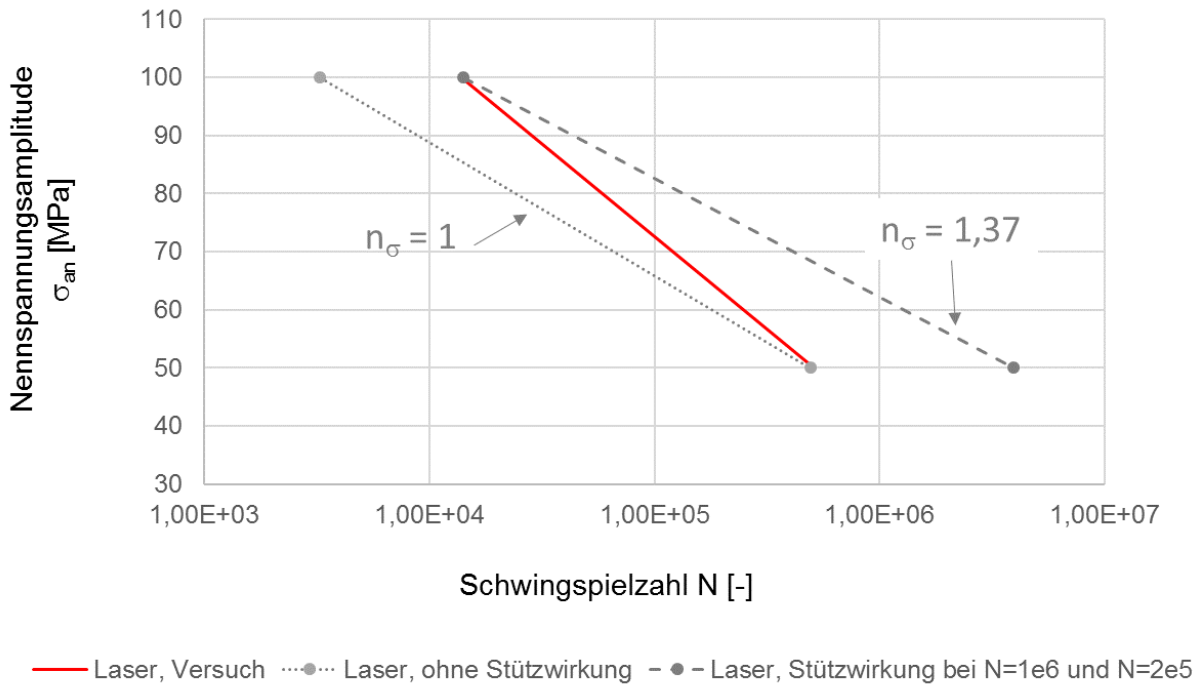


Abbildung 13-69: Extremfall für den Einfluss einer variablen dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 Laser, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 2,5$

Wie aus Abbildung 13-69 ersichtlich wird, würde eine Interpolation mit dem Berechnungsergebnis ohne dynamische Stützwirkung ($n_\sigma = 1$) auf dem unteren Horizont und dem mit $n_\sigma = 1,37$ auf dem oberen Horizont zu einer sehr guten Abschätzung führen. Hierfür kann keine fachliche Erklärung und somit keine Rechtfertigung für die Umsetzung gefunden werden. Mögliche Erklärungen für Abweichungen zwischen Berechnung und Versuch wären beispielsweise Abweichungen zwischen den spannungs- und dehnungsgeregelten Versuchen oder zwischen den Kantenzuständen der gekerbten und ungekerbten Proben.

Wie Abbildung 13-70 zeigt, werden für die Knetlegierung EN AW-6082 bessere Vorhersageergebnisse für die zug-schwellenden spannungsgeregelten Versuche ($R = 0,1$) erreicht, wenn im Rahmen der rechnerischen Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept der Schädigungsparameter nach Bergmann P_{Bergmann} anstelle der Variante nach Smith, Watson

und Topper P_{SWT} verwendet wird. Der Bewertungsparameter der Mittelspannung für den Schädigungsparameter nach Bergmann ergibt sich aus der Mittelspannungsempfindlichkeit des Werkstoffes. Diese kann im vorliegenden Fall in guter Näherung nach der FKM-Richtlinie abgeschätzt werden, vergleiche Diskussionsteil zum Mittelspannungseinfluss.

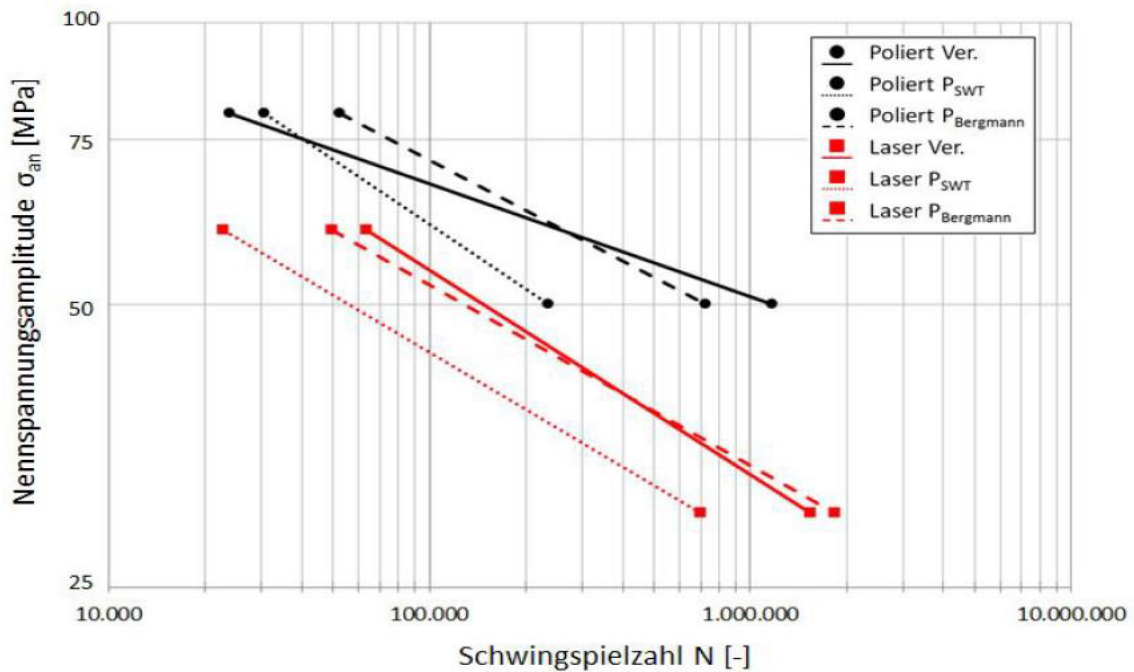


Abbildung 13-70: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse nach dem Örtlichen Dehnungskonzept mit dem Schädigungsparameter nach Smith-Watson-Topper P_{SWT} und nach Bergmann $P_{Bergmann}$, AA6082, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Ohne reale bzw. Prinzipbauteile konnte die Übertragbarkeit nur eingeschränkt untersucht werden und der Aufbau eines Korrelationsmodells zur Beschreibung des Kanteneinflusses war aufgrund der zu geringen Datenmenge nicht möglich.

Voranstehend wurden jedoch einige wichtige Erkenntnisse im Zusammenhang einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept erläutert, die zu einer Verbesserung der Vorhersageergebnisse führen können. Insbesondere eine lastabhängige Erfassung des Kanteneinflusses und der dynamischen Stützwirkung bietet großes Potential. Eine konkrete Beschreibung in Form eines Korrelationsmodells ist, wie zuvor angesprochen, jedoch nicht möglich.

14 Einfluss der Schneidstrategie auf Kantenrissempfindlichkeit und Betriebsfestigkeit

Da in der Regel sowohl die kantenrissfreie Herstellbarkeit als auch eine möglichst lange Lebensdauer und gute Betriebsfestigkeit sichergestellt werden müssen, ist der Einfluss der Schneidstrategie auf beide Themenbereiche in Kombination zu bewerten. Hierbei werden vorrangig Ergebnisse für EN AW-6082 herangezogen, da für diesen Werkstoff Betriebsfestigkeitsuntersuchungen (dehnungsgeregelt und spannungsgeregelt) für alle untersuchten Schneidstrategien vorliegen.

Bei einem Vergleich der spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche mit ungekerbten Proben ($K_t = 1$) aus EN AW-6082 mit den Ergebnissen der entsprechenden Kantenrisszugversuche ist ein gegensätzlicher Trend feststellbar. Hierzu werden die ertragbaren Nennspannungsamplituden bei $N = 200.000$ Schwingspielen betrachtet. Während die Strategien Laser und Schneiden 4 die geringsten Kantenrissempfindlichkeiten und somit die besten Resultate bei der Blechumformung aufweisen, zeigen diese Strategien bei den Betriebsfestigkeitsuntersuchungen die kürzesten Lebensdauern. Im Gegensatz dazu erreichen Strategie Schneiden 2 und Schneiden 5, welche am anfälligsten für Umformkantenrisse sind, die längsten Lebensdauern unter zyklischer Belastung. Diese Tendenz tritt ebenfalls bei Versuchen mit gekerbten Proben ($K_t = 2,5$) hervor: Die Schneidstrategien Laser und das zweistufige Scherschneiden (Schneiden 4) zeigen den größten Kanteneinfluss und somit die geringste Lebensdauer, die mit beschichtetem Stempel geschnittenen Proben (Schneiden 2) besitzen die längste Lebensdauer.

Eine Erklärung für dieses konträre Verhalten kann in der Aufhärtung der Schnittkante gefunden werden, welche maßgeblich vom gewählten Schneidverfahren beeinflusst wird. Während die Aufhärtung an der Kante in Kapitel 10 als wesentlicher Faktor für die Entstehung von Kantenrissen bei der Umformung von Aluminiumblech ermittelt wurde, kann eine Verfestigung des Randschichtgefüges positive Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit der Bauteilkante hervorrufen (Dittmann und Pätzold, 2018). Die Versuchsergebnisse aus Kapitel 9.3 zeigen, dass Strategie Schneiden 2, mit welcher die beste Schwingfestigkeit ermittelt wird, ebenfalls die größte gemessene maximale Aufhärtung aller untersuchten Schneidstrategien bei EN AW-6082 besitzt. Zudem erstreckt sich der Bereich maximaler Aufhärtung an der Kante über die komplette Blechdicke und ist nicht nur, wie beispielsweise bei Strategie Schneiden 1, im Bereich des Glattschnitts lokalisiert (siehe Abbildung 9-25). Strategie Schneiden 5, für die ebenfalls gute Ergebnisse in den spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuchen ermittelt werden, weist im Vergleich zur Referenz (Schneiden 1) keine nennenswerte Änderung der maximalen Aufhärtung an der Kante auf. Jedoch hat die Blechvorbiegung vor dem eigentlichen Schneidprozess bei Schneiden 5 eine Verschiebung des am stärksten aufgehärteten Bereichs in Richtung der

Bruchfläche zur Folge (siehe Abbildung 9-45). Dies ist insofern von Bedeutung, da bei den schergeschnittenen Schwingproben die Rissausgangsstelle in der Regel im Bereich der Bruchfläche an der Schnittkante lokalisiert werden kann. Zweistufig schergeschnittene (Schneiden 4) sowie laserstrahlgeschnittene Proben zeigen nur eine vergleichsweise geringe beziehungsweise gar keine Aufhärtung an der Kante. Daraus resultieren kürzere Lebensdauern bei den Betriebsfestigkeitsuntersuchungen.

Im Bereich der Kurzzeitfestigkeit mit hohen Dehnungsamplituden wird ein abweichendes Verhalten festgestellt. Hierzu werden die Ergebnisse der dehnungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche herangezogen. So zeigen schergeschnittene Proben mit Strategie Schneiden 2 und Schneiden 5 bei hohen Dehnungsamplituden die geringste Lebenserwartung, verglichen mit den anderen Schneidstrategien. Die längste Lebensdauer der Schneidvarianten wird hingegen mit den laserstrahlgeschnittenen Proben erzielt. Diese Klassifikation steht im Gegensatz zu den Ergebnissen der Langzeitfestigkeit und entspricht in etwa der Einteilung der Schneidstrategien hinsichtlich der plastischen Umformbarkeit der Blechkante, welche mithilfe von Kantenrisszugversuchen (EFTT) bestimmt wurde. Da der Bereich hoher Dehnungsamplituden durch einen großen plastischen Dehnungsanteil gekennzeichnet ist, dominiert hier die bei den Kantenrissuntersuchungen ermittelte schädigende Wirkung der Aufhärtung, während die anrisshemmenden Effekte eines verfestigten Randschichtgefüges in den Hintergrund treten. Gut erkennbar ist die Verfestigung der Randschicht an der Lage des Transition Points, des Schnittpunktes der elastischen und plastischen Geraden einer Dehnungswöhlerlinie. Dieser gilt als ein Maß für die Duktilität des Werkstoffes. Je größer die Schwingspielzahl des Transition Points ist, desto höher ist die Duktilität des Werkstoffes. Im vorliegenden Fall, liegen die Transition Points der Varianten Schneiden 2 und Schneiden 4 im Vergleich mit den laserstrahlgeschnittenen Proben bei geringeren Schwingspielzahlen.

15 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wird der Einfluss der Schneidstrategie auf das Restumformvermögen sowie die Betriebsfestigkeit der schergeschnittenen Kante untersucht. Dazu werden Proben aus den Aluminiumlegierungen EN AW-5182 und EN AW-6082 mit einer Blechdicke von jeweils 1,5 mm gefertigt. Hierzu kommen fünf verschiedene Scherschneidstrategien zum Einsatz, welche einer Laserstrahlschneidvariante sowie dem gefrästen und polierten Referenzzustand gegenübergestellt werden.

Zur Beurteilung der Kantenrissempfindlichkeit werden *Edge-Fracture-Tensile-Tests* und Kragenziehversuche durchgeführt. Die Untersuchung des Einflusses auf die Betriebsfestigkeit erfolgt anhand der Ergebnisse spannungs- und dehnungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuche. Sowohl das Restumformvermögen, bestimmt durch die Kantenrissempfindlichkeit, als auch das Verhalten unter schwingender Beanspruchung zeigen eine starke Abhängigkeit vom vorliegenden Kantenzustand. Dieser wird durch die Eigenschaften der Kante in Form von Rauheit, Aufhärtung und Geometrie beschrieben und ist wiederum abhängig von der Wahl der Schneidstrategie und -parameter. Dabei kann sich zwischen der Kantenrissempfindlichkeit und dem Betriebsfestigkeitsverhalten auch ein Zielkonflikt einstellen. So kann eine Aufhärtung im Nahbereich der schergeschnittenen Kante die Kantenrissempfindlichkeit bei Umformvorgängen erhöhen, wohingegen im hcf-Bereich (high cycle fatigue) einer Schwingbeanspruchung die Lebensdauer positiv beeinflusst wird. Um den Zielkonflikt zu lösen, ist die Wahl der Schneidstrategie somit abhängig vom Umformgrad des herzustellenden Bauteils und dessen zu erwartenden Belastungen im Betrieb zu treffen.

Weiterhin ist die Schneidstrategie auch werkstoffabhängig anzupassen. Rauheit, Aufhärtung und Kantengeometrie können sich je nach gewähltem Blechwerkstoff unterscheiden. Die Wahl einer ungeeigneten Schneidstrategie kann dabei unerwünschte Effekte wie die Ausbildung von Sekundärglattschnitt hervorrufen, welcher neben einer erhöhten Aufhärtung auch geometrische Unstetigkeiten an der Schnittfläche zur Folge haben kann. Auch die Verwendung von kaltaufgeschweißten Aktivelementen ist möglichst zu vermeiden, da sich diese negativ auf die Kantenrissempfindlichkeit der schergeschnittenen Kante auswirken können.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden lediglich zwei Aluminiumlegierungen untersucht, die sich speziell in ihrem Verhalten unter schwingender Beanspruchung sehr ähnlich verhalten. Für eine Bestätigung und Erweiterung der hierin gewonnenen Ergebnisse sollten weitere Legierungen und auch Blechdicken untersucht werden, um klarere Empfehlungen für die Wahl einer geeigneten Schneidstrategie ableiten zu können.

16 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU

16.1 Nutzen der Forschungsergebnisse in KMU

Die Fertigung von Strukturbauteilen für Fahrzeuge sowie von erforderlichen Umformwerkzeugen wird oftmals von kleinen und mittleren Unternehmen in Gesamtverantwortung übernommen. Durch die im Rahmen dieses Projektes erzielten Ergebnisse können auch in KMUs ohne eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilung schon in der Produktplanungs- und Auslegungsphase geeignete Scherschneidstrategien ausgewählt werden, mit welchen gute Ergebnisse hinsichtlich Bauteilherstellbarkeit und Betriebsfestigkeit erzielt werden können. Eine Orientierungshilfe zur Reduzierung der Kantenrissempfindlichkeit von Bauteilen aus Aluminium bieten dabei beispielsweise die Untersuchungen zum zweistufigen Scherschneiden, wobei für gegebene Randbedingungen geeignete Nachschneidparameter wie Nachschneidzugabe und Schneidkantenradius aufgezeigt werden.

Neben der Bauteilfertigung werden auch Simulationsdienstleistungen zur rechnerischen Absicherung der Herstellbarkeit und Schwingfestigkeit von kleineren Ingenieurbüros oder Simulationsdienstleistern durchgeführt. Durch eine Einbeziehung des Kanteneinflusses in die Berechnungen kann eine bessere Ergebnisgenauigkeit erzielt werden, was späteren Reklamationen und kostspieligen Anpassungen von Werkzeugen und Bauteilen vorbeugt.

16.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU

Durch eine frühzeitige fundierte Bewertung der Bauteilherstellbarkeit und -lebensdauer kann ein kosten- und zeitintensiver Trial-and-Error-Prozess vermieden werden. Auch die Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen gelaserten Prototypenbauteilen und schergeschnittenen Teilen, wie sie in der Regel in der Serienfertigung anzutreffen sind, tragen dazu bei, dass anhand von Prototypen zuverlässige Rückschlüsse auf das Serienteil gezogen werden können. Zudem können die im Rahmen des Projektes ermittelten Ergebnisse auch dazu führen, dass die Notwendigkeit von Prototypen zur Produktabsicherung gänzlich entfällt. Daraus folgen Kostenvorteile sowie eine verkürzte Bearbeitungsdauer von Aufträgen, was wiederum die Wettbewerbsfähigkeit der auf diesem Gebiet tätigen KMUs steigert.

Auch die Wettbewerbsfähigkeit von Simulationsdienstleistern und Ingenieurbüros kann durch die Berücksichtigung des fertigungsbedingten Kanteneinflusses auf das maximale Restumformvermögen der Kante sowie die Betriebsfestigkeit erheblich gesteigert werden. Hieraus resultieren Alleinstellungsmerkmale gegenüber Mitbewerbern aus Niedriglohnländern, da eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit erzielt werden kann. Folgen hieraus können eine höhere Kundenzufriedenheit und die Aussicht auf Folgeaufträge sein.

16.3 Industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse

Die im Rahmen des Projektes untersuchten Schneidstrategien können schnell, vergleichsweise einfach und ohne größeren Kostenaufwand in produzierenden Unternehmen umgesetzt werden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in der Regel lediglich eine Anpassung der Schneidaktivelemente ausreicht und kein neues Werkzeug notwendig ist. Auch das zweistufige Scherschneiden, mit dem besonders gute Ergebnisse hinsichtlich des Restformänderungsvermögens der Bauteilkante erzielt werden können, kann mit überschaubarem Aufwand in neue und auch bereits bestehende Werkzeuge integriert werden. Dazu ist bei bereits vorhandenen Stufenwerkzeugen die Ergänzung eines Vorschneidprozesses mit Berücksichtigung der entsprechenden Nachschneidzugabe in einer Stufe vor dem bereits existierenden Schneidprozess notwendig.

Auch die Umsetzung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen mit kaltaufgeschweißtem Stempel ist sofort ohne Aufwand möglich. So muss ein höheres Augenmerk auf den Verschleißzustand der Aktivelemente gelegt werden bzw. geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden, um Kaltaufschweißungen effektiv zu verhindern. Andernfalls kann eine deutlich erhöhte Ausschussquote aufgrund von kantenrissbehafteten Bauteilen in folgenden Umformprozessen resultieren.

17 Verwendung der Zuwendung Forschungsstelle 1 (utg, TU München)

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

24 MM

Übriges Fachpersonal (Einzelansatz (A.2 des Finanzierungsplans)

keine

Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)

25.536,32 €

Ausgaben für die Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

keine

Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

keine

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um das Projektziel zu erreichen.

18 Verwendung der Zuwendung Forschungsstelle 2 (HS Esslingen)**Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)**

18,3 MM

Übriges Fachpersonal (Einzelansatz (A.2 des Finanzierungsplans)

keine

Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)

keine

Ausgaben für die Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

keine

Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

3.103,77 €

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um das Projektziel zu erreichen.

19 Plan zum Ergebnistransfer

Die am projektbegleitenden Ausschuss (PbA) beteiligten Unternehmen wurden im Rahmen regelmäßiger Treffen aus erster Hand über den aktuellen Projektstatus sowie über Zwischenergebnisse informiert. Hierbei konnten die Mitglieder des PbAs auch aktiv an der Gestaltung der Projektziele mitwirken. Dies erfolgte beispielsweise anhand einer anwendungsnahen Auswahl der Stempelbeschichtung oder der Bereitstellung der zu untersuchenden Aluminiumblechwerkstoffe.

Des Weiteren wurden die Projektergebnisse einem breiten Publikum im Rahmen verschiedener Veranstaltungen zur Verfügung gestellt. Neben Messeauftritten und Kongressbeiträgen erfolgte auch eine Projektvorstellung auf den Homepages der Lehrstühle.

Als weitere Transfermaßnahme wurden ausgewählte Projekthinhalte in Vorlesungen und Praktika des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) sowie der Hochschule Esslingen integriert, um so schon Studenten für den signifikanten Einfluss des Zustandes der Blechkanten auf die Umformbarkeit sowie die Betriebsfestigkeit zu sensibilisieren.

Ein Überblick über die bereits durchgeführten Maßnahmen ist in Tabelle 19-1 gegeben.

Tabelle 19-1: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
A: Projektbegleitender Ausschuss PbA	Fortlaufende Vorstellung der Forschungsergebnisse für die Mitglieder des PbA sowie Diskussion der Ergebnisse und Festlegung weiterer Maßnahmen	A1: Vorstellung der aktuellen Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens in Garching, Esslingen sowie als Webkonferenz	13.04.2018 11.02.2019 26.11.2019 29.09.2020
		A2: Abschlusspräsentation und Diskussion aller Ergebnisse	14.12.2020
D: Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende durch Verzahnung von Forschung und Lehre sowie an interessierte Industrievertreter	D1: Vergabe von neun studentischen Arbeiten (Bachelor-, Semester- und Masterarbeiten) zur Fragestellung des Projekts D2: Aufnahme der Ergebnisse in die Lehrveranstaltungen „Praktikum Umformtechnik“, „Virtuelle Prozessgestaltung“, „Grundlagen der Ur- und Umformtechnik“, „Integrity of Structures“, „Betriebsfestigkeit“ und „Reliability“	01.01.2018 – 31.12.2020 WS 2018/2019 – WS 2020/2021
E: Transfer der Ergebnisse durch Forschungsvereinigung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft über FAT	E2: Vorstellung der Projektergebnisse und Diskussion bei der FAT im Rahmen der Arbeitskreissitzungen	20.02.2019 06.02.2020

Einige Maßnahmen zum Ergebnistransfer erfolgen erst nach Abschluss des Projektes. Diese umfassen beispielsweise die Veröffentlichung des Abschlussberichtes oder eines wissenschaftlichen Artikels.

Eine Übersicht über die noch geplanten Transfermaßnahmen ist in Tabelle 19-2 zu sehen.

Tabelle 19-2: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
E: Transfer der Ergebnisse durch Forschungsvereinigung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft über FAT; Veröffentlichung des Abschlussberichtes	E1: Veröffentlichung des Abschlussberichtes	Festlegung durch FAT
		E2: Vorstellung der Projektergebnisse und Diskussion bei der FAT	umgehend nach Projektende
F: Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	F2: Beitrag in einer Fachzeitschrift (z.B. ALUMINIUM International Journal, International Journal of Fatigue)	innerhalb von 6 Monaten nach Projektende
		F3: Präsentation auf einer Tagung mit Veröffentlichung im Tagungsband z.B. Arbeitskreis Betriebsfestigkeit	innerhalb von einem Jahr nach Projektende

20 Förderhinweis

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben „Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) wurde unter der Fördernummer 19824 N über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

A. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Links: Prinzip des Laserstrahlschneidens, Rechts: Kenngrößen an Schnittflächen beim Laserstrahlschneiden, nach (VDI 2906-8).....	3
Abbildung 2-2: a) Randzone und Gratbereich einer laserstrahlgeschnittenen Probe, geätzt mit NaOH 10%ig; b) Randzone und Gefüge einer laserstrahlgeschnittenen Probe, Farbätzen nach Weck; EN AW-6082	4
Abbildung 2-3: Einordnung des Scherschneidens nach DIN 8588.....	5
Abbildung 2-4: Verfahrensprinzip des Scherschneidens mit geschlossener Schnittlinie nach Hoffmann, Neugebauer und Spur (2012)	6
Abbildung 2-5: Phasen des Scherschneidvorgangs nach Hoffmann, Neugebauer und Spur (2012)	6
Abbildung 2-6: Kräfte und Momente beim Scherschneiden nach Lange (1990) und Romanowski (1959).....	8
Abbildung 2-7: Kraft-Zeit-Verlauf beim Scherschneiden nach Doege und Behrens (2010).....	8
Abbildung 2-8: Schnittflächenausprägung nach VDI 2906-1.....	9
Abbildung 2-9: Verfahrensprinzip des Nachschneidens nach Gläsner et al. (2015a)	10
Abbildung 2-10: Verfahrensprinzip des Lochaufweitungsversuchs (ZwickRoell, 2020a).....	13
Abbildung 2-11: Rissausbildung nach Lochaufweitungsversuch (ZwickRoell, 2020a).....	13
Abbildung 2-12: Nakajima-Test mit Loch nach Gläsner et al. (2015b)	14
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Probengeometrie (Feistle et al., 2016)	15
Abbildung 2-14: Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh, (Radaj und Vormwald, 2007)	20
Abbildung 2-15: Schematische Darstellung des Örtlichen Dehnungskonzepts nach (Häfele und Thum, 2020)	22
Abbildung 2-16: Schematische Darstellung der Neuber-Hyperbel, (Dittmann und Pätzold, 2018).....	23
Abbildung 4-1: Bruderer Stanzautomat BSTA 1600-181 (Bruderer UK Ltd., 2020)	26
Abbildung 4-2: Universalprüfmaschine ZwickRoell Z150 (ZwickRoell, 2020b).....	27
Abbildung 4-3: Prinzipieller Aufbau des Messsystems GOM ARAMIS (GOM GmbH, 2013).....	29

Abbildung 4-4: Konturmessgerät Mahr MarSurf XCR 20.....	30
Abbildung 4-5: Laserkonfokal-Mikroskop Keyence VK-X150.....	31
Abbildung 4-6: Auflichtmikroskop Keyence VHX-2000	32
Abbildung 4-7: Mirkohärteprüfer LECO AMH-43.....	33
Abbildung 4-8: Geometrien der verwendeten Schwingproben mit hervorgehobenen relevanten Kantenbereichen.....	33
Abbildung 4-9: Exemplarischer Aufbau der spannungsgeregelten Versuche anhand einer ungekerbten Schwingprobe ($K_t = 1$)	34
Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Verlaufs der Versuchsfrequenz über der Schwingspielzahl (Dittmann und Pätzold, 2018).....	35
Abbildung 4-11: a) Exemplarischer Vergleich der Gauß-Verteilung und des geblockten Lastkollektivs mit 20 Blöcken einer Länge von min. 500 Schwingspielen und einem Kollektivumfang von 50.000 Schwingspielen, b) Blockprogramm der Resonanzprüfmaschine, c) Last-Zeit-Folge der Gauß-Verteilung mit 10.000 Schwingspielen ($R = -1$, $I = 1$), jeweils mit einem Kollektivhöchstwert von 70 MPa, (Thum und Häfele, 2020)	36
Abbildung 4-12: Aufbau der dehnungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche.....	37
Abbildung 4-13: Schematische Darstellung des Auswertekriteriums der Anrisschwingspielzahl nach Empfehlung VDA239-300, entnommen aus (Dittmann und Pätzold, 2018).....	38
Abbildung 5-1: Kornstruktur der Aluminiumlegierung EN AW-5182.....	40
Abbildung 5-2: Einschlüsse und Partikel in der Aluminiumlegierung EN AW-5182	41
Abbildung 5-3: Kornstruktur der Aluminiumlegierung EN AW-6082.....	43
Abbildung 5-4: Einschlüsse und Partikel in der Aluminiumlegierung EN AW-6082	44
Abbildung 6-1: Schnitt durch das Zugproben-Scherschneidwerkzeug (Feistle et al., 2017) ...	46
Abbildung 6-2: Stempel-Schneidaktivelemente für Kantenrisszugproben: Schneiden 1 (links) und Schneiden 5 (rechts).....	47
Abbildung 6-3: Schnitt durch das Universal-Scherschneidwerkzeug.....	48
Abbildung 7-1: Versuchsplan utg.....	50
Abbildung 7-2: Versuchsplan Hochschule Esslingen (HE)	51

Abbildung 8-1: Scherschneidwerkzeug (links) und Kragenziehwerkzeug (rechts).....	55
Abbildung 8-2: Prüfraster für die Mikrohärtedrucke	56
Abbildung 8-3: Ermittlung des maximalen Höhengsprungs Δh im Bereich Sekundärglattschnitt/Bruch (links) und im Bereich Glattschnitt/Bruch (rechts)	57
Abbildung 8-4: Schematische Darstellung und mathematische Beschreibung der Wöhlerlinie Typ I, (Häfele und Thum, 2020).....	58
Abbildung 8-5: Schematische Darstellung und mathematische Definition der Dehnungs- Wöhlerlinie, (Häfele und Thum, 2020)	60
Abbildung 8-6: Schematische Darstellung und mathematische Definition der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve, (Häfele und Thum, 2020).....	61
Abbildung 9-1: Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen bei Strategie Schneiden 1 von EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts).....	62
Abbildung 9-2: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die Schnittflächenkenngrößen	63
Abbildung 9-3: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die Schnittflächenrauheiten	63
Abbildung 9-4: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die max. Aufhärtung der Scherzone ..	64
Abbildung 9-5: Einfluss der Strategie Schneiden 1 auf die Kantenrissempfindlichkeit.....	65
Abbildung 9-6: Dehnungsverteilung nach dem Vordehnen auf $\varphi_{\text{global}} = 0,2$: EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)	66
Abbildung 9-7: Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen bei unterschiedlichen Probenvordehnungen bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1.....	66
Abbildung 9-8: Einfluss der Probenvordehnung auf die Blechdicke und die Schnittflächenkenngrößen bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1	67
Abbildung 9-9: Einfluss der Probenvordehnung auf die max. Aufhärtung der Scherzone bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1	68
Abbildung 9-10: Einfluss der Probenvordehnung auf das Aufhärteverhältnis bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1	68
Abbildung 9-11: Einfluss der Probenvordehnung auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-5182 mit Strategie Schneiden 1	69
Abbildung 9-12: Mikroskopaufnahmen der Schnittflächen bei unterschiedlichen Probenvor- dehnungen bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 1	70

Abbildung 9-13: Entstehung von Sekundärglattschnitt beim offenen Schnitt aufgrund einer Rissausbreitung in Richtung des Stempels	70
Abbildung 9-14: Einfluss der Probenvordehnung auf die max. Aufhärtung der Scherzone bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 1	71
Abbildung 9-15: Einfluss der Probenvordehnung auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-6082 mit Strategie Schneiden 1	72
Abbildung 9-16: Vergleich der Schnittflächen von Strategie Schneiden 1 und Schneiden1G bei EN AW-5182 (oben) und EN AW-6082 (unten)	73
Abbildung 9-17: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die Schnittflächenkenngrößen.....	73
Abbildung 9-18: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die Schnittflächenrauheiten.....	74
Abbildung 9-19: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die max. Aufhärtung der Scherzone	74
Abbildung 9-20: Einfluss der Strategie Schneiden 1G auf die Kantenrissempfindlichkeit	75
Abbildung 9-21: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 2 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts).....	75
Abbildung 9-22: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Schnittflächenkenngrößen	76
Abbildung 9-23: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Schnittflächenrauheiten	77
Abbildung 9-24: Vergleich der maximalen Höhengsprünge am Übergang (Sekundär-) Glattschnitt – Bruch	77
Abbildung 9-25: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die max. Aufhärtung der Scherzone	78
Abbildung 9-26: Einfluss der Strategie Schneiden 2 auf die Kantenrissempfindlichkeit	79
Abbildung 9-27: Vergleich der Stempelmantelflächen bei 0 Hub (links) und mit Kaltaufschweißungen bei 2500 Hub (rechts).....	79
Abbildung 9-28: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 3 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts).....	80
Abbildung 9-29: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Schnittflächenkenngrößen	80
Abbildung 9-30: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Schnittflächenrauheiten	81
Abbildung 9-31: Unterschiedliche Rauheiten des Glattschnittes bei Schneiden 1 (links) und Schneiden 3 (rechts) für EN AW-5182.....	81
Abbildung 9-32: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die max. Aufhärtung der Scherzone	82

Abbildung 9-33: Einfluss der Strategie Schneiden 3 auf die Kantenrissempfindlichkeit.....	83
Abbildung 9-34: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 4 für EN AW-5182 mit scharfkantigem Stempel nachgeschnitten (oben links), EN AW-5182 mit 50 µm Schneidkantenradius nachgeschnitten (oben rechts) und EN AW-6082 mit scharfkantigem Stempel nachgeschnitten (unten)	84
Abbildung 9-35: Vergleich Nachschneiden mit vorgefräster (links) und vorgeschchnittener Kante (rechts)	85
Abbildung 9-36: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die Schnittflächenkenngrößen	86
Abbildung 9-37: Vergleich der maximalen Höhengsprünge am Übergang (Sekundär-) Glattschnitt – Bruch.....	86
Abbildung 9-38: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die Schnittflächenrauheiten	87
Abbildung 9-39: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die max. Aufhärtung der Scherzone	88
Abbildung 9-40: Einfluss der Strategie Schneiden 4 auf die Kantenrissempfindlichkeit.....	88
Abbildung 9-41: Gestufte Schneidkante am Stempel zur Reduzierung des Glattschnittanteils	89
Abbildung 9-42: Schnittflächen bei Strategie Schneiden 5 für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts).....	89
Abbildung 9-43: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Schnittflächenkenngrößen	90
Abbildung 9-44: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Schnittflächenrauheiten	90
Abbildung 9-45: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die max. Aufhärtung der Scherzone	91
Abbildung 9-46: Einfluss der Strategie Schneiden 5 auf die Kantenrissempfindlichkeit.....	92
Abbildung 9-47: Schnittflächen beim Laserschneiden für EN AW-5182 (links) und EN AW-6082 (rechts)	92
Abbildung 9-48: Einfluss des Laserschneidens auf die Schnittflächenrauheiten	93
Abbildung 9-49: Einfluss des Laserschneidens auf die max. Aufhärtung an der Kante	93
Abbildung 9-50: Einfluss des Laserschneidens auf die Kantenrissempfindlichkeit.....	94
Abbildung 9-51: Einfluss der Schneidstrategie auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-5182	95
Abbildung 9-52: Einfluss der Schneidstrategie auf die Kantenrissempfindlichkeit bei EN AW-6082	96

Abbildung 9-53: Erreichbares Lochaufweitungsverhältnis in Abhängigkeit des Werkstoffes und der Schneidstrategie	97
Abbildung 9-54: Vergleich der Hauptformänderungsvermögen aus dem Edge-Fracture-Tensile-Test mit den Kragenziehversuchen	98
Abbildung 11-1: Exemplarische Verläufe für Kraft-Weg-Diagramm der Kerbzugversuche an polierten, laserstrahl- und schergeschnittenen Kerbproben ($K_t = 2,5$) aus EN AW-6082.....	104
Abbildung 11-2: Exemplarische Verläufe für Kraft-Weg-Diagramm der Kerbzugversuche an polierten, laserstrahl- und schergeschnittenen Kerbproben ($K_t = 4,6$) aus EN AW-6082.....	105
Abbildung 13-1: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$	109
Abbildung 13-2: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$	110
Abbildung 13-3: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$	110
Abbildung 13-4: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$	112
Abbildung 13-5: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$	112
Abbildung 13-6: Wöhler-Diagramm Einfluss Vorrecken, AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, $P_A = 50\%$	113
Abbildung 13-7: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA5182 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$	115
Abbildung 13-8: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA5182 Laserstrahlschneiden, $R = -1$, $P_A = 50\%$	115
Abbildung 13-9: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA5182 Schneiden 1, $R = -1$, $P_A = 50\%$	116
Abbildung 13-10: Vergleich der bei $N = 2E5$ experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahlen mit den Werten nach FKM-Richtlinie.....	117
Abbildung 13-11: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$	119

Abbildung 13-12: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Laserstrahlschneiden, $R = -1$, $P_A = 50\%$	119
Abbildung 13-13: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Schneiden 1, $R = -1$, $P_A = 50\%$	120
Abbildung 13-14: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Schneiden 2, $R = -1$, $P_A = 50\%$	120
Abbildung 13-15: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Schneiden 3, $R = -1$, $P_A = 50\%$	121
Abbildung 13-16: Wöhler-Diagramm Kerbeinfluss, AA6082 Schneiden 4a, $R = -1$, $P_A = 50\%$	121
Abbildung 13-17: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$	122
Abbildung 13-18: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$	123
Abbildung 13-19: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$	123
Abbildung 13-20: Wöhler-Diagramm Mittelspannungseinfluss, AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$	124
Abbildung 13-21: Zeitfestigkeitsschaubild nach Haigh für AA6082, $K_t = 2,5$, $N = 2E5$ Schwingspiele.....	125
Abbildung 13-22: Zeitfestigkeitsschaubild nach Haigh für AA6082, $K_t = 2,5$, $N = 2E5$ Schwingspiele mit ausgewerteten Mittelspannungsempfindlichkeiten.....	127
Abbildung 13-23: Kanteneinflussfaktor (bei $N = 2E5$ Schwingspielen) abhängig vom Spannungs-Verhältnis R , EN AW-6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$	127
Abbildung 13-24: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA5182, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$	128
Abbildung 13-25: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA5182, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$	129
Abbildung 13-26: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA5182, $K_t = 2,5$, $P_A = 50\%$, $R = -1$	130
Abbildung 13-27: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA6082, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$, $R = -1$	131
Abbildung 13-28: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA6082, $K_t = 2,5$, $R = -1$	132

Abbildung 13-29: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, AA6082, $K_t = 4.6$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	133
Abbildung 13-30: Wöhler-Diagramm Kanteneinfluss, Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	133
Abbildung 13-31: Darstellung der Kanteneinflussfaktoren ($N = 200.000$ Schwingspiele) der spannungsgeregelten Versuche, $R = -1$, $P_A = 50 \%$	135
Abbildung 13-32: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA5182, $K_t = 1$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	136
Abbildung 13-33: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Blockprogramm, AA6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	137
Abbildung 13-34: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Gauß-Signal, AA5182, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	137
Abbildung 13-35: Wöhler-Diagramm Einfluss Beanspruchung mit variabler Amplitude, Gauß-Signal, AA6082, $K_t = 2,5$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	138
Abbildung 13-36: Schematische Darstellung des Auswerteverfahrens für den Vergleich des Kanteneinfluss bei Wöhler- und Lebensdauerlinien, (Thum und Häfele, 2020)	138
Abbildung 13-37: Vergleich des Kanteneinflusses für variable und konstante Lastamplitude, nach (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020)	140
Abbildung 13-38: Vergleich des Kanteneinflusses für variable und konstante Beanspruchungsamplitude abhängig von der Höhe der Lastamplitude, nach (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020).....	141
Abbildung 13-39: Einfluss des Kantenzustands auf die berechneten kritischen Schadenssummen nach Miner-Elementar (oben) und Miner-Modifiziert (unten), $R = -1$, Gauß-Signal, $H_0 = 10.000$, $I = 1$, nach (Thum, Basavarajappa und Häfele, 2020).....	142
Abbildung 13-40: Einfluss Wärmebehandlung W185 auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA6082, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	144
Abbildung 13-41: Wöhler-Diagramm Einfluss Wärmebehandlung W185, AA6082, $K_t = 1$, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	145

Abbildung 13-42: Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Kompatibilitätsbedingung und aus experimenteller Auswertung, AA5182 Schneiden 1.....	146
Abbildung 13-43: Kanteneinfluss auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (nicht nach Kompatibilität), AA5182, $R = -1$	147
Abbildung 13-44: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA5182, $R = -1$, $P_A = 50$ %.....	148
Abbildung 13-45: Kanteneinfluss auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (nicht nach Kompatibilität), AA6082, $R = -1$	148
Abbildung 13-46: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA6082, $R = -1$, $P_A = 50$ %.....	149
Abbildung 13-47: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA6082, $R = -1$, $P_A = 50$ %, ohne elastische und plastische Gerade.....	149
Abbildung 13-48: Einfluss des Kantenzustands auf die Versagensschwingspielzahl somit die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve, (Thum und Häfele, 2019).....	150
Abbildung 13-49: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, poliert.....	151
Abbildung 13-50: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, laserstrahlgeschnitten.....	152
Abbildung 13-51: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Schneiden 1.....	152
Abbildung 13-52: Werkstoffvergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Schneiden 2.....	153
Abbildung 13-53: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, poliert, $R = -1$, $P_A = 50$ %.....	154
Abbildung 13-54: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, laserstrahlgeschnitten, $R = -1$, $P_A = 50$ %.....	154
Abbildung 13-55: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, Schneiden 1, $R = -1$, $P_A = 50$ %.....	155
Abbildung 13-56: Werkstoffvergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien, Schneiden 2, $R = -1$, $P_A = 50$ %.....	155

Abbildung 13-57: Vergleich der Dehnungs-Wöhlerlinien AA5182 Schneiden 4 und Schneiden 4+, $R = -1$, $P_A = 50\%$	157
Abbildung 13-58: Kanteneinfluss auf die Dehnungs-Wöhlerlinie, AA5182, $R = -1$, $P_A = 50\%$	158
Abbildung 13-59: Gegenüberstellung der Kanteneinflussfaktoren abhängig von Kantenzustand und Werkstoff.....	159
Abbildung 13-60: Schematische Darstellung der Anrissorte für (v. l.) polierte, schergeschnittene und laserstrahlgeschnittene Kante	161
Abbildung 13-61: Schematische Darstellung zur Verdeutlichung der Lage der betrachteten Bruchflächen der ungekerbten (links) und gekerbten (rechts) Schwingprobe.....	162
Abbildung 13-62: Exemplarische Darstellungen der Rissausgangsorte für die gekerbten ($K_t = 2,5$) Proben, AA6082, spannungsgeregelt, $R = 0,1$	165
Abbildung 13-63: Vergleich von Versuch und Berechnung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082, ungekerbte Probe, $R = -1$, $P_A = 50\%$	168
Abbildung 13-64: Vergleich von Versuch und Berechnung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082, ungekerbte Probe, $R = -1$, $P_A = 50\%$, zyklische Kennwerte des jeweiligen Kantenzustands.....	170
Abbildung 13-65: Einfluss einer konstanten dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 2,5$	171
Abbildung 13-66: Einfluss einer konstanten dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 4,6$	172
Abbildung 13-67: Beispiel für den Einfluss einer variablen dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 poliert, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 4,6$	173
Abbildung 13-68: Beispiel für den Einfluss einer variablen dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 Laser, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 4,6$	173

Abbildung 13-69: Extremfall für den Einfluss einer variablen dynamischen Stützzahl auf die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage nach dem Örtlichen Dehnungskonzept, AA6082 Laser, $R = -1$, $P_A = 50\%$, $K_t = 2,5$	174
Abbildung 13-70: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse nach dem Örtlichen Dehnungskonzept mit dem Schädigungsparameter nach Smith-Watson-Topper P_{SWT} und nach Bergmann $P_{Bergmann}$, AA6082, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$...	175
Abbildung 20-1: Wöhler-Diagramm AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$	211
Abbildung 20-2: Wöhler-Diagramm AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$	212
Abbildung 20-3: Wöhler-Diagramm AA5182 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$	213
Abbildung 20-4: Wöhler-Diagramm AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$	215
Abbildung 20-5: Wöhler-Diagramm AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Nettonennspannung	217
Abbildung 20-6: Wöhler-Diagramm AA5182 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$	218
Abbildung 20-7: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$	220
Abbildung 20-8: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Nettonennspannung	222
Abbildung 20-9: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$	224
Abbildung 20-10: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	226
Abbildung 20-11: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$	227
Abbildung 20-12: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,1$	228
Abbildung 20-13: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$	229
Abbildung 20-14: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	230
Abbildung 20-15: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 4,6$, $R = -1$	231
Abbildung 20-16: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$	233
Abbildung 20-17: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 =$ $0,1$	234
Abbildung 20-18: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$	235
Abbildung 20-19: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	237
Abbildung 20-20: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 4,6$, $R = -1$	239

Abbildung 20-21: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$	241
Abbildung 20-22: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,1$	242
Abbildung 20-23: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$	243
Abbildung 20-24: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	244
Abbildung 20-25: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 4,6$, $R = -1$	246
Abbildung 20-26: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 2, $K_t = 1$, $R = -1$	248
Abbildung 20-27: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 2, $K_t = 2,5$, $R = -1$	249
Abbildung 20-28: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 3, $K_t = 1$, $R = -1$	251
Abbildung 20-29: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 3, $K_t = 2,5$, $R = -1$	252
Abbildung 20-30: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 4, $K_t = 1$, $R = -1$	253
Abbildung 20-31: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 4, $K_t = 2,5$, $R = -1$	254
Abbildung 20-32: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 5, $K_t = 1$, $R = -1$	256
Abbildung 20-33: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 poliert, $R = -1$	257
Abbildung 20-34: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 poliert, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	257
Abbildung 20-35: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Laserstrahlschneiden, $R = -1$	259
Abbildung 20-36: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Laserstrahlschneiden, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	259
Abbildung 20-37: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 1, $R = -1$	260
Abbildung 20-38: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 1, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	260
Abbildung 20-39: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 2, $R = -1$	262
Abbildung 20-40: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 2, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	262
Abbildung 20-41: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 4a, $R = -1$..	263
Abbildung 20-42: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 4a, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	263
Abbildung 20-43: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 4+ bzw. 4b, $R = -1$	265
Abbildung 20-44: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 4+ bzw. 4b, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	265

Abbildung 20-45: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 poliert, $R = -1$	266
Abbildung 20-46: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 poliert, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	266
Abbildung 20-47: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Laserstrahlschneiden, $R = -1$	268
Abbildung 20-48: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Laserstrahlschneiden, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	268
Abbildung 20-49: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 1, $R = -1$	269
Abbildung 20-50: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 1, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	269
Abbildung 20-51: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 2, $R = -1$	271
Abbildung 20-52: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 2, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	271
Abbildung 20-53: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 3, $R = -1$	272
Abbildung 20-54: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 3, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	272
Abbildung 20-55: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 4a, $R = -1$..	274
Abbildung 20-56: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 4a, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	274
Abbildung 20-57: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 5, $R = -1$	275
Abbildung 20-58: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 5, $P_A = 50 \%$, $R = -1$	275

B. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Technische Daten der Schnellläuferpresse (Bruderer AG, 2020).....	26
Tabelle 4-2: Technische Daten der Universalprüfmaschine (ZwickRoell, 2020b).....	27
Tabelle 4-3: Technische Daten des Laserkonfokal-Mikroskops (Keyence, 2015)	31
Tabelle 5-1: Legierungszusammensetzung der Aluminiumlegierung EN AW-5182	39
Tabelle 5-2: Mechanische Kennwerte von EN AW-5182.....	40
Tabelle 5-3: Legierungszusammensetzung der Aluminiumlegierung EN AW-6082	42
Tabelle 5-4: Mechanische Kennwerte von EN AW-6082 (Zustand T4, überaltert)	42
Tabelle 5-5: Mechanische Kennwerte von EN AW-6082 (Zustand nach W185).....	43
Tabelle 7-1: Übersicht über die untersuchten Schneidstrategien	52
Tabelle 7-2: Überblick über die durchgeführten spannungs- (SK) und dehnungsgeregelten (DK) Schwingfestigkeitsversuche	53
Tabelle 11-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche an ungekerbten Schwingproben.....	102
Tabelle 11-2: Zusammenfassung der quasistatischen Kerbzugversuche	103
Tabelle 12-1: Zusammenfassung der Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden der durchgeführten Gaßner-Versuche mit Blockprogramm, $P_A = 50\%$	106
Tabelle 12-2: Zusammenfassung der Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden der durchgeführten Wöhlerversuche, $P_A = 50\%$	107
Tabelle 12-3: Zusammenfassung der Kennwerte der Zeitfestigkeitsgeraden der durchgeführten Gaßner-Versuche mit Gauß-Signal, $P_A = 50\%$	108
Tabelle 12-4: Zusammenfassung der zyklischen Kennwerte aus den dehnungsgeregelten Versuchen, $P_A = 50\%$	108
Tabelle 13-1: Zusammenfassung des Einflusses einer Vorreckung bei $N = 200.000$ Schwingspielen, $R = -1$, $K_t = 1$, $P_A = 50\%$	114
Tabelle 13-2: Zusammenfassung der experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahlen bei $N = 2E5$	118
Tabelle 13-3: Zusammenfassung der experimentell ausgewerteten dynamischen Stützzahlen bei $N = 1E6$	118

Tabelle 13-4: Zusammenfassung der Auswertung des Einflusses einer Mittelspannung bei spannungsgeregelten Versuchen an Kerbproben ($K_t = 2,5$)	124
Tabelle 13-5: Zusammenfassung der Kanteneinflussfaktoren der spannungsgeregelten Versuche mit konstanter Lastamplitude für $N = 200.000$ Schwingspiele, $P_A = 50\%$	134
Tabelle 13-6: Zusammenfassung der Kanteneinflussfaktoren der spannungsgeregelten Versuche mit konstanter Lastamplitude für $N = 1.000.000$ Schwingspiele, $P_A = 50\%$	134
Tabelle 13-7: Zusammenfassung der ausgewerteten Kanteneinflussfaktoren der dehnungsgeregelten Versuche	159
Tabelle 13-8: Exemplarische Mikroskopaufnahmen der Schwingbruchflächen der dehnungsgeregelten Versuche, Schneidrichtung von oben nach unten	162
Tabelle 20-1: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	183
Tabelle 20-2: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens	184
Tabelle 21-1: Versuchsergebnisse AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$	210
Tabelle 21-2: Versuchsergebnisse AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$	212
Tabelle 21-3: Versuchsergebnisse AA5182 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$	213
Tabelle 21-4: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$	214
Tabelle 21-5: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Netto-Nennspannung	216
Tabelle 21-6: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Brutto-Nennspannung	216
Tabelle 21-7: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$	217
Tabelle 21-8: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$	219
Tabelle 21-9: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschn., $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Netto-Nennspannung	221
Tabelle 21-10: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschn., $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Brutto-Nennspannung	222
Tabelle 21-11: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$	223
Tabelle 21-12: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	225

Tabelle 21-13: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$	227
Tabelle 21-14: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,1$	228
Tabelle 21-15: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$	229
Tabelle 21-16: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	230
Tabelle 21-17: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 4,6$, $R = -1$	231
Tabelle 21-18: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$	232
Tabelle 21-19: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, vorgereckt, $\phi_1 = 0,1$	234
Tabelle 21-20: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$	235
Tabelle 21-21: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	236
Tabelle 21-22: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 4,6$, $R = -1$	238
Tabelle 21-23: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$	240
Tabelle 21-24: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, vorgereckt, $\phi_1 =$ $0,1$	242
Tabelle 21-25: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$	243
Tabelle 21-26: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$	244
Tabelle 21-27: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 4,6$, $R = -1$	245
Tabelle 21-28: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 2, $K_t = 1$, $R = -1$	247
Tabelle 21-29: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 2, $K_t = 2,5$, $R = -1$	249
Tabelle 21-30: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 3, $K_t = 1$, $R = -1$	250
Tabelle 21-31: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 3, $K_t = 2,5$, $R = -1$	251
Tabelle 21-32: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 4, $K_t = 1$, $R = -1$	252
Tabelle 21-33: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 4, $K_t = 2,5$, $R = -1$	253
Tabelle 21-34: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 5, $K_t = 1$, $R = -1$	255
Tabelle 21-35: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 poliert, $R = -1$...	258
Tabelle 21-36: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 laserstrahlgeschnitten, $R = -1$	258

Tabelle 21-37: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 1, R = -	
1	261
Tabelle 21-38: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 2, R = -	
1	261
Tabelle 21-39: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 4a, R = -	
1	264
Tabelle 21-40: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 4+ bzw.	
4b, R = -1	264
Tabelle 21-41: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 poliert, R = -1 ...	267
Tabelle 21-42: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082	
Laserstrahlschneiden, R = -1	267
Tabelle 21-43: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 1, R = -	
1	270
Tabelle 21-44: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 2, R = -	
1	270
Tabelle 21-45: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 3, R = -	
1	273
Tabelle 21-46: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 4a, R = -	
1	273
Tabelle 21-47: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 5, R = -	
1	276

C. Normenverzeichnis

DIN EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth, 00.04.1998

DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 00.07.2018

DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth, 00.02.2017

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth, 00.09.2003

DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth, 00.08.2013

ISO 16630: Metallische Werkstoffe - Blech und Band – Lochaufweitungsverfahren. Berlin: Beuth, 00.09.2017

FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Band 6. Frankfurt: VDAM Verlag GmbH, 2012

FKM-Richtlinie: Richtlinie nichtlinear. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH, 2019

VDA 239-300: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Walzprodukten. Berlin: Verband der Automobilindustrie e.V., 01.10.2015

VDI 2906: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 00.05.1994

D. Literaturverzeichnis

BACHHOFER, A., 2000. *Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau*. Dissertation. Stuttgart.

BOROWSKI, J. und BARTKOWIAK, K., 2010. Investigation of the influence of laser treatment parameters on the properties of the surface layer of aluminum alloys. In: *Physics Procedia* 5. S. 449-456.

BRUDERER AG, 2020. *Bruderer BSTA-1600 Produktbroschüre* [online] [Zugriff am: 11.08.2020]. Verfügbar unter: https://www.bruderer.com/media/pdf/e9/2e/52/BSTA-1600_de_01.pdf

BRUDERER UK Ltd., 2020. *Bruderer High Performance Stamping Press BSTA 1600* [online] [Zugriff am: 11.08.2020]. Verfügbar unter: <https://www.bruderer.co.uk/product/bruderer-high-performance-stamping-press-bsta-1600/#prettyPhoto>

DITTMANN, F. und I. PÄTZOLD, 2018. *Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung*. Berlin: FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. FAT-Schriftenreihe. 306. ISSN 2192-7863

DOEGE, E. und B.-A. BEHRENS, 2010. *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. VDI-Buch. ISBN 9783540234418

FEISTLE, M., R. GOLLE und W. VOLK, 2015. Determining the Influence of Shear Cutting Parameters on the Edge Cracking Susceptibility of High-Strength-Steels using the Edge-Fracture-Tensile-Test. In: *Procedia CIRP*. **41**. S. 1078-1083. ISSN 2212-8271

FEISTLE, M., I. PÄTZOLD, R. GOLLE und W. VOLK, 2016. Predicting Edge Cracks on Shear-Cut High-Strength Steels by Modified Uniaxial Tensile Tests. In: *Key Engineering Materials*. **703**. S. 49-55. ISSN 1662-9795

FEISTLE, M., et al., 2017. *Design and conceptualization of a cutting tool to investigate the influence of the shear cutting process on edge crack sensitivity*. IOP Publishing

FEISTLE, M., I. PÄTZOLD, R. GOLLE, W. VOLK, A. FREHN und R. ILSKENS, 2018. Maximizing the Expansion Ratio through Multi-stage Shearcutting Process during Collar Forming. In: *Materials Science and Engineering*. **418** (2018). doi:10.1088/1757-899X/418/1/012071

- FITZKA, M. und MAYER, H., 2016. Constant and variable amplitude fatigue testing of aluminum alloy 2014-T531 with ultrasonic and servo-hydraulic equipment. In: *International Journal of Fatigue* 91. S. 363-372.
- FRITZ, A.H. und G. SCHULZE, 2012. *Fertigungstechnik*. 10., neu bearb. Aufl. 2012. Berlin: Springer. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783642297854.
- GLÄSNER, T., C. SUNDERKÖTTER, M. HOFFMAN, W. VOLK, H. HOFFMANN und R. GOLLE, 2013. *Zweistufiges Scherschneiden reduziert die Kantenrissempfindlichkeit* [online]. UTF Science, (1). UTF Science. Verfügbar unter: https://www.umformtechnikmagazin.de/binary_data/3075413_2013-02-19-zweistufiges-scherschneiden.pdf
- GLÄSNER, T. und andere, 2015a. *Evaluation eines Verfahrens zur Bestimmung der Kantenrissempfindlichkeit von hochfesten Stählen*. Bamberg: Meisenbach
- GLÄSNER, T., V. IMAT, M. SCHNEIDER, C. SUNDERKÖTTER, M. THEISS und S. WESTHÄUSER, 2015b. *Berücksichtigung der Kantenrissempfindlichkeit in der Umformsimulation* [online]. UTF Science, (4). UTF Science. Verfügbar unter: https://www.umformtechnik.net/binary_data/3208771_2015-09-30-final.pdf
- GLÄSNER, T. und H. HOFFMANN, 2018. *Reduzierung der Kantenrissempfindlichkeit von Mehrphasenstählen durch 2-stufiges Scherschneiden*. Aachen: Shaker Verlag GmbH. ISBN 9783844057317
- GOM GmbH, 2013. *ARAMIS – Benutzerinformation – Hardware*. Braunschweig: GOM GmbH
- GOM GmbH, 2016. *Grundlagen der digitalen Bildkorrelation und Dehnungsberechnung*. Braunschweig: GOM GmbH
- GOM GmbH, 2017. *Erfassung Grundwissen*. GOM Software. Braunschweig: GOM GmbH
- GRAF, A. und W. HOSFORD, 1994. The Influence of Strain-Path Changes on Forming Limit Diagrams of Al 6111 T4. In: *International Journal of Mechanical Sciences*. **36**(10), S. 897-910. ISSN 0020-7403
- GUIDI, A., 1965. *Nachschnitten und Feinschnitten*. München: Hanser
- HÄFELE, P. und THUM, M., 2020. *Betriebsfestigkeit*. Vorlesungsunterlagen, Fakultät Fahrzeugtechnik, Hochschule Esslingen.
- HAIBACH, E, 2006. *Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- HOFFMANN, H., R. NEUGEBAUER und G. SPUR, 2012. *Handbuch Umformen*. München: Hanser. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. ISBN 9783446427785

- HOLLMANN, C., 2004. *Die Übertragbarkeit von Schwingfestigkeits-Eigenschaften im Örtlichen Konzept*. Dissertation. Dresden.
- HÖRMANN, F., 2008. *Einfluss der Prozessparameter auf einstufige Schneidverfahren zum Ausschneiden mit endkonturnaher Form*. Dissertation. München.
- KEYENCE, 2012. *VHX-2000: Hochauflösendes Digitalmikroskop mit automatisierten Messungen* [online]. Neu-Iseneburg: Keyence Deutschland GmbH. Verfügbar unter: <https://www.git-labor.de/produkte/laborgeraete/vhx-2000-hochaufloesendes-digitalmikroskop-mit-automatisierten-messungen>
- KEYENCE, 2015. *Präzise und intuitive Oberflächenanalyse*. Neu-Isenburg: Keyence Deutschland GmbH
- KEYENCE, 2018a: *3D-Laser-Scanning-Mikroskop Anwendungsleitfaden*. Neu-Isenburg: Keyence Deutschland GmbH
- KEYENCE, 2018b: *Einführung zur Rauheitsmessung von Oberflächen*. Neu-Isenburg: Keyence Deutschland GmbH
- KLEEMANN, U. und ZENNER, H., 2006. Bauteiloberfläche und Schwingfestigkeit – Untersuchungen zum Einfluss der Randschicht auf die Dauerschwingfestigkeit von Bauteilen aus Stahl. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37, 5. S. 349-373.
- KLOCKE, F. und W. KÖNIG, 2006. *Fertigungsverfahren 4. Umformen*. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. VDI-Buch. ISBN 9783540236504.
- LANGE, K., Hrsg., 1990. *Umformtechnik*. Band 3: Blechbearbeitung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-50039-1.
- LECO, 2005. *Instruktion Manual: AMH43 Automatic Micro/Macro Indentation Hardness Testing System*. Mönchengladbach: Leco Instrumente GmbH
- LIU, J., 2001. *Dauerfestigkeitsberechnung metallischer Bauteile*. Habilitation. Clausthal.
- MEURLING, F., MELANDER, A., LINDER, J. und LARSSON, M., 2001. The influence of mechanical and laser cutting on the fatigue strengths of carbon and stainless sheet steels. In: *Scandinavian Journal of Metallurgy* 30. S. 309-319.
- MEYERS, M. A., J. R. C. GUIMARÃES und R. R. AVILLEZ, 1979. On Stress-Relaxation Experiments and Their Significance Under Strain-Aging Conditions. In: *Metallurgical Transactions A*. **10A**, S. 33-40. ISSN 0360-2133

- MÜLLER, C., 2015. *Zur statistischen Auswertung experimenteller Wählerlinien*. Dissertation. Clausthal.
- NOVELIS, 2011. *Novelis Automotive: EN AW-5182*. Stuttgart: Novelis Deutschland GmbH
- OSTERMANN, F., 2014. *Anwendungstechnologie Aluminium*. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. VDI-Buch. ISBN 9783662438060
- PÄTZOLD, I., M. FEISTLE, R. GOLLE, W. VOLK, A. FREHN und R. ILSKENS, 2018. Determination of the minimum possible damage due to shear cutting using a multi-stage shear cutting process. In: *Materials Science and Engineering*. **418** (2018). doi:10.1088/1757-899X/418/1/012070
- RADAJ, D. und VORMWALD, M., 2007. *Ermüdungsfestigkeit*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- ROMANOWSKI, W., 1959. *Handbuch der Stanzereitechnik*. Berlin: VEB Verlag Technik.
- RUBIO-GONZALEZ, C., OCANA, J. L., GOMEZ-ROSAS, G., MOLPECERES, C., PAREDES, M., BANDERAS, A., PORRO, J. und MORALES, M., 2004. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy. In: *Materials Science and Engineering A* 386. S. 291-295.
- SANCHEZ-SANTANA, U., RUBIO-GONZALEZ, C., GOMEZ-ROSAS, G., OCANA, J. L., MOPECERES, C., PORRO, J. und MORALES, M., 2006. Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing. In: *Wear* 260. S. 847-854.
- SONSINO, C. M., 2009. Optimierung von Nutzfahrzeugsicherheitskomponenten aus Eisengraphitguss. In: *Materials Testing* 51, 7-8. S. 428-436.
- THOMAS, D. J., WHITTAKER, M. T., BRIGHT, G. W. und GAO, Y., 2011. The influence of mechanical and CO2 laser cut-edge characteristics on the fatigue life performance of high strength automotive steels. In: *Journal of Materials Processing Technology* 211. S. 263-274.
- THOMAS, D. J., 2012. Characterization of Cut-Edges for Improved Automotive Chassis and Suspension Fatigue CAE Life Predictions. In: *Journal of Failure Analysis and Prevention* 12. S. 408-418.
- THUM, M. und HÄFELE, P., 2019. Ermittlung der zyklischen Werkstoffkennwerte von Fein- und Feinstblech. In: *Tagung Werkstoffprüfung*. S. 311-316.
- THUM, M. und HÄFELE, P., 2020. Cut edge influence on the fatigue behavior of sheet metals under constant and variable amplitude loading. In: *VAL4 – Fourth International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading*. S. 487-496.

THUM, M., BASAVARAJAPPA, V. H. und HÄFELE, P., 2020. Influence of edge cutting process and sequence length on fatigue behaviour of spectrum loaded aluminum and steel sheets. Eingereicht bei: *International Journal of Fatigue*

TIMM, J., 2019. Expertengespräch im Rahmen einer Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses. Garching, 26.11.2019

VDA, 2020. *CO₂-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen* [online]. Berlin: Verband der Automobilindustrie e. V. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nutz-fahrzeugen.html>

VOLK, W. und P. HORA, 2011. New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination. In: *International Journal of Material Forming*. **4**, S. 339–346. ISSN 1960-6206

VOLK, W. und M. KRINNINGER, 2018. *Reduzierung der Flitterbildung beim Beschneiden von Aluminiumblechen*. Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. EFB-Forschungsbericht Nr. 488. ISBN 978-3-86776-540-4

VOLK, W., R. NORZ, M. EDER und H. HOFFMANN, 2020. Influence of non-proportional load paths and change in loading direction on the failure mode of sheet metals. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. **69**, S. 273-276. ISSN 0007-8506

WEICH, I., 2008. *Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands*. Dissertation. Braunschweig.

WINLIFE. STZ-Verkehr, Steinbeis-Transferzentrum Verkehrstechnik.Simulation.Software, www.stz-verkehr.de/winlife. Zugriff am: 17.11.2020.

WOHNIG, W., 2018. *Entwicklung von Fahrzeugkarosserien* [Präsentation]. Garching

YILDIRIM, H. C., MARQUIS, G. und SONSINO, C. M., 2016. Lightweight design with welded high-frequency mechanical impact (HFMI) treated high-strength steel joints from S700 under constant and variable amplitude loadings. In: *International Journal of Fatigue* **91**, 2. S. 466-474.

ZWICKROELL 2020a. *Lochaufweitungsversuch nach ISO 16630 – Bestimmung der Kantenrissempfindlichkeit* [online]. Ulm: ZwickRoell GmbH & Co. KG. Verfügbar unter: <https://www.zwickroell.com/de-de/materialpruefung-werkstoffpruefung/blechumformung/lochaufweitungsversuch/bestimmung-kantenrissempfindlichkeit-iso-16630>

ZWICKROELL 2020b. *Allround-Line - individuell und vielfältig* [online]. Ulm: ZwickRoell GmbH & Co. KG. Verfügbar unter: <https://www.zwickroell.com/de-de/universalpruefmaschinen/allroundline-material-pruefmaschine>

E. Versuchsergebnisse spannungsgeregt

Tabelle 20-1: Versuchsergebnisse AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregteltes Versuch AA5182, poliert, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingungszahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-P-0-1-01	9,95	1,50	2,24	150	3,87E+02	Überlastet
2	AA5-P-0-1-02	9,97	1,49	1,49	100	1,71E+06	Anriss
3	AA5-P-0-1-03	9,93	1,49	1,48	100	1,00E+07	Durchläufer
4	AA5-P-0-1-04	9,98	1,50	2,25	150	1,62E+05	Anriss
5	AA5-P-0-1-05	9,96	1,50	1,79	120	1,23E+06	Anriss
6	AA5-P-0-1-06	10,03	1,50	2,26	150	1,02E+05	Anriss
7	AA5-P-0-1-07	9,94	1,50	1,79	120	4,53E+05	Anriss
8	AA5-P-0-1-08	9,93	1,50	1,49	100	1,00E+07	Durchläufer
9	AA5-P-0-1-08	9,93	1,50	2,68	180	3,59E+04	hochgesetzt, Anriss
10	AA5-P-0-1-09	9,97	1,50	2,69	180	2,83E+04	Anriss
11	AA5-P-0-1-10	9,95	1,49	2,67	180	2,10E+04	Anriss
12	AA5-P-0-1-11	9,93	1,50	1,79	120	2,26E+06	Einspannbruch
13	AA5-P-0-1-12	9,94	1,50	1,79	120	7,34E+06	Anriss
14	AA5-P-0-1-13	9,97	1,49	2,23	150	1,15E+05	Anriss
15	AA5-P-0-1-14	9,95	1,50	2,69	180	6,24E+04	Anriss
16	AA5-P-0-1-15	9,94	1,50	2,24	150	2,24E+05	Anriss
17	AA5-P-0-1-16	9,92	1,50	1,79	120	6,53E+05	Anriss
18	AA5-P-0-1-17	9,96	1,50	1,49	100	1,00E+07	Durchläufer
19	AA5-P-0-1-18	9,93	1,50	1,79	120	6,86E+05	Anriss
20	AA5-P-0-1-19	9,92	1,49	1,48	100	1,96E+06	Einspannbruch
21	AA5-P-0-1-20	9,91	1,49	1,48	100	1,00E+07	Durchläufer
22	AA5-P-0-1-20	9,91	1,49	2,66	180	4,46E+04	hochgesetzt, Anriss

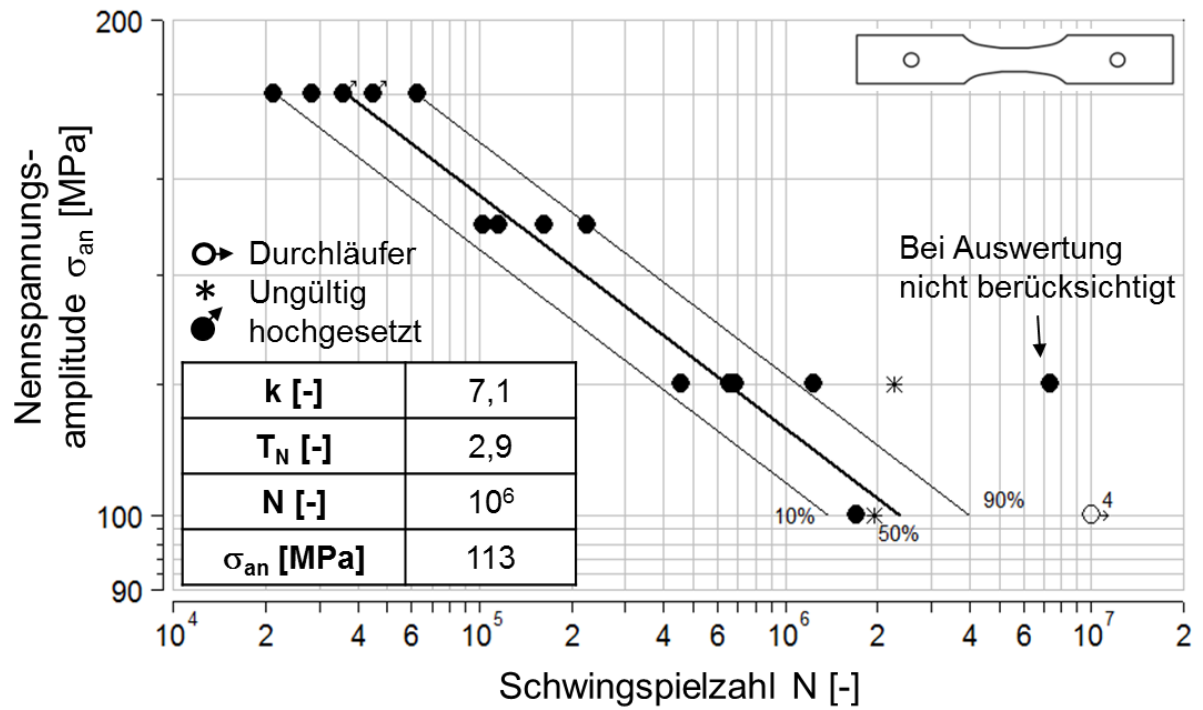


Abbildung 20-1: Wöhler-Diagramm AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-2: Versuchsergebnisse AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA5182, poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0.2$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-P-20-01	9,62	1,37	1,85	140	2,08E+05	Anriss
2	AA5-P-20-02	9,75	1,36	1,59	120	2,33E+06	Anriss
3	AA5-P-20-03	9,73	1,37	2,00	150	3,69E+05	Anriss
4	AA5-P-20-04	9,76	1,38	2,42	180	1,09E+05	Anriss
5	AA5-P-20-05	9,85	1,37	2,02	150	3,05E+05	Anriss
6	AA5-P-20-06	9,78	1,37	2,01	150	3,33E+05	Anriss
7	AA5-P-20-07	9,80	1,38	2,43	180	1,10E+05	Anriss
8	AA5-P-20-08	9,91	1,37	2,44	180	6,93E+04	Anriss
9	AA5-P-20-09	9,76	1,38	1,62	120	1,00E+07	Durchläufer
10	AA5-P-20-10	9,85	1,37	2,70	200	4,72E+04	Anriss
11	AA5-P-20-11	9,81	1,37	1,88	140	2,08E+05	Anriss
12	AA5-P-20-12	9,88	1,38	1,91	140	2,16E+06	Anriss
13	AA5-P-20-13	9,82	1,37	2,69	200	4,46E+04	Anriss
14	AA5-P-20-14	9,68	1,37	1,72	130	6,47E+05	Anriss
15	AA5-P-20-15	9,76	1,37	1,74	130	9,39E+05	Anriss
16	AA5-P-20-16	9,62	1,38	1,73	130	1,30E+06	Anriss

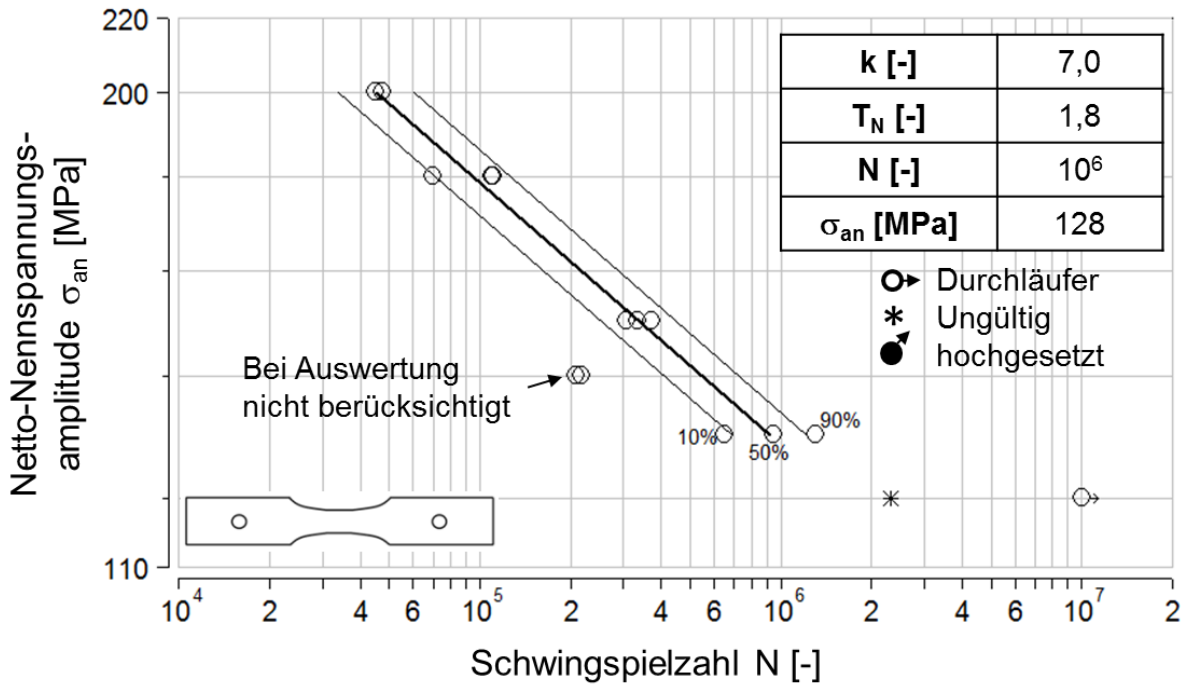


Abbildung 20-2: Wöhler-Diagramm AA5182 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$

Tabelle 20-3: Versuchsergebnisse AA5182 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA5182, poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-P-0-25-01	59,90	1,51	12,36	7,18	100	2,05E+04	Anriss
2	AA5-P-0-25-02	59,85	1,51	12,23	5,03	70	3,20E+05	Anriss
3	AA5-P-0-25-03	59,86	1,50	12,24	6,07	85	6,77E+04	Anriss
4	AA5-P-0-25-04	59,84	1,50	12,19	7,15	100	2,07E+04	Anriss
5	AA5-P-0-25-05	59,89	1,50	12,22	5,01	70	3,21E+05	Anriss
6	AA5-P-0-25-06	59,90	1,51	12,38	6,10	85	5,39E+04	Anriss
7	AA5-P-0-25-07	59,91	1,51	12,41	7,17	100	1,67E+04	Anriss
8	AA5-P-0-25-08	59,86	1,51	12,18	6,12	85	6,69E+04	Anriss
9	AA5-P-0-25-09	59,93	1,50	12,18	5,01	70	2,98E+05	Anriss
10	AA5-P-0-25-10	59,94	1,52	12,30	3,98	55	1,76E+06	Einspannbruch
11	AA5-P-0-25-11	59,89	1,51	12,11	3,97	55	5,65E+06	Anriss
12	AA5-P-0-25-12	59,83	1,51	12,11	3,60	50	2,89E+06	Einspannbruch
13	AA5-P-0-25-13	59,83	1,51	12,17	3,60	50	3,86E+06	Einspannbruch
14	AA5-P-0-25-14	59,72	1,50	12,02	3,58	50	1,00E+07	Durchläufer
15	AA5-P-0-25-15	59,78	1,52	12,18	3,62	50	1,00E+07	Durchläufer
16	AA5-P-0-25-16	59,85	1,52	12,10	3,99	55	1,00E+07	Durchläufer
17	AA5-P-0-25-17	59,75	1,51	12,24	4,30	60	1,00E+07	Durchläufer
18	AA5-P-0-25-18	59,87	1,50	12,12	4,30	60	1,41E+06	Anriss
19	AA5-P-0-25-19	59,90	1,50	12,20	7,16	100	1,66E+04	Anriss
20	AA5-P-0-25-20	59,90	1,50	12,19	5,01	70	2,52E+05	Anriss
21	AA5-P-0-25-21	59,77	1,51	12,20	6,11	85	7,79E+04	Anriss

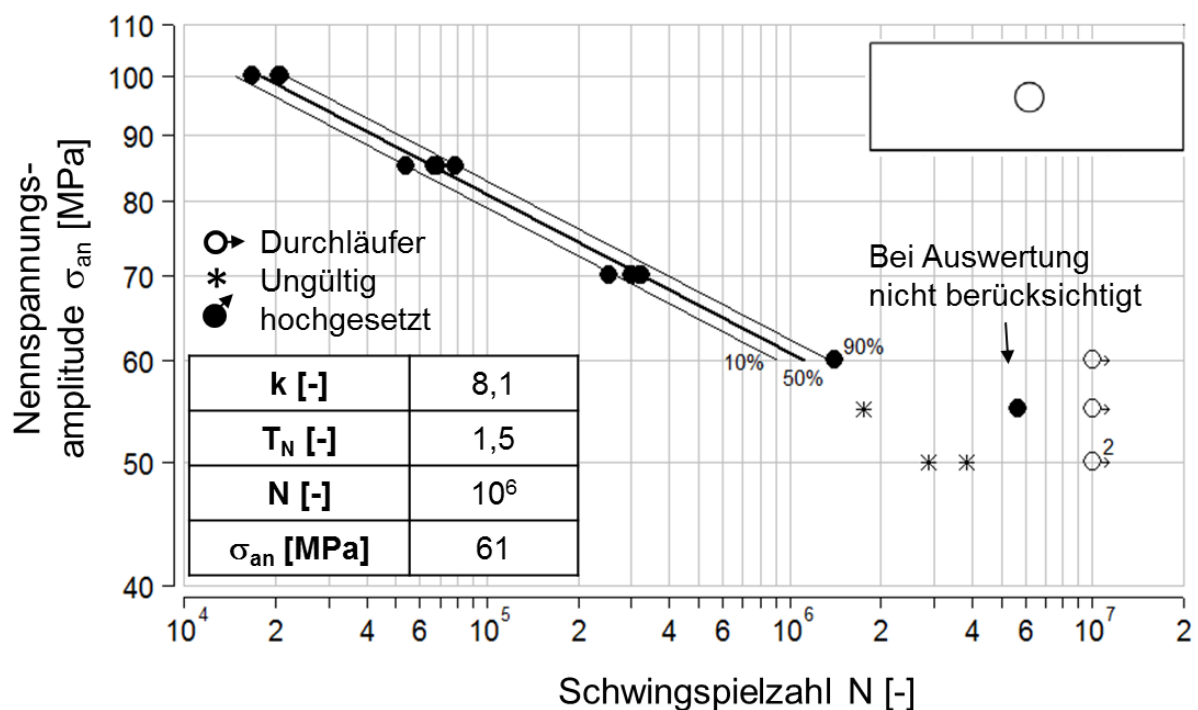


Abbildung 20-3: Wöhler-Diagramm AA5182 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-4: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA5182, Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-S1-0-1-01	9,90	1,50	1,49	100	1,48E+05	Anriss
2	AA5-S1-0-1-02	9,91	1,51	1,80	120	5,06E+04	Anriss
3	AA5-S1-0-1-03	9,93	1,51	1,80	120	6,96E+04	Anriss
4	AA5-S1-0-1-04	9,90	1,51	2,24	150	2,79E+04	Anriss
5	AA5-S1-0-1-05	9,91	1,50	1,78	120	7,93E+04	Anriss
6	AA5-S1-0-1-06	9,91	1,50	1,49	100	1,44E+05	Anriss
7	AA5-S1-0-1-07	9,90	1,49	1,25	85	4,07E+05	Anriss
8	AA5-S1-0-1-08	9,98	1,49	1,26	85	4,02E+05	Anriss
9	AA5-S1-0-1-09	9,93	1,50	2,23	150	2,94E+04	Anriss
10	AA5-S1-0-1-10	9,92	1,50	1,04	70	1,53E+06	Anriss
11	AA5-S1-0-1-11	9,91	1,50	2,23	150	2,93E+04	Anriss
12	AA5-S1-0-1-12	9,92	1,50	0,89	60	1,00E+07	Durchläufer
13	AA5-S1-0-1-13	9,90	1,49	2,21	150	4,17E+04	Anriss
14	AA5-S1-0-1-14	9,92	1,50	1,79	120	1,13E+05	Anriss
15	AA5-S1-0-1-15	9,93	1,50	1,49	100	1,84E+05	Anriss
16	AA5-S1-0-1-16	9,91	1,49	1,48	100	2,42E+05	Anriss
17	AA5-S1-0-1-17	9,90	1,50	0,89	60	1,00E+07	Durchläufer
18	AA5-S1-0-1-18	9,93	1,49	1,26	85	5,87E+05	Anriss
19	AA5-S1-0-1-19	9,90	1,50	1,26	85	4,38E+05	Anriss
20	AA5-S1-0-1-20	9,89	1,50	2,67	180	1,37E+04	Anriss
21	AA5-S1-0-1-21	9,89	1,49	2,65	180	1,52E+04	Anriss
22	AA5-S1-0-1-22	9,90	1,50	2,67	180	2,09E+04	Anriss

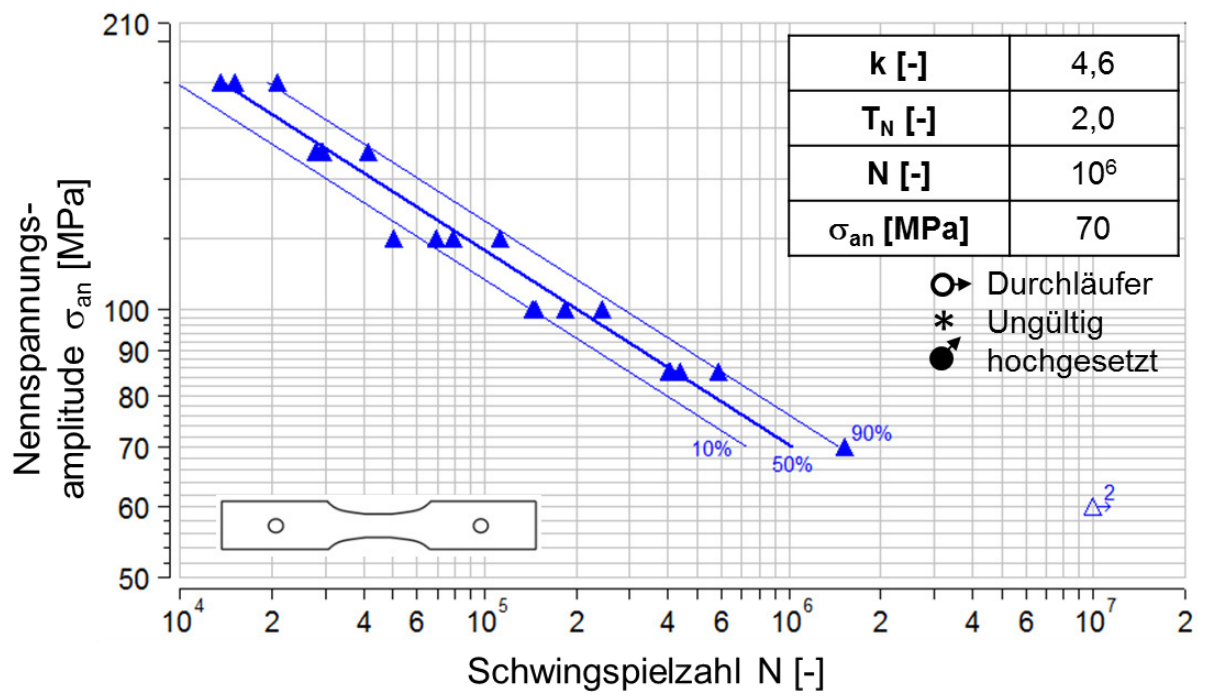


Abbildung 20-4: Wöhler-Diagramm AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-5: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_l = 0,2$, Netto-Nennspannung

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA5182, Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_l = 0.2$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-S1-20-1-01	9,92	1,38	1,64	120	1,01E+05	Anriss
2	AA5-S1-20-1-02	9,91	1,37	1,63	120	1,10E+05	Anriss
3	AA5-S1-20-1-03	9,93	1,37	1,36	100	1,49E+05	Anriss
4	AA5-S1-20-1-04	9,97	1,37	1,16	85	3,66E+05	Anriss
5	AA5-S1-20-1-05	9,97	1,37	1,16	85	2,55E+05	Anriss
6	AA5-S1-20-1-06	9,92	1,38	2,05	150	4,32E+04	Anriss
7	AA5-S1-20-1-07	9,97	1,37	0,96	70	2,14E+06	Anriss
8	AA5-S1-20-1-08	9,97	1,37	2,05	150	3,14E+04	Anriss
9	AA5-S1-20-1-09	9,92	1,37	1,16	85	3,46E+05	Anriss
10	AA5-S1-20-1-10	9,98	1,37	1,37	100	2,30E+05	Anriss
11	AA5-S1-20-1-11	9,97	1,37	1,02	75	8,70E+05	Anriss
12	AA5-S1-20-1-12	9,98	1,37	2,05	150	4,28E+04	Anriss
13	AA5-S1-20-1-13	9,97	1,37	1,64	120	9,17E+04	Anriss
14	AA5-S1-20-1-14	9,98	1,36	1,36	100	1,34E+05	Anriss
15	AA5-S1-20-1-15	9,97	1,37	0,89	65	1,29E+06	Anriss

Tabelle 20-6: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_l = 0,2$, Brutto-Nennspannung

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA5182, Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_l = 0.2$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Brutto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-S1-20-1-01	9,92	1,5	1,64	110	1,01E+05	Anriss
2	AA5-S1-20-1-02	9,91	1,5	1,63	110	1,10E+05	Anriss
3	AA5-S1-20-1-03	9,93	1,5	1,36	91	1,49E+05	Anriss
4	AA5-S1-20-1-04	9,97	1,5	1,16	78	3,66E+05	Anriss
5	AA5-S1-20-1-05	9,97	1,5	1,16	78	2,55E+05	Anriss
6	AA5-S1-20-1-06	9,92	1,5	2,05	138	4,32E+04	Anriss
7	AA5-S1-20-1-07	9,97	1,5	0,96	64	2,14E+06	Anriss
8	AA5-S1-20-1-08	9,97	1,5	2,05	137	3,14E+04	Anriss
9	AA5-S1-20-1-09	9,92	1,5	1,16	78	3,46E+05	Anriss
10	AA5-S1-20-1-10	9,98	1,5	1,37	91	2,30E+05	Anriss
11	AA5-S1-20-1-11	9,97	1,5	1,02	68	8,70E+05	Anriss
12	AA5-S1-20-1-12	9,98	1,5	2,05	137	4,28E+04	Anriss
13	AA5-S1-20-1-13	9,97	1,5	1,64	110	9,17E+04	Anriss
14	AA5-S1-20-1-14	9,98	1,5	1,36	91	1,34E+05	Anriss
15	AA5-S1-20-1-15	9,97	1,5	0,89	59	1,29E+06	Anriss

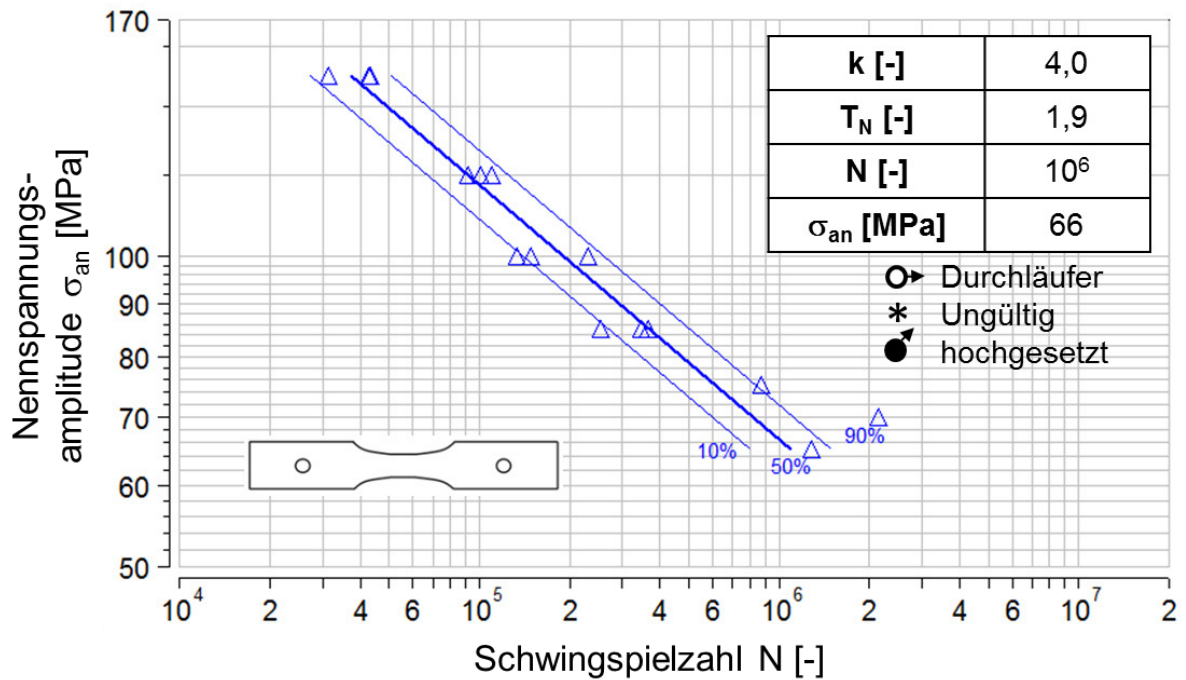


Abbildung 20-5: Wöhler-Diagramm AA5182 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_t = 0,2$, Nettonennspannung

Tabelle 20-7: Versuchsergebnisse AA5182 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtel Versuch AA5182, Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5_S_S1_01	60,04	1,50	12,04	7,20	100	1,71E+04	Anriss
2	AA5_S_S1_02	60,01	1,52	12,03	6,20	85	4,52E+04	Anriss
3	AA5_S_S1_03	60,02	1,51	12,03	6,16	85	4,34E+04	Anriss
4	AA5_S_S1_04	60,00	1,51	12,03	4,35	60	1,99E+05	Anriss
5	AA5_S_S1_05	59,97	1,51	12,04	5,07	70	9,48E+04	Anriss
6	AA5_S_S1_06	60,02	1,51	12,00	5,08	70	1,04E+05	Anriss
7	AA5_S_S1_07	60,03	1,50	12,03	6,12	85	4,15E+04	Bruch
8	AA5_S_S1_08	59,98	1,50	12,01	2,88	40	1,00E+07	Durchläufer
9	AA5_S_S1_09	60,02	1,51	11,99	4,35	60	1,79E+05	Anriss
10	AA5_S_S1_10	60,00	1,50	12,03	4,32	60	1,92E+05	Anriss
11	AA5_S_S1_11	60,01	1,51	12,00	7,25	100	1,52E+04	Anriss
12	AA5_S_S1_12	60,03	1,51	12,03	5,07	70	1,01E+05	Anriss
13	AA5_S_S1_13	60,02	1,51	12,03	3,62	50	4,09E+05	Anriss
14	AA5_S_S1_14	59,98	1,51	12,03	3,62	50	3,64E+05	Anriss
15	AA5_S_S1_15	60,01	1,50	12,01	3,60	50	4,31E+05	Anriss
16	AA5_S_S1_16	59,99	1,51	12,02	7,24	100	1,48E+04	Anriss
17	AA5_S_S1_17	60,03	1,51	12,00	3,63	50	3,50E+05	Anriss
18	AA5_S_S1_18	59,99	1,51	12,02	2,90	40	1,00E+07	Durchläufer
19	AA5_S_S1_08h	59,98	1,50	12,01	7,20	100	1,47E+04	Bruch
20	AA5_S_S1_18h	59,99	1,51	12,02	6,16	85	3,91E+04	Anriss

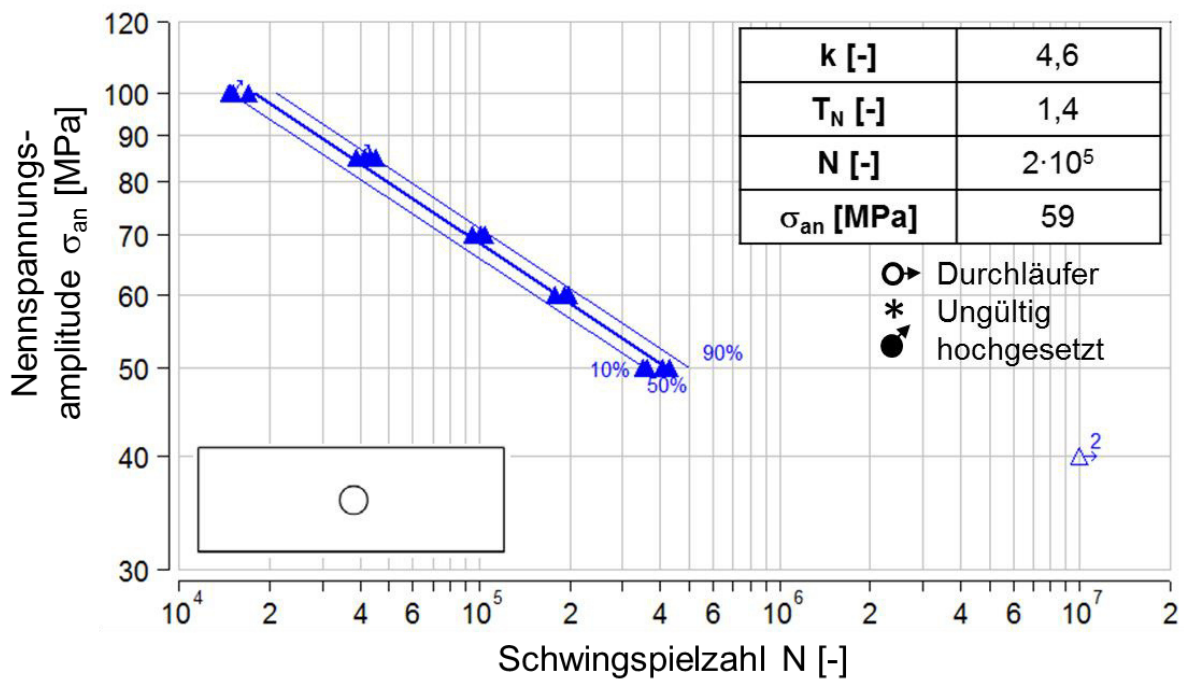


Abbildung 20-6: Wöhler-Diagramm AA5182 Schneiden I, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-8: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA5182, Laser, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-L-0-1-01	9,79	1,52	2,23	150	3,94E+04	Anriss
2	AA5-L-0-1-02	9,80	1,52	2,23	150	4,25E+04	Anriss
3	AA5-L-0-1-03	9,81	1,53	1,80	120	7,23E+04	Anriss
4	AA5-L-0-1-04	9,78	1,52	1,78	120	1,09E+05	Anriss
5	AA5-L-0-1-05	9,73	1,53	1,49	100	2,44E+05	Anriss
6	AA5-L-0-1-06	9,80	1,52	1,49	100	3,08E+05	Anriss
7	AA5-L-0-1-07	9,75	1,52	1,26	85	3,03E+05	Anriss
8	AA5-L-0-1-08	9,72	1,52	2,22	150	2,53E+04	Anriss
9	AA5-L-0-1-09	9,78	1,53	2,25	150	3,46E+04	Anriss
10	AA5-L-0-1-10	9,73	1,52	1,78	120	1,04E+05	Anriss
11	AA5-L-0-1-11	9,75	1,52	1,78	120	9,93E+04	Anriss
12	AA5-L-0-1-12	9,72	1,52	1,48	100	2,13E+05	Anriss
13	AA5-L-0-1-13	9,81	1,53	1,50	100	1,22E+05	Anriss
14	AA5-L-0-1-14	9,78	1,52	1,26	85	3,93E+05	Anriss
15	AA5-L-0-1-15	9,76	1,53	1,27	85	4,88E+05	Anriss
16	AA5-L-0-1-16	9,74	1,52	1,26	85	4,16E+05	Anriss
17	AA5-L-0-1-17	9,74	1,51	1,47	100	1,11E+05	Anriss
18	AA5-L-0-1-18	9,78	1,52	1,04	70	7,36E+05	Anriss
19	AA5-L-0-1-19	9,74	1,51	0,88	60	1,00E+07	Durchläufer
20	AA5-L-0-1-20	9,72	1,51	0,88	60	1,00E+07	Durchläufer
21	AA5-L-0-1-21	9,79	1,51	2,66	180	8,82E+03	Anriss
22	AA5-L-0-1-22	9,72	1,51	2,64	180	8,74E+03	Anriss
23	AA5-L-0-1-23	9,73	1,51	2,65	180	7,58E+03	Anriss

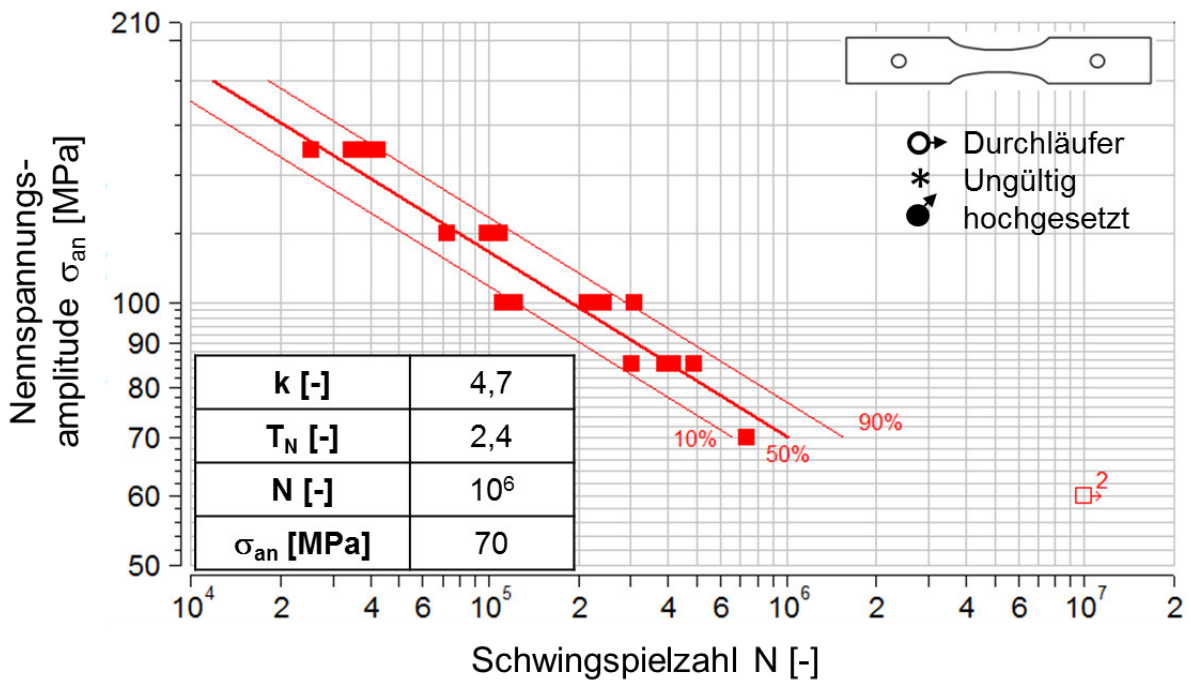


Abbildung 20-7: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-9: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschn., $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Netto-Nennspannung

Versuchsergebnisse spannungsgeregteltes Versuch AA5182, Laser, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0.2$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-L-20-1-01	9,58	1,32	1,27	100	2,02E+05	Anriss
2	AA5-L-20-1-02	9,67	1,36	1,58	120	8,38E+04	Anriss
3	AA5-L-20-1-03	9,48	1,35	1,92	150	4,18E+04	Anriss
4	AA5-L-20-1-04	9,63	1,35	1,95	150	3,63E+04	Anriss
5	AA5-L-20-1-05	9,46	1,35	1,28	100	2,37E+05	Anriss
6	AA5-L-20-1-06	9,73	1,34	1,57	120	1,09E+05	Anriss
7	AA5-L-20-1-07	9,65	1,43	2,07	150	2,22E+04	Anriss
8	AA5-L-20-1-08	9,67	1,36	1,12	85	5,58E+05	Anriss
9	AA5-L-20-1-09	9,70	1,34	1,11	85	1,10E+06	Anriss
10	AA5-L-20-1-10	9,58	1,36	0,91	70	1,00E+07	Durchläufer
11	AA5-L-20-1-10	9,58	1,36	1,95	150	4,34E+04	hochgesetzt, Anriss
12	AA5-L-20-1-11	9,72	1,37	1,60	120	7,18E+04	Anriss
13	AA5-L-20-1-12	9,75	1,36	1,59	120	8,59E+04	Anriss
14	AA5-L-20-1-13	9,77	1,35	1,32	100	2,58E+05	Anriss
15	AA5-L-20-1-14	9,83	1,35	1,13	85	6,72E+05	Anriss
16	AA5-L-20-1-15	9,78	1,37	1,34	100	1,68E+05	Anriss
17	AA5-L-20-1-16	9,81	1,36	1,13	85	3,61E+05	Anriss
18	AA5-L-20-1-17	9,86	1,35	0,93	70	1,00E+07	Durchläufer

Tabelle 20-10: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschn., $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Brutto-Nennspannung

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA5182, Laser, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0.2$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Brutto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-L-20-1-01	9,58	1,5	1,27	88	2,02E+05	Anriss
2	AA5-L-20-1-02	9,67	1,5	1,58	109	8,38E+04	Anriss
3	AA5-L-20-1-03	9,48	1,5	1,92	135	4,18E+04	Anriss
4	AA5-L-20-1-04	9,63	1,5	1,95	135	3,63E+04	Anriss
5	AA5-L-20-1-05	9,46	1,5	1,28	90	2,37E+05	Anriss
6	AA5-L-20-1-06	9,73	1,5	1,57	107	1,09E+05	Anriss
7	AA5-L-20-1-07	9,65	1,5	2,07	143	2,22E+04	Anriss
8	AA5-L-20-1-08	9,67	1,5	1,12	77	5,58E+05	Anriss
9	AA5-L-20-1-09	9,70	1,5	1,11	76	1,10E+06	Anriss
10	AA5-L-20-1-10	9,58	1,5	0,91	63	1,00E+07	Durchläufer
11	AA5-L-20-1-10	9,58	1,5	1,95	136	4,34E+04	hochgesetzt, Anriss
12	AA5-L-20-1-11	9,72	1,5	1,60	110	7,18E+04	Anriss
13	AA5-L-20-1-12	9,75	1,5	1,59	109	8,59E+04	Anriss
14	AA5-L-20-1-13	9,77	1,5	1,32	90	2,58E+05	Anriss
15	AA5-L-20-1-14	9,83	1,5	1,13	77	6,72E+05	Anriss
16	AA5-L-20-1-15	9,78	1,5	1,34	91	1,68E+05	Anriss
17	AA5-L-20-1-16	9,81	1,5	1,13	77	3,61E+05	Anriss
18	AA5-L-20-1-17	9,86	1,5	0,93	63	1,00E+07	Durchläufer

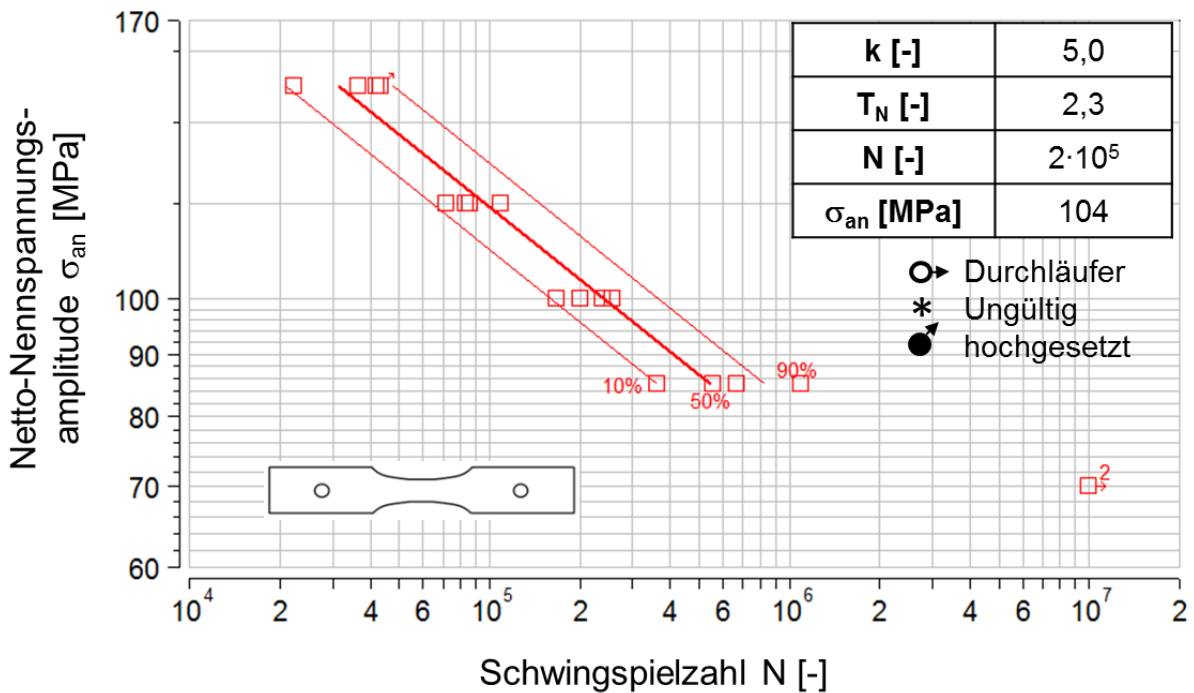


Abbildung 20-8: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschnitten, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,2$, Nettonennspannung

Tabelle 20-11: Versuchsergebnisse AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA5182, Laser, $K_t = 2,5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA5-L-0-25-01	59,80	1,52	12,13	5,07	70	9,79E+04	Anriss
2	AA5-L-0-25-02	59,78	1,53	12,15	4,37	60	1,48E+05	Anriss
3	AA5-L-0-25-03	59,80	1,53	12,14	5,10	70	8,39E+04	Anriss
4	AA5-L-0-25-04	59,81	1,53	12,13	4,38	60	1,59E+05	Anriss
5	AA5-L-0-25-05	59,77	1,53	12,12	5,10	70	9,38E+04	Anriss
6	AA5-L-0-25-06	59,81	1,52	12,12	3,62	50	3,98E+05	Anriss
7	AA5-L-0-25-07	59,80	1,53	12,14	4,38	60	1,87E+05	Anriss
8	AA5-L-0-25-08	59,79	1,53	12,13	2,92	40	8,32E+05	Anriss
9	AA5-L-0-25-09	59,81	1,53	12,13	5,11	70	9,91E+04	Anriss
10	AA5-L-0-25-10	59,81	1,53	12,13	4,38	60	1,96E+05	Anriss
11	AA5-L-0-25-11	59,78	1,53	12,12	3,65	50	4,75E+05	Anriss
12	AA5-L-0-25-12	59,80	1,53	12,13	2,92	40	9,83E+05	Anriss
13	AA5-L-0-25-13	59,80	1,53	12,13	6,20	85	3,48E+04	Anriss
14	AA5-L-0-25-14	59,81	1,53	12,12	6,20	85	3,39E+04	Anriss
15	AA5-L-0-25-15	59,78	1,52	12,13	6,16	85	3,48E+04	Anriss
16	AA5-L-0-25-16	59,81	1,53	12,09	6,21	85	3,77E+04	Anriss
17	AA5-L-0-25-17	59,78	1,52	12,12	3,62	50	2,75E+05	Anriss
18	AA5-L-0-25-18	59,78	1,52	12,10	3,62	50	3,91E+05	Anriss
19	AA5-L-0-25-19	59,79	1,52	12,09	2,54	35	5,71E+06	Anriss
20	AA5-L-0-25-20	59,77	1,51	12,15	2,52	35	1,00E+07	Durchläufer
21	AA5-L-0-25-21	59,80	1,52	12,14	2,54	35	1,88E+06	Anriss
22	AA5-L-0-25-22	59,74	1,52	12,12	2,18	30	1,00E+07	Durchläufer

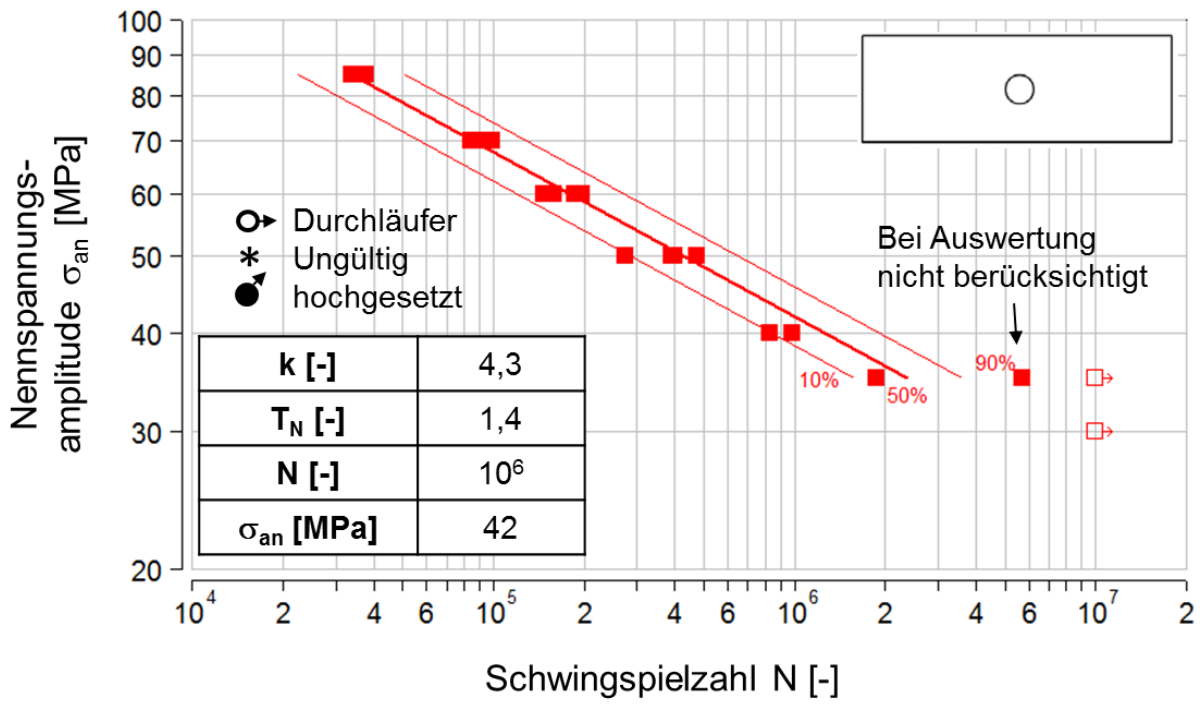


Abbildung 20-9: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-12: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregteter Versuch AA6082, Laser, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingenspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-L-25-S-01	60,01	1,52	12,02	4,38	60	8,77E+04	Anriss
2	AA-6-L-25-S-02	60,02	1,52	12,02	3,65	50	1,48E+05	Anriss
3	AA-6-L-25-S-03	60,04	1,52	12,02	5,11	70	2,32E+04	Anriss
4	AA-6-L-25-S-04	59,94	1,52	12,00	2,92	40	6,02E+05	Anriss
5	AA-6-L-25-S-05	60,02	1,52	12,01	3,28	45	2,71E+05	Anriss
6	AA-6-L-25-S-06	59,98	1,52	12,02	3,28	45	2,55E+05	Anriss
7	AA-6-L-25-S-07	60,02	1,52	12,01	4,38	60	7,60E+04	Anriss
8	AA-6-L-25-S-08	59,98	1,52	12,02	4,74	65	4,54E+04	Anriss
9	AA-6-L-25-S-09	60,09	1,52	12,01	2,56	35	5,73E+05	Anriss
10	AA-6-L-25-S-10	60,01	1,52	12,00	3,65	50	2,12E+05	Anriss
11	AA-6-L-25-S-11	60,04	1,52	11,98	2,56	35	4,60E+05	Anriss
12	AA-6-L-25-S-12	60,01	1,52	11,99	2,92	40	4,59E+05	Anriss
13	AA-6-L-25-S-13	59,97	1,52	12,01	1,82	25	1,00E+07	Durchläufer
14	AA-6-L-25-S-14	60,01	1,52	12,00	1,82	25	1,00E+07	Durchläufer
15	AA-6-L-25-S-15	59,99	1,52	12,01	4,38	60	8,32E+04	Anriss
16	AA-6-L-25-S-16	60,04	1,52	12,01	4,75	65	4,04E+04	Anriss
17	AA-6-L-25-S-17	59,99	1,52	12,03	4,74	65	3,45E+04	Anriss
18	AA-6-L-25-S-18	59,99	1,52	12,01	4,74	65	3,89E+04	Anriss
19	AA-6-L-25-S-19	59,96	1,52	12,02	4,74	65	4,70E+04	Anriss
20	AA-6-L-25-S-20	60,00	1,52	12,07	4,74	65	3,83E+04	Anriss
21	AA-6-L-25-S-21	59,97	1,52	12,06	4,73	65	3,73E+04	Anriss
22	AA-6-L-24	59,91	1,51	12,03	6,15	85	1,13E+04	Bruch
23	AA-6-L-25	59,94	1,5	12,01	6,11	85	1,16E+04	Bruch
24	AA-6-L-26	59,94	1,5	11,96	6,12	85	1,07E+04	Bruch
25	AA-6-L-27	59,98	1,51	12,03	5,07	70	3,78E+04	Bruch
26	AA-6-L-28	59,94	1,51	12,01	5,07	70	3,86E+04	Bruch

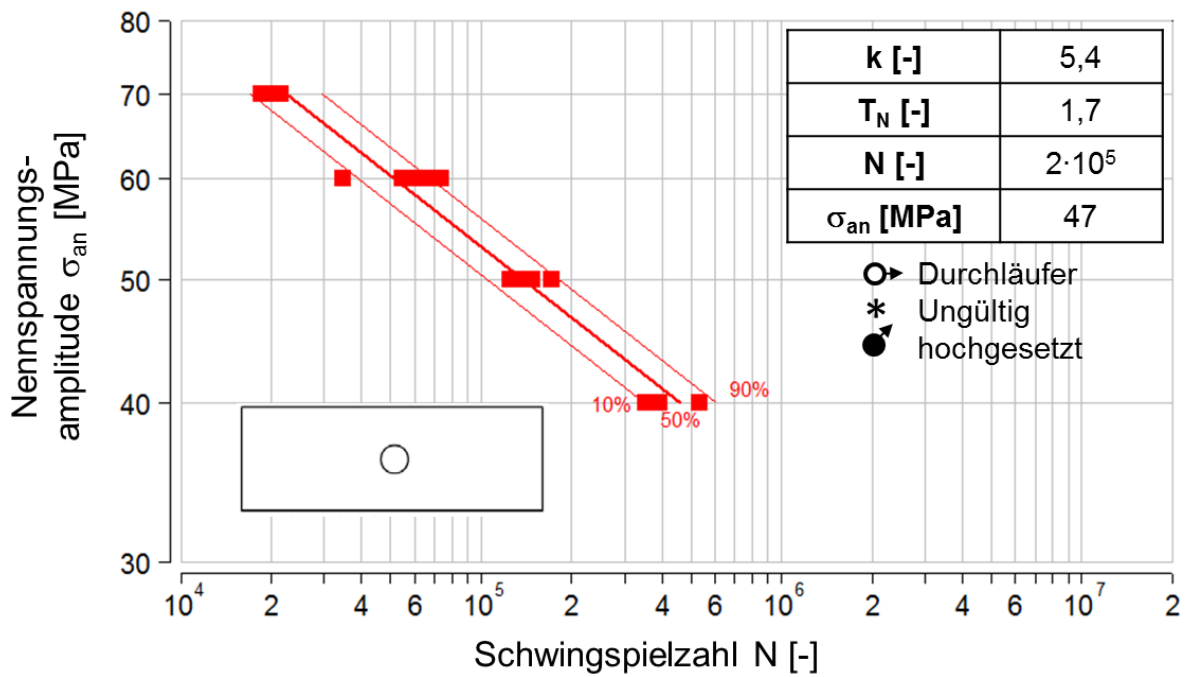


Abbildung 20-10: Wöhler-Diagramm AA5182 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Tabelle 20-13: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA6082, poliert, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6-P-0-1-01	9,77	1,52	1,49	100	1,00E+07	Durchläufer
2	AA6-P-0-1-02	9,78	1,52	2,23	150	1,95E+05	Anriss
3	AA6-P-0-1-03	9,78	1,52	2,68	180	5,32E+04	Anriss
4	AA6-P-0-1-04	9,68	1,52	2,21	150	1,97E+05	Anriss
5	AA6-P-0-1-05	9,74	1,52	2,67	180	4,71E+04	Anriss
6	AA6-P-0-1-06	9,77	1,52	1,78	120	6,41E+05	Anriss
7	AA6-P-0-1-07	9,84	1,52	1,80	120	1,17E+06	Anriss
8	AA6-P-0-1-08	9,81	1,52	2,68	180	5,02E+04	Anriss
9	AA6-P-0-1-09	9,82	1,52	2,09	140	2,90E+05	Anriss
10	AA6-P-0-1-10	9,87	1,52	2,25	150	1,42E+05	Anriss
11	AA6-P-0-1-11	9,85	1,52	1,80	120	4,00E+05	Anriss
12	AA6-P-0-1-12	9,87	1,52	1,80	120	8,76E+05	Anriss
13	AA6-P-0-1-13	9,79	1,52	1,64	110	2,03E+06	Anriss
14	AA6-P-0-1-14	9,80	1,52	2,09	140	3,03E+05	Anriss
15	AA6-P-0-1-15	9,72	1,51	2,22	151	1,93E+05	Anriss
16	AA6-P-0-1-16	9,75	1,52	2,67	180	5,24E+04	Anriss
17	AA6-P-0-1-17	9,71	1,52	1,55	105	1,00E+07	Durchläufer
18	AA6-P-0-1-18	9,77	1,52	2,38	160	1,27E+05	Anriss

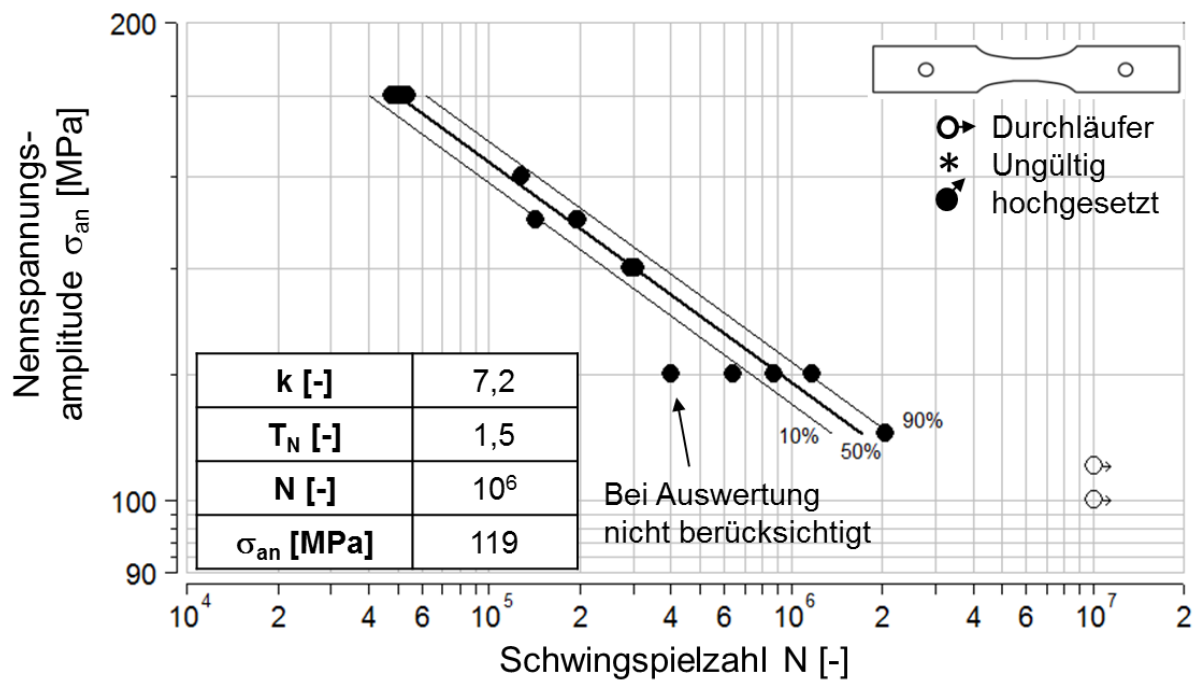


Abbildung 20-11: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-14: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0.1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6-P-P-01	9,96	1,43	2,56	180	5,58E+04	Bruch
2	AA6-P-P-02	9,98	1,44	2,16	150	1,89E+05	Bruch
3	AA6-P-P-03	9,97	1,43	1,71	120	9,22E+05	Bruch
4	AA6-P-P-04	9,98	1,44	2,59	180	5,43E+04	Bruch
5	AA6-P-P-05	9,96	1,45	2,17	150	2,35E+05	Bruch
6	AA6-P-P-06	9,97	1,44	2,15	150	2,24E+05	Bruch
7	AA6-P-P-07	9,99	1,44	1,73	120	1,35E+06	Bruch
8	AA6-P-P-08	9,97	1,44	2,58	180	6,32E+04	Bruch
9	AA6-P-P-09	9,97	1,43	1,43	100	1,00E+07	Durchläufer
10	AA6-P-P-10	9,97	1,44	1,72	120	2,06E+06	Bruch
11	AA6-P-P-11	9,99	1,44	1,44	100	1,00E+07	Durchläufer
12	AA6-P-P-12	9,97	1,44	1,72	120	1,52E+06	Bruch
13	AA6-P-P-09h	9,97	1,43	2,57	180	5,62E+04	Bruch
14	AA6-P-P-11h	9,99	1,44	2,16	150	1,72E+05	Bruch

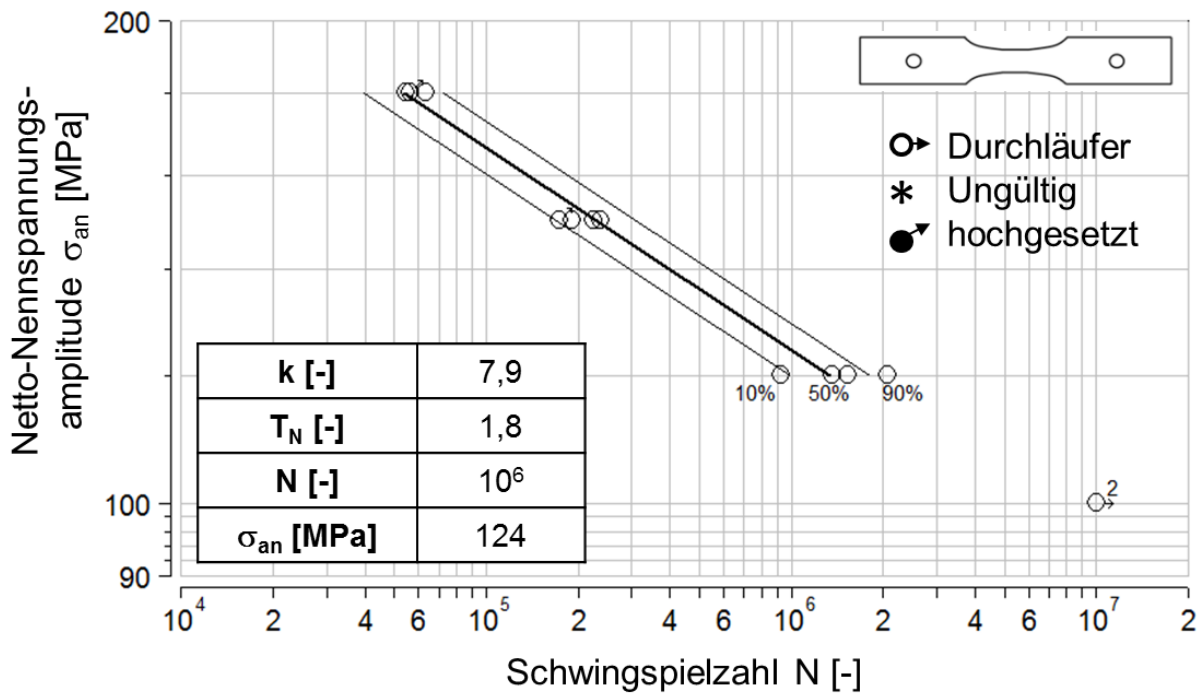


Abbildung 20-12: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,1$

Tabelle 20-15: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$

AA6082, poliert, $K_t = 2.5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-P-25-01	59,92	1,52	12,24	5,07	70	2,96E+05	Anriss
2	AA-6-P-25-02	59,82	1,52	12,25	5,79	80	1,31E+05	Anriss
3	AA-6-P-25-03	59,89	1,52	12,26	5,07	70	3,56E+05	Anriss
4	AA-6-P-25-04	59,92	1,52	12,26	6,52	90	4,80E+04	Anriss
5	AA-6-P-25-05	59,92	1,51	12,22	5,08	70	2,26E+05	Anriss
6	AA-6-P-25-06	59,91	1,52	12,23	6,52	90	3,91E+04	Anriss
7	AA-6-P-25-07	59,92	1,52	12,13	5,81	80	9,55E+04	Anriss
8	AA-6-P-25-08	59,88	1,52	12,17	5,80	80	1,04E+05	Anriss
9	AA-6-P-25-09	59,89	1,52	12,14	4,36	60	1,61E+06	Anriss
10	AA-6-P-25-10	60,08	1,52	12,20	6,55	90	4,10E+04	Anriss
11	AA-6-P-25-11	59,88	1,52	12,19	4,71	65	5,07E+05	Anriss
12	AA-6-P-25-12	59,84	1,52	12,20	4,71	65	5,22E+05	Anriss
13	AA-6-P-25-13	59,89	1,52	12,22	4,71	65	5,27E+05	Anriss
14	AA-6-P-25-14	59,84	1,52	12,15	3,99	55	4,37E+06	Anriss
15	AA-6-P-25-15	59,89	1,52	12,18	7,25	100	2,01E+04	Anriss
16	AA-6-P-25-16	59,88	1,52	12,16	7,25	100	1,95E+04	Anriss
17	AA-6-P-25-17	59,87	1,52	12,16	3,63	50	1,00E+07	Durchläufer

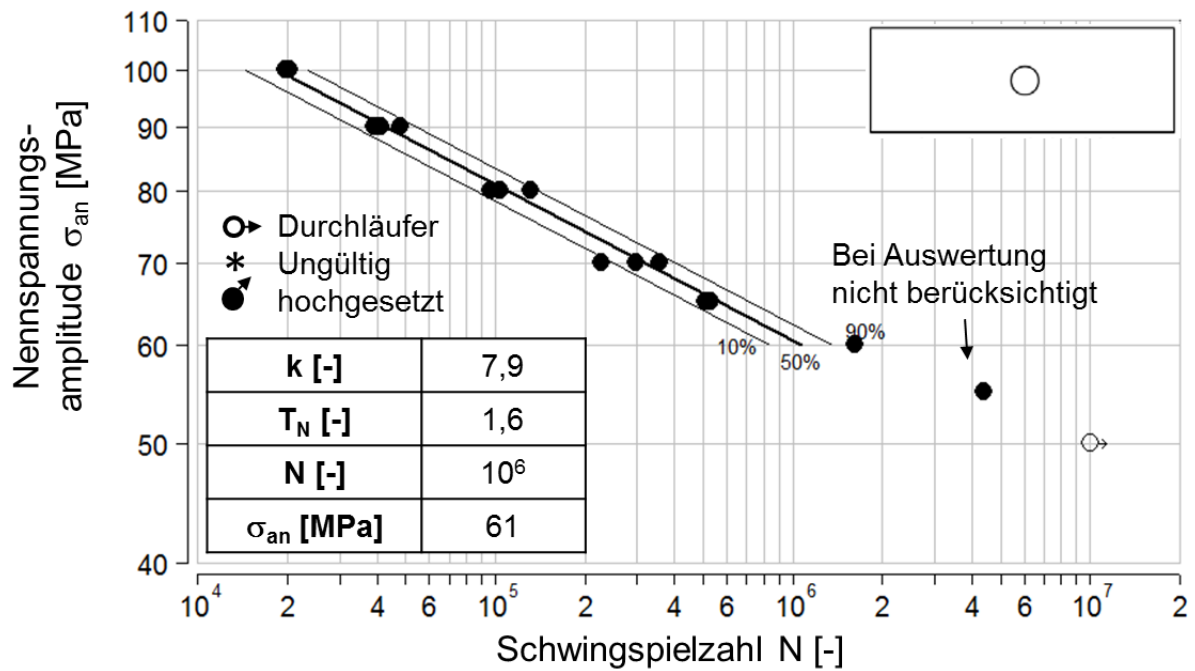


Abbildung 20-13: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-16: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregt Versuch AA6082, poliert, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-P-25-01-01	59,88	1,52	12,20	5,07	70	5,81E+04	Anriss
2	AA-6-P-25-01-02	59,87	1,52	12,18	5,07	70	6,45E+04	Anriss
3	AA-6-P-25-01-03	59,88	1,52	12,20	3,99	55	7,50E+05	Anriss
4	AA-6-P-25-01-04	59,82	1,52	12,21	3,62	50	1,00E+06	Anriss
5	AA-6-P-25-01-05	59,92	1,52	12,25	4,35	60	2,79E+05	Anriss
6	AA-6-P-25-01-06	59,88	1,52	12,20	4,35	60	2,57E+05	Anriss
7	AA-6-P-25-01-07	59,90	1,52	12,20	3,63	50	2,93E+06	Einspannbruch
8	AA-6-P-25-01-08	59,89	1,52	12,22	4,35	60	2,20E+05	Anriss
9	AA-6-P-25-01-09	59,89	1,52	12,30	5,79	80	3,18E+04	Anriss
10	AA-6-P-25-01-10	59,91	1,52	12,18	5,80	80	3,14E+04	Anriss
11	AA-6-P-25-01-11	59,89	1,52	12,17	3,63	50	1,47E+06	Anriss
12	AA-6-P-25-01-12	59,91	1,52	12,20	5,08	70	7,23E+04	Anriss
13	AA-6-P-25-01-13	59,91	1,52	12,22	3,26	45	1,49E+06	Einspannbruch
14	AA-6-P-25-01-14	59,83	1,52	12,23	5,79	80	1,99E+04	Anriss
15	AA-6-P-25-01-15	59,90	1,52	12,18	5,80	80	2,70E+04	Anriss
16	AA-6-P-25-01-16	60,10	1,52	12,22	3,64	50	1,79E+06	Einspannbruch
17	AA-6-P-25-01-17	59,85	1,52	12,17	2,90	40	1,00E+07	Durchläufer

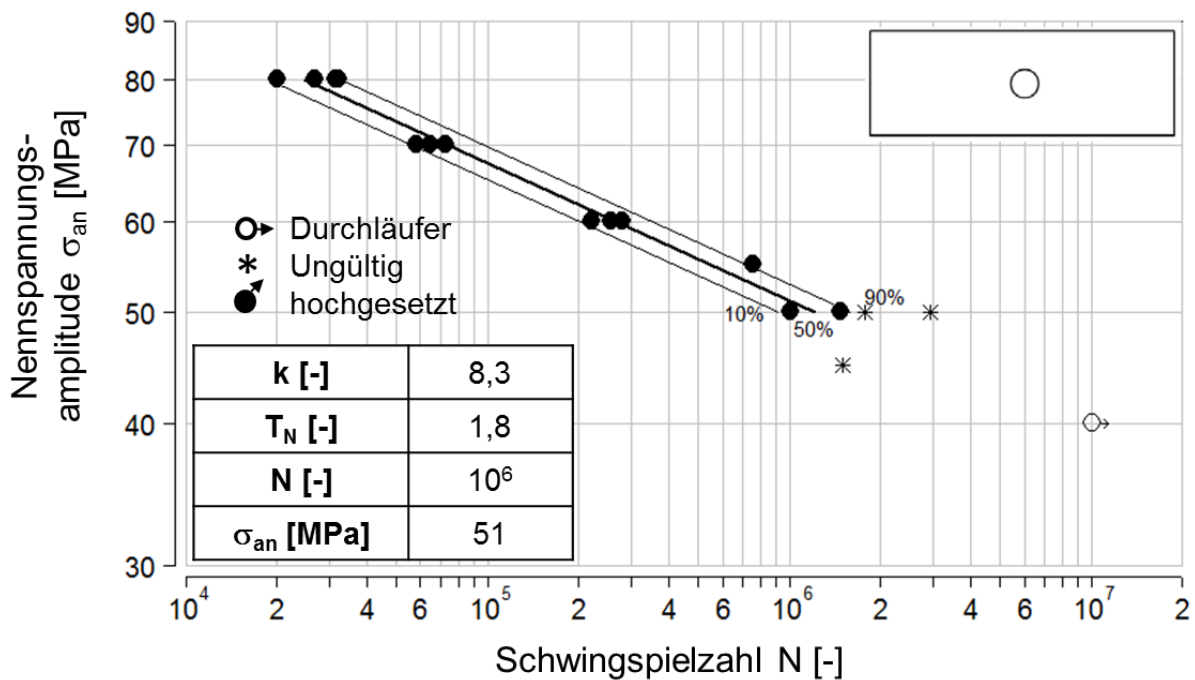
Abbildung 20-14: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Tabelle 20-17: Versuchsergebnisse AA6082 poliert, $K_t = 4,6$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregt Versuch AA6082, poliert, $K_t = 4,7$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-P-47-01	30,14	1,52	2,75	60	1,42E+05	Anriss
2	AA-6-P-47-02	30,15	1,52	2,29	50	3,35E+05	Anriss
3	AA-6-P-47-03	30,16	1,52	2,75	60	1,76E+05	Anriss
4	AA-6-P-47-04	30,18	1,52	1,38	30	4,30E+06	Anriss
5	AA-6-P-47-05	30,14	1,52	3,67	80	3,37E+04	Anriss
6	AA-6-P-47-06	30,18	1,52	3,67	80	3,70E+04	Anriss
7	AA-6-P-47-07	30,15	1,52	3,67	80	3,17E+04	Anriss
8	AA-6-P-47-08	30,17	1,52	3,67	80	3,43E+04	Anriss
9	AA-6-P-47-09	30,17	1,52	2,75	60	1,65E+05	Anriss
10	AA-6-P-47-10	30,17	1,52	2,29	50	3,28E+05	Anriss
11	AA-6-P-47-11	30,18	1,52	2,29	50	3,53E+05	Anriss
12	AA-6-P-47-12	30,19	1,52	1,15	25	1,00E+07	Durchläufer
13	AA-6-P-47-13	30,19	1,52	2,29	50	2,96E+05	Anriss
14	AA-6-P-47-14	30,15	1,52	2,75	60	1,50E+05	Anriss
15	AA-6-P-47-15	30,13	1,52	1,83	40	7,85E+05	Anriss
16	AA-6-P-47-16	30,13	1,52	1,83	40	8,33E+05	Anriss
17	AA-6-P-47-17	30,16	1,52	1,83	40	8,20E+05	Anriss

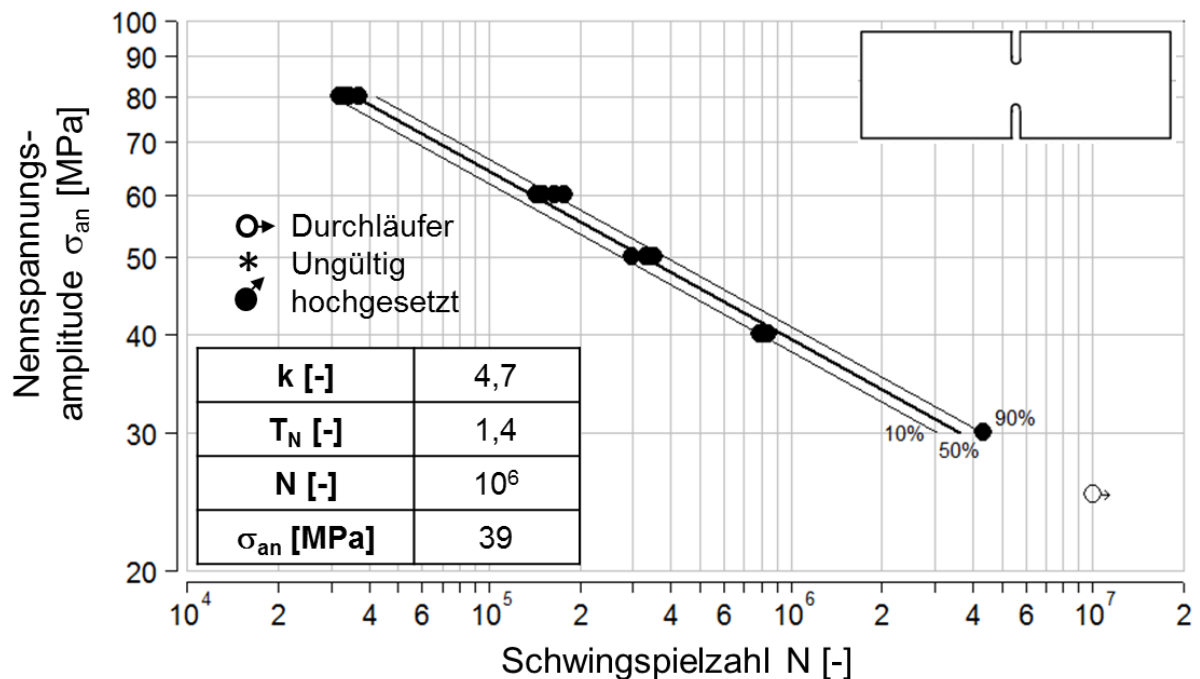
Abbildung 20-15: Wöhler-Diagramm AA6082 poliert, $K_t = 4,6$, $R = -1$

Tabelle 20-18: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Laser, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6-L-0-1-01	9,92	1,56	1,86	120	1,15E+05	Anriss
2	AA6-L-0-1-02	9,92	1,52	2,26	150	6,24E+04	Anriss
3	AA6-L-0-1-03	10,04	1,52	1,07	70	2,46E+06	Anriss
4	AA6-L-0-1-04	9,99	1,52	1,52	100	4,08E+05	Anriss
5	AA6-L-0-1-05	9,98	1,52	1,82	120	1,18E+05	Anriss
6	AA6-L-0-1-06	10,04	1,53	2,30	150	4,17E+04	Anriss
7	AA6-L-0-1-07	9,95	1,52	2,27	150	3,70E+04	Anriss
8	AA6-L-0-1-08	9,92	1,52	1,28	85	5,66E+05	Anriss
9	AA6-L-0-1-09	10,04	1,52	1,53	100	3,55E+05	Anriss
10	AA6-L-0-1-10	10,02	1,53	1,30	85	7,94E+05	Anriss
11	AA6-L-0-1-11	10,01	1,52	1,00	66	1,00E+07	Durchläufer
12	AA6-L-0-1-12	10,06	1,52	1,30	85	4,94E+05	Anriss
13	AA6-L-0-1-13	9,97	1,52	1,52	100	2,96E+05	Anriss
14	AA6-L-0-1-14	10,01	1,52	1,83	120	1,11E+05	Anriss
15	AA6-L-0-1-15	10,04	1,52	1,07	70	2,16E+06	Anriss
16	AA6-L-0-1-16	9,91	1,52	2,26	150	7,71E+04	Anriss
17	AA6-L-0-1-17	10,04	1,52	1,83	120	1,61E+05	Anriss
18	AA6-L-0-1-18	10,03	1,52	1,30	85	7,89E+05	Anriss
19	AA6-L-01	9,99	1,51	2,72	180	1,30E+04	Bruch
20	AA6-L-02	9,96	1,51	2,71	180	1,22E+04	Bruch
21	AA6-L-03	9,97	1,51	2,71	180	1,35E+04	Bruch

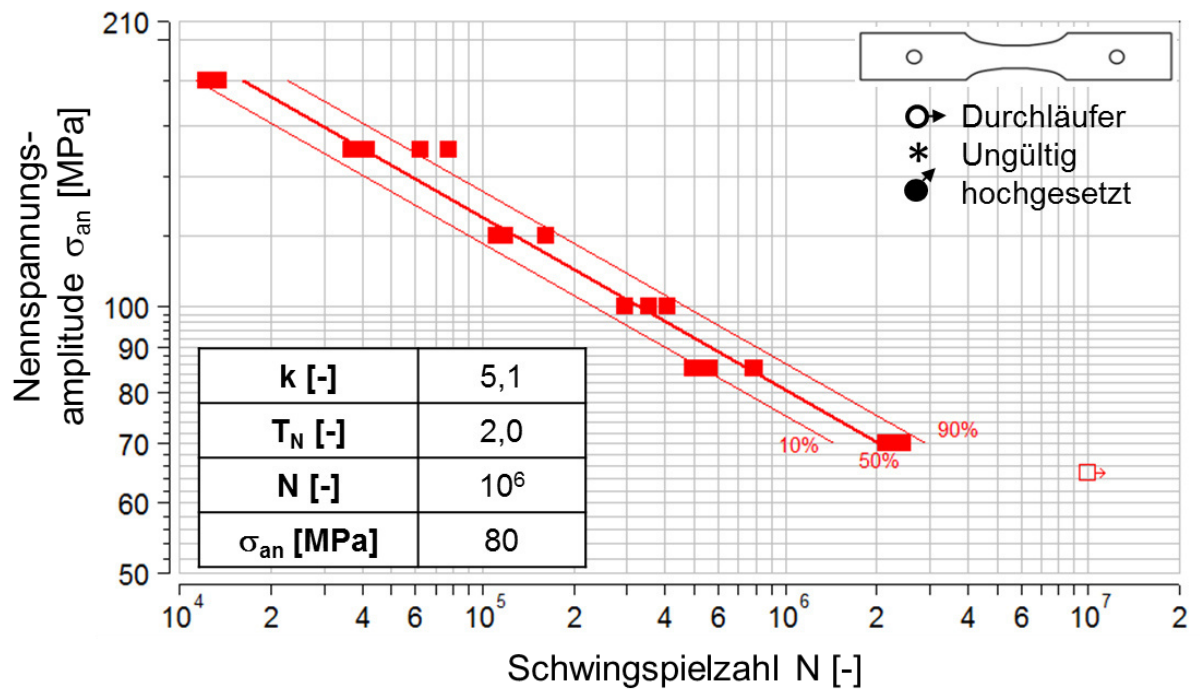


Abbildung 20-16: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-19: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, vorgereckt, $\phi_l = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Laser, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi = 0,1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraft-amplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungs-amplitude σ_{an} [MPa]	Schwing-spielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_L_P_01	9,97	1,44	1,01	70	1,25E+06	Einspannbruch
2	AA6_L_P_02	9,97	1,44	2,58	180	1,37E+04	Bruch
3	AA6_L_P_03	9,96	1,44	2,58	180	1,79E+04	Bruch
4	AA6_L_P_04	9,95	1,44	2,15	150	5,68E+04	Bruch
5	AA6_L_P_05	9,96	1,44	2,15	150	4,11E+04	Bruch
6	AA6_L_P_06	9,96	1,44	2,58	180	1,33E+04	Bruch
7	AA6_L_P_07	9,96	1,44	1,72	120	1,37E+05	Bruch
8	AA6_L_P_08	9,95	1,43	1,71	120	1,49E+05	Bruch
9	AA6_L_P_09	9,93	1,44	2,15	150	4,32E+04	Bruch
10	AA6_L_P_10	9,98	1,43	1,71	120	1,18E+05	Bruch
11	AA6_L_P_11	9,97	1,44	1,15	80	6,67E+05	Anriss
12	AA6_L_P_12	9,98	1,43	1,43	100	3,45E+05	Bruch
13	AA6_L_P_13	9,98	1,44	1,44	100	1,71E+05	Bruch
14	AA6_L_P_14	9,97	1,44	1,44	100	2,24E+05	Bruch
15	AA6_L_P_15	9,94	1,45	1,15	80	1,88E+06	Bruch
16	AA6_L_P_16	9,96	1,44	1,15	80	7,96E+05	Bruch
17	AA6_L_P_17	9,94	1,44	1,00	70	1,00E+07	Durchläufer
18	AA6_L_P_18	9,93	1,44	1,00	70	1,00E+07	Durchläufer
18	AA6_L_P_19	9,9	1,43	2,12	150	5,02E+04	Bruch
18	AA6_L_P_20	9,97	1,43	1,141	80	1,90E+06	Bruch
18	AA6_L_P_18h	9,93	1,44	2,574	180	2,14E+04	Bruch

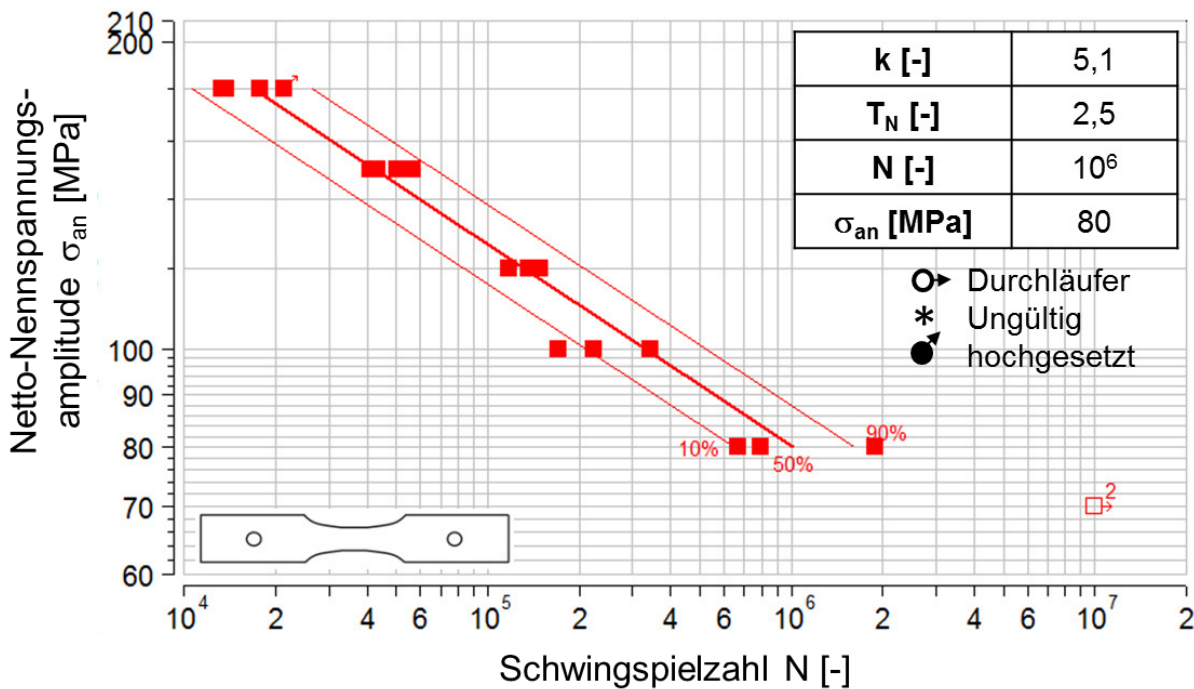


Abbildung 20-17: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_l = 0,1$

Tabelle 20-20: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA6082, Laser, $K_t = 2,5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-L-25-01	60,00	1,52	12,02	4,38	60	2,63E+05	Anriss
2	AA-6-L-25-02	59,95	1,52	12,02	5,10	70	1,16E+05	Anriss
3	AA-6-L-25-03	59,94	1,52	12,01	3,64	50	3,61E+05	Anriss
4	AA-6-L-25-04	59,97	1,52	12,00	2,92	40	1,63E+06	Anriss
5	AA-6-L-25-06	59,94	1,52	11,99	2,55	35	3,38E+06	Anriss
6	AA-6-L-25-07	59,97	1,52	12,00	6,20	85	4,16E+04	Anriss
7	AA-6-L-25-08	59,99	1,52	12,01	3,36	46	4,97E+05	Anriss
8	AA-6-L-25-09	60,00	1,52	12,01	2,92	40	1,76E+06	Anriss
9	AA-6-L-25-10	59,98	1,52	12,01	4,38	60	2,42E+05	Anriss
10	AA-6-L-25-11	60,02	1,52	12,00	5,11	70	1,10E+05	Anriss
11	AA-6-L-25-12	60,04	1,52	12,00	2,19	30	1,00E+07	Durchläufer
12	AA-6-L-25-13	59,98	1,52	12,00	5,11	70	1,17E+05	Anriss
13	AA-6-L-25-14	59,93	1,52	12,00	6,19	85	2,91E+04	Anriss
14	AA-6-L-25-15	59,95	1,52	12,01	6,19	85	3,33E+04	Anriss
15	AA-6-L-25-16	59,98	1,52	11,98	3,65	50	3,41E+05	Anriss
16	AA-6-L-25-17	59,92	1,51	11,93	7,25	100	1,31E+04	Bruch
17	AA-6-L-25-18	59,98	1,51	11,96	7,25	100	9,45E+03	Bruch
18	AA-6-L-25-19	59,99	1,51	12,03	7,24	100	1,94E+04	Bruch

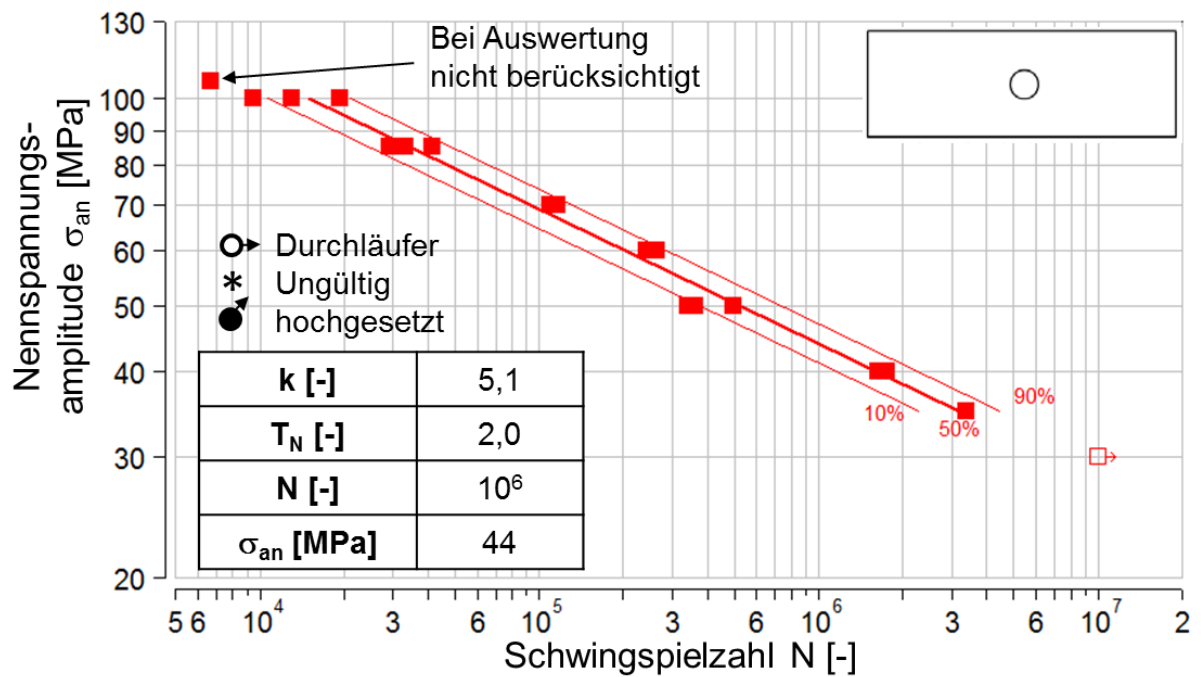


Abbildung 20-18: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-21: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Laser, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-L-25-S-01	60,01	1,52	12,02	4,38	60	8,77E+04	Anriss
2	AA-6-L-25-S-02	60,02	1,52	12,02	3,65	50	1,48E+05	Anriss
3	AA-6-L-25-S-03	60,04	1,52	12,02	5,11	70	2,32E+04	Anriss
4	AA-6-L-25-S-04	59,94	1,52	12,00	2,92	40	6,02E+05	Anriss
5	AA-6-L-25-S-05	60,02	1,52	12,01	3,28	45	2,71E+05	Anriss
6	AA-6-L-25-S-06	59,98	1,52	12,02	3,28	45	2,55E+05	Anriss
7	AA-6-L-25-S-07	60,02	1,52	12,01	4,38	60	7,60E+04	Anriss
8	AA-6-L-25-S-08	59,98	1,52	12,02	4,74	65	4,54E+04	Anriss
9	AA-6-L-25-S-09	60,09	1,52	12,01	2,56	35	5,73E+05	Anriss
10	AA-6-L-25-S-10	60,01	1,52	12,00	3,65	50	2,12E+05	Anriss
11	AA-6-L-25-S-11	60,04	1,52	11,98	2,56	35	4,60E+05	Anriss
12	AA-6-L-25-S-12	60,01	1,52	11,99	2,92	40	4,59E+05	Anriss
13	AA-6-L-25-S-13	59,97	1,52	12,01	1,82	25	1,00E+07	Durchläufer
14	AA-6-L-25-S-14	60,01	1,52	12,00	1,82	25	1,00E+07	Durchläufer
15	AA-6-L-25-S-15	59,99	1,52	12,01	4,38	60	8,32E+04	Anriss
16	AA-6-L-25-S-16	60,04	1,52	12,01	4,75	65	4,04E+04	Anriss
17	AA-6-L-25-S-17	59,99	1,52	12,03	4,74	65	3,45E+04	Anriss
18	AA-6-L-25-S-18	59,99	1,52	12,01	4,74	65	3,89E+04	Anriss
19	AA-6-L-25-S-19	59,96	1,52	12,02	4,74	65	4,70E+04	Anriss
20	AA-6-L-25-S-20	60,00	1,52	12,07	4,74	65	3,83E+04	Anriss
21	AA-6-L-25-S-21	59,97	1,52	12,06	4,73	65	3,73E+04	Anriss
22	AA-6-L-24	59,91	1,51	12,03	6,15	85	1,13E+04	Bruch
23	AA-6-L-25	59,94	1,5	12,01	6,11	85	1,16E+04	Bruch
24	AA-6-L-26	59,94	1,5	11,96	6,12	85	1,07E+04	Bruch
25	AA-6-L-27	59,98	1,51	12,03	5,07	70	3,78E+04	Bruch
26	AA-6-L-28	59,94	1,51	12,01	5,07	70	3,86E+04	Bruch

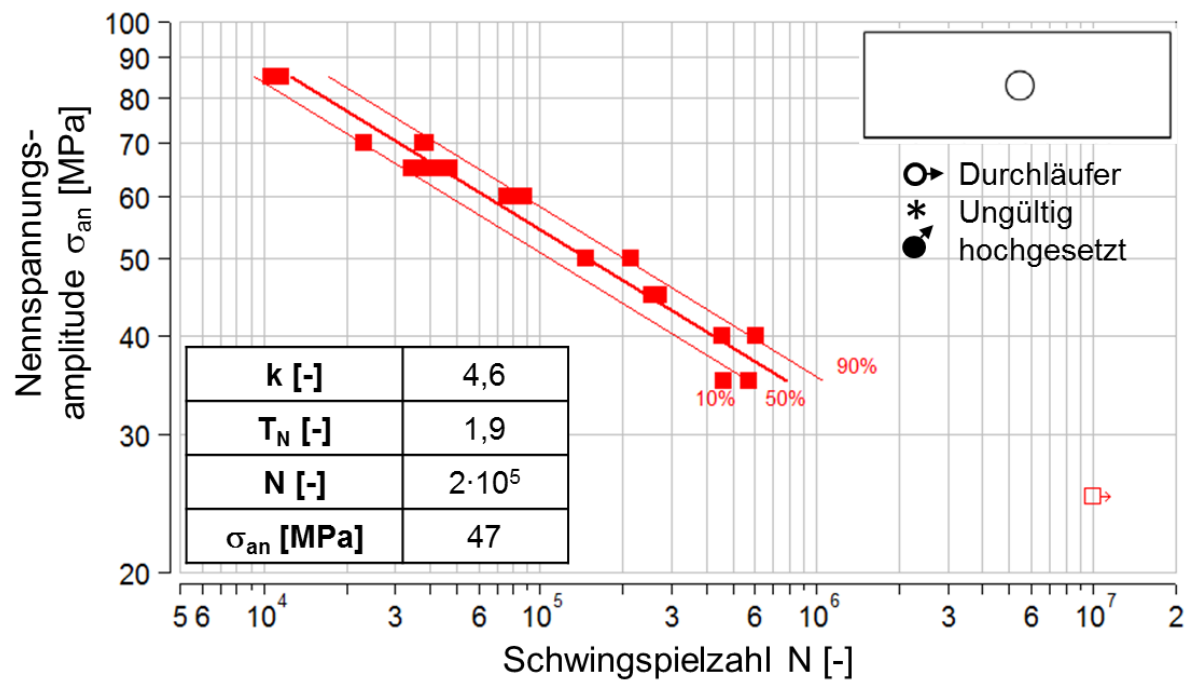


Abbildung 20-19: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Tabelle 20-22: Versuchsergebnisse AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 4,6$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Laser, $K_t = 4.6$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA-6-L-46-01	30,10	1,52	2,29	50	2,16E+05	Anriss
2	AA-6-L-46-02	30,11	1,52	1,83	40	4,82E+05	Anriss
3	AA-6-L-46-03	30,09	1,52	3,20	70	6,42E+04	Anriss
4	AA-6-L-46-04	30,11	1,52	3,20	70	6,30E+04	Anriss
5	AA-6-L-46-05	30,09	1,52	1,37	30	1,15E+06	Anriss
6	AA-6-L-46-06	30,09	1,52	2,74	60	1,26E+05	Anriss
7	AA-6-L-46-07	30,09	1,52	1,83	40	4,56E+05	Anriss
8	AA-6-L-46-08	30,09	1,52	2,29	50	2,81E+05	Anriss
9	AA-6-L-46-09	30,09	1,51	1,14	25	2,03E+06	Anriss
10	AA-6-L-46-10	30,06	1,52	2,74	60	1,08E+05	Anriss
11	AA-6-L-46-11	30,08	1,52	1,83	40	3,97E+05	Anriss
12	AA-6-L-46-12	30,05	1,52	3,20	70	5,56E+04	Anriss
13	AA-6-L-46-13	30,04	1,52	2,74	60	1,00E+05	Anriss
14	AA-6-L-46-14	30,05	1,52	2,28	50	2,21E+05	Anriss
15	AA-6-L-46-15	30,06	1,52	0,91	20	7,39E+06	Anriss
16	AA-6-L-46-16	30,06	1,52	0,91	20	1,00E+07	Durchläufer
17	AA-6-L-46-18	29,98	1,51	4,53	100	1,56E+04	Bruch
18	AA-6-L-46-19	30,08	1,51	4,54	100	7,65E+03	Bruch
19	AA-6-L-46-20	30,07	1,51	4,54	100	9,75E+03	Bruch
20	AA-6-L-46-21	30,12	1,51	3,87	85	5,01E+04	Anriss
21	AA-6-L-46-22	30,11	1,51	3,87	85	3,77E+04	Anriss
22	AA-6-L-46-23	30,03	1,51	3,85	85	3,98E+04	Anriss

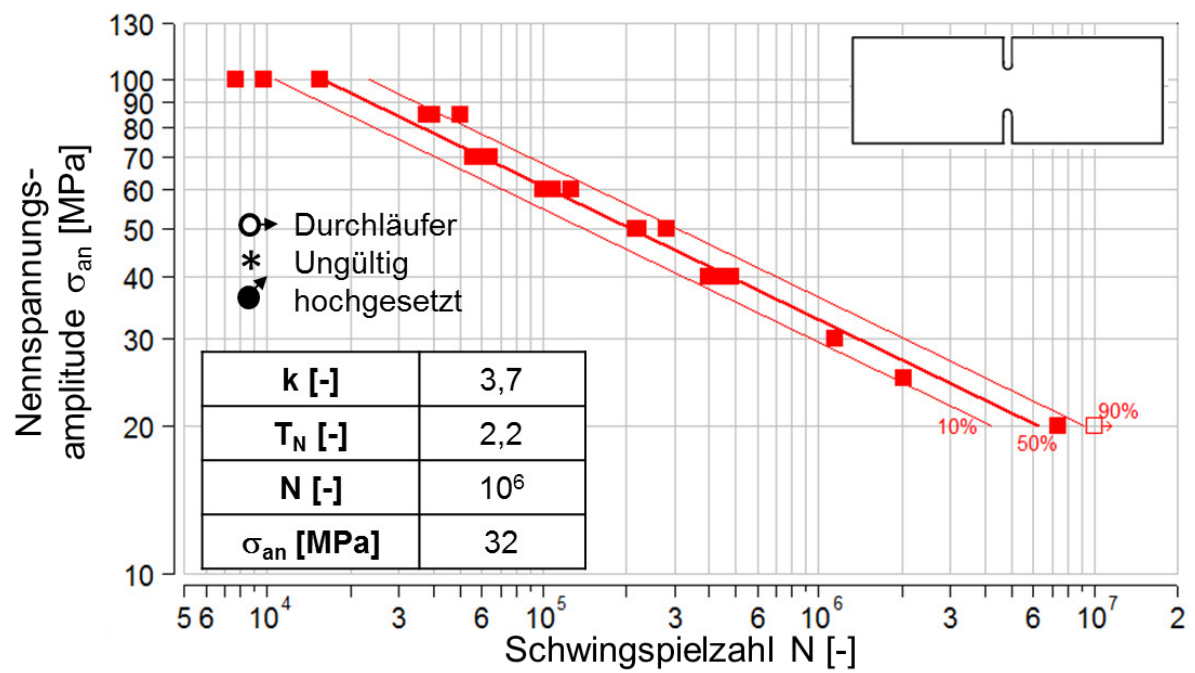


Abbildung 20-20: Wöhler-Diagramm AA6082 Laserstrahlschneiden, $K_t = 4,6$, $R = -1$

Tabelle 20-23: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6-S1-0-1-01	10,00	1,52	2,28	150	7,63E+04	Anriss
2	AA6-S1-0-1-02	10,00	1,52	2,28	150	6,96E+04	Anriss
3	AA6-S1-0-1-03	10,03	1,52	2,29	150	3,69E+04	Anriss
4	AA6-S1-0-1-04	9,98	1,52	1,82	120	6,52E+04	Anriss
5	AA6-S1-0-1-05	10,00	1,52	1,82	120	8,38E+04	Anriss
6	AA6-S1-0-1-06	10,00	1,52	1,82	120	6,43E+04	Anriss
7	AA6-S1-0-1-07	10,01	1,52	1,52	100	1,85E+05	Anriss
8	AA6-S1-0-1-08	10,00	1,52	1,29	85	1,00E+07	Durchläufer
9	AA6-S1-0-1-09	9,99	1,52	1,52	100	1,77E+05	Anriss
10	AA6-S1-0-1-10	10,00	1,52	1,52	100	1,70E+05	Anriss
11	AA6-S1-0-1-11	10,01	1,52	1,83	120	9,92E+04	Anriss
12	AA6-S1-0-1-12	10,00	1,52	2,28	150	3,72E+04	Anriss
13	AA6-S1-0-1-13	9,98	1,52	1,52	100	3,68E+05	Anriss
14	AA6-S1-0-1-14	9,97	1,52	1,36	90	1,00E+07	Durchläufer
15	AA6-S1-0-1-15	9,97	1,51	1,51	100	1,23E+05	Anriss
16	AA6-S1-0-1-16	9,98	1,51	1,51	100	1,73E+05	Anriss
17	AA6-S1-0-1-17	9,92	1,51	1,80	120	7,38E+04	Anriss
18	AA6-S1-0-1-18	9,95	1,51	2,25	150	3,69E+04	Anriss
19	AA6-S1-0-1-19	9,96	1,51	2,71	180	1,73E+04	Anriss
20	AA6-S1-0-1-20	9,95	1,51	2,70	180	1,45E+04	Anriss
21	AA6-S1-0-1-21	9,95	1,51	2,70	180	1,32E+04	Anriss
22	AA6-S1-0-1-22	9,97	1,51	1,36	90	1,00E+07	Durchläufer

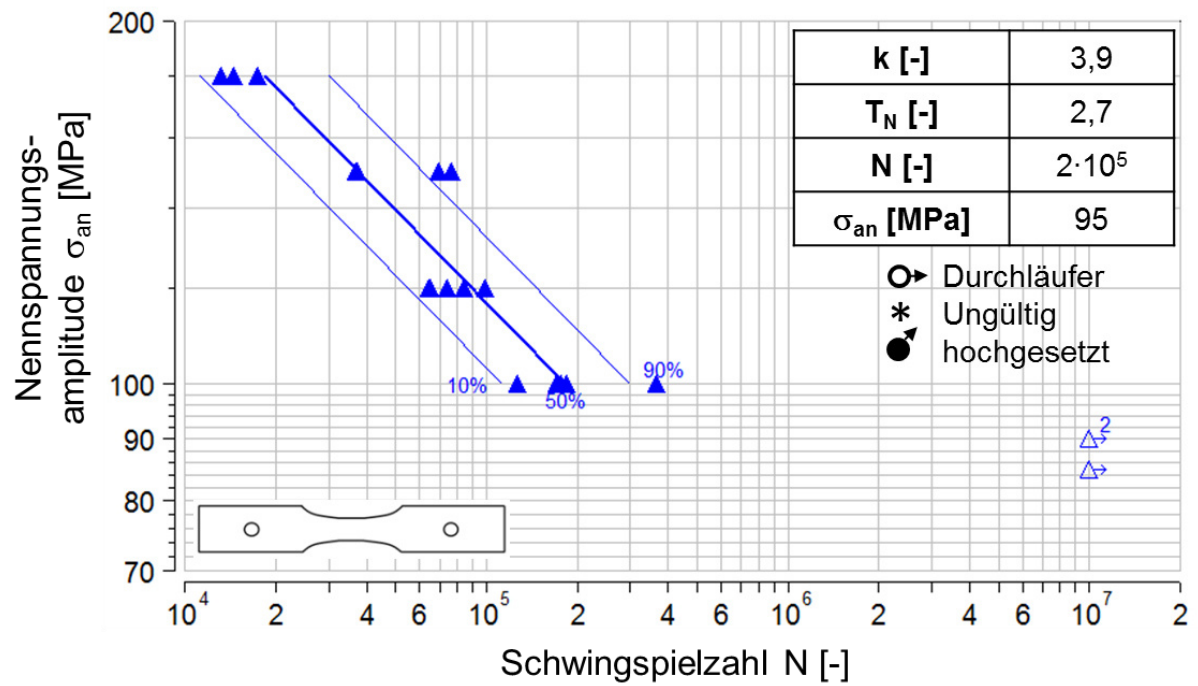
Abbildung 20-21: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-24: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, vorgerechnet, $\phi_1 = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0.1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S1_P_01	9,99	1,44	2,59	180	3,06E+04	Bruch
2	AA6_S1_P_02	9,99	1,43	1,71	120	1,65E+05	Bruch
3	AA6_S1_P_03	10,00	1,43	2,15	150	6,72E+04	Bruch
4	AA6_S1_P_04	9,99	1,44	2,59	180	2,56E+04	Bruch
5	AA6_S1_P_05	9,99	1,43	1,43	100	3,76E+05	Bruch
6	AA6_S1_P_06	10,00	1,43	2,57	180	2,11E+04	Bruch
7	AA6_S1_P_07	10,01	1,44	1,73	120	1,57E+05	Bruch
8	AA6_S1_P_08	10,00	1,43	2,15	150	7,68E+04	Bruch
9	AA6_S1_P_09	10,00	1,43	1,43	100	4,13E+05	Bruch
10	AA6_S1_P_10	9,99	1,43	1,29	90	2,11E+06	Bruch
11	AA6_S1_P_11	10,00	1,43	2,15	150	5,42E+04	Bruch
12	AA6_S1_P_12	10,02	1,43	1,72	120	1,32E+05	Bruch
13	AA6_S1_P_13	10,02	1,42	1,28	90	1,01E+06	Bruch
14	AA6_S1_P_14	10,02	1,44	1,44	100	4,80E+05	Bruch
15	AA6_S1_P_15	10,01	1,42	1,14	80	1,00E+07	Durchläufer
16	AA6_S1_P_16	10,00	1,43	1,29	90	3,98E+05	Bruch
17	AA6_S1_P_17	10,02	1,43	1,29	90	1,00E+07	Durchläufer
18	AA6_S1_P_18	10,00	1,43	1,29	90	1,53E+06	Bruch
19	AA6_S1_P_15h	10,01	1,42	2,56	180	2,97E+04	Bruch
20	AA6_S1_P_17h	10,02	1,43	2,15	150	6,31E+04	Bruch

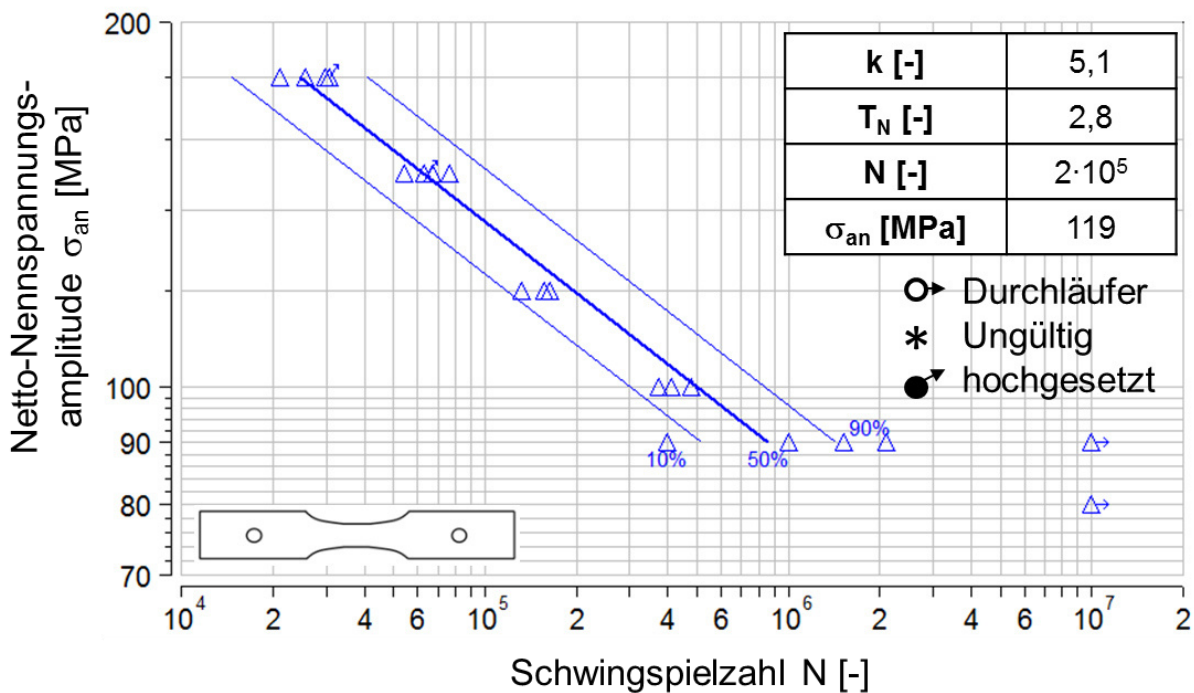


Abbildung 20-22: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$, $\phi_1 = 0,1$

Tabelle 20-25: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA6082, Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S_1_01	59,99	1,51	12,04	7	100	2,25E+03	Maschinenproblem
2	AA6_S_1_02	60,00	1,51	12,02	7,245	100	2,65E+04	Bruch
3	AA6_S_1_03	59,98	1,51	11,99	7,245	100	2,73E+04	Anriss
4	AA6_S_1_04	59,97	1,51	11,99	6,158	85	7,73E+04	Anriss
5	AA6_S_1_05	59,98	1,50	11,98	5,04	70	5,70E+04	Bruch
6	AA6_S_1_06	59,99	1,51	12,02	7,243	100	3,10E+04	Bruch
7	AA6_S_1_07	59,97	1,50	12,01	4,316	60	5,16E+05	Anriss
8	AA6_S_1_08	59,99	1,51	11,98	6,162	85	7,17E+04	Anriss
9	AA6_S_1_09	60,02	1,51	12,00	5,076	70	1,89E+05	Anriss
10	AA6_S_1_10	59,96	1,51	11,99	5,071	70	1,71E+05	Anriss
11	AA6_S_1_11	60,03	1,50	11,98	5,045	70	2,03E+05	Anriss
12	AA6_S_1_12	60,02	1,51	12,00	4,351	60	6,60E+05	Anriss
13	AA6_S_1_13	59,96	1,51	11,97	4,348	60	3,34E+05	Anriss
14	AA6_S_1_14	59,95	1,51	11,97	2,898	40	1,00E+07	Durchläufer
15	AA6_S_1_15	59,99	1,50	12,02	5,037	70	2,05E+05	Anriss
16	AA6_S_1_16	59,97	1,51	12,01	3,621	50	1,34E+06	Anriss
17	AA6_S_1_17	59,95	1,50	11,97	3,599	50	5,66E+06	Einspannbruch
18	AA6_S_1_18	59,99	1,51	11,97	3,626	50	7,02E+06	Einspannbruch
19	AA6_S_1_19	59,97	1,51	12,00	3,622	50	1,00E+07	Durchläufer
20	AA6_S_1_14h	59,95	1,51	11,97	7,245	100	2,85E+04	Bruch
20	AA6_S_1_19h	59,97	1,51	12,00	6,157	85	7,30E+04	Anriss

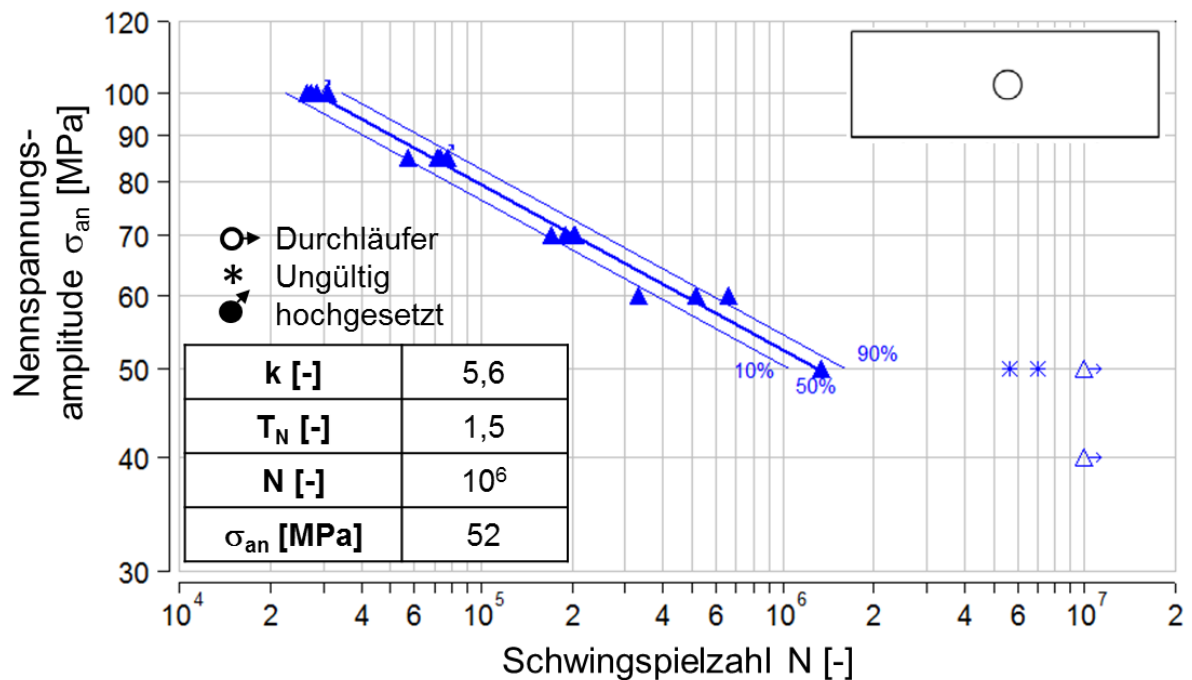


Abbildung 20-23: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-26: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6 S1 M 01	60,00	1,51	12,01	7,25	100	1,41E+03	Bruch
2	AA6 S1 M 02	60,04	1,51	11,99	7,26	100	1,05E+03	Anriss
3	AA6 S1 M 03	60,04	1,50	11,99	6,13	85	7,36E+03	Bruch
4	AA6 S1 M 04	60,04	1,51	11,98	5,08	70	2,40E+04	Anriss
5	AA6 S1 M 05	60,01	1,51	11,99	4,35	60	5,98E+04	Bruch
6	AA6 S1 M 06	59,99	1,51	11,98	4,35	60	5,63E+04	Bruch
7	AA6 S1 M 07	60,00	1,51	11,99	2,18	30	1,00E+07	Durchläufer
8	AA6 S1 M 08	60,01	1,50	12,01	4,32	60	5,84E+04	Bruch
9	AA6 S1 M 09	60,00	1,50	11,99	3,60	50	1,20E+05	Anriss
10	AA6 S1 M 10	60,05	1,50	11,97	5,05	70	2,64E+04	Anriss
11	AA6 S1 M 11	59,96	1,51	12,03	5,07	70	2,65E+04	Bruch
12	AA6 S1 M 12	59,97	1,51	12,01	6,16	85	7,40E+03	Bruch
13	AA6 S1 M 13	59,96	1,51	12,01	3,62	50	1,31E+05	Anriss
14	AA6 S1 M 14	60,04	1,50	12,03	2,88	40	1,00E+07	Durchläufer
15	AA6 S1 M 15	59,95	1,50	12,03	5,03	70	2,17E+04	Bruch
16	AA6 S1 M 16	59,96	1,50	12,00	5,04	70	2,39E+04	Bruch
17	AA6 S1 M 17	59,97	1,51	12,03	4,34	60	4,99E+04	Bruch
18	AA6 S1 M 18	59,97	1,51	12,03	3,62	50	1,10E+05	Anriss
19	AA6 S1 M 7 h	60,00	1,51	11,99	6,16	85	5,50E+03	Bruch
20	AA6 S1 M 14 h	60,04	1,50	12,03	6,12	85	6,59E+03	Bruch

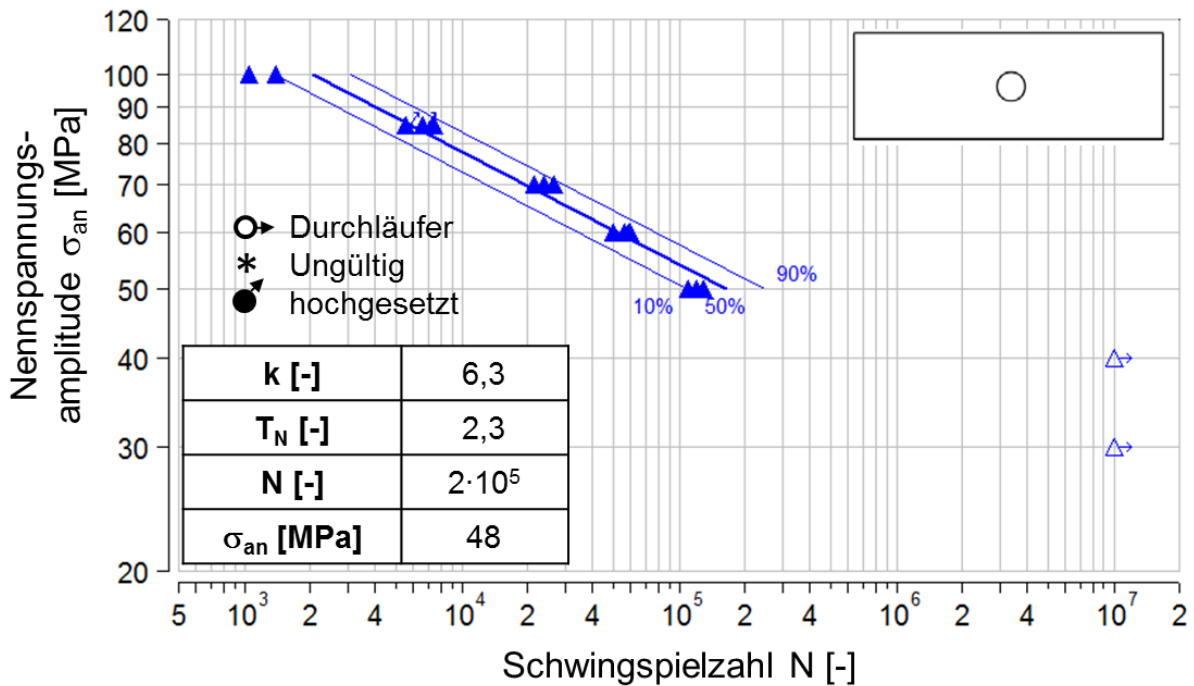


Abbildung 20-24: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 1, $K_t = 2,5$, $R = 0,1$

Tabelle 20-27: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 1, $K_t = 4,6$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA6082, Schneiden 1, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6-S5-0-1-01	9,97	1,52	1,52	100	8,54E+05	Anriss
2	AA6-S5-0-1-02	10,00	1,52	2,28	150	6,24E+04	Anriss
3	AA6-S5-0-1-03	9,98	1,52	1,52	100	3,92E+06	Anriss
4	AA6-S5-0-1-04	9,99	1,52	1,82	120	2,25E+05	Anriss
5	AA6-S5-0-1-05	10,01	1,52	1,83	120	8,16E+04	Anriss
6	AA6-S5-0-1-06	9,99	1,52	1,82	120	1,22E+05	Anriss
7	AA6-S5-0-1-07	9,99	1,52	2,28	150	4,35E+04	Anriss
8	AA6-S5-0-1-08	10,02	1,52	1,52	100	3,75E+05	Anriss
9	AA6-S5-0-1-09	9,98	1,52	2,28	150	7,93E+04	Anriss
10	AA6-S5-0-1-10	9,98	1,52	1,82	120	2,24E+05	Anriss
11	AA6-S5-0-1-11	9,98	1,52	2,28	150	4,07E+04	Anriss
12	AA6-S5-0-1-12	9,98	1,52	1,37	90	1,00E+07	Durchläufer
13	AA6-S5-0-1-13	9,99	1,52	1,52	100	4,57E+05	Anriss
14	AA6-S5-0-1-14	9,97	1,51	1,51	100	1,89E+05	Anriss
15	AA6-S5-0-1-15	9,98	1,51	2,26	150	3,44E+04	Anriss
16	AA6-S5-0-1-16	9,96	1,51	1,81	120	4,57E+04	Anriss
17	AA6-S5-0-1-17	9,98	1,51	1,51	100	2,90E+05	Anriss
18	AA6-S5-0-1-18	9,98	1,51	1,81	120	7,93E+04	Anriss
19	AA6-S5-0-1-19	9,98	1,51	1,36	90	3,38E+05	Anriss
20	AA6-S5-0-1-20	9,98	1,51	1,36	90	3,60E+05	Anriss
21	AA6-S5-0-1-21	9,98	1,51	1,36	90	2,21E+05	Anriss
22	AA6-S5-0-1-22	9,96	1,50	1,35	90	3,57E+05	Anriss
23	AA6-S5-0-1-23	9,97	1,50	1,20	80	1,00E+07	Durchläufer
24	AA6-S5-0-1-24	9,98	1,50	2,70	180	1,37E+04	Anriss

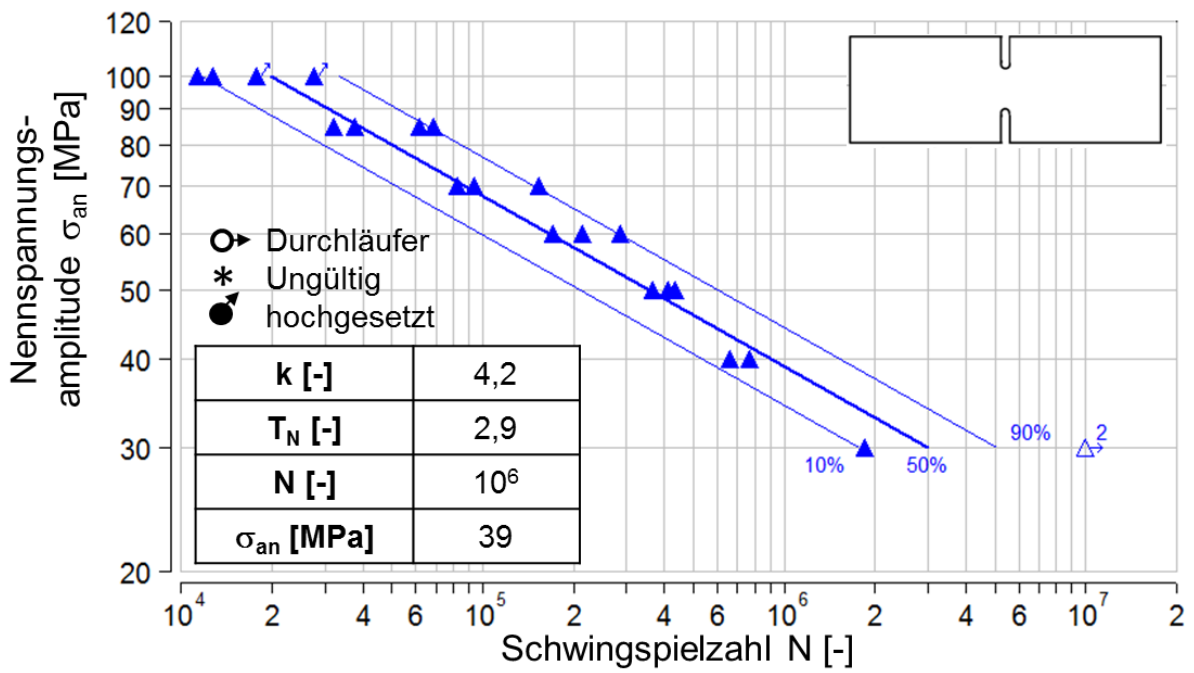


Abbildung 20-25: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden I, $K_t = 4,6$, $R = -1$

Tabelle 20-28: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 2, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA6082, Schneiden 2, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S_2_01	9,95	1,51	2,70	180	1,64E+04	Bruch
2	AA6_S_2_02	9,93	1,51	2,70	180	3,52E+04	Bruch
3	AA6_S_2_03	9,96	1,51	2,26	150	6,53E+04	Bruch
4	AA6_S_2_04	9,95	1,50	2,24	150	3,11E+04	Bruch
5	AA6_S_2_05	9,95	1,50	2,24	150	5,54E+04	Bruch
6	AA6_S_2_06	9,99	1,50	1,20	80	1,00E+07	Durchläufer
7	AA6_S_2_07	9,93	1,51	1,50	100	2,25E+06	Einspannbruch
8	AA6_S_2_08	9,97	1,50	1,80	120	2,61E+05	Bruch
9	AA6_S_2_09	9,96	1,51	1,79	119	2,97E+05	Bruch
10	AA6_S_2_10	9,99	1,50	1,80	120	4,19E+05	Bruch
11	AA6_S_2_11	9,99	1,51	1,51	100	1,00E+07	Durchläufer
12	AA6_S_2_12	9,93	1,52	2,72	180	2,41E+04	Bruch
13	AA6_S_2_13	9,95	1,51	2,25	150	5,89E+04	Bruch
14	AA6_S_2_14	9,97	1,51	1,51	100	2,20E+05	Bruch
15	AA6_S_2_15	9,98	1,51	2,71	180	1,80E+04	Bruch
16	AA6_S_2_16	9,98	1,51	2,71	180	1,56E+04	Bruch
17	AA6_S_2_17	9,95	1,51	2,25	150	4,83E+04	Bruch
18	AA6_S_2_18	9,98	1,51	2,26	150	4,40E+04	Bruch
19	AA6_S_2_06_h	9,99	1,51	2,72	180	3,92E+04	Bruch
20	AA6_S_2_11_h	9,99	1,51	2,72	180	3,60E+04	Bruch
21	AA6_S_2_19	9,98	1,51	1,81	120	1,33E+05	Bruch
22	AA6_S_2_20	9,99	1,51	1,51	100	2,02E+05	Bruch
23	AA6_S_2_21	9,96	1,51	1,354	90	1,00E+07	Durchläufer
24	AA6_S_2_22	9,97	1,51	1,505	100	3,61E+05	Bruch
25	AA6_S_2_23	9,97	1,51	1,807	120	1,08E+05	Bruch
26	AA6_S_2_21_h	9,96	1,51	2,707	180	2,50E+04	Bruch

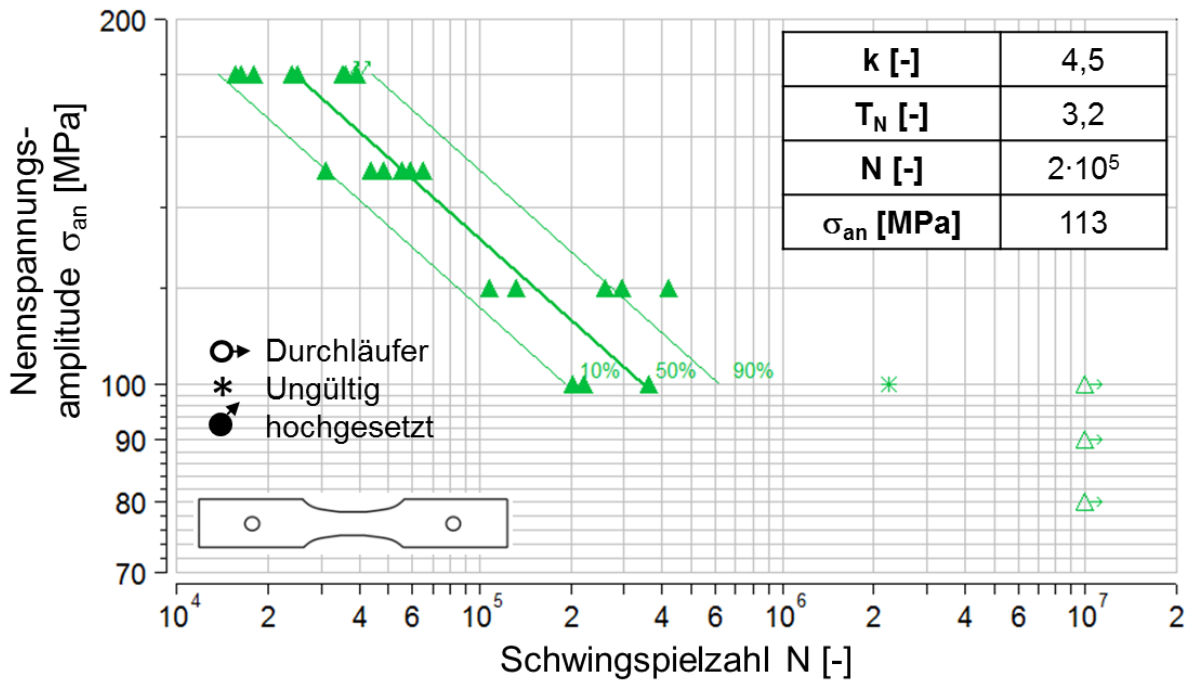


Abbildung 20-26: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 2, $K_t = 1$, $R = -1$

Tabelle 20-29: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 2, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregt Versuch AA6082, Schneiden 2, $K_t = 2,5$, $R = -1$								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S2_1_01	60,05	1,52	12,05	6,20	85	7,68E+04	Anriss
2	AA6_S2_1_02	60,00	1,52	12,05	5,10	70	1,91E+05	Anriss
3	AA6_S2_1_03	59,98	1,52	12,03	7,29	100	2,89E+04	Bruch
4	AA6_S2_1_04	60,06	1,52	12,06	2,92	40	1,00E+07	Durchläufer
5	AA6_S2_1_05	59,98	1,51	12,04	4,34	60	5,13E+05	Anriss
6	AA6_S2_1_06	59,96	1,52	12,03	4,37	60	5,09E+05	Anriss
7	AA6_S2_1_07	60,04	1,52	12,04	3,65	50	1,00E+07	Durchläufer
8	AA6_S2_1_08	59,95	1,52	12,05	4,37	60	5,01E+05	Anriss
9	AA6_S2_1_09	59,97	1,51	12,02	5,07	70	3,26E+05	Anriss
10	AA6_S2_1_04h	60,06	1,52	12,06	7,30	100	2,03E+04	Bruch
11	AA6_S2_1_11	59,97	1,51	11,99	4,35	60	4,60E+05	Anriss
12	AA6_S2_1_12	59,95	1,51	12,00	6,15	85	7,01E+04	Bruch
13	AA6_S2_1_13	60,04	1,52	12,03	6,20	85	6,93E+04	Bruch
14	AA6_S2_1_14	59,95	1,52	12,04	6,19	85	7,33E+04	Bruch
15	AA6_S2_1_15	59,97	1,51	12,04	5,07	70	3,24E+05	Anriss
16	AA6_S2_1_16	59,98	1,51	12,04	5,07	70	1,85E+05	Anriss
17	AA6_S2_1_17	59,98	1,52	12,06	7,28	100	2,54E+04	Bruch
18	AA6_S2_1_18	60,04	1,52	12,04	6,20	85	1,02E+05	Anriss
19	AA6_S2_1_07h	60,02	1,51	12,00	7,25	100	2,75E+04	Bruch

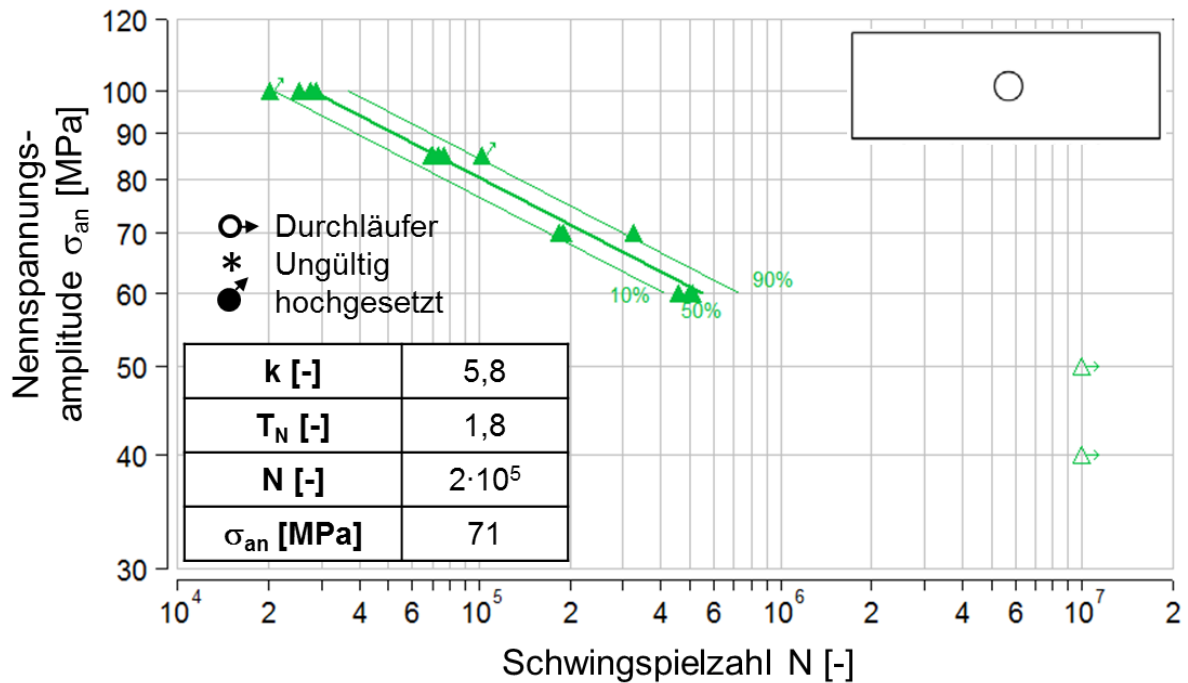


Abbildung 20-27: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 2, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-30: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 3, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Schneiden 3, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S_3_01	9,99	1,51	2,72	180	1,82E+04	Bruch
2	AA6_S_3_02	9,99	1,51	2,72	180	2,90E+04	Bruch
3	AA6_S_3_03	9,98	1,51	2,26	150	1,19E+05	Bruch
4	AA6_S_3_04	9,96	1,51	2,26	150	8,95E+04	Bruch
5	AA6_S_3_05	9,97	1,51	1,51	100	5,42E+05	Bruch
6	AA6_S_3_06	9,99	1,51	2,72	180	2,06E+04	Bruch
7	AA6_S_3_07	9,98	1,52	2,28	150	3,47E+04	Bruch
8	AA6_S_3_08	9,99	1,51	2,26	150	5,39E+04	Bruch
9	AA6_S_3_09	9,99	1,51	1,81	120	9,57E+04	Bruch
10	AA6_S_3_10	9,98	1,51	1,51	100	1,75E+05	Bruch
11	AA6_S_3_11	9,98	1,51	1,81	120	2,25E+05	Bruch
12	AA6_S_3_12	9,99	1,51	1,81	120	7,01E+04	Bruch
13	AA6_S_3_13	9,99	1,51	1,51	100	3,57E+05	Bruch
14	AA6_S_3_14	9,98	1,51	1,51	100	1,78E+05	Bruch
15	AA6_S_3_15	9,99	1,51	2,72	180	1,48E+04	Bruch
16	AA6_S_3_16	9,99	1,51	2,26	150	3,65E+04	Bruch
17	AA6_S_3_17	9,98	1,50	2,25	150	7,52E+04	Bruch
18	AA6_S_3_18	9,99	1,50	1,80	120	4,25E+05	Einspannbruch
19	AA6_S_3_19	9,98	1,51	1,51	100	2,79E+05	Bruch
20	AA6_S_3_20	9,98	1,51	1,36	90	2,47E+06	Bruch
21	AA6_S_3_21	9,98	1,51	1,81	120	6,85E+05	Einspannbruch
22	AA6_S_3_22	9,99	1,51	1,81	120	1,20E+05	Bruch
23	AA6_S_3_23	9,98	1,51	1,356	90	1,04E+06	Bruch
24	AA6_S_3_24	9,99	1,51	1,207	80	2,02E+06	Bruch
25	AA6_S_3_25	9,99	1,51	1,056	70	1,00E+07	Durchläufer

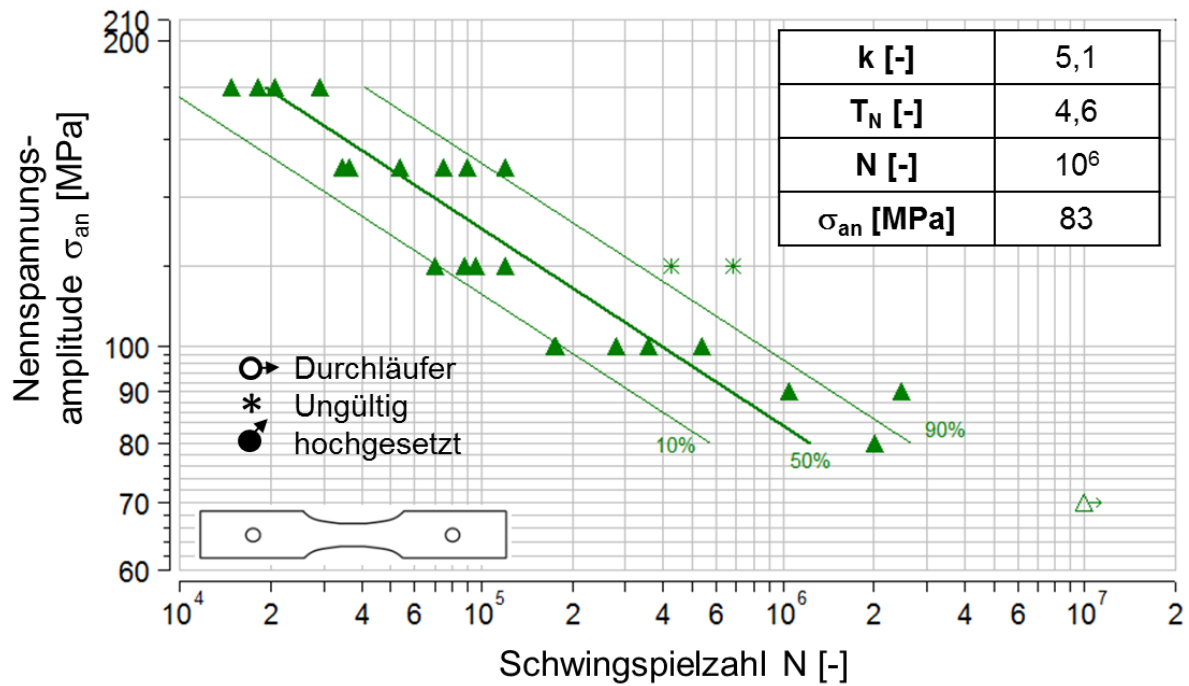
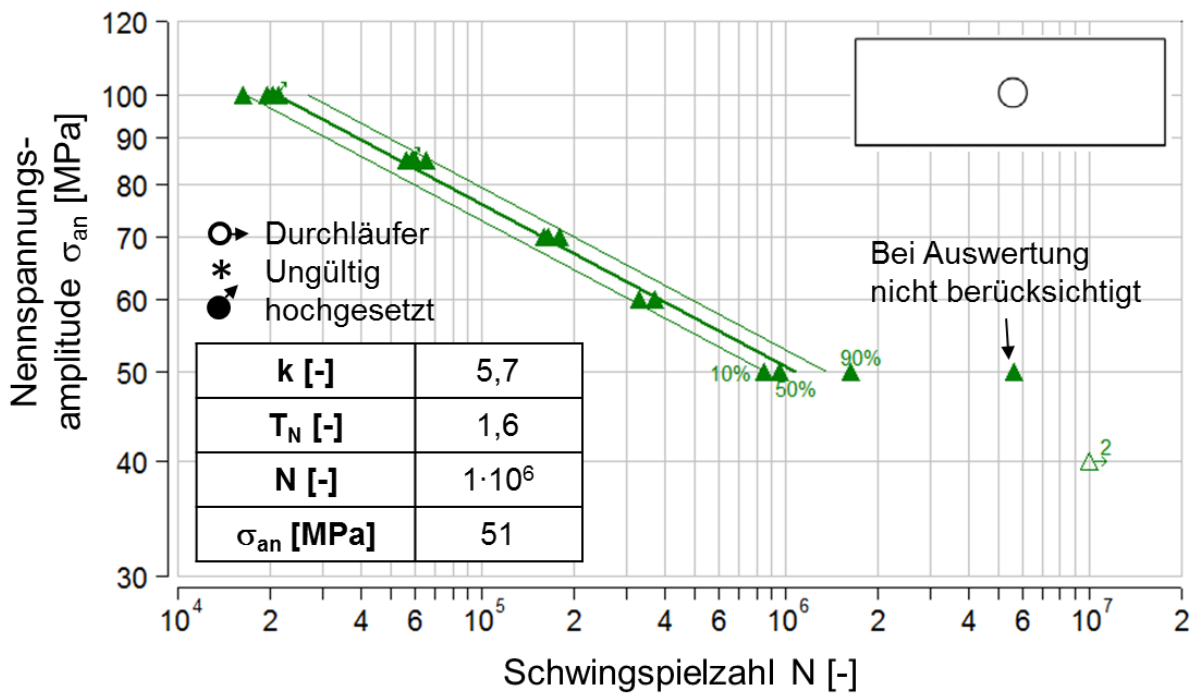


Abbildung 20-28: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 3, K_t = 1, R = -1

Tabelle 20-31: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 3, K_t = 2,5, R = -1

Versuchsergebnisse spannungsgeregt Versuch AA6082, Schneiden 3, K _t = 2,5, R = -1								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F _a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ _{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S3_01	59,98	1,51	12,02	7,24	100	2,13E+04	Bruch
2	AA6_S3_02	60,02	1,51	12,03	7,25	100	1,96E+04	Bruch
3	AA6_S3_03	59,99	1,51	12,03	5,07	70	1,79E+05	Anriss
4	AA6_S3_04	59,98	1,51	12,04	5,07	70	1,60E+05	Anriss
5	AA6_S3_05	59,97	1,50	12,04	6,11	85	6,58E+04	Anriss
6	AA6_S3_06	59,98	1,51	12,04	6,15	85	6,01E+04	Anriss
7	AA6_S3_07	60,03	1,51	12,05	3,62	50	1,64E+06	Anriss
8	AA6_S3_08	59,99	1,51	12,05	4,34	60	3,71E+05	Anriss
9	AA6_S3_09	59,99	1,51	12,04	5,07	70	1,66E+05	Anriss
10	AA6_S3_10	59,97	1,51	12,04	3,62	50	8,53E+05	Anriss
11	AA6_S3_11	60,02	1,51	12,05	7,24	100	1,64E+04	Bruch
12	AA6_S3_12	59,99	1,51	12,05	6,15	85	5,89E+04	Anriss
13	AA6_S3_13	59,98	1,51	12,05	4,34	60	3,30E+05	Anriss
14	AA6_S3_14	60,02	1,51	12,04	3,62	50	5,66E+06	Anriss
15	AA6_S3_15	59,99	1,51	12,04	4,34	60	3,29E+05	Anriss
16	AA6_S3_16	59,99	1,51	12,04	2,90	40	1,00E+07	Durchläufer
17	AA6_S3_17	60,02	1,50	12,02	2,88	40	1,00E+07	Durchläufer
18	AA6_S3_18	59,99	1,51	12,02	3,62	50	9,54E+05	Anriss
19	AA6_S3_16h	59,99	1,51	12,04	7,24	100	2,05E+04	Anriss
20	AA6_S3_17h	60,02	1,51	12,02	6,125	85	56326	Bruch

Abbildung 20-29: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 3, $K_t = 2,5$, $R = -1$ Tabelle 20-32: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 4, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregelter Versuch AA6082, Schneiden 4, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S4_01	9,89	1,51	2,24	150	3,67E+04	Bruch
2	AA6_S4_02	9,93	1,51	1,05	70	1,00E+07	Durchläufer
3	AA6_S4_03	10,01	1,51	1,36	90	6,08E+05	Bruch
4	AA6_S4_04	10,01	1,51	2,72	180	1,26E+04	Bruch
5	AA6_S4_05	9,98	1,51	2,26	150	3,56E+04	Bruch
6	AA6_S4_06	9,88	1,51	1,79	120	9,68E+04	Bruch
7	AA6_S4_07	10,01	1,51	1,36	90	3,19E+05	Bruch
8	AA6_S4_08	9,91	1,51	1,80	120	9,92E+04	Bruch
9	AA6_S4_09	9,87	1,51	1,49	100	2,63E+05	Bruch
10	AA6_S4_10	9,86	1,51	1,34	90	5,74E+05	Bruch
11	AA6_S4_11	9,84	1,51	1,04	70	1,37E+06	Bruch
12	AA6_S4_12	9,90	1,51	2,69	180	1,31E+04	Bruch
13	AA6_S4_13	9,96	1,51	2,26	150	2,86E+04	Bruch
14	AA6_S4_14	9,93	1,51	1,50	100	2,33E+05	Bruch
15	AA6_S4_15	9,84	1,51	1,04	70	1,00E+07	Durchläufer
16	AA6_S4_2h	9,99	1,51	1,81	120	1,40E+05	Bruch
17	AA6_S4_15h	9,82	1,51	2,67	180	1,03E+04	Bruch

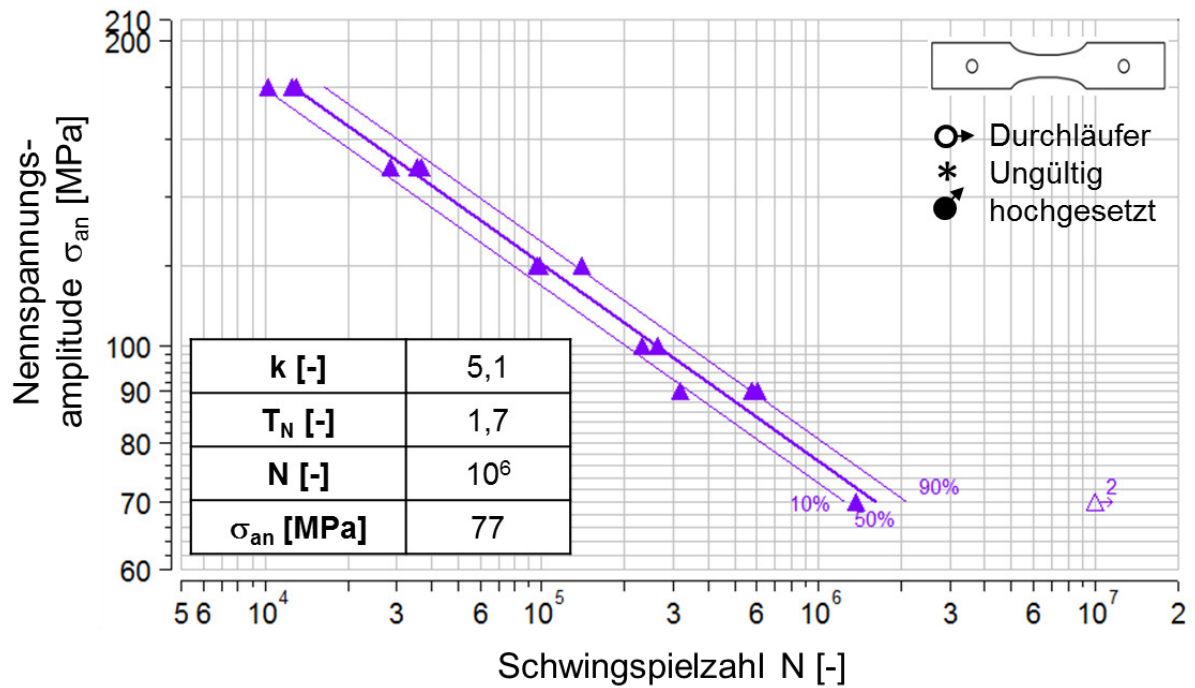


Abbildung 20-30: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 4, K_t = 1, R = -1

Tabelle 20-33: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 4, K_t = 2,5, R = -1

AA6082, Schneiden 4, K _t = 2,5, R = -1								
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Bohrungsdurchmesser d [mm]	Kraftamplitude F _a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ _{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6_S4_01	60,00	1,51	12,03	5,07	70	1,31E+05	Anriss
2	AA6_S4_02	60,00	1,51	12,05	7,24	100	1,46E+04	Bruch
3	AA6_S4_03	59,96	1,51	12,02	7,24	100	1,74E+04	Bruch
4	AA6_S4_04	60,00	1,51	12,03	6,16	85	4,52E+04	Anriss
5	AA6_S4_05	59,98	1,51	12,03	6,15	85	4,21E+04	Anriss
6	AA6_S4_06	60,05	1,51	12,04	3,63	50	8,27E+05	Anriss
7	AA6_S4_07	60,00	1,51	12,02	7,25	100	1,77E+04	Bruch
8	AA6_S4_08	60,03	1,51	12,04	4,35	60	3,72E+05	Anriss
9	AA6_S4_09	59,97	1,51	12,04	6,15	85	5,31E+04	Anriss
10	AA6_S4_10	60,05	1,51	12,05	5,07	70	1,49E+05	Anriss
11	AA6_S4_11	60,01	1,51	12,03	3,62	50	1,61E+05	Anriss
12	AA6_S4_12	59,98	1,51	12,03	2,90	40	1,00E+07	Durchläufer
13	AA6_S4_13	59,97	1,51	12,03	2,90	40	2,36E+06	Anriss
14	AA6_S4_14	59,99	1,51	12,05	5,07	70	1,38E+05	Anriss
15	AA6_S4_15	59,99	1,51	12,04	4,34	60	3,79E+05	Anriss
16	AA6_S4_16	60,04	1,51	12,03	3,63	50	8,20E+05	Anriss
17	AA6_S4_17	60,05	1,51	12,03	4,35	60	3,27E+05	Anriss
18	AA6_S4_18	59,99	1,51	12,01	2,90	40	1,00E+07	Durchläufer
19	AA6_S4_12h	59,98	1,51	12,03	7,24	100	1,53E+04	Bruch
20	AA6_S4_18h	59,99	1,51	12,01	6,158	85	4,20E+04	Bruch

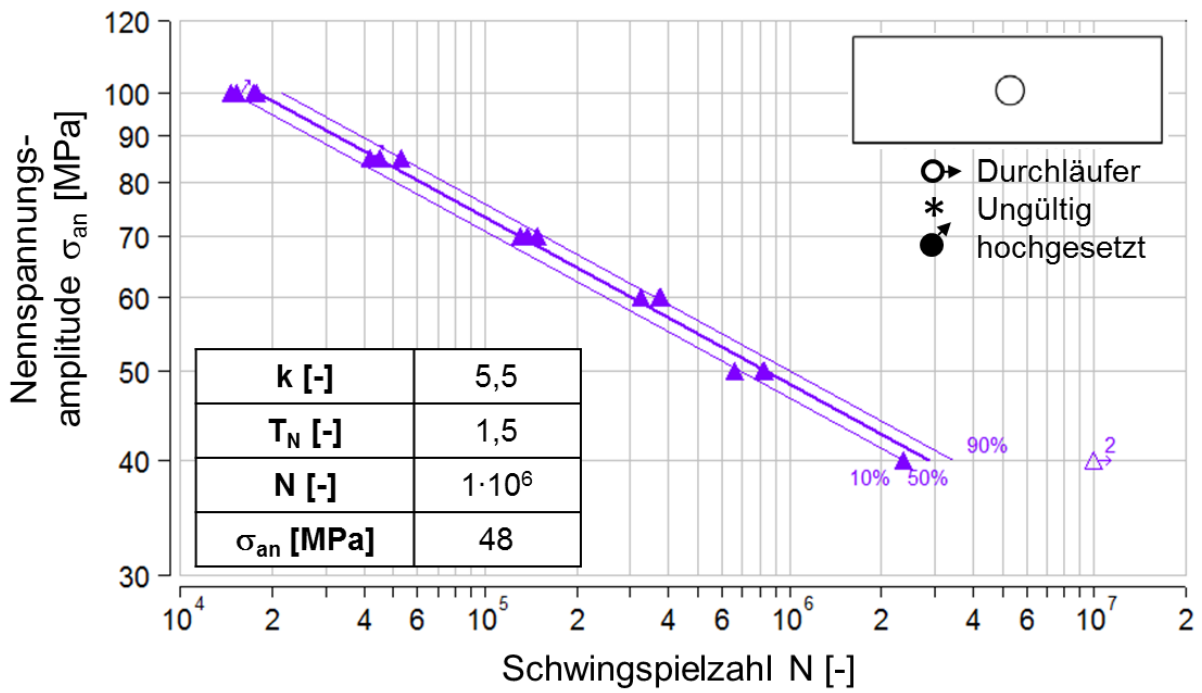


Abbildung 20-31: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 4, $K_t = 2,5$, $R = -1$

Tabelle 20-34: Versuchsergebnisse AA6082 Schneiden 5, $K_t = 1$, $R = -1$

Versuchsergebnisse spannungsgeregtter Versuch AA6082, Schneiden 5, $K_t = 1$, $R = -1$							
Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	Breite b [mm]	Dicke t [mm]	Kraftamplitude F_a [kN]	Netto-Nennspannungsamplitude σ_{an} [MPa]	Schwingspielzahl N [-]	Bemerkung
1	AA6-S5-0-1-01	9,97	1,52	1,52	100	8,54E+05	Anriss
2	AA6-S5-0-1-02	10,00	1,52	2,28	150	6,24E+04	Anriss
3	AA6-S5-0-1-03	9,98	1,52	1,52	100	3,92E+06	Anriss
4	AA6-S5-0-1-04	9,99	1,52	1,82	120	2,25E+05	Anriss
5	AA6-S5-0-1-05	10,01	1,52	1,83	120	8,16E+04	Anriss
6	AA6-S5-0-1-06	9,99	1,52	1,82	120	1,22E+05	Anriss
7	AA6-S5-0-1-07	9,99	1,52	2,28	150	4,35E+04	Anriss
8	AA6-S5-0-1-08	10,02	1,52	1,52	100	3,75E+05	Anriss
9	AA6-S5-0-1-09	9,98	1,52	2,28	150	7,93E+04	Anriss
10	AA6-S5-0-1-10	9,98	1,52	1,82	120	2,24E+05	Anriss
11	AA6-S5-0-1-11	9,98	1,52	2,28	150	4,07E+04	Anriss
12	AA6-S5-0-1-12	9,98	1,52	1,37	90	1,00E+07	Durchläufer
13	AA6-S5-0-1-13	9,99	1,52	1,52	100	4,57E+05	Anriss
14	AA6-S5-0-1-14	9,97	1,51	1,51	100	1,89E+05	Anriss
15	AA6-S5-0-1-15	9,98	1,51	2,26	150	3,44E+04	Anriss
16	AA6-S5-0-1-16	9,96	1,51	1,81	120	4,57E+04	Anriss
17	AA6-S5-0-1-17	9,98	1,51	1,51	100	2,90E+05	Anriss
18	AA6-S5-0-1-18	9,98	1,51	1,81	120	7,93E+04	Anriss
19	AA6-S5-0-1-19	9,98	1,51	1,36	90	3,38E+05	Anriss
20	AA6-S5-0-1-20	9,98	1,51	1,36	90	3,60E+05	Anriss
21	AA6-S5-0-1-21	9,98	1,51	1,36	90	2,21E+05	Einspannbruch
22	AA6-S5-0-1-22	9,96	1,50	1,35	90	3,57E+05	Einspannbruch
23	AA6-S5-0-1-23	9,97	1,50	1,20	80	1,00E+07	Durchläufer
24	AA6-S5-0-1-24	9,98	1,50	2,70	180	1,37E+04	Bruch
25	AA6-S5-0-1-23h	9,97	1,50	2,70	180	2,20E+04	Bruch

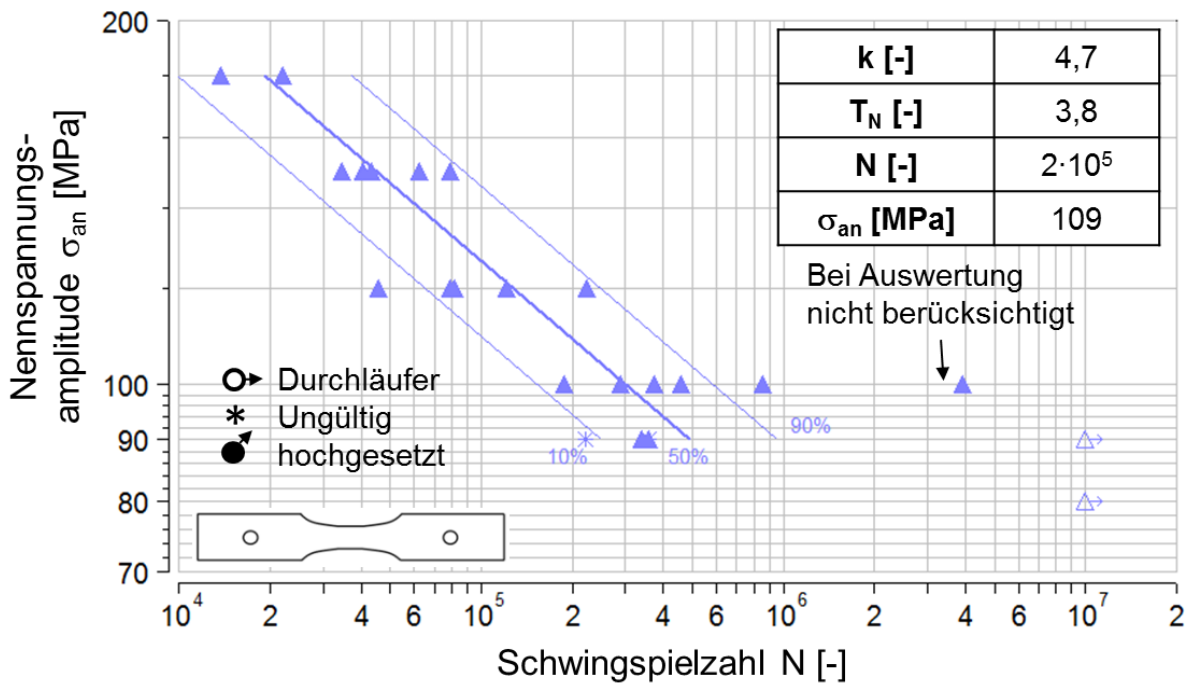


Abbildung 20-32: Wöhler-Diagramm AA6082 Schneiden 5, $K_t = 1$, $R = -1$

F. Versuchsergebnisse dehnungsgeregelt

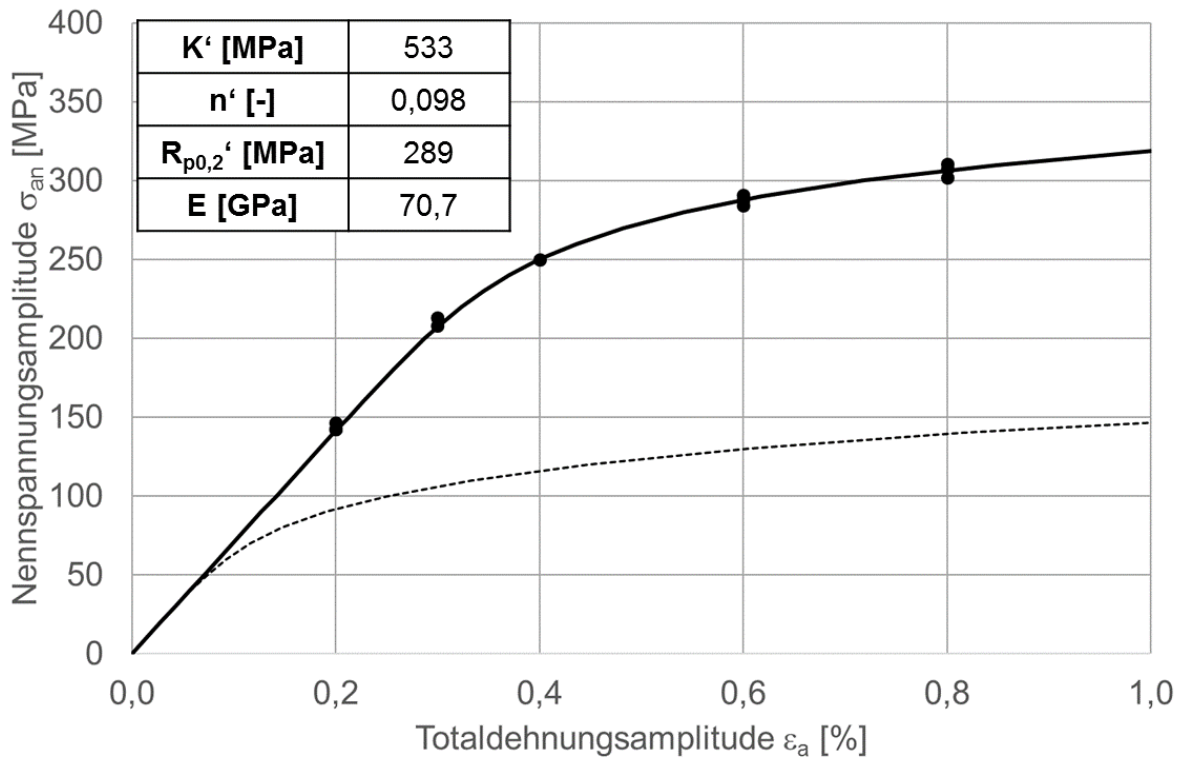


Abbildung 20-33: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 poliert, $R = -1$

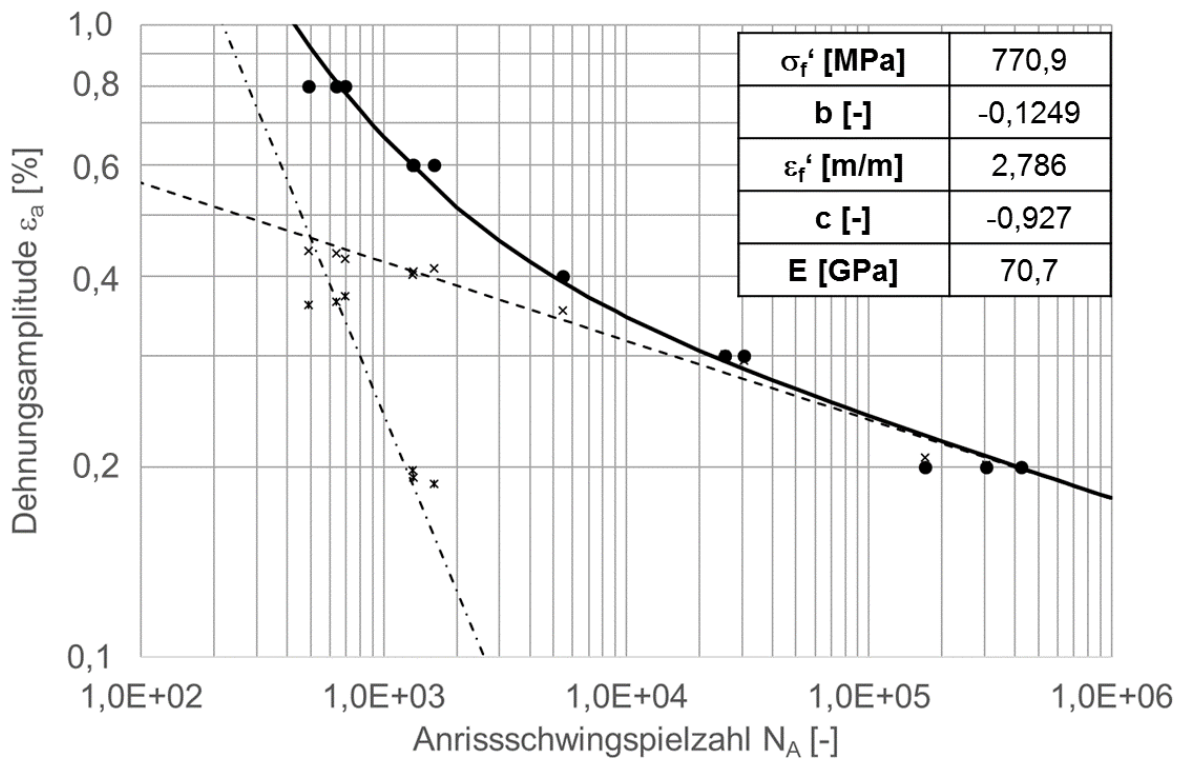


Abbildung 20-34: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 poliert, $P_A = 50\%$, $R = -1$

Tabelle 20-35: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 poliert, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																		
AA5182, Poliert																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		70,2	Schwingspielzahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$													
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. ϵ_a [%]	Fre-quenz f [Hz]	Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.-ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Bemerkungen
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_t [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_o [-]	
1	1	0,80	0,1	488	500	244	76	0,800	-0,800	0,800	0,361	0,439	-1,0	303	-318	311	-1,0	B-0
2	2	0,60	0,1	1323	1323	662	75	0,600	-0,600	0,600	0,193	0,407	-1,0	282	-294	288	-1,0	D-0
3	3	0,40	0,5	5460	6500	2730	71	0,400	-0,400	0,400	0,046	0,354	-1,0	244	-256	250	-1,0	B-0
4	5	0,20	3,0	304790	328731	152395	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	134	-151	143	-1,1	C-1
5	6	0,80	0,1	636	657	318	74	0,800	-0,800	0,800	0,365	0,435	-1,0	300	-315	308	-1,1	D-0
6	7	0,60	0,1	1316	1580	658	72	0,600	-0,600	0,600	0,197	0,403	-1,0	280	-289	285	-1,0	D-0
7	8	0,80	0,1	695	695	348	73	0,800	-0,800	0,800	0,373	0,427	-1,0	281	-323	302	-1,1	D-0
8	9	0,20	3,0	423448	476611	211724	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	119	-166	143	-1,4	B-0
9	10	0,30	1,0	30619	33115	15310	70	0,300	-0,300	0,300	0,006	0,294	-1,0	193	-223	208	-1,2	C-1
10	11	0,20	3,0	170844	178095	85422	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	141	-152	147	-1,1	C-1
11	12	0,60	0,1	1608	1632	804	76	0,600	-0,600	0,600	0,188	0,412	-1,0	285	-297	291	-1,0	C-0
12	13	0,30	1,0	25485	26628	12743	74	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,300	-1,0	189	-237	213	-1,3	C-0

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B=zwischen den Schneiden, C=außerhalb der Schneiden, D=unter den Schneiden (oben), E=unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Tabelle 20-36: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 laserstrahlgeschritten, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																		
AA5182, Laser																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		70,2	Schwingspielzahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$													
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. ϵ_a [%]	Fre-quenz f [Hz]	Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.-ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Bemerkungen
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_t [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_o [-]	
1	1	0,80	0,1	295	295	148	72	0,800	-0,800	0,800	0,366	0,434	-1,0	296	-313	305	-1,1	C-0
2	2	0,60	0,1	798	809	399	69	0,600	-0,600	0,600	0,190	0,410	-1,0	281	-294	288	-1,0	C-0
3	3	0,60	0,1	655	667	328	70	0,600	-0,600	0,600	0,184	0,416	-1,0	286	-298	292	-1,0	C-1
4	4	0,80	0,1	422	422	211	72	0,800	-0,800	0,800	0,346	0,454	-1,0	312	-326	319	-1,0	C-0
5	5	0,40	0,5	2220	2802	1110	73	0,400	-0,400	0,400	0,033	0,367	-1,0	249	-266	258	-1,1	C-1
6	6	0,60	0,1	602	602	301	72	0,600	-0,600	0,600	0,181	0,419	-1,0	286	-302	294	-1,1	C-0
7	7	0,30	1,0	7480	7480	3740	74	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	207	-225	216	-1,1	C-1
8	8	0,30	1,0	11246	11246	5623	68	0,300	-0,300	0,300	0,011	0,289	-1,0	193	-212	203	-1,1	C-0
9	9	0,20	3,0	59772	61234	29886	69	0,200	-0,200	0,200	0,005	0,195	-1,0	127	-147	137	-1,2	C-0
10	10	0,80	0,1	416	419	208	75	0,800	-0,800	0,800	0,349	0,451	-1,0	310	-323	317	-1,0	C-1
11	11	0,20	3,0	90678	97211	45339	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	140	-151	146	-1,1	C-0
12	12	0,17	4,0	200817	207020	100409	69	0,170	-0,170	0,170	0,005	0,165	-1,0	106	-125	116	-1,2	C-0, C-1

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B=zwischen den Schneiden, C=außerhalb der Schneiden, D=unter den Schneiden (oben), E=unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

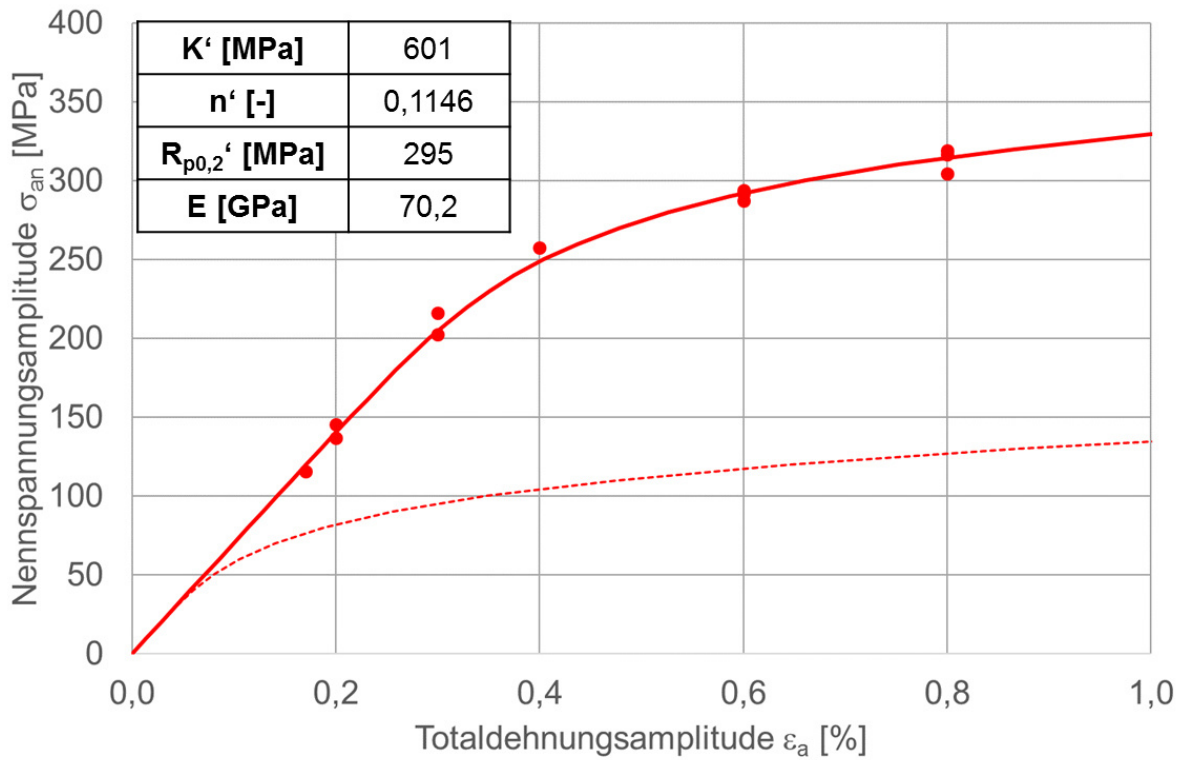


Abbildung 20-35: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Laserstrahlschneiden, R = -1

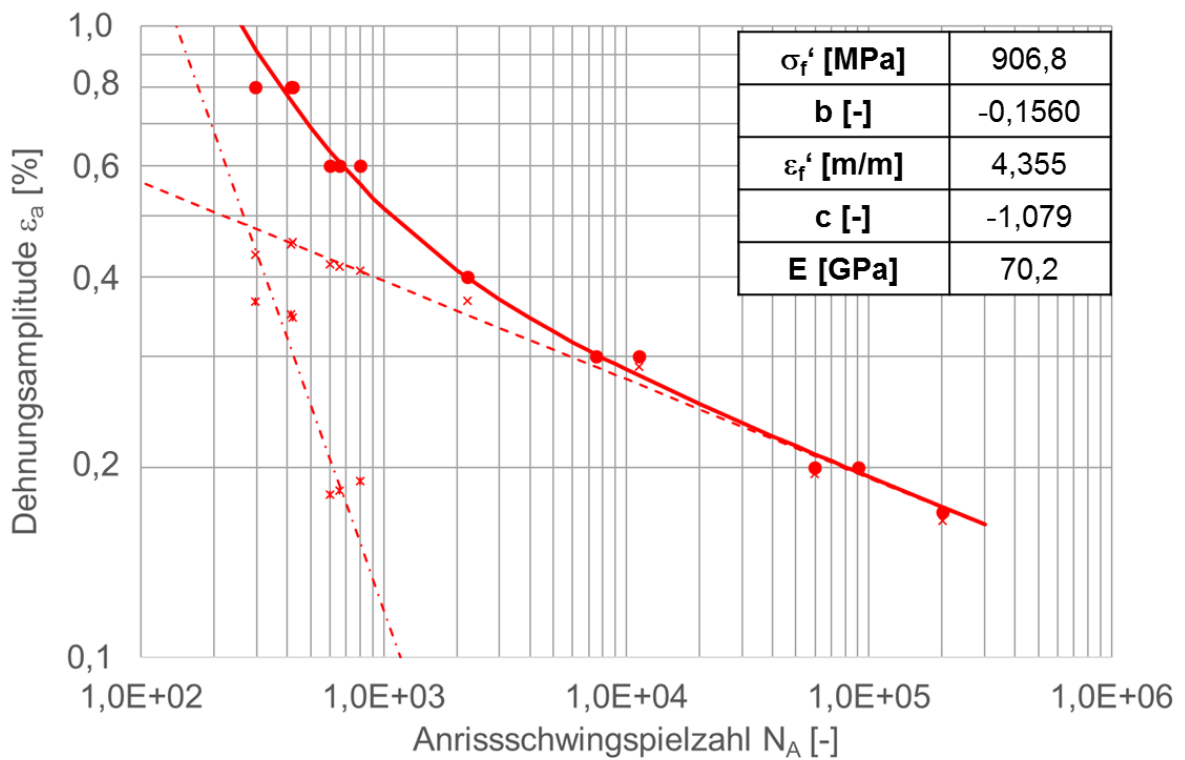


Abbildung 20-36: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Laserstrahlschneiden, P_A = 50 %, R = -1

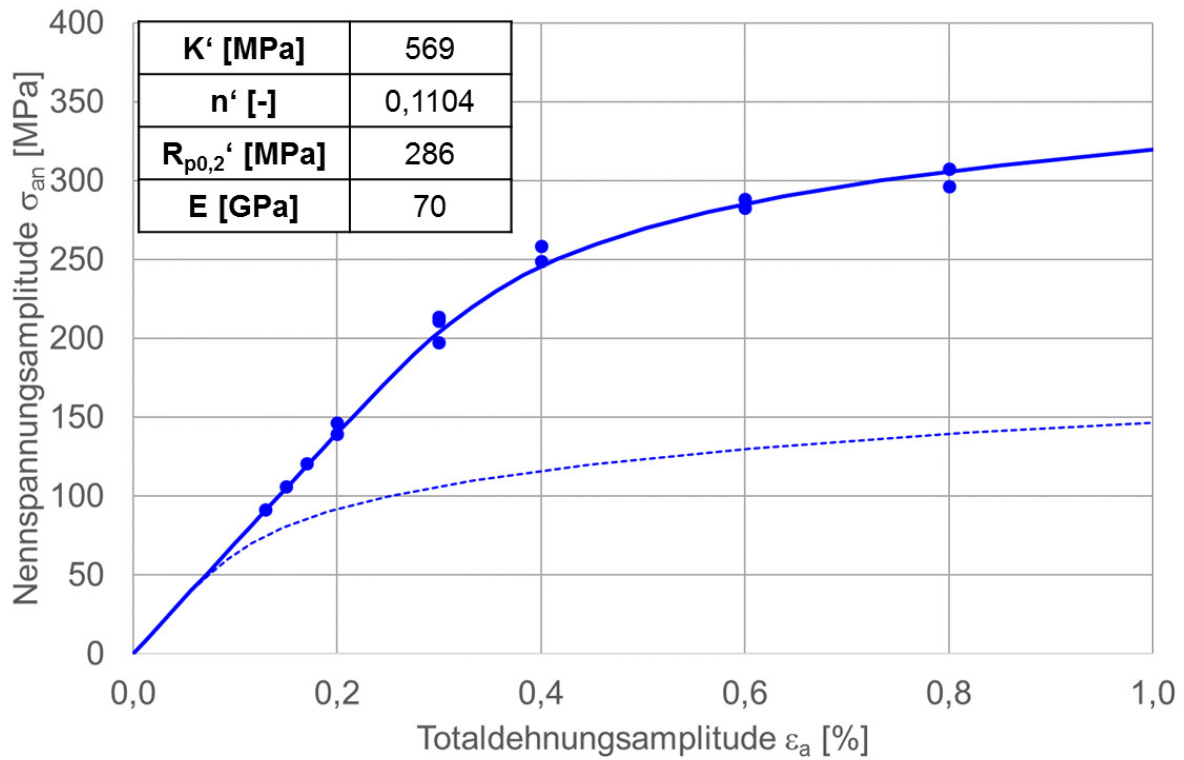


Abbildung 20-37: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 1, R = -1

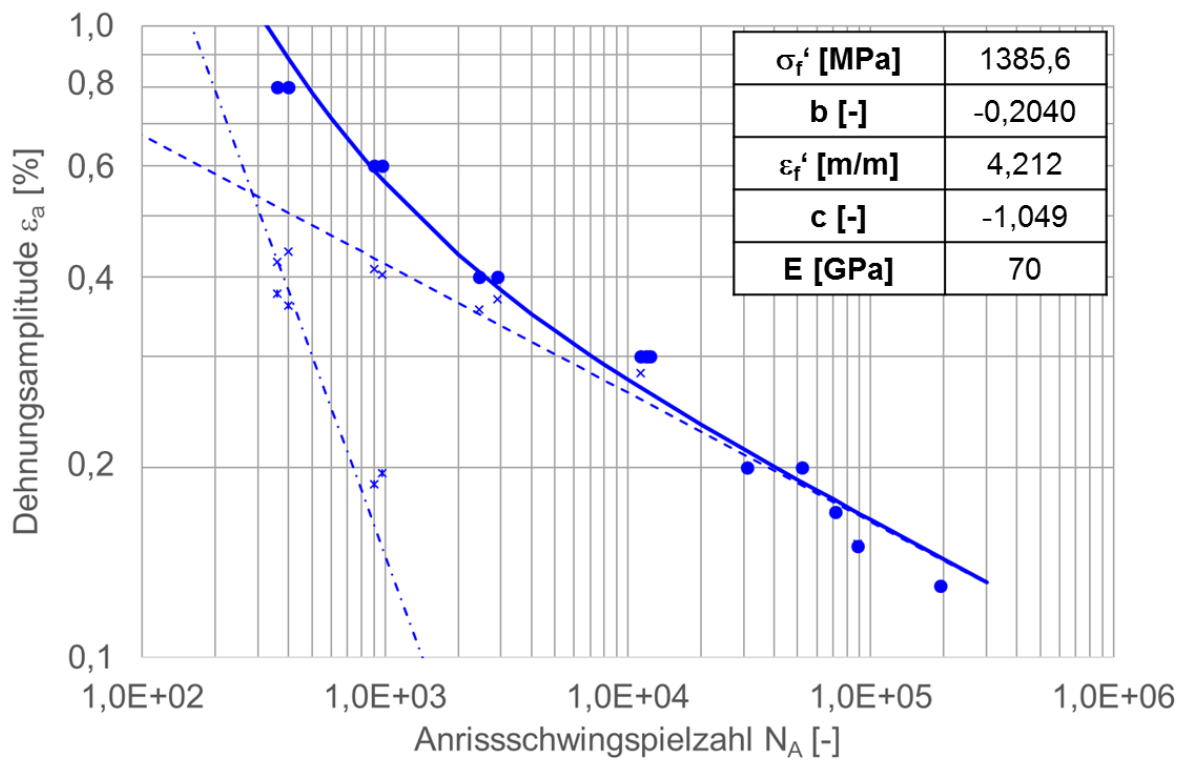


Abbildung 20-38: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 1, P_A = 50 %, R = -1

Tabelle 20-37: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 1, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																			
AA5182, Schneiden1																			
E-Modul Zugversuch [GPa]		70,2	Schwingspiel-zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$														Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-amp. ϵ_a [%]	Fre-quenz f [Hz]	Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.-ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Rißlage ¹⁾	
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,1}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_{ϵ} [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_{σ} [-]		
1	1	0,40	0,5	2444	2444	1222	75	0,400	-0,400	0,400	0,044	0,356	-1,0	242	-256	249	-1,1	C-0	
2	2	0,80	0,1	401	407	201	72	0,800	-0,800	0,800	0,361	0,439	-1,0	302	-313	308	-1,0	C-1	
3	3	0,80	0,1	359	365	180	76	0,800	-0,800	0,800	0,376	0,424	-1,0	290	-303	297	-1,0	C-1	
4	5	0,17	4,0	71450	80156	35725	72	0,170	-0,170	0,170	0,000	0,170	-1,0	122	-119	121	-1,0	C-1	
5	6	0,60	0,1	972	972	486	73	0,600	-0,600	0,600	0,196	0,404	-1,0	277	-289	283	-1,0	C-0	
6	7	0,30	1,0	11896	11896	5948	74	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	207	-220	214	-1,1	C-0	
7	8	0,60	0,1	902	902	451	67	0,600	-0,600	0,600	0,188	0,412	-1,0	282	-295	289	-1,0	C-0	
8	9	0,20	3,0	52000	57580	26000	71	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	139	-140	140	-1,0	C-1	
9	10	0,40	0,5	2912	2912	1456	73	0,400	-0,400	0,400	0,031	0,369	-1,0	251	-266	259	-1,1	C-0	
10	11	0,30	1,0	11267	11267	5634	69	0,300	-0,300	0,300	0,018	0,282	-1,0	192	-203	198	-1,1	C-0	
11	12	0,20	3,0	30903	35297	15452	74	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	146	-147	147	-1,0	C-1	
12	13	0,30	1,0	12361	12361	6181	73	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	203	-219	211	-1,1	C-0	
13	14	0,15	4,0	88410	98689	44205	72	0,200	-0,200	0,200	0,049	0,151	-1,0	107	-105	106	-1,0	C-1	
14	15	0,13	4,0	193197	217780	96599	71	0,130	-0,130	0,130	0,000	0,130	-1,0	92	-91	92	-1,0	C-1	

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Tabelle 20-38: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 2, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																			
AA5182, Schneiden 2																			
E-Modul Zugversuch [GPa]		70,0	Schwingspiel-zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$														Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-amp. ϵ_a [%]	Fre-quenz f [Hz]	Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.-ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Rißlage ¹⁾	
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,1}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_{ϵ} [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_{σ} [-]		
1	1	0,80	0,1	488	490	244	73	0,800	-0,800	0,800	0,376	0,424	-1,0	290	-304	297	-1,0	B1	
2	2	0,80	0,1	495	495	248	70	0,800	-0,800	0,800	0,359	0,441	-1,0	301	-316	309	-1,0	C0	
3	3	0,30	1,0	10666	13465	5333	71	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	201	-210	206	-1,0	C1	
4	5	0,20	3,0	42364	48875	21182	80	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	152	-136	144	-0,9	C1	
5	6	0,60	0,1	1023	1023	512	72	0,600	-0,600	0,600	0,172	0,428	-1,0	293	-306	300	-1,0	C0	
6	7	0,20	3,0	76648	79098	38324	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	138	-146	142	-1,1	C0	
7	8	0,40	0,5	3875	3875	1938	65	0,400	-0,400	0,400	0,056	0,344	-1,0	235	-246	241	-1,0	C0	
8	9	0,30	1,0	11117	16598	5559	74	0,300	-0,300	0,300	0,002	0,298	-1,0	201	-216	209	-1,1	C1	
9	10	0,17	3,0	77535	84525	38768	86	0,170	-0,170	0,170	0,000	0,170	-1,0	132	-126	129	-1,0	C1	
10	11	0,17	3,0	92512	101931	46256	75	0,170	-0,170	0,170	0,000	0,170	-1,0	127	-119	123	-0,9	C1	
11	12	0,15	3,0	213108	260736	106554	66	0,150	-0,150	0,150	0,013	0,137	-1,0	98	-94	96	-1,0	C0	

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

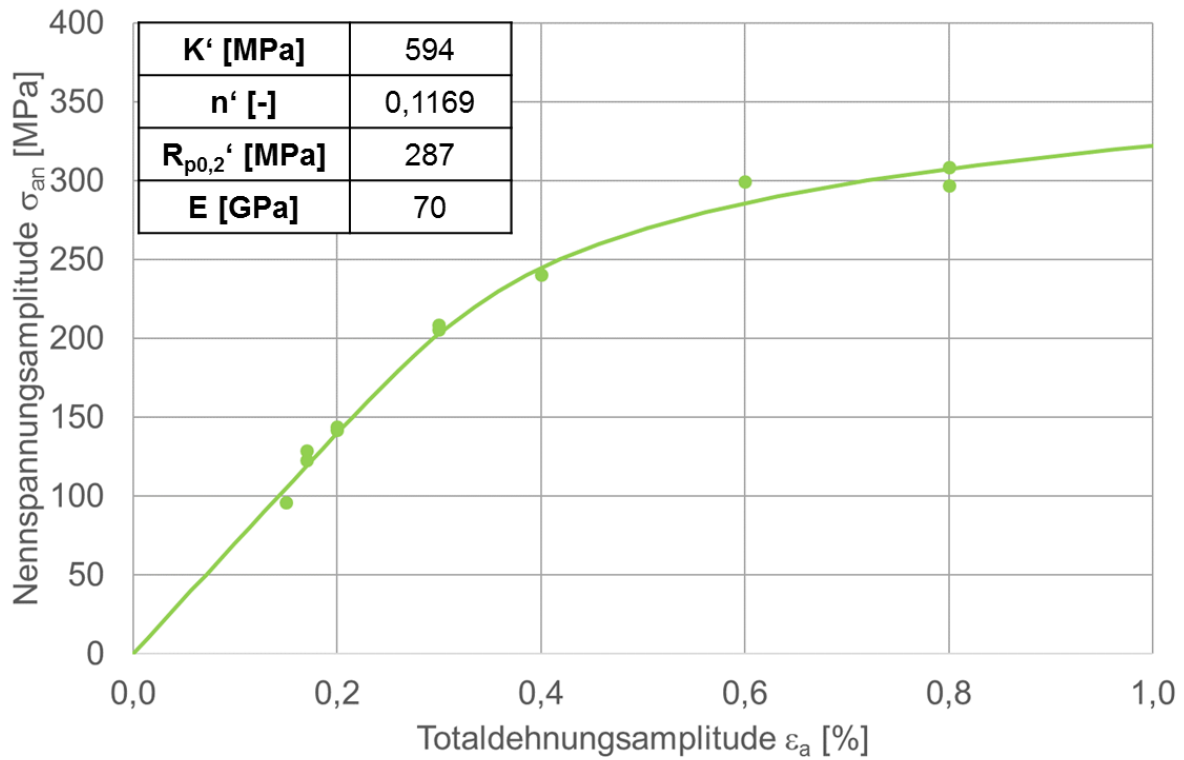


Abbildung 20-39: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 2, R = -1

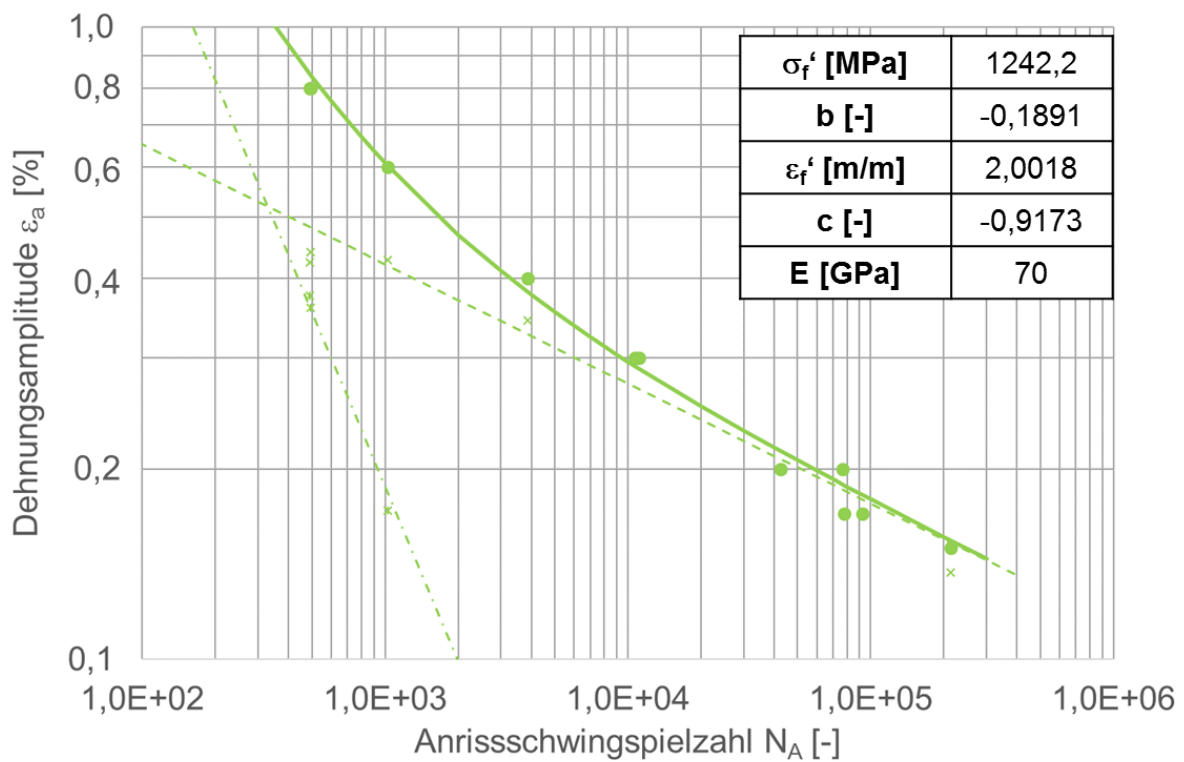


Abbildung 20-40: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 2, P_A = 50 %, R = -1

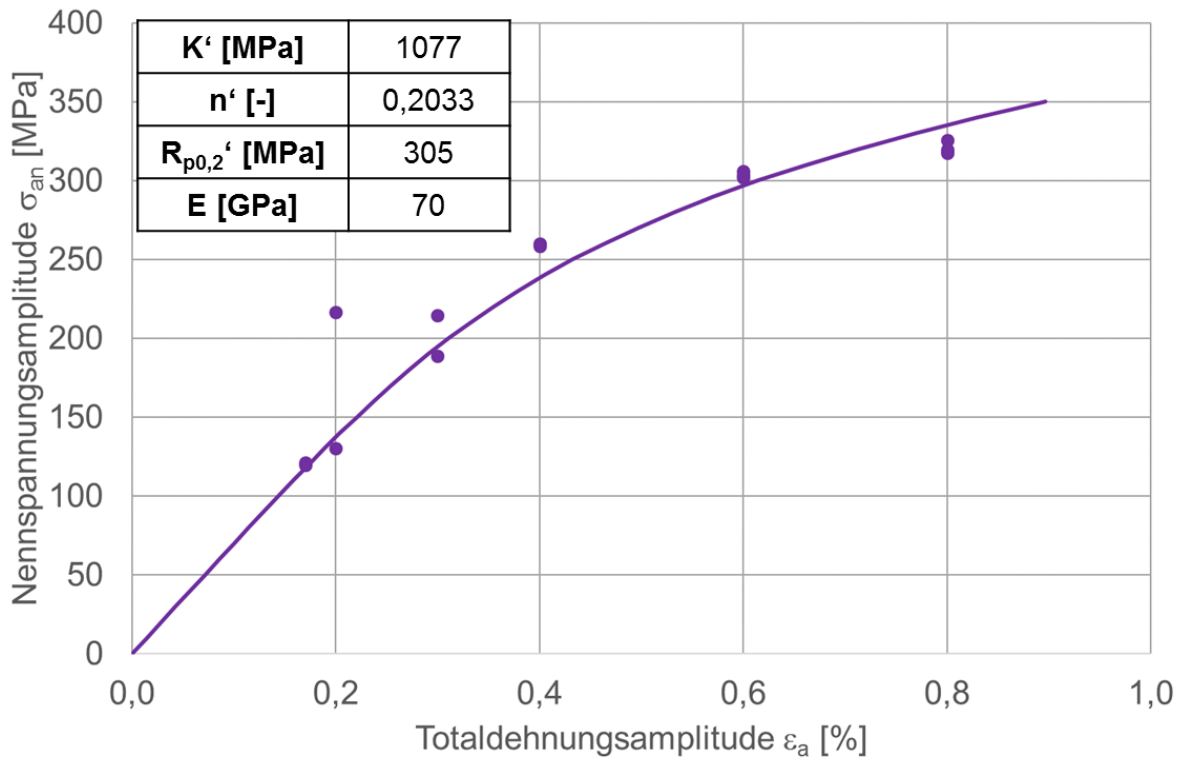


Abbildung 20-41: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 4a, R = -1

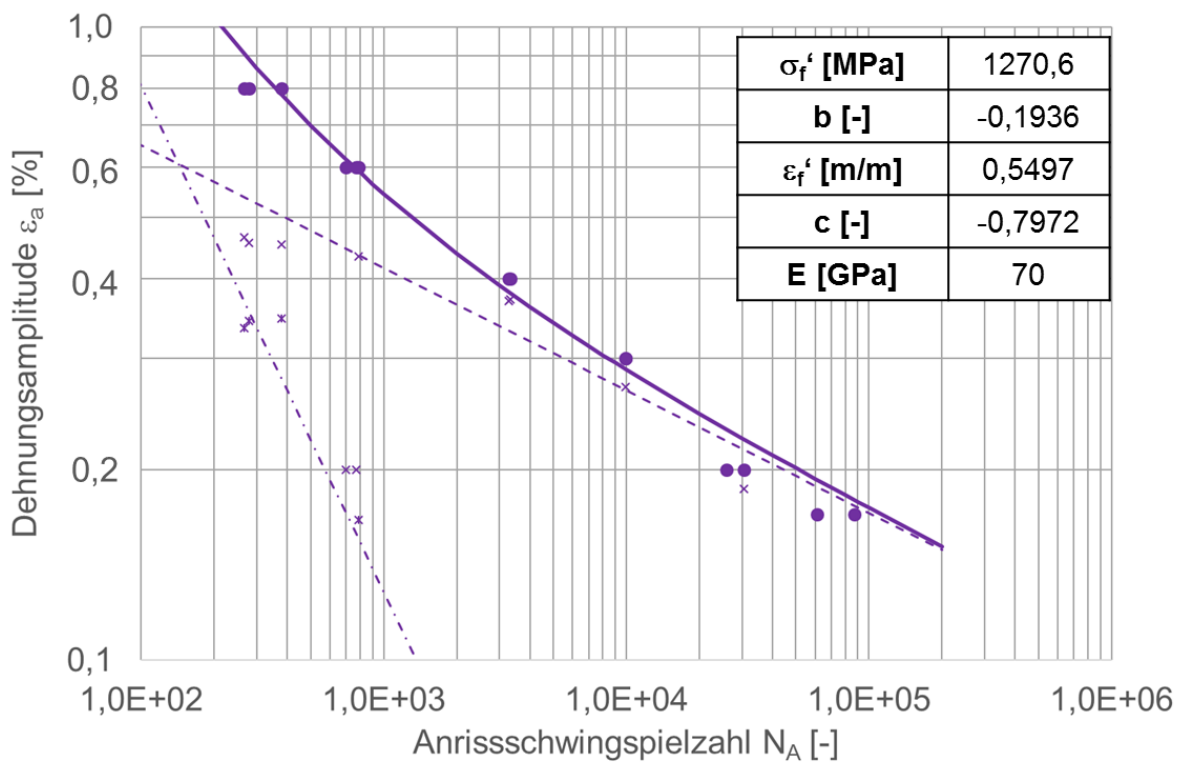


Abbildung 20-42: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 4a, P_A = 50 %, R = -1

Tabelle 20-39: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 4a, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																			
AA5182, Schneiden4																			
E-Modul Zugversuch [GPa]			70,0	Schwingspielzahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$													Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. ϵ_a [%]	Fre-quenz f [Hz]	Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.-ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Rißlage ¹⁾	
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_t [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_σ [-]		
1	1	0,80	0,1	379	379	190	78	0,800	-0,80	0,800	0,346	0,454	-1,0	310	-325	318	-1,0	C-0	
2	2	0,80	0,1	266	266	133	70	0,800	-0,80	0,800	0,335	0,465	-1,0	312	-339	326	-1,1	B-0	
3	3	0,20	2,0	25888	53467	12944	70	0,200	-0,20	0,200	0,000	0,200	-1,0	194	-239	217	-1,2	B-0	
4	5	0,60	0,1	772	802	386	73	0,600	-0,60	0,600	0,000	0,200	-1,0	298	-306	302	-1,0	C-0	
5	6	0,20	2,0	30600	81493	15300	69	0,200	-0,20	0,200	0,014	0,186	-1,0	121	-140	131	-1,2	C-1	
6	7	0,60	0,1	700	727	350	74	0,600	-0,60	0,600	0,000	0,200	-1,0	299	-313	306	-1,0	C-0	
7	8	0,40	0,5	3275	3275	1638	71	0,400	-0,40	0,400	0,031	0,369	-1,0	250	-267	259	-1,1	D-0	
8	9	0,30	1,0	9920	19890	4960	65	0,300	-0,30	0,300	0,030	0,270	-1,0	180	-198	189	-1,1	C-1	
9	10	0,40	0,5	3324	3324	1662	72	0,400	-0,40	0,400	0,029	0,371	-1,0	253	-267	260	-1,1	C-1	
10	11	0,30	1,0	9920	10469	4960	75	0,300	-0,30	0,300	0,000	0,300	-1,0	207	-222	215	-1,1	C-1	
11	12	0,80	0,1	278	278	139	70	0,800	-0,80	0,800	0,344	0,456	-1,0	312	-327	320	-1,0	D-0	
12	13	0,17	4,0	61235	68475	30618	78	0,170	-0,17	0,170	0,000	0,170	-1,0	120	-122	121	-1,0	C-1	
13	14	0,17	4,0	86896	89865	43448	71	0,170	-0,17	0,170	0,000	0,170	-1,0	111	-128	120	-1,2	C-1	
14	15	0,60	0,1	785	785	393	72	0,600	-0,60	0,600	0,166	0,434	-1,0	295	-312	304	-1,1	C-0	

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Tabelle 20-40: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA5182 Schneiden 4+ bzw. 4b, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																			
AA5182, Schneiden4+																			
E-Modul Zugversuch [GPa]			70,0	Schwingspielzahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$													Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. ϵ_a [%]	Fre-quenz f [Hz]	Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.-ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Rißlage ¹⁾	
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_t [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_σ [-]		
1	1	0,80	0,1	361	361	181	72	0,800	-0,80	0,800	0,353	0,447	-1,0	306	-320	313	-1,0	C-1	
2	2	0,80	0,1	276	276	138	74	0,800	-0,80	0,800	0,364	0,436	-1,0	300	-311	306	-1,0	D-0	
3	3	0,20	4,0	53026	85989	26513	68	0,200	-0,20	0,200	0,000	0,200	-1,0	126	-148	137	-1,2	B-0	
4	5	0,60	0,1	555	555	278	70	0,600	-0,60	0,600	0,000	0,200	-1,0	286	-309	298	-1,1	C-0	
5	6	0,60	0,1	491	491	246	69	0,600	-0,60	0,600	0,204	0,396	-1,0	272	-283	278	-1,0	C-1	
6	7	0,20	4,0	104616	125361	52308	70	0,200	-0,20	0,200	0,000	0,200	-1,0	109	-163	136	-1,5	C-0	
7	8	0,40	0,5	2158	2158	1079	72	0,400	-0,40	0,400	0,036	0,364	-1,0	245	-264	255	-1,1	D-0	
8	9	0,30	1,0	7092	7945	3546	66	0,300	-0,30	0,300	0,022	0,278	-1,0	201	-188	195	-0,9	C-1	
9	10	0,30	1,0	12982	12989	6491	63	0,300	-0,30	0,300	0,039	0,261	-1,0	181	-185	183	-1,0	E-0	
10	11	0,40	0,5	2257	2257	1129	73	0,400	-0,40	0,400	0,000	0,300	-1,0	239	-267	253	-1,1	C-1	
11	12	0,20	4,0	46050	79180	23025	71	0,200	-0,20	0,200	0,009	0,191	-1,0	124	-143	134	-1,2	C-0	
12	13	0,80	0,1	176	176	88	75	0,800	-0,80	0,800	0,000	0,170	-1,0	285	-299	292	-1,0	B-0	
13	14	0,17	4,0	61235	65963	30618	70	0,170	-0,17	0,170	0,000	0,170	-1,0	124	-137	131	-1,1	C-0	
14	15	0,60	0,1	476	476	238	73	0,600	-0,60	0,600	0,180	0,420	-1,0	288	-300	294	-1,0	D-0	
15	16	0,17	4,0	58456	136916	29228	77	0,170	-0,17	0,170	0,006	0,164	-1,0	111	-119	115	-1,1	C-1	

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

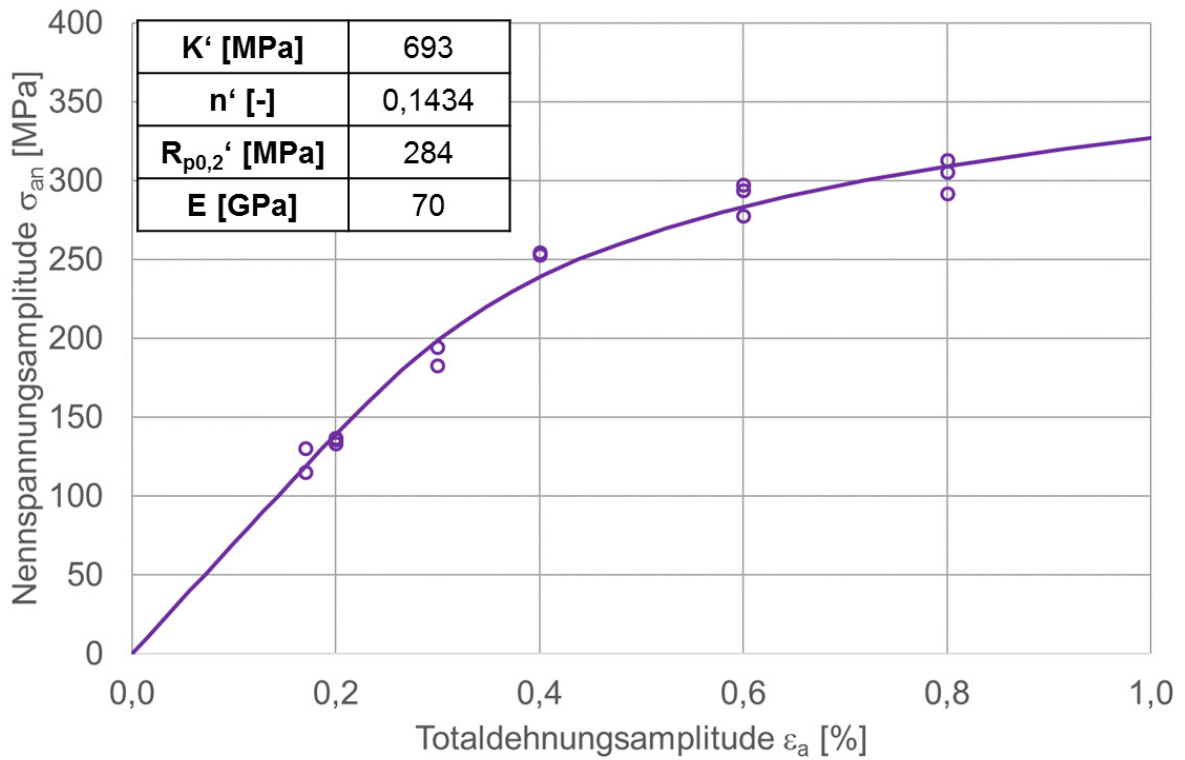


Abbildung 20-43: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA5182 Schneiden 4+ bzw. 4b, R = -1

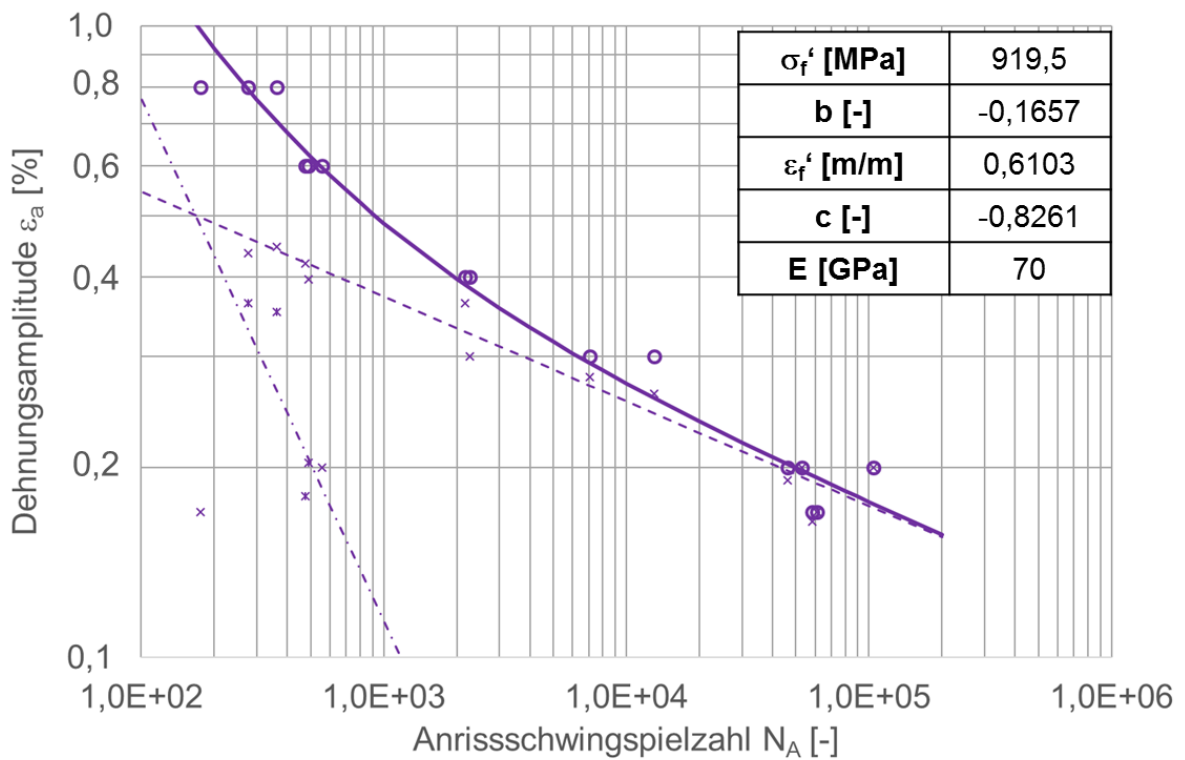


Abbildung 20-44: Dehnungs-Wöhlerlinie AA5182 Schneiden 4+ bzw. 4b, P_A = 50 %, R = -1

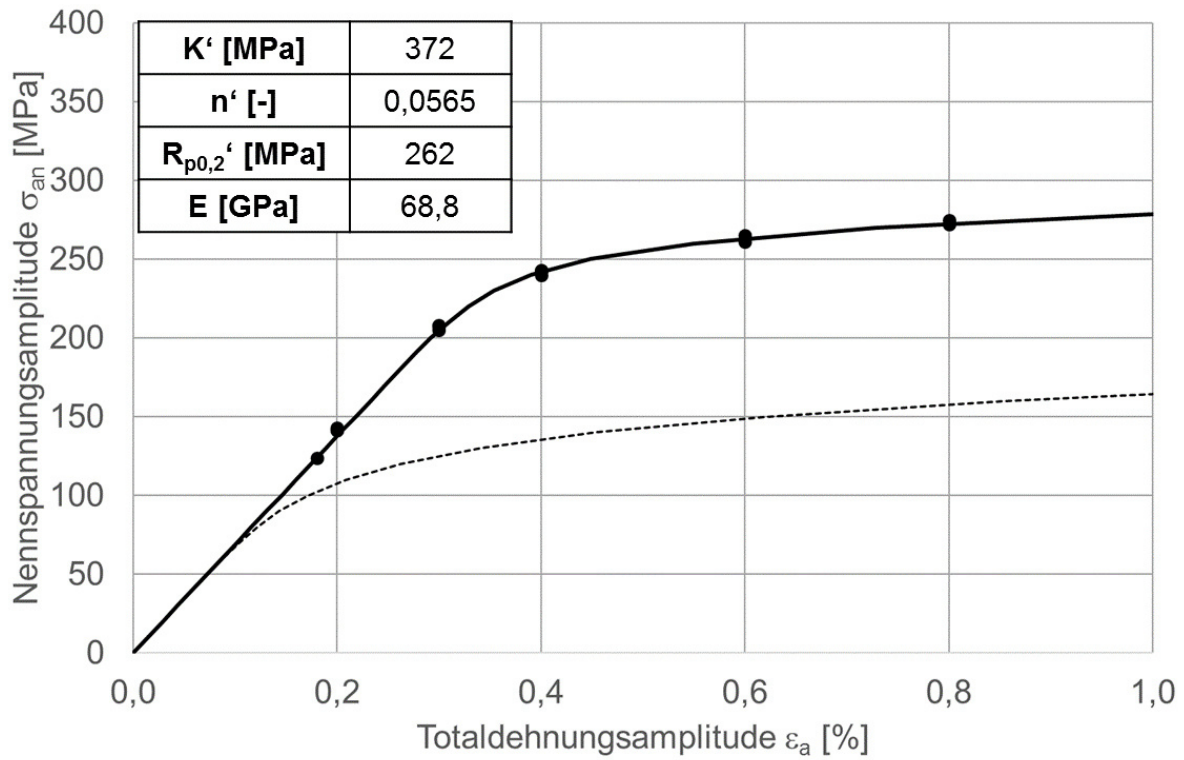


Abbildung 20-45: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 poliert, R = -1

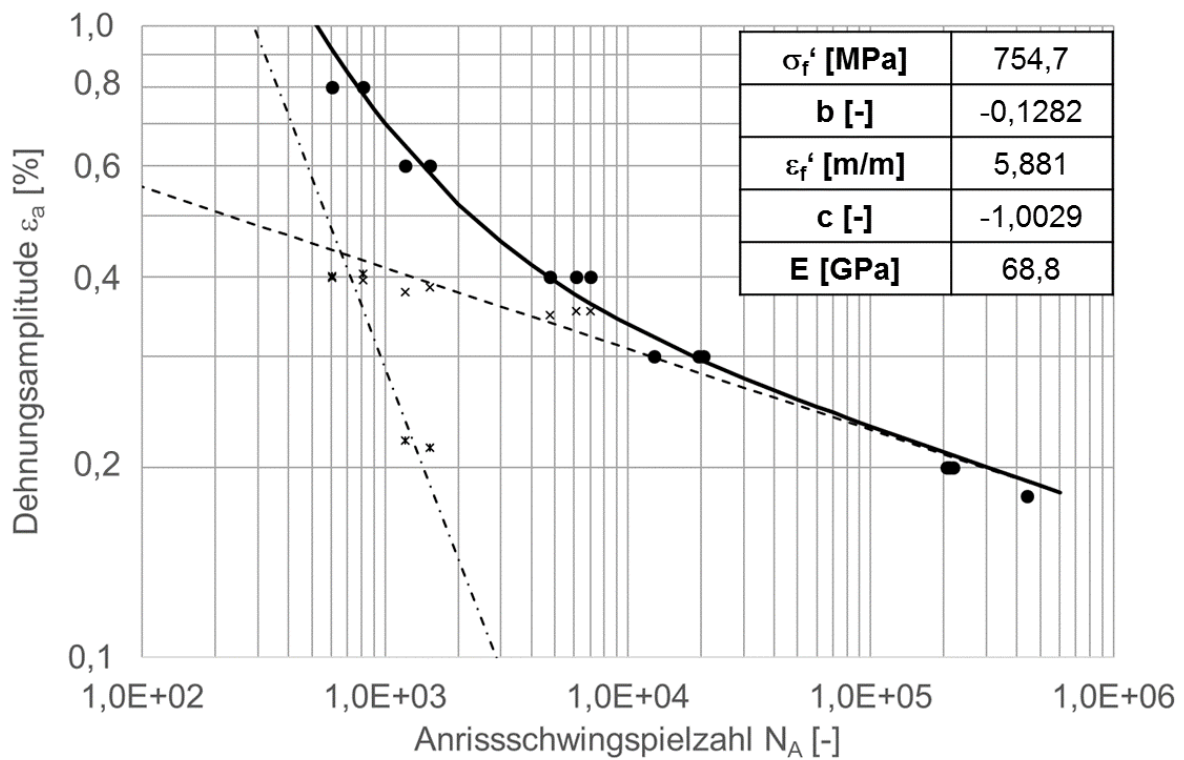


Abbildung 20-46: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 poliert, P_A = 50 %, R = -1

Tabelle 20-41: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 poliert, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																		
AA6082, Poliert																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		Deh- nungs- ampl. ϵ_a [%]	Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$												Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben- nr.			Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.- ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				
				ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]			$\epsilon_{a,1}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_{ϵ} [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_{σ} [-]			
1	1	0,80	0,1	606	626	303	74	0,800	-0,800	0,800	0,401	0,399	-1,0	265	-284	275	-1,1	D-0
2	2	0,30	1,0	12779	21025	6390	73	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	200	-216	208	-1,1	D-0
3	3	0,40	0,5	6121	6323	3061	72	0,400	-0,400	0,400	0,047	0,353	-1,0	236	-250	243	-1,1	C-1
4	5	0,30	1,0	19521	19720	9761	72	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	198	-212	205	-1,1	C-0
5	6	0,60	0,1	1533	1533	767	75	0,600	-0,600	0,600	0,215	0,385	-1,0	259	-271	265	-1,0	D-0
6	7	0,40	0,5	4778	4778	2389	72	0,400	-0,400	0,400	0,051	0,349	-1,0	233	-247	240	-1,1	D-0
7	8	0,20	3,0	210184	219756	105092	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	135	-148	142	-1,1	C-0
8	9	0,30	1,0	20464	22940	10232	73	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	199	-216	208	-1,1	C-1
9	10	0,60	0,1	1212	1774	606	74	0,600	-0,600	0,600	0,221	0,379	-1,0	255	-267	261	-1,0	B-0
10	11	0,20	3,0	206158	227450	103079	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	143	-140	142	-1,0	C-1
11	12	0,40	0,5	7008	7189	3504	72	0,400	-0,400	0,400	0,047	0,353	-1,0	236	-250	243	-1,1	C-1
12	13	0,80	0,1	812	812	406	75	0,800	-0,800	0,800	0,405	0,395	-1,0	266	-278	272	-1,0	D-0
13	14	0,18	3,0	440255	440255	220128	70	0,180	-0,180	0,180	0,000	0,180	-1,0	125	-123	124	-1,0	C-1
14	15	0,20	3,0	218110	218110	109055	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	135	-151	143	-1,1	C-1

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Tabelle 20-42: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Laserstrahlschneiden, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																		
AA6082, Laser																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		Deh- nungs- ampl. ϵ_a [%]	Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$												Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben- nr.			Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.- ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				
				ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]			$\epsilon_{a,1}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_{ϵ} [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_{σ} [-]			
1	1	0,60	0,1	821	821	411	75	0,600	-0,600	0,600	0,236	0,364	-1,0	249	-261	255	-1,0	C-0
2	2	0,40	0,5	3056	3416	1528	75	0,400	-0,400	0,400	0,060	0,340	-1,0	231	-245	238	-1,1	E-0
3	3	0,20	3,0	62445	64435	31223	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	137	-147	142	-1,1	C-0
4	4	0,20	3,0	53333	54809	26667	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	138	-145	142	-1,1	C-0
5	5	0,40	0,5	2168	2662	1084	72	0,400	-0,400	0,400	0,071	0,329	-1,0	224	-237	231	-1,1	C-1
6	6	0,80	0,1	473	473	237	77	0,800	-0,800	0,800	0,420	0,380	-1,0	260	-272	266	-1,0	C-1
7	7	0,17	4,0	106365	124345	53183	74	0,170	-0,170	0,170	0,000	0,170	-1,0	122	-125	124	-1,0	C-1
8	8	0,30	1,0	8017	8484	4009	73	0,300	-0,300	0,300	0,005	0,295	-1,0	199	-214	207	-1,1	C-1
9	9	0,80	0,1	417	417	209	76	0,800	-0,800	0,800	0,000	0,200	-1,0	260	-276	268	-1,1	C-1
10	10	0,30	1,0	7842	7842	3921	71	0,300	-0,300	0,300	0,020	0,280	-1,0	198	-194	196	-1,0	C-0
11	11	0,15	4,0	226464	299911	113232	74	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	95	-124	110	-1,3	C-1
12	12	0,60	0,1	928	932	464	76	0,600	-0,600	0,600	0,228	0,372	-1,0	254	-267	261	-1,1	B-1
13	13	0,15	4,0	213108	258238	106554	74	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	91	-124	108	-1,4	C-0
14	14	0,13	4,0	319448	372385	159724	72	0,130	-0,130	0,130	0,000	0,130	-1,0	88	-98	93	-1,1	C-0

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

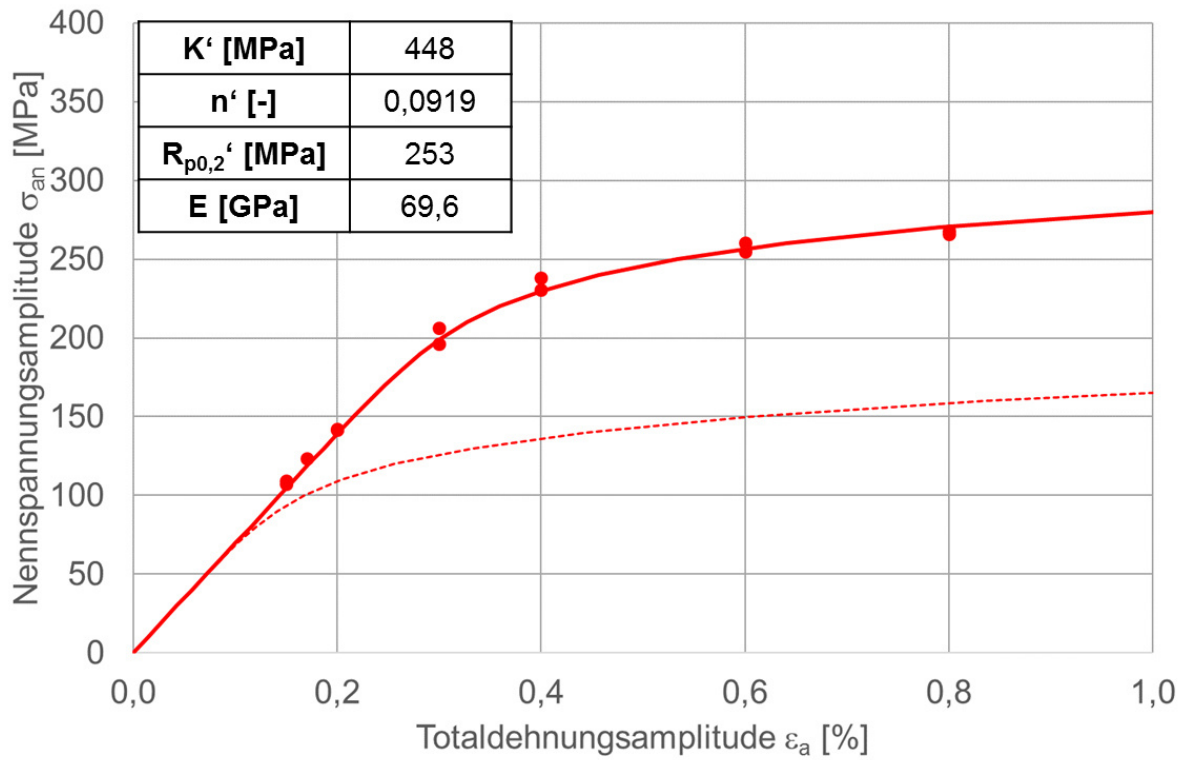


Abbildung 20-47: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Laserstrahlschneiden, R = -1

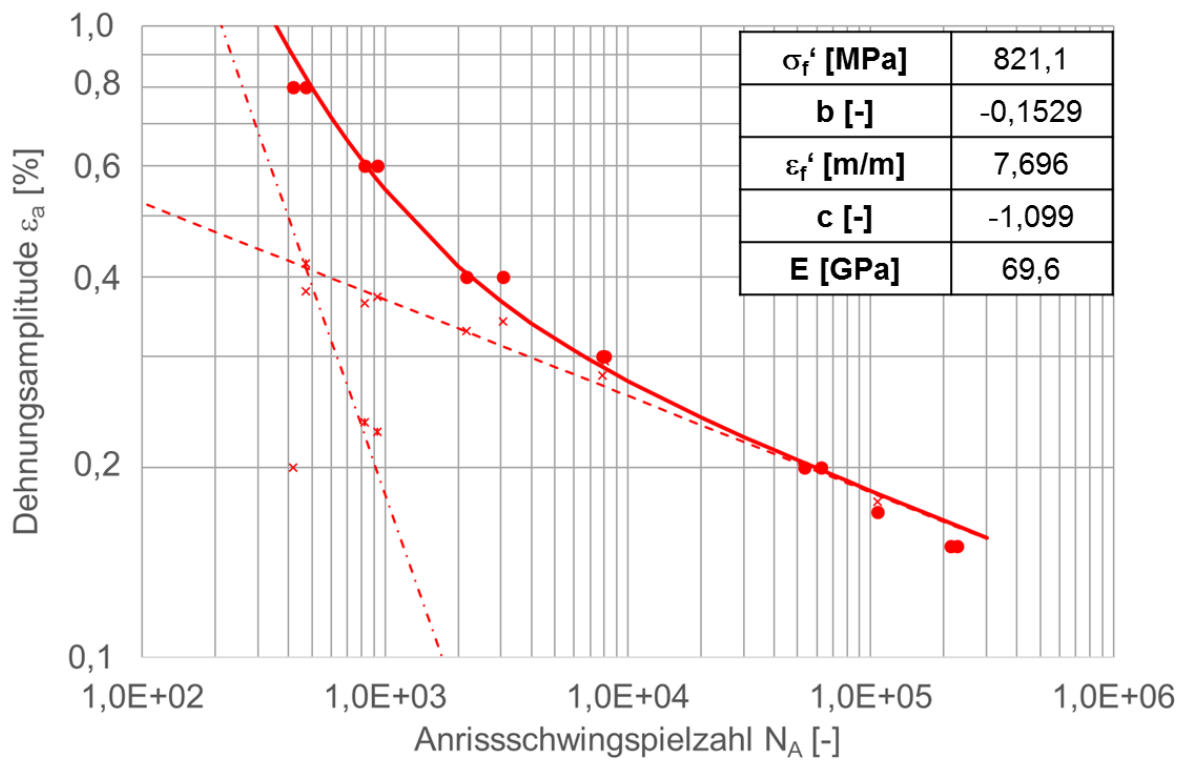


Abbildung 20-48: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Laserstrahlschneiden, P_A = 50 %, R = -1

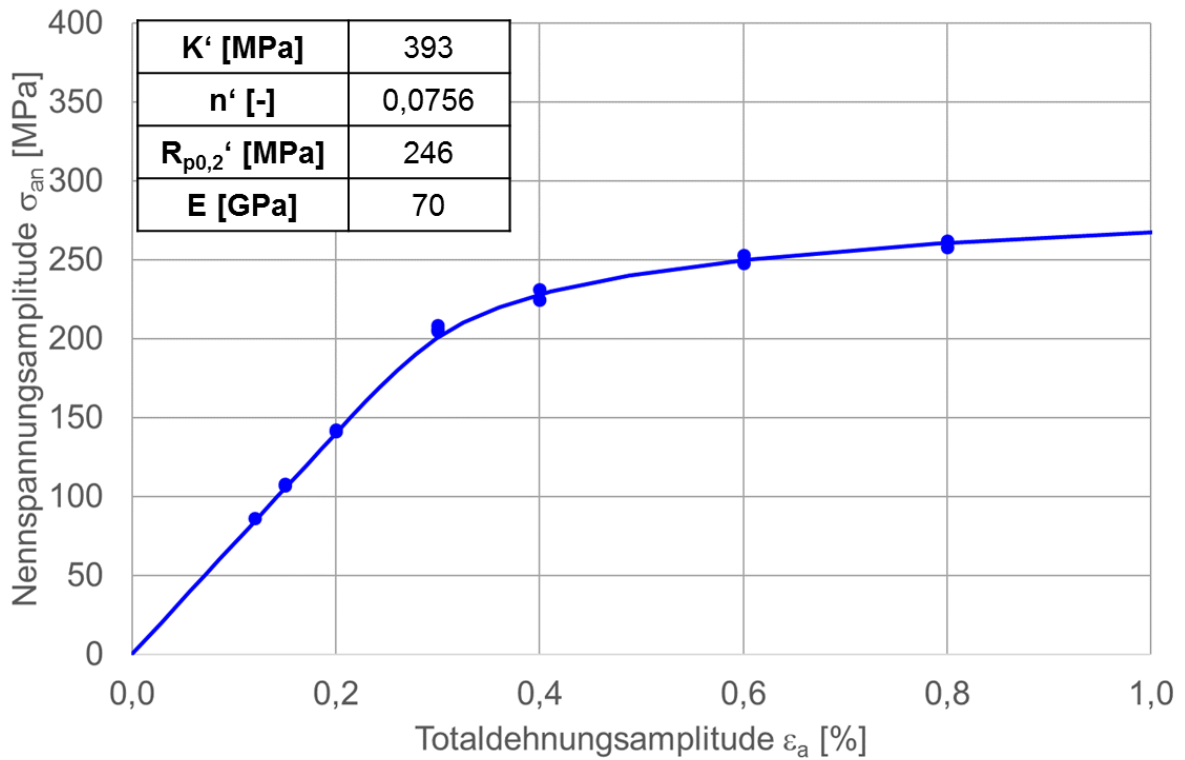


Abbildung 20-49: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 1, R = -1

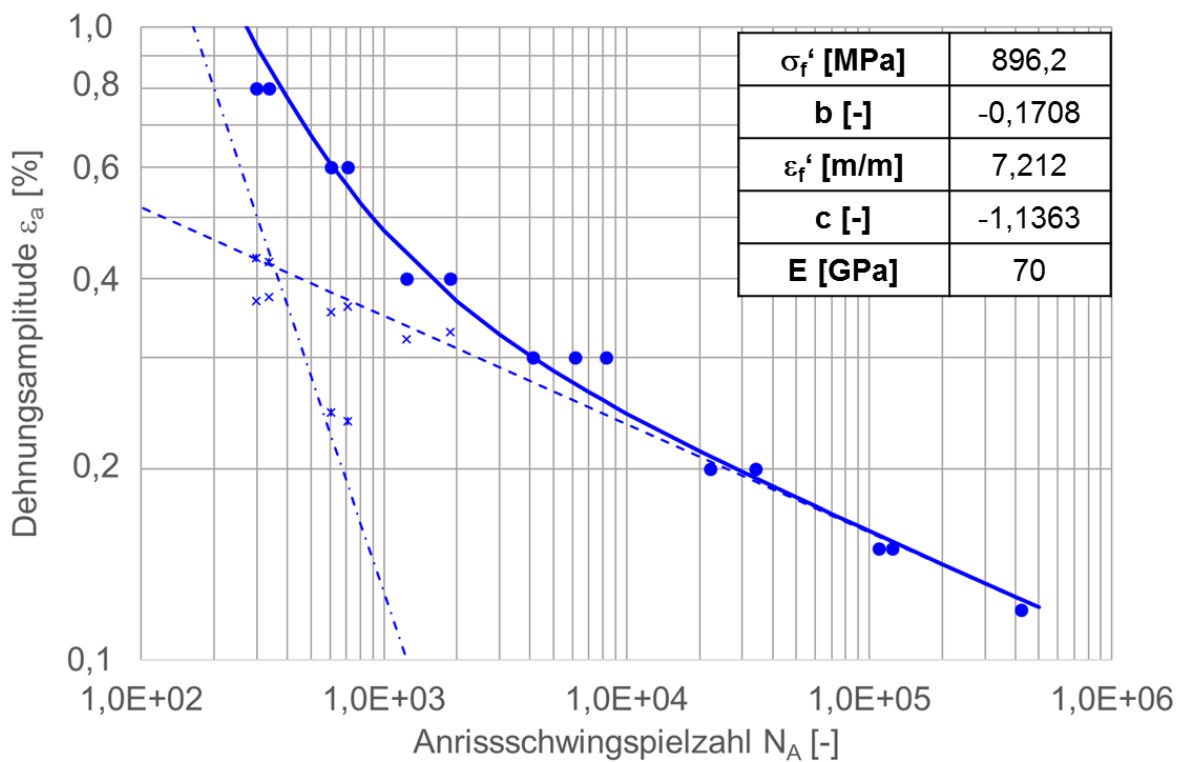


Abbildung 20-50: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 1, P_A = 50 %, R = -1

Tabelle 20-43: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 1, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																			
AA6082, Schneiden1, W185																			
E-Modul Zugversuch [GPa]			Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N _i		Ergebnisse Half Life N=N/2=N ₅₀													Bemerkungen Rißlage ¹⁾
Ifd. Nr.	Proben- nr.	Deh- nungs- ampl. ε _a [%]		Anriß N _i	Bruch N _B bzw. Vers.- ende N _E	N ₅₀	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen					
								ε _{max} [%]	ε _{min} [%]	ε _{a,t} [%]	ε _{a,p} [%]	ε _{a,e} [%]	R _t [-]	σ _{max} [MPa]	σ _{min} [MPa]	σ _a [MPa]	R _σ [-]		
1	1	0,60	0,1	709	716	355	72	0,600	-0,600	0,600	0,239	0,361	-1,0	248	-258	253	-1,0	C-1	
2	2	0,20	3,0	34002	37581	17001	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	135	-149	142	-1,1	C-0	
3	3	0,40	0,5	1241	1860	621	72	0,400	-0,400	0,400	0,079	0,321	-1,0	218	-231	225	-1,1	C-1	
4	5	0,15	4,0	124165	132555	62083	73	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	105	-111	108	-1,1	C-1	
5	6	0,80	0,1	297	301	149	73	0,800	-0,800	0,800	0,431	0,369	-1,0	252	-264	258	-1,0	C-1	
6	7	0,15	4,0	109799	135265	54900	72	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	102	-112	107	-1,1	C-0	
7	8	0,30	1,0	4127	4746	2064	74	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	200	-212	206	-1,1	C-1	
8	9	0,80	0,1	337	353	169	76	0,800	-0,800	0,800	0,426	0,374	-1,0	256	-268	262	-1,0	B-0	
9	10	0,20	3,0	22156	28739	11078	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	139	-143	141	-1,0	C-1	
10	11	0,30	1,0	8234	9009	4117	75	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	201	-216	209	-1,1	C-1	
11	12	0,40	0,5	1883	1883	942	72	0,400	-0,400	0,400	0,070	0,330	-1,0	225	-237	231	-1,1	C-0	
12	13	0,60	0,1	605	612	303	74	0,600	-0,600	0,600	0,246	0,354	-1,0	242	-254	248	-1,0	C-1	
13	14	0,30	1,0	6121	6567	3061	73	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	198	-212	205	-1,1	C-1	
14	15	0,12	4,0	421114	497460	210557	74	0,120	-0,120	0,120	0,000	0,120	-1,0	86	-86	86	-1,0	C-1	

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Tabelle 20-44: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 2, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																			
AA6082, Schneiden2, W185																			
E-Modul Zugversuch [GPa]			Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N _i		Ergebnisse Half Life N=N/2=N ₅₀													Bemerkungen Rißlage ¹⁾
Ifd. Nr.	Proben- nr.	Deh- nungs- ampl. ε _a [%]		Anriß N _i	Bruch N _B bzw. Vers.- ende N _E	N ₅₀	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen					
								ε _{max} [%]	ε _{min} [%]	ε _{a,t} [%]	ε _{a,p} [%]	ε _{a,e} [%]	R _t [-]	σ _{max} [MPa]	σ _{min} [MPa]	σ _a [MPa]	R _σ [-]		
1	1	0,20	2,0	42364	49116	21182	72	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	140	-142	141	-1,0	C1	
2	2	0,40	0,5	1426	1455	713	75	0,400	-0,400	0,400	0,053	0,347	-1,0	236	-250	243	-1,1	C1	
3	3	0,80	0,1	279	279	140	77	0,800	-0,800	0,800	0,410	0,390	-1,0	265	-281	273	-1,1	C1	
4	5	0,30	1,0	2278	2739	1139	79	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	226	-221	224	-1,0	C1	
5	6	0,60	0,1	575	584	288	72	0,600	-0,600	0,600	0,222	0,378	-1,0	256	-273	265	-1,1	C1	
6	7	0,80	0,1	155	155	78	80	0,800	-0,800	0,800	0,390	0,410	-1,0	280	-294	287	-1,1	C1	
7	8	0,20	2,0	31622	34512	15811	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	135	-150	143	-1,1	C1	
8	9	0,80	0,1	305	305	153	76	0,800	-0,800	0,800	0,403	0,397	-1,0	269	-287	278	-1,1	C1	
9	10	0,40	0,5	853	880	427	78	0,400	-0,400	0,400	0,000	0,200	-1,0	233	-247	240	-1,1	C1	
10	11	0,15	3,0	93540	103439	46770	73	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	104	-112	108	-1,1	C1	
11	12	0,60	0,1	541	541	271	77	0,600	-0,600	0,600	0,219	0,381	-1,0	258	-275	267	-1,1	C0	
12	13	0,15	3,0	101065	104795	50533	71	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	104	-111	108	-1,1	C1	
13	14	0,13	3,0	209315	223420	104658	72	0,130	-0,130	0,130	0,000	0,130	-1,0	86	-98	92	-1,1	C1	

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
 (Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

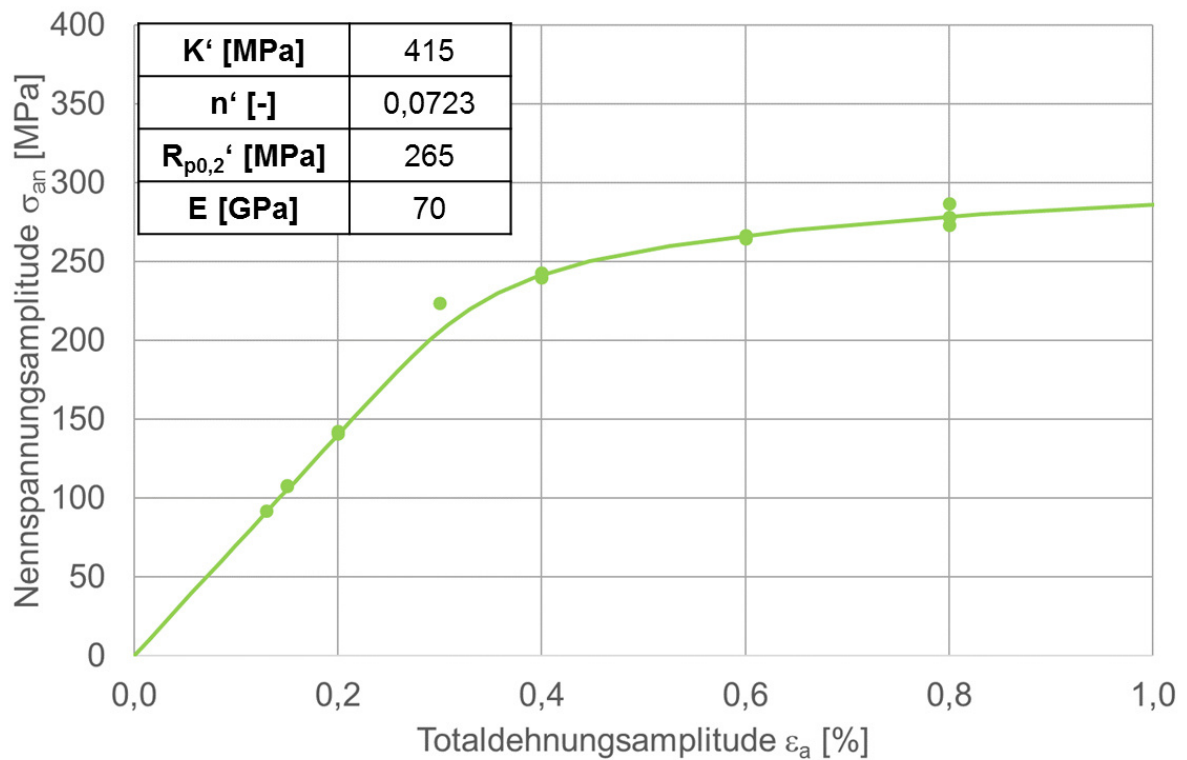


Abbildung 20-51: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 2, R = -1

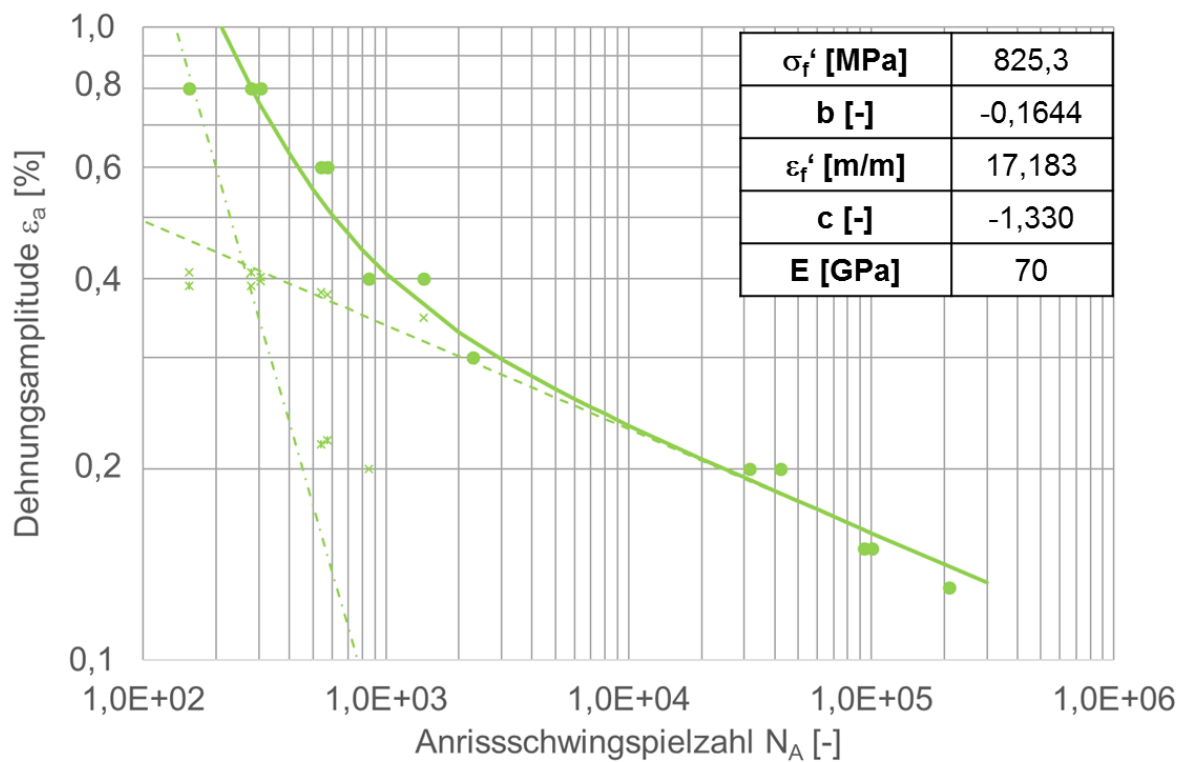


Abbildung 20-52: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 2, P_A = 50 %, R = -1

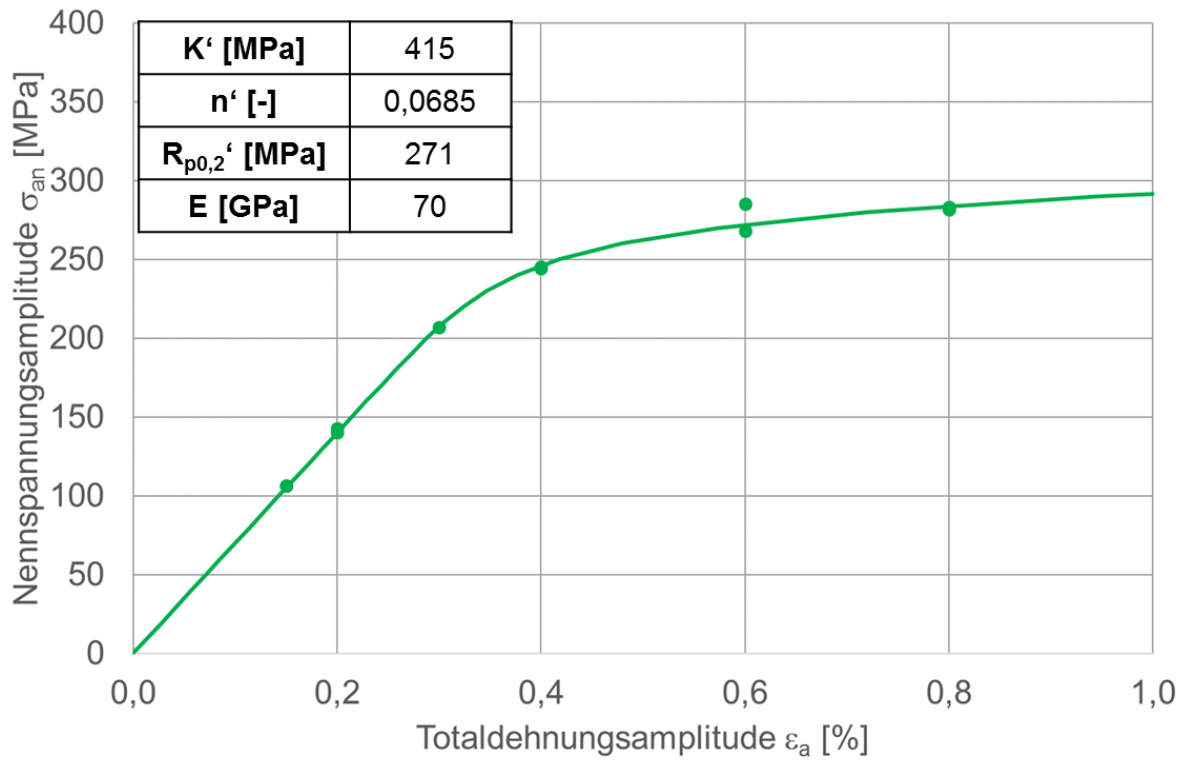


Abbildung 20-53: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 3, R = -1

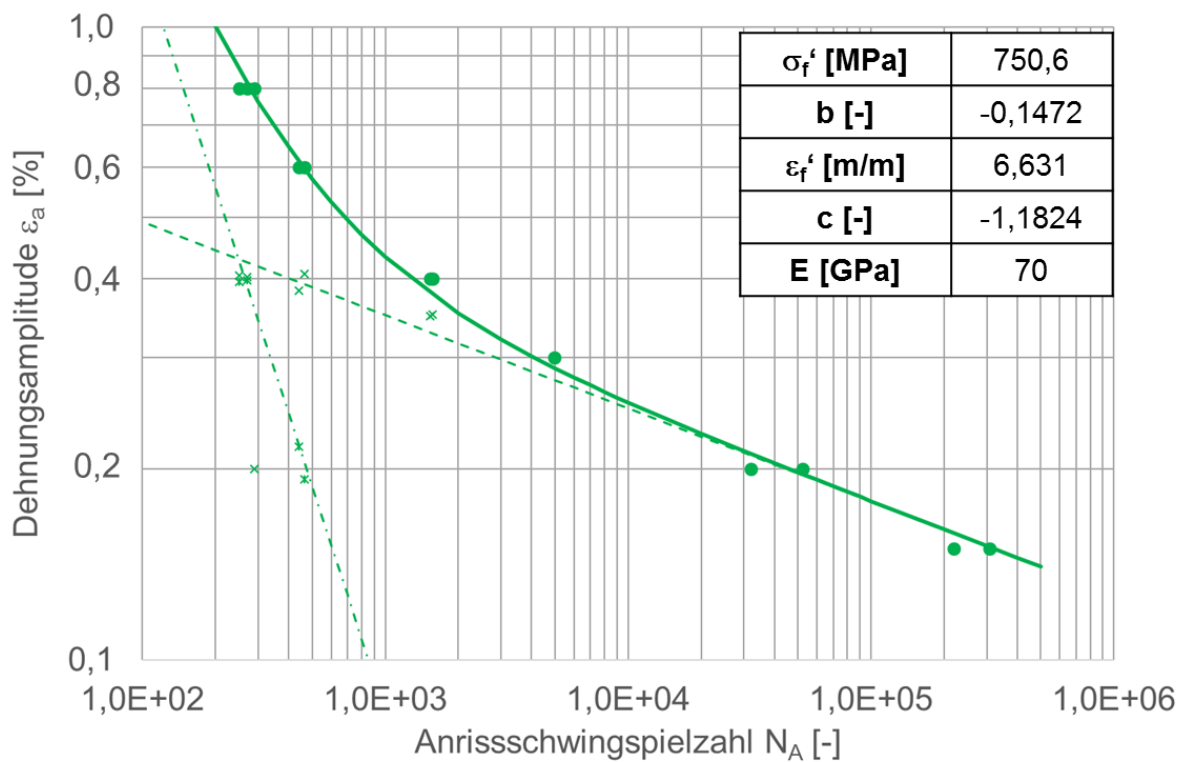


Abbildung 20-54: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 3, P_A = 50 %, R = -1

Tabelle 20-45: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 3, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																				
AA6082, Schneiden3, W185																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		Deh- nungs- ampl. ϵ_a [%]	Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$													Bemerkungen	
Ifd. Nr.	Proben- nr.			Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.- ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen							Spannungen					Rißlage ¹⁾
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,1}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_{ϵ} [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_{σ} [-]			
1	1	0,60	0,1	464	474	232	73	0,600	-0,600	0,600	0,193	0,407	-1,0	274	-296	285	-1,1	C1		
2	2	0,40	0,5	1537	1556	769	73	0,400	-0,400	0,400	0,051	0,349	-1,0	252	-237	245	-0,9	C1		
3	3	0,30	1,0	4972	4972	2486	73	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	213	-201	207	-0,9	C0		
4	5	0,20	2,0	52180	58865	26090	71	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	134	-146	140	-1,1	C1		
5	6	0,15	3,0	307751	341852	153876	73	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	97	-116	107	-1,2	C1		
6	7	0,40	0,5	1561	1561	781	72	0,400	-0,400	0,400	0,049	0,351	-1,0	252	-239	246	-0,9	C0		
7	8	0,20	2,0	31915	38660	15958	74	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	143	-143	143	-1,0	C1		
8	9	0,60	0,1	442	442	221	74	0,600	-0,600	0,600	0,217	0,383	-1,0	262	-274	268	-1,0	C0		
9	10	0,80	0,1	289	289	145	73	0,800	-0,800	0,800	0,000	0,200	-1,0	276	-288	282	-1,0	B1		
10	11	0,80	0,1	250	250	125	75	0,800	-0,800	0,800	0,396	0,404	-1,0	275	-291	283	-1,1	C1		
11	12	0,80	0,1	270	270	135	73	0,800	-0,800	0,800	0,398	0,402	-1,0	273	-290	282	-1,1	B0		
12	13	0,15	3,0	218474	259083	109237	72	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	103	-110	107	-1,1	C1		

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
(Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Tabelle 20-46: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 4a, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																				
AA6082, Schneiden4, W185																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		Deh- nungs- ampl. ϵ_a [%]	Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$													Bemerkungen	
Ifd. Nr.	Proben- nr.			Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.- ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen							Spannungen					Rißlage ¹⁾
								ϵ_{max} [%]	ϵ_{min} [%]	$\epsilon_{a,1}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	R_{ϵ} [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_{σ} [-]			
1	1	0,80	0,1	335	335	168	76	0,800	-0,800	0,800	0,411	0,389	-1,0	265	-279	272	-1,1	D-0		
2	2	0,80	0,1	259	259	130	72	0,800	-0,800	0,800	0,419	0,381	-1,0	261	-272	267	-1,0	C-0		
3	3	0,60	0,1	650	745	325	74	0,600	-0,600	0,600	0,226	0,374	-1,0	256	-268	262	-1,0	B-0		
4	5	0,40	0,5	1811	1839	906	75	0,400	-0,400	0,400	0,056	0,344	-1,0	234	-248	241	-1,1	C-1		
5	6	0,60	0,1	584	584	292	75	0,600	-0,600	0,600	0,231	0,369	-1,0	252	-264	258	-1,0	C-0		
6	7	0,20	3,0	26242	32130	13121	78	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	148	-163	156	-1,1	C-1		
7	8	0,40	0,5	1575	1602	788	77	0,400	-0,400	0,400	0,058	0,342	-1,0	234	-245	240	-1,0	C-1		
8	9	0,80	0,1	267	267	134	78	0,800	-0,800	0,800	0,414	0,386	-1,0	264	-277	271	-1,0	D-0		
9	10	0,20	3,0	43251	47363	21626	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	163	-123	143	-0,8	C-1		
10	11	0,15	3,0	107251	123980	53626	78	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	117	-116	117	-1,0	C-1		
11	12	0,15	3,0	104616	122944	52308	76	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	102	-125	114	-1,2	C-1		
12	13	0,60	0,1	467	467	234	76	0,600	-0,600	0,600	0,231	0,369	-1,0	250	-266	258	-1,1	C-1		
13	14	0,30	1,0	2443	3050	1222	88	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	217	-225	221	-1,0	C-1		
14	15	0,30	1,0	2046	2233	1023	80	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,300	-1,0	209	-225	217	-1,1	C-1		

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schneiden, C= außerhalb der Schneiden, D= unter den Schneiden (oben), E= unter den Schneiden (unten)
0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
(Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

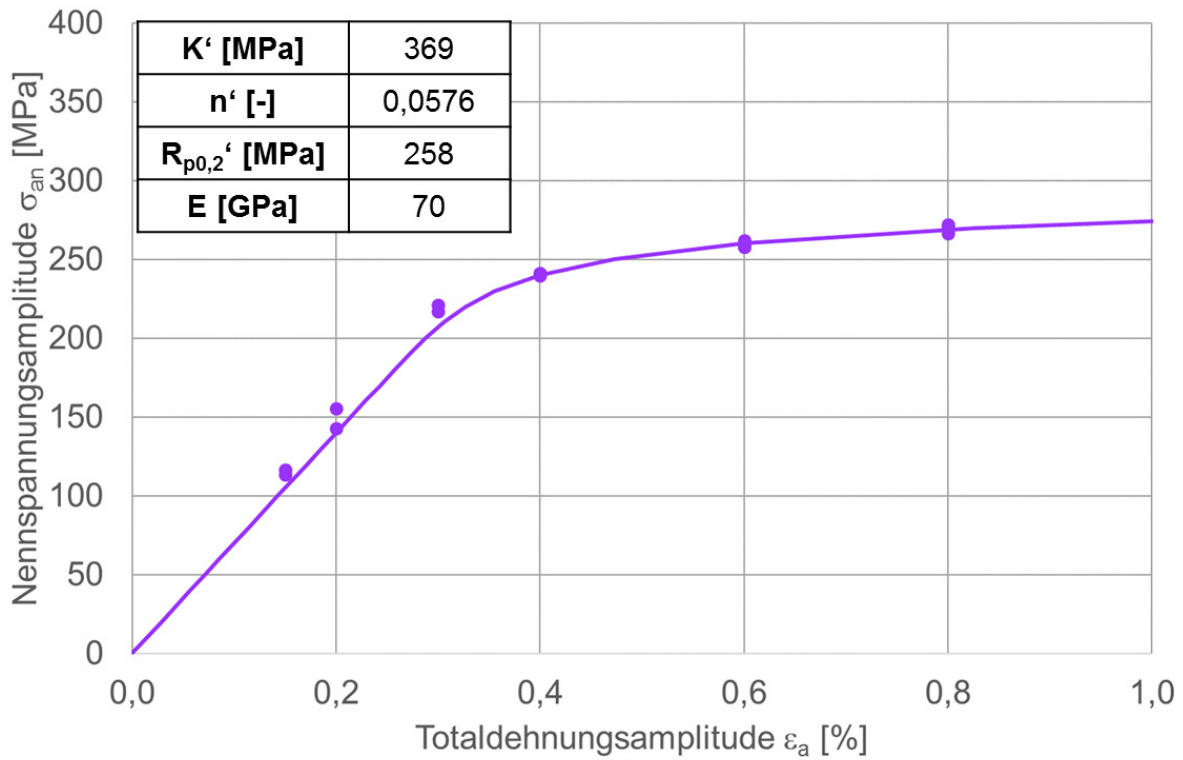


Abbildung 20-55: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 4a, R = -1

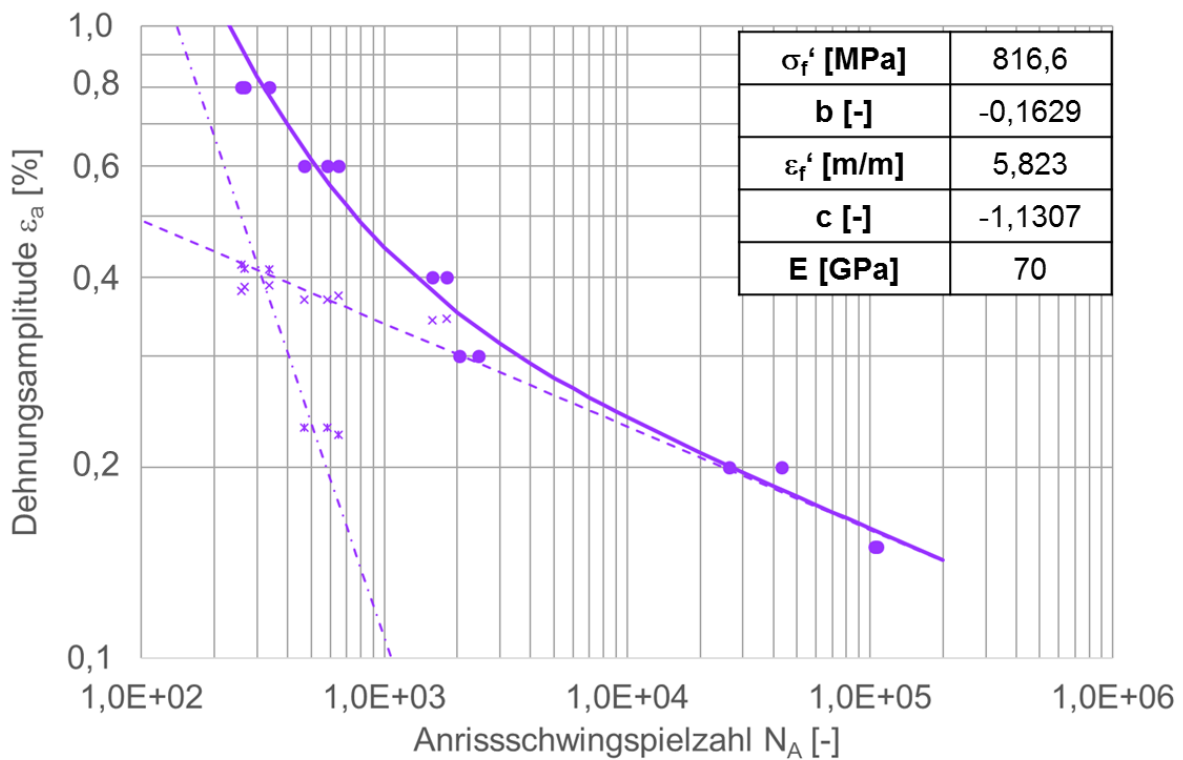


Abbildung 20-56: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 4a, P_A = 50 %, R = -1

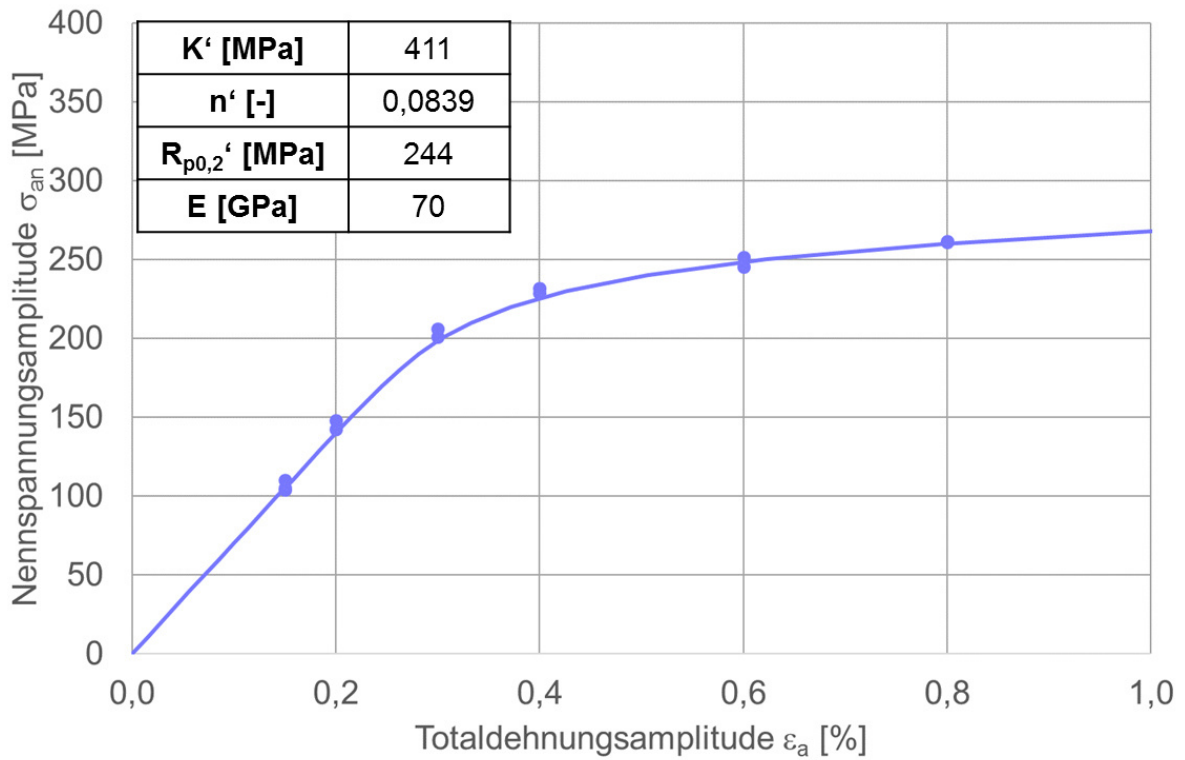


Abbildung 20-57: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve AA6082 Schneiden 5, R = -1

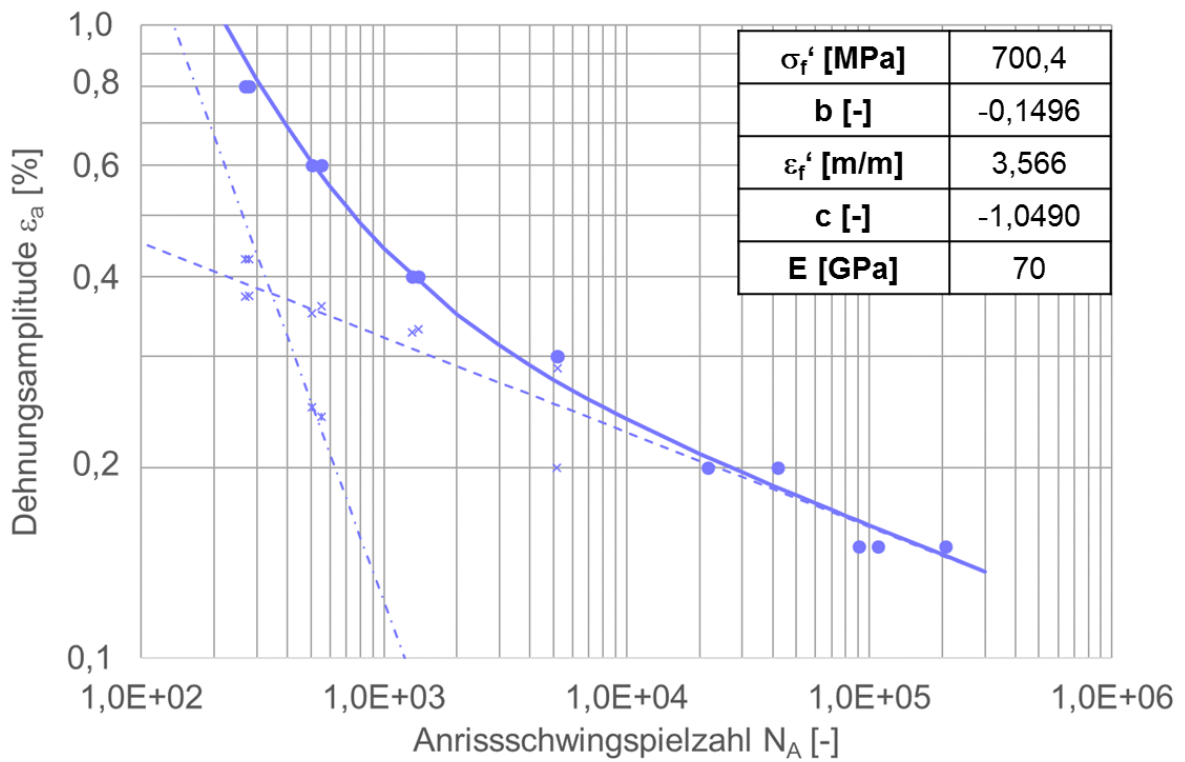


Abbildung 20-58: Dehnungs-Wöhlerlinie AA6082 Schneiden 5, P_A = 50 %, R = -1

Tabelle 20-47: Versuchsergebnisse dehnungsgeregelter Versuch AA6082 Schneiden 5, R = -1

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungsgeregelte Versuche																				
AA6082, Schneiden5, W185																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		Deh- nungs- ampl. ε_a [%]	Fre- quenz f [Hz]	Schwingspiel- zahl N_i		Ergebnisse Half Life $N=N/2=N_{50}$														Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben- nr.			Anriß N_i	Bruch N_B bzw. Vers.- ende N_E	N_{50}	E [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Rißlage ¹⁾		
				ε_{max} [%]	ε_{min} [%]			$\varepsilon_{a,t}$ [%]	$\varepsilon_{a,p}$ [%]	$\varepsilon_{a,e}$ [%]	R_t [-]	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	σ_a [MPa]	R_n [-]					
1	1	0,80	0,1	279	283	140	72	0,800	-0,800	0,800	0,426	0,374	-1,0	254	-269	262	-1,1	C-1		
2	2	0,20	3,0	21577	26398	10789	75	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	145	-151	148	-1,0	C-1		
3	3	0,30	1,0	5200	5759	2600	72	0,300	-0,300	0,300	0,013	0,287	-1,0	195	-207	201	-1,1	C-1		
4	5	0,15	4,0	90782	98007	45391	75	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	95	-125	110	-1,3	C-1		
5	6	0,60	0,1	504	504	252	73	0,600	-0,600	0,600	0,249	0,351	-1,0	240	-251	246	-1,0	C-0		
6	7	0,20	3,0	41976	49797	20988	73	0,200	-0,200	0,200	0,000	0,200	-1,0	140	-145	143	-1,0	C-1		
7	8	0,15	4,0	206443	229364	103222	71	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	100	-108	104	-1,1	C-1		
8	9	0,40	0,5	1304	1744	652	74	0,400	-0,400	0,400	0,074	0,326	-1,0	223	-234	229	-1,0	C-1		
9	10	0,30	1,0	5142	5575	2571	74	0,300	-0,300	0,300	0,000	0,200	-1,0	200	-212	206	-1,1	C-1		
10	11	0,40	0,5	1390	1390	695	75	0,400	-0,400	0,400	0,069	0,331	-1,0	225	-238	232	-1,1	C-1		
11	12	0,60	0,1	555	559	278	74	0,600	-0,600	0,600	0,241	0,359	-1,0	260	-243	252	-0,9	C-1		
12	13	0,80	0,1	268	271	134	74	0,800	-0,800	0,800	0,427	0,373	-1,0	269	-253	261	-0,9	C-1		
13	14	0,15	3,0	108293	145032	54147	72	0,150	-0,150	0,150	0,000	0,150	-1,0	107	-103	105	-1,0	C-1		

1) Rißlage: A= von der Oberfläche, B=zwischen den Schneiden, C=außerhalb der Schneiden, D=unter den Schneiden (oben), E=unter den Schneiden (unten)
0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite
(Bsp: B-0: zw. Schneiden auf Aufnehmerseite)

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2016)

Nr.	Titel
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
286	χ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
287	Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
288	Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
289	Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
290	Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
291	Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
292	Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
293	Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
294	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
295	Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
296	Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
297	Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
298	Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
299	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
300	Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
301	The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
302	Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
303	Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
304	Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
305	Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018

- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubverbindungen, 2018
- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashsimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020

- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashesimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashesimulation, 2020
- 334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
- 335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
- 336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
- 337 Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
- 338 Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashesimulation, 2020
- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
- 340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
- 341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
- 342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
- 343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
- 344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
- 345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
- 346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021
- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2021

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik