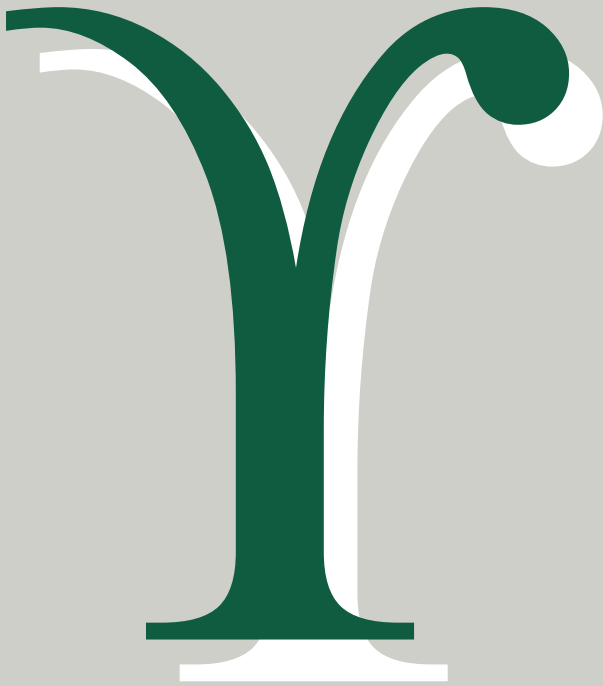


# FAT 306



Einfluss der Kantenbearbeitung  
auf die Festigkeitseigenschaften  
von Stahl-Feinblechen  
unter quasistatischer und  
schwingender Beanspruchung



Das im Folgenden dargestellte Forschungsprojekt

Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasi-statischer und schwingender Beanspruchung

wurde gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt.

Begleitet wurde das Projekt von einem Arbeitskreis der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT).

Der nachstehende Bericht fasst Zielsetzung und wichtigste Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammen.

# **Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung**

## **Forschungsstelle**

Hochschule Esslingen (1)

Fakultät Fahrzeugtechnik

Labor für Werkstoff- und Fügetechnik

Technische Universität München (2)

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)

## **Forschungsleiter**

Prof. Dr.-Ing. Peter Häfele (1)

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk (2)

## **Autor/Verfasser**

Felix Dittmann (1)

Isabella Pätzold (2)

## Kurzfassung

Für die rechnerische Lebensdaueranalyse schwingend belasteter Blechkonstruktionen, wie z. B. Karosserie- oder Fahrwerksbauteile aus Stahlfeinblech wird häufig das Örtliche Dehnungskonzept verwendet. Das Verfahren basiert auf Werkstoffkennwerten, welche an ungekerbten Flachproben mit polierten Kanten ermittelt werden. Die in der Fertigung von Prototypen- und Serienbauteilen verwendeten Trennverfahren wie Laserstrahlschneiden oder Scherschneiden führen zu Kantenzuständen, die stark von dem polierten Kantenzustand der Flachprobe abweichen. Da der Ermüdungsriss in der Regel von einer bearbeiteten Kante ausgeht, hat der Kantenzustand einen maßgeblichen Einfluss auf die Anrisslebensdauer. Wird der Einfluss des Kantenzustands auf die zyklischen Werkstoffkennwerte nicht berücksichtigt, sind Abweichungen zwischen der rechnerischen und der experimentellen Lebensdauer zu erwarten. Für eine sichere Bauteilauslegung bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Leichtbauaspekten muss der Einfluss des Kantenbearbeitungszustands auf die Schwingfestigkeit von Stahlfeinblech systematisch untersucht werden.

An der Hochschule Esslingen wurde mit dehnungs- und spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen der Einfluss des Laserstrahlschneidens und des Scherschneidens auf die Schwingfestigkeit von Stahlfeinblech ermittelt. Die Untersuchungen wurden an sechs verschiedenen Stahlfeinblechgüten durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen einen zum Teil erheblich Einfluss des Kantenbearbeitungszustands auf das Schwingfestigkeitsverhalten.

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen wurde ein Verfahren entwickelt, mit welchem die zyklischen Werkstoffkennwerte an den am Prototypen- oder Serienbauteil vorliegenden Kantenbearbeitungszustand angepasst werden können. Auf diese Weise kann der Einfluss des Kantenbearbeitungszustands bei der Auslegung des Bauteils mit dem örtlichen Dehnungskonzept berücksichtigt werden.

Die Schnittkantenqualität schergeschnittener Bauteile ist neben dem Werkstoff vor allem von den Schneidparametern abhängig. Dazu zählen unter anderem der Schneidspalt, der Kantenradius von den Schneidaktivelementen und das Schneidverfahren. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Umformtechnik und Gießereiwesen an der Technischen Universität München wurden im Rahmen der Forschungsarbeit Proben mit verschiedenen Parameterkombinationen gefertigt und bezüglich des Schwingfestigkeitsverhaltens untersucht. Mit den Untersuchungsergebnissen kann eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie die Anrisslebensdauer schergeschnittener Bauteile über die Wahl der Schneidparameter optimiert werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Problemstellung.....	5
1.2	Zielsetzung.....	6
1.3	Vorgehensweise .....	6
2	Theoretische Grundlagen.....	8
2.1	Experimentelle Ermittlung der Schwingfestigkeit.....	8
2.2	Kerbwirkung und Stützwirkung.....	12
2.3	Mittelspannungseinfluss.....	13
2.4	Größeneinfluss.....	14
2.5	Konzepte zur rechnerischen Lebensdauerabschätzung.....	16
2.5.1	Das Örtliche Dehnungskonzept.....	16
2.6	Laserstrahlschneiden.....	28
2.7	Scherschneiden.....	31
2.7.1	Aufbau eines Scherschneidwerkzeuges.....	32
2.7.2	Phasen des Schneidvorgangs und Schneidkraftverlauf .....	33
2.7.3	Schnittflächenkenngrößen.....	37
2.8	Nachschnitten.....	41
3	Stand der Technik.....	45
3.1	Methoden und Konzepte zur Berücksichtigung der Stützwirkung.....	45
3.1.1	Stützwirkungsmodell nach Siebel und Stieler .....	45
3.1.2	Mikrostützwirkung nach Neuber .....	46
3.1.3	Makrostützwirkung nach Neuber .....	47
3.1.4	Fehlstellenmodell.....	48
3.1.5	Stützwirkungsmodell nach Liu und Zenner.....	50
3.1.6	Berücksichtigung der Stützwirkung im Örtlichen Dehnungskonzept .....	52
3.2	Oberflächeneinfluss .....	53
3.2.1	Einfluss der Oberflächenrauheit.....	54
3.2.2	Einfluss der Oberflächenverfestigung.....	56
3.2.3	Berücksichtigung des Oberflächeneinfluss im Örtlichen Dehnungskonzept.....	57
3.3	Fertigungseinfluss .....	58
3.3.1	Laserstrahlschneiden .....	58
3.3.2	Scherschneiden .....	61
4	Proben und Prinzipbauteil.....	65
4.1	Werkstoffe .....	65
4.2	Geometrie.....	67

4.3	Herstellung.....	69
4.3.1	Referenzzustand mit polierten Kanten.....	69
4.3.2	Laserstrahlschneiden.....	69
4.3.3	Scherschneiden.....	70
4.4	Prinzipbauteil.....	77
5	Versuchs- und Auswertetechnik.....	84
5.1	Randzonencharakterisierung.....	84
5.1.1	Mikrohärteprüfung an Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten (HS Esslingen).....	84
5.1.2	Oberflächenmessung an Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten (HS Esslingen).....	85
5.1.3	Mikrohärteprüfung an Proben mit schergeschnittenen Kanten (utg).....	86
5.1.4	Oberflächenmessung an Proben mit schergeschnittenen Kanten (utg).....	88
5.2	Quasistatischer Zugversuch.....	90
5.3	E-Modul Ermittlung.....	91
5.4	Kerbzugversuch.....	91
5.5	Spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche.....	92
5.5.1	Versagenskriterium und Versuchsauswertung.....	93
5.6	Dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche.....	95
5.6.1	Versagenskriterium und Versuchsauswertung.....	96
6	Versuchsergebnisse.....	99
6.1	Randzonencharakterisierung.....	99
6.1.1	Polierter Kantenzustand und gewalzte Oberfläche.....	99
6.1.2	Laserstrahlgeschnittener Kantenzustand.....	99
6.1.3	Schergeschnittene Kanten.....	105
6.1.4	Zusammenfassung.....	135
6.2	Quasistatischer Zugversuch.....	137
6.2.1	Ungekerbte Flachproben.....	137
6.2.2	Gekerbte Flachproben.....	138
6.3	Spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche.....	140
6.3.1	DC04.....	141
6.3.2	DP800.....	143
6.3.3	CP800.....	148
6.3.4	DP1000.....	149
6.3.5	CP1000.....	151
6.3.6	22MnB5.....	152
6.4	Dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche.....	158
6.4.1	DC04.....	158

6.4.2	DP800.....	160
6.4.3	CP800.....	162
6.4.4	DP1000.....	164
6.4.5	CP1000.....	166
6.4.6	22MnB5.....	168
6.5	Rissausgangsortanalyse.....	170
6.5.1	DC04.....	170
6.5.2	DP800.....	172
6.5.3	CP800.....	174
6.5.4	DP1000.....	175
6.5.5	CP1000.....	176
6.5.6	22MnB5.....	177
6.6	Bauteilschwingfestigkeitsversuch.....	179
7	Diskussion der Versuchsergebnisse.....	185
7.1	Quasistatischer Zugversuch.....	185
7.1.1	Ungekerbte Flachproben.....	185
7.1.2	Gekerbte Flachproben.....	188
7.2	Einfluss der Kantenbearbeitung auf das Schwingfestigkeitsverhalten.....	191
7.2.1	DC04.....	191
7.2.2	DP800.....	193
7.2.3	CP800.....	202
7.2.4	DP1000.....	204
7.2.5	CP1000.....	207
7.2.6	22MnB5.....	210
7.3	Einfluss des Werkstoffs auf das Schwingfestigkeitsverhalten.....	213
7.4	Einfluss der Probengeometrie auf das Schwingfestigkeitsverhalten.....	215
7.5	Einfluss der Mittelspannung auf das Schwingfestigkeitsverhalten.....	218
7.6	Versagensmechanismen unter dehnungskontrollierter Beanspruchung.....	219
7.6.1	LCF-Bereich.....	219
7.6.2	HCF-Bereich.....	223
7.7	Bauteilschwingfestigkeitsversuche.....	226
8	Vorschlag zur Berücksichtigung des Kantenzustands im Örtlichen Dehnungskonzept.....	229
8.1	Validierung der Methode.....	233
8.2	Vergleich der Methode mit dem $\kappa$ -P-Verfahren.....	239
9	Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept.....	242
9.1	Vorgehensweise.....	242
9.2	Ergebnisse.....	243

9.3	Diskussion der rechnerischen Lebensdauerabschätzung .....	247
10	Zusammenfassung.....	250
11	Danksagung und Förderhinweis .....	253
12	Literaturverzeichnis.....	255
	Anhang.....	263



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Ein Fahrwerks- oder Karosseriebauteil aus Stahlfeinblech wird bei der Herstellung in mehreren Schritten umgeformt und mit einem geeigneten Trennverfahren aus der Stahlplatte entnommen. An dem fertigen Bauteil liegt durch das Trennen eine bearbeitete Kante vor. Unter schwingender Beanspruchung geht das Schwingversagen in Form eines Ermüdungsrissses häufig von einer bearbeiteten Kante aus. Zustandsgrößen wie Oberflächenrauheit, Randschichtverfestigung und Eigenspannungen haben dabei einen maßgeblichen Einfluss auf die Anrisslebensdauer und sind abhängig vom angewendeten Trennverfahren sowie den verwendeten Fertigungsparametern.

In den verschiedenen Entwicklungsstadien eines Karosseriebauteils kommen unterschiedliche Trennverfahren zum Einsatz. Eine Vorauslegung des Bauteils erfolgt in der Regel nach dem Örtlichen Dehnungskonzept [1]. Die Basis für das Örtliche Dehnungskonzept sind die zyklischen Werkstoffkennwerte, die in der Regel an ungekerbten Flachproben mit polierten Kanten ermittelt werden. Im nächsten Entwicklungsschritt werden Prototypenbauteile hergestellt, mit welchen die Freigabeversuche für das Betriebsfestigkeitsverhalten durchgeführt werden. Bei der Herstellung der Prototypenbauteile werden für die geringen Stückzahlen effizient einsetzbare Fertigungsverfahren verwendet, wie beispielsweise das Fräsen, das Laserstrahlschneiden oder das Wasserstrahlschneiden. Das Serienbauteil letztendlich wird meistens durch Scherschneiden aus der Blechplatte entnommen. Demnach liegen von der Entwicklungsphase bis zum Serienbauteil unterschiedliche Kantenbearbeitungszustände am Bauteil vor. Da der Kantenbearbeitungszustand maßgeblichen Einfluss auf die Anrisslebensdauer haben kann, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Lebensdauern des vorausgelegten Bauteils, des Prototypenbauteils und des Serienbauteils unterscheiden. Dadurch besteht im schlimmsten Fall die Gefahr einer nicht konservativen Bauteilauslegung oder durch das Anwenden hoher Sicherheitsfaktoren einer ineffizienten, nicht leichtbaugerechten Werkstoffausnutzung.

Die Problematik der Übertragbarkeit zwischen den verschiedenen Entwicklungsstadien und damit zwischen den verschiedenen Kantenbearbeitungszuständen bezüglich der Anrisslebensdauer ist Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen eine präzisere Lebensdauervorhersage von Karosseriebauteilen aus Stahlfeinblech in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens ermöglichen und dadurch den Auslegungs- und Entwicklungsprozess solcher Bauteile verbessern. Aus dieser Zielformulierung wurden die im folgenden Kapitel beschriebenen Punkte der Zielsetzung abgeleitet.

## 1.2 Zielsetzung

Im Folgenden Abschnitt sind die einzelnen Punkte der Zielsetzung für das vorliegende Forschungsvorhaben aufgeführt, die sich aus der im vorherigen Kapitel beschriebenen Problematik ableiten lassen.

### 1. Ziel:

Die experimentelle Ermittlung des Einfluss des Kantenbearbeitungszustands auf das Festigkeitsverhalten von Stahlfeinblech unter quasistatischer und insbesondere unter schwingender Beanspruchung in Abhängigkeit der Kantenbearbeitung, des Werkstoffs, der Beanspruchungsart, des Spannungsgradienten und des Lastverhältnis.

### 2. Ziel:

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen sollen werkstoffspezifische Scherschneidparameter bestimmt werden im Hinblick auf eine Optimierung des Schwingfestigkeitsverhaltens.

### 3. Ziel:

Für die Bauteilauslegung nach dem örtlichen Dehnungskonzept liegt in Werkstoffdatenbanken bereits eine große Menge an zyklischen Werkstoffkennwerten von Stahlfeinblech mit polierten Kanten vor. Es würde einen immensen Versuchsaufwand benötigen, wenn für einen Werkstoff immer mehrere kantenspezifische zyklische Kennwerte ermittelt werden müssten. Daher soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine Möglichkeit beschrieben werden, wie sich die an polierten Kanten ermittelten zyklischen Werkstoffkennwerte auf andere Kantenbearbeitungszustände übertragen lassen und somit die bereits vorhandenen Kennwerte weiter genutzt werden können.

## 1.3 Vorgehensweise

### 1. Probenherstellung:

Für die Untersuchungen werden ungekerbte und gekerbte Proben aus Stahlfeinblech durch Fräsen, Laserstrahlschneiden und Scherschneiden hergestellt. Um den Kanteneinfluss auf das Festigkeitsverhalten möglichst zu eliminieren, werden die gefrästen Proben im Anschluss feingeschliffen und poliert. Die Proben mit den polierten Kanten stellen den Referenzzustand dar.

Um an den schergeschnittenen Proben den Einfluss der Schneidparameter auf das Festigkeitsverhalten zu untersuchen, werden verschiedene Schneidstrategien bei der Probenherstellung eingesetzt. Die Schneidstrategien unterscheiden sich hinsichtlich der Größe des Schneidspalts, den Kantenradien der Schneidaktivelemente, der Beschichtung der Schneidaktivelemente und

dem Schneidverfahren (einstufig, mehrstufig). Die Proben werden aus den sechs Stahlfeinblechgüten DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und pressgehärteten 22MnB5 hergestellt.

## 2. Experimentelle Untersuchungen:

Zur Untersuchung des Festigkeitsverhaltens werden zum einen quasistatische Zugversuche durchgeführt und zum anderen dehnungs- sowie spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche. Der Einfluss des Kantenbearbeitungszustands auf die mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte wird im quasistatischen Zugversuch an ungekerbten Flachproben ermittelt. Für eine Bewertung des Kanteneinfluss auf das Verformungsverhalten von gekerbten Strukturen werden Kerbzugversuche an unterschiedlichen Kerbgeometrien durchgeführt. Der Einfluss auf die zyklischen Werkstoffkennwerte wird in dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen ebenfalls an ungekerbten Flachproben ermittelt. Um die Übertragbarkeit auf Bauteile zu untersuchen, werden die spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche neben den ungekerbten auch an unterschiedlich scharf gekerbten Flachproben mit den Kerbformzahlen  $K_t = 2,5$  und  $K_t = 4,6$  bei variierendem Lastverhältnis durchgeführt. Ergänzt werden die Untersuchungen durch Schwingfestigkeitsversuche an einem bauteilähnlichen Prinzipbauteil.

## 3. Randzonencharakterisierung:

An allen untersuchten Probenvarianten werden Oberflächenmessungen und Mikrohärteprüfungen auf der Schnittkantenfläche beziehungsweise im schnittkantennahen Gefüge durchgeführt. Auf diese Weise soll eine Bewertung des Kantenbearbeitungszustands hinsichtlich der Oberflächenrauheit an der Schnittkante und des Mikrohärteverlaufs durchgeführt werden und so eine Erklärung des auftretenden Festigkeitsverhaltens unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung ermöglichen.

## 4. Korrelationsfaktoren:

Es soll ein Verfahren entwickelt werden mit dem sich die kantenspezifischen zyklischen Werkstoffkennwerte aus den polierten zyklischen Werkstoffkennwerten in Abhängigkeit des Kantenbearbeitungszustands ableiten lassen. Dafür werden die aus den dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen ermittelten kantenspezifischen zyklischen Werkstoffkennwerte hinsichtlich einer Korrelation mit den Zustandsgrößen aus der Randzonencharakterisierung (Oberflächenrauheit, Mikrohärteverlauf) untersucht.

## 5. Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept:

Abschließend wird das entwickelte Verfahren bezüglich der Vorhersagegüte der Anrisslebensdauer überprüft. Dafür werden die abgeleiteten Kennwerte verwendet um mit dem örtlichen Dehnungskonzept die spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche nachzurechnen. Auf

diese Weise wird ein Vergleich zwischen Berechnungsergebnis und Versuchsergebnis ermöglicht.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die aus Sicht der Autoren für den vorliegenden Bericht relevanten Grundlagen zur experimentellen Untersuchung der Schwingfestigkeit erläutert werden. Für eine ausführlichere Darstellung der theoretischen Grundlagen wird an dieser Stelle auf die Werke [2] und [3] verwiesen.

### 2.1 Experimentelle Ermittlung der Schwingfestigkeit

Der bekannteste Versuch zur Ermittlung der Schwingfestigkeit ist der Wöhlerversuch. Mit dem Wöhlerversuch wird die Lebensdauer von Werkstoffproben oder Strukturen unter zyklischer Beanspruchung mit konstanter Amplitude ermittelt. Die zyklische Beanspruchung wird durch die Frequenz, die Form und den Bereich der Schwingung beschrieben. Außerdem muss eine Beanspruchungsgröße bestimmt werden, nach welcher der Versuch geregelt wird, wie beispielsweise eine Kraft oder eine Spannung beziehungsweise ein Weg oder eine Dehnung. In Abbildung 2.1 sind die Kennwerte der Schwingbeanspruchung an einem Schwingspiel dargestellt. Die Spannungsamplitude  $\sigma_a$  und die Mittelspannung  $\sigma_m$  beziehungsweise die Grenzwerte  $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  bestimmen das Lastverhältnis  $R$  wie folgt:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (2.1)$$

Mit steigendem  $R$  wechselt die Beanspruchung vom Druckschwellbereich ( $R > 1$ ) über den Bereich wechselnder Beanspruchung ( $-\infty < R < 0$ ) in den Zug-Schwell-Bereich ( $0 < R < 1$ ). In Abbildung 2.2 ist beispielhaft die Lage der Schwingbeanspruchung für verschiedene Werte von  $R$  dargestellt.

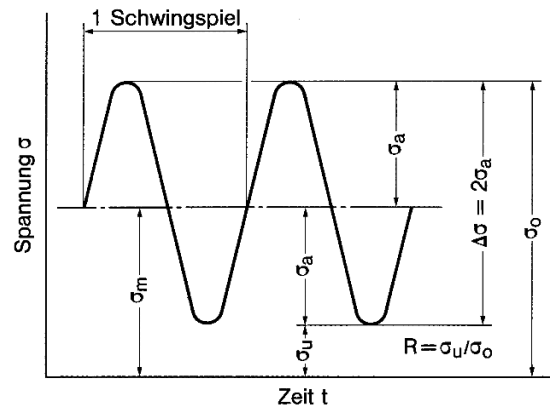


Abbildung 2.1: Kennwerte der zyklischen Beanspruchung [2]

Die Ergebnisse aus den Wöhlerversuchen werden im Wöhlerdiagramm abgebildet, dabei wird die Amplitudenhöhe der zyklischen Beanspruchungsgröße (y-Achse) über der Schwingenzahl (x-Achse) aufgetragen, bei der das Bauteil versagt. Für beide Achsen wird die logarithmische Darstellung verwendet. Das Versagen muss durch ein Kriterium, das einen bestimmten Grad der Schädigung beschreibt, definiert sein. Gängige Versagenskriterien sind beispielsweise der technische Anriss oder der Probenbruch. Mit einer entsprechenden Regressionsanalyse wird die Wöhlerlinie aus den Versuchsergebnissen abgeleitet.

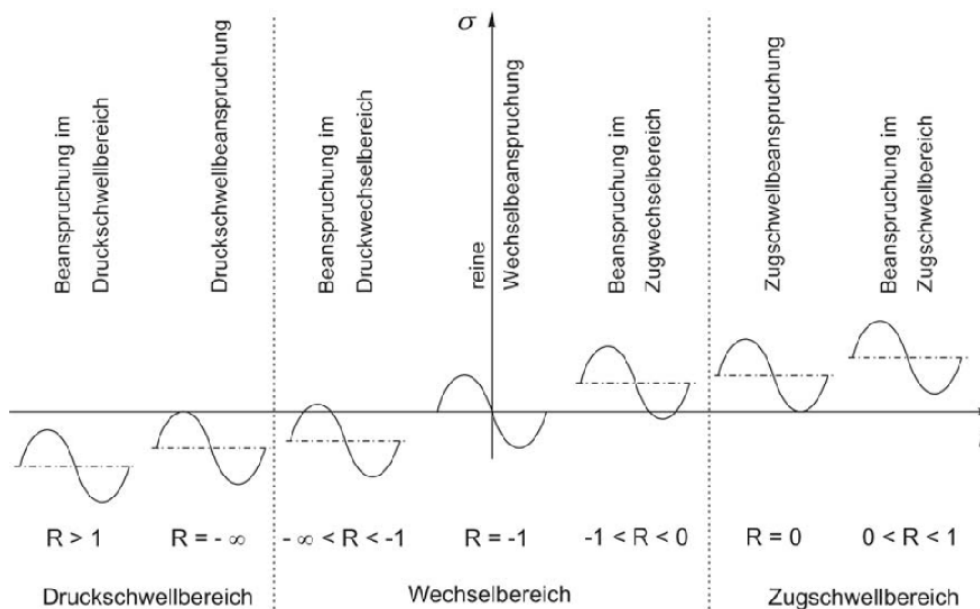


Abbildung 2.2: Lastverhältnis R bei unterschiedlichen Mittelspannungen [4]

Die Wöhlerlinie durchläuft drei Festigkeitsbereiche: Die Kurzzeitfestigkeit, die Zeitfestigkeit und die sogenannte Dauerfestigkeit, siehe Abbildung 2.3. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich kommt es zu elastisch-plastischen Materialbeanspruchungen, bei welchen der plastische Anteil überwiegt [2]. Dieser Bereich ist hin zu steigenden Beanspruchungen durch die statische Festigkeit begrenzt.

Bei der Abbildung der Wöhlerlinie im Diagramm wird der Bereich der Kurzzeitfestigkeit oftmals nicht berücksichtigt.

Zu niedrigeren Beanspruchungen schließt sich der Zeitfestigkeitsbereich an die Kurzzeitfestigkeit an. Im Zeitfestigkeitsbereich liegen ebenfalls elastisch-plastische Beanspruchungen vor, jedoch überwiegt hier der elastische Anteil. Aufgrund der doppeltlogarithmischen Darstellung kann die Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich als Gerade abgebildet werden. Mit einem bekannten Punkt A ( $N_A | \sigma_{a,A}$ ) auf der Zeitfestigkeitsgeraden lautet die Formel für die Schwingspielzahl N in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude  $\sigma_a$ :

$$N = N_A \cdot \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{a,A}} \right)^{-k} \quad (2.2)$$

Der Exponent k beschreibt die Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich. Dabei gilt: Je größer k, desto flacher verläuft die Wöhlerlinie.

Der Übergang von dem Zeitfestigkeitsbereich in den sogenannten Dauerfestigkeitsbereich wird als Abknickpunkt bezeichnet. Die sogenannte Dauerfestigkeit wird im Allgemeinen ab einer Millionen Schwingspielen definiert. Unterschreitet die Lastamplitude die Dauerfestigkeitsgrenze, so hat sie theoretisch gesehen keine Schädigungswirkung auf das Bauteil und es kommt zu keinem Versagen. Das Bauteil hält also „unendlich“ viele Schwingspiele. Ein horizontaler oder konstanter Verlauf der Dauerfestigkeit ist jedoch nicht bei allen Werkstoffen gültig. Es wurde nachgewiesen, dass auch Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit durch mikroskopisch plastische Beanspruchungen das Bauteil schädigen und somit früher oder später zum Versagen führen können. Eine Dauerfestigkeit im ursprünglichen Sinn existiert in diesem Fall nicht. Stattdessen ist von einem „Bereich nach dem Abknickpunkt“ die Rede. Der Bereich nach dem Abknickpunkt wird nicht wie ursprünglich durch einen horizontalen Verlauf der Wöhlerlinie im Wöhlerdiagramm beschrieben, sondern durch eine abfallende Wöhlerlinie mit im Vergleich zum Zeitfestigkeitsbereich flacherem Verlauf, wie in Abbildung 2.3 anhand der gepunkteten Linie mit der Neigung  $k^*$  dargestellt.

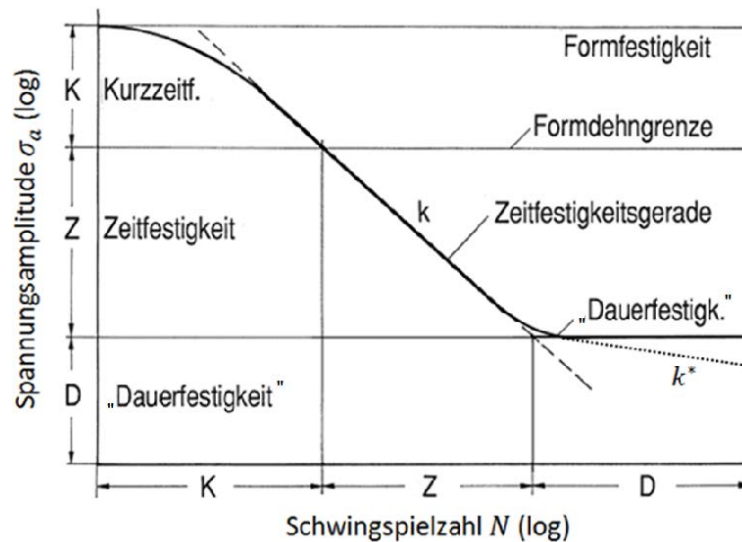


Abbildung 2.3: Festigkeitsbereiche einer Wöhlerlinie nach [3]

Proben und Bauteile weisen aufgrund von Fertigungseinflüssen und Werkstoffeigenschaften immer wenn auch nur minimale Abweichungen von den Idealmaßen beziehungsweise Idealeigenschaften auf. Auch bei der Versuchsdurchführung treten von Versuch zu Versuch immer Unterschiede auf, sei es durch den Anwender oder die Maschinenregelung. Die Verschiedenheit der Einzelversuche verursacht die Streuung der Versuchsergebnisse. Diese Streuung muss bei der Auswertung eines Wöhlerversuchs berücksichtigt werden. Sie beschreibt, wie genau die Lebensdauer durch die Wöhlerlinie abgeschätzt wird.

Mit einer Wöhlerlinie werden die Versuchsergebnisse approximiert. Über die Streuung der Versuchsergebnisse lässt sich mit statistischen Verfahren für jede Schwingspielzahl bei einem Lastniveau eine Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_A$  ermitteln. So kann jeder Wöhlerlinie eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugewiesen werden oder umgekehrt eine Wöhlerlinie mit einer bestimmten Ausfallwahrscheinlichkeit ermittelt werden. Die Wöhlerlinie mit einer mittleren Ausfallwahrscheinlichkeit von  $P_A = 50\%$  wird als 50%-Wöhlerlinie bezeichnet. Sie definiert bei einer bestimmten Lastamplitude statistisch gesehen die Schwingspielzahl, die von der Hälfte der Proben überlebt wird. Die andere Hälfte versagt vor dem Erreichen dieser Schwingspielzahl.

Die Streuung der Versuchsergebnisse wird über ein Streuband im Wöhlerdiagramm beschrieben. Begrenzt wird dieses Streuband in der Regel durch die 90 %- und 10 %-Wöhlerlinie. In der Mitte des Streubands liegt die 50 %-Wöhlerlinie. Nach Haibach wird das Verhältnis der Schwingspielzahlen bei  $P_A = 90\%$  und  $10\%$  im Zeitfestigkeitsbereich als Streuspanne  $T_N = N_{90\%}/N_{10\%}$  bezeichnet. Die Verteilung der Versagensschwingspielzahlen auf einem Lasthorizont im Zeitfestigkeitsgebiet wird üblicherweise mit einer logarithmischen Gauß-Normalverteilung beschrieben [2].

## 2.2 Kerbwirkung und Stützwirkung

Kerben führen zu Spannungsüberhöhungen und stehen als möglicher Versagensort im Fokus von Betriebsfestigkeitsbetrachtungen. Nach [2] kann in Formkerben, Werkstoffkerben und Belastungskerben unterschieden werden. Formkerben kann man als Unstetigkeit in der Geometrie einer Probe oder eines Bauteils beschreiben, die den Kraftfluss in einer Struktur umleiten oder stören und so zu örtlichen Spannungsüberhöhungen führen. Im vorliegenden Bericht wird von den drei Kerbarten nur der Einfluss der Formkerbe auf das Festigkeitsverhalten untersucht. Ist daher im Folgenden von einer Kerbe die Rede, so ist folglich die Formkerbe gemeint.

Nach Neuber [5] können Kerben in milde und scharfe, flache und tiefe sowie innere und äußere Kerben unterteilt werden. Die Spannungsüberhöhung im Kerbgrund ist neben der Beanspruchungsart von den geometrischen Abmessungen der Kerbe abhängig. Dazu gehören beispielsweise die Kerbtiefe, der Kerbradius und der Kerböffnungswinkel. In der Elastizitätstheorie wird die Spannungsüberhöhung als das Verhältnis zwischen maximaler Spannung  $\sigma_{max}$  im Kerbgrund und Nennspannung  $\sigma_n$  mit der Kerbformzahl  $K_t$  beschrieben:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (2.3)$$

Die Nennspannung bezieht sich in Gleichung (2.3) auf den Proben- oder Bauteilquerschnitt im Kerbgrund.

Auf ähnliche Weise lassen sich die örtlichen Spannungsüberhöhungen definieren, die bei gekerbten Proben oder Bauteilen unter zyklischer Beanspruchung zum Versagen im Kerbgrund führen. In diesem Fall beschreibt die Kerbwirkungszahl  $K_f$  den Zusammenhang zwischen der Dauerfestigkeit  $\sigma_{a,D}$  der ungekerbten Probe mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  und der Dauerfestigkeit der Probe oder des Bauteils mit der Kerbformzahl  $K_t > 1$ :

$$K_f = \frac{\sigma_{a,D,K_t=1}}{\sigma_{a,D,K_t>1}} \quad (2.4)$$

Die Kerbwirkungszahl ist abhängig von der Kerbschärfe bzw. der Kerbformzahl, dem Werkstoff, der Beanspruchungsart und der Probengröße.

Eine örtliche Spannungsüberhöhung im Kerbgrund kann unter schwingender Beanspruchung eine geringere Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten haben wie unter quasistatischer Beanspruchung. In diesem Fall ist die Kerbwirkungszahl kleiner als die Kerbformzahl ( $K_f < K_t$ ). Die-



ses Phänomen der Abweichung zwischen der Kerbwirkungszahl und der Kerbformzahl ist allgemein als dynamische Stützwirkung bekannt und kann mit der Mikrostützwirkungstheorie von Neuber [6] erklärt werden. Demnach bestehen zwischen den Körnern in einem hochbeanspruchten Bereich stärkere Bindungen als in der Elastizitätstheorie angenommen wird. Somit unterstützt das umgebende Material den höchstbeanspruchten Bereich im Kerbgrund bei der Lastaufnahme in einem höheren Maße wie angenommen und führt dadurch zu dessen Entlastung.

Die dynamische Stützwirkung kann mit der Stützzahl  $n_\sigma$  beschrieben werden, welche sich aus dem Vergleich von Kerbformzahl und Kerbwirkungszahl ergibt:

$$n_\sigma = \frac{K_t}{K_f} \quad (2.5)$$

Die Stützwirkung ist abhängig von der Kerbgeometrie und dem damit verbundenen Spannungsgradienten im Kerbgrund, welcher wiederum von der Kerbschärfe und der Beanspruchungsart abhängt. Außerdem besteht ein Einfluss durch den Werkstoff und dessen Eigenschaften sowie durch die Probengröße und die damit verbundene Auftretenswahrscheinlichkeit von Materialimperfectionen [7]. Weixing et al. bezeichnen die Kerbwirkungszahl als eine Art black-box mit vielen schwer zu bestimmenden Faktoren [8]. Dies ist eine gute Analogie für die Tatsache, dass es eine Vielzahl an möglichen Varianten für die Bestimmung der dynamischen Stützzahl  $n_\sigma$ , beziehungsweise der Kerbwirkungszahl  $K_f$  gibt. In Kapitel 3.1 werden einige Konzepte zur Berücksichtigung der dynamischen Stützwirkung vorgestellt.

Nach der Unterteilung des Größeneinflusses nach Kloos [9] lässt sich die in diesem Kapitel beschriebene dynamische Stützwirkung unter dem spannungsmechanischen Größeneinfluss einordnen, der zusammen mit anderen Größeneinflüssen im folgenden Kapitel erklärt wird.

### 2.3 Mittelspannungseinfluss

Die Ergebnisse des Wöhlerversuchs sind u.a. abhängig von der wirkenden Mittelspannung, die über das Lastverhältnis  $R$  beschrieben wird. Bei steigendem Lastverhältnis  $R$  verschiebt sich die Wöhlerlinie zu kürzeren Lebensdauern und niedrigeren Spannungsamplituden, da bei gleicher Amplitude eine höhere Mittelspannung vorliegt. Die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M$  ist ein Werkstoffkennwert und beschreibt im Dauerfestigkeitsschaubild in Abbildung 2.4, wie stark die dauerfest ertragbare Spannungsamplitude zwischen reiner Wechselbeanspruchung ( $R = -1$ ) und Zugschwellbeanspruchung ( $R = 0$ ) in Abhängigkeit der Mittelspannung abnimmt:

$$M = \frac{\sigma_{A,R=-1} - \sigma_{A,R=0}}{\sigma_{m,R=0}} \quad (2.6)$$

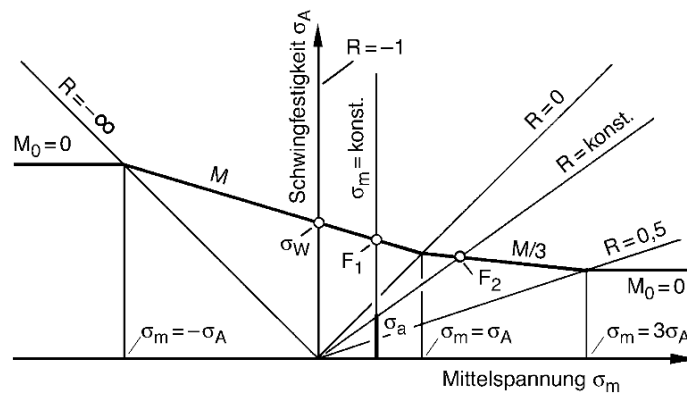


Abbildung 2.4: Dauerfestigkeitsschaubild aus [2]; einheitliche Dauerfestigkeit  $\sigma_A$  als Funktion der Mittelspannung  $\sigma_m$  mit zugehörigen Spannungsverhältnissen  $R$

Die Mittelspannungsempfindlichkeit kann auch im Zeitfestigkeitsbereich ermittelt werden. In diesem Fall wird  $M$  nicht mit den dauerhaft ertragbaren Spannungsamplituden berechnet, sondern mit Spannungsamplituden, die bei einer definierten Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich aus den Wöhlerversuchen hervorgehen.

## 2.4 Größeneinfluss

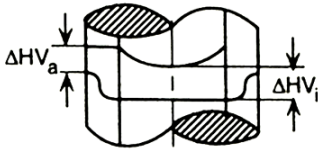
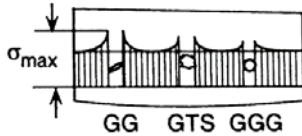
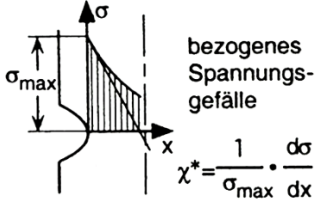
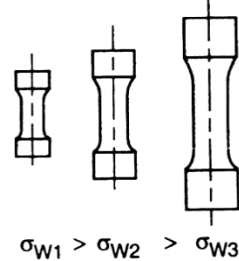
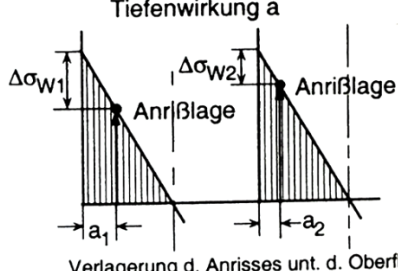
Das Festigkeitsverhalten und insbesondere das Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen sind von deren Größe abhängig. Dieser Größeneinfluss muss vor allem dann berücksichtigt werden, wenn Festigkeitskennwerte oder Einflüsse auf das Schwingfestigkeitsverhalten im Labor an Proben ermittelt und die Untersuchungsergebnisse auf das Bauteil übertragen werden [10]. Als Beispiel sei an dieser Stelle die rechnerische Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept genannt. Die zyklischen Werkstoffkennwerte, welche die Basis des Örtlichen Dehnungskonzepts darstellen, werden an ungekerbten Proben mit polierter Oberfläche unter homogener Spannungsverteilung ermittelt. Diese Kennwerte werden wiederum für die Lebensdauerabschätzung von gekerbten Bauteilen verwendet, deren Oberflächentopographie aus dem Fertigungsverfahren bei der Herstellung resultiert und die eine inhomogene Spannungsverteilung am Versagensort aufweisen. Die Problematik der Übertragbarkeit von Probe auf Bauteil kann mit dem Größeneinfluss beschrieben werden. Für eine zuverlässige Lebensdauerberechnung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept ist die Berücksichtigung des Größeneinflusses unumgänglich.

Der Größeneinfluss wird nach Kloos [9] unterteilt in:

- Technologischer Größeneinfluss
- Spannungsmechanischer Größeneinfluss
- Statistischer Größeneinfluss
- Oberflächentechnischer Größeneinfluss

Die verschiedenen Größeneinflüsse nach [9] mit den jeweiligen Entstehungsursachen und wirkenden Mechanismen sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Größeneinflüsse, Entstehungsursachen und Mechanismen aus [10]

Größeneinfluss	Entstehungsursachen	Mechanismen
Technologischer Größeneinfluss	a) Durchmesser-Abhängigkeit der Randfestigkeit bzw. -härte bei Vergütungsstählen $\sigma_w = f(\text{Randfestigkeit})$	
	b) Reinheitsgrad (Größe, Form und Verteilung der nichtmetallischen Einschlüsse)	
	c) Graphit-Form bei Eisen-Graphit-Werkstoffen	
Spannungsmechanischer (geometrischer) Größeneinfluss	Stützwirkung bei inhomogener Spannungsverteilung	
Statistischer Größeneinfluss	Mit zunehmender Probengröße erhöhte Wahrscheinlichkeit eines Bruchausganges von statistisch verteilten Fehlern	
Oberflächentechnischer Größeneinfluss	Unterschiedliche Tiefenwirkung einer Oberflächenverfestigung (Eigenspannung)	

## 2.5 Konzepte zur rechnerischen Lebensdauerabschätzung

Für die rechnerische Lebensdauerabschätzung von zyklisch belasteten Bauteilen stehen heute folgende fortschrittlichen Auslegungskonzepte zur Verfügung, siehe auch [2] und [7]:

- Nennspannungskonzept
- Strukturspannungskonzept
- Kerbspannungskonzept
- Örtliches Dehnungskonzept
- Bruchmechanisches Konzept.

Die Konzepte unterscheiden sich hinsichtlich der für die Beschreibung der Beanspruchung  $B$  und der Beanspruchbarkeit  $R$  verwendeten Größen. Während das Nennspannungskonzept auf äußeren Lasten bzw. den daraus berechneten Nennspannungen basiert, werden bei den lokalen Konzepten (Kerbspannungskonzept und Örtliches Dehnungskonzept) örtliche Beanspruchungen verwendet. Letztere werden meist mit Hilfe numerischer Berechnungsmethoden wie z. B. der Finiten-Elemente-Methode ermittelt.

Bei den im Karosserie- und Fahrwerksbereich häufig eingesetzten umgeformten schalenförmigen Blechstrukturen lassen sich aufgrund der komplexen Bauweise kein Nennquerschnitt und somit auch keine Nennspannung definieren. Darüber hinaus ist die erforderliche Bauteilwöhlerlinie meistens nicht bekannt. In der Fahrzeugindustrie wird daher zunehmend das Örtliche Dehnungskonzept zur Lebensdauerabschätzung von umgeformten Strukturen aus Stahlfeinblech eingesetzt [1]. Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen und die Vorgehensweise bei der Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept beschrieben.

### 2.5.1 Das Örtliche Dehnungskonzept

Kerben an Bauteilen oder Proben verursachen Spannungsüberhöhungen, die dazu führen, dass es lokal im Kerbgrund in Abhängigkeit von der Kerbschärfe zu makroskopischen elastisch-plastischen Verformungen kommen kann, während das Bauteil global gesehen rein elastisch beansprucht wird. Nach dem Grundgedanken des Örtlichen Dehnungskonzepts kann man das Anrissverhalten im Kerbgrund mit dem Versagensverhalten einer ungekerbten Probe aus demselben Werkstoff unter dehnungskontrollierter Axialbeanspruchung vergleichen. Mit der im Kerbgrund ermittelten Beanspruchung lässt sich demnach die Anrisslebensdauer des Bauteils aus der zugehörigen Dehnungswöhlerlinie der ungekerbten Probe bestimmen. Die Vorgehensweise bei der Auslegung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept sowie die einzelnen Elemente des Konzepts sind in [11] ausführlich und detailliert beschrieben.

### 2.5.1.1 Vorgehensweise

In Abbildung 2.5 ist die Vorgehensweise bei der rechnerischen Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept schematisch dargestellt. In den einzelnen Schritten auf dem oberen Ast (B1-B5) wird die Ermittlung der örtlichen Beanspruchungen im Bauteilkerbgrund dargestellt. Gegenstand der rechnerischen Lebensdauerabschätzung ist eine Struktur, die mit äußeren Lasten zyklisch beansprucht wird (B1). Die Belastung wird beschrieben durch einen Last-Zeit-Verlauf (B2). Über eine Last-Kerbdehnungs-Näherung kann im nächsten Schritt (B3) eine Verbindung zwischen den äußeren Lasten und den örtlich im Kerbgrund auftretenden Dehnungen hergestellt werden. Die Ermittlung der örtlichen Dehnungen kann numerisch beispielsweise mit der Finite-Elemente-Methode, mit einem geeigneten analytischen Näherungsverfahren oder experimentell beispielsweise mit einem Dehnmessstreifen erfolgen. Auf diese Weise erhält man den Last-Dehnungs-Verlauf, welcher die Dehnungen im Kerbgrund in Abhängigkeit der äußeren Belastung des Bauteils beschreibt. Über die zyklische Spannungs-Dehnungskurve des Bauteilwerkstoffs lässt sich jedem Dehnungswert ein Spannungswert zuordnen. So kann der Last-Dehnungs-Verlauf in einen örtlichen Spannungs-Dehnungs-Pfad im Spannungs-Dehnungs-Diagramm übertragen werden (B4). Der sich ausbildende Bereich zwischen zwei Umkehrpunkten des Spannungs-Dehnungs-Pfads wird als Hysterese bezeichnet. Der gesamte Spannungs-Dehnungs-Pfad kann als Abfolge von geschlossenen Hysteresen beschrieben werden. Da bei einer realen Bauteilbelastung in der Regel Mittelspannungen auftreten und somit keine rein wechselnde Beanspruchung vorliegt, müssen die geschlossenen schädigenden Hysteresen in einen sogenannten Schädigungsparameter transformiert werden (B5) um einen Vergleich mit den rein wechselnden Versuchen zur Ermittlung der Dehnungswöhlerlinie zu ermöglichen.

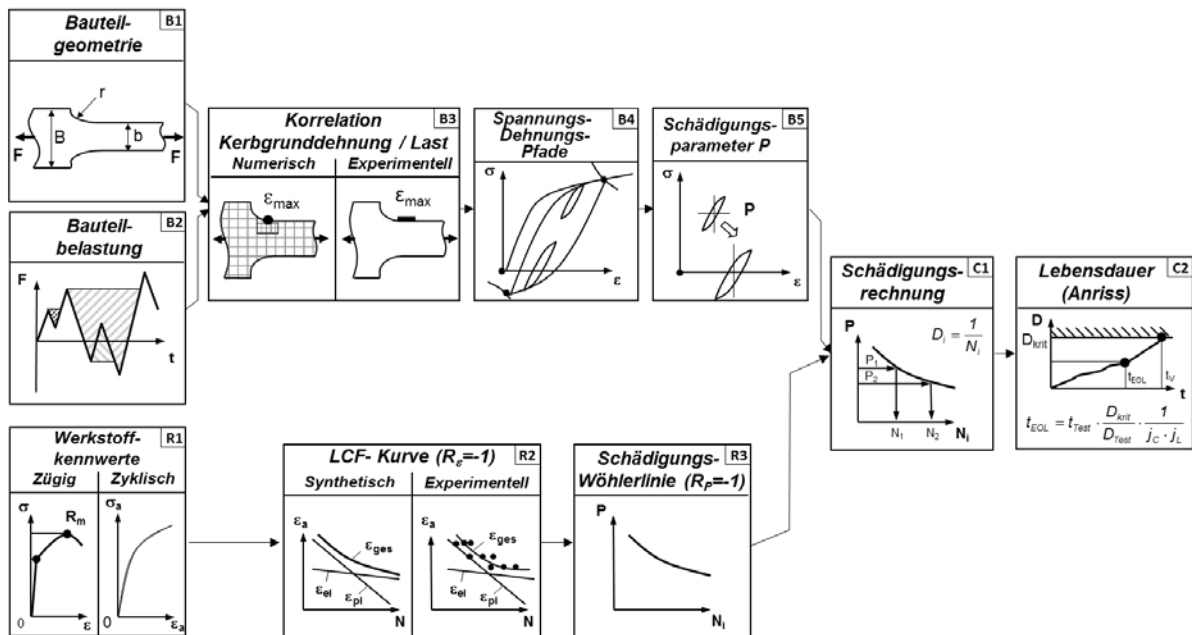


Abbildung 2.5: Vorgehensweise bei der rechnerischen Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept [12]

Auf dem unteren Ast (R1-R3) in Abbildung 2.5 sind die für die Auslegung nach dem örtlichen Dehnungskonzept benötigten Elemente der Beanspruchbarkeit abgebildet. Das sind im Wesentlichen die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (R1) und die Dehnungswöhlerlinie (R2) des Werkstoffs. Beide Kurven lassen sich aus einstufigen dehnungskontrollierten Versuchen an ungekerbten Proben unter zyklischer und in der Regel reinwechselnder Axialbeanspruchung ermitteln. Für die Bestimmung der Dehnungswöhlerlinie existiert außerdem eine Vielzahl an synthetischen Konzepten (z.B. in [11] und [13]). Im Anschluss muss die Dehnungswöhlerlinie in eine Schädigungswöhlerlinie (R3) transformiert werden, um so einen Vergleich mit den Schädigungsparameterwerten aus (B5) zu ermöglichen

Im letzten Schritt wird in einer Schädigungsrechnung (C1 und C2) über einen Vergleich zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit die Anrisslebensdauer des Bauteils abgeschätzt.

### 2.5.1.2 Werkstoffverhalten unter zyklischer elastisch-plastischer Beanspruchung

Bei erstmaliger Belastung des Werkstoffs folgt der zyklische Spannungs-Dehnungs-Pfad der Erstbelastungskurve (Abbildung 2.6, Pfad: 0-1). Im Fall der Ermittlung eines Beanspruchungspfad im Örtlichen Dehnungskonzept ist die Erstbelastungskurve gleichzusetzen mit der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve und darf nicht mit der zügigen Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dem Zugversuch verwechselt werden. Im Folgenden wird daher nur noch von der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve die Rede sein. Nach der ersten Lastumkehr kann der weitere Verlauf des Spannungs-Dehnungspfad mit dem Masing- und dem Memory-Verhalten des Werkstoffs beschrieben werden.

Das Masing-Verhalten nach [14] besagt, dass der weitere Verlauf des Spannungs-Dehnungspfads nach Beanspruchungsumkehr einer Kurve folgt, die der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve mit doppelten Spannungs- und Dehnungswerten entspricht.

Das Memory-Verhalten wird in [11] mit den drei folgenden Gesetzmäßigkeiten beschrieben:

1. Steigt nach einer Folge von Lastumkehrpunkten die Spannung über einen bereits zuvor in der Belastungsgeschichte erreichten Wert an (Abbildung 2.6, Pfad: 1-2-1), so durchläuft der Spannungs-Dehnungspfad den ehemaligen Lastumkehrpunkt und verläuft weiter entlang der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve (Abbildung 2.6, Pfad: 1-3).
2. Schließt sich eine Hysterese, welche auf einem Hysteresenast begonnen wurde (Abbildung 2.6, Pfad: 4-5-4), so folgt der Spannungs-Dehnungs-Pfad wieder dem ursprünglichen Hysteresenast (Abbildung 2.6, Pfad: 3-4-6).
3. Ein Hysteresenast, welcher von der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve abzweigt (Abbildung 2.6, Pfad: 3-4-6), endet, wenn der Betrag von Spannung oder Dehnung seines Startpunktes (Abbildung 2.6, Punkt: 3) im gegenüberliegenden Quadranten erreicht wird (Abbildung 2.6, Punkt: 6). Anschließend folgt der Spannungs-Dehnungs-Pfad wieder der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve (Abbildung 2.6, Pfad: 6-7).

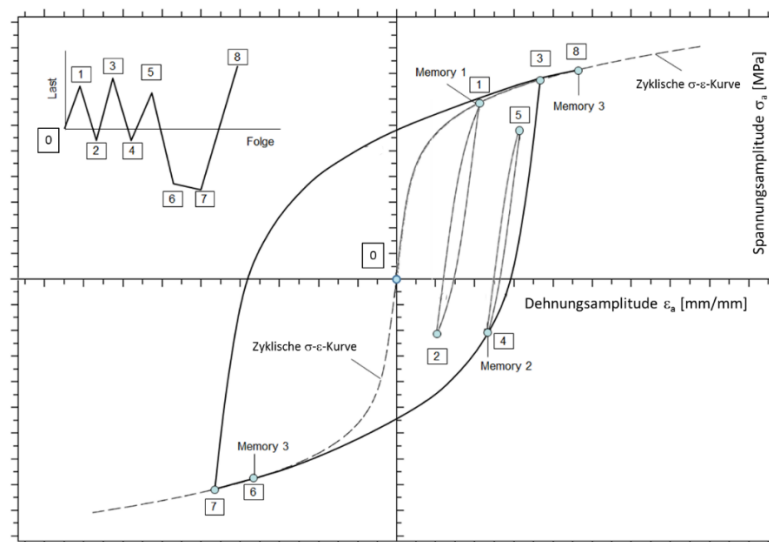


Abbildung 2.6: Masing- und Memory-Verhalten bei zyklischer elastisch-plastischer Werkstoffbeanspruchung [15]

In Abbildung 2.7 ist eine Spannungs-Dehnungs-Hysterese zusammen mit den zugehörigen Beanspruchungsgrößen dargestellt. Dabei setzt sich die Gesamtdehnungsspannweite  $\epsilon_a$  aus einem elastischen  $\epsilon_{a,el}$  und einem plastischen  $\epsilon_{a,pl}$  Dehnungsanteil zusammen:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} \quad (2.7)$$

Der elastische Dehnungsanteil kann aus dem E-Modul und der Spannungsamplitude  $\sigma_a$  wie folgt ermittelt werden:

$$\varepsilon_{a,el} = \frac{\sigma_a}{E} \quad (2.8)$$

Zieht man den elastischen Anteil von der Gesamtdehnungsamplitude ab erhält man den plastischen Dehnungsanteil:

$$\varepsilon_{a,pl} = \varepsilon_a - \varepsilon_{a,el} \quad (2.9)$$

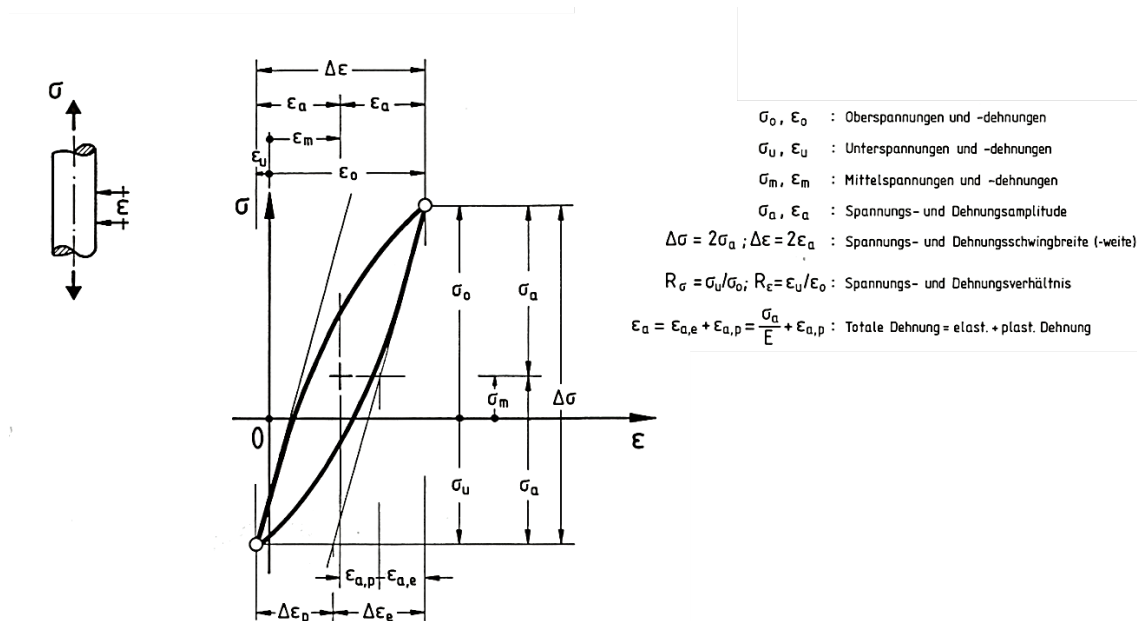


Abbildung 2.7: Beanspruchungsgrößen der Hysteresen [11]

Unter wechselnder elastisch-plastischer Verformung mit konstanter Dehnungsamplitude kommt es in metallischen Werkstoffen aufgrund von Versetzungsbewegungen zu sogenannten zyklischen Verfestigungen oder Entfestigungen. Wenn mit steigender Schwingspielzahl  $N$  die Oberlast  $\sigma_0$ , welche zum Erreichen der vorgegebenen Dehnung benötigt wird, zunimmt, handelt es sich um einen zyklisch verfestigenden Werkstoff. Nimmt hingegen die Last zum Erreichen der vorgegebenen Dehnung ab, liegt ein zyklisch entfestigender Werkstoff vor, siehe Abbildung 2.8.



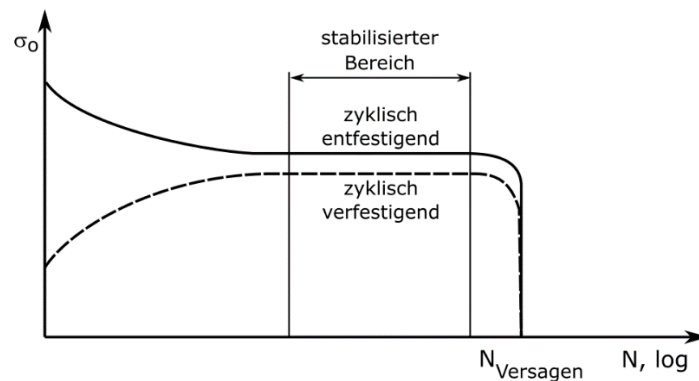


Abbildung 2.8: Zyklische Entfestigung und Verfestigung schematisch dargestellt anhand der Wechselverformungskurve

Ob zyklische Verfestigung oder zyklische Entfestigung auftritt und in welcher Höhe ist vom Werkstoff und der Beanspruchungshöhe abhängig. Bei den meisten Metallen sind die Verfestigungs- bzw. Entfestigungsvorgänge nach etwa 20 bis 40 % der Lebensdauer abgeschlossen und es stellt sich über die restliche Anrisslebensdauer ein stabiler Verlauf der Wechselverformungskurve ein, siehe Abbildung 2.8. Meistens tritt bei Stählen mit niedriger Festigkeit und Aluminiumlegierungen zyklisches Verfestigen auf, wohingegen hochfeste Stähle zyklisch entfestigen.

### 2.5.1.3 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve

Eine Hysterese aus dem Bereich eines dehnungskontrollierten Einstufenversuchs, in welchem stabiles Werkstoffverhalten vorliegt, wird als stabilisierte Hysterese bezeichnet. Trägt man die stabilisierte Hysterese im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ein und wiederholt diesen Vorgang für mehrere Versuchsläufe bei unterschiedlichen Dehnungsamplituden, so kann man gedanklich die Spitzenwerte der stabilisierten Hysteresen zu einer Kurve verbinden und erhält, wie in Abbildung 2.9 schematisch dargestellt, die stabilisierte zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve. In der Realität unterliegen die Ergebnisse aus den dehnungskontrollierten Einstufenversuchen Streuungen und die resultierende zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve muss mit einer Regressionsanalyse ermittelt werden.

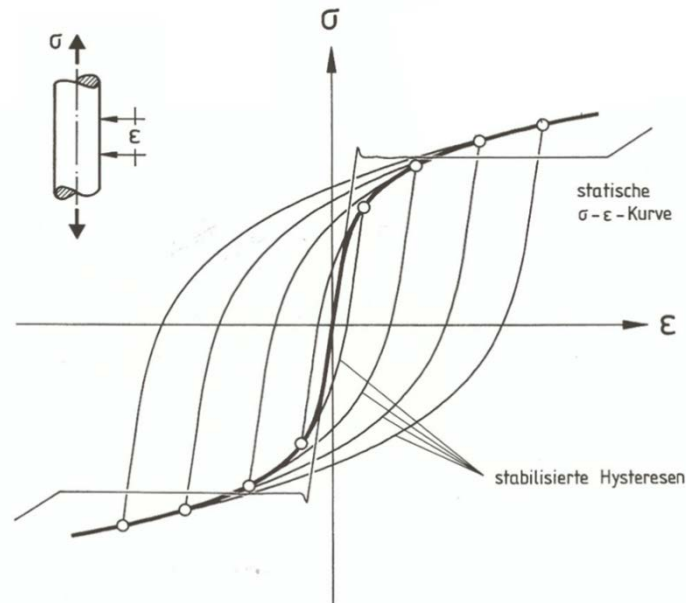


Abbildung 2.9: Stabilisierte zyklische  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve, schematisch [11]

Für die analytische Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve wird meistens der Ansatz nach Ramberg und Osgood [16] verwendet, wonach sich die Gesamtdehnungsamplitude aufteilen lässt in einen elastischen und einen plastischen Anteil:

$$\epsilon_a = \epsilon_{a,el} + \epsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.10)$$

Darin wird der elastische Anteil mit dem Hookeschen Gesetz beschrieben. Für die Darstellung des plastischen Amplitudenanteils wird nach Morrow [17] ein zweiparametiger Exponentialansatz gewählt. Demnach lässt sich der Zusammenhang zwischen dem plastischen Anteil der Dehnungsamplitude und der Spannungsamplitude über einen linearen Verlauf im doppeltlogarithmischen Diagramm beschreiben. Diese sogenannte zyklische Fließkurve wird mit dem zyklischen Festigkeitskoeffizient  $K'$  und dem zyklischen Verfestigungsexponent  $n'$  abgebildet. Die Parameter können experimentell über eine lineare Regression aus den Versuchsergebnissen ermittelt werden, indem für jeden Einzelversuch die stabilisierte Spannungsamplitude über dem plastischen Dehnungsanteil abgebildet wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Ermittlung von  $K'$  und  $n'$  über die sogenannte Kompatibilitätsbedingung, die in Kapitel 2.5.1.5 beschrieben wird.

#### 2.5.1.4 Dehnungswöhlerlinie

Die Dehnungswöhlerlinie beschreibt zusammen mit der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve die Beanspruchbarkeit eines Werkstoffs im Örtlichen Dehnungskonzept (Abbildung 2.5). Dargestellt wird die Dehnungswöhlerlinie im doppeltlogarithmischen Diagramm, wobei auf der Ordinate

nate die Gesamtdehnungsamplitude und auf der Abszisse die Versagensschwingspielzahl aufgetragen ist. Als Versagenskriterium wird nach [11] der technische Oberflächenanriss festgelegt.

Die Informationen für die Ermittlung der Dehnungswöhlerlinie werden aus denselben dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Werkstoffproben gewonnen, die auch zur Ermittlung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve dienen. Demnach ist jede stabilisierte Hysterese fest mit der zugehörigen Versagensschwingspielzahl verknüpft. Wie bei der Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve kann auch bei der Dehnungswöhlerlinie zwischen einem elastischen und einem plastischen Anteil unterschieden werden. Nach Basquin, Manson und Coffin können beide Anteile mit Exponentialgleichungen beschrieben werden und stellen somit einen linearen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Dehnungsanteil und der Versagensschwingspielzahl im doppeltlogarithmischen Wöhlerdiagramm dar, siehe Abbildung 2.10. Die zugehörige Wöhlerliniengleichung lautet wie folgt:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c \quad (2.11)$$

Demnach werden die plastische und elastische Gerade über die halbe Versagensschwingspielzahl im Wöhlerdiagramm dargestellt. Die Gleichung zur Beschreibung der elastischen Geraden ist auf Basquin zurückzuführen. Die Gleichung zur Beschreibung der plastischen Geraden wurde von Manson [18], [19] und Coffin [20] aufgestellt. Der Schwingfestigkeitskoeffizient  $\sigma_f'$  und der Duktilitätskoeffizient  $\varepsilon_f'$  beschreiben den Spannungs- bzw. Dehnungswert der Geraden bei einem halben Schwingspiel. Mit dem Schwingfestigkeitsexponent  $b$  und dem Duktilitätsexponent  $c$  wird die Neigung der elastischen und plastischen Geraden beschrieben. Diese vier Parameter werden zusammen mit den Parametern  $K'$  und  $n'$  zur Darstellung der zyklischen Fließkurve aus dem vorherigen Kapitel 2.5.1.3 als zyklische Werkstoffkennwerte bezeichnet.

Der Schnittpunkt der plastischen und der elastischen Geraden wird als Transition-Point bezeichnet. Anhand der Schwingspielzahl des Schnittpunkts  $N_T$  wird die Dehnungswöhlerlinie in zwei Schwingfestigkeitsbereiche unterteilt. Der Bereich kleinerer Schwingspielzahlen  $N < N_T$  wird als Low-Cycle-Fatigue Bereich bezeichnet, kurz LCF-Bereich. Der Bereich größerer Schwingspielzahlen  $N > N_T$  wird als High-Cycle-Fatigue Bereich bezeichnet, kurz HCF-Bereich (Abbildung 2.10).

Aufgrund des hohen zeitlichen und experimentellen Aufwands bei der Ermittlung der Dehnungswöhlerlinie existiert eine Vielzahl an Konzepten für die Erstellung synthetischer Dehnungswöhlerlinien. Eine detaillierte Auswahl ist beispielsweise in [11] oder [13] aufgeführt.

Dabei wird häufig eine Korrelation zwischen den mechanisch-technologischen Kennwerten aus dem quasistatischen Zugversuch und den zyklischen Werkstoffkennwerten, welche die Dehnungswöhlerlinie beschreiben, verwendet, um auf diese Weise die zyklischen Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch abzuleiten.

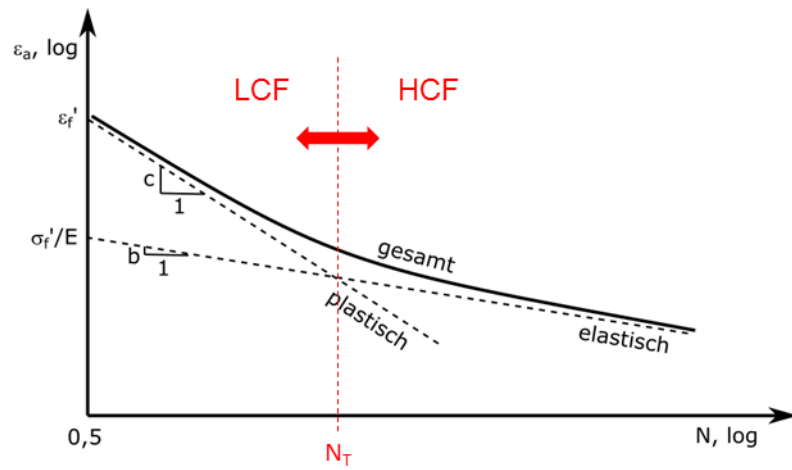


Abbildung 2.10: Dehnungswöhlerlinie, schematisch

Das bekannteste Verfahren zur Erstellung von synthetischen Dehnungswöhlerlinien ist das „Uniform Material Law“ kurz UML nach Bäumel und Seeger [21]. Das Verfahren basiert auf der empirischen Auswertung der Kennwerte von ca. 1500 Werkstoffen, die in un- und niedriglegierte Stähle und in Aluminium- und Titan-Legierungen unterteilt wurden. So lässt sich nach dem UML der Schwingfestigkeitskoeffizient  $\sigma_f'$  von un- und niedriglegierten Stählen aus der Zugfestigkeit  $R_m$  des Stahls berechnen:

$$\sigma_f' = 1,5 \cdot R_m \quad (2.12)$$

Der Duktilitätskoeffizient lässt sich entsprechend nach folgender Gleichung berechnen:

$$\varepsilon_f' = 0,59 \cdot \Psi \quad (2.13)$$

Wobei der Parameter  $\Psi$  in Abhängigkeit des Verhältnisses von Zugfestigkeit zu E-Modul festgelegt wird:

$$\Psi = 1 \quad \text{für} \quad \frac{R_m}{E} \leq 0,003 \quad (2.14)$$

$$\Psi = 1,375 - 125,0 \cdot \frac{R_m}{E} \quad \text{für } \frac{R_m}{E} > 0,003 \quad (2.15)$$

Die Neigungsexponenten werden als konstant angenommen:

$$b = -0,087 \quad (2.16)$$

$$c = -0,58 \quad (2.17)$$

### 2.5.1.5 Kompatibilitätsbedingung

Wie im vorherigen Kapitel bereits beschrieben, besteht eine direkte Verknüpfung zwischen der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve und der Dehnungswöhlerlinie. Demnach müssen auch die Gleichungen zur analytischen Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve und der Dehnungswöhlerlinie miteinander kompatibel sein und ineinander überführbar. Dieser Zusammenhang wird mit der sogenannten Kompatibilitätsbedingung beschrieben. Löst man den elastischen Anteil der Dehnungswöhlerlinie in Gleichung (2.11) nach der Schwingspielzahl auf und setzt es in die Gleichung für den plastischen Anteil ein, so erhält man nach Umformen folgende Gleichung:

$$\varepsilon_{a,pl} = \left( \frac{\sigma_a}{\left( \frac{\sigma_f'}{\varepsilon_f'^{\frac{b}{c}}} \right)^{\frac{c}{b}}} \right)^{\frac{c}{b}} \quad (2.18)$$

Über Gleichsetzen mit dem plastischen Anteil zur Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve nach der Ramberg-Osgood-Gleichung (2.10) erhält man die Gleichungen der Kompatibilitätsbedingung:

$$K' = \frac{\sigma_f'}{\varepsilon_f'^{\frac{b}{c}}} \quad (2.19)$$

$$n' = \frac{b}{c} \quad (2.20)$$

### 2.5.1.6 Ermittlung der lokalen Beanspruchungen im Kerbgrund

Die Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept setzt voraus, dass die lokal im Kerbgrund auftretenden Dehnungen bekannt sind. Für die Ermittlung der Kerbgrunddehnung gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit ist die experimentelle Ermittlung der Dehnungen, beispielsweise mithilfe eines im Kerbgrund des Bauteils angebrachten Dehnmessstreifens. Ein Nachteil der experimentellen Ermittlung ist, dass bei der Vorauslegung des Bauteils noch kein reales Bauteil beziehungsweise ein Prototyp für experimentelle Untersuchungen zur Verfügung steht.

Eine weitere Möglichkeit ist die numerische Ermittlung der Kerbgrunddehnungen, wie sie zum Beispiel mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführt werden kann. Dafür wird den Elementen, welche das Bauteil abbilden, die Spannungs-Dehnungs-Kurve des Bauteilwerkstoffs in einem elastisch-plastischen Werkstoffgesetz hinterlegt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das Element-Netz im Kerbgrund fein genug ist um den Approximationsfehler möglichst gering zu halten.

Neben den beiden genannten Möglichkeiten existiert noch eine Vielzahl an analytischen Verfahren zur Abschätzung der örtlichen Kerbgrundbeanspruchung. Von diesen sogenannten Last-Kerbdehnungs-Näherungsverfahren ist das Verfahren nach Neuber [22] am bekanntesten. Demnach kann die örtliche Beanspruchung im Kerbgrund, beschrieben durch einen Punkt auf der Spannungs-Dehnungs-Kurve ( $\sigma$  und  $\varepsilon$  in Gleichung (2.21)), über gleichsetzen mit einer fiktiven rein elastischen Beanspruchung auf der Hooke'schen Geraden berechnet werden, siehe Abbildung 2.11. Die fiktive elastische Beanspruchung ergibt sich aus dem Faktor der Nennspannung  $\sigma_n$  und der Kerbformzahl  $K_t$ . Die sich ausbildende Kurve zwischen fiktiver und realer Beanspruchung wird als Neuber-Hyperbel bezeichnet.

$$\frac{\sigma_n^2 \cdot K_t^2}{E} = \sigma \cdot \varepsilon = konst. \quad (2.21)$$

Das hier beschriebene Vorgehen bei statischer Bauteilbelastung ist identisch zu dem Vorgehen bei zyklischer Belastung, schematisch dargestellt in Abbildung 2.11. Die Spannungen und Dehnungen werden bei zyklischer Beanspruchung durch Amplituden beschrieben und die örtlichen

Beanspruchungen können über die Neuber-Regel (2.21) unter Verwendung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve iterativ ermittelt werden.

Mit dem Last-Kerbdehnungs-Verfahren nach Neuber werden die Beanspruchungen bei mittleren Belastungen in der Regel etwas überschätzt [23]. Somit sind im mittleren Belastungsbereich bei einer Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept und Anwendung der Neuber-Regel konservative Ergebnisse der Anrisslebensdauervorhersage zu erwarten.

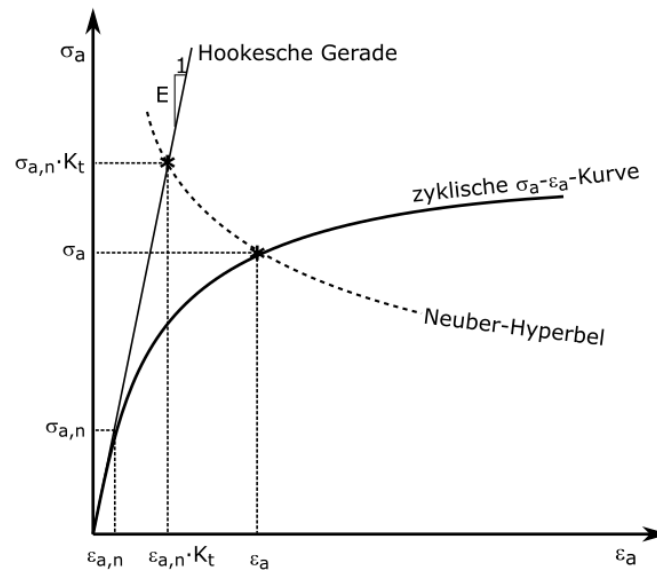


Abbildung 2.11: Neuber-Regel bei zyklischer Beanspruchung

### 2.5.1.7 Schädigungsparameter

Mittelspannungen beeinflussen das Versagensverhalten unter zyklischer Belastung und müssen daher bei einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung berücksichtigt werden. Im Örtlichen Dehnungskonzept wird für die Berücksichtigung des Mittelspannungseinfluss ein Schädigungsparameter verwendet. Mit dem Schädigungsparameter wird jede geschlossene Spannungs-Dehnungs-Hysterese auf ein einheitliches Lastverhältnis transformiert.

Es existiert eine Vielzahl an Vorschlägen zur Beschreibung des Schädigungsparameters. Die bedeutendsten sind in [11] beschrieben. Durchgesetzt hat sich vor allem der Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper [24]. Demnach lässt sich die Schädigung einer geschlossenen Spannungs-Dehnungs-Hysterese aus der vorliegenden Mittelspannung, der Spannungs- und Dehnungsamplitude sowie dem E-Modul berechnen:

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_o \cdot \varepsilon_a \cdot E} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \varepsilon_a \cdot E} \quad (2.22)$$

Um den ermittelten Schädigungswert der Belastungs-Hysteresen mit der Dehnungswöhlerlinie in einer Schädigungsrechnung vergleichen zu können, muss die Dehnungswöhlerlinie ebenfalls in die Schädigungsparameter-Form transformiert werden. Durch Ersetzen der Oberspannung in Gleichung (2.22) mit dem elastischen Anteil aus Gleichung (2.11) kann die Schädigungsparameterwöhlerlinie mit den zyklischen Werkstoffkennwerten wie folgt beschrieben werden:

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_f'^2 (2N)^{2b} + E \cdot \varepsilon_f' \cdot \sigma_f' (2N)^{(b+c)}} \quad (2.23)$$

### 2.5.1.8 Schädigungsrechnung

Die bekannteste und am häufigsten verwendete Methode zur Durchführung einer Schädigungsrechnung ist das lineare Schadensakkumulationsgesetz nach Palmgren [25] und Miner [26]. Basierend auf der Schädigungsparameterwöhlerlinie kann jedem P-Wert und dementsprechend jeder geschlossenen Spannungs-Dehnungs-Hysterese aus einem Last-Zeit-Verlauf eine Teilschädigung  $D_i$  zugewiesen werden:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{1}{N_i} \quad (2.24)$$

Dabei ist  $N_i$  die Schwingspielzahl der Schädigungsparameterwöhlerlinie bei dem jeweiligen P-Wert der Hysterese. Die Teilschädigungen werden zu einer Schadenssumme  $D$  aufsummiert. Erreicht die Schadenssumme den Wert  $D = 1$ , tritt Versagen ein. Die gesuchte Lebensdauer ergibt sich aus allen bis zum Versagen aufgebrauchten Einzelschwingspielen.

## 2.6 Laserstrahlschneiden

Das Laserstrahlschneiden ist ein Trennverfahren, welches insbesondere in der Prototypenfertigung und Kleinserienproduktion als wirtschaftlich gilt und Anwendung findet. Laserstrahlschneiden ist ein Überbegriff für verschiedene Arten von Trennverfahren, die auf der Verwendung eines Laserstrahls basieren. Es wird zwischen Laserschmelzschnneiden, Laserbrennschnneiden und Lasersublimationsschnneiden unterschieden [27], [28]. Ist im Rahmen dieses Berichts die Rede von Laserstrahlschneiden, so bezieht sich dies stets auf die Verfahrensvariante Laserschmelzschnneiden. Dabei wird monochromatisches, kohärentes Laserlicht, welches sich durch



eine nur geringe Aufweitung und zeitgleich hohe Leistungsdichte auszeichnet, geführt, geformt und gebündelt. Der so entstandene, fokussierte Laserstrahl trifft, berührungslos und daher auch verschleißfrei, auf das Werkstück [27], vergleiche Abbildung 2.12.

Im Brennpunkt des fokussierten Laserstrahls wird das Material lokal über seinen Schmelzpunkt hinaus erwärmt und über die gesamte Tiefe des Werkstücks aufgeschmolzen und zum Teil auch verdampft. Über den induzierten Dampfdruck sowie einen koaxial zum Laserstrahl geführten Gasstrahl wird die Schmelze aus der Schnittfuge ausgeblasen [27], [28] und [29]. Zur Vermeidung von Oxidbildung an den Schnittkanten wird Inertgas verwendet.

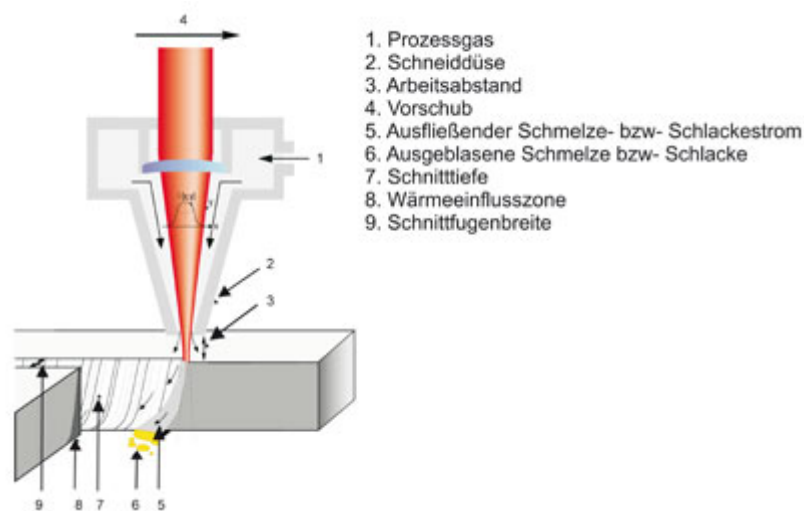
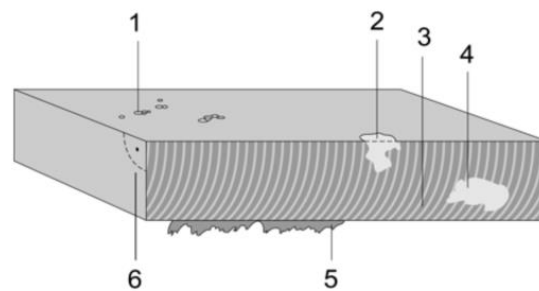


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Laserstrahlschneidens [28]

Die neun aufgeführten Punkte in Abbildung 2.12 stellen Größen dar, die den Schneidprozess charakterisieren und über Parametervariation verändert werden können um das optimale Schnittergebnis zu erhalten. Für das Erreichen des optimalen Schnittresultats ist bereits die Auswahl der Strahlquelle, beispielsweise ein CO<sub>2</sub>- oder Feststofflaser, entscheidend. Sie ist abhängig von der zu fertigenden Schneidgeometrie, der gewünschten Taktzeit, der vorhandenen Systemtechnik und dem zu trennenden Material [28], [30]. Weiterhin gilt es für einen zuverlässigen und effizienten Schneidprozess den Laser- und Gasstrahl an die jeweilige Schneidaufgabe anzupassen. Ziel dabei ist die Einkopplung des Schneidgases in die Fuge effizienter und das Ausblasen der Schmelze effektiver zu gestalten. Wichtige Größen während jedes Schneidprozesses sind die maximale Schneidgeschwindigkeit, die Schnittfugenbreite, die Schmelzfilmdicke, die absorbierte Laserleistung sowie die Verdampfungsrate. Die optimalen Werte für diese Größen können experimentell beziehungsweise durch Simulationen ermittelt werden [30]. Die typische Schneidgeschwindigkeit für Baustähle zwischen 1 und 3 mm Dicke liegt beispielsweise zwischen 18 und 4,5 m/min [31].

Neben einem effektiven und wirtschaftlichen Ablauf des Schneidprozesses zeichnet sich ein optimales Schnittresultat durch eine hohe Güte der Schnittkanten aus. Kriterien für die Güte einer Schnittkante sind neben der Rechtwinkligkeit und Maßhaltigkeit auch ein geringer Riefennachlauf und damit eine geringe Oberflächenrauheit sowie ein nur geringfügig oder gar nicht ausgeprägter Grat. Bekannter Weise wirkt sich eine geringe Oberflächenrauheit positiv auf das Festigkeitsverhalten unter schwingender Beanspruchung aus. Weiterhin wünschenswert ist es, dass so wenig wie möglich Materialablagerungen, Auswaschungen und Kolkungen auftreten. Diese mindern nicht nur optisch die Qualität des Schneidresultats, sondern können auch als Fehlstellen zur Anrissentstehung unter Betriebslasten beitragen. Zusätzlich sollte eine entstehende, nicht immer vermeidbare, Wärmeeinflusszone idealerweise so klein wie möglich ausgedehnt sein, d. h. geringe Einhärtetiefe und nur geringfügige Härteänderungen aufweisen. In Abbildung 2.13 sind die Qualitätskriterien für das Laserstrahlschneiden schematisch aufgezeigt.



- |   |                    |   |                  |
|---|--------------------|---|------------------|
| 1 | Materialablagerung | 4 | Auswaschung      |
| 2 | Kolkung            | 5 | Grat             |
| 3 | Riefennachlauf     | 6 | Rechtwinkligkeit |

Abbildung 2.13: Qualitätskriterien für das Laserstrahlschneiden [32]

## 2.7 Scherschneiden

DIN 8588 ordnet das Scherschneiden, welches auch als Normalschneiden bezeichnet wird, der dritten Hauptgruppe „Trennen“ sowie der Gruppe „Zerteilen“ zu. Es ist definiert als ein Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei sich aneinander vorbeibewegenden Schneiden. [33]

Das Scherschneiden stellt auf Grund seiner wirtschaftlichen Relevanz die wohl bedeutendste Untergruppe dar. Nahezu jedes Blechprodukt erfährt innerhalb des Herstellungsprozesses eine oder gar mehrere Schneidoperationen. [34]

Der Werkstoff wird dabei durch die von beiden Seiten eindringenden Schneidkanten so weit umgeformt, bis sein Umformvermögen erschöpft ist und der Werkstoffzusammenhalt durch Bruch verloren geht. Wie bei jedem Umformvorgang entstehen auch beim Trennprozess des Scherschneidens durch die lokale Umformung hohe Verfestigungen an der Schnittkante. Die Höhe der Verfestigung sowie die Größe der Schereinflusszone hängen von diversen Parametern ab. Hervorzuheben sind dabei der Einfluss des Schneidspaltes, des Werkstoffes sowie des Verschleißes der Aktivelemente. [35], [36]

Entsprechend DIN 9870-2 wird unterschieden zwischen dem Schneiden mit offener respektive geschlossener Schnittlinie. Es handelt sich um einen offenen Schnitt, wenn die Schnittlinie die Ränder des Blechs schneidet, anderenfalls um einen geschlossenen. Das Lochen sowie das Ausschneiden gehören zu den bedeutendsten Verfahren und sind dem geschlossenen Schnitt zuzuordnen. Beide Verfahren unterscheiden sich dahingehend, dass das Ausschneiden zur Fertigung einer Außenform, das Lochen zur Herstellung einer Innenform eingesetzt wird. Das Schneiden mit offener Schnittlinie wird hauptsächlich beim Abschneiden zur vollständigen Trennung eines Schnittteils angewandt. [37]

Abbildung 2.14 verdeutlicht die Unterscheidung der Verfahren anhand ihrer Schnittlinie.

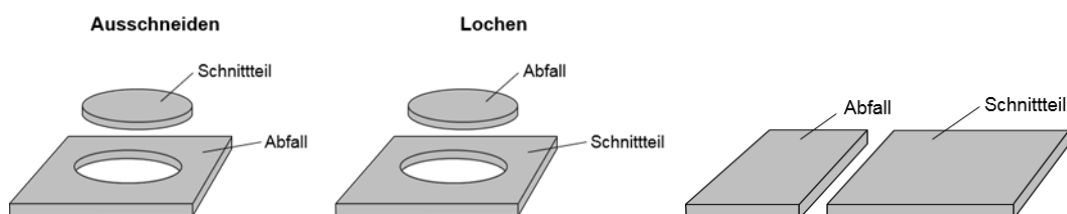


Abbildung 2.14: Scherschneiden mit a) geschlossener und b) offener Schnittlinie

Neben der Unterscheidung hinsichtlich der Schnittlinie lässt sich das Scherschneiden weiterhin in Normalschneiden und Präzisionsschneiden unterteilen. Insbesondere zur Reduktion respektive Vermeidung von Qualitätsmängeln werden Präzisionsschneidverfahren eingesetzt. Die meisten Verfahren sind dem Normalschneiden sehr ähnlich, jedoch führen veränderte Verfah-

rensparameter zu erheblich verbesserten Schnittergebnissen. In Abbildung 2.15 sind die wichtigsten Präzisionsschneidverfahren abgebildet.

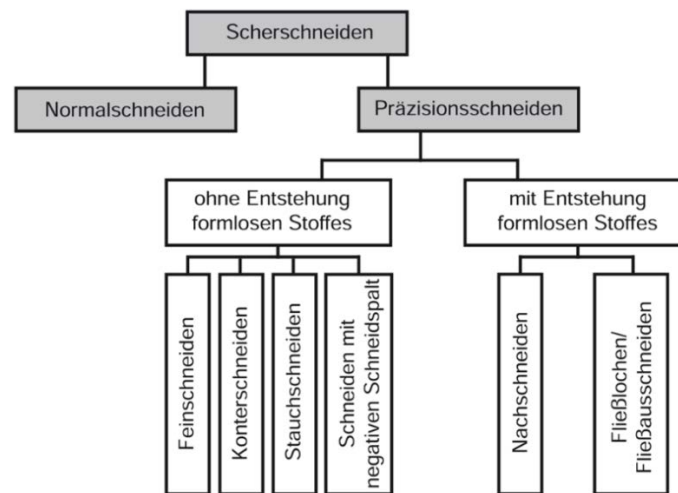


Abbildung 2.15: Präzisionsschneidverfahren aus [38]

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird nun auf das Normalschneiden Bezug genommen.

### 2.7.1 Aufbau eines Scherschneidwerkzeuges

Der grundsätzliche Aufbau eines Schneidwerkzeuges besteht aus den beiden Elementen Schneidstempel und Matrize. Als Aktivelemente werden die Werkzeugbauteile bezeichnet, welche direkt am Schneidvorgang beteiligt sind. Zusätzlich kann ein weiteres Element, ein Niederhalter, zum Einsatz kommen. Der Niederhalter verhindert das Abheben des Blechs von der Matrizenstirnfläche und gleichzeitig ein zu großes Nachfließen des zu schneidenden Werkstoffs. Des Weiteren dient er zur Führung sowie Positionierung des Stempels zur Matrize, als auch als Abstreifer beim Stempelrückhub. Der Durchbruch in der Schneidplatte ist üblicherweise nicht zylindrisch, sondern mit einem Freiwinkel versehen, damit die Butzen nicht verklemmen. Das zu schneidende Blech wird in Form von Platinen, von Coil (Band) oder als Streifen zwischen die Aktivelemente Schneidstempel und Schneidplatte geschoben und durch die Relativbewegung der am Schneidprozess beteiligten Aktivelemente getrennt. Die geometrische Form der Aktivelemente bestimmt die Geometrie des Schnittteils. [38], [39]

Abbildung 2.16 verdeutlicht den schematischen Aufbau eines Schneidwerkzeuges mit geschlossener Schnittlinie.

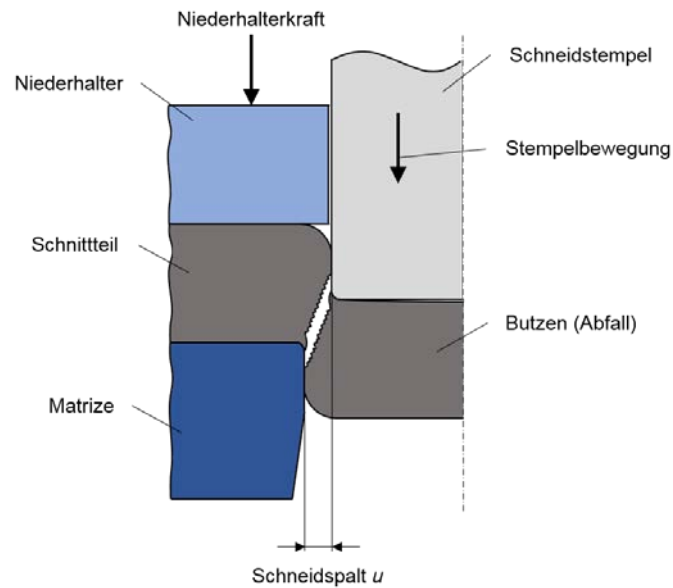


Abbildung 2.16: Arbeitsprinzip des Scherschneidens am Beispiel des Lochens von Blechen nach [38]

Einer der wichtigsten Prozessparameter des Scherschneidens ist der Schneidspalt  $u$ . Gemäß der VDI-Richtlinie 3368 ist der Schneidspalt als der gleichmäßige Abstand zwischen den Schneidkanten des Stempels und der Matrice bei eingetauchtem Stempel definiert. Um die Schneidspaltwerte beim Zerteilen unterschiedlicher Blechdicken besser vergleichen zu können, wird der Schneidspalt als eine auf die Blechdicke  $s$  bezogene Größe angegeben und relativer Schneidspalt  $u_r$  genannt. [38], [40]

$$u_r = \frac{u}{s} \cdot 100 \quad (2.25)$$

mit

$u_r$  Relativer Schneidspalt [%]

$u$  Schneidspalt [mm]

$s$  Blechdicke [mm]

Der relative Schneidspalt beträgt beim Scherschneiden ca. 5 bis 15 Prozent der Blechdicke. [38]

### 2.7.2 Phasen des Schneidvorgangs und Schneidkraftverlauf

Schmidt, Hoffmann und Doege teilen den Ablauf des Trennprozesses beim Scherschneiden mit Niederhalter und geschlossener Schnittlinie hinsichtlich der Verformungsvorgänge in fünf Phasen auf. Für die Trennung des Blechwerkstoffes ist eine Schneidkraft notwendig, die sowohl vom Schneidstempel als auch von der Matrice auf den Blechwerkstoff einwirkt. Die einzelnen Phasen sowie der zugehörige Schneidkraftverlauf sind in Abbildung 2.17 verdeutlicht. [41], [38], [39]

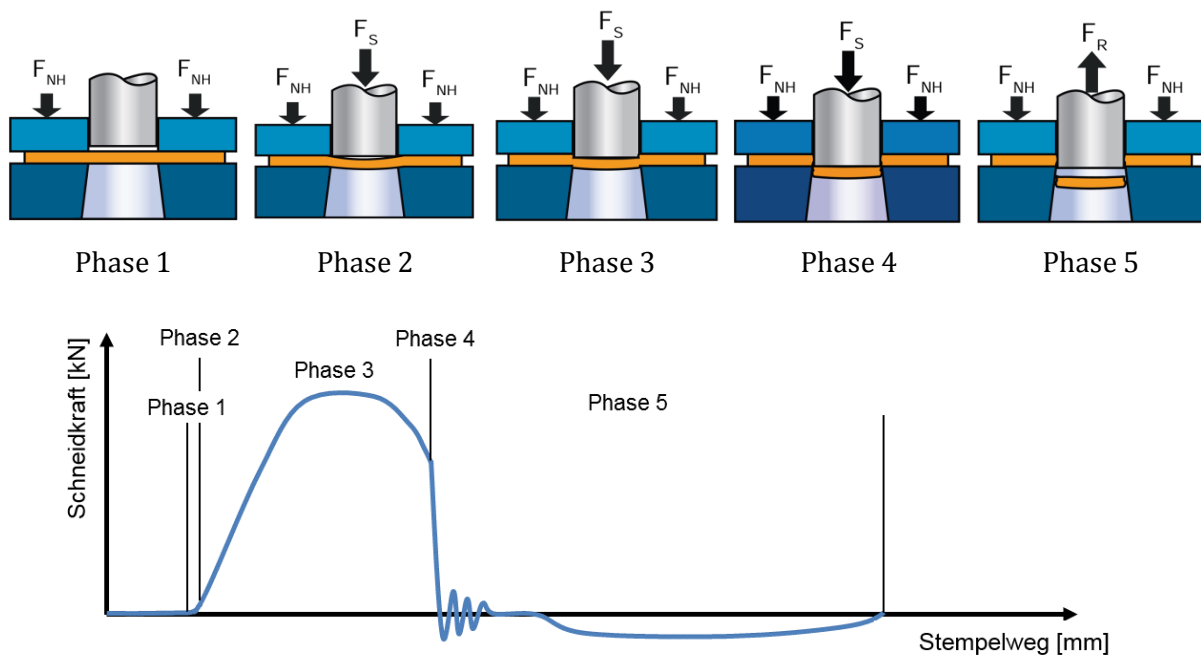


Abbildung 2.17: Phasen des Schneidvorgangs [38] mit zugehörigem Schneidkraft-Stempelweg-Diagramm nach [42]

Nachfolgend werden die einzelnen Phasen und die jeweils stattfindenden Verformungs- und Kraftvorgänge beschrieben.

### Phase 1: Aufsetzen

Der Blechwerkstoff wird durch den Niederhalter auf der Schneidplatte mit der konstanten Niederhalterkraft  $F_{NH}$  festgehalten. Der Stempel bewegt sich mit definierter Geschwindigkeit auf das Blech zu und setzt auf der Blechoberfläche auf. Dies ist der Zeitpunkt, an dem der Schneidstempel zum ersten Mal mit einer Kraft beaufschlagt wird.

### Phase 2: Elastische Werkstoffverformung

Das Aufsetzen des Schneidstempels auf der Blechoberfläche hat eine elastische Verformung des Blechwerkstoffs zur Folge. Aus der Stempelkraft  $F_S$ , der resultierenden Matrizenkraft und dem Schneidspalt entsteht im Bereich zwischen den Kanten der Aktivelemente ein Biegemoment, das insbesondere von den Parametern Stempeldurchmesser, Schneidspaltgröße und Blechdicke abhängig ist. Abbildung 2.18 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Aufgrund der Durchbiegung des Blechwerkstoffes kommt es zu einer ringförmig stark belasteten Zone. Bei Verwendung eines Niederhalters verhindert die Niederhalterkraft eine Durchbiegung des Blechs im Bereich außerhalb der Schnittlinie. [41], [42], [38]

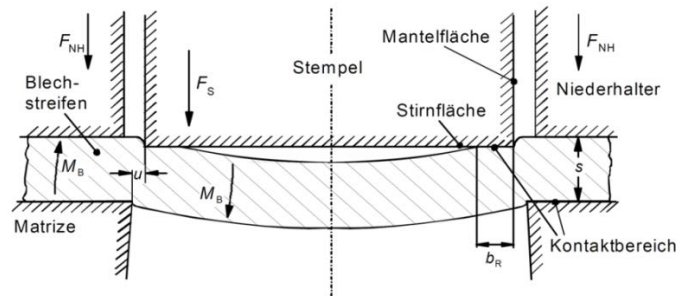


Abbildung 2.18: Resultierendes Biegemoment aus [43]

### Phase 3: Plastische Werkstoffverformung

Im Anschluss an die elastische folgt eine plastische Verformung des Bleches. Die vom Stempel auf das Blech übertragene Druckkraft  $F_S$  bewirkt eine Reaktionskraft der Matrize. Dadurch werden im Bereich der Schneidkanten Spannungen in den Werkstoff eingebracht. Erreichen diese Spannungen die Schubfließgrenze des Werkstoffes, so tritt plastische Formänderung ein, wobei der Blechbereich am Rand der Schneidkanten in Richtung der Stempelbewegung fließt. Die Formänderung einzelner Kristallite richtet sich nach dem Scherprozess beziehungsweise nach dem Formänderungsvermögen des Blechwerkstoffes. Während Kristallite mit großem Formänderungsvermögen den angreifenden Spannungen folgen, werden spröde Gefügebestandteile zertrümmert, welche wiederum dem Werkstofffluss folgen. Dadurch entstehen die charakteristischen Schnittbereiche Kanteneinzug und Glattschnittanteil. [38], [44]

Durch die enormen Formänderungen des Blechwerkstoffes und den damit einhergehenden Versetzungsbewegungen in diesen Schnittbereichen kommt es zu einer Erhöhung der Versetzungsdichte und damit zu einer Reduzierung des Restumformvermögens des Blechwerkstoffes. [44]

Zwei Mechanismen haben in dieser Phase einen Einfluss auf den Kraftverlauf. Zum einen steigt mit zunehmender Stempeleindringtiefe die Kaltverfestigung und damit einhergehend der Schneidwiderstand an. Zum anderen nehmen der noch verbleibende Restquerschnitt und damit die benötigte Schneidkraft ab. Bis das Schneidkraftmaximum erreicht wird überwiegt der Anteil der Kaltverfestigung, daraufhin dominiert die Abnahme des Restquerschnitts. [42], [38]

### Phase 4: Rissbildung und Werkstofftrennung

Erreicht die maximale Schubspannung im Blech zwischen Stempel- und Matrizenkante die werkstoffabhängige Schubbruchgrenze, so ist das Formänderungsvermögen des Werkstoffes erschöpft. Es kommt zu ersten Rissbildungen. Diese treten nach [45] zuerst an der Matrizen-schneidkante auf, da sich an der der Matrize zugewandten Blechunterseite die Zugspannungen aus der Werkstoffstreckung und der Blechdurchbiegung überlagern. Die Gesamtbeanspruchung

an der dem Stempel zugewandten Blechoberseite ist geringer, da dort die Zugspannungen aus der Werkstoffstreckung durch die Druckbeanspruchung aus der Blechbiegung teilweise kompensiert werden. Daher entstehen hier die Risse erst später. Die Risse resultieren in einem vollständigen Trennen des Werkstoffs. Im Falle größerer Schneidspalte verursacht ein im Blech auftretendes Biegemoment im Werkstoffbereich an der Stempelschneidkante eine zusätzliche Dehnung. Es kommt dort zu größeren plastischen Vergleichsdehnungen, sodass der Rissbeginn auch an der Stempelschneidkante auftreten kann. [46], [45]

Der Kraftverlauf zeichnet sich an dieser Stelle durch einen schlagartigen Abfall der Schneidkraft aus. Das Abreißen des Schnittteils führt zu einer abrupten Entlastung von Werkzeug und Presse. Die im Werkzeug und der Presse gespeicherte elastische Energie wird nun freigesetzt. Dies hat eine Schwingbewegung zur Folge. [42], [38]

### Phase 5: Stempelrückzug und Werkstoffrückfederung

Nach der Trennung des Bleches werden auch im Werkstoff elastische Spannungen freigesetzt, welche zu einer Rückfederung im Bereich der Schnittfläche führen. Dabei werden Maß- und Formänderungen im Schnittteil hervorgerufen. Während des Rückzuges des Schneidstempels besteht deshalb meist eine Presspassung zwischen Stempel und gelochtem Außenteil als auch zwischen Matrize und Butzen. Nach dem Durchlaufen des unteren Umkehrpunktes setzt die Bewegung des Stempels in die gegengesetzte Richtung ein. Der Niederhalter streift in dieser Rückzugsbewegung das Schnittteil vom Stempel ab. Dadurch entstehen einerseits ein erhöhter abrasiver und adhäsiver Verschleiß an der Mantelfläche des Stempels, als auch Reibungskräfte. Diese Reibungskräfte haben eine so genannte Rückzugskraft zur Folge. [42], [46]

Die während des Schneidkraftverlaufes auftretende Maximalkraft  $F_{S,max}$  kann mit Hilfe folgender Formel berechnet werden [41]:

$$F_{S,max} = l_S \cdot s \cdot k_S = l_S \cdot s \cdot R_m \cdot c \quad (2.26)$$

mit

$F_{S,max}$	Maximale Schneidkraft [N]
$l_S$	Schnittlinienlänge [mm]
$k_S$	Schneidwiderstand [N/mm <sup>2</sup> ]
$R_m$	Zugfestigkeit des Blechwerkstoffes [N/mm <sup>2</sup> ]
$c$	Bezogener Schneidwiderstand [-]



Der Schneidwiderstand  $k_S$  stellt dabei keine konstante Größe dar, sondern wird für unterschiedliche Bedingungen empirisch ermittelt. Einflussnehmende Faktoren sind dabei nach [38]:

- Werkzeugparameter: Größe des Schneidspaltes, Werkzeugverschleiß, Oberflächenbeschaffenheit der Aktivelemente
- Schnittteilgeometrie: Schnittlinienkontur, offener bzw. geschlossener Schnitt, Blechdicke
- Sonstige Parameter: Schmierung, Blechwerkstoffeigenschaften, Werkzeug- und Werkstücktemperatur, Schneidgeschwindigkeit

Nach [38] bildet die Festigkeit des Blechwerkstoffes den größten auf den Schneidwiderstand einflussnehmenden Faktor. Mit steigender Zugfestigkeit  $R_m$  nimmt der bezogene Schneidwiderstand  $k_S/R_m$  ab. Weiches, gut umformbares Gefüge weist einen bezogenen Schneidwiderstand von  $k_S/R_m = 0,8$  auf. Für höherfeste Werkstoffe beträgt das Verhältnis  $k_S/R_m = 0,7$ .

### 2.7.3 Schnittflächenkenngrößen

Jedes durch Scherschneiden bearbeitete Schnittteil weist eine charakteristische Schnittfläche auf. Diese kann gemäß der VDI-Richtlinie 2906-1 bis -5 in unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden. Dabei werden die vier Bereiche Kanteneinzug, Glattschnittzone, Bruchzone, und Grat unterschieden. Abbildung 2.18 verdeutlicht die genannten Bereiche.

Zusätzlich zu den geometrischen Merkmalen der Schnittfläche entsteht anhand des beim Schneidvorgang eingebrachten Biegemoments eine bleibende Schnittteildurchbiegung. Außerdem ist aufgrund der Kaltverfestigung während des Schneidprozesses eine Härtesteigerung im Bereich der Scherzone (verfestigter Randbereich) zu beobachten [42]. Auf die vier charakteristischen Bereiche der Schnittfläche soll im Folgenden näher eingegangen werden.

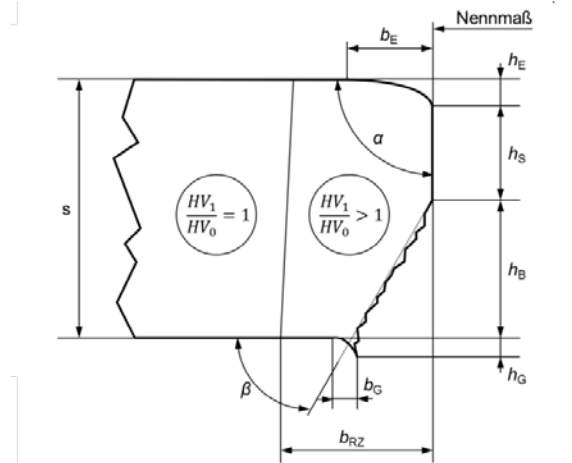


Abbildung 2.19: Schnittflächenausbildung nach [47]

Im Diagramm sind folgende Abkürzungen verwendet worden:

$b_E$	Kanteneinzugsbreite [mm]
$b_G$	Schnittgratbreite [mm]
$b_{RZ}$	Breite der Schereinflusszone [mm]
$h_B$	Bruchflächenhöhe [mm]
$h_E$	Kanteneinzugshöhe [mm]
$h_G$	Schnittgrathöhe [mm]
$h_S$	Glattschnitthöhe [mm]
$s$	Blechdicke [mm]
$HV_0$	Grundhärte [ $N/mm^2$ ]
$HV_1$	Härte nach dem Schneidvorgang [ $N/mm^2$ ]
$\alpha$	Glattschnittwinkel [ $^\circ$ ]
$\beta$	Bruchflächenwinkel [ $^\circ$ ]

### Kanteneinzug

Sowohl Kanteneinzugshöhe als auch -breite entstehen durch das Nachfließen des Blechwerkstoffes während der dritten Phase des Schneidvorgangs. Die Kanteneinzugshöhe  $h_E$  wird insbesondere von der Beschaffenheit der Schneidkante des Schneidstempels bestimmt. Ein größerer Schneidspalt oder Verschleiß des Stempels wirkt sich vergrößernd aus, da beide Effekte dazu führen, dass mehr Werkstoffvolumen für die Formgebung des Einzugs zur Verfügung steht. [38], [48]

## Glattschnitt- und Bruchflächenanteil

Dringt der Schneidstempel weiter in das Material vor, so geht der Kanteneinzug in eine glatte Scherfläche, den Glattschnitt, über. Die sich an den Glattschnitt anschließende Bruchfläche entsteht auf Grund des erschöpften Formänderungsvermögens des Werkstoffes. Einflussnehmende Parameter auf die Anteile von Glattschnitt und Bruchfläche sind im Wesentlichen die Größe des Schneidspaltes, das Umformvermögen des verwendeten Blechwerkstoffes und die Schneidkanten-geometrie. [38]

[43] und [49] konnten für eine geschlossene Schnittlinie nachweisen, dass eine Verkleinerung des relativen Schneidspaltes zu einer Zunahme des Glattschnittanteils und damit einer Abnahme des Bruchflächenanteils führt.

Eine zunehmende Abrundung der Schneidkante hat eine Erhöhung des Glattschnittanteils zur Folge, da dadurch ein kontinuierlicher Werkstofffluss um die Kante ermöglicht wird und die Spannungskonzentration an der Schneidkante geringer ausfällt. Dies führt zu einer niedrigeren Einrissempfindlichkeit und daraus folgend zu einer späteren Bruchinitiierung. [42], [38]

## Grat

Die Schnittflächenkenngröße Schnittgrat schließt sich an die um den Bruchflächenwinkel geneigte Bruchfläche an.

Nach [36] ist die Ausbildung eines Grats die Folge von Verschleiß der Schneidkanten und der daraus resultierenden Veränderung des Rissverlaufs.

Die Wahl eines möglichst kleinen Schneidspaltes sowie scharfer Schneidkanten ermöglicht eine Reduzierung des Schnittgrats. Infolge zunehmenden Verschleißes und der damit verbundenen Verrundung der Werkzeugschneidkanten geht die Rissbildung nicht mehr von den Schneidkanten, sondern von den entstandenen Freiformflächen aus. Je verschlissener die Schneidkanten, desto höher resultiert der Grat. [38]

Die Geometrie der Schneidkante am Obermesser beeinflusst die Grathöhe  $h_G$  am ausgeschnittenen Werkstück, die Grathöhe des gelochten Blechs hingegen hängt vom Zustand der Matrizenkante ab. [50]

Eine tabellarische Zusammenfassung der einflussnehmenden Prozessparameter des Scherschneidens auf die Schnittflächenkenngrößen bietet die nach VDI 2906-2 gestaltete Tabelle 2.2.

Je nach Einsatzgebiet des schergeschnittenen Werkstücks variiert die Bedeutung einzelner Schnittflächenkenngrößen für die Schnittflächenqualität. Für den Fall, dass die Schnittfläche gleichzeitig als Funktionsfläche dient, so ist der Stellenwert der Glattschnitthöhe  $h_S$  und Bruchflächenhöhe  $h_B$  für die Schnittkantenqualität hoch. Je geringer die Notwendigkeit einer Funktionsfläche besteht, desto mehr gewinnen Schnittflächenkenngrößen an Bedeutung, die die Prozesssicherheit des Scherschneidens beeinflussen. Grundsätzlich ist eine hohe Schnittflächenqualität durch eine geringe Kanteneinzugshöhe  $h_E$ , Kanteneinzugsbreite  $b_E$ , Bruchflächenhöhe  $h_B$ , Schnittgrathöhe  $h_G$ , Schnittgratbreite  $b_G$  und eine große Glattschnitthöhe  $h_S$  gekennzeichnet. Das Optimum des Bruchflächenwinkels  $\beta$  liegt bei  $90^\circ$ . [46]

Tabelle 2.2: Einfluss der Prozessparameter auf die Kenngrößen nach [51]

Prozessparameter		Bezogener Schneidspalt $u/s$	Werkzeugführung	Zustand der Schneidele-	Werkstoff	Blechdicke	Teilegeometrie	Schneidgeschwindigkeit
Kanteneinzug	$b_E, h_E$	x		x	x	x	x	
Glattschnittwinkel	$\alpha$	x	x	x			x	
Glattschnittanteil	$h_S/s$	x		x	x			x
Bruchflächenwinkel	$\beta$	x		x				
Bruchflächenanteil	$h_B/s$	x		x	x		x	x
Schnittgrat	$b_G, h_G$	x	x	x	x	x	x	
Beeinflusste Randzone	$b_{RZ}$	x		x	x	x		x

Zusätzlich zu den bereits erläuterten Schnittflächenkenngrößen erzeugt der Schneidprozess eine Schereinflusszone, welche sich von der Schneidkante aus in das angrenzende Material des Werkstoffes erstreckt. Die Schereinflusszone entspricht dem Werkstoffvolumen, welches während des Schneidprozesses einer plastischen Deformation unterzogen wurde.

Das Gefüge des Materials in der Schereinflusszone wird durch den Scherschneidprozess als Folge von lokalen Umformungen erheblich geschädigt. Einflussnehmende Parameter sind vor allem der Schneidspalt, die Materialeigenschaften, die Werkstoffdicke, die Schneidgeschwindigkeit und der Werkzeugverschleiß. [52], [53]

Aufgrund der plastischen Verformung des Werkstückwerkstoffes während des Scherschneidprozesses und der damit einhergehenden Kaltverfestigung kommt es in der Scherzone zu einem Härteanstieg. Dies ist auf die ansteigende Versetzungsdichte und die Behinderung der Versetzungsbewegung bei fortschreitender Verformung zurückzuführen. [38]

Die Schereinflusszone ist als jener Bereich definiert, bis zu dem die Verfestigung bzw. Formänderung vordringt. Sie erstreckt sich je nach Material und Schneidparameter bis einige Zehntel-Millimeter in das Grundmaterial hinein. Graphisch verdeutlicht wird die Schereinflusszone in Abbildung 2.19 zu Beginn dieses Kapitels. [52], [35]

## 2.8 Nachschneiden

Das Nachschneiden ist ein spezielles Fertigungsverfahren aus dem Bereich der Scherschneidverfahren. Wie bereits in Kapitel 2.7 beschrieben kann es den Präzisionsschneidverfahren zugeordnet werden. Es ist definiert als das Beschneiden schmaler Ränder von vorgearbeiteten Flächen zur Herstellung sauberer und maßhaltiger Außen- und Innenformen. [33]

Zumeist ist das Nachschneiden dem Normalschneidprozess als Nachbearbeitungsschritt angegliedert. Zunächst wird die Kontur durch konventionelles Scherschneiden, reduziert um die Nachschneidzugabe, vorgeschritten. Im nächsten Schritt erfolgt das Nachschneiden. In dem Folgeprozess wird mit einem um die Nachschneidzugabe größeren Aktivelement die Werkstoffzugabe abgetrennt. Der dabei entstehende Abfall besitzt gegenüber dem konventionellen Scherschneiden eine geringere Steifigkeit, so dass die Spannungen im Werkstoff positiv beeinflusst werden und bessere Schnittflächenqualitäten erzeugt werden können. [54]

Der Aufbau eines Nachschneidwerkzeuges entspricht im Wesentlichen dem Aufbau eines Scherschneidwerkzeuges. Für den Fall eines Folgeverbundwerkzeuges ist eine weitere Stufe notwendig. Sofern ein einstufiges Scherschneidwerkzeug für die vorhergehende Operation bereits genutzt wurde sind lediglich veränderte Aktivelemente nötig.

Der Aufbau eines Nachschneidwerkzeuges, beziehungsweise einer Nachschneidstufe für eine geschlossene Schnittlinie wird in Abbildung 2.20 gezeigt.

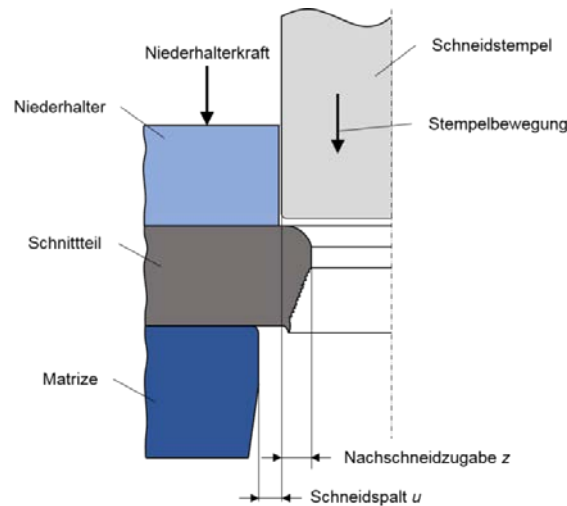


Abbildung 2.20: Arbeitsprinzip des Nachschneidens

Neben dem Schneidspalt  $u$  der, wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, einen großen Einfluss auf die resultierende Schnittflächenqualität hat, wird der Nachschneidprozess von einer weiteren Prozessgröße, der Nachschneidzugabe  $z$ , beeinflusst. Sie definiert die Breite des Streifens, der entlang der vorgeschrittenen Kontur nachgeschnitten wird. Abbildung 2.20 verdeutlicht beide für die Nachschneideoperation relevanten Prozessgrößen. Beide Parameter können auch als relative Größen auf die Blechdicke  $s$  bezogen werden. [54], [55]

Neben dem Aufbau ist auch der Ablauf des Nachschneideprozesses dem des Scherschneidens sehr ähnlich. Die einzelnen Phasen des Schneidprozesses (vgl. Kapitel 2.7.2) unterscheiden sich lediglich anhand veränderter Spannungszustände. Durch die schmale Nachschneidzugabe und die daraus resultierende geringere Steifigkeit des Abfalls kommt es zu einem früheren Einsetzen der dritten Phase, der plastischen Verformung des Werkstoffes sowie zu einem späteren Beginn der sechsten Phase, der Werkstofftrennung. [54]

Aufgrund der veränderten Steifigkeit des Butzens im Fall des Nachschneidens kann die Berechnung der Schneidkraft nicht nach Formel (2.26) erfolgen.

Die für den Nachschneideprozess geltende Schneidkraft setzt sich aus der reinen Schneidkraft  $F_{NS}$  und der Reibkraft  $F_{NR}$  zusammen.

$$F_{SN,max} = F_{NS} + F_{NR} \quad (2.27)$$

mit

$F_{SN,max}$  maximale Schneidkraft für den Nachschneidprozess [N]

$F_{NS}$  Schneidkraft [N]

$F_{NR}$  Reibkraft [N]

In Abbildung 2.21 sind die einflussnehmenden Kräfte dargestellt.

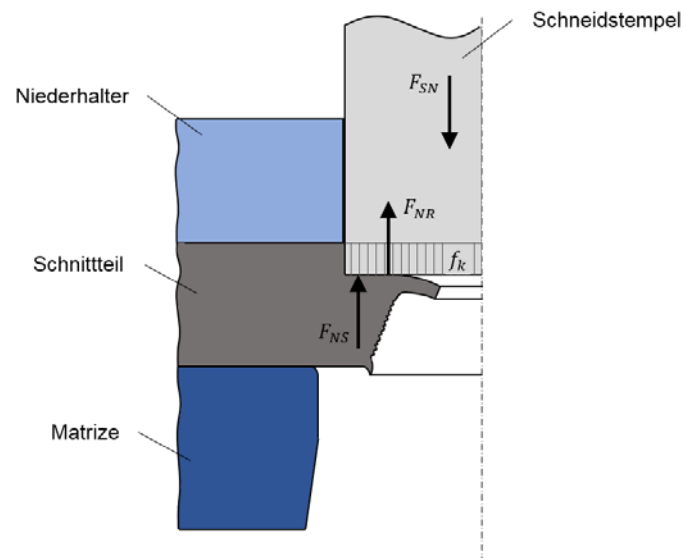


Abbildung 2.21: Kräfte beim Nachschneiden nach [54]

Die Schneidkraft für Nachschneidoperationen lässt sich nach [56] wie folgt berechnen:

$$F_{NS} = z \cdot l \cdot k_N \quad (2.28)$$

mit

- $z$  Nachschneidzugabe [mm]
- $l$  Konturumfang [mm]
- $k_N$  Spezifischer Schneidanteil [N/mm<sup>2</sup>]

Der spezifische Schneidanteil ist von der Nachschneidzugabe abhängig. Er steigt mit abnehmender Nachschneidzugabe progressiv an (siehe Abbildung 2.22).

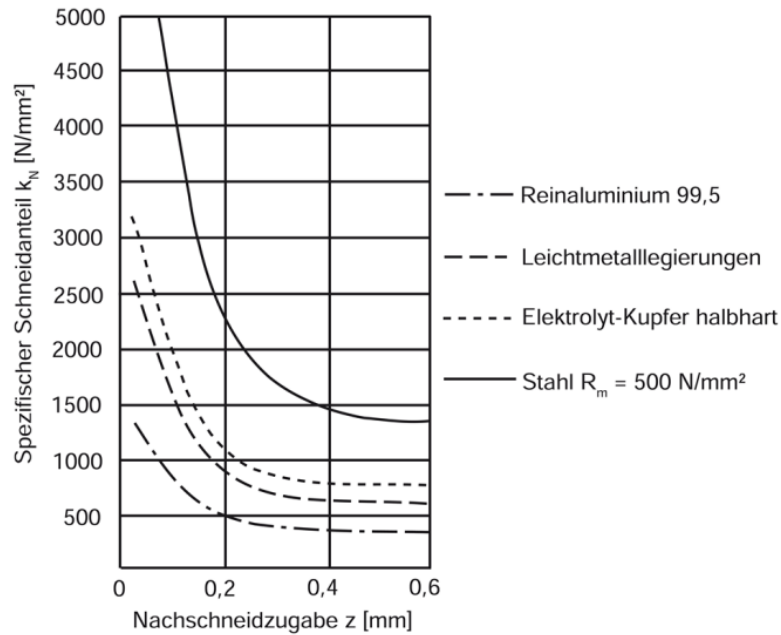


Abbildung 2.22: Richtwerte für den spezifischen Schneidanteil  $k_N$  in Abhängigkeit von der Nachschneidzugabe  $z$  aus [38]

Die Reibkraft kann mit Hilfe nachfolgender Formel bestimmt werden:

$$F_{NR} = f_R \cdot p_{NR} = s \cdot l \cdot p_{NR} \quad (2.29)$$

mit

$f_R$  Reibfläche [mm<sup>2</sup>]

$s$  Blechdicke [mm]

$p_{NR}$  Spezifische Reibkraft [N/mm<sup>2</sup>]

Die spezifische Reibkraft beträgt für den Fall, dass Gleitreibung herrscht, zwischen 10 und 50 N/mm<sup>2</sup>, bei Haftreibung bis zu 30 N/mm<sup>2</sup>. Das Nachschneiden von Außenformen ist im Gegensatz zu Innenformen in der Regel mit einer größeren spezifischen Reibkraft verbunden. [54]

Die resultierenden Schnittflächen lassen sich anhand derselben Kenngrößen charakterisieren, wie sie bereits in Kapitel 2.7.3 beschrieben wurden. Durch den Nachschneidprozess jedoch ist der Glattschnittwinkel nahezu rechtwinklig. Des Weiteren lassen sich höhere Glattschnittanteile realisieren, als es für den Normalschneidprozess der Fall ist.



### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Methoden und Konzepte zur Berücksichtigung der Stützwirkung

##### 3.1.1 Stützwirkungsmodell nach Siebel und Stieler

Das Stützwirkungsmodell nach Siebel und Stieler [57] nutzt den bezogenen Spannungsgradienten als Maß für die Stützwirkung. Der bezogene Spannungsgradient  $\chi^*$  beschreibt den Spannungsabfall am Ort der maximalen Beanspruchung  $\sigma_{max}$  und ist von der Kerbschärfe und der Beanspruchungsart abhängig. In Abbildung 3.1 wird der Zusammenhang zwischen Spannungsgradient, maximaler Beanspruchung und Kerbradius schematisch dargestellt. Für einfache Kerbgeometrien kann  $\chi^*$  analytisch anhand von Formeln bestimmt werden. Bei komplexeren Geometrien wird  $\chi^*$  in der Regel numerisch bestimmt. In der Literatur wird der bezogene Spannungsgradient oftmals auch mit  $\bar{G}_\sigma$  statt mit  $\chi^*$  bezeichnet.

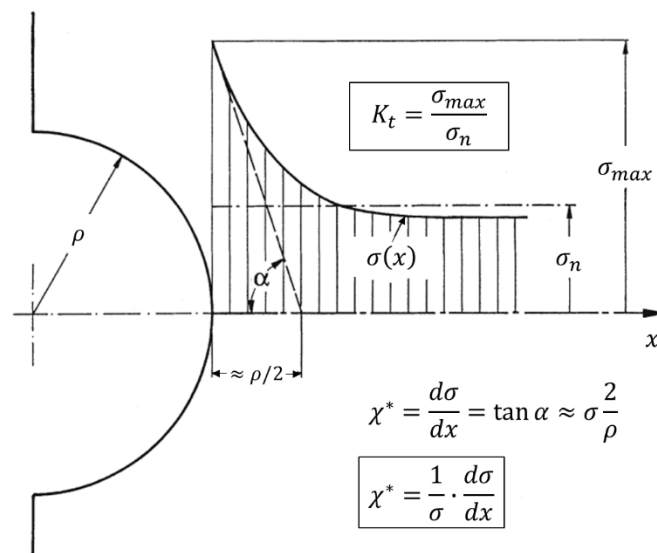


Abbildung 3.1: Definition der Kerbformzahl und des bezogenen Spannungsgradienten  $\chi^*$  nach [3]

Nach dem Verfahren von Siebel und Stieler ist nicht die maximale Spannung an der höchstbeanspruchten Stelle für die Schwingfestigkeit maßgebend, sondern die Spannung die in einer bestimmten Entfernung vom Kerbgrund im Material auftritt. Diese Entfernung vom Kerbgrund wird als Gleichschichtbreite  $s_g$  bezeichnet und ist werkstoffabhängig. Die Stützzahl  $n$  berechnet sich zu:

$$n = 1 + \sqrt{s_g \cdot \chi^*} \quad (3.1)$$

Das Verfahren zählt nach [2] zu den Spannungsgradientenansätzen und wurde vielfach weiterentwickelt. In der ursprünglichen oder einer abgeänderten Form ist es heute in vielen Regelwerken enthalten, unter anderem in der deutschen FKM-Richtlinie [58]. Bei der Stützzahl in [58] wird die Gleitschichtdicke  $s_g$  durch eine Korrelation mit der Zugfestigkeit  $R_m$  des Werkstoffs in Abhängigkeit des Spannungsgradienten ersetzt:

$$\text{Für } \chi^* \leq 0,1 \text{ mm}^{-1}: \quad n_\sigma = 1 + \chi^* \cdot \text{mm} \cdot 10^{-(a_G - 0,5 + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}})} \quad (3.2)$$

$$\text{Für } 0,1 \text{ mm}^{-1} < \chi^* \leq 1 \text{ mm}^{-1}: \quad n_\sigma = 1 + \sqrt{\chi^* \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}})} \quad (3.3)$$

$$\text{Für } 1 \text{ mm}^{-1} < \chi^* \leq 100 \text{ mm}^{-1}: \quad n_\sigma = 1 + \sqrt[4]{\chi^* \cdot \text{mm}} \cdot 10^{-(a_G + \frac{R_m}{b_G \cdot \text{MPa}})} \quad (3.4)$$

Die Werkstoffkonstanten  $a_G$  und  $b_G$  werden in [58] für Stahl (ausgeschlossen: nichtrostender Stahl und Stahlguss) mit  $a_G = 0,5$  und  $b_G = 2700$  angegeben.

Bei der Anwendung des Konzepts ist zu beachten, dass es sich um ein rein empirisches Konzept handelt, welches auf den Ergebnissen von Schwingfestigkeitsversuchen an unterschiedlich stark gekerbten Rundproben basiert. Des Weiteren wird mit dem Konzept nur der spannungsmechanische Größeneinfluss nach [9] berücksichtigt, der statistische Größeneinfluss bleibt unberücksichtigt, siehe Kapitel 2.3.

### 3.1.2 Mikrostützwirkung nach Neuber

Das Mikrostützwirkungsmodell nach Neuber [6] wird nach [2] zu den Spannungsmittelungsansätzen gezählt. Demnach ist nicht die Maximalspannung im Kerbgrund für das Schwingfestigkeitsversagen maßgebend, sondern die Spannung, welche sich als Mittelwert über einer fiktiven Ersatzstrukturlänge  $\rho^*$  des Spannungsverlaufs senkrecht zum Kerbgrund berechnen lässt, siehe Abbildung 3.2. Die Ersatzstrukturlänge stellt dabei eine werkstoffspezifische Größe dar. In [6] sind Werte für Stähle, Stahlguss und Aluminium-Legierungen in Abhängigkeit der Streckgrenze des Werkstoffs angegeben. Nach Neuber wird der vorliegende Kerbradius  $\rho$  additiv um  $s \cdot \rho^*$  vergrößert und somit eine weniger scharfe Kerbe angenommen. Die Stützzahl  $n$  beschreibt das Verhältnis von der Maximalspannung zum wirksamen gemittelten Spannungswert und berechnet sich zu:

$$n = \sqrt{1 + \frac{s \cdot \rho^*}{\rho}} \quad (3.5)$$

Der Faktor  $s$  wird in [2] in Abhängigkeit von der Festigkeitshypothese und des Mehrachsigengrads angegeben.

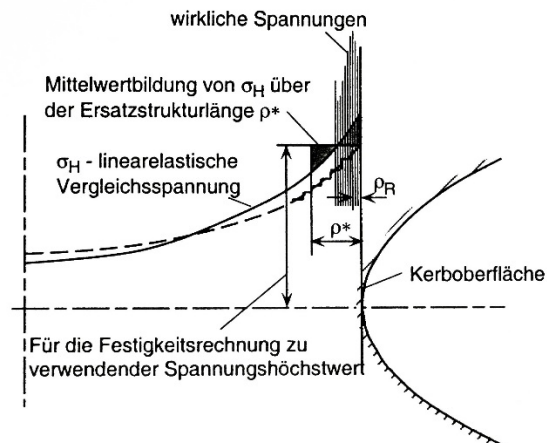


Abbildung 3.2: Mikrostützwirkungsmodell nach Neuber [10]

Wie in Kapitel 2.2 bereits beschrieben, wird bei dem Modell der Mikrostützwirkung nach Neuber davon ausgegangen, dass es bei steilen Spannungsgradienten im Kerbgrund zu Lastübertragungen zwischen mikroskopisch kleinen Stoffteilchen oder Bereichen kommt, die von der Elastizitätstheorie nicht berücksichtigt werden. Diese Grundidee der Theorie zur Mikrostützwirkung nach Neuber wird von vielen Autoren aufgegriffen und zur Ableitung ähnlicher Stützwirkungskonzepte verwendet. Mit dem Mikrostützwirkungsmodell wird wie beim Stützwirkungsmodell nach Siebel und Stieler (Kapitel 3.1.1) nur der spannungsmechanische Größeneinfluss berücksichtigt, der statistische Größeneinfluss bleibt unberücksichtigt.

### 3.1.3 Makrostützwirkung nach Neuber

Kommt es im Kerbgrund zu überelastischer Beanspruchung, so ist die örtliche elastisch-plastische Beanspruchung kleiner als mit dem Hookeschen Gesetz nach der linearen Elastizitätstheorie angenommen wird. Dieser Effekt wird von Neuber als Makrostützwirkung bezeichnet. Die Makrostützwirkung unterscheidet sich gedanklich von dem im vorherigen Kapitel 3.1.2 beschriebenen Modell der Mikrostützwirkung, indem nicht einzelne mikroskopische Stoffteilchen, sondern ganze makroskopische Materialbereiche an der stützenden Lastumlagerung beteiligt werden. Die Makrostützwirkung bei örtlicher elastisch-plastischer Beanspruchung kann beispielsweise mit dem in Kapitel 2.5.1.6 beschriebenen Kerbnäherungsverfahren nach Neuber

berücksichtigt werden. Wird also eine elastisch-plastische Berechnung wie mit dem Örtlichen Dehnungskonzept durchgeführt, so wird die Makrostützwirkung bereits automatisch bei der Ermittlung der lokalen Beanspruchung im Kerbgrund berücksichtigt und darf nicht ein zweites Mal in den Berechnungsprozess mit einbezogen werden. Die von Neuber beschriebene Makrostützwirkung ist unabhängig von der Probengröße und hat somit nichts mit den von Kloos [9] in Kapitel 2.3 beschriebenen Größeneinflüssen zu tun.

### 3.1.4 Fehlstellenmodell

Das Fehlstellenmodell, auch als Weakest-Link-Modell bekannt, wurde von Weibull für die statistische Beschreibung von Zugfestigkeiten entwickelt. Mit dem Modell wird angenommen, dass mögliche Versagensorte in Form von Fehlstellen gleichmäßig über das Werkstoffvolumen oder die Werkstoffoberfläche verteilt sind und entsprechend mit dem Probenvolumen auch die Anzahl der möglichen Versagensorte ansteigt. Nach der Modellvorstellung besitzt eine Probe mit großem Volumen daher eine kleinere Überlebenswahrscheinlichkeit als eine ansonsten geometrisch identische Probe mit kleinerem Volumen bei gleicher Beanspruchung [2].

Das Fehlstellenmodell wurde von Heckel, Köhler und Böhm (in [59], [60] und [61]) für die Berücksichtigung des statistischen Größeneinflusses bei schwingender Beanspruchung verwendet, unter der Annahme eines örtlichen Anrisses und einer Rissausbreitung ohne makroskopische plastische Verformung im Bereich der sogenannten Dauerfestigkeit. Bei dem entwickelten Stützwirkungsmodell wird davon ausgegangen, dass der Anriss von der Bauteil- bzw. Probenoberfläche ausgeht. Die statistische Stützzahl  $n_{st}$  berechnet sich daher aus einem Vergleich zwischen der höchstbeanspruchten Oberfläche einer Bezugsprobe  $A_{Ref}$  und der höchstbeanspruchten Oberfläche eines Bauteils  $A$  wie folgt:

$$n_{st} = \left( \frac{A_{Ref}}{A} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (3.6)$$

Der Weibullexponent  $\kappa$  stellt ein Maß für die Streuung der Ergebnisse aus den Schwingfestigkeitsversuchen an der Bezugsprobe dar. Je nachdem ob es sich bei dem betrachteten Werkstoff um Stahl, Aluminiumknetlegierungen oder Aluminiumgusslegierungen handelt wird in [58]  $\kappa = 30, 20$  oder  $10$  festgelegt. In [62] wird beschrieben, wie  $\kappa$  aus der Streuung von den dehnungskontrollierten Einstufenversuchen zur Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie ermittelt werden kann. Die statistische Stützzahl ist demnach nicht alleine von dem Verhältnis der höchstbeanspruchten Werkstoffbereiche abhängig, sondern außerdem von der Streuung der

Versuchsergebnisse der Bezugsprobe. Mit zunehmender Streuung wird  $\kappa$  kleiner und somit  $n_{st}$  größer.

Die höchstbeanspruchten Oberflächen berechnen sich aus dem zweidimensionalen SpannungsinTEGRAL  $I$  der Bezugsprobe beziehungsweise des Bauteils bezogen auf die Maximalspannung  $\sigma_{max}$  [2]:

$$I = \int_A \left[ \frac{\sigma(x, y)}{\sigma_{max}} \right]^\kappa dA \quad (3.7)$$

Bei inhomogener Spannungsverteilung und komplexer Bauteilgeometrie muss die höchstbeanspruchte Oberfläche in der Regel numerisch bestimmt werden.

Bei dem volumetrischen Ansatz des Fehlstellenmodells von Kuguel [63] werden unter der Annahme, dass der Ermüdungsriss unter schwingender Beanspruchung auch unter der Oberfläche beginnen kann, anstelle der höchstbeanspruchten Oberflächen die höchstbeanspruchten Volumina ins Verhältnis gesetzt. Dafür wird das SpannungsinTEGRAL nicht über die Oberfläche wie in Gleichung (3.7) ausgewertet, sondern über das Volumen:

$$I = \int_V \left[ \frac{\sigma(x, y, z)}{\sigma_{max}} \right]^\kappa dV \quad (3.8)$$

Als höchstbeansprucht wird dabei das Volumen definiert, welches mit über 95 % der Maximalspannung beansprucht wird. Sonsino griff den Ansatz von Kuguel in [64] auf und entwickelte ihn weiter. Aufgrund von Erfahrungswerten setzte er die Grenze des höchstbeanspruchten Volumens auf 90 % der Maximalspannung herab. Die statistische Stützzahl, die den Zusammenhang zwischen den ertragbaren Spannungsamplituden bei  $N = 5e6$  Schwingspielen sowie zwischen den höchstbeanspruchten Volumina von Bezugsprobe und Bauteil beschreibt, wird analog zu Gleichung (3.6) wie folgt definiert:

$$n_{st} = \frac{\sigma_{90\%}}{\sigma_{Ref,90\%}} = \left( \frac{V_{Ref,90\%}}{V_{90\%}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (3.9)$$

Die Tiefe  $t_{0,9}$  des höchstbeanspruchten Volumens im Kerbgrund kann mit dem bezogenen Spannungsgradienten  $\chi^*$  beschrieben werden:

$$t_{0,9} = \frac{0,1}{\chi^*} \quad (3.10)$$

Es besteht demnach eine direkte Verbindung zu den Gradientenverfahren, mit welchen der spannungsmechanische Größeneinfluss berücksichtigt wird. Anhand von Gleichung (3.10) lässt sich erkennen, dass mit steigender Kerbschärfe und somit größerem Spannungsgefälle  $\chi^*$  die Tiefenausweitung des höchstbeanspruchten Volumens  $t_{0,9}$  sinkt. Daraus folgt ein kleineres höchstbeanspruchtes Bauteilvolumen  $V_{90\%}$ , was wiederum bei Betrachtung von (3.9) zu einer Vergrößerung der statistischen Stützzahl führt, wenn das höchstbeanspruchte Bezugsvolumen  $V_{Ref,90\%}$  konstant bleibt. Der Effekt einer steigenden Stützwirkung bei schärferen Kerben ist derselbe wie bei dem Gradientenverfahren nach Siebel und Stieler. Das zeigt, dass mit dem vorgestellten Werkstoffvolumenansatz sowohl der statistische als auch der spannungsmechanische Größeneinfluss berücksichtigt wird [2].

### 3.1.5 Stützwirkungsmodell nach Liu und Zenner

Das Stützwirkungsmodell von Liu und Zenner [65] folgt der Grundidee von Neuber, dass sich bei inhomogener Spannungsverteilung die Stützzahl aus einem Produkt von Makro- und Mikro-stützzahl berechnen lässt. Auf gleiche Weise vereinen Liu und Zenner in ihrem Modell daher die spannungsmechanische  $n_{sm}$  und die statistische Stützzahl  $n_{st}$ :

$$n = n_{sm} \cdot n_{st} \quad (3.11)$$

Die spannungsmechanische Stützzahl  $n_{sm}$  wird infolge der Makrostützwirkung bei elastisch-plastischer Wechselverformung im Kerbgrund angenommen (siehe Abbildung 3.3) und kann für den Fall einer rein elastischen dauerfest ertragbaren Nennspannungsamplitude im Kerbgrundquerschnitt wie folgt berechnet werden:

$$n_{sm} = \frac{K_t \cdot S_{aD}}{\sigma_{aD}} = \left[ 1 + \frac{E \varepsilon_{apW}}{\sigma_W} n_{st}^{\frac{1}{n'} - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

Für den Grenzfall einer glatten oder schwach gekerbten Probe kann die allgemeine Neuber-Formel in Gleichung (2.21) verwendet werden. In weiterentwickelten Ansätzen, die auf dem Stützwirkungsmodell von Liu und Zenner basieren, wird der spannungsmechanische Anteil auch

als verformungsmechanische Stützzahl bezeichnet, um Verwechslungen mit dem spannungsmechanischen Größeneinfluss nach Kloos (Kapitel 2.3) zu vermeiden.

Die statistische Stützwirkung wird mit dem Fehlstellenmodell nach Gleichung (3.6) berechnet. Auf diese Weise wird die Ausbreitung der höchstbeanspruchten Oberfläche (siehe Kapitel 3.1.4) im Kerbgrund berücksichtigt. Bei der Betrachtung der Stützwirkung nach dem vorgestellten Modell wird von einer plastischen Wechselverformung im Kerbgrund in Höhe der Dauerfestigkeit ausgegangen [10]. In Abbildung 3.3 wird das Stützwirkungsmodell nach Liu und Zenner im zyklischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm veranschaulicht.

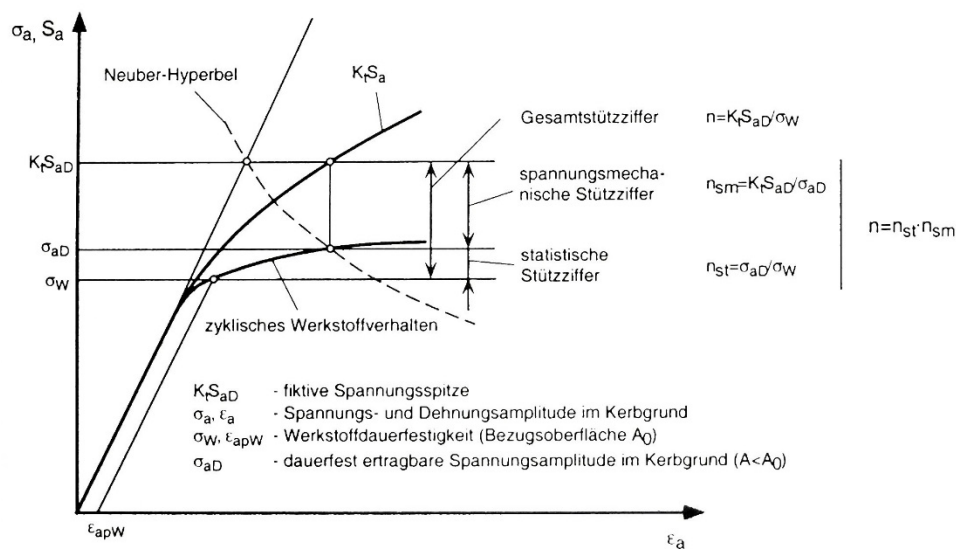


Abbildung 3.3: Stützwirkungsmodell nach Liu und Zenner [65]

Mit dem vorgestellten Modell kann der Grenzfall von ungekerbten glatten Proben oder Bauteilen berücksichtigt werden, jedoch nicht der Grenzfall sehr scharfer Kerben. Daher erweiterte Liu das Modell in [10] um eine dritte bruchmechanische Stützzahl  $n_{bm}$ , mit der dieser Grenzfall abgebildet werden kann:

$$n = n_{sm} \cdot n_{st} \cdot n_{bm} \quad (3.13)$$

Die bruchmechanische Stützzahl wird damit begründet, dass der Ermüdungsriss in Werkstoffbereichen in welchen ein Spannungsgefälle vorliegt langsamer wächst als in homogen beanspruchten Werkstoffbereichen. Die bruchmechanische Stützzahl ist Gegenstand aktueller Forschung. Nach [66] berechnet sich die bruchmechanische Stützzahl  $n_{bm}$  für Stahl in Abhängigkeit der Zugfestigkeit  $R_m$  und dem bezogenen Spannungsgefälle  $\bar{G}$  wie folgt:

$$n_{bm} = \frac{5 + \sqrt{\chi^* [mm]}}{5 \cdot n_{st} + \frac{R_m}{430 \text{ MPa}} \cdot \sqrt{\frac{15 + 2\sqrt{\chi^* [mm]}}{5 + \sqrt{\chi^* [mm]}}} \quad (3.14)$$

Auf diese Weise steht ein Stützwirkungsmodell zur Verfügung, mit welchem sowohl der spannungsmechanische als auch der statistische Größeneinfluss für die Grenzfälle einer glatten ungekerbten Probe und einer scharfen Kerbe berücksichtigt werden kann. Das Stützwirkungsmodell nach Liu (Gleichung (3.13)) wurde neben dem Gradientenansatz von Siebel und Stieler in der aktuellen Ausgabe der FKM-Richtlinie [58] als Stützwirkungsmodell mit aufgenommen. Darin wird die spannungsmechanische Stützzahl als verformungsmechanische Stützzahl  $n_{vm}$  bezeichnet. Die bruchmechanische Stützzahl  $n_{bm}$  berechnet sich entsprechend zu:

$$n_{bm} = \frac{1}{\frac{n_{vm} \cdot n_{st}}{K_t} + \sqrt{\frac{2 - 3 \cdot K_t^{-1} + K_t^{-3}}{4 \cdot \chi^* \cdot a^*}}} \quad (3.15)$$

Darin beschreibt  $a^*$  die Mikrostrukturlänge und kann für Stahl aus einer Korrelation mit der Zugfestigkeit  $R_m$  bestimmt werden:

$$a^* = 0,1 \text{ mm} \cdot \left( \frac{680 \text{ MPa}}{R_m} \right)^2 \quad (3.16)$$

Die bruchmechanische Stützzahl darf für den Fall  $n_{bm} < 1$  nicht weiter berücksichtigt werden, beziehungsweise wird zu  $n_{bm} = 1$  gesetzt.

### 3.1.6 Berücksichtigung der Stützwirkung im Örtlichen Dehnungskonzept

In [11] werden zwei Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Mikrostützwirkung bei einer rechnerischen Lebensdaueranalyse mit dem Örtlichen Dehnungskonzept aufgezeigt. So kann die Beanspruchbarkeit erhöht werden, indem die Werkstoffwöhlerlinie in Form der Schädigungsparameterwöhlerlinie (Abbildung 2.5, R3) um die Stützzahl  $n$  in Lastrichtung verschoben wird, siehe Abbildung 3.4.



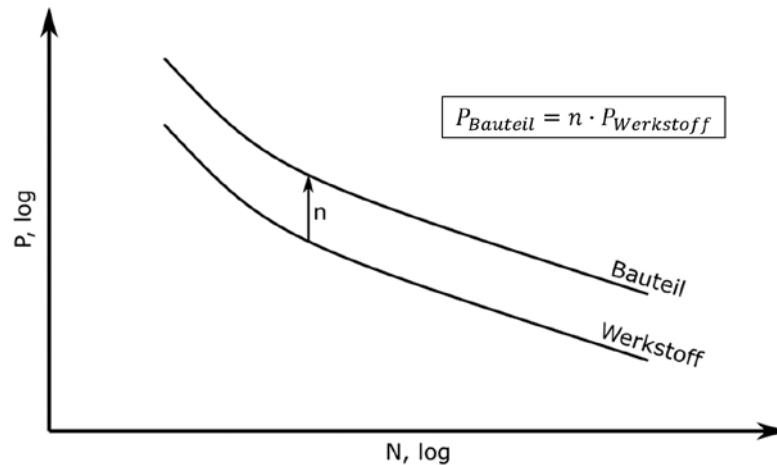


Abbildung 3.4: Verschieben der Schädigungsparameterwöhlerlinie um die Stützzahl  $n$

Die zweite Möglichkeit beschreibt eine Berücksichtigung der Stützwirkung auf der Beanspruchungsseite, indem bei der Ermittlung der örtlichen Beanspruchung mit einem Last-Kerbdehnungs-Näherungsverfahren (Abbildung 2.5, B3 und B4) nicht die Kerbformzahl  $K_t$  verwendet wird, sondern die dynamische Kerbwirkungszahl  $K_f$  (siehe Kapitel 2.2). Mit Gleichung (2.5) kann  $K_f$  auch aus der Kerbformzahl und einer Stützzahl  $n$  ermittelt werden. Beide Varianten führen quantitativ zu denselben Berechnungsergebnissen.

Bei der Verwendung der Stützzahl nach Gleichung (3.13) ist darauf zu achten, dass die spannungsmechanische beziehungsweise verformungsmechanische Stützzahl nicht mit einbezogen werden darf. Mit dem verformungsmechanischen Anteil wird eine Makrostützwirkung angenommen welche beim örtlichen Dehnungskonzept bereits bei der Ermittlung der örtlichen Spannungen und Dehnungen (Abbildung 2.5 B4 und Kapitel 2.5.1.6) berücksichtigt wird.

Mit den vorgestellten Varianten wird eine konstante Stützwirkung über den gesamten Beanspruchungsbereich von Dauerfestigkeit über HCF- bis LCF-Bereich angenommen. Dies ist als kritisch zu betrachten, da die Mikrostützwirkung bekanntermaßen von der Beanspruchungshöhe abhängig ist, [67], [68], [69], und die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Stützwirkungsmodelle sich nur auf den Bereich der Dauerfestigkeit beziehen. Bei hohen Beanspruchungen im LCF-Bereich kann es sein, dass eine als konstant angenommene Stützzahl zu groß ist und es so zu nicht-konservativen Ergebnissen bei der Lebensdauerabschätzung kommt.

### 3.2 Oberflächeneinfluss

Jedes Fertigungsverfahren erzeugt in Abhängigkeit der Fertigungsparameter eine charakteristische Randschicht, die sich durch eine bestimmte Kombination von Oberflächentopographie sowie Gefüge- und Eigenspannungszustand auszeichnet [9]. Der Einfluss der Oberfläche lässt sich

demnach in drei Einflussgrößen unterteilen: Die Oberflächenrauheit, die Verfestigung der Randschicht aufgrund von mechanischen oder thermischen Energieeintrag bei der Fertigung sowie der Eigenspannungszustand in der Randschicht. Die genannten Einflussgrößen können gegensätzliche Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit haben. So entsteht ein komplexes Parameterfeld in Bezug auf den Schwingfestigkeitseinfluss, der eine getrennte Betrachtung der Einflussgrößen nahezu unmöglich macht.

So ist es beispielsweise nicht zielführend, das Schwingfestigkeitsverhalten laserstrahl- und schergeschnittener Proben aus demselben Werkstoff ausschließlich anhand der Oberflächenrauheit am Versagensort zu bewerten, da sich die Randschichten der beiden Fertigungsverfahren hinsichtlich des Werkstoffgefüges stark unterscheiden. Vielmehr ist eine ganzheitliche Betrachtung der Randschicht erforderlich, um ihre Auswirkung auf das Schwingfestigkeitsverhalten nachvollziehbar zu machen. Im Folgenden wird die Auswirkung der verschiedenen Kenngrößen auf das Schwingfestigkeitsverhalten beschrieben und zum Abschluss des Kapitels Varianten zu deren Berücksichtigung bei einer Lebensdauerberechnung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept vorgestellt.

### 3.2.1 Einfluss der Oberflächenrauheit

Bei Proben oder Bauteilen geht der Ermüdungsriß in der Regel von der Oberfläche aus. Dafür gibt es verschiedene Gründe. So liegt bei Strukturkerben die größte Beanspruchung im Kerbgrund an der Oberfläche vor und gleichzeitig fehlt an der Oberfläche die Dehnungsbehinderung durch den umgebenden Werkstoff. Der makroskopischen Betrachtung des Beanspruchungszustands aufgrund der Struktur überlagert sich an der Oberfläche der mikroskopische Einfluss in Form der Oberflächentopografie. Ein Kennwert zur Beschreibung der Oberflächentopographie ist die Rauheit. Es ist nachgewiesen, dass die Oberflächenrauheit einen entscheidenden Einfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten der Struktur haben kann [2], [3].

Das Oberflächenprofil kann auf mikroskopischer Ebene als eine Aneinanderreihung von Kerben betrachtet werden, die zu Spannungsüberhöhungen und Mikroplastizität in der Randschicht führen und somit im Vergleich zu einer polierten Oberfläche eine Abminderung der Schwingfestigkeit bewirken. Die Untersuchungen von Lehr [70] sowie von Siebel [71] und Gaier [72] haben gezeigt, dass der Oberflächeneinfluss von der Oberflächenrauheit, der Werkstofffestigkeit und der Beanspruchungsart abhängig ist. Bei der Beanspruchungsart wurde zwischen Axial- und Torsionsbeanspruchung unterschieden. Als Kennwert zur Beschreibung der Oberflächenrauheit hat sich die maximale oder gemittelte Rautiefe  $R_z$  [73] durchgesetzt. Mit wachsender Rautiefe steigen die mikroskopischen Spannungsüberhöhungen in der Randschicht an und dementsprechend auch der Oberflächeneinfluss. Aufgrund eines feinkörnigeren Gefüges sind hochfeste Stäh-

le empfindlicher in Bezug auf die Oberflächenrauheit. So nimmt der Oberflächeneinfluss im Allgemeinen mit steigender Zugfestigkeit  $R_m$  und sinkender Zähigkeit zu. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen von Siebel und Gaier wurde ein Oberflächenfaktor  $f_{R,\sigma}$  entwickelt, welcher die Schwingfestigkeit einer Probe oder eines Bauteils mit einer rauen Oberfläche gegenüber der Schwingfestigkeit einer Probe mit polierter Oberfläche abmindert. Für Stahl berechnet sich  $f_{R,\sigma}$  in Abhängigkeit der Zugfestigkeit  $R_m$  und der gemittelten Rautiefe  $R_z$  der Oberfläche senkrecht zur Hauptbelastungsrichtung wie folgt:

$$f_{R,\sigma} = 1 - 0,22 \cdot \lg\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot R_m}{400 \text{ MPa}}\right) \quad (3.17)$$

Der beschriebene Oberflächenfaktor wurde unter anderem in der FKM-Richtlinie [58] aufgenommen und gehört somit heute noch zum Stand der Technik bei der Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses.

Bei der Probenfertigung für die Untersuchungen von Siebel und Gaier lag aufgrund der damaligen Fertigungstechnik ein extremer Fertigungseinfluss vor, so dass mit dem Oberflächenfaktor der Oberflächeneinfluss zum Teil deutlich überschätzt wird [2]. Weiterhin wird kritisiert, dass die mittlere Rautiefe  $R_z$  alleine nicht ausreicht, um eine dreidimensionale Oberfläche hinsichtlich des Schwingfestigkeitseinflusses hinreichend gut zu beschreiben [69], [74], [75].

Die linear-elastische Bruchmechanik bietet neben der faktoriellen Abminderung der Dauerfestigkeit eine weitere Möglichkeit zur Berücksichtigung des Einflusses durch die Oberflächenrauheit, indem die Rautiefe als Anriss betrachtet wird [76]. In der linear-elastischen Bruchmechanik gilt ein Riss als wachstumsfähig, wenn eine kritische Anfangsrisslänge  $a^*$  bzw. der Schwellenwert  $\Delta K_0$  überschritten wird. Dabei stellt  $a^*$  eine werkstoffspezifische Größe dar, die auch als Eigenrisslänge bezeichnet wird. Zwischen der Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  und  $a^*$  sowie  $\Delta K_0$  besteht ein direkter Zusammenhang [76]:

$$\sigma_D = \frac{\Delta K_0}{2\sqrt{\pi a^*}} \quad (3.18)$$

Von Vormwald wird in [77] die Oberflächenrautiefe zur Eigenrisslänge hinzuaddiert und auf diese Weise die Dauerfestigkeit nach Gleichung (3.18) abgesenkt.

Liu bestätigt in [10] vorherige Untersuchungen von Syren [75], wonach die Dauerfestigkeit neben der Rautiefe auch vom Gesamtprofil der Oberfläche beeinflusst wird. In [10] stellt er eine

Oberflächenkerbformzahl  $\alpha_{ko}$  vor, mit welcher der Oberflächeneinfluss auf die Dauerfestigkeit aus kerbmechanischer Sicht betrachtet wird. Neben der Rautiefe wird mit  $\alpha_{ko}$  außerdem das Verhältnis von Kerbtiefe zu Kerbradius sowie von Kerbbreite zu Kerbabstand berücksichtigt. Auf diese Weise schließt er in seine Oberflächenbetrachtung einen Entlastungseffekt mit ein, der durch eine mehrfache Aneinanderreihung von Kerben entsteht.

### 3.2.2 Einfluss der Oberflächenverfestigung

Eine Verfestigung der Oberfläche beziehungsweise des Randschichtgefüges hinter der bearbeiteten Oberfläche kann entweder als unvermeidbare Begleiterscheinung infolge des Fertigungsprozesses auftreten oder gezielt eingebracht werden um die Festigkeitseigenschaften positiv zu beeinflussen. Eine plastische Verformung des Randschichtgefüges durch einen mechanischen Energieeintrag wird als Kaltverfestigung bezeichnet. Durch das Auseinanderziehen oder Zusammendrücken des Werkstoffgefüges entstehen lokal Zug- oder Druckeigenspannungen, die sich je nach Vorzeichen negativ oder positiv auf das Schwingfestigkeitsverhalten der Randschicht auswirken. Typische Verfahren die angewendet werden, um über eine Kaltverfestigung gezielt Druckeigenspannungen in die Randschicht einzubringen und so die Schwingfestigkeit des Bauteils zu erhöhen, sind das Kugelstrahlen oder das Festwalzen.

Beim Scherschneiden wird das Randschichtgefüge an der Schnittkante ebenfalls stark verfestigt. Dabei kann sich die Kaltverfestigung mit steigender Werkstofffestigkeit negativ auf die Restumformbarkeit des Bauteils bei einem folgenden Umformprozess auswirken. Wie stark ein Werkstoff von diesem Phänomen betroffen ist, beschreibt dessen Kantenrissempfindlichkeit oder -sensitivität und ist neben dem Werkstoff von den Fertigungsparametern beim Scherschneiden abhängig [78], [35], [79]. Es wird vermutet, dass sich die verminderte Umformbarkeit beziehungsweise die Kaltverfestigung der Randschicht auch auf das Schwingfestigkeitsverhalten auswirkt. Ein möglicher Zusammenhang wird im vorliegenden Vorhaben untersucht.

Mit thermischen Verfahren kann die Randschicht gezielt gehärtet werden. Durch die Wärmebehandlung kommt es bei schneller Abkühlung und ausreichend hohem Kohlenstoffgehalt zu einer Phasenumwandlung von austenitischem in martensitisches Gefüge [2]. Das martensitische Gefüge der Randschicht hat ein größeres spezifisches Volumen als das Grundgefüge. Durch die Ausdehnungsbehinderung durch das umgebende Grundgefüge kommt es in der Randschicht zu Druckeigenspannungen. Das martensitische Gefüge und die entstehenden Druckeigenspannungen führen zu einer deutlichen Verbesserung der Schwingfestigkeit. Typische Verfahren zur Oberflächenhärtung sind das Einsatzhärten und Laserstrahlhärten.

Eine weitere Möglichkeit der Oberflächenhärtung bieten die thermochemischen Verfahren wie beispielsweise das Aufkohlen oder Nitrieren. Beim Aufkohlen wird zum Beispiel die Randschicht eines ferritischen Stahls mit Kohlenstoff angereichert, um eine Martensitbildung in der Randschicht zu ermöglichen. Auf diese Weise können Bauteile mit einem weichen ferritischen Kern und einer harten martensitischen Randschicht hergestellt werden.

Wie stark das Schwingfestigkeitsverhalten durch eine Kaltverfestigung oder Härtung der Randschicht beeinflusst wird, ist von dem Höchstwert der Eigenspannungen beziehungsweise der Härte und von der Tiefenausprägung des verfestigten Bereichs abhängig. Nach der FKM-Richtlinie [58] kann der Einfluss einer verfestigten Randschicht auf die Dauerfestigkeit eines Bauteils mit einem Randschichtfaktor berücksichtigt werden. Der Randschichtfaktor  $K_V$  lässt sich demnach in Abhängigkeit des Werkstoffs, der Geometrie und des Fertigungsverfahrens bestimmen.

### 3.2.3 Berücksichtigung des Oberflächeneinfluss im Örtlichen Dehnungskonzept

In [11] werden verschiedene Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses bei einer rechnerischen Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept beschrieben. Einige davon sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Kennwertermittlung mit Proben durchzuführen, an welchen der gleiche Oberflächenzustand wie am berechneten Bauteil vorliegt, stellt eine der Möglichkeiten dar. Soll zum Beispiel ein Bauteil berechnet werden, welches durch Laserstrahlschneiden hergestellt wird, so könnte man in diesem Fall die zyklischen Kennwerte an laserstrahlgeschnittenen Proben ermitteln. Stellt man sich die Anzahl an Kombinationen aus Werkstoffen und Oberflächenzuständen vor, so ist leicht zu erkennen, dass diese Variante aufgrund des immensen Versuchsaufwands in industriellem Umfeld nicht praktikabel ist.

Eine weitere Möglichkeit ist das sogenannte  $\kappa$ -P-Verfahren, wonach die Schädigungsparameterwöhlerlinie um den Faktor  $\kappa$  in Lastrichtung abgemindert wird. Dabei beschreibt  $\kappa$  das Verhältnis der Dauerfestigkeit von einer Probe mit rauher Oberfläche  $\sigma_{D,rau}$  zur Dauerfestigkeit einer Probe mit polierter Oberfläche  $\sigma_{D,poliert}$ :

$$\kappa = \frac{\sigma_{D,rau}}{\sigma_{D,poliert}} \quad (3.19)$$

Entsprechend kann  $\kappa$  auch durch den Oberflächenfaktor  $f_{R,\sigma}$  aus Gleichung (3.17) ersetzt werden. Bei einer konstanten Verschiebung der Schädigungsparameterwöhlerlinie, beruhend auf dem Oberflächeneinfluss im Dauerfestigkeitsbereich, kann es im LCF- und HCF-Bereich zu stark konservativen Lebensdauerabschätzungen kommen, da der Oberflächeneinfluss mit steigender Beanspruchung beziehungsweise steigendem plastischen Verformungsanteil sinkt. Dies kann mit einem sinkenden mikroskopischen Einfluss bei makroskopischer plastischer Verformung erklärt werden [2]. Außerdem wird das Oberflächenprofil aufgrund der plastischen Verformung eingeebnet, was zu einer sinkenden Rautiefe  $R_z$  führt. In [62] wurde unter anderem der Einfluss der Oberflächenrauheit auf die zyklischen Werkstoffkennwerte untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Oberflächenrauheit erst ab ca.  $N = 10^4$  Schwingspielen mit steigender Schwingspielzahl zunehmend auf den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie auswirkt. So führt eine rauere Oberfläche bei  $N = 10^4$  Schwingspielen zu einem „Ablösen der Dehnungswöhlerlinie“ von dem polierten Zustand hin zu einer niedrigeren Schwingfestigkeit.

Um den Oberflächeneinfluss seitens der Beanspruchung (siehe Abbildung 2.5) in die Lebensdauerabschätzung einfließen zu lassen, kann die lokale Beanspruchung um den Faktor  $K_f = 1/\kappa$  erhöht werden. Eine Erhöhung der lokalen Beanspruchung resultiert ebenfalls in einer niedrigeren Lebensdauer. Dieses Vorgehen wird nach [11] als  $K_f$ -Verfahren bezeichnet.

Des Weiteren kann der Oberflächeneinfluss berücksichtigt werden, indem ein bruchmechanisch begründeter Schädigungsparameter verwendet wird und die Rautiefe  $R_z$  zur Anfangsrislänge hinzuaddiert wird. Als Schädigungsparameter bietet sich beispielsweise der  $P_J$ -Parameter nach Vormwald [77] an.

### 3.3 Fertigungseinfluss

#### 3.3.1 Laserstrahlschneiden

Thermische Trennverfahren wie das Laserstrahlschneiden oder autogene Brennschneiden verursachen an der Schnittkante eine Wärmeeinflusszone aufgrund des hohen thermischen Energieeintrags. Das Gefüge in der Wärmeeinflusszone kann sich aufgrund von Phasenumwandlungen und Anlasseffekten zum Teil erheblich vom Gefüge des Grundwerkstoffs unterscheiden. Außerdem weist die Schnittkante thermischer Trennverfahren oft eine riefige oder wellige Oberflächenstruktur aus aufgeschmolzenem und erstarrtem Stahl auf. Der Zustand und die Ausbreitung der Wärmeeinflusszone sind neben den Fertigungsparametern vor allem vom bearbeiteten Werkstoff abhängig. In der Literatur existiert daher eine Vielzahl an Veröffentlichungen, die sich mit dem Fertigungseinfluss durch thermische Trennverfahren auf das Schwingfestigkeitsverhal-

ten von Stahl befassen. Dabei wird in der Regel eine Werkstoffabhängigkeit oder eine Abhängigkeit von den Fertigungsparametern untersucht. So wurde in [80] der Schwingfestigkeitseinfluss von autogenem Brennschneiden an hochfesten Feinkornbaustählen mit Streckgrenzen zwischen 350 und 900 MPa untersucht. Die Untersuchungen beziehen sich auf den Bereich des Stahlbaus sowie Kran- und Schiffsbau, dementsprechend hatten die gewalzten Werkstoffe eine Dicke von 15 mm. Gestützt wurden die Untersuchungen von Gefügeuntersuchungen sowie Oberflächen-, Mikrohärt- und Eigenspannungsmessungen. Es konnte festgestellt werden, dass es in der Randschicht im Bereich der Wärmeeinflusszone bei allen vier Werkstoffen durch das Brennschneiden zu Martensitbildung kommt. Die Breite des aufgehärteten Bereichs stieg mit zunehmender Werkstofffestigkeit von 0,2 auf 0,6 mm. Die Rauheit der Schnittkantenoberfläche lag bei allen Werkstoffen zwischen  $R_z = 40$  und  $50 \mu\text{m}$  und war damit kleiner als die Rauheit der reinigungsgestrahlten Walzoberfläche der Proben mit  $R_z = 70$  bis  $80 \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse der Untersuchungen ergaben, dass die Schwingfestigkeit der aufgehärteten Brennschnittfläche bei allen Werkstoffen höher ist als die der Walzoberfläche. Dementsprechend ist der versagenskritische Bereich unter schwingender Beanspruchung nicht die Brennschnittfläche, sondern die Oberfläche des Grundwerkstoffs. Das Brennschneiden hat somit keinen Einfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten der untersuchten Feinkornbaustähle. Begründet wurde die niedrigere Schwingfestigkeit der Walzoberfläche mit der höheren Oberflächenrauheit und vorhandenen Strukturfehlern wie beispielsweise tiefe Narben, Einschlüssen und der Randentkohlung während des Walzprozesses.

In [81] vergleicht der Autor die Schwingfestigkeit von laserstrahl- und plasmageschnittenen Proben mit der Schwingfestigkeit von gefrästen Proben. Die Proben wurden aus mikrolegiertem HSLA-Stahl mit Streckgrenzen von 240 bis 900 MPa gefertigt. Die Materialdicke betrug dabei zwischen 6 und 12 mm. Die Untersuchungsergebnisse zeigten keinen nennenswerten Einfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten durch die thermischen Trennverfahren gegenüber den gefrästen Proben. Es wird jedoch aufgezeigt, dass die Differenz zwischen der berechneten Schwingfestigkeit einer polierten Probe und der Schwingfestigkeit der gefrästen, laserstrahl- und plasmageschnittenen Proben mit steigender Streckgrenze des Werkstoffs zunimmt.

In [82] wird mit Wechselbiegeversuchen die Schwingfestigkeit von wasserstrahl- und laserstrahlgeschnittenen Proben mit der Schwingfestigkeit von gefrästen Proben verglichen. Untersucht wurden dabei die zwei Komplexphasenstähle CP960 und CP1100 und die drei kaltumgeformten austenitischen Stähle 2H+C700, 2H+C850 und 2H+C1000. Die Materialdicke betrug zwischen 3 und 4 mm und die Zugfestigkeiten der Stähle lagen zwischen 850 und 1250 MPa. Die laserstrahlgeschnittenen Proben wurden mit einem CO<sub>2</sub>-Laser bei einer Leistung von 4000 Watt hergestellt. Im Fall der Komplexphasenstähle zeigten die laserstrahlgeschnittenen Proben einen

Schwingfestigkeitsabfall von ca. 40 % gegenüber den gefrästen Proben. Wohingegen bei den wasserstrahlgeschnittenen Proben kein Abfall der Schwingfestigkeit festgestellt werden konnte, obwohl die Oberflächenrauheit an der Schnittkantenfläche größer als bei den laserstrahlgeschnittenen Proben war. Die laserstrahlgeschnittenen austenitischen Stähle wiesen sogar einen Schwingfestigkeitsabfall von bis zu 62 % auf. Bei den Komplexphasenstählen führte das Laserstrahl-schneiden zu einer 82 bis 92  $\mu\text{m}$  breiten Wärmeeinflusszone, deren Gefüge gegenüber dem Grundgefüge um 8 bis 15 % härter war. Die austenitischen Stähle wiesen eine 100 bis 168  $\mu\text{m}$  breite Wärmeeinflusszone auf und einen Härteabfall von 21 bis 23 % gegenüber dem Grundgefüge.

Bei den Untersuchungen in [83] wurde neben dem Fertigungseinfluss durch Laserstrahl-schneiden und Scherschneiden auch ein Einfluss durch die Fertigungsparameter untersucht. So wurden die laserstrahlgeschnittenen Proben mit drei Strategien hergestellt, bei denen jeweils die Laserleistung (800 bis 2000 W) und Schneidgeschwindigkeit (1500 bis 4500 mm/min) eines  $\text{CO}_2$ -Lasers stufenweise gesteigert wurde. Die Untersuchungen wurden an einem S355MC Stahl mit einer Zugfestigkeit von 475 MPa und dem Dualphasenstahl DP600 mit 690 MPa Zugfestigkeit durchgeführt. Bei den Untersuchungen konnte eine Wechselwirkung zwischen der Breite der Wärmeeinflusszone und den Prozessparametern festgestellt werden. Die Proben, welche mit geringerer Laserleistung hergestellt wurden, wiesen sowohl für den S355MC als auch für den DP600 keinen Abfall der Schwingfestigkeit gegenüber Proben mit polierten Kanten auf. Die Verwendung der hohen Laserleistung während der Probenfertigung führte hingegen zu einem Schwingfestigkeitsabfall von 18 % bei den Proben aus DP600, wohingegen die Schwingfestigkeit der Proben aus S355MC nahezu unbeeinflusst blieb.

In [84] wurde unter anderem der Einfluss des Laserstrahl-schneidens und der Beschichtung auf die Schwingfestigkeit eines pressgehärteten 22MnB5 Stahls mit 1,8 mm Dicke untersucht. Drei Probenvarianten wurden für die Untersuchungen hergestellt: Laserstrahlgeschnitten mit Aluminium-Silizium Beschichtung, polierte Kanten mit Aluminium-Silizium Beschichtung, polierte Kanten und mechanische entfernte Aluminium-Silizium Beschichtung. Die beste Schwingfestigkeit wurde mit den Proben mit polierter Kante und ohne Beschichtung erzielt. Im Vergleich dazu fiel die Schwingfestigkeit der Proben mit polierter Kante und Al-Si Beschichtung um 36 % ab. Die Proben mit laserstrahlgeschnittener Kante und Al-Si Beschichtung wiesen einen Schwingfestigkeitsabfall von 55 % auf. Damit konnte nachgewiesen werden, dass beim pressgehärteten 22MnB5 Stahl sowohl ein Schwingfestigkeitseinfluss von der Beschichtung als auch von der Kantenbearbeitung ausgeht. Für den Schwingfestigkeitsabfall der Proben mit polierten Kanten und Al-Si Beschichtung werden Mikrorisse verantwortlich gemacht, welche durch die Beschichtung bis in eine Diffusionsschicht zwischen Beschichtung und Grundmaterial verlaufen. Unter



schwingender Beanspruchung werden diese Risse im Schnittkantenbereich wachstumsfähig und es kommt zum Versagen. Die Diffusionsschicht bildet sich während des Austenitisierungsprozesses bei Temperaturen über 900 °C. Sie besteht aus sehr harten intermetallischen Phasen. In [85] konnte gezeigt werden, dass die Risse infolge von Diffusionsprozessen zwischen der Al-Si Beschichtung und dem Grundmaterial während des Austenitisierungsprozesses entstehen. Es wurde herausgefunden, dass die Austenitisierungszeit und -temperatur Einfluss auf die Ausbildung der intermetallischen Phasen in der Diffusionsschicht hat. So entstehen bei kurzen Austenitisierungszeiten und niedrigen -temperaturen vermehrt intermetallische Phasen, die eine geringe Bruchdehnung haben und somit sehr spröde sind. Damit wird eine ebenfalls in [85] aufgezeigte Korrelation zwischen sinkender Rissdichte in der Diffusionsschicht und steigender Austenitisierungszeit erklärt. Mit steigender Austenitisierungszeit entstehen demnach ausgewogenere intermetallische Phasen mit einem duktileren Werkstoffverhalten.

### 3.3.2 Scherschneiden

Wie bereits in Kapitel 2.7 beschrieben, wird durch das im Serienbetrieb größtenteils eingesetzte Trennverfahren, das Scherschneiden, das Gefüge des Materials in der Schereinflusszone als Folge lokaler Umformungen erheblich geschädigt. [86], [41] Die Deformation erstreckt sich je nach Blechwerkstoff und Scherschneidparameter ausgehend von der schergeschnittenen Kante bis einige Zehntel-Millimeter in das Grundmaterial hinein. Neben der Deformation entsteht durch den Scherschneidprozess eine charakteristische geometrische Ausprägung der Kante, der sogenannten Schnittfläche. Die Qualität der Schnittfläche in Abhängigkeit der angewandten Scherschneidparameter wurde in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht.

[42] konnte für eine geschlossene Schnittlinie nachweisen, dass die Anteile der Schnittflächenkenngrößen insbesondere von dem gewählten Schneidspalt abhängig sind. An den Schnittkanten stellt sich ein hydrostatischer Spannungszustand im Zugbereich ein, welcher mit zunehmendem Schneidspalt ansteigt und zu einer früheren Bruchinitiierung führt. Für kleine Schneidspalte verschiebt sich der Mohr'sche Spannungskreis in Richtung des Druckgebiets. Dies geht mit einer Verschiebung der Schubbruchgrenze zu größeren Werten einher und ermöglicht ein längeres Fließen des Werkstoffes. Dieser Zusammenhang wird in nachfolgender Abbildung 3.5 verdeutlicht.

Neben Untersuchungen zum Einfluss des Schneidspalts auf die resultierenden Schnittflächenkenngrößen beschreiben [51] und [87] die Ausprägung der Schereinflusszone. [51] gibt an, dass sich bei Stahlblechen eine Härtesteigerung auf das 2,0- bis 2,2-fache der Ausgangshärte von der Schnittfläche ergeben kann. Die Tiefe und der Grad der Aufhärtung sind jedoch maßgeblich vom

verwendeten Werkstoff abhängig. [87] zufolge reicht die Schereinflusszone bis in eine Tiefe von etwa 75 % der Blechdicke.

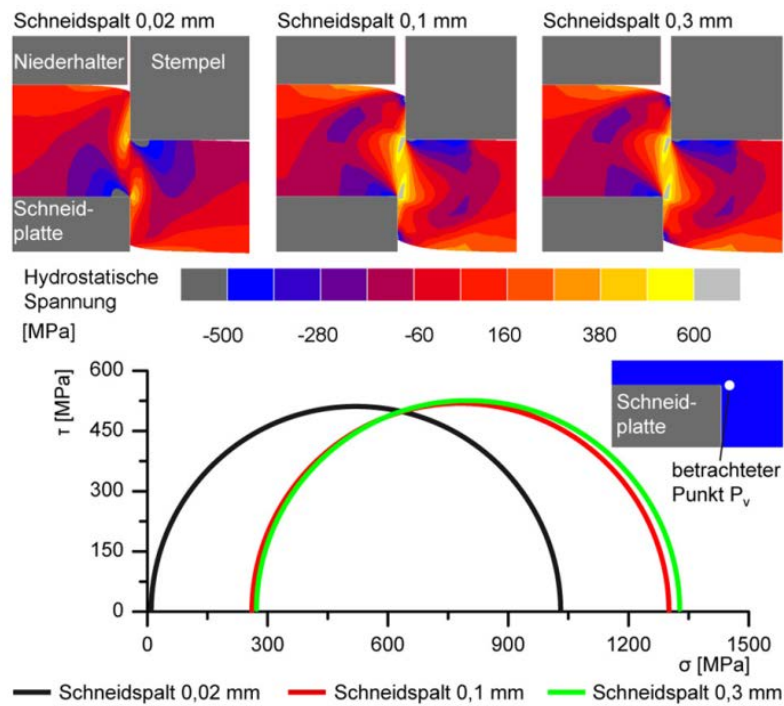


Abbildung 3.5: Spannungszustand im Bauteil in Abhängigkeit vom Schneidspalt aus [42]

Um die in der Schereinflusszone eingebrachte Verfestigung und damit einhergehende Schädigung zu reduzieren wird das Verfahren des Nachschneidens angewandt. [56] empfiehlt für das Nachschneiden von Außenformen einen Schneidspalt von 5 bis 6,5 % der Blechdicke sowie 3 bis 4 % der Blechdicke für Innenformen. Die untere Grenze der Intervalle für die Wahl des Schneidspaltes gilt dabei für Werkstoffe mit großem Formänderungsvermögen, die obere Grenze für Werkstoffe mit geringem Formänderungsvermögen. Die Nachschneidzugabe sollte bei Außenkonturen ca. 7 bis 10 % der Blechdicke, bei Innenkonturen ca. 3,5 bis 6,5 % der Blechdicke betragen. Für Werkstoffe mit geringem Formänderungsvermögen sollte jeweils eine kleine Nachschneidzugabe gewählt werden. Aufgrund der sehr geringen Nachschneidzugabe kommt es nicht zu einem Scherschneidvorgang, sondern zu einer spanenden Bearbeitung. Die oben genannten Grenzen bilden Arbeitsbereiche, innerhalb derer sich Schnittflächen mit hohem Glattschnittanteil erzielen lassen. Ein Überschreiten der Bereiche führt zu einem Anstieg des Bruchflächenanteils.

[54] untersuchte das Nachschneiden an Innenkonturen für den Lochprozess mit einem Lochdurchmesser zwischen 8 und 9 mm. Für alle Werkstoffe lag die maximale Nachschneidzugabe bei 20 %. Die für höher- und hochfeste Stähle empfohlenen minimalen und maximalen Schneidspalte lagen bei etwa 3,3 bis 6,7 % und decken sich damit mit den Empfehlungen von [56].

In der Literatur wird vielfach der Fertigungseinfluss durch das Scherschneiden und die Scherschneidparameter auf die Umformeigenschaften des Werkstoffs untersucht, siehe zum Beispiel [78], [35] und [79]. Wie in Kapitel 3.2.2 bereits erwähnt, kann die Kaltverfestigung der Schnittkante aufgrund des Schneidprozesses zu einer Reduzierung der Kantenumformbarkeit führen. Folgt bei der Bauteilherstellung im Anschluss an einen Schneidprozess ein Umformprozess, besteht die Gefahr von Kantenrissen. Die sogenannte Kantenrissempfindlichkeit steigt mit der Werkstofffestigkeit und ist außerdem von den Fertigungsparametern abhängig, die maßgeblichen Einfluss auf den Zustand der Randschicht haben.

Ein Schwingfestigkeitseinfluss durch das Scherschneiden oder sogar durch die Scherschneidparameter wird vergleichsweise in deutlich weniger Veröffentlichungen untersucht. In [88] wird die Schwingfestigkeit von verschiedenen Stahlblechgüten im schergeschnittenen und laserstrahlgeschnittenen Zustand ermittelt. Die Versuche wurden an einem niedrigfesten Tiefziehstahl, zwei hochfesten Stählen, zwei austenitischen Stählen und einem Duplexstahl durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Fertigungseinfluss auf die Schwingfestigkeit mit steigender Werkstofffestigkeit zunimmt. Außerdem war die Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben bei allen Werkstoffen geringer als die der laserstrahlgeschnittenen Proben. Dafür wird eine schlechtere Oberflächenqualität an der Schnittkante der schergeschnittenen Proben verantwortlich gemacht.

In [89] wird der Einfluss des Schneidspalts auf das Schwingfestigkeitsverhalten von acht Karoseriestählen mit Zugfestigkeiten zwischen 300 und 600 MPa untersucht. Die Materialdicke der Stahlfeinbleche betrug dabei zwischen 1,5 und 2,5 mm. Der Schneidspalt variierte bei der Probenfertigung zwischen 5 und 30 % bezogen auf die Materialdicke. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass bis zu einem kritischen Schneidspalt die Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben konstant bleibt. Wird diese kritische Größe überschritten, sinkt die Schwingfestigkeit der Proben kontinuierlich mit zunehmendem Schneidspalt. Begründet wird dieser Effekt mit einem steigenden Bruchflächenanteil an der Schnittkante mit zunehmendem Schneidspalt. Da die Bruchfläche bei allen Werkstoffen der Ausgangsort des Ermüdungsrisses ist, der zum Versagen führte, steigt mit zunehmendem Bruchflächenanteil auch die Anzahl der möglichen Versagensorte und führt somit zu einem Abfall der Schwingfestigkeit. Mit den Untersuchungsergebnissen konnte ebenfalls eine Korrelation eines zunehmenden Schwingfestigkeitseinflusses mit steigender Werkstofffestigkeit festgestellt werden.

Ein Einfluss durch den gewählten Schneidspalt bei der Probenfertigung auf die Schwingfestigkeit wird ebenfalls in [83] festgestellt. Die Untersuchungen an einem S355MC und einem DP600 Stahl zeigten, dass die Optimierung des Schneidspalts in Bezug auf die Schwingfestigkeit stark werkstoffabhängig ist und nicht einheitlich betrachtet werden kann. So hatten die Proben aus

S355MC, die mit einem Schneidspalt mittlerer Größe gefertigt wurden, die höchste Schwingfestigkeit, wohingegen Proben aus DP600 die höchste Schwingfestigkeit aufwiesen, wenn bei der Fertigung ein vergleichsweise großer Schneidspalt verwendet wurde. Die Größe der verwendeten Schneidspalte lag zwischen 6 und 13 % der Materialdicke und sind demnach vergleichsweise als sehr kleine Schneidspalte zu betrachten. Bei den schergeschnittenen Proben aus DP600 wurde außerdem ein größerer Schwingfestigkeitsabfall festgestellt gegenüber Proben mit polierten Kanten als bei den Proben aus S355MC. So lag der Schwingfestigkeitsabfall bei den Proben aus DP600 zwischen 12 und 28 % und bei den Proben aus S355MC zwischen 6 und 12 %. Diese Ergebnisse bestätigen die Untersuchungsergebnisse der vorherigen Veröffentlichungen, wonach der Schwingfestigkeitsabfall mit der Werkstofffestigkeit korreliert. Außerdem hatten die schergeschnittenen Proben im Vergleich mit den laserstrahlgeschnittenen Proben in der Regel eine geringere Schwingfestigkeit, was ebenfalls auf eine schlechtere Oberflächenqualität im Bruchflächenbereich der Schnittkante gegenüber einer laserstrahlgeschnittenen Schnittkante zurückgeführt wird.

In [84] wurde neben dem Einfluss des Schneidspalts auch der Einfluss des Schneidkantenradius auf die Schwingfestigkeit untersucht. Auf diese Weise soll der Effekt einer Werkzeugabnutzung in Form einer Schneidkantenverrundung bei der Serienfertigung nach einer Vielzahl von Schneidvorgängen nachgestellt werden. So wurde eine Probenvariante mit einem Schneidspalt von 6 % und einem Schneidkantenradius von 30  $\mu\text{m}$  hergestellt. Bei der zweiten Probenvariante wurden der Schneidspalt auf 10 % und der Schneidkantenradius auf 100  $\mu\text{m}$  vergrößert. Die Untersuchungen wurden an dem Tiefziehstahl MS300 mit einer Zugfestigkeit von 300 MPa, dem Dualphasenstahl DP1000 mit einer Zugfestigkeit von über 1000 MPa und dem pressgehärteten Al-Si beschichteten 22MnB5 Stahl mit einer Zugfestigkeit von über 1500 MPa durchgeführt. Die Materialdicke betrug zwischen 1,5 und 2 mm. Die Vergrößerung des Schneidspalts und des Schneidkantenradius führten beim DP1000 und 22MnB5 zu einer Zunahme des Schwingfestigkeitsabfalls der schergeschnittenen Proben gegenüber Proben mit polierter Kante. So stieg der Schwingfestigkeitsabfall beim DP1000 von 25 auf 33 % und beim 22MnB5 von 33 auf 40 %. Der Ermüdungsriss ging bei allen schergeschnittenen Proben von dem Bruchflächenbereich beziehungsweise dem Übergang zwischen Glattschnitt- und Bruchflächenbereich aus. Dementsprechend werden die an der Bruchfläche aufgrund des Schneidprozesses entstehenden Oberflächenfehler für den Schwingfestigkeitsabfall verantwortlich gemacht. Bei den Proben aus MS300 konnte kein Einfluss auf die Schwingfestigkeit durch das Scherschneiden festgestellt werden. Bezüglich der Korrelation zwischen Schwingfestigkeitsabfall und Werkstofffestigkeit entsprechen die Untersuchungsergebnisse den Ergebnissen der anderen Veröffentlichungen.

## 4 Proben und Prinzipbauteil

### 4.1 Werkstoffe

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird der Einfluss der Kantenbearbeitung auf das Festigkeitsverhalten von Feinblechen aus verschiedenen Stahlgüten unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung untersucht. Die Stähle unterscheiden sich in ihrem Gefügebau und ihren werkstoffmechanischen Eigenschaften. Hieraus ergeben sich im Fahrzeugbau unterschiedliche Einsatzbereiche und -zwecke. Die Stahlplatten für die Untersuchungen werden von Firmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt, siehe Tabelle 4.1.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens werden die Feinblechstähle DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5 untersucht.

Tabelle 4.1: Werkstofflieferanten

<i>Werkstoff</i>	<i>Lieferant</i>
DC04	thyssenkrupp Steel Europe AG
DP800	voestalpine Stahl GmbH
CP800	thyssenkrupp Steel Europe AG
DP1000	voestalpine Stahl GmbH
CP1000	voestalpine Stahl GmbH
22MnB5	thyssenkrupp Steel Europe AG

Die Stahlgüten werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die mechanisch-technologischen Kennwerte aus dem quasistatischen Zugversuch nach [90] sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Die angegebenen Kennwerte stellen darin den Mittelwert von mindestens fünf Einzelversuchen dar. Des Weiteren können Tabelle 4.2 Informationen über die Oberflächenbeschichtung und die Dicke der Stahlfeinbleche entnommen werden. Bei allen hier vorgestellten Stahlgüten, ausgenommen dem 22MnB5, wird das Coil durch Kaltwalzen auf die angegebene Dicke gebracht.

Der **DC04** ist ein unlegierter Stahl mit ferritischem Gefüge, welcher sich durch seine gute Umformbarkeit auszeichnet. Als niederfester Tiefziehstahl wird er im Karosseriebau typischerweise für Bauteile mit hohem Umformgrad eingesetzt, die nicht crashrelevant sind und daher keine hohen Festigkeiten aufweisen müssen. Als Beispiel lassen sich etwa eine Reserveradmulde oder Teile der Außenhaut anführen.

Beim **DP800 und DP1000** handelt es sich um Dualphasen-Stähle mit ferritischem Grundgefüge und inselförmig eingelagertem Martensit. Im Vergleich zum DP800 weist das Gefüge des DP1000 einen gesteigerten Martensit-Anteil auf, woraus eine höhere Festigkeit resultiert. Die Umform-

barkeit hingegen ist entsprechend etwas geringer. Aus der Gefügestruktur mit dem verformbaren Ferrit und dem festen Martensit resultiert die gute Kombination aus Festigkeit und Umformbarkeit, welche die Dualphasen-Stähle auszeichnet. Sie eignen sich für die Fertigung von Struktur- und Sicherheitsbauteilen wie beispielsweise die Stoßfänger eines PKW.

**CP800 und CP1000** sind Komplexphasen-Stähle mit ferritisch-bainitisch-martensitischem Gefüge. Durch einen höheren Bainit-Anteil weist CP1000 gegenüber CP800 eine höhere Festigkeit auf. Die Verformbarkeit des CP1000 ist dementsprechend etwas geringer als die des CP800. Gegenüber den Dualphasen-Stählen besitzen die Komplexphasen-Stähle eine deutlich höhere Streckgrenze und geringere Bruchdehnung. Da es sich um hochfeste Stähle handelt, finden Komplexphasen-Stähle in Bereichen mit ausgeprägter Crash-Relevanz Anwendung. Als Anwendungsbeispiele können Querlenker oder eine Verstärkung des Wellentunnels genannt werden.

Tabelle 4.2: Mechanisch-technologische Kennwerte aus dem quasistatischen Zugversuch ermittelt nach [90]

Werkstoffbezeichnung	Werkstoffnummer	Beschichtung	Dicke t [mm]	E-Modul E [GPa]	Dehngrenze $R_{p0,2\%}$ [MPa]	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	Gleichmaßdehnung $A_g$ [%]	Bruchdehnung $A_{90}$ [%]
DC04 DIN EN 10130: DC04 VDA 239-100: CR3-UC	10.338	keine	1,5	212,3	162	285	22,6	41,2
DP800 DIN EN 10346: HCT 780 X VDA 239-100: CR440Y780T-DP-UC-U	10.943	keine	1,5	215,6	508	813	11,4	16,4
CP800 DIN EN 10346: HCT 780 C ZE50/50 VDA 239-100: CR570Y780T-CP-EG29/29-U	10.954	elektrolytisch verzinkt	1,5	228,9	691	883	5,2	9,2
DP1000 DIN EN 10346: HCT 980 X VDA 239-100: CR590Y980T-DP-UC-U	10.944	keine	1,4	211,6	697	1012	8,3	13
CP1000 DIN EN 10346: HCT 980 C VDA 239-100: CR780Y980T-CP-UC-U	10.955	keine	1,4	211,4	945	1028	3,6	7,2
22MnB5	15.528	Al-Si	1,5	195,1	1080	1526	3,8	5,4

Der **22MnB5-Stahl** ist ein borlegierter Vergütungsstahl und wird im Karosseriebereich für Bauteile verwendet, welche durch Presshärten hergestellt werden. Angeliefert wird der 22MnB5 zunächst mit einem ferritisch-perlitischen Gefüge und mittleren Zugfestigkeiten von 500 bis 700 MPa. Nach dem Warmumformen wird das Bauteil durch schnelles Abkühlen gehärtet. Abbildung 4.1 zeigt eine für diesen Prozess typische Temperaturführung/Abkühlkurve. Nach der

Umformung und Wärmebehandlung besteht der Werkstoff aus einem voll martensitischem Gefüge mit einer Zugfestigkeit von über 1500 MPa. Auf Grund seiner hohen Festigkeit findet dieser Werkstoff bei crash-relevanten Strukturen im Karosseriebereich Anwendung. So werden beispielsweise B-Säulen und Seitenaufprallschutz-Systeme aus pressgehärtetem 22MnB5 gefertigt.

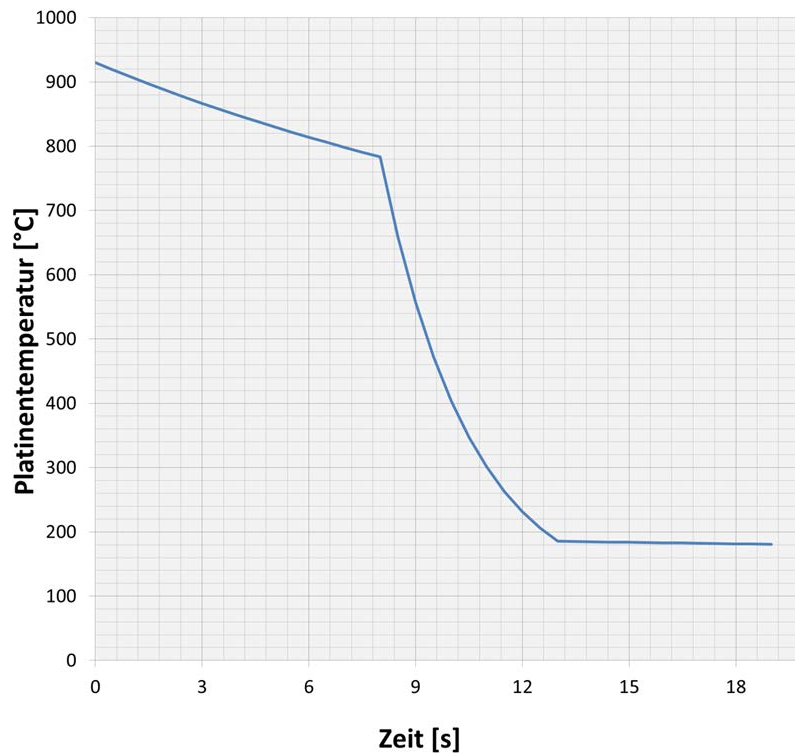


Abbildung 4.1: Abkühlkurve 22MnB5 mit Al-Si Beschichtung von der Firma Kirchhoff Automotiv-ve Deutschland GmbH, Materialstärke 1,5 mm

## 4.2 Geometrie

Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden quasistatische Zugversuche sowie dehnungs- und spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche an ungekerbten und gekerbten Flachproben durchgeführt. Die Geometrie der ungekerbten Flachproben nach [90] für die Ermittlung der mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte im quasistatischen Zugversuch ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Die Geometrie der ungekerbten Flachproben für die Schwingfestigkeitsversuche wird in Anlehnung an [91] festgelegt, siehe Abbildung 4.3. Die Kerbformzahl der ungekerbten Flachproben beträgt nahezu  $K_t = 1$ .

Um den Einfluss auf das Festigkeitsverhalten eines Werkstoffs durch Strukturkerben, wie sie an Bauteilen vorliegen, zu untersuchen, werden neben den ungekerbten auch gekerbte Flachproben untersucht. Die zwei dafür ausgewählten Probengeometrie sind ebenfalls in Abbildung 4.3

dargestellt. Zum einen wird eine Probe mit einer milden Kerbe und der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  verwendet. Realisiert wird die Kerbe durch eine mittige Innenbohrung. Zum anderen wird eine scharf gekerbte Flachprobe mit beidseitiger Außenkerbe und einer Kerbformzahl von  $K_t = 4,6$  ausgewählt.

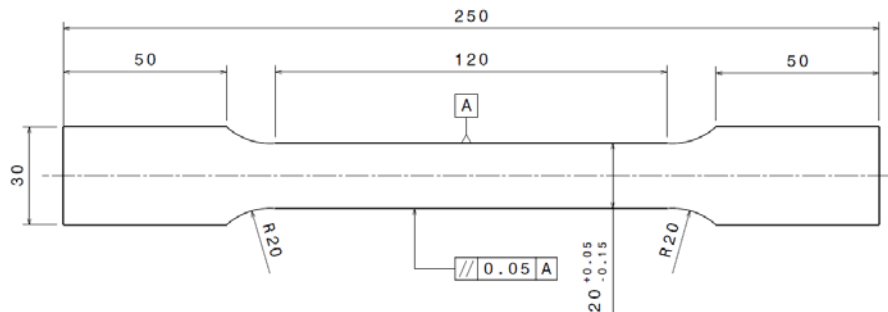


Abbildung 4.2: Ungekerbte Flachprobe ( $K_t = 1$ ) für den quasistatischen Zugversuch nach [90]

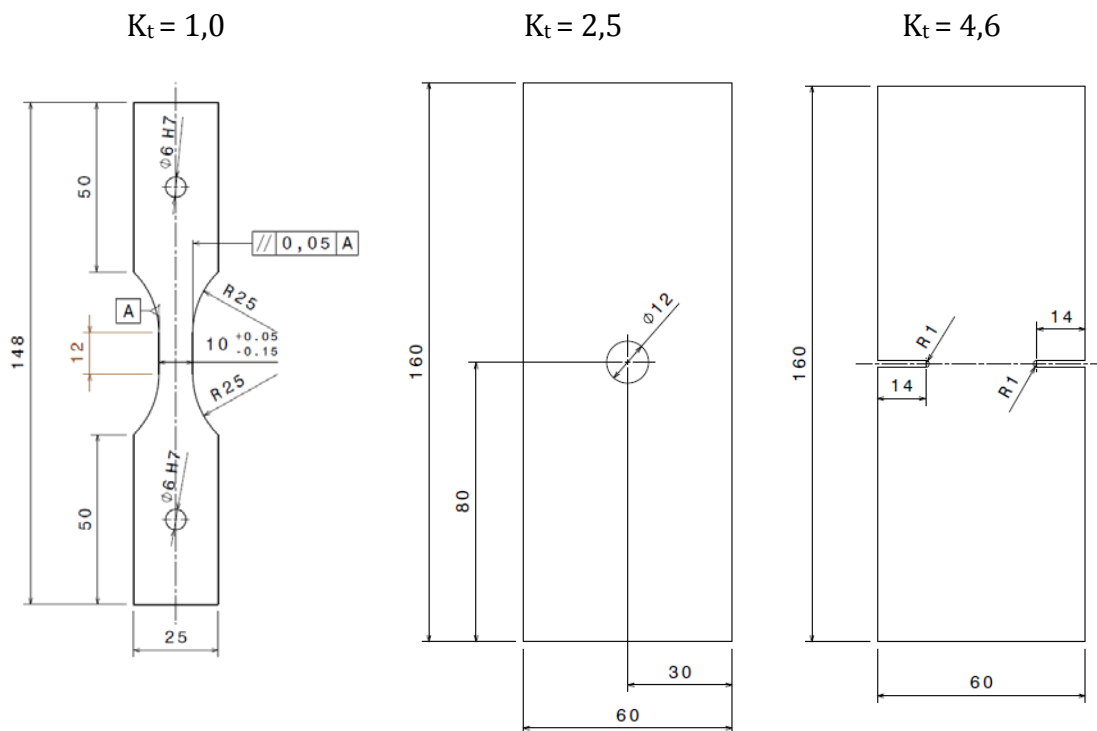


Abbildung 4.3: Probengeometrie der ungekerbten und gekerbten Flachproben

Die gekerbten Flachproben aus gehärtetem 22MnB5 mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  und polierten Kanten wurde aufgrund von wiederholt auftretenden Außenrissen im Bereich der Einspannung während der Schwingfestigkeitsversuche an die in Abbildung 4.4 dargestellte Geometrie angepasst. Durch die Verjüngung der Probe im Bereich der Bohrung konnten die Einspannbrüche vermieden werden. Die Kerbformzahl wird durch die Änderung der Probengeometrie nur minimal kleiner. Aufgerundet liegt die Kerbformzahl nach wie vor bei  $K_t = 2,5$ .



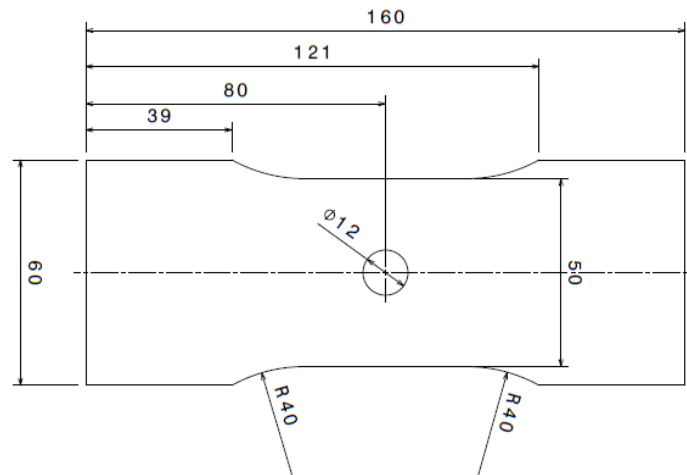


Abbildung 4.4: Angepasste Probengeometrie für die Probe mit Mittenbohrung ( $K_t = 2,5$ ) aus gehärtetem 22MnB5 mit poliertem Kantenbearbeitungszustand

## 4.3 Herstellung

### 4.3.1 Referenzzustand mit polierten Kanten

Die ungekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  werden durch Fräsen aus den Blechplatten entnommen. Die Bohrungen mit den Radien 6 mm und 1 mm in den gekerbten Flachproben mit den Kerbformzahlen  $K_t = 2,5$  und  $4,6$  (siehe Abbildung 4.3) werden mit einem Bohrer in das Blech eingebracht. Die Entnahme aller Proben erfolgt quer zur Walzrichtung. Für den Referenzzustand werden an der Hochschule Esslingen die Kantenflächen der gefrästen und gebohrten Proben in mehreren Schritten von Hand feingeschliffen und poliert. Auf diese Weise soll der Einfluss durch die Kantenbearbeitung möglichst eliminiert werden, so dass das Festigkeitsverhalten nur vom Werkstoff und der Probengeometrie abhängig ist. Die Walzoberflächen werden an den Proben belassen.

### 4.3.2 Laserstrahlschneiden

Die durch Laserstrahlschneiden gefertigten Proben werden von der KIRCHHOFF Automotive Deutschland GmbH geliefert. Nach Angaben des Herstellers wird für die Fertigung ein 4800 Watt  $\text{CO}_2$ -Laser verwendet. Die Laserleistung ist für den Schneidprozess auf 3200 Watt eingestellt und die Schnittgeschwindigkeit beträgt in etwa 4 m/min. Genauere Angaben zu den Fertigungsparametern wie etwa der Vorschubgeschwindigkeit oder der Laserintensität sind nur schwer ermittelbar, da der Schneidprozess unter der Berücksichtigung einer Vielzahl von Parametern von einer Software geregelt wird und die Fertigungsparameter während des Prozesses nicht konstant sind.

Während des Laserstrahlschneidens wird der Werkstoff lokal aufgeschmolzen und der flüssige Stahl mit einem Schutzgas aus der Schnittfuge ausgeblasen. Dadurch ergibt sich an den laserstrahlgeschnittenen Kanten das für das Fertigungsverfahren typische Riefenbild aus aufgeschmolzenem und erstarrtem Stahl.

Für den Werkstoff 22MnB5 mit Al-Si Beschichtung ist in Bezug auf die Probenherstellung zwischen zwei laserstrahlgeschnittenen Varianten zu unterscheiden (siehe Tabelle 6.43 und Tabelle 6.29). Die beiden Varianten unterscheiden sich in der Prozessreihenfolge von Wärmebehandlung und Laserstrahlschneiden. Bei der ersten Variante (V1) werden die Platinen zuerst der Wärmebehandlung unterzogen, anschließend erfolgt die Probenherstellung durch das Laserstrahlschneiden. Bei der zweiten Variante (V2) werden zuerst die Proben aus den ungehärteten Platinen geschnitten und anschließend der Wärmebehandlung unterzogen. In der Industrie kommen beide Varianten zum Einsatz.

### 4.3.3 Scherschneiden

Bei der Kantenbearbeitung durch Scherschneiden wurden unterschiedliche Strategien verfolgt. Diese sind in Abbildung 4.5 aufgeführt.

Die Basis für die Fertigung der Schwingproben durch Scherschneiden bilden Proben, welche im Referenzzustand schergeschnitten werden. Für den Referenzzustand wurden auf Erfahrungswerten basierende Schneidspalte und Schneidkantenradien für die jeweiligen Werkstoffklassen und Festigkeiten ausgewählt. Für den weichen Tiefziehstahl DC04 als auch die Mehrphasenstähle wurden für den Referenzzustand scharfkantige Aktivelemente ( $r = 10 \mu\text{m}$ ) benutzt. Für den pressgehärteten 22MnB5 wurde bereits im Referenzzustand die Schneidstempelkante auf  $r = 150 \mu\text{m}$  verrundet, um ein Ausbrechen der Kante zu vermeiden.

Entsprechend der Festigkeiten der untersuchten Werkstoffe wird für die Nachbildung eines Verschleißzustands am Aktivelement Schneidstempel der Kantenradius vergrößert. Der Schneidspalt bleibt dabei konstant.

Für den Dualphasenstahl DP800 werden weiterhin drei optimierte Scherschneidverfahren untersucht. Eine Strategie stellt die Beschichtung des Aktivelements Schneidstempel dar, um die Auswirkung der Mikrostruktur des Aktivelements auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen. Die Beschichtung vermindert dabei die Reibung zwischen Werkstoff und Mantelfläche des Aktivelements und verbessert die Oberflächenqualität der Werkstücke. Der Kantenradius des Schneidstempels muss dazu auf  $r = 50 \mu\text{m}$  verrundet werden, um ein Abplatzen der Beschich-

tung zu vermeiden. Als Beschichtung diente BALINIT® ALCRONA PRO der Firma Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH, Bingen.

Scherschneiden Offener / geschlossener Schnitt								
Referenz	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center; border-right: 1px solid black;">                     DC04  <math>r = 10 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 10\%</math> </td> <td style="width: 33%; text-align: center; border-right: 1px solid black;">                     DP800, CP800                      DP1000, CP1000  <math>r = 10 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 15\%</math> </td> <td style="width: 33%; text-align: center;">                     22MnB5  <math>r = 150 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 20\%</math> </td> </tr> </table>	DC04 $r = 10 \mu\text{m}$ $u_r = 10\%$	DP800, CP800 DP1000, CP1000 $r = 10 \mu\text{m}$ $u_r = 15\%$	22MnB5 $r = 150 \mu\text{m}$ $u_r = 20\%$				
DC04 $r = 10 \mu\text{m}$ $u_r = 10\%$	DP800, CP800 DP1000, CP1000 $r = 10 \mu\text{m}$ $u_r = 15\%$	22MnB5 $r = 150 \mu\text{m}$ $u_r = 20\%$						
Verschleiß	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center; border-right: 1px solid black;">                     DC04  <math>r = 150 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 10\%</math> </td> <td style="width: 33%; text-align: center; border-right: 1px solid black;">                     DP800  <math>r = 300 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 15\%</math> </td> <td style="width: 33%; text-align: center;">                     22MnB5  <math>r = 400 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 20\%</math> </td> </tr> </table>	DC04 $r = 150 \mu\text{m}$ $u_r = 10\%$	DP800 $r = 300 \mu\text{m}$ $u_r = 15\%$	22MnB5 $r = 400 \mu\text{m}$ $u_r = 20\%$				
DC04 $r = 150 \mu\text{m}$ $u_r = 10\%$	DP800 $r = 300 \mu\text{m}$ $u_r = 15\%$	22MnB5 $r = 400 \mu\text{m}$ $u_r = 20\%$						
Optimierte Scherschneidverfahren DP800	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Mikrostruktur Aktivelemente</td> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <math>r = 50 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 15\%</math>                      beschichtet mit                      BALINIT® ALCRONA PRO                      und feinstpoliert                 </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Minimierung Eigenspannungszustand</td> <td style="text-align: center;"> <i>Offener Schnitt:</i>  <math>r = 10 \mu\text{m}</math>  <math>u_v = 15\% / u_n = 15\%</math>  <math>z = 2 \text{ mm}</math> </td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">Maximierung Glattschnittanteil</td> <td style="text-align: center;"> <i>Offener Schnitt:</i>  <math>r = 10 \mu\text{m}</math>  <math>u_v = 5\% / u_n = 2\%</math>  <math>z = 0,4 \text{ mm}</math> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <i>Geschlossener Schnitt:</i>  <math>r = 200 \mu\text{m}</math>  <math>u_r = 2\%</math> </td> </tr> </table>	Mikrostruktur Aktivelemente	$r = 50 \mu\text{m}$ $u_r = 15\%$ beschichtet mit BALINIT® ALCRONA PRO und feinstpoliert	Minimierung Eigenspannungszustand	<i>Offener Schnitt:</i> $r = 10 \mu\text{m}$ $u_v = 15\% / u_n = 15\%$ $z = 2 \text{ mm}$	Maximierung Glattschnittanteil	<i>Offener Schnitt:</i> $r = 10 \mu\text{m}$ $u_v = 5\% / u_n = 2\%$ $z = 0,4 \text{ mm}$	<i>Geschlossener Schnitt:</i> $r = 200 \mu\text{m}$ $u_r = 2\%$
Mikrostruktur Aktivelemente	$r = 50 \mu\text{m}$ $u_r = 15\%$ beschichtet mit BALINIT® ALCRONA PRO und feinstpoliert							
Minimierung Eigenspannungszustand	<i>Offener Schnitt:</i> $r = 10 \mu\text{m}$ $u_v = 15\% / u_n = 15\%$ $z = 2 \text{ mm}$							
Maximierung Glattschnittanteil	<i>Offener Schnitt:</i> $r = 10 \mu\text{m}$ $u_v = 5\% / u_n = 2\%$ $z = 0,4 \text{ mm}$							
	<i>Geschlossener Schnitt:</i> $r = 200 \mu\text{m}$ $u_r = 2\%$							

Abbildung 4.5: Scherschneidstrategien

Eine weitere Strategie stellt die Reduzierung der durch das Scherschneiden eingebrachten Eigenspannungen in die Schereinflusszone dar. Dazu wird ein zweistufiger Scherschneidprozess, respektive Nachschneidprozess angewandt. Der Schneidspalt für das Vor- sowie Nachschneiden beträgt dabei 15 Prozent, die Nachschneidzugabe  $z$  beträgt 2 mm. Ziel der Strategie ist es die Steifigkeit des Butzens durch die geringere Breite zu reduzieren und die während des Umformvorgangs entstehende plastische Deformation dadurch in den Butzen zu lenken. Im Schnittteil sollen daraufhin weniger Verfestigung und geringere Eigenspannungen resultieren.

Die dritte optimierte Scherschneidstrategie gilt der Maximierung des Glattschnittanteils. Anhand von kleinen Schneidspalten werden in die Schereinflusszone Druckspannungen eingebracht, welche eine späte Rissinitiierung begünstigen. Dabei wird zwischen dem Scherschneiden im offenen und geschlossenen Schnitt unterschieden. Für den offenen Schnitt soll dazu ein zweistufiger Scherschneidprozess angewandt werden. Dabei wird mit einem kleinen Schneidspalt von  $u_v = 5\%$  vorgeschritten und einer Nachschneidzugabe von  $z = 0,4 \text{ mm}$  in Kombination mit einem Nachschneid-Schneidspalt von  $u_n = 5\%$  nachgeschritten. Die Kanten der Aktivelemente sind

dabei jeweils scharfkantig ( $r = 10 \mu\text{m}$ ). Das Nachschneiden mit sehr geringer Nachschneidzugabe verstärkt den oben genannten Effekt der späten Rissinitiierung. Für den geschlossenen Schnitt begünstigt ein großer Schneidkantenradius gepaart mit einem kleinen Schneidspalt die späte Rissinitiierung und damit die Maximierung des Glattschnittanteils.

Für die Fertigung durch Scherschneiden werden zunächst mit der Tafelschere Ausgangsplatinen aus den Blechplatinen entnommen. In jene werden entsprechend der Kerbgeometrie Sucherlöcher eingebracht, um die Ausgangsplatine im Scherschneidwerkzeug mit Hilfe von Sucherstiften positionieren zu können. Für die Herstellung der schergeschnittenen Schwingproben wurden zwei am Lehrstuhl vorhandene modulare Werkzeuge mit entsprechend der Schneidstrategien notwendigen Aktivelementsätzen, bestehend aus Stempel, Matrize und Niederhalter auf die Schwingprobengeometrie angepasst. Der modulare Aufbau beider Werkzeuge ermöglicht die Variation der Parameter Schneidspalt, Schneidkantenverrundung und Niederhalterkraft. Weiterhin ist es mit beiden Werkzeugen möglich einstufig, wie auch zweistufig zu schneiden. Für die Probengeometrie mit Kerbformzahl  $K_t = 1$  ist es weiterhin möglich eine offene oder geschlossenen Schnittlinie zu realisieren. Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen den Aufbau der beiden Scherschneidwerkzeuge.

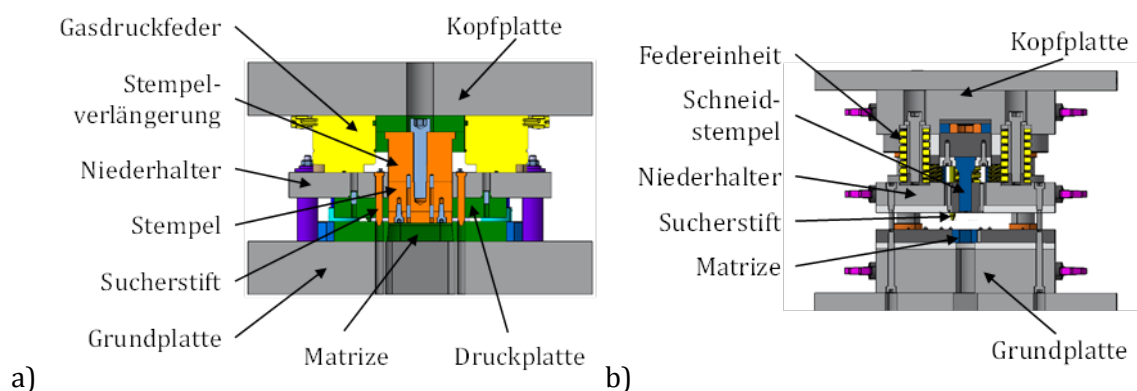


Abbildung 4.6: Aufbau a) Werkzeug zur Herstellung von Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 1$   
 b) Werkzeug zur Herstellung von Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  sowie  $K_t = 4,6$

Werkzeug 1 wurde für den Scherschneidprozess an den Proben mit Kerbformzahl  $K_t = 1$  genutzt. Das selbstöffnende Werkzeug basiert auf einer Vier-Säulen-Konstruktion. Der Schneidspalt kann durch die Stempelgeometrie variabel eingestellt werden. Abbildung 4.7 zeigt den Aufbau der einzelnen Ebenen des Schneidwerkzeuges.

Die Basis der Matrizenplatte bilden die Grund- und Matrizenplatte. Die Grundplatte ist mit vier Führungsbuchsen versehen, vier Federpakete stützen die Niederhalterebene ab. Mit Hilfe von Federelementen in der Matrizenplatte kann ein Anschlag zum positionsgenauen Einlegen der Blechzuschnitte realisiert werden. Weiterhin ist die Matrizenplatte mit zwei erodierten Durchgangslöchern für das Eintauchen der Sucherstempel versehen. Der wesentliche Bestandteil der

Niederhalterebene sind die Niederhalterplatte sowie die Stempelführungsplatte. In die Niederhalterplatte sind vier Mittenbund-Führungssäulen verbaut. Sie bilden mit acht Kugelkäfigen eine präzise Kugelführung. Die Niederhalterplatte bringt über die harte Stempelführungsplatte die Niederhalterkraft auf den eingelegten Blechzuschnitt auf. Zwei Sucherstempel gewährleisten die exakte Positionierung des Blechzuschnitts. Die Niederhalterkraft wird durch vier Gasdruckfedern der Firma Kaller, Tranas, Schweden, im Werkzeugoberteil bereitgestellt. Der maximale Abstand zwischen Niederhalterplatte und Werkzeugoberteil ist mit Hilfe von vier Distanzrohren geregelt. Während des Schneidvorgangs tauchen die Distanzhülsen in die Kopfplatte ein. Dadurch wird der Abstand von Niederhalterplatte zum Werkzeugoberteil verkleinert und somit der Niederhalterdruck durch die Gasdruckfedern auf den Blechzuschnitt aufgebracht. Neben der Funktion des Niederhalters erfüllt die Niederhalterebene auch die Führung des Schneidstempels. Ebenso wie die Matrizenebene ist auch die Stempelebene mit vier Führungsbuchsen versehen. Die Stempelebene besteht aus der Kopfplatte sowie einer Druckplatte und der Stempelhalteplatte. Der Schneidstempel wird mit der Stempelhalteplatte verschraubt und stützt sich während des Schneidvorgangs an der Druckplatte ab. Für die Variation des Schneidspaltes stehen vier Schneidstempel zur Verfügung. Es können die auf eine Blechdicke von 1,5 mm bezogenen relativen Schneidspalte 2 %, 10 %, 15 % sowie 20 % eingestellt werden.

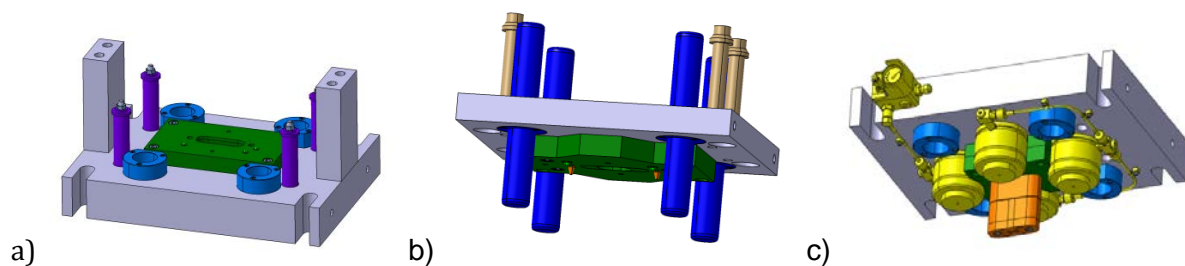


Abbildung 4.7: Ebenen des Einzelhubwerkzeuges für den Beschnitt der Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 1$  a) Matrizenebene b) Niederhalterebene c) Stempelebene

Der Vorschneidprozess für die Strategien „Eigenspannung“ und „Glattschnitt“ im offenen Schnitt wird mit Hilfe zweier weiterer Paare aus Stempel und Matrize realisiert. Die einzelnen Schritte zur Herstellung einer Schwingprobe mit Kerbformzahl  $K_t = 1$  durch Scherschneiden ist in der nachfolgenden Abbildung 4.8 dargestellt.

In zwei aufeinander folgenden Schritten wird die Außenkontur der Schwingprobe durch Wenden der Platine im Werkzeug schergeschnitten. Die Probe wird in beiden Schritten durch die Sucherlöcher positioniert. Eine Nut in der Matrizenplatte verhindert im zweiten Schritt ein Verdrücken des Grats zwischen Matrizenplatte und Niederhalterplatte. Schlussendlich erfolgt ein Abtrennen des überstehenden Materials auf die Endgeometrie der Schwingprobe.

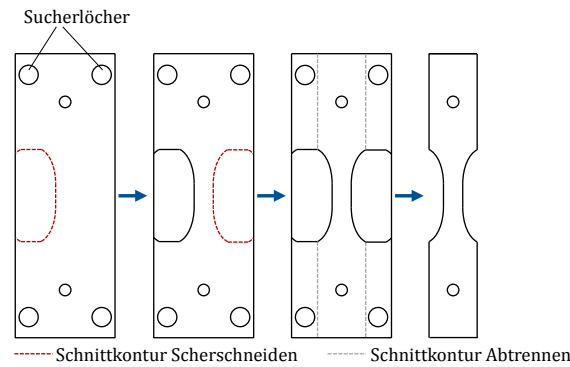


Abbildung 4.8: Abfolge zur Herstellung einer Schwingfestigkeitsprobe durch Scherschneiden mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Für die Herstellung der Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  und  $K_t = 4,6$  wurde Werkzeug 2 verwendet. Abbildung 4.9 zeigt den Aufbau des Stanzwerkzeuges in seinen drei Ebenen.

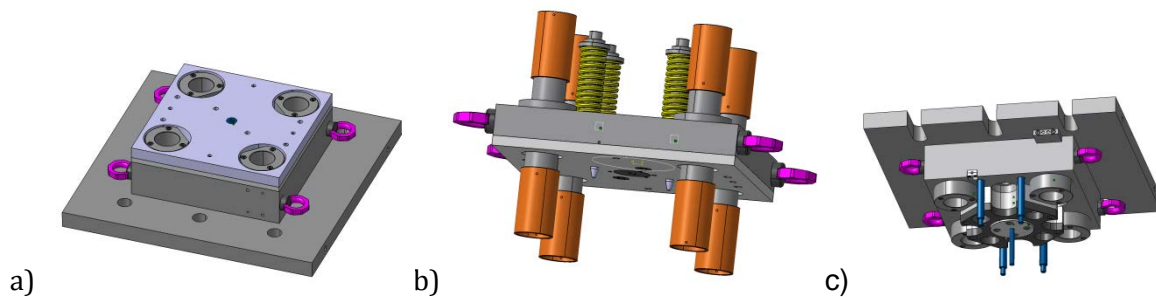


Abbildung 4.9: Ebenen des Einzelhubwerkzeuges für den Beschnitt der Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  und Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  a) Matrizeebene b) Niederhalterebene c) Stempellebene

Die Matrizeebene besteht aus Grundplatte, Druckplatte und Matrizenplatte. In der Grundplatte sind vier Führungsbuchsen verbaut. Die Druckplatte wurde zweiteilig gestaltet, um für unterschiedliche Schneidbuchsen eine ausreichend große Abstützung und eine genügend große Öffnung für den Schneidabfall zu gewährleisten. Um das Eintauchen der Sucherstempel zu ermöglichen ist die Matrizenplatte mit zwei erodierten Durchgangslöchern versehen. Eine weitere Bohrung erlaubt den Austausch von unterschiedlichen Schneidmatrizen. Die Niederhalterebene setzt sich aus der Niederhalterplatte und der Stempelführungsplatte sowie dem Stempelführungseinsatz zusammen. Vier Mittenbund-Führungssäulen sind in der Niederhalterplatte verbaut und führen die drei Werkzeugebenen präzise mit Hilfe von Kugelkäfigen. Die Niederhalterkraft wird mit Hilfe von vier Federpaketen auf den eingelegten Blechzuschnitt aufgebracht, welcher durch zwei Sucherstempel positioniert wird. Vier Distanzhülsen definieren den größtmöglichen Abstand zwischen Niederhalterplatte und Werkzeugoberseite. Kopfplatte, Druckplatte und Stempelhalterplatte sind die wesentlichen Bestandteile der Stempellebene. In die Kopfplatte sind vier Führungsbuchsen verbaut. Die Stempelhalterplatte nimmt den Schneidstempel auf und ist mit der Halteplatte verschraubt.

Die Abfolgen zur Herstellung von Schwingproben mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  und  $K_t = 4,6$  sind in Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 dargestellt.

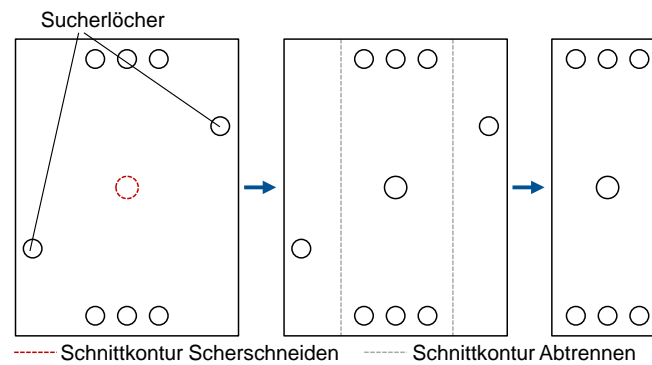


Abbildung 4.10: Abfolge zur Herstellung einer Schwingfestigkeitsprobe durch Scherschneiden mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

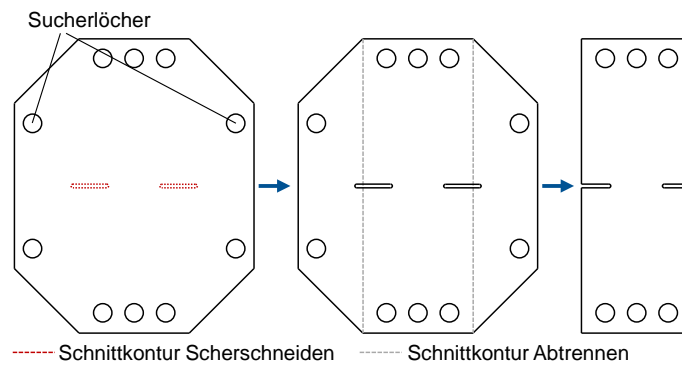


Abbildung 4.11: Abfolge zur Herstellung einer Schwingfestigkeitsprobe durch Scherschneiden mit Kerbformzahl  $K_t = 4,6$

Anhand der in die Ausgangsplatte eingebrachten Sucherlöcher kann das Loch mittig eingebracht werden. Mit zwei Stiften wird darauffolgend die Platinen durch die mittleren Bohrungen aufgenommen und die Außenkontur auf Maß gefräst.

Durch Wenden der Platine im Werkzeug werden in zwei aufeinander folgenden Schritten die Langlöcher in die Ausgangsplatte schergeschnitten. Die Probe wird in beiden Schritten durch die Sucherlöcher positioniert. Eine Nut in der Matrizenplatte verhindert im zweiten Schritt ein Verdrücken des Grats zwischen Matrizenplatte und Niederhalterplatte. Mit zwei Stiften wird darauffolgend die Platinen durch die mittleren Bohrungen aufgenommen und die Außenkontur auf Maß gefräst.

Die Verrundung der Schneidstempelkanten für die Strategien Verschleiß, Beschichtung und Glattschnitt wird manuell mit Schleifpaste aufgebracht. Dabei wird in kleinen Intervallen bis zum Erreichen des gewünschten Kantenradius mit Hilfe des Profilmessgerätes (siehe Kapitel 5.1.4) der Firma Mahr der Grad der Verrundung kontrolliert.

Beide Werkzeuge wurden in einer Schnellläuferpresse BSTA BSTA 1600-181 der Firma Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz betrieben. Die Presse verfügt über eine Nennpresskraft von 1600 kN und eine Aufspannplattenfläche von 1790 mm x 1070 mm. Mit Hilfe eines Hebelsystems kann die durch den Stanzprozess erzeugte Last im System verteilt werden. Dieses Hebelsystem sowie minimale Lagerspiele ermöglichen eine hohe Wiederholgenauigkeit und Präzision bei gleichzeitig geringer Werkzeugbeanspruchung. [92]

Der Pressenrahmen ist in geschlossener Vier-Säulen-Bauweise ausgeführt. Der Stößelantrieb erfolgt über einen Kurbeltrieb von einer Exzenterwelle aus, welche quer zur Bandlaufe Ebene angeordnet ist. [93], [94]

Die technischen Daten der Presse sind in nachfolgender Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Technische Daten der Schnellläuferpresse [93], [92]

<b><i>Kenngröße</i></b>	<b><i>BSTA 1600-181</i></b>
<i>Nennkraft [kN]:</i>	<i>1600</i>
<i>Hubzahl [1/min]:</i>	<i>100 – 600</i>
<i>Hubhöhe [mm]:</i>	<i>19, 25, 34, 43, 52, 60, 67, 75</i>
<i>Stößelverstellweg [mm]:</i>	<i>89</i>
<i>Werkzeugeinbauhöhe [mm]:</i>	<i>255,5 – 385</i>
<i>Aufspannplattenfläche [mm x mm]:</i>	<i>1790 x 1070</i>



## 4.4 Prinzipbauteil

Der an Flachproben ermittelte Einfluss des Kantenzustands auf die Schwingfestigkeitseigenschaften und auf die zyklischen Werkstoffkennwerte sollen mittels seriennaher Bauteilversuche überprüft und validiert werden. Aufgrund von unterschiedlich angreifenden Kräften im Fahrzeugbetrieb treten in der Karosserie komplexe Belastungszustände auf. So ist für die bauteilähnliche Probe ebenfalls ein vergleichbarer Spannungszustand darzustellen. Grundlegend sollen die Geometrie und die Fügstellen der bauteilähnlichen Probe so ausgelegt werden, dass bei variierenden Werkstoffen und Kantenbearbeitungszuständen jeweils die zu untersuchende Stelle in Form eines gekerbten Freischnittes die Bruchausgangsstelle darstellt. Die bauteilähnliche Probe zur Validierung der Versuchsergebnisse aus Kapitel 6 auf Probenebene lässt sich gesamt gesehen als T-Stoß zweier geschlossener Hutprofile zusammenfassen. Vergleichbare und gängige Konzepte einer solchen Verbindung lassen sich in einer Fahrzeugarchitektur beispielsweise in der Anbindung einer B-Säule mit dem darunter liegenden Schweller wiederfinden.

Für das Konzept der bauteilnahen Probe wurde ein ungekerbtes Hutprofil samt innenliegender Verstärkung mit einem gekerbten Hutprofil partiell stoffschlüssig mittels Schweißpunkten und Schweißnähten verbunden. In einer FE-Simulation bei der Opel Automobile GmbH wurde die Bauteilgeometrie optimiert und die Abmessungen in Form eines CAD-Datensatzes erstellt. Als Randbedingung wurde zudem eingangs definiert, dass nicht nur die verwendeten Blechwerkstoffe aus der gleichen Liefercharge stammen wie die gekerbten Flachproben zur Ermittlung des resultierenden Schwingfestigkeit, sondern auch die Kantenbearbeitung durch Scherschneiden im Werkzeug am utg München durchgeführt wird. Die Bauteilgeometrie wurde unter der Randbedingung erstellt, dass die Abmessungen der Grundplatte für das gekerbte Hutprofil in die Matrizenplatte des Scherschneidwerkzeuges am utg München passen. Die Maße der Platine für das gekerbte Hutprofil sind Abbildung 4.12 zu entnehmen. Zusätzlich ist der Abwicklung die durch die Biegung entstehende Verkürzung des Bleches hinzugerechnet, damit die korrekten Endabmessungen eingehalten werden. Der Freischnitt wurde dementsprechend analog zum Scherschneidprozess an den Proben mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  mit dem Werkzeug 2 aus Abbildung 4.9 hergestellt. Dies realisiert eine vergleichbare Herstellung des Kantenbearbeitungszustandes Scherschneiden mit den flachen Grundwerkstoffproben.

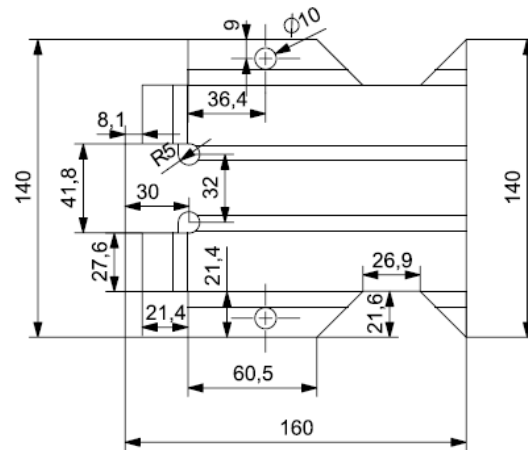


Abbildung 4.12: Geometrie und Abmessungen der Grundplatte zur Herstellung des gekerbten Hutprofils

Zur betriebsfestigkeitsgerechten Auslegung der bauteilähnlichen Probe wurde die Methode der Finiten Elemente verwendet, um rechnerisch ein Versagen in der Kerbe vorhersagen zu können. Eine Vernetzung der CAD-Daten wurde unter Zuhilfenahme des Pre-Prozessors HyperMesh mit linearen Schalenelementen unterschiedlicher Elementkantenlängen durchgeführt. Zur realitätsnahen Abbildung der Kerbspannungen ist eine durchschnittliche Elementkantenlänge von 0,1 mm gewählt worden; die restliche Struktur weist hingegen eine größere Elementkantenlänge auf. Einzig Schweißpunkte sind mittels linearen Solid-Elementen und Schweißnähte mittels Rigid-Elementen abgebildet worden. Durchgeführt wurde eine linearelastische Finite Elemente Analyse mittels des Solvers Optistruct. Abbildung 4.13 zeigt die Konstruktion der bauteilähnlichen Probe, die als zentrales Element das gekerbte Hutprofil enthält.

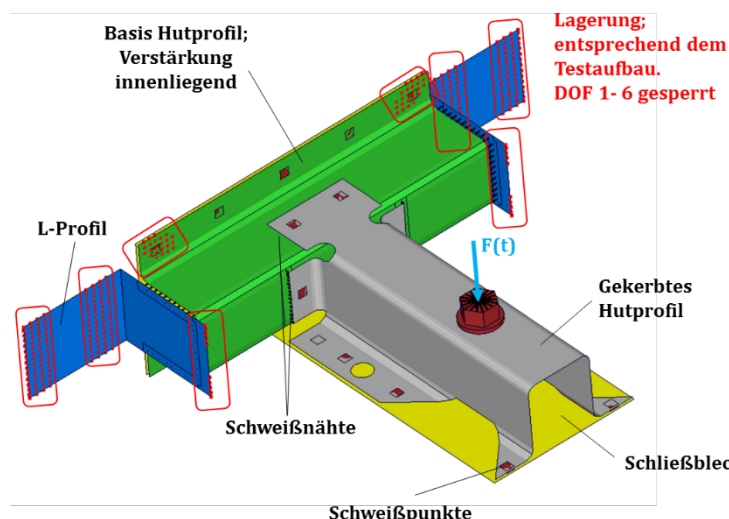


Abbildung 4.13: Konstruktion der bauteilähnlichen Probe samt Lagerung und Belastung

Als Lagerung der Probe wurden seitliche L-Profile angebracht, welche auf dem Spannfeld verprazt werden können. Die Krafteinleitung erfolgt mittels einer Verschraubung samt Anbindung an den Prüfzylinder. In einem ersten Schritt diente das Finite Elemente Modell der bauteilähnli-

chen Probe dazu, sicher zu stellen, dass sich die höchst beanspruchten Bereiche in den dafür vorgesehenen Kerben am Übergang zum Basis Hutprofil befinden, was in folgender Abbildung 4.14 ersichtlich ist.

**Höchst beanspruchte**

**Bereiche im Freischnitt der Kerben**

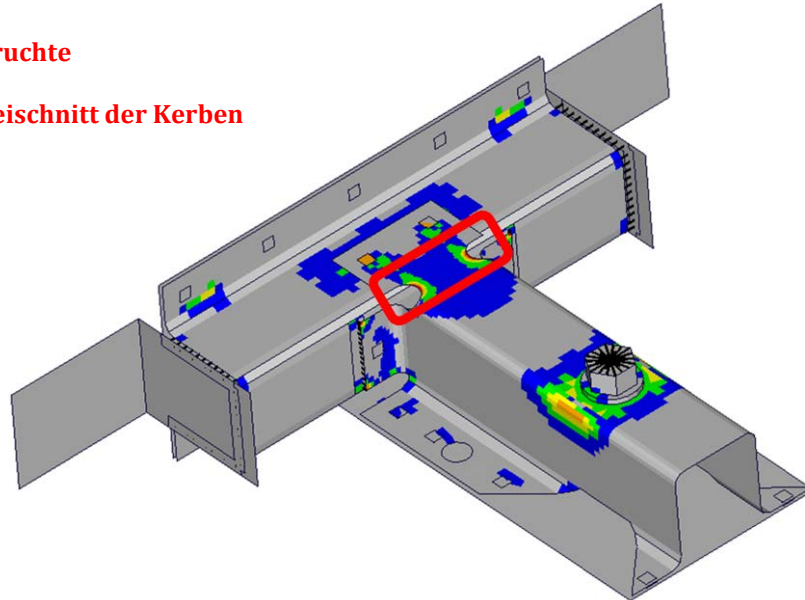


Abbildung 4.14: Ergebnisse einer Finite Elemente Analyse: Spannungsverteilung (von Mises) an der bauteilähnlichen Probe

Entsprechend der Farbgebung der Skalierung bedeuten rot dargestellte Elemente höchste Spannungen (hier Vergleichsspannungen nach von Mises). Zur Schwingfestigkeitsuntersuchung der bauteilähnlichen Proben wurden zugschwellende Einstufenversuche verschiedener Krafthorizonte bei einem Kraft- bzw. Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  gewählt und durchgeführt. Dabei wurde die Krafteinleitung über die Verschraubung in dem gekerbten Hutprofils induziert, was wiederum zu einer überwiegenden Biegezug-Beanspruchung im Kerbgrund führte.

Zur abschließenden Ermittlung der rechnerischen Lebensdauer ist der Solver-Code DesignLife unter Verwendung der in Kapitel 2.5.1 vorgestellten Methode verwendet worden. Abbildung 4.15 zeigt beispielhaft die rechnerische Lebensdauer der bauteilähnlichen Probe unter Verwendung der zuvor erwähnten Lagerung einer Belastung am Werkstoff DP800. Der Krafthorizont beträgt für dieses Beispiel  $F_0 = 4,9$  kN und  $F_U = 0,49$  kN. Außerdem gilt es zu erwähnen, dass keine unterschiedlichen Kantenzustände in der rechnerischen Abschätzung verwendet wurden, da diese einzig der Auslegung der bauteilähnlichen Probe diene.

Die dargestellten Ergebnisse lassen sich dabei als Wiederholungsanzahl der aufgebrachten Prüfkraft verstehen. Sie zeigen außerdem, dass der höchst beanspruchte Bereich in den Kerben liegt und rechnerisch der Lebensdauer der Schweißpunkte unterlegen ist, wodurch ein früheres Versagen des Blechs im Vergleich zu einem Schweißpunkt zu erwarten ist.

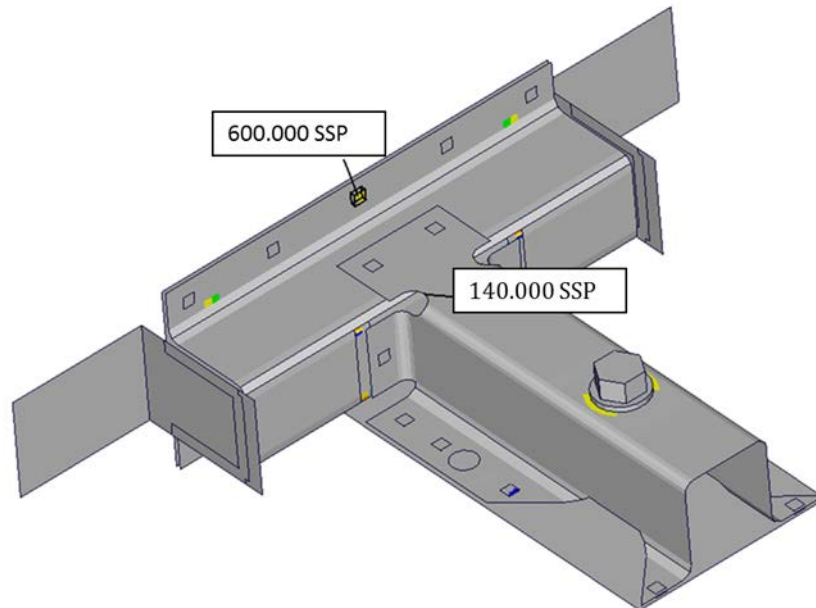


Abbildung 4.15: Ergebnisse der Lebensdauerberechnung der bauteilähnlichen Probe für die Kräfte  $F_0 = 4,9 \text{ kN}$  und  $F_U = 0,49 \text{ kN}$ , beispielhaft am Werkstoff DP800

Aus der rechnerischen Vorauslegung wurde eine Abwicklung des Bauteilprofils in CAD übertragen, um die Einzelkomponenten aus den Grundblechen entsprechend im Prototypenbau im Hause der Daimler AG, Sindelfingen fertigen zu können.

Abbildung 4.16 gibt die Abmessungen des gesamten Prinzipbauteiles wider.

Das gekerbte Hutprofil wurde aus den im Projekt verwendeten Mehrphasenstählen DP800 oder DP1000 gefertigt und abgekantet. Der darin dargestellte Freischnitt wurde entsprechend mit der jeweiligen Kantenbearbeitungstechnologie vorbearbeitet und nach dem Abkanten mit den anderen Profilen entsprechend zum T-Stoß-Profil miteinander gefügt. Die verwendeten Kantenbearbeitungszustände sind analog zu Grundwerkstoffproben folgende:

- Fräsen mit anschließendem Polieren,
- Scherschneiden,
  - ohne und mit Verschleiß des Scherschneidwerkzeuges,
- Laserschneiden.

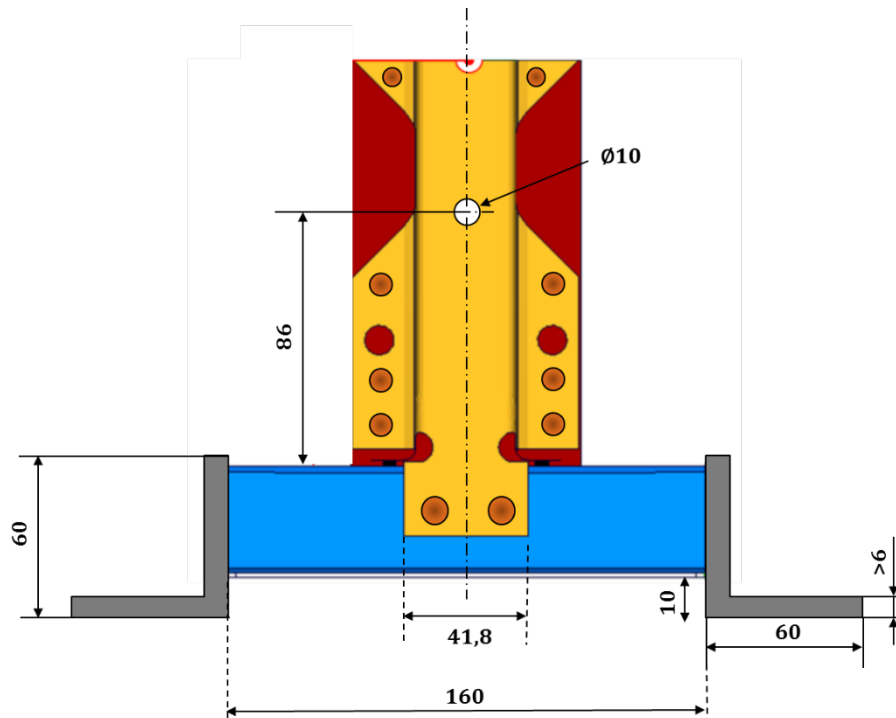


Abbildung 4.16: Prinzipskizze der verwendeten bauteilnahen Probengeometrie

Tabelle 4.4 gibt einen Überblick zu den experimentellen Versuchen für die ausgewählten Grundwerkstoffe DP800 und DP1000. Je Variante wurden sechs Wiederholungen mit unterschiedlichen Kraftniveaus (Kraftamplituden) und unterschiedlichen Kantenbearbeitungen durchgeführt. Analog zu den Probenversuchen wird die Kantenbearbeitung Fräsen und anschließendes Polieren als Referenzzustand verwendet. Für den Grundwerkstoff DP800 wurden zusätzlich die Parameter der Technologie des Scherschneidens in Referenz und Verschleiß unterschieden. Wie dem Kapitel 2.7 zu entnehmen ist, zeichnet sich der Parameter Verschleiß mit einer höheren Rauheit an der Bruchfläche der Schnittkanten aus.

Der Freischnitt wurde zur Darstellung des Kantenzustandes „Fräsen mit Polieren“ aus den Blechplatten herausgefräst. Die Entnahme aller Proben erfolgte quer zur Walzrichtung. Anschließend wurde, analog zu der Herstellung der gekerbten Flachproben, der Freischnitt von Hand in mehreren Schritten feingeschliffen und poliert.

Für die Kantenbearbeitung Laserschneiden wurden die einzelnen Blechplatten im Freischnitt mit einem 6 kW Festkörperlaser (Faserlaser) der Firma Bystronic mit einer Schnittgeschwindigkeit von 2,8 m/min bearbeitet.

Das Scherschneiden der Platinen bzw. des Freischnittes wurde am utg München am Werkzeug 2 mit den in Kapitel 4.3.3 angegebenen Parameter umgesetzt.

Tabelle 4.4: Übersicht der zur Erprobung der bauteilnahen Geometrie mit unterschiedlichen Kantenbearbeitungszuständen

Werkstoff	Kantenbearbeitung	R-Verhältnis
DP1000	Referenz: Gefräst und poliert	0,1
DP1000	Laserschneiden	0,1
DP1000	Scherschneiden	0,1
DP800	Referenz: Gefräst und poliert	0,1
DP800	Laserschneiden	0,1
DP800	Scherschneiden	0,1
DP800	Scherschneiden (Verschleiß)	0,1

Um werkstoffbedingte Einflüsse in Bezug auf der Streuung mechanischen Eigenschaften ausschließen zu können, wurden für die genannten Blechwerkstoffe dieselben Chargen verwendet, wie zur Bewertung der zyklischen Werkstoffkennwerte. Das untere Hutprofil, das Basisprofil, wurde bei allen Versuchsserien aus dem Werkstoff HC340 gefertigt. Alle Bleche weisen eine Ausgangsblechdicke von  $s = 1,5$  mm auf. Die Hutprofile wurden jeweils mit einem Blech auf der Unterseite (einem Schließblech) verschlossen. Um die Hutprofile mit dem jeweiligen Schließblech zu verbinden, wurden die dafür vorgesehenen Flansche durch eine Aneinanderreihung von Schweißpunkten verbunden, um eine einfache stabile und stoffschlüssige Verbindung herzustellen.

Die Durchführung der Bauteilschwingfestigkeitsversuche erfolgte an einem servohydraulischen Prüfstand der Firma MTS Systems mit einer maximalen Prüfkraft von 25 kN. Ein querliegender servohydraulischer Zylinder wird auf die Höhe der Krafteinleitung justiert und bringt die schwel-lende Druckbelastung auf, um im Freischnitt des gekerbten Hutprofils eine Zugbelastung zu er-zeugen. Die Einspannung der T-Stoßprofile wird so realisiert, dass die L-Profile über eine mechanische Spanntechnik mittels Pratzen auf den flexiblen Spanntisch fixiert werden, siehe Abbildung 4.17.

Die einzelnen Bauteilproben werden jeweils auf zwei verschiedenen Lastniveaus mit einer sinusförmigen Lastfrequenz von 20 Hz und einem Spannungsverhältnis  $R = 0,1$  bis Anriss geprüft. Um zu detektieren, ob ein Anriss vorliegt, konnte aus den ersten Versuchen eine Wegänderung von 1 mm als sinnvolles Anrisskriterium ermittelt werden, siehe Abbildung 4.18. Wird eine Wegänderung von der ursprünglichen maximalen Verlängerung der Probe von einem Millimeter erreicht, stoppt der Hydraulikzylinder die zyklische Belastung. Werden andernfalls eine Grenzs-chwingspielzahl von 2.000.000 Lastwechsel erreicht, wird der Versuch gestoppt und der Ver-such wird als Durchläufer gewertet.



Abbildung 4.17: Einspannung der bauteilnahen Geometrie am servohydraulischen Prüfstand MTS Systems im Hause der Daimler AG, Sindelfingen

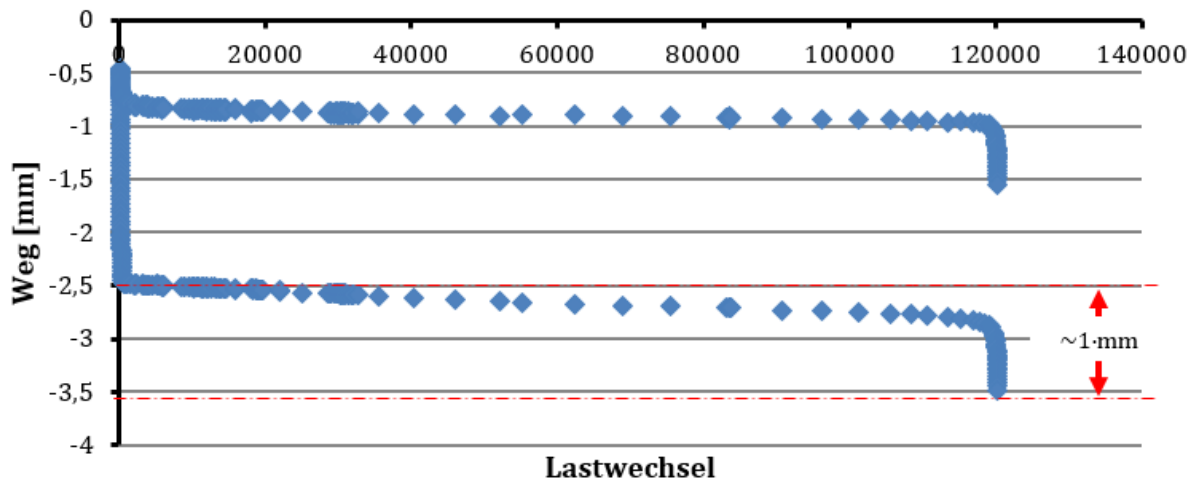


Abbildung 4.18: Beispielhafte Aufzeichnung zur Bewertung des Anrisskriteriums mit 1 mm Wegänderung als Überwachungskenngröße

## 5 Versuchs- und Auswertetechnik

### 5.1 Randzonencharakterisierung

Um das Laserstrahlschneiden und Scherschneiden der unterschiedlichen Werkstoffe hinsichtlich des in Kapitel 3.2 beschriebenen Oberflächeneinflusses zu bewerten, werden an allen Probenvarianten Randzonencharakterisierungen durchgeführt. Dafür werden an den Proben jeder Probenvariante Oberflächenmessungen auf der Schnittkante und der Walzoberfläche sowie Mikrohärtmessungen in der Randschicht hinter der Schnittkante und im Grundgefüge durchgeführt. Die Randzonencharakterisierung der Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten wird an der Hochschule Esslingen durchgeführt. Die Randzonencharakterisierung der Proben mit schergeschnittenen Kanten wird hingegen am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) an der Technischen Universität München durchgeführt. Da sich die Vorgehensweisen bei den Oberflächenmessungen und Härteprüfungen an den verschiedenen Probenvarianten teilweise voneinander unterscheiden, wird im Folgenden in separate Kapitel unterteilt.

#### 5.1.1 Mikrohärtprüfung an Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten (HS Esslingen)

Für die Mikrohärtprüfung wird das Verfahren nach Vickers gewählt, bei welchem ein pyramidenförmiger Prüfkörper mit definierter Kraft senkrecht in die Oberfläche eingedrückt wird. Die Mikrohärtprüfung wird nach den Vorgaben in [95] für die Härteprüfung von metallischen Werkstoffen durchgeführt. Dabei wurde explizit auf die Einhaltung der Vorgaben bezüglich des Abstands eines Härteeindrucks zum Rand bzw. zu einem anderen Härteeindruck geachtet, um so einer Verfälschung der Messwerte untereinander vorzubeugen. Für die Untersuchungen wird die vollautomatisierte, rechnergestützte Härteprüfmaschine LM 100AT von der Firma Leco verwendet. Um die Härte des Grundgefüges und der Randschicht zu untersuchen, müssen zuvor Querschliffe des zu untersuchenden Probenbereichs erstellt werden. In Abbildung 5.1 ist die Schliffoberfläche beziehungsweise der Prüfquerschnitt in welchem die Härtemessungen durchgeführt werden schematisch an einer ungekerbten Flachprobe dargestellt.

Um den Härteverlauf in beiden Raumrichtungen (x- und z-Achse in Abbildung 5.2) zu ermitteln, wird der Prüfquerschnitt aus Abbildung 5.1 mit einem Raster aus Härtemessungen mit definiertem Abstand zueinander überzogen, siehe Abbildung 5.2. Da der Härteverlauf feiner abgebildet werden soll als es die Abstandsvorgaben in [95] zulassen, werden die Härtemessungen in verschiedene Ebenen über die Probenlängsrichtung verteilt. Das bedeutet, wenn die Messungen in einer Ebene fertig sind, wird die gemessene Querschnittsebene abgeschliffen und die Messungen auf der neuen Ebene mit verschobenem Raster wiederholt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5.2



schematisch dargestellt. Bei einem Vergleich der Messwerte aus den verschiedenen Ebenen, wird davon ausgegangen, dass die Härtewerte in Längsrichtung ( $y$ -Achse in Abbildung 5.2) der Probe konstant sind.

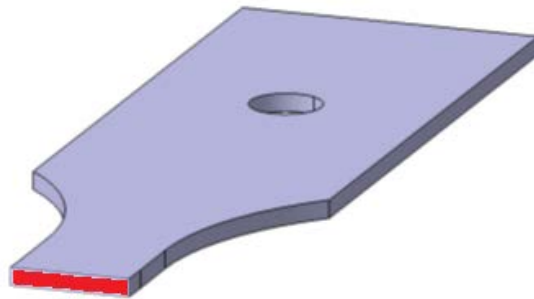


Abbildung 5.1: Prüfquerschnitt (rot gekennzeichnet) für Mikrohärtemessungen nach Vickers

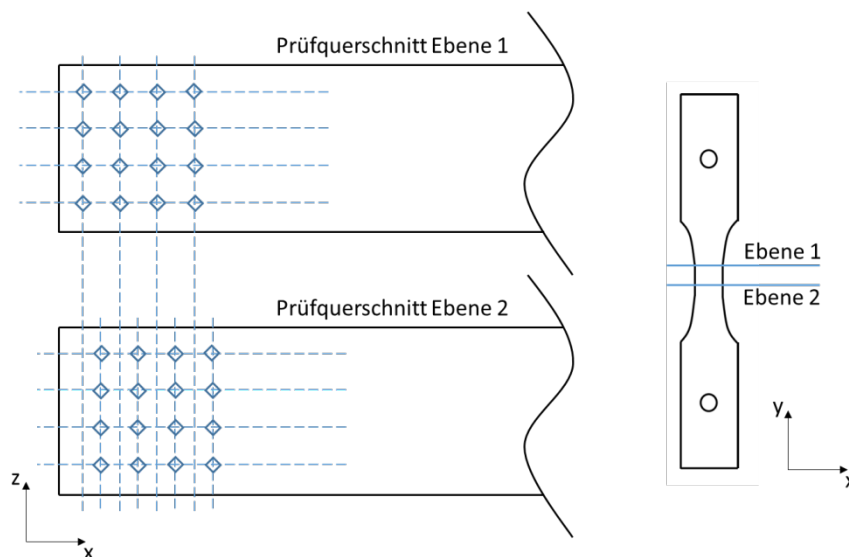


Abbildung 5.2: Verteilung der Härteeindrücke über den Probenquerschnitt einer ungedrehten Flachprobe, schematisch

### 5.1.2 Oberflächenmessung an Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten (HS Esslingen)

Die Oberflächen werden nach dem Tastschnittverfahren [96] vermessen. Die Oberflächenmessungen werden in Probenlängsrichtung auf der Walzoberfläche und auf den Kantenflächen durchgeführt. Der Messwert an einer Probe wird als Mittelwert aus fünf Messstrecken gebildet. In der Regel werden mindestens drei Proben einer Versuchsreihe vermessen.

An der Hochschule Esslingen werden die Oberflächenmessungen an den ungedrehten Flachproben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten mit der Messeinrichtung MarSurf GD 25 von der Firma Mahr durchgeführt. Dafür werden die Messstrecken parallel in gleichmäßigem Abstand auf der Walzoberfläche beziehungsweise der Kantenfläche verteilt. In Abbildung 5.3

sind die fünf Messstrecken exemplarisch an einer laserstrahlgeschnittenen Kante einer ungekerbten Probe dargestellt.

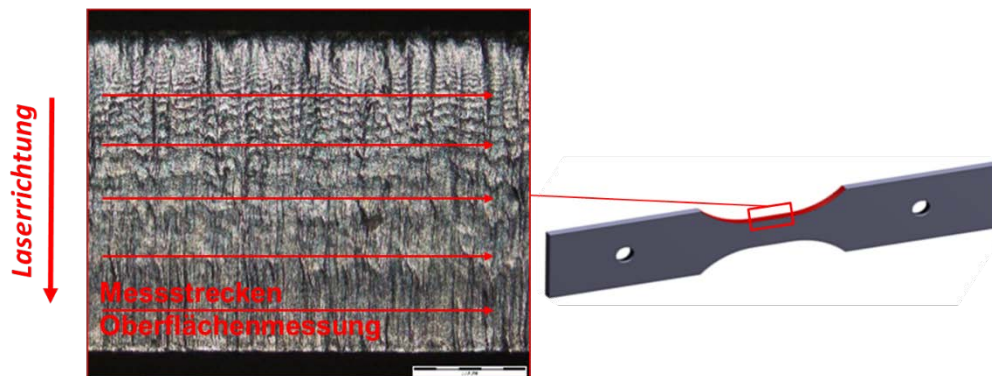


Abbildung 5.3: Messstrecken der Oberflächenmessung auf der Kante einer laserstrahlgeschnittenen ungekerbten Flachprobe

Die Messungen werden mit den in Tabelle 5.1 eingetragenen Messparametern durchgeführt. Bei der Durchführung der Messungen wurden die Vorgaben in DIN EN ISO 4288 [97] zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit nach dem Tastschnittverfahren berücksichtigt und eingehalten.

Tabelle 5.1: Messparameter der Oberflächenmessung für ungekerbte polierte und laserstrahlgeschnittene Proben an der Hochschule Esslingen

Filter $\lambda_c$	0,8 mm
Messstreckenlänge	5,6 mm
Messgeschwindigkeit	0,1 mm/s
Abtastrate	0,0002 mm/point

### 5.1.3 Mikrohärteprüfung an Proben mit schergeschnittenen Kanten (utg)

Die Aufhärtung der Schereinflusszone wird am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen nach DIN 6507-1 [95] mit Hilfe der Vickers-Mikrohärteprüfung ermittelt. Als Eindringkörper dient bei der standardisierten Härteprüfung nach Vickers eine quadratische Diamantpyramide. Das Einbringen des Härteeindrucks erfolgt für alle Werkstoffe einheitlich bei einer Prüfkraft von  $F_p = 0,4903 \text{ N}$  (HV 0,05) mit einer Haltezeit von  $t = 13 \text{ s}$ . Als Prüfgerät dient ein Totlastmikrohärteprüfgerät LECO AMH-43 der Firma LECO Instrumente GmbH, Mönchengladbach. Das Härteprüfgerät ist mit einem motorischen X-Y-Tisch ausgestattet und ermöglicht dadurch eine vollautomatische Vermessung der Härteverläufe. Nach dem Eindruck des Diamant-Eindringkörpers werden mit Hilfe einer im Härteprüfgerät integrierten, digitalen Kamera die Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  des Eindrucks vermessen und arithmetisch gemittelt.

Aus der gemittelten Diagonallänge  $d$  und der Kenntnis über die Prüfkraft  $F_P$  kann die Härte mit Hilfe der nachfolgenden Formel berechnet werden.

$$HV = 0,102 \frac{2 F_P \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F_P}{d^2} \quad (5.1)$$

mit

$HV$  Vickershärte [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$F_P$  Prüfkraft [N]

$d$  Arithmetischer Mittelwert der beiden Diagonallängen  $d_1$  und  $d_2$  [mm]

Die Bezeichnung der Vickershärte erfolgt entsprechend DIN 6507-1 [95] nach der folgenden Nomenklatur.

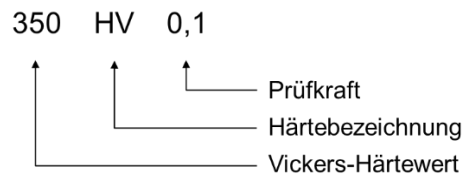


Abbildung 5.4: Bezeichnung Vickershärte nach [95]

Um die Aufhärtung der Schereinflusszone quantifizieren zu können, müssen Querschliffe angefertigt werden. Die Schliffe werden analog zu Abbildung 5.1 aus den Proben entnommen, daraufhin geschliffen und bis zu einer Körnung von  $1 \mu\text{m}$  poliert.

Der Härteverlauf wird mit Hilfe von zwölf parallel zur Schnittfläche verlaufenden Messlinien ermittelt. Der Abstand der Messlinien zueinander sowie die Verteilung des Messrasters werden in Abbildung 5.5 verdeutlicht.

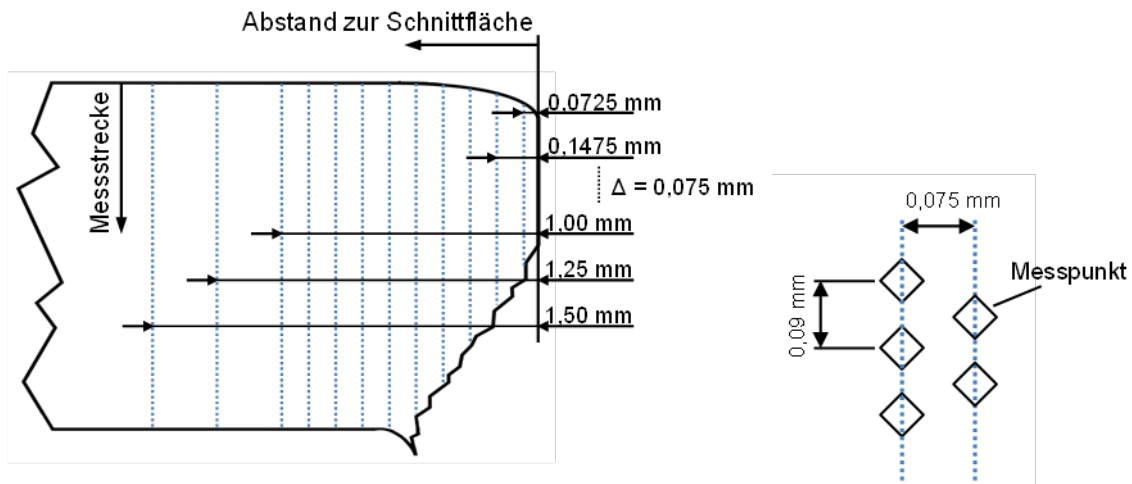


Abbildung 5.5: Messraster zur Bestimmung der Schnittflächenaufhärtung

[95] gibt Empfehlungen für den Abstand des Mittelpunktes des Prüfabdrucks zum Rand der Probe sowie für den Abstand der Mittelpunkte zweier nebeneinander liegender Punkte. Die Entfernung der einzelnen Messpunkte zueinander sowie der Mindestabstand zur Schnittteilaußenkante werden gemäß [95] berücksichtigt. Für die untersuchten Werkstoffe wird ein einheitliches Messraster verwendet, wobei zur Erhöhung der Messpunktdichte die Messlinien versetzt zueinander angeordnet sind. Das Messraster wurde auf Basis des weichsten Werkstoffes DC04 erstellt, welcher die größten Härteeindrucksabstände bedingt.

Zur Illustration der Ergebnisse wird mit Hilfe eines Matlab-Programms die Aufhärtung der Scherinflusszone in Falschfarbendarstellung veranschaulicht.

#### 5.1.4 Oberflächenmessung an Proben mit schergeschnittenen Kanten (utg)

Zur quantitativen Beurteilung der Schnittflächenqualität werden die Versuchsteile nach dem Tastschnittverfahren an einem kombinierten Profil- und Rauheitsmessplatz XCR 20 der Firma Carl Mahr Oberflächentechnik GmbH, Göttingen vermessen. Neben der makroskopischen Beschaffenheit der schergeschnittenen Oberfläche erfolgen weiterhin Rauheitsmessungen im Glattschnitt- und Bruchflächenbereich zur Erfassung der mikroskopischen Beschaffenheit dieser Flächen.

##### Schnittflächenkenngrößen

Zur Ermittlung der charakteristischen Schnittflächenkenngrößen wird an den ungekerbten Versuchsteilen auf beiden Seiten an jeweils fünf Messstellen quer zur Probenlängsrichtung die Kontur der schergeschnittenen Bauteilkante mit Hilfe des Profilmessplatzes und einer Doppeltastspitze (Kennzeichnung DS9) aufgezeichnet. Abbildung 5.6 verdeutlicht die Verteilung der Messpunkte exemplarisch an einer ungekerbten Probe.

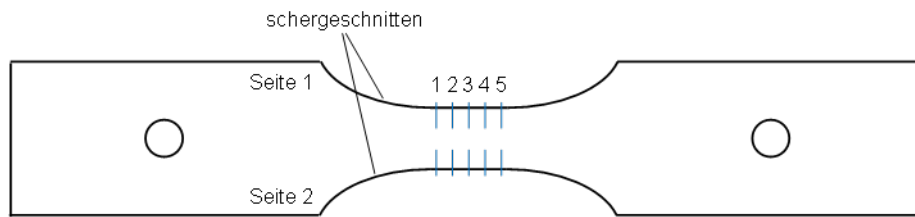


Abbildung 5.6: Verteilung der Messpunkte zur Bestimmung der Schnittflächenkennwerte

Die Positionierung der Probe erfolgt anhand einer für diesen Anwendungsfall konstruierten Vorrichtung. Mit Hilfe eines auf die Versuchsteile zugeschnittenen Makros werden die Schnittkontur erfasst und die Schnittflächenkenngrößen bestimmt.

Die Bewertung der Schnittflächen erfolgt nach VDI-Richtlinie 2906-1 [47]. Für jede Probe wurden die messpunktspezifischen Kenngrößen gemittelt und in folgende Ergebnisgrößen umgerechnet:

$$\text{Anteil Kanteneinzug} = \frac{h_E}{s} = \frac{\sum_1^i h_{Ei}}{\sum_1^i s_i}; i = \text{Anzahl der Messstellen} \quad (5.2)$$

$$\text{Glattschnittanteil} = \frac{h_S}{s} = \frac{\sum_1^i h_{Si}}{\sum_1^i s_i}; i = \text{Anzahl der Messstellen} \quad (5.3)$$

$$\text{Bruchflächenanteil} = \frac{h_B}{s} = \frac{\sum_1^i h_{Bi}}{\sum_1^i s_i}; i = \text{Anzahl der Messstellen} \quad (5.4)$$

$$\text{Anteil Grat} = \frac{h_G}{s} = \frac{\sum_1^i h_{Gi}}{\sum_1^i s_i}; i = \text{Anzahl der Messstellen} \quad (5.5)$$

Die gekerbten Proben werden zur Vermessung der Schnittflächenkenngrößen getrennt. An der Kerbgeometrie mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  werden pro Teil zwei Messstellen vermessen, an der Kerbgeometrie mit Kerbformzahl  $K_t = 4,7$  auf Grund der kleinen Geometrie lediglich eine Messstelle.

### Rauheitskenngrößen

Neben den Schnittflächenkenngrößen werden am Rauheitsmessplatz weiterhin die Rauheitskenngrößen arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$ , gemittelte Rautiefe  $R_z$  sowie die maximale Einzelrautiefe  $R_{max}$  ermittelt. Dazu wird für die ungekerbte Geometrie auf beiden Probenseiten in Probenlängsrichtung sowohl im Glattschnitt- als auch im Bruchflächenbereich die Rauheit gemessen und nach DIN EN ISO 4287 [73] ausgewertet. Abbildung 5.7 zeigt die schematische Anordnung der Messstrecken auf der schergeschnittenen Kante.

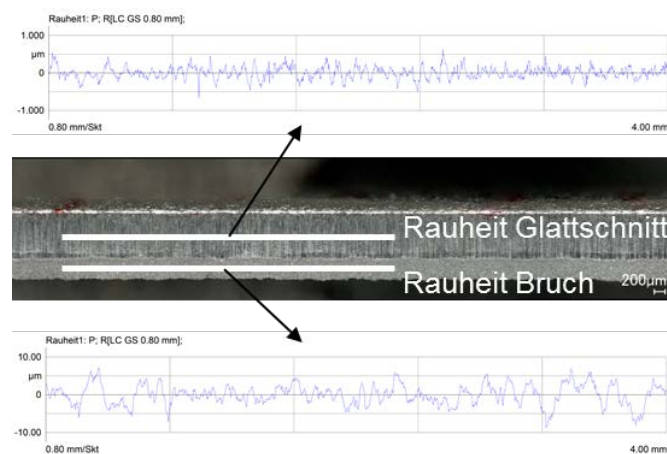


Abbildung 5.7: Anordnung der Messstrecken zur Bestimmung der Rauheitskenngrößen

An den gekerbten Proben mit Kerbgeometrie  $K_t = 2,5$  werden ebenfalls die Rauheitskenngrößen im Glattschnitt- und Bruchflächenbereich aufgezeichnet, die Proben mit Kerbgeometrie  $K_t = 4,6$  lassen aufgrund der geringen Größe keine Messung der Rauheit zu.

Die Wahl der Grenzwellenlänge, welche von der zu erwartenden Rauheit der Werkstückoberfläche abhängt, erfolgte nach DIN EN ISO 4288 [97]. Die verwendeten Messparameter zur Bestimmung der Oberflächenrauheit der schergeschnittenen Kanten sind in Tabelle 5.2 angegeben.

Tabelle 5.2: Messparameter der Oberflächenmessung für schergeschnittene Proben am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen

Filter $\lambda_c$	0,8 mm
Messstreckenlänge gesamt $l_t$	4,8 mm
Messgeschwindigkeit	0,5 mm/s
Abtastrate	0,0005 mm/point

## 5.2 Quasistatischer Zugversuch

Die quasistatischen Zugversuche werden nach [90] bei Raumtemperatur an einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick mit einer Maximallast von 100 kN durchgeführt. Die ermittelten mechanisch-technologischen Kennwerte der verwendeten Werkstoffe sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Da für die ungekerbten schergeschnittenen Flachproben nur ein Schneidwerkzeug für die Herstellung der Probengeometrie aus Abbildung 4.3 gefertigt wurde, können die Untersuchungen zum Einfluss der Kantenbearbeitung auf die mechanisch-technologischen Kennwerte nicht an der nach [90] vorgeschriebenen Probengeometrie erfolgen. Stattdessen wird der Einfluss an der in Abbildung 4.3 dargestellten ungekerbten Probengeometrie untersucht. Die vorgeschriebene Messlänge von 80 mm und Probenbreite von 20 mm werden auf die Probengeometrie der unge-

kerbten Probe angepasst. Dementsprechend wird eine Messlänge von 10 mm sowie die vorliegende Probenbreite von 10 mm verwendet. Die restlichen Vorgaben zur Durchführung des quasistatischen Zugversuch nach [90] sind davon unbeeinflusst und werden übernommen.

### 5.3 E-Modul Ermittlung

Der E-Modul spielt bei der Auswertung der dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche eine wichtige Rolle (siehe Kapitel 5.6.1), da er das Versuchsergebnis in hohem Maße beeinflussen kann [98]. Daher wurde der E-Modul der verschiedenen Stähle nicht direkt aus dem quasistatischen Zugversuch, sondern in einem separaten Versuch ermittelt.

An den ungekerbten Proben mit der Geometrie aus Abbildung 4.2 wurde ein biegekompensierter beidseitiger Ansetzaufnehmer angebracht mit einer Messlänge von 20 mm. Anschließend wurden die Proben in einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick mit einer Maximallast von 100 kN wiederholt im elastischen Bereich belastet und entlastet. Die auf diese Weise ermittelten E-Moduln der verschiedenen Stahl-Werkstoffe sind ebenfalls in Tabelle 4.2 eingetragen.

### 5.4 Kerbzugversuch

Zugversuche an gekerbten Proben, sogenannte Kerbzugversuche, sind in [90] nicht vorhergesehen. Dennoch finden sich in der Literatur zahlreiche Beispiele für die Anwendung und Durchführung von Kerbzugversuchen. So lassen sich nach [99] die Ergebnisse von Kerbzugversuchen an Proben unterschiedlicher Kerbgeometrie für die Erstellung einer Grenzformänderungskurve verwenden. In [100] wird beschrieben, dass die aus Kerbzugversuchen gewonnene Kerbzugdehnung Rückschlüsse zur Tief-, bzw. Streckzieheignung von Werkstoffen ermöglicht, da der beim Kerbzugversuch erzielte Spannungszustand den beim Umformen auftretenden Spannungsverhältnissen nahekommt. In [101] wird der Kerbzugversuch als Einfachprüfverfahren für die Bestimmung des Umformvermögens von Blechwerkstoffen angewendet.

Für die Durchführung von Kerbzugversuchen im Rahmen dieses Projektes wird die Geometrie der gekerbten Schwingproben aus Abbildung 4.3 verwendet. Die Prüfungsgeschwindigkeit der verschiebungskontrollierten Versuche und die freie Einspannlänge von 80 mm werden in Anlehnung an [90] gewählt. Für die Auswertung werden entsprechend Abbildung 5.8 die statische Maximalkraft  $F_{max}$ , die gesamte Verlängerung bei Maximallast  $\Delta l_{ges}$  und die bleibende Verlängerung bei Maximallast  $\Delta l_{bl}$  ermittelt. Weiterhin werden die Gesamt-Arbeitsaufnahme bei Maximallast  $W_{max}$  sowie der plastische Anteil der Arbeitsaufnahme  $W_{plast}$  bestimmt. Die Arbeitsaufnahme beschreibt die durch die Verformungskurve eingegrenzte Fläche im Kraft-Weg-

Diagramm in Abbildung 5.8. Aus der Maximalkraft kann mit dem Kerbquerschnitt  $A_k$  die Kerbzugfestigkeit  $R_{m,k}$  berechnet werden [102].

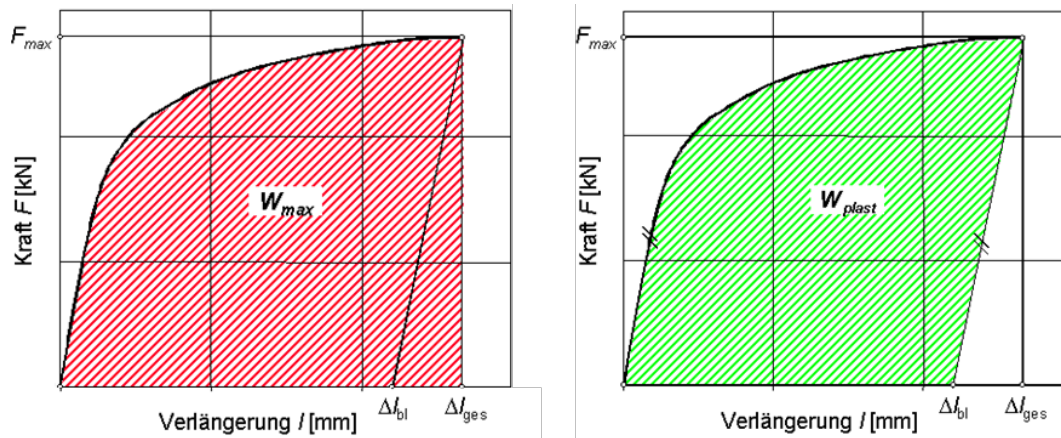


Abbildung 5.8: Auswertung der quasistatischen Kerbzugversuche, schematisch, gesamte Arbeitsaufnahme  $W_{max}$  links, plastischer Anteil der Arbeitsaufnahme  $W_{plast}$  rechts [102]

## 5.5 Spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche

Die spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche werden mit einer unwuchterregten Resonanzprüfmaschine der Firma Sincotec vom Typ „POWER SWING MOT“ mit motorischem Antrieb und einer Maximalkraft von 100 kN durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.9 dargestellt und beschrieben.

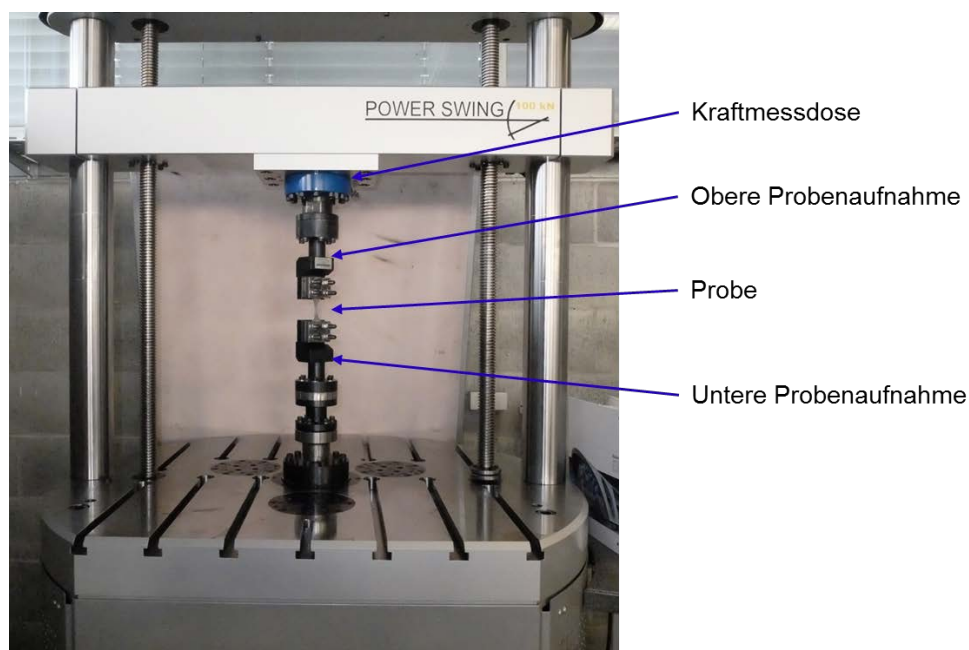


Abbildung 5.9: Versuchsaufbau der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche

Die Frequenz beträgt je nach Probengeometrie zwischen 51 und 58 Hz. Zur Vermeidung des Ausknickens werden bei den Versuchen die bei dem Lastverhältnis  $R = -1$  durchgeführt werden,



Knickstützen an den Proben angebracht. Zur Minimierung der Reibung zwischen der Probenoberfläche und der Knickstütze sind die Innenseiten der Knickstütze mit PTFE-Folie beklebt. In Abbildung 5.10 ist eine ungekerbte Probe ( $K_t = 1$ ) mit der dazugehörigen Knickstütze abgebildet.

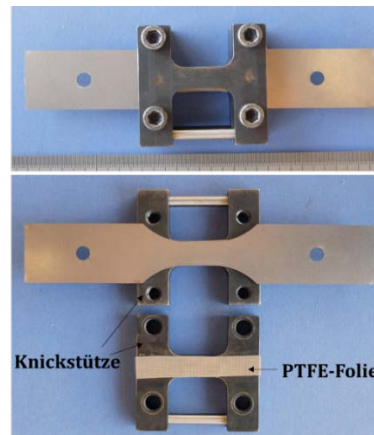


Abbildung 5.10: Ungekerbte Flachprobe ( $K_t = 1$ ) mit Knickstütze

### 5.5.1 Versagenskriterium und Versuchsauswertung

Die Versuchsergebnisse aus den spannungskontrollierten Versuchen sollen mit Hilfe des örtlichen Dehnungskonzeptes und den hierfür benötigten, im Rahmen des Projekts ermittelten Kennwerten, nachgerechnet und verglichen werden. Solch ein Vergleich ist nur bei einem einheitlichen Versagenskriterium zulässig. Das Versagenskriterium der dehnungskontrollierten Versuche ist per Definition nach dem örtlichen Dehnungskonzept der technische Oberflächenanriss. Für die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse wird daher das Versagenskriterium aus den dehnungskontrollierten Versuchen für die spannungskontrollierten Versuche übernommen. Das bedeutet die Versuchsauswertung erfolgt mit der jeweiligen Anrisschwingspielzahl.

Bei der Versuchsdurchführung gibt es verschiedene Methoden zur Anrisserkennung. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung des sogenannten Potentialsondenverfahrens. Hierbei wird der Riss über eine Änderung des elektrischen Potentials direkt an der Probe detektiert. Im Rahmen dieses Projektes fand das Potentialsondenverfahren jedoch keine Anwendung. Zum einen ist die Anwendung der Potentialsonde recht aufwendig, zum anderen ist diese bei der Durchführung von Zug-Druck-Wechselversuchen auf Grund der angebrachten Knickstütze nicht möglich.

Da die spannungsgeregelten Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auf einer Resonanzprüfmaschine durchgeführt werden, kann der Anriss über einen Abfall der Prüffrequenz ermittelt werden. Die Prüffrequenz ist die Resonanzfrequenz des schwingungsfähigen Systems, bestehend aus Teilen des Prüfstandes, der Einspannung und der Probe selbst. Bildet sich an der

Probe ein Anriss, so verringert sich die Struktursteifigkeit dieses schwingungsfähigen Systems und die Prüffrequenz fällt ab. Abbildung 5.11 zeigt diesen Zusammenhang schematisch für ungekerbte und unterschiedlich stark gekerbte Proben.

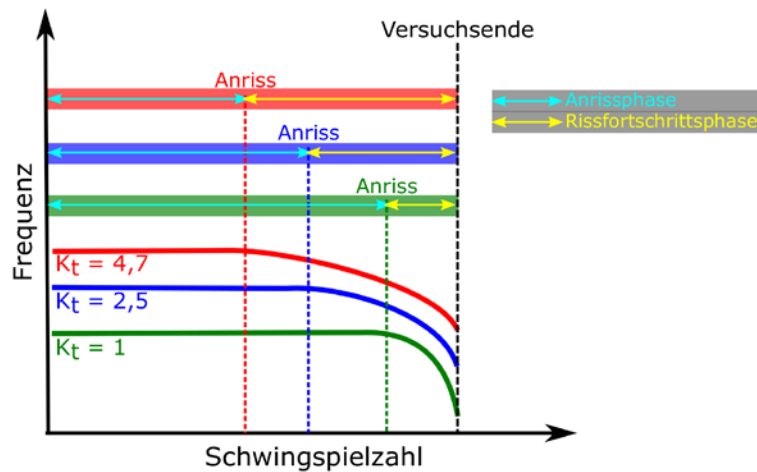


Abbildung 5.11: Frequenzverläufe bei spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Resonanzprüfmaschinen

Beim technischen Anriss spricht man in der Regel von einem durchgehenden Oberflächenanriss mit einer Risstiefe zwischen 0,5 und 1 mm. Im Idealfall sollte der Frequenzabfall bei dem der Versuch gestoppt wird, so gewählt werden, dass bei Versuchsabbruch ein Anriss entsprechender Größe an der Probe vorliegt und somit der Anteil der Rissfortschrittsphase an der Gesamtlebensdauer möglichst gering bleibt. Wird der Frequenzabfall vom Prüfer jedoch zu klein festgelegt, so kann es aufgrund von einzelnen Spitzen im Frequenzsignal zum vorzeitigen Versuchsabbruch kommen, ohne dass ein Anriss an der Probe vorliegt.

Untersuchungen zur Anrissstiefe bei vorliegendem Frequenzabfall an ungekerbten und gekerbten Proben in [103] und [104] haben ergeben, dass die spannungskontrollierten Versuche an den gekerbten Flachproben ( $K_t = 2,5$  und  $4,6$ ) bei einem Frequenzabfall von 0,3 Hz beendet werden. In diesem Fall liegt an den Proben ein beidseitiger Anriss mit jeweils einer Risstiefe von 3 bis 6 mm vor. Der Fehler in der Versagensschwingspielzahl der sich gegenüber einem Abbruch bei einer Risstiefe von 0,5 bis 1 mm ergibt ist vernachlässigbar gering. Die Versuche an der ungekerbten Flachprobe werden bei einem Frequenzabfall von 1 Hz gestoppt. In den meisten Fällen tritt zuvor der Probenbruch ein. Auch hier ist der Fehler in der Versagensschwingspielzahl vernachlässigbar klein, da speziell bei der ungekerbten Flachprobe die Frequenz ab dem Auftreten eines Anriss so rasch abfällt (siehe Abbildung 5.11), dass zwischen der ermittelten Abbruchschwingspielzahl und der tatsächlichen Anrisschwingspielzahl nur wenige hundert Schwingspiele liegen.

Die statistische Auswertung der Versuche sowie die Bestimmung der zugehörigen Wöhlerlinien erfolgt mit der kommerziellen Software LMS FALANCS LifeStat. Die Auswertung im Zeitfestigkeitsgebiet erfolgt nach dem Perlschnurverfahren. Die Dauerfestigkeit wird mit der Maximum-Likelihood Methode anhand von ein bis zwei Durchläuferversuchen abgeschätzt. Die Streuung der Versuche wird mit einer logarithmischen Normalverteilung abgebildet. Für eine detaillierte Beschreibung der Wöhlerlinienkennwerte und der Vorgehensweise bei deren Ermittlung, wird auf das Grundlagenkapitel 2.1 verwiesen.

Bezüglich der Dauerfestigkeit ist zu berücksichtigen, dass die Dauerfestigkeit im vorliegenden Forschungsvorhaben nicht im Fokus der Untersuchungen steht und daher nur mit wenigen Durchläuferversuchen nach der Maximum-Likelihood-Methode abgeschätzt wird. Die auf diese Weise ermittelten Dauerfestigkeitswerte sind somit aus statistischer Sicht nicht ausreichend belegt und daher nur als ungefähre Richtwert zu betrachten.

## 5.6 Dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche

Die dehnungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche werden auf einem Lastrahmen mit einem servohydraulischen Prüfzylinder an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) Flachproben aus Abbildung 4.3 durchgeführt. Die Dehnung wird von einem Extensometer mit einer Messlänge von 10 mm gemessen welcher auf der Kante der Probe angebracht ist. Die Versuche werden mit dem Lastverhältnis  $R_\epsilon = -1$  durchgeführt. Zur Vermeidung des Ausknickens wird eine Knickstütze verwendet (Abbildung 5.10). Die Prüffrequenz lag in Abhängigkeit vom Lastniveau zwischen 0,5 und 3 Hz. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach den Vorgaben in [105]. In Abbildung 5.12 ist der Versuchsaufbau dargestellt und beschrieben.



Abbildung 5.12: Versuchsaufbau der dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche

### 5.6.1 Versagenskriterium und Versuchsauswertung

Der technische Oberflächenanriss ist per Definition das Versagenskriterium im Örtlichen Dehnungskonzept. Der technische Anriss bildet in der Lebensdauer einer Probe oder eines Bauteils den Übergang von Rissinitiierungsphase zur Rissfortschrittsphase ab. Nach einer in der Literatur gängigen Definition gilt ein Riss als technischer Anriss, wenn er mit den üblichen, betrieblich anwendbaren Inspektionsverfahren entdeckbar ist. Diese sehr ungenaue Definition führt dazu, dass die Ermittlung einer Anrisschwingspielzahl immer von der jeweiligen Definition des technischen Anriss abhängt. Nach [105] wird für die dehnungskontrollierten Versuche der technische Anriss bei einem Lastabfall von 10 % ausgehend von der stabilisierten Hysterese definiert.

Die Auswertung des Versuchs erfolgt anhand der aufgezeichneten Wechselverformungskurve. In der Regel wird zur Abbildung der Wechselverformungskurve die Oberspannung  $\sigma_o$  der Hysterese über ihrer Schwingspielzahl dargestellt, siehe Abbildung 5.13. Im ersten Auswertungsschritt wird in der Wechselverformungskurve des Versuchslaufs der stabilisierte Bereich definiert. Ausgehend davon kann die Schwingspielzahl ermittelt werden, bei welcher die Wechselverformungskurve den stabilisierten Wert der Oberspannung  $\sigma_{o, stabilisiert}$  um 10 % unterschreitet. Diese Schwingspielzahl ist die gesuchte Anrisschwingspielzahl  $N_{Anriss}$ . Im nächsten Schritt wird die Spannungsamplitude der stabilisierten Hysterese aus der Ober- und Unterspannung bei halber Anrisschwingspielzahl bestimmt:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2} \quad (5.6)$$

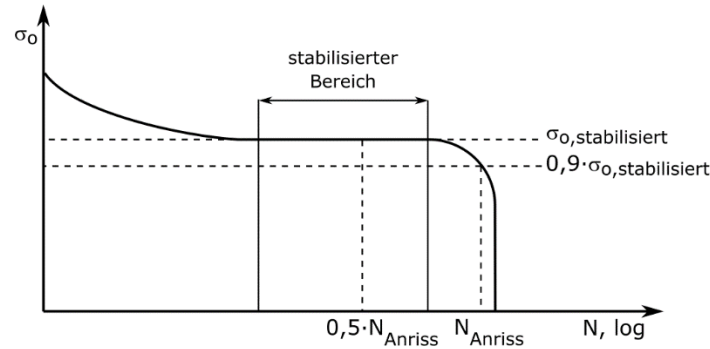


Abbildung 5.13: Auswertung dehnungskontrollierter Schwingfestigkeitsversuche anhand der Wechselverformungskurve

Nachdem die Spannungsamplitude und die Anrisschwingungszahl der stabilisierten Hysterese aus der Wechselverformungskurve ermittelt wurden, müssen der plastische und elastische Dehnungsanteil der Gesamtdehnungsamplitude bestimmt werden. Der elastische Anteil der Dehnungsamplitude  $\varepsilon_{a,el}$  kann nach Gleichung (2.8) aus der ermittelten Spannungsamplitude  $\sigma_a$  und dem E-Modul des Werkstoffs berechnet werden:

$$\varepsilon_{a,el} = \frac{\sigma_a}{E} \quad (5.7)$$

Der plastische Anteil der Dehnungsamplitude  $\varepsilon_{a,pl}$  wird nach Gleichung (2.9) ermittelt, indem  $\varepsilon_{a,el}$  von der Gesamtdehnungsamplitude  $\varepsilon_a$  abgezogen wird:

$$\varepsilon_{a,pl} = \varepsilon_a - \varepsilon_{a,el} = \varepsilon_a - \frac{\sigma_a}{E} \quad (5.8)$$

Die auf diese Weise bestimmten elastischen und plastischen Anteile der Gesamtdehnungsamplitude werden in einem doppeltlogarithmischen Diagramm über der Anrisschwingungszahl (Abszisse) aufgetragen. Über eine Regressionsanalyse nach der Methode der Minimierung des kleinsten Fehlerquadrats werden anschließend die Koeffizienten und Exponenten, also die zyklischen Werkstoffkennwerte, zur Beschreibung der elastischen und plastischen Geraden nach Gleichung (2.11) ermittelt. Dabei gilt zu beachten, dass die Minimierung des Fehlerquadrats in Schwingungszahlrichtung erfolgt. Außerdem dürfen nach [105] keine plastischen Dehnungsanteile  $\varepsilon_{a,pl} < 0,01 \%$  für die Regressionsanalyse der plastischen Geraden verwendet werden.

Die zyklische Fließkurve beziehungsweise die sie beschreibenden zyklischen Kennwerte  $K'$  und  $n'$  in Gleichung (2.10) können entweder über die Kompatibilitätsbedingungen in Gleichung (2.19) und (2.20) ermittelt werden oder ebenfalls über eine Regressionsanalyse nach der Mini-

mierung des kleinsten Fehlerquadrats. Dafür wird  $\sigma_a$  über  $\varepsilon_{a,pl}$  im doppeltlogarithmischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm abgebildet. Die Minimierung des Fehlerquadrats erfolgt in Spannungs-Richtung.

## 6 Versuchsergebnisse

### 6.1 Randzonencharakterisierung

#### 6.1.1 Polierter Kantenzustand und gewalzte Oberfläche

An den ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ ) mit polierten Kanten wurden stichprobenartig Rauheitsmessungen an der Kantenfläche und der Walzoberfläche durchgeführt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6.1 eingetragen. Die Messungen wurden nach den Angaben in Kapitel 5.1.2 an den Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  (Abbildung 4.3) durchgeführt. Die angegebenen Werte stellen den Mittelwert aus den Messungen an mindestens zwei Proben mit jeweils fünf Einzelmessungen dar, siehe Abbildung 5.3.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an der Kantenfläche und Walzoberfläche von ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ )

Werkstoff	Polierte Kantenfläche $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Walzoberfläche quer zur Walzrichtung gemessen (mit Beschichtung) $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
DC04	0,6	8,3
DP800	0,4	5,3
CP800	0,4	6,7
DP1000	0,3	3,6
CP1000	0,4	3,7
22MnB5 gehärtet	0,4	11,0

Mit Oberflächenmessungen nach dem Tastschnittverfahren konnten auf den polierten Kantenflächen mittlere Rautiefen zwischen 0,4 und 0,6  $\mu\text{m}$  ermittelt werden. Die Rauheit der polierten Flächen ist von der Körnung der verwendeten Polierpaste abhängig, daher sind die  $R_z$ -Werte erwartungsgemäß unabhängig vom Werkstoff. Die Anforderung in [105] für die Ermittlung von zyklischen Werkstoffkennwerten an Flachproben aus Stahlfeinblech, wonach für die polierten Kantenflächen ein Wert von  $R_z < 0,7 \mu\text{m}$  zu realisieren ist, wird demnach erfüllt. An den Ergebnissen in Tabelle 6.1 ist außerdem festzustellen, dass die mittlere Rautiefe  $R_z$  an der Walzoberfläche (mit oder ohne Beschichtung) deutlich größer ist, als an der polierten Kantenfläche.

#### 6.1.2 Laserstrahlgeschnittener Kantenzustand

Optisch kennzeichnen sich die laserstrahlgeschnittenen Kanten durch die riefige Oberflächenstruktur aus geschmolzenem und wieder erstarrtem Stahl, wie in Abbildung 6.1 exemplarisch an einer laserstrahlgeschnittenen Probe aus gehärtetem 22MnB5 zu sehen ist. Auf den laserstrahl-

geschnittenen Kantenflächen wurden Rauheitsmessungen durchgeführt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6.2 eingetragen und bilden jeweils den Mittelwert aus den Messungen an drei Proben einer Versuchsreihe. Die gemittelten Rautiefen der verschiedenen Werkstoffe an der Kantenfläche liegen alle im Bereich zwischen  $R_z \approx 5$  und  $9 \mu\text{m}$  und fallen damit, bei Betrachtung der riefigen Laserschnittkante in Abbildung 6.1, unerwartet gering aus. Die geringen Rautiefen lassen sich damit erklären, dass die sichtbaren Riefen an der Schnittkante aufgrund ihres weiten Profils nicht unter die Kategorie Rauheit, sondern unter die Kategorie Welligkeit fallen. Dies zeigen die vergleichsweise hohen Werte der ebenfalls in Tabelle 6.2 eingetragenen Wellentiefen  $W_t$ .

Bei Betrachtung der Laserschnittkante in Abbildung 6.1 fällt außerdem auf, dass über die Probendicke keine konstanten Oberflächenbedingungen an der Kante vorliegen. Die Riefen an der Lasereintrittsseite sind sichtbar tiefer als an der Laseraustrittsseite. Die in Tabelle 6.2 angegebenen Rautiefen für die Lasereintritts- und Laseraustrittsseite bestätigen diesen Befund. Somit ist fraglich, ob mit den gemittelten Rauheiten an der Kantenfläche der am Ausgangsort des Ermüdungsriss tatsächlich vorliegende Oberflächenzustand überhaupt beschrieben werden kann.

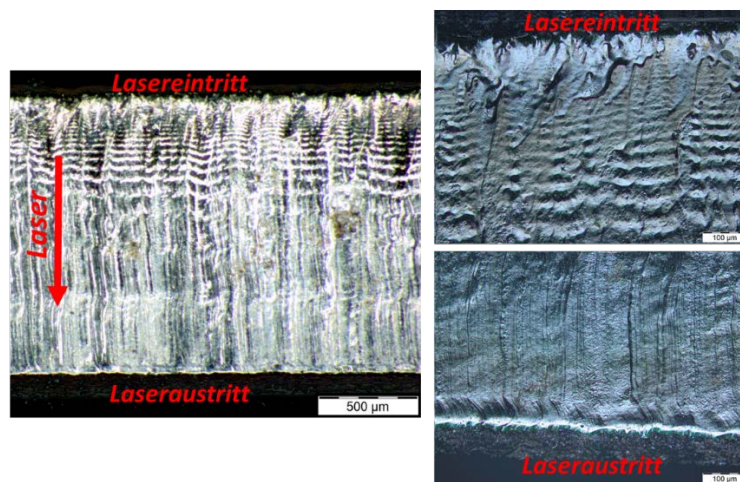


Abbildung 6.1: Laserstrahlgeschnittene Kante einer ungekerbten Flachprobe aus gehärtetem 22MnB5 (Variante1)

Eine Besonderheit bezüglich des Oberflächenzustands der Laserschnittkante zeigt sich an den Proben aus dem Komplexphasenstahl CP800. Die Proben weisen an den Schnittkanten im regelmäßigen Abstand sich deutlich von der restlichen Oberfläche abzeichnende Einzelkerben auf. Die Ursache für die Entstehung der Kerben konnte nicht eindeutig geklärt werden. Es wird jedoch vermutet, dass Fehler bei der Wahl der Fertigungsparameter dafür verantwortlich sind. In Abbildung 6.2 ist exemplarisch die Schnittkante einer laserstrahlgeschnittenen CP800-Probe abgebildet. Unter schwingender Beanspruchung können diese Kerben einen kritischen Versagensort darstellen und somit das Schwingfestigkeitsverhalten beeinflussen.



Tabelle 6.2: Ergebnisse der Oberflächenmessungen an der laserstrahlgeschnittenen Kantenfläche von ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ )

Werkstoff	Rauheit der laserstrahlgeschnittenen Kantenflächen $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]			Wellentiefe $W_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Kantenfläche gemittelt	Lasereintrittsseite	Laseraustrittsseite	
DC04	7,0	7,8	5,9	14,4
DP800	7,8	9,1	6,4	16,1
CP800	6,5	8,0	6,1	9,1
DP1000	6,6	8,3	5,7	11,7
22MnB5 gehärtet, Variante 1	5,3	7,4	4,0	8,4
22MnB5 gehärtet, Variante 2	8,6	9,5	7,9	7,9

Das lokale Aufschmelzen des Werkstoffs im Schnittkantenbereich sowie das anschließende zügige Abkühlen und Erstarren beeinflusst den Gefügestand nahe der Schnittkante. Der beeinflusste Bereich wird auch als Wärmeeinflusszone bezeichnet. In der Wärmeeinflusszone kann es in Abhängigkeit des Werkstoffs und der Schneidparameter zu Gefügeumwandlungen kommen. Die Auswirkung des Schneidprozesses auf das Werkstoffgefüge lässt sich anhand von Mikroschliffen und Mikrohärteverläufen untersuchen und beurteilen. Daher wurden im Rahmen dieser Untersuchungen an den Laserschnittkanten der verschiedenen Werkstoffe Mikrohärtmessungen durchgeführt und bei Bedarf Mikroschliffe für mikroskopische Aufnahmen des Gefüges angefertigt.

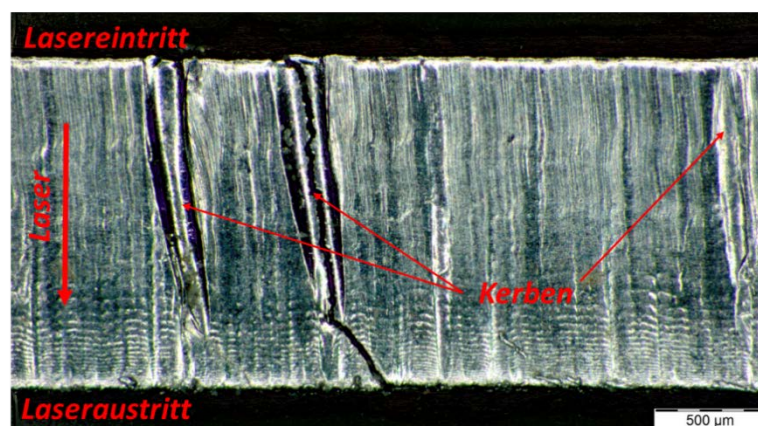


Abbildung 6.2: Kerben an einer laserstrahlgeschnittenen Kante einer ungekerbten Flachprobe aus CP800

Im Diagramm in Abbildung 6.3 sind die Tiefenverläufe der Mikrohärt über den Abstand von der Kantenfläche für die verschiedenen Werkstoffe abgebildet. Die Messungen wurden nach der in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die abgebildeten Messwerte stellen jeweils den Mittelwert von den Messungen an drei Proben dar. Durchgeführt wurden die Mes-

sungen an den ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ ). Stichprobenartige Untersuchungen an gekerbten laserstrahlgeschnittenen Proben ( $K_t = 2,5$ ) ergaben, dass bei Verwendung derselben Fertigungsparameter zwischen den Randzonen der ungekerbten und gekerbten Proben kein Unterschied besteht.

Betrachtet man die Tiefenhärteverläufe in Abbildung 6.3 so fällt auf, dass bei keinem der Werkstoffe eine konstante Härte über den Probenquerschnitt vorliegt. Bei den Werkstoffen DC04, DP800, CP800 und DP1000 liegt die Härte der Randzone über der des Grundgefüges. Den Härteverläufen nach erstreckt sich die Wärmeeinflusszone bis zu einer Tiefe von ca. 100 bis 120  $\mu\text{m}$  hinter der Schnittkantenfläche. Ab dort gehen die Härtewerte mit steigendem Abstand in einen nahezu konstanten Verlauf über. Während der Härteunterschied zwischen Randzone und Grundgefüge bei den Proben aus DC04 eher gering ausfällt, ist der Unterschied bei den Proben aus DP800, CP800 und DP1000 deutlich größer. So werden in der Randzone der Proben aus DP800 nahezu doppelt so große Härtewerte gemessen wie im Grundgefüge. Die großen Härteunterschiede zwischen Randzone und Grundgefüge beim DP800, CP800 und DP1000 lassen sich mit einer martensitischen Gefügemwandlung infolge des Laserstrahlschneidens erklären. Abbildung 6.4 zeigt makroskopische Aufnahmen des Gefüges im Bereich der Laserschnittkante einer DP800-Probe. Es ist deutlich zu erkennen, dass hinter der Schnittkante eine etwa 100  $\mu\text{m}$  breite Wärmeeinflusszone aus martensitischem Gefüge vorliegt, welche sich durch die goldene Färbung deutlich von dem weiß-schwarz gefärbten zweiphasigen Grundgefüge abhebt. Im Gegensatz zum DP800, CP800 und DP1000 ist im DC04 zu wenig Kohlenstoff enthalten ( $< 0,08\%$ ) und daher keine Martensitbildung möglich, womit sich der deutlich geringere Härteunterschied zwischen Randzone und Grundgefüge Abbildung 6.3 erklären lässt.

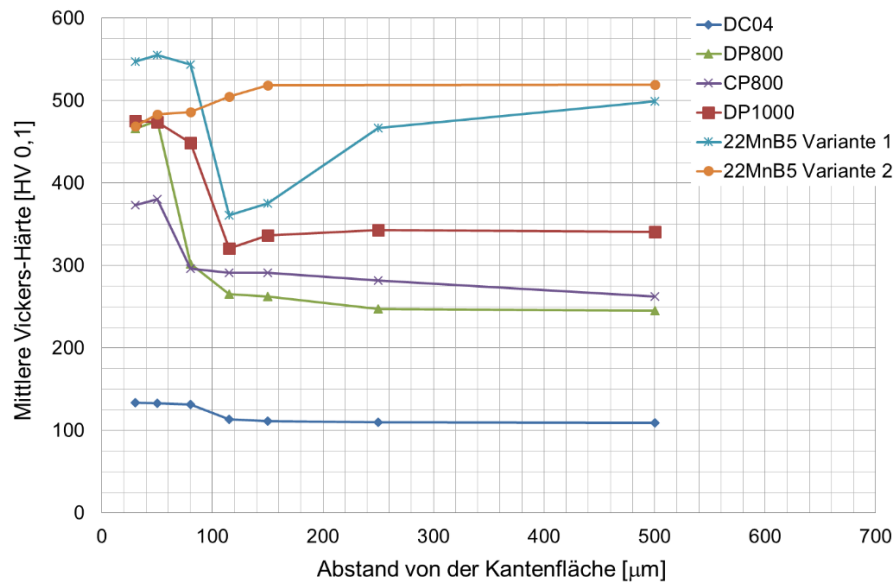


Abbildung 6.3: Härteverläufe von laserstrahlgeschnittenen Flachproben aus den Werkstoffen DC04, DP800, CP800, DP1000 und gehärtetem 22MnB5, Mittelwerte aus drei Messungen

Bei Betrachtung der Härteverläufe der zwei laserstrahlgeschnittenen Varianten aus 22MnB5 in Abbildung 6.3, lässt sich feststellen, dass je nachdem ob das Laserstrahlschneiden vor (Variante 2) oder nach (Variante 1) der Wärmebehandlung des Stahls durchgeführt wird, unterschiedliche Randzonenzustände vorliegen. Der Tiefen Härteverlauf von Variante 1 zeigt eine gegenüber dem Grundgefüge leicht aufgehärtete Randzone. Dies ist damit zu begründen, dass das martensitische Randzonengefüge, welches sich infolge des Laserstrahlschneidens ausbildet, feinkörniger ist als das martensitische Grundgefüge, wie anhand der mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 6.5 zu erkennen ist. Zwischen der Randzone und dem Grundgefüge der Variante 1 entsteht ein Bereich, in welchem die Härte unter die des Grundgefüges fällt (siehe Abbildung 6.3) und welcher sich in Abbildung 6.5 durch eine leicht bläuliche Färbung von dem umgebenden Randzonen- und Grundgefüge abhebt. In diesem Bereich kommt es aufgrund des Temperatur-Zeit-Verlaufs bei der Probenfertigung zu Anlasseffekten, welche die Härte des Grundgefüges senken und somit den sogenannten Härtesack im Tiefen Härteverlauf verursachen. Bei den Proben der Variante 2 wird die Wärmebehandlung nach dem Laserstrahlschneiden durchgeführt. Somit werden die entstehenden Gefügeveränderungen in der Randzone durch die anschließende Wärmebehandlung wieder aufgehoben. Der dennoch entstehende leichte Härteabfall im Bereich der Randzone kann mit Entkohlungseffekten an der ungeschützten blanken Schnittkante während des Austenitisierungsprozess begründet werden.

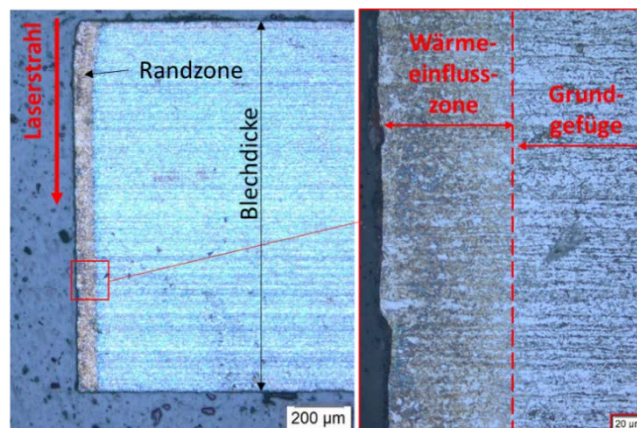


Abbildung 6.4: Gefüge im Schnittkantenbereich einer laserstrahlgeschnittenen Probe aus DP800  
 Für einen direkten Vergleich der Randzonenhärte und der Härte des Grundgefüges sind die jeweiligen Mittelwerte für die verschiedenen Werkstoffe in Tabelle 6.3 eingetragen.

Die mittlere Härte der Randzone errechnet sich jeweils aus den zwei Messwerten in Abbildung 6.3, welche am nächsten an der Schnittkante liegen, da in diesem Bereich die größten Unterschiede zur Härte des Grundgefüges festgestellt werden.

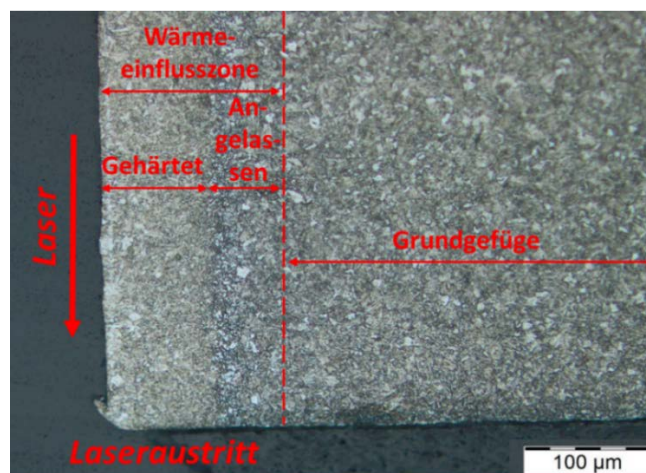


Abbildung 6.5: Gefüge im Schnittkantenbereich einer laserstrahlgeschnittenen Probe aus gehärtetem 22MnB5, Variante 1 (Laserstrahlschneiden nach der Wärmebehandlung)

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Härteprüfung an den laserstrahlgeschnittenen ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ ) aus den Werkstoffen DC04, DP800, CP800, DP1000 und 22MnB5

Werkstoff	Gemittelte Vickershärte [HV0,1]	
	Randzone	Grundgefüge
DC04	133	108
DP800	471	255
CP800	377	279
DP1000	475	332

---

22MnB5 gehärtet, Variante 1	552	498
22MnB5 gehärtet, Variante 2	476	513

### 6.1.3 Schergeschnittene Kanten

Die Ergebnisse der Randzonencharakterisierung werden entsprechend der untersuchten Werkstoffe in den nachfolgenden Unterkapiteln separat behandelt.

#### 6.1.3.1 DC04

##### Kerbformzahl $K_t = 1$

Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 zeigen die fotografische Dokumentation sowie die Anteile der charakteristischen Schnittflächenkenngrößen des Werkstoffes DC04 für die Scherschneidstrategien Referenz und Verschleiß.

Die Scherschneidstrategie Referenz zeigt eine typische Schnittflächenausprägung eines weichen Tiefziehstahls, welcher mit scharfkantigen Aktivelementen und einem auf Erfahrungswerten basierendem Schneidspalt von  $u_r = 10 \%$  schergeschnitten wurde. Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 17,28 %, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 58,09 % und einem Bruchflächenanteil von 24,63 %. Die absolute Grathöhe beträgt 45  $\mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei 75,2 °.

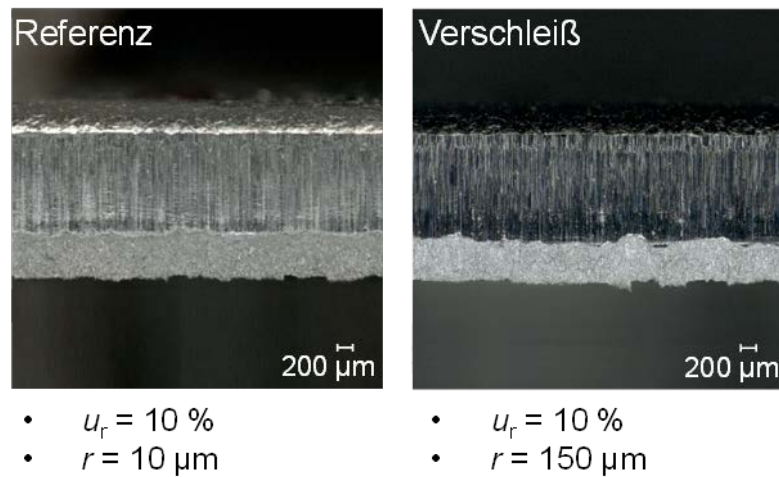


Abbildung 6.6: Optische Schnittflächenausprägung DC04, Kerbformzahl  $K_t = 1$

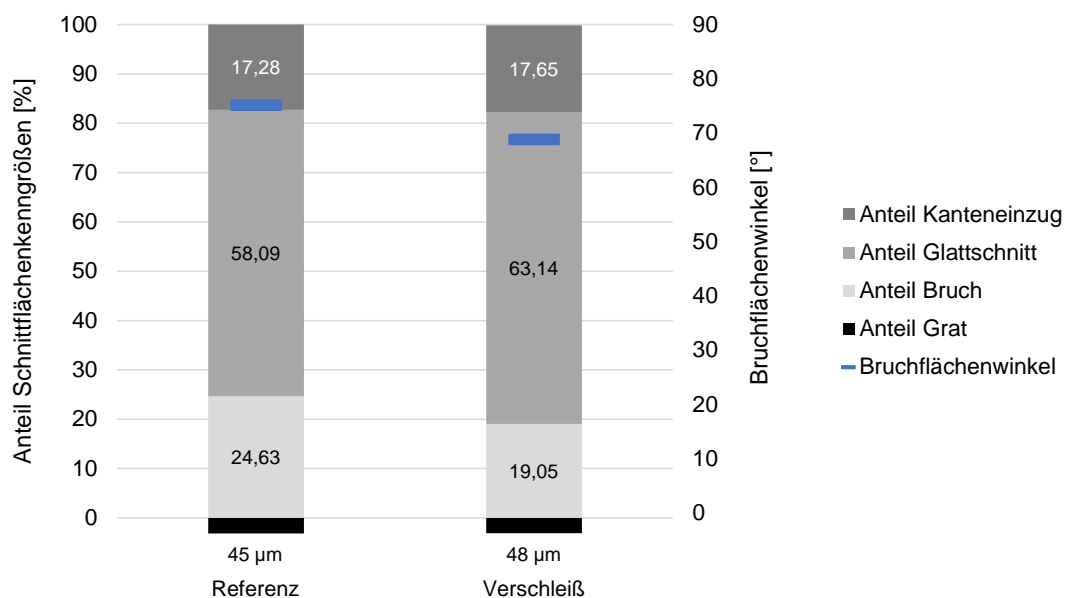


Abbildung 6.7: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen DC04, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Eine Verrundung der Schneidstempelpkante auf  $r = 150 \mu\text{m}$  bei gleichbleibendem Schneidspalt soll den Verschleißzustand eines Schneidstempels darstellen. Der größere Schneidkantenradius hat einen Anstieg des Kanteneinzugsanteils auf 17,65 % sowie des Glattschnittanteils auf 63,14 % mit einhergehender Reduktion des Bruchflächenanteils auf 19,05 % zur Folge. Die Grathöhe wächst auf 48  $\mu\text{m}$ . Durch die verrundete Schneidstempelpkante kommt es zu Beginn des Scherschneidprozesses zu einer Vergrößerung des Schneidspaltes. Der Anteil des Kanteneinzugs steigt daher an. Der erhöhte Glattschnittanteil resultiert aus dem während des Scherschneidprozesses kleiner werdenden Schneidspalt und des dadurch induzierten erhöhten Druckspannungszustands während der Glattschnittoausbildung. Aufgrund des größeren Anteils an Kanteneinzug und Glattschnitt nimmt der Bruchflächenwinkel  $\beta$  ab und beträgt 68,89 °.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus DC04 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{a,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},B}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Referenz	0,38	2,91	3,49	4,85	26,62	33,07
Verschleiß	0,083	0,71	1,07	5,25	30,52	38,23

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.4 zeigen, dass die Rauheit im Glattschnittbereich erwartungsgemäß geringer ist als im Bruchflächenanteil. Die Rauheit auf der Glattschnittfläche ist für die Referenzstrategie auf Grund der scharfkantigen Aktivelemente höher als für die Verschleißstrategie. Die Verrundung der Aktivelemente mit Schleifpaste auf  $r = 150 \mu\text{m}$  für die Strategie Verschleiß bewirkt eine Reduktion der Oberflächenrauheit der Stempeloberfläche und damit verbunden eine Abnahme der Rauheit auf dem Glattschnittanteil. Im Bruchflächenanteil hingegen ist die Rauheit im Bruchflächenanteil für die Verschleißstrategie um circa 40 % höher als für die Strategie Referenz.

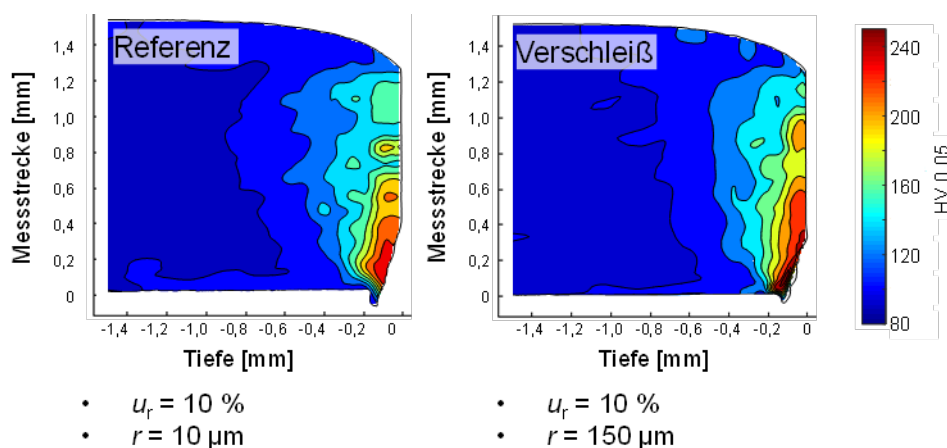


Abbildung 6.8: Aufhängung der Schereinflusszone DC04, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,\text{max}}$ [HV 0,05]	$HV_{1,\text{max}}/HV_0$ [-]
Referenz	95	248	2,61
Verschleiß	95	256	2,69

DC04 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

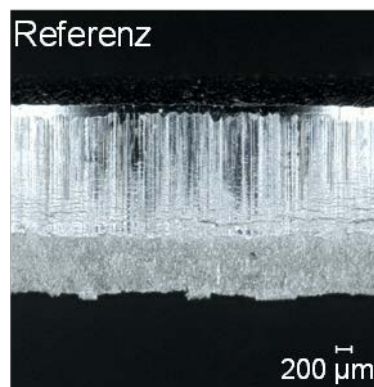
Das Grundgefüge des Tiefziehstahls DC04 weist in Tabelle 6.5 eine gemittelte Härte von 95 HV 0,05 auf und entspricht damit dem weichsten der in diesem Forschungsprojekt untersuchten Stahlwerkstoffe. Im Fall der Referenzstrategie findet die stärkste Aufhängung am Übergang von Glattschnitt zu Bruch statt. Der Werkstoff härtet dabei um das 2,61-fache seiner Grundhärte auf.

Die Schereinflusszone reicht bis in eine Tiefe von ca. 0,5 mm, welches einem Drittel der Blechdicke entspricht.

Eine Verrundung der Schneidstempelkante ( $r = 150 \mu\text{m}$ ) verursacht eine stärkere Aufhärtung der Schereinflusszone direkt unterhalb der Schnittfläche, insbesondere im Übergangsbereich von Glattschnitt- zu Bruchflächenanteil, da durch den hohen Glattschnittanteil eine starke Kaltverfestigung erzeugt wird, siehe Abbildung 6.8. Die Aufhärtung reicht ebenfalls bis in eine Tiefe von ca. 0,5 mm.

#### Kerbformzahl $K_t = 2,5$

Abbildung 6.9 verdeutlicht die Ausprägung der schergeschnittenen Kante des Werkstoffes DC04 für die Scherschneidstrategie Referenz. In der darauffolgenden Abbildung 6.10 sind die charakteristischen Schnittflächenkenngrößen aufgetragen.



- $u_r = 10 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

Abbildung 6.9: Optische Schnittflächenausprägung DC04, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Der Anteil des Kanteneinzugs ist geringer als im Falle des offenen Schnittes ( $K_t = 1$ ) für die Scherschneidstrategie Referenz. Dies begründet sich durch die symmetrische geschlossene Schnittliniengeometrie, die höhere Steifigkeit des Butzens und das dadurch reduzierte Biegemoment in der Schereinflusszone. Der Glattschnittanteil ist leicht größer, der Bruchflächenanteil geringer als im Fall des offenen Schnittes. Die Grathöhe ist geringfügig höher. Der Bruchflächenwinkel  $\beta$  ist ebenfalls vergleichbar mit dem des offenen Schnittes.



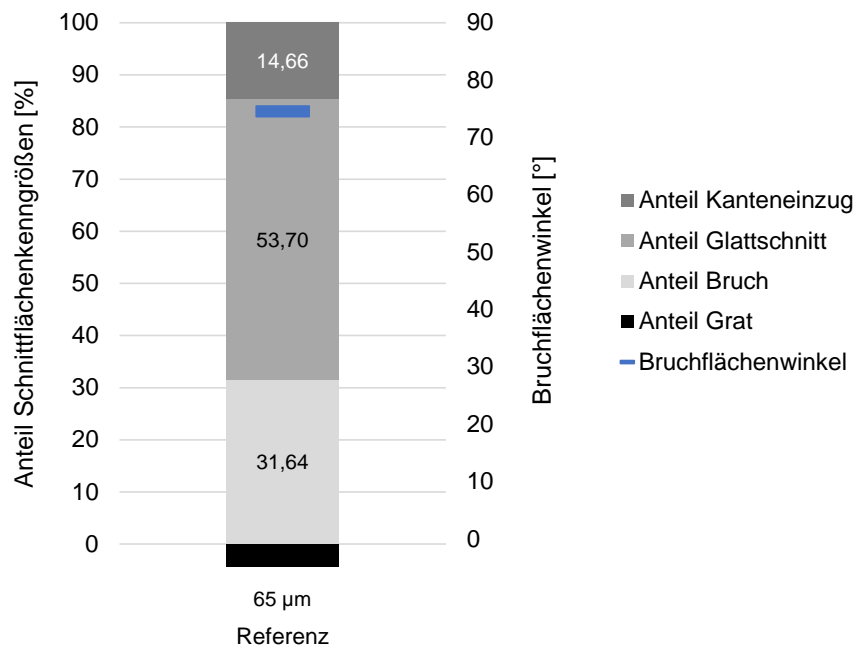


Abbildung 6.10: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen DC04, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Tabelle 6.6: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus DC04 mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Strategie	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{a,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},B}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Referenz	1,00	6,63	11,22	12,47	69,57	88,01

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.6 zeigen, dass die Rauheit im Glattschnittbereich als auch im Bruchflächenanteil wesentlich höher ist als für den offenen Schnitt, die Rauheit im Glattschnittbereich ist erwartungsgemäß geringer, als im Bruchflächenbereich.

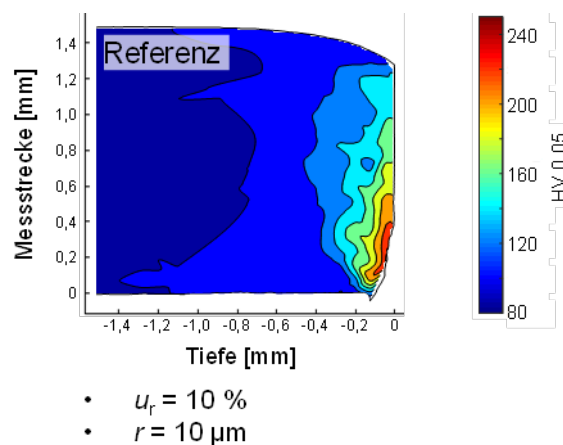


Abbildung 6.11: Aufhängung der Schereinflusszone DC04, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Tabelle 6.7: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Strategie	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}/HV_0$ [-]
Referenz	95	232	2,44

DC04 mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$ 

Die absolute Aufhärtung als auch die Tiefe der Schereinflusszone für den geschlossenen Schnitt mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  ist geringer, als im Fall des offenen Schnitts mit Kerbformzahl  $K_t = 1$ , siehe Tabelle 6.7. Dies begründet sich durch das geringere Biegemoment im geschlossenen Schnitt durch das Abstützen des Butzens. Die Aufhärtung dringt bis ca. 0,4 mm in die Tiefe ein, die stärkste Kaltverfestigung tritt wie auch bereits im offenen Schnitt am Übergang von Glattschnitt zu Bruchfläche auf.

### 6.1.3.2 DP800

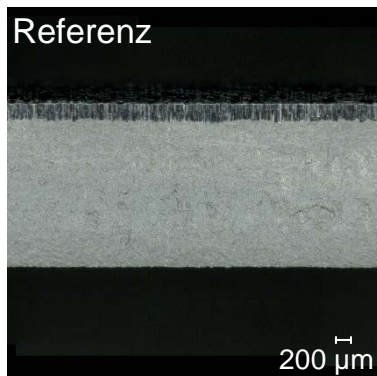
#### Kerbformzahl $K_t = 1$

Abbildung 6.12 zeigt die fotografische Dokumentation der Schnittflächenausprägungen des Werkstoffes DP800 für die Scherschneidstrategien Referenz, Verschleiß, Beschichtung, Eigenspannung und Glattschnitt mit den für die jeweilige Strategie angewandten Scherschneidparametern.

Die entsprechend der unterschiedlichen Scherschneidstrategien entstandenen charakteristischen Schnittflächenkenngrößen sowie der Bruchflächenwinkel sind in nachfolgender Abbildung 6.13 aufgetragen. Die Schnittflächenausprägung der Scherschneidstrategie Referenz ist repräsentativ für einen hochfesten Dualphasenstahl, welcher mit scharfkantigen Aktivelementen und einem auf Erfahrungswerten basierenden Schneidspalt von  $u_r = 15$  % schergeschnitten wurde. Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 11,43 %, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 9,8 % und einem Bruchflächenanteil von 78,77 %. Die absolute Grathöhe beträgt 6  $\mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei 80,9 °. Verglichen mit den Schnittflächenkenngrößen des weichen Tiefziehstahls DC04 zeichnet sich die Schnittfläche der Referenzstrategie eines DP800 durch einen kleineren Kanteneinzug aus, welcher durch die höhere Festigkeit bedingt ist. Der Glattschnittanteil ist aufgrund der höheren Festigkeit und geringeren Duktilität wesentlich kleiner als im Fall des DC04. Der Bruchflächenanteil ist entsprechend größer.

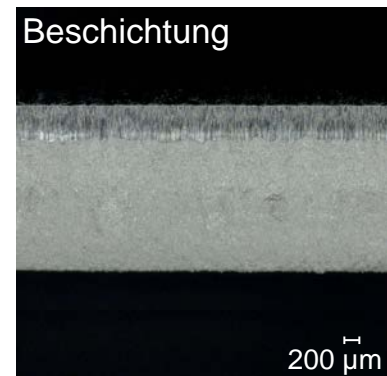
Eine Verrundung der Schneidstempelkante auf  $r = 300$   $\mu\text{m}$  ahmt bei gleichbleibendem Schneidspalt den Verschleißzustand eines Schneidstempels nach. Der größere Schneidkantenradius hat einen Anstieg des Anteils des Kanteneinzugs auf 16,29 % sowie des Glattschnittanteils auf 30,22 % mit einhergehender Reduktion des Bruchflächenanteils auf 53,49 % zur Folge. Die

Grathöhe wächst auf 14  $\mu\text{m}$ . Die Tendenzen durch die Verrundung der Schneidstempelkante stimmen mit jenen des Tiefziehstahls DC04 überein. Die verrundete Schneidstempelkante ( $r = 300 \mu\text{m}$ ) bewirkt eine Vergrößerung des Schneidspaltes zu Beginn des Scherschneidprozesses, wodurch der Anteil des Kanteneinzugs ansteigt. Mit fortschreitender Stempelbewegung wird der Schneidspalt kleiner und erhöht den Druckspannungszustand in der Schereinflusszone, welcher die Ausprägung eines größeren Glattschnittanteils begünstigt. Aufgrund des größeren Anteils an Kanteneinzug und Glattschnitt nimmt der Bruchflächenwinkel  $\beta$  ab und beträgt 73,5  $^\circ$ .

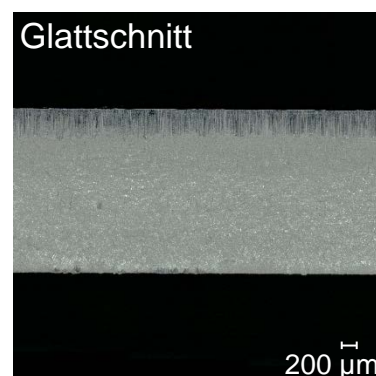


- $u_r = 15 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

- $u_r = 15 \%$
- $r = 300 \mu\text{m}$



- $u_r = 15 \%$
- $r = 50 \mu\text{m}$



- $u_v = 15 \%$
- $z = 2 \text{ mm}$
- $u_v = 15 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

- $u_v = 5 \%$
- $z = 0,4 \text{ mm}$
- $u_v = 2 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

Abbildung 6.12: Optische Schnittflächenausprägung DP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Für die Strategie Beschichtung wurde die Schneidstempelkante auf  $r = 50 \mu\text{m}$  verrundet, da dies den kleinsten prozesssicher beschichtbaren Radius darstellt. Die Verrundung der Schneidstempelkante bewirkt, wie bereits in der Strategie Verschleiß zuvor, eine Vergrößerung des Schneidspaltes zu Beginn des Scherschneidprozesses. Der Anteil des Kanteneinzugs sowie des Glattschnitts steigt daher im Vergleich zur Strategie Referenz an, der Bruchflächenanteil nimmt ab. Die Grathöhe steigt ebenfalls auf 8  $\mu\text{m}$ . Der Bruchflächenwinkel nimmt nur leicht ab und beträgt 80,7  $^\circ$ .

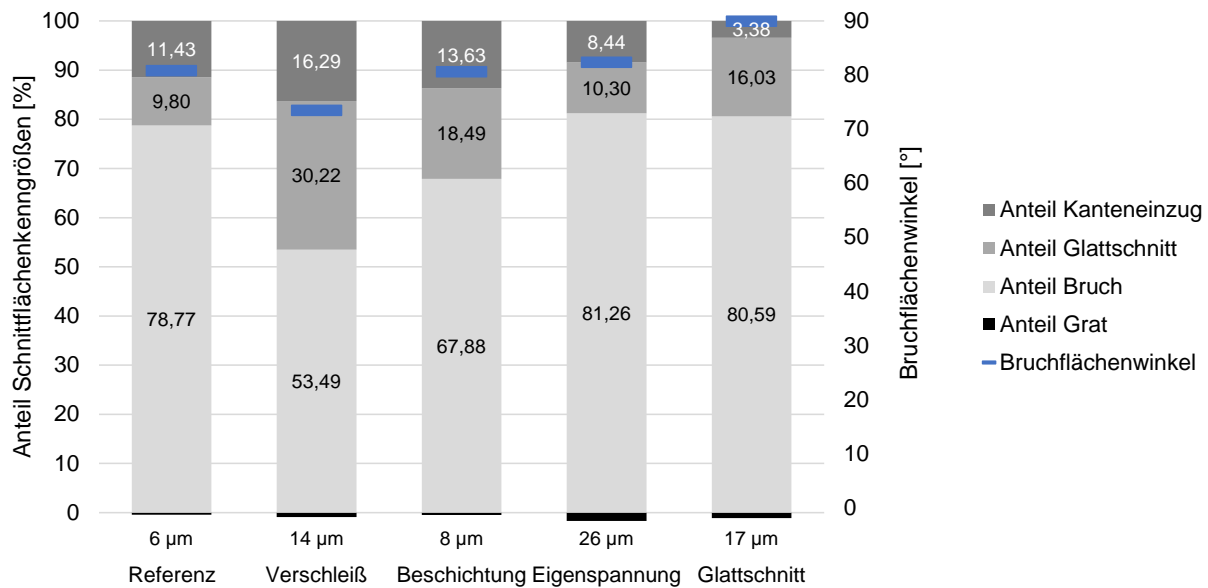


Abbildung 6.13: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen DP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Durch den zweistufigen Scherschneidprozess der Strategie Eigenspannung und Glattschnitt wird die Steifigkeit des Abfalls beim Nachschneiden, im Vergleich zum Normalschneiden reduziert, wodurch die Kanteneinzugshöhe sinkt. Ein Teil des Werkstoffes des Butzens fließt im Nachschneidvorgang in radiale Richtung, zusätzlich wird der Butzen nicht wie im geschlossenen Schnitt abgestützt, wodurch ein erhöhter Biegeanteil entsteht, der zu einem veränderten Spannungszustand führt. Es werden zusätzliche Zugspannungen an der Stempelseite impliziert, weshalb die Rissbildung stempelseitig initiiert wird. Die Breite der Nachschneidzugabe hat dabei einen großen Einfluss auf die Ausprägung der schergeschnittenen Schnittfläche. Der Butzen übernimmt im Fall des Nachschneidens bei richtig gewählter Nachschneidzugabe einen Großteil der plastischen Deformation aus dem Umformvorgang, im resultierenden Schnittteil verbleibt folglich weniger Kaltverfestigung. Dies äußert sich nicht nur in der Reduktion der maximalen Aufhärtung als auch in einer geringeren Tiefe der Schereinflusszone.

Die beiden in diesem Forschungsvorhaben angewandten Scherschneidstrategien sind jedoch auf Grund ihrer unterschiedlich breiten Nachschneidzugaben und der damit verbundenen unterschiedlichen Effekte voneinander zu unterscheiden.

Der Nachschneidprozess mit einer Nachschneidzugabe von  $z = 2$  mm für die Strategie Eigenspannung führt durch die geringere Steifigkeit des Butzens, verglichen mit einem einstufigen Prozess, zu einem kleineren Anteil des Kanteneinzugs. Der Glattschnittanteil und der Bruchanteil steigen leicht an. Weiterhin kommt es zu einer leicht erhöhten Ausbildung des Grats, welche durch das Wegbiegen des Butzens aufgrund der niedrigen Steifigkeit hervorgerufen wird. Der Bruchflächenwinkel steigt im Vergleich zur Referenzstrategie geringfügig auf  $82,4^\circ$ .

Ein zweistufiger Scherschneidprozess mit Nachschneidzugabe von 0,4 mm kann aufgrund der noch geringen Steifigkeit den kleinsten Anteil des Kanteneinzugs vorweisen. Der Glattschnittanteil wird um 63,5 % auf absolut 16,03 % gesteigert, der Bruchflächenanteil beträgt 80,59 %. Auch für eine Nachschneidzugabe von 0,4 mm ist ein Anstieg des Grats auf 17  $\mu\text{m}$  zu verzeichnen. Die geringe Breite der Nachschneidzugabe führt zu einer starken Deformation des Butzens, welcher sich einrollt, so dass eine nahezu rechtwinklige Schnittfläche entsteht, siehe Abbildung 6.14.

Nachfolgende Tabelle 6.8: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus DP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$  listet die Ergebnisse der Rauheitsmessungen im Glattschnitt- und Bruchflächenbereich auf.

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.8 zeigen, dass für alle Strategien die Rauheit im Glattschnittbereich erwartungsgemäß geringer ist als im Bruchflächenanteil. Die Rauheit auf der Glattschnittfläche ist für die Referenzstrategie auf Grund der scharfkantigen Aktivelemente höher als für die Verschleißstrategie. Die Aktivelemente werden für die Strategie durch manuelles Schleifen mit Hilfe von Schleifpaste auf  $r = 300 \mu\text{m}$  verrundet. Dies zieht eine Reduktion der Oberflächenrauheit der Stempeloberfläche nach sich und verringert daher die Rauheit auf dem Glattschnittanteil. Im Bruchflächenanteil hingegen ist die Rauheit für die Verschleißstrategie um circa 40 % höher als für die Strategie Referenz. Die Rauheitskenngößen für die Strategien Beschichtung und Eigenspannung im Glattschnitt weichen nur sehr gering von jenen der Referenzstrategie ab, für den Bruchflächenbereich liegen die Kenngößen oberhalb der Referenzstrategie. Die Glattschnittstrategie verzeichnet im Glattschnittbereich die höchsten Rauheitswerte, die Rauheit im Bruchflächenbereich ist vergleichbar mit jener der Referenzstrategie.

Tabelle 6.8: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus DP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G} [\mu\text{m}]$	$R_{z,G} [\mu\text{m}]$	$R_{\max,G} [\mu\text{m}]$	$R_{a,B} [\mu\text{m}]$	$R_{z,B} [\mu\text{m}]$	$R_{\max,B} [\mu\text{m}]$
Referenz	0,13	1,20	1,85	1,90	11,04	14,09
Verschleiß	0,07	0,58	0,77	2,73	15,47	19,70
Beschichtung	0,12	0,89	1,26	2,89	17,52	22,74
Eigenspannung	0,14	1,10	1,52	2,21	12,58	15,03
Glattschnitt	0,34	2,71	4,36	1,86	10,66	13,59

Im Folgenden sind in Abbildung 6.14 die Härteplots der Mikrohärtmessungen zur Bestimmung der maximalen Aufhärtung sowie der Tiefe der Schereinflusszone aufgetragen. Tabelle 6.9 gibt

die Ergebnisse für die maximale Aufhärtung als Verhältnis von maximal gemessener Härte zu Härte des Ausgangsmaterials unterhalb der schergeschnittenen Oberfläche wieder.

Das Grundgefüge des Dualphasenstahls DP800 weist eine gemittelte Härte von 235 HV 0,05 auf. Einige der Mikrohärteplots weisen zeilenförmige Inhomogenitäten bezüglich der Ausgangshärte auf.

Im Fall der Referenzstrategie findet die stärkste Aufhärtung am Bruchflächenbereich statt. Der Werkstoff härtet dabei um das 1,65-fache seiner Grundhärte auf. Die Schereinflusszone reicht bis in eine Tiefe von ca. 0,5 mm, welches einem Drittel der Blechdicke entspricht.

Eine Verrundung der Schneidstempelkante ( $r = 300 \mu\text{m}$ ) verursacht eine stärkere Aufhärtung der Schereinflusszone direkt unterhalb der Schnittfläche im unförmig ausgeprägten Glattschnittanteil. Die maximale Aufhärtung unterhalb der Schnittfläche ist für die Verschleißstrategie nur geringfügig höher als im Referenzzustand, das Volumen an stark verfestigtem Werkstoff ist jedoch wesentlich größer.

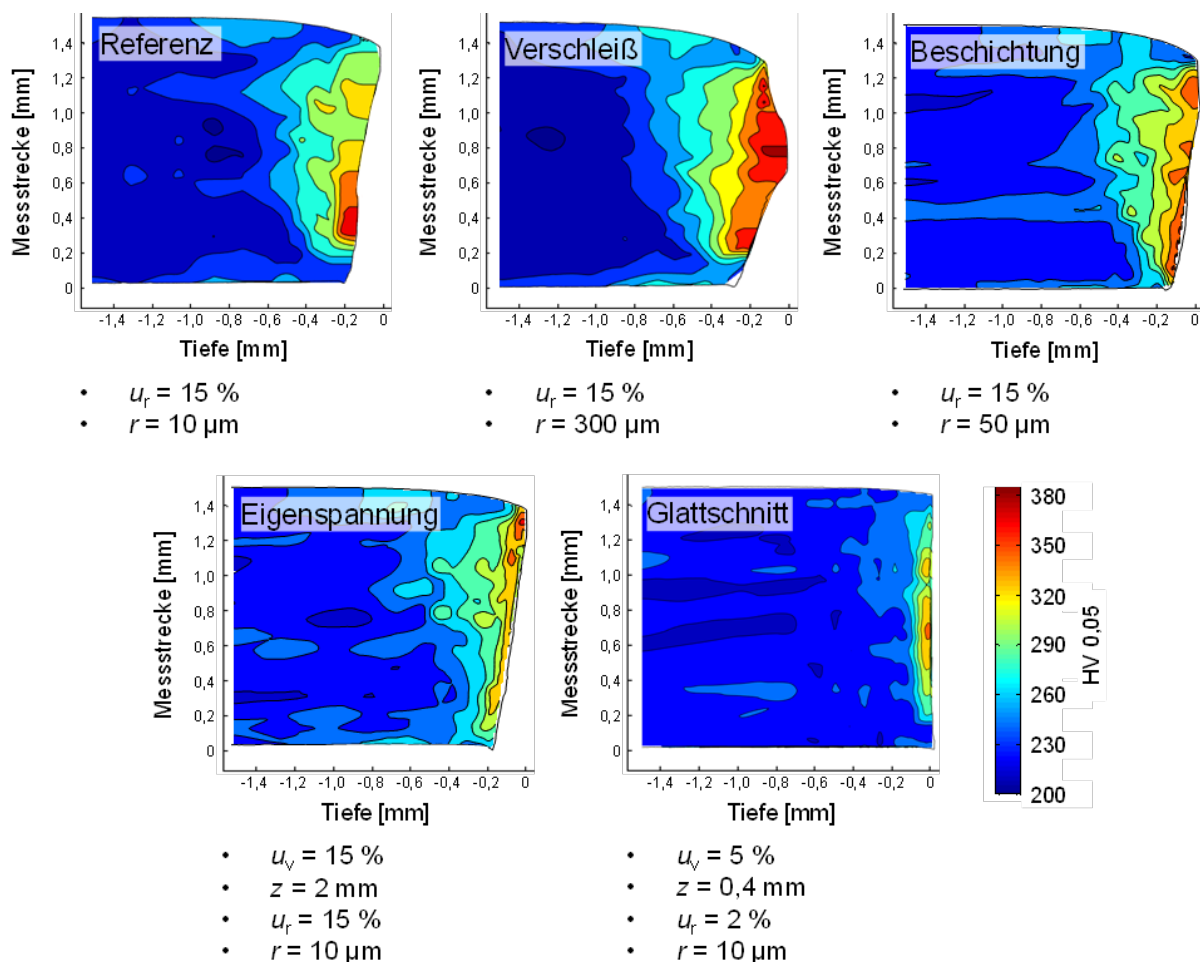


Abbildung 6.14: Aufhärtung der Schereinflusszone DP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Für die Strategie Beschichtung ist die maximale Aufhärtung geringer als im Fall der Referenzstrategie, jedoch erstreckt sich das stark deformierte Gefüge vom Glattschnittanteil bis in den Bruchflächenanteil. Die Tiefe der Aufhärtung ist vergleichbar mit der Referenzstrategie.

Das Nachschneiden mit einer Nachschneidzugabe von  $z = 2$  mm (Strategie Eigenspannung) führt zu einer geringeren Steifigkeit des Butzens und ähnelt dadurch einem offenen Schnitt. Dies führt zu einer geringeren Verformung (Kanteneinzug + Glattschnittanteil) und dadurch zu einem geringeren Aufhärtungsniveau. Die Tiefe der Aufhärtung ist dennoch ähnlich hoch wie in der Referenzstrategie.

Für die Glattschnittstrategie (Nachschneiden mit einer Nachschneidzugabe von  $z = 0,4$  mm) besitzt der Butzen eine noch geringere Steifigkeit, wodurch der Prozess noch mehr einem offenen Schnitt ähnelt. Die Kaltverfestigung unterhalb der Schnittfläche ist für diese Strategie am geringsten, der Werkstoff härtet maximal um das 1,49-fache des Grundwerkstoffes auf. Das noch geringere Aufhärtungsniveau wird dadurch erreicht, dass der Butzen einen großen Teil der plastischen Deformation aus dem Scherschneidvorgang aufnimmt. Die Tiefe der Aufhärtung ist für die Strategie Glattschnitt am geringsten (ca. 0,15 mm), sie beträgt lediglich ein Zehntel der Blechdicke.

Tabelle 6.9: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}/HV_0$ [-]
Referenz	235	380	1,65
Verschleiß	235	386	1,67
Beschichtung	235	354	1,51
Eigenspannung	235	362	1,57
Glattschnitt	235	345	1,49

DP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

#### Kerbformzahl $K_t = 2,5$

Abbildung 6.15 zeigt die fotografische Dokumentation der Schnittflächenausprägungen des Werkstoffes DP800 für die Scherschneidstrategien Referenz, Verschleiß, Beschichtung und Glattschnitt. Da die Schnittflächenqualität der Schwingproben, welche entsprechend der Glattschnittstrategie gefertigt wurden, stark variierte sind die Schnittflächenausprägungen bei fortschreitenden Hubzahlen dokumentiert worden.

Die entsprechend der unterschiedlichen Scherschneidstrategien entstandenen charakteristischen Schnittflächenkenngößen sowie der Bruchflächenwinkel sind in nachfolgender Abbildung 6.16 aufgetragen. Die Schnittflächenausprägung der Scherschneidstrategie Referenz weist einen Kanteneinzugsanteil von 9,07 % auf, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 16,17 % und einem Bruchflächenanteil von 74,76 %. Die absolute Grathöhe beträgt  $4 \mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei  $78,84^\circ$ . Aufgrund der geschlossenen Schnittlinie und des veränderten Spannungszustands zeichnet sich die Schnittfläche des schergeschnittenen Lochs mit Kerbformzahl  $K_t=2,5$  gegenüber der offenen Schnittlinie mit  $K_t = 1$  durch einen kleineren Kanteneinzug sowie einen höheren Glattschnittanteil aus. Der Bruchflächenanteil ist entsprechend geringer. Dies begründet sich durch die symmetrische geschlossene Schnittliniengeometrie, die höhere Steifigkeit des Butzens und das dadurch reduzierte Biegemoment in der Schereinflusszone.

Eine Verrundung der Schneidstempelkante auf  $r = 300 \mu\text{m}$  ahmt bei gleichbleibendem Schneidspalt den Verschleißzustand eines Schneidstempels nach. Der größere Schneidkantenradius hat einen Anstieg des Anteils des Kanteneinzugs auf 11,77 % sowie des Glattschnittanteils auf 44,89 % mit einhergehender Reduktion des Bruchflächenanteils auf 43,34 % zur Folge. Die Grathöhe wächst auf  $14 \mu\text{m}$ . Die Tendenzen durch die Verrundung der Schneidstempelkante stimmen mit jenen der offenen Schnittlinie ( $K_t = 1$ ) überein. Die verrundete Schneidstempelkante ( $r = 300 \mu\text{m}$ ) bewirkt eine Vergrößerung des Schneidspaltes zu Beginn des Scherschneidprozesses. Der Anteil des Kanteneinzugs steigt daher an, wird aber durch die Inkompressibilität des Werkstoffes begrenzt. Der erhöhte Glattschnittanteil resultiert aus dem während des Scherschneidprozesses kleiner werdenden Schneidspalt und des dadurch induzierten erhöhten Druckspannungszustands während der Glattschnittausbildung. Die Ausbildung des ungleichförmigen Glattschnitts entsteht durch die frühe Rissbildung an der scharfkantigen ( $r = 10 \mu\text{m}$ ) Matrzenschneidkante. Aufgrund des größeren Anteils an Kanteneinzug und Glattschnitt nimmt der Bruchflächenwinkel  $\beta$  ab und beträgt  $76,53^\circ$ . Wie bereits für die Referenzstrategie beschrieben, nimmt auch für die Verschleißstrategie gegenüber der offenen Schnittlinie der Kanteneinzug für eine Kerbformzahl von  $K_t = 2,5$  ab, der Glattschnittanteil nimmt zu.

Für die Strategie Beschichtung wurde die Schneidstempelkante auf  $r = 50 \mu\text{m}$  verrundet, da dies dem kleinsten prozesssicher beschichtbaren Radius entspricht. Die Verrundung der Schneidstempelkante bewirkt, wie bereits in der Strategie Verschleiß zuvor, eine Vergrößerung des Schneidspaltes zu Beginn des Scherschneidprozesses. Der Anteil des Kanteneinzugs sowie des Glattschnitts steigt daher im Vergleich zur Strategie Referenz an, der Bruchflächenanteil nimmt ab. Die Grathöhe steigt ebenfalls auf  $7 \mu\text{m}$ . Der Bruchflächenwinkel bleibt konstant und beträgt  $78,83^\circ$ .



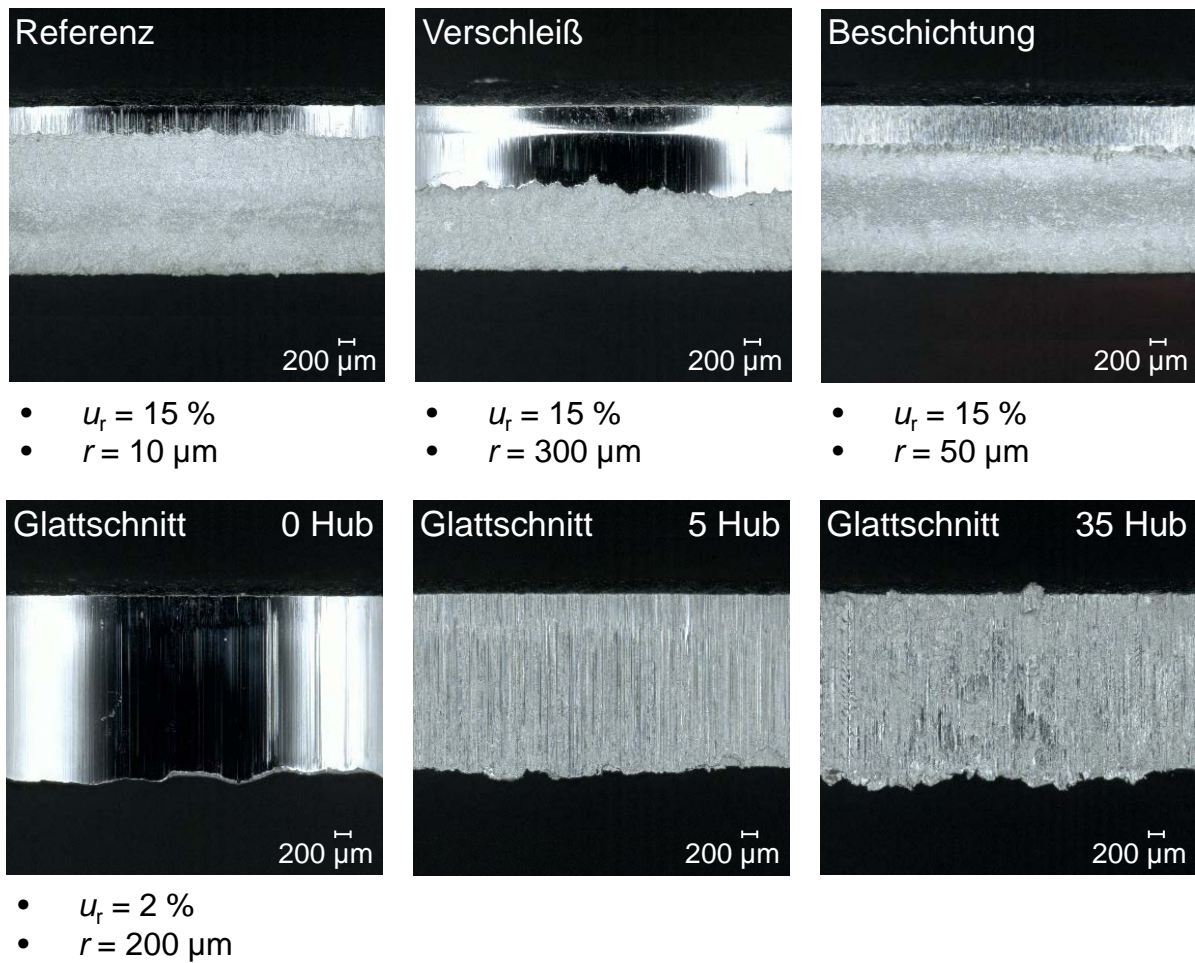


Abbildung 6.15: Optische Schnittflächenausprägung DP800, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

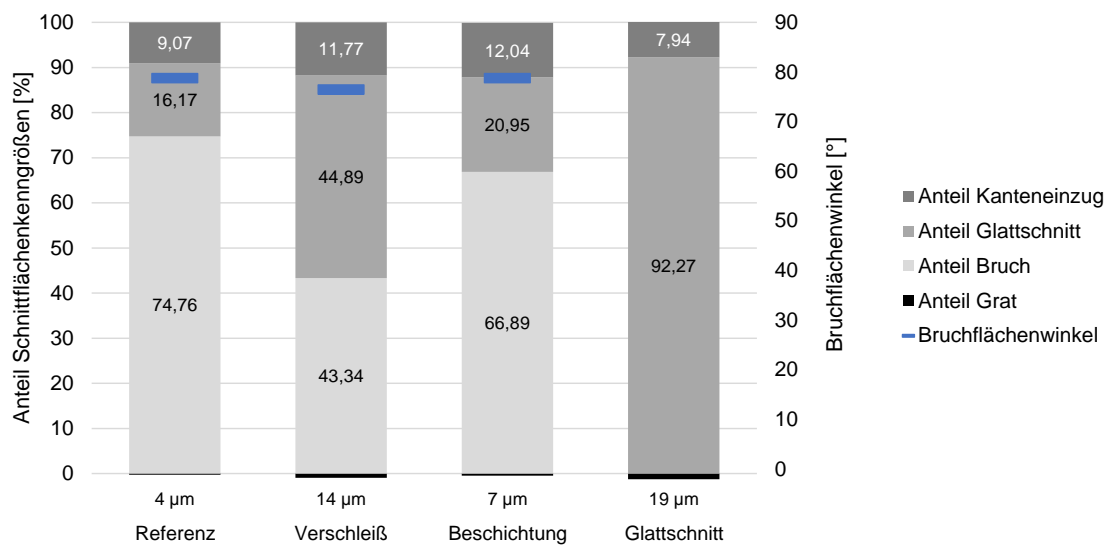


Abbildung 6.16: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen DP800, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Durch die Verrundung der Schneidstempelkante ( $r = 200 \mu\text{m}$ ) in Kombination mit einem verkleinerten Schneidspalt ( $u_r = 2 \%$ ) kann der maximale Glattschnittanteil erzielt werden. Der Materialfluss in der Schereinflusszone fördert Kaltaufschweißungen an der Stempelmantelfläche, welche mit zunehmender Hubzahl die Rauheit der Schnittfläche erhöhen. Kaltaufschweißungen können analog zum Feinschneiden durch eine geeignete Beschichtung der Aktivelemente und entsprechende Beölung vermieden werden.

Nachfolgende Tabelle 6.10 listet die Ergebnisse der Rauheitsmessungen im Glattschnitt- und Bruchflächenbereich auf.

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.10 zeigen, dass für alle Strategien die Rauheit im Glattschnittbereich erwartungsgemäß geringer ist als im Bruchflächenanteil. Die Rauheit auf der Glattschnittfläche ist für die Referenzstrategie auf Grund der scharfkantigen Aktivelemente höher als für die Verschleißstrategie. Die Verrundung der Aktivelemente mit Schleifpaste für die Strategie Verschleiß bewirkt eine Reduktion der Oberflächenrauheit der Stempeloberfläche und damit verbunden eine Abnahme der Rauheit auf dem Glattschnittanteil. Im Bruchflächenanteil hingegen ist die Rauheit für die Verschleißstrategie höher als für die Strategie Referenz. Die Rauheitskenngrößen im Glattschnittbereich konnten durch die Beschichtung des Aktivelements Stempel halbiert werden, der Bruchflächenanteil geringfügig rauer als für die Strategie Referenz. Die Glattschnittstrategie verzeichnet aufgrund der zunehmenden Kaltaufschweißungen mit steigender Hubzahl einen rapiden Anstieg der Rauheitskenngrößen.

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus DP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G} [\mu\text{m}]$	$R_{z,G} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max},G} [\mu\text{m}]$	$R_{a,B} [\mu\text{m}]$	$R_{z,B} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max},B} [\mu\text{m}]$
Referenz	0,18	1,54	1,85	1,12	6,15	7,64
Verschleiß	0,05	0,51	0,84	1,55	7,96	10,46
Beschichtung	0,09	0,62	0,86	1,21	6,36	8,05
Glattschnitt 0 Hub	0,26	1,82	2,94	-	-	-
Glattschnitt 5 Hub	1,85	7,96	11,79	-	-	-
Glattschnitt 35 Hub	3,34	19,84	33,64	-	-	-

Im Folgenden sind in Abbildung 6.17 die Härteplots der Mikrohärtemessungen zur Bestimmung der maximalen Aufhärtung sowie der Tiefe der Schereinflusszone aufgetragen. Tabelle 6.11 gibt

die Ergebnisse für die maximale Aufhärtung als Verhältnis von maximal gemessener Härte zu Härte des Ausgangsmaterials unterhalb der schergeschnittenen Oberfläche wider.

Wie bereits für die ungekerbten Proben findet auch im Fall der Referenzstrategie die stärkste Aufhärtung am Bruchflächenbereich statt. Der Werkstoff härtet dabei um das 1,55-fache seiner Grundhärte auf. Die geringere Aufhärtung gegenüber den ungekerbten Proben erklärt sich durch das Abstützen des Butzens. Die Aufhärtung dringt bis ca. 0,5 mm in die Tiefe ein, die stärkste Kaltverfestigung tritt wie auch bereits im offenen Schnitt im Bereich der Bruchfläche auf.

Eine Verrundung der Schneidstempelkante ( $r = 300 \mu\text{m}$ ) verursacht gegenüber der Referenzstrategie eine sehr starke Aufhärtung an der Schnittfläche. Durch den hohen Glattschnittanteil wird eine starke Kaltverfestigung erzeugt, die Tiefe der Schereinflusszone ist geringfügig höher.

Für die Strategie Beschichtung ( $r = 50 \mu\text{m}$ ) ist die maximale Aufhärtung mäßig höher als im Fall der Referenzstrategie, die Tiefe der Aufhärtung ist ebenfalls leicht größer.

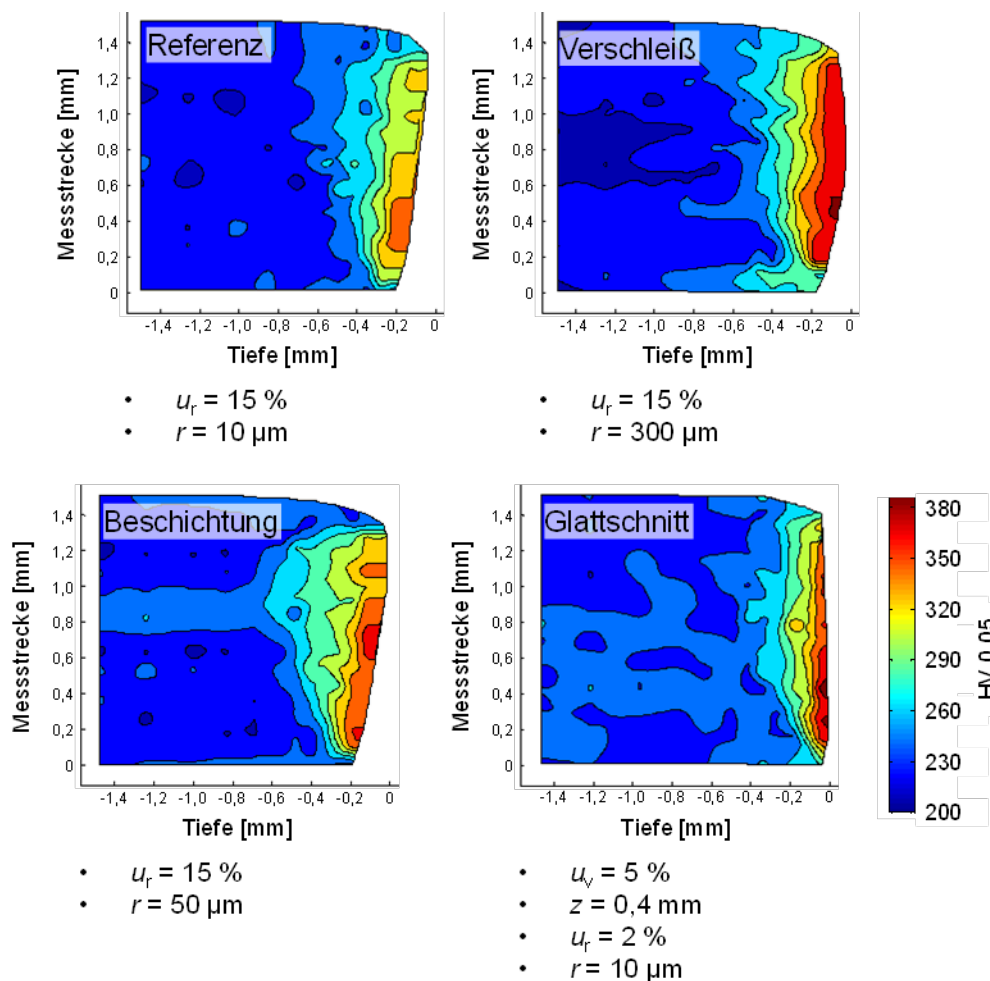


Abbildung 6.17: Aufhärtung der Schereinflusszone DP800, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Durch die Verrundung der Schneidstempelkante ( $r = 200 \mu\text{m}$ ) in Kombination mit einem verkleinerten Schneidspalt ( $u_r = 2 \%$ ) wird die stärkste Aufhärtung an der Schnittfläche erzeugt. Der hohe Glattschnittanteil geht mit einer starken Kaltverfestigung einher. Aufgrund des kleineren Schneidspalts entsteht in der Schereinflusszone ein kleineres Biegemoment, welches eine geringere Tiefe der Schereinflusszone zur Folge hat.

Tabelle 6.11: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,\text{max}}$ [HV 0,05]	$HV_{1,\text{max}}/HV_0$ [-]
Referenz	235	357	1,55
Verschleiß	235	381	1,65
Beschichtung	235	368	1,59
Glattschnitt	235	384	1,66

DP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

#### Kerbformzahl $K_t = 4,6$

Abbildung 6.18 zeigt die fotografische Dokumentation der Schnittflächenausprägungen des Werkstoffes DP800 für die Scherschneidstrategien Referenz und Verschleiß.

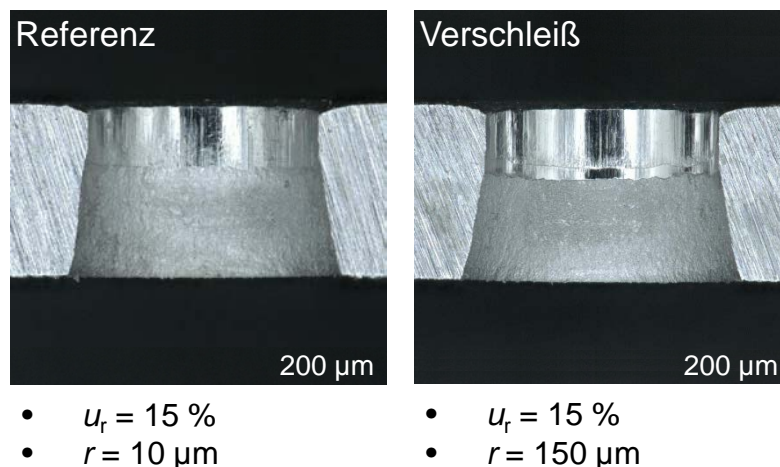


Abbildung 6.18: Optische Schnittflächenausprägung DP800, Kerbformzahl  $K_t = 4,6$

Die entsprechend der unterschiedlichen Scherschneidstrategien entstandenen charakteristischen Schnittflächenkenngrößen sowie der Bruchflächenwinkel sind in nachfolgender Abbildung 6.19 aufgetragen. Die Schnittflächenausprägung der Scherschneidstrategie Referenz weist einen Kanteneinzugsanteil von 3,91 % auf, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 34,02 % und einem Bruchflächenanteil von 62,05 %. Die absolute Grathöhe beträgt  $11 \mu\text{m}$ , der Bruchflächen-

winkel  $\beta$  liegt bei  $78,42^\circ$ . Aufgrund der geschlossenen Schnittlinie und des veränderten Spannungszustands zeichnet sich die Schnittfläche des schergeschnittenen Lochs mit Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  gegenüber der offenen Schnittlinie mit  $K_t = 1$  sowie  $K_t = 2,5$  durch einen noch kleineren Kanteneinzug sowie einen höheren Glattschnittanteil aus. Der Bruchflächenanteil ist entsprechend geringer.

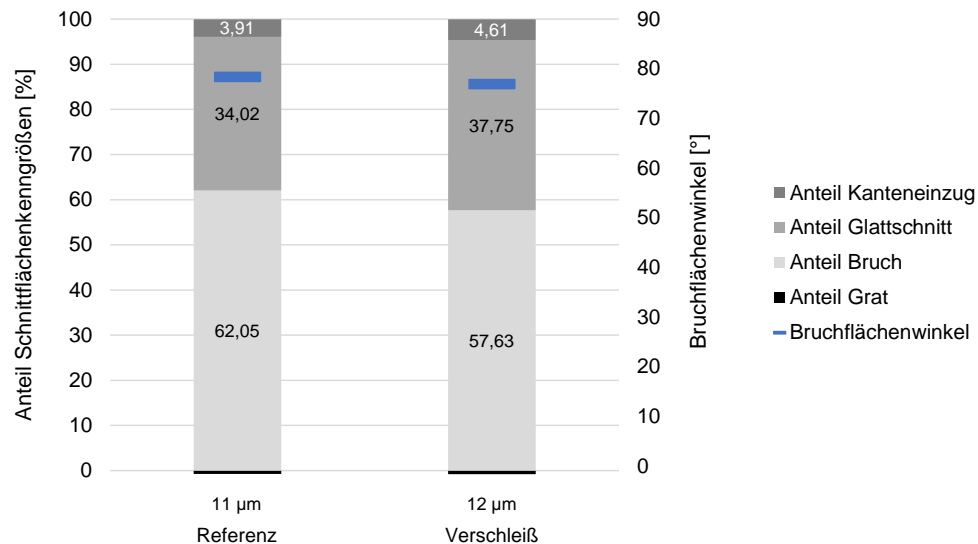


Abbildung 6.19: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen DP800, Kerbformzahl  $K_t = 4,6$

Eine Verrundung der Schneidstempelkante auf  $r = 150 \mu\text{m}$  ahmt bei gleichbleibendem Schneidspalt den Verschleißzustand eines Schneidstempels nach. Der größere Schneidkantenradius hat einen Anstieg des Anteils des Kanteneinzugs auf  $4,61\%$  sowie des Glattschnittanteils auf  $37,75\%$  mit einhergehender Reduktion des Bruchflächenanteils auf  $57,63\%$  zur Folge. Die Grathöhe wächst auf  $12 \mu\text{m}$ . Die Tendenzen durch die Verrundung der Schneidstempelkante stimmen mit jenen der offenen Schnittlinie ( $K_t = 1$ ) überein. Die verrundete Schneidstempelkante ( $r = 150 \mu\text{m}$ ) bewirkt eine Vergrößerung des Schneidspaltes zu Beginn des Scherschneidprozesses. Der Anteil des Kanteneinzugs steigt daher an. Der erhöhte Glattschnittanteil resultiert aus dem während des Scherschneidprozesses kleiner werdenden Schneidspalt und des dadurch induzierten erhöhten Druckspannungszustands während der Glattschnittausbildung. Aufgrund des größeren Anteils an Kanteneinzug und Glattschnitt nimmt der Bruchflächenwinkel  $\beta$  ab und beträgt  $76,95^\circ$ . Wie bereits für die Referenzstrategie beschrieben, nimmt auch für die Verschleißstrategie gegenüber der offenen Schnittlinie der Kanteneinzug für eine Kerbformzahl von  $K_t = 4,6$  ab, der Glattschnittanteil nimmt zu.

Aufgrund der sehr kleinen und gleichzeitig halbrunden Schnittfläche war es nicht möglich die Rauheit normgerecht zu bestimmen.

Im Folgenden sind in Abbildung 6.20 die Härteplots der Mikrohärtmessungen zur Bestimmung der maximalen Aufhärtung sowie der Tiefe der Schereinflusszone aufgetragen. Tabelle 6.12 gibt die Ergebnisse für die maximale Aufhärtung als Verhältnis von maximal gemessener Härte zu Härte des Ausgangsmaterials unterhalb der schergeschnittenen Oberfläche wider.

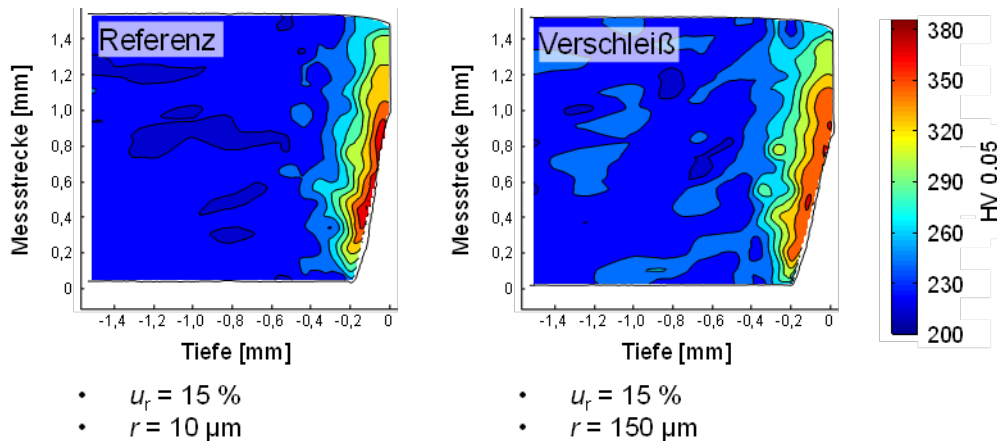


Abbildung 6.20: Aufhärtung der Schereinflusszone DP800, Kerbformzahl  $K_t = 4,6$

Tabelle 6.12: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}/HV_0$ [-]
Referenz	235	365	1,55
Verschleiß	235	359	1,53

DP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 4,6$

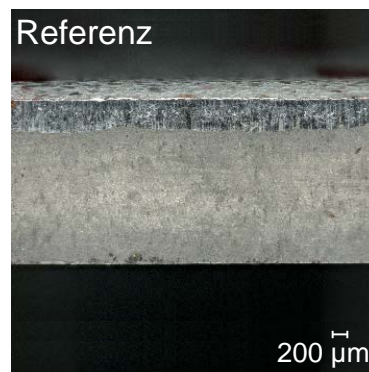
Im Fall der stark gekerbten Proben tritt die stärkste Aufhärtung unterhalb der Bruchfläche auf. Die Aufhärtung erstreckt sich dabei über eine geringe Tiefe, jedoch über eine Länge von circa zwei Drittel der Bruchfläche. Der Werkstoff verfestigt dabei um das 1,55-fache seiner Grundhärte. Die Aufhärtung dringt bis ca. 0,3 mm in die Tiefe ein.

Eine Verrundung der Schneidstempelkante ( $r = 150 \mu\text{m}$ ) verursacht gegenüber der Referenzstrategie eine geringere maximale Aufhärtung an der Schnittfläche. Der Bereich der stärksten Aufhärtung erstreckt sich jedoch über ein größeres Werkstoffvolumen, beginnt bereits im Glattschnittanteil und erstreckt sich bis zum Ende der Bruchfläche. Die Tiefe der Aufhärtung ist mäßig größer, als für die Referenzstrategie.

### 6.1.3.3 CP800

#### Kerbformzahl $K_t = 1$

Abbildung 6.21 und Abbildung 6.22 zeigen die fotografische Dokumentation sowie die Anteile der charakteristischen Schnittflächenkenngößen des Werkstoffes CP800 für die Scherschneidstrategie Referenz.



- $u_r = 15 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

Abbildung 6.21: Optische Schnittflächenausprägung CP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$

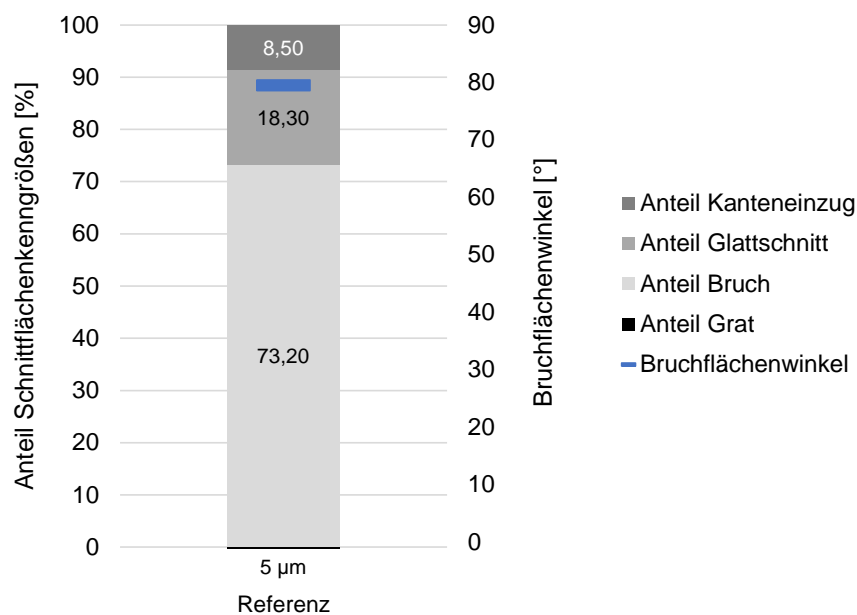


Abbildung 6.22: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngößen CP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Die Scherschneidstrategie Referenz zeigt eine typische Schnittflächenausprägung eines Complexphasenstahls, welcher mit scharfkantigen Aktivelementen und einem auf Erfahrungswerten basierendem Schneidspalt von  $u_r = 15 \%$  schergeschnitten wurde. Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 8,50 %, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 18,30 % und einem Bruchflächenanteil von 73,20 %. Die absolute Grathöhe beträgt 5 μm, der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei 79,53 °.

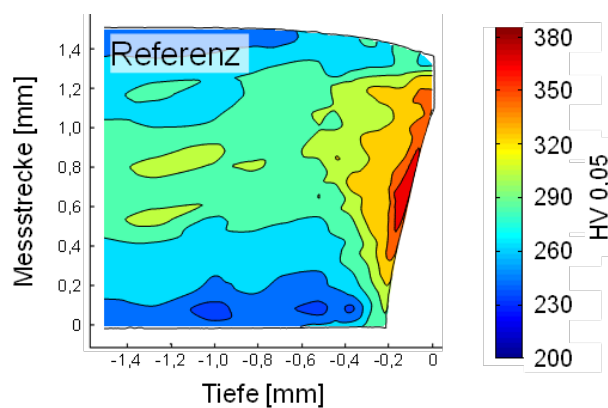
Verglichen mit den Schnittflächenkenngrößen des Dualphasenstahls DP800 kennzeichnet sich die Schnittfläche der Referenzstrategie des CP800 durch einen kleineren Kanteneinzug, welcher durch die höhere Festigkeit bedingt ist. Der Glattschnittanteil ist aufgrund des zusätzlichen Gefügeanteils Bainit höher als im Fall des DP800, der Bruchflächenanteil ist entsprechend kleiner.

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.13 zeigen, dass die Rauheit im Glattschnittbereich erwartungsgemäß geringer ist als im Bruchflächenanteil. Die Rauheit auf der Glattschnittfläche ist vergleichbar mit jener des Werkstoffes DP800, die Rauheit im Bruchflächenbereich ist geringfügig höher.

Nachfolgend ist in Abbildung 6.23 der Härteplot der Mikrohärtemessungen zur Bestimmung der maximalen Aufhärtung sowie der Tiefe der Schereinflusszone aufgetragen. Tabelle 6.14 gibt das Ergebnis der maximalen Aufhärtung als Verhältnis von maximal gemessener Härte zu Härte des Ausgangsmaterials unterhalb der schergeschnittenen Oberfläche wider.

Tabelle 6.13: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus CP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{a,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},B}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Referenz	0,16	1,31	2,02	2,12	12,57	15,99



- $u_r = 15 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

Abbildung 6.23: Aufhärtung der Schereinflusszone CP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Das Grundgefüge des Komplexphasenstahls CP800 weist eine gemittelte Härte von 275 HV 0,05 auf, die Verteilung der Härte ist jedoch über die Blechdicke hinweg nicht homogen. Im oberflächennahen Bereich des Grundwerkstoffes beträgt die gemessene Härte 250 HV 0,05, in der Mitte hingegen bis zu 300 HV 0,05. Der Scherschneidprozess des CP800 mit scharfkantigen Aktivele-



menten und einem Schneidspalt von  $u_r = 15 \%$  hat eine geringere absolute Aufhärtung des Gefüges unterhalb der Schnittfläche im Vergleich zum Werkstoff DP800 zur Folge.

Tabelle 6.14: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}/HV_0$ [-]
Referenz	275	375	1,36

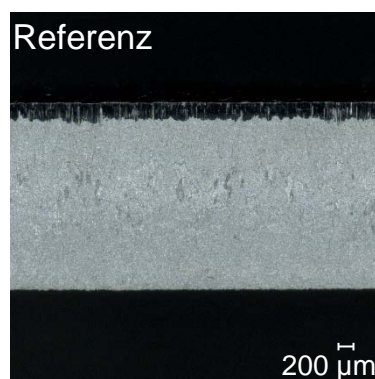
CP800 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

#### 6.1.3.4 DP1000

##### Kerbformzahl $K_t = 1$

Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25 zeigen die fotografische Dokumentation sowie die Anteile der charakteristischen Schnittflächenkenngrößen des Werkstoffes DP1000 für die Scherschneidstrategie Referenz.

Die Scherschneidstrategie Referenz zeigt eine typische Schnittflächenausprägung eines Dualphasenstahls, welcher mit scharfkantigen Aktivelementen und einem auf Erfahrungswerten basierendem Schneidspalt von  $u_r = 15 \%$  schergeschnitten wurde. Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 7,87 %, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 9,22 % und einem Bruchflächenanteil von 82,92 %. Die absolute Grathöhe beträgt  $4 \mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei  $83,0^\circ$ . Verglichen mit den Schnittflächenkenngrößen des Dualphasenstahls DP800 kennzeichnet sich die Schnittfläche der Referenzstrategie des DP1000 durch einen kleineren Kanteneinzug sowie Glattschnittanteil welcher durch die höhere Festigkeit bedingt ist, der Bruchflächenanteil ist entsprechend größer.



- $u_r = 15 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

Abbildung 6.24: Optische Schnittflächenausprägung DP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

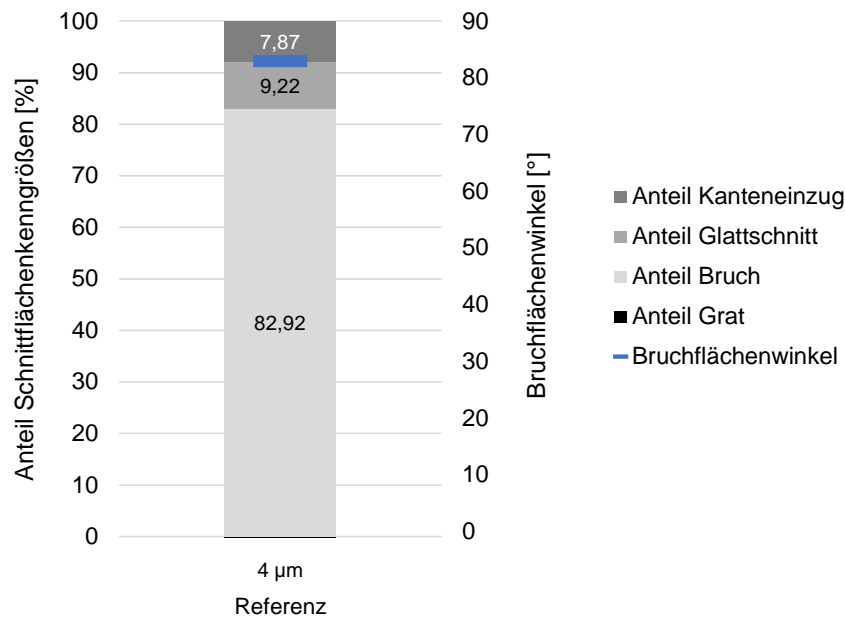


Abbildung 6.25: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen DP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.15 zeigen, dass die Rauheit im Glattschnittbereich erwartungsgemäß geringer ist als im Bruchflächenanteil. Die Rauheitskenngrößen auf der Glattschnittfläche sowie im Bruchflächenbereich sind geringfügig kleiner als für den Werkstoff DP800.

Tabelle 6.15: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus DP1000 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{a,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},B}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Referenz	0,11	1,27	2,61	1,54	9,44	11,72

Nachfolgend ist in Abbildung 6.26 der Härteplot der Mikrohärtemessungen zur Bestimmung der maximalen Aufhärtung sowie der Tiefe der Schereinflusszone aufgetragen. Tabelle 6.16 gibt das Ergebnis der maximalen Aufhärtung als Verhältnis von maximal gemessener Härte zu Härte des Ausgangsmaterials unterhalb der schergeschnittenen Oberfläche wider.

Das Grundgefüge des Dualphasenstahls DP800 weist eine gemittelte Härte von 311 HV 0,05 auf. Der Mikrohärtplot weist zeilenförmige Inhomogenitäten bezüglich der Ausgangshärte auf. Die maximale Kaltverfestigung tritt im unteren Bereich der Bruchfläche auf. Der Werkstoff härtet dabei um das 1,30-fache seiner Grundhärte auf. Die Schereinflusszone reicht bis in eine Tiefe von circa 0,35 mm.

Der Scherschneidprozess des DP1000 mit scharfkantigen Aktivelementen und einem Schneidspalt von  $u_r = 15\%$  hat eine geringere absolute Aufhärtung des Gefüges unterhalb der Schnittfläche im Vergleich zum Werkstoff DP800 zur Folge.

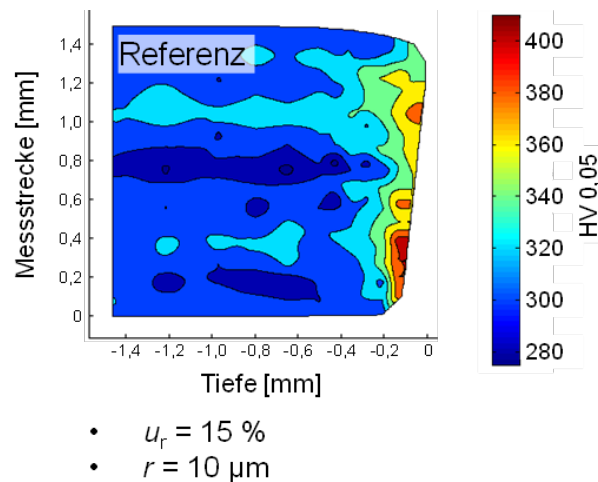


Abbildung 6.26: Aufhärtung der Schereinflusszone DP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Tabelle 6.16: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,\text{max}}$ [HV 0,05]	$HV_{1,\text{max}}/HV_0$ [-]
Referenz	311	404	1,30

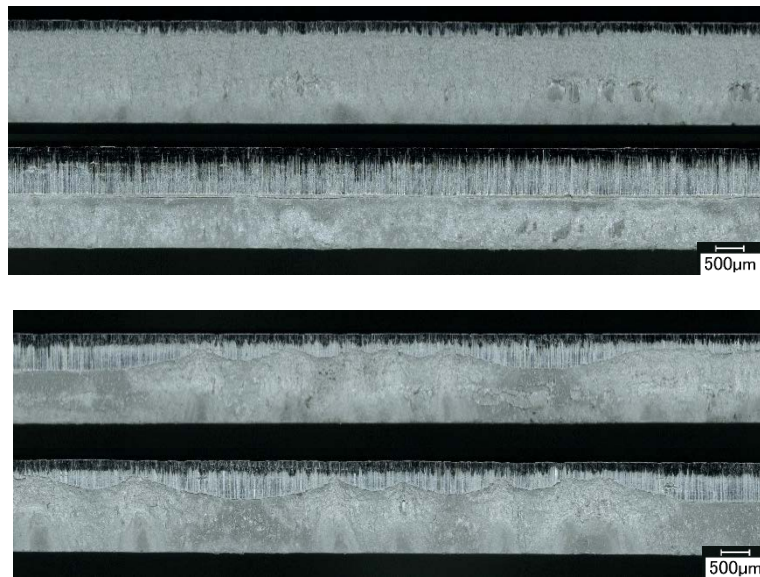
DP1000 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

### 6.1.3.5 CP1000

#### Kerbformzahl $K_t = 1$

Abbildung 6.27 und Abbildung 6.28 zeigen die fotografische Dokumentation sowie die Anteile der charakteristischen Schnittflächenkenngrößen des Werkstoffes CP1000 für die Scherschneidstrategie Referenz.

Die Scherschneidstrategie Referenz zeigt atypische Schnittflächenausprägungen eines Komplexphasenstahls, welcher mit scharfkantigen Aktivelementen und einem auf Erfahrungswerten basierendem Schneidspalt von  $u_r = 15\%$  schergeschnitten wurde. Es treten dabei die in Abbildung 6.27 dargestellten unterschiedlichen Schnittflächenausprägungen auf. Grund hierfür könnte die inhomogene Härteverteilung des Ausgangsgefüges darstellen (siehe Abbildung 6.30). Eine linienförmige Seigerung in der Mitte des Blechwerkstoffes (siehe Abbildung 6.28) verursacht außerdem Anrisse aus der Schnittfläche.



- $u_r = 15 \%$
- $r = 10 \mu\text{m}$

Abbildung 6.27: Optische Schnittflächenausprägung CP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

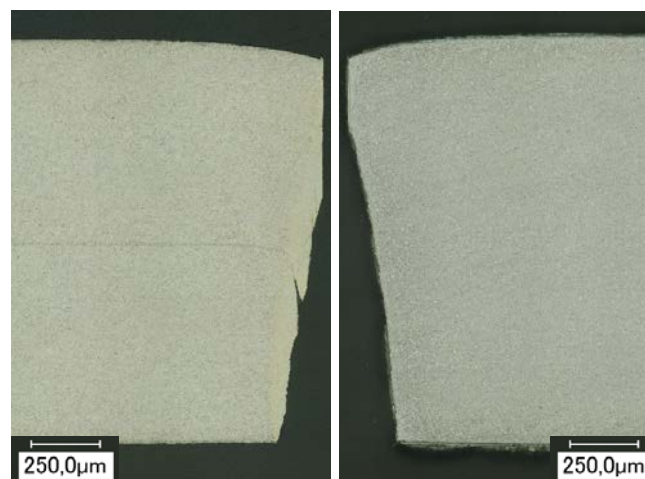


Abbildung 6.28: Schlibbilder CP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 5,91 %, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 10,98 % und einem Bruchflächenanteil von 83,12 %, siehe Abbildung 6.29. Die absolute Grathöhe beträgt  $4 \mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei  $80,9^\circ$ . Verglichen mit den Schnittflächenkenngrößen des Dualphasenstahls CP800 kennzeichnet sich die Schnittfläche der Referenzstrategie des CP800 durch einen kleineren Kanteneinzug sowie Glattschnittanteil, welcher durch die höhere Festigkeit bedingt ist. Der Glattschnittanteil ist aufgrund des zusätzlichen Gefügeanteils Bainit höher als im Fall des DP1000.

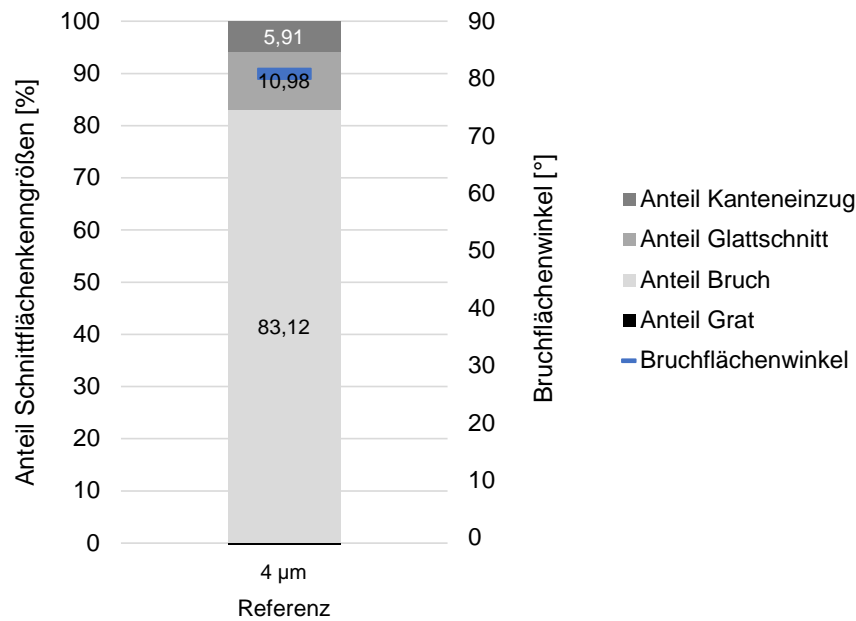


Abbildung 6.29: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen CP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen in Tabelle 6.17 zeigen, dass die Rauheit im Glattschnittbereich erwartungsgemäß geringer ist als im Bruchflächenanteil. Die Rauheit auf der Glattschnittfläche als auch im Bruchflächenbereich ist geringfügig höher als im Fall des DP1000.

Tabelle 6.17: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus CP1000 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},G}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{a,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{z,B}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max},B}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Referenz	0,16	1,32	2,25	1,75	10,20	12,40

Nachfolgend ist in Abbildung 6.30 der Härteplot der Mikrohärtemessungen zur Bestimmung der maximalen Aufhärtung sowie der Tiefe der Schereinflusszone aufgetragen. Tabelle 6.18 gibt das Ergebnis der maximalen Aufhärtung als Verhältnis von maximal gemessener Härte zu Härte des Ausgangsmaterials unterhalb der schergeschnittenen Oberfläche wider.

Das Grundgefüge des Komplexphasenstahls CP1000 weist eine gemittelte Härte von 325 HV 0,05 auf, die Verteilung der Härte ist jedoch über die Blechdicke hinweg nicht homogen. Die Härte im nicht durch Scherschneiden beeinflussten Bereich variiert zwischen 310 HV 0,05 und 335 HV 0,05. Der Scherschneidprozess des CP1000 mit scharfkantigen Aktivelementen und einem Schneidspalt von  $u_r = 15\%$  hat eine geringere absolute Aufhärtung des Gefüges unterhalb der Schnittfläche im Vergleich zum Werkstoff CP800 zur Folge. Die stärkste Kaltverfestigung tritt dabei im Bereich des Übergangs von Glattschnitt zur Bruchfläche auf, wobei der Werkstoff

um das 1,1 fache seiner Grundhärte aufhärtet. Die Schereinflusszone reicht bis in eine Tiefe von ca. 0,5 mm, welches einem Drittel der Blechdicke entspricht.

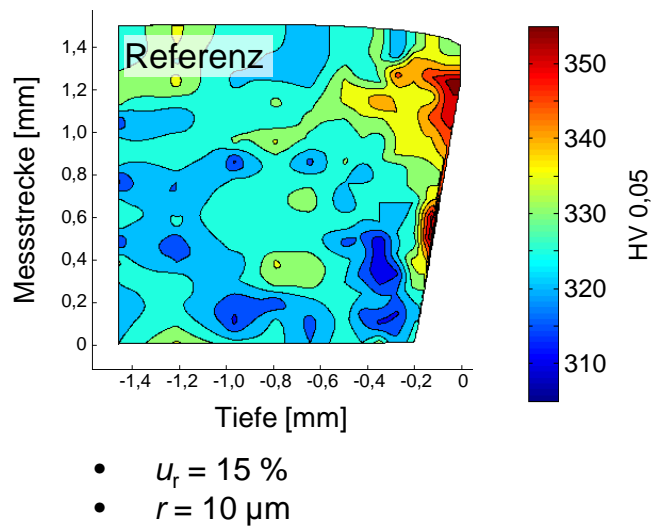


Abbildung 6.30: Aufhärtung der Schereinflusszone CP1000, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Tabelle 6.18: Ergebnisse der Mikrohärtemessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}/HV_0$ [-]
Referenz	325	357	1,10

CP1000 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

### 6.1.3.6 22MnB5

#### Kerbformzahl $K_t = 1$

Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32 zeigen die fotografische Dokumentation sowie die Anteile der charakteristischen Schnittflächenkenngrößen des pressgehärteten Werkstoffes 22MnB5 für die Scherschneidstrategien Referenz und Verschleiß.

Die Scherschneidstrategie Referenz zeigt eine typische Schnittflächenausprägung eines pressgehärteten 22MnB5, welcher mit verrundetem Schneidstempel ( $r = 150 \mu\text{m}$ ) und einem auf Erfahrungswerten basierendem Schneidspalt von  $u_r = 20 \%$  schergeschnitten wurde. Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 12,35 %, gefolgt von einem Glattschnittanteil von 10,37 % und einem Bruchflächenanteil von 77,28 %. Die absolute Grathöhe beträgt  $6 \mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei  $80,7^\circ$ .

Eine Verrundung der Schneidstempelkante auf  $r = 400 \mu\text{m}$  bei gleichbleibendem Schneidspalt soll den Verschleißzustand eines Schneidstempels darstellen. Eine Erhöhung des Schneidkantenradius auf  $r = 400 \mu\text{m}$  hat zur Folge, dass der Anteil des Kanteneinzugs aufgrund des zu Be-

ginn des Prozesses größeren Schneidspaltes auf 17,16 % zunimmt und Rissbildung ausgehend von der Schneidmatrize vor Ausbildung des Glattschnittanteils erfolgt. Der Bruchflächenanteil ist daher ebenfalls größer als bei der Referenzstrategie und beträgt 82,84 %. Die Grathöhe steigt auf 14  $\mu\text{m}$  an, der Bruchflächenwinkel sinkt auf Grund der früheren Rissinitiation und beträgt 79,0  $^\circ$ .

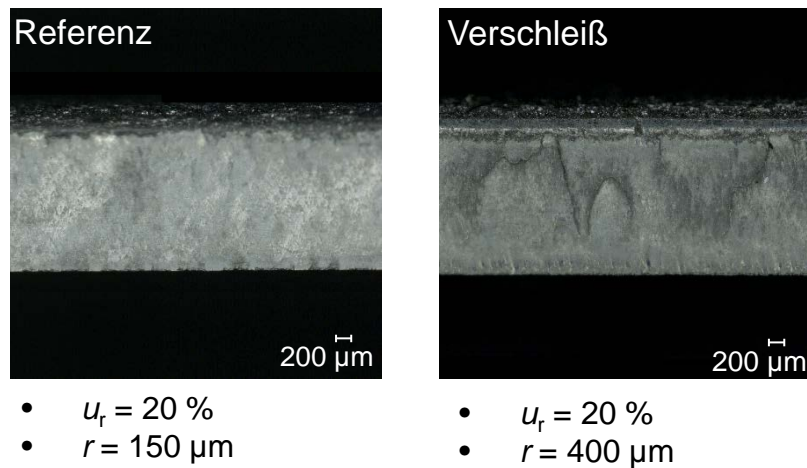


Abbildung 6.31: Optische Schnittflächenausprägung 22MnB5, pressgehärtet, Kerbformzahl  $K_t = 1$

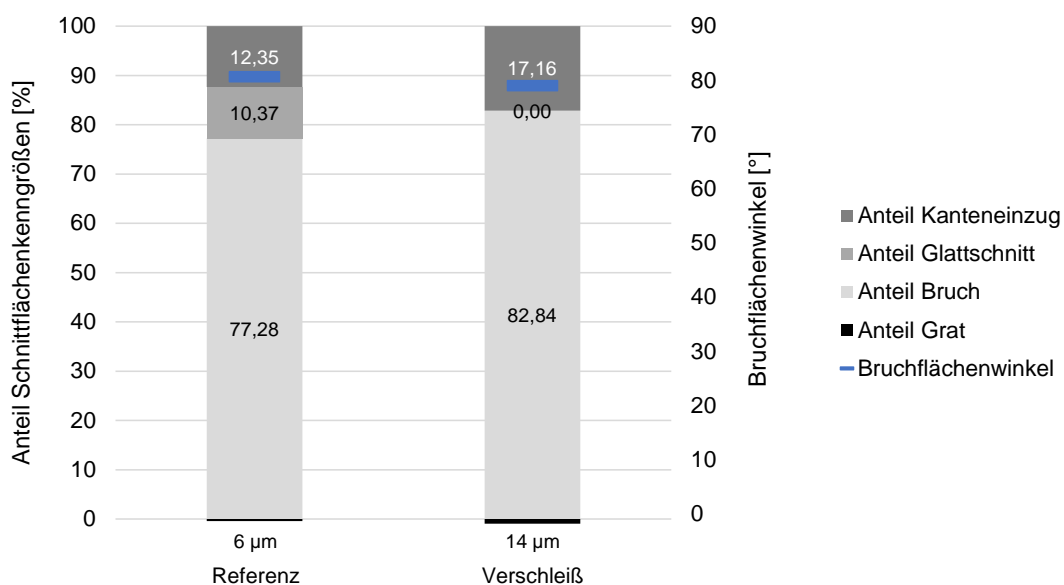


Abbildung 6.32: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen 22MnB5, pressgehärtet, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen des pressgehärteten 22MnB5 in Tabelle 6.19 weisen für die Referenzstrategie im Glattschnittbereich eine höhere Rauheit als im Bruchflächenbereich auf. Grund hierfür ist die Al-Si Beschichtung, welche durch den Scherschneidprozess aufplatzt und eine raue Oberflächenstruktur hinterlässt. Der Bruchflächenbereich weist, verglichen mit den anderen im Forschungsprojekt untersuchten Werkstoffen, die geringste Rauheit auf. Die

Verrundung der Aktivelemente mit auf  $r = 400 \mu\text{m}$  für die Strategie Verschleiß bewirkt eine Zunahme der Oberflächenrauheit der im Bruchflächenanteil.

Tabelle 6.19: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus pressgehärtetem 22MnB5 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G} [\mu\text{m}]$	$R_{z,G} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max},G} [\mu\text{m}]$	$R_{a,B} [\mu\text{m}]$	$R_{z,B} [\mu\text{m}]$	$R_{\text{max},B} [\mu\text{m}]$
Referenz	1,93	9,91	17,90	0,21	2,38	3,88
Verschleiß	-	-	-	1,27	1,63	8,21

Der Härteprozess des 22MnB5 verursacht eine Streuung der Grundhärte des Werkstoffes, die Verteilung der Härte über die Blechdicke ist nicht homogen. Die vorliegenden Härtemessungen bestätigen dies. Die minimale Härte des Grundwerkstoffes beträgt 460 HV 0,05, die maximale Härte 515 HV 0,05. Unter Berücksichtigung des Härtegradienten der Grundhärte zeigen die Proben der Referenzstrategie mit Schneidkantenradius  $r = 150 \mu\text{m}$  ein geringeres Niveau der Aufhärtung, siehe Tabelle 6.20.

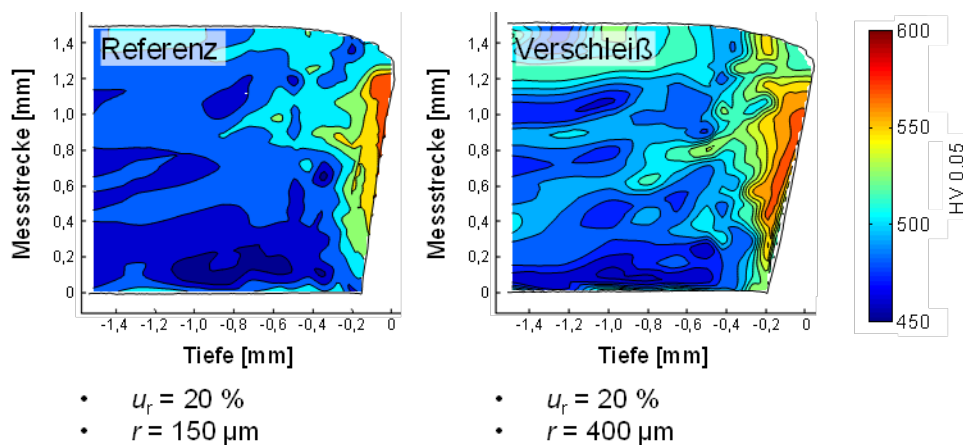


Abbildung 6.33: Aufhärtung der Schereinflusszone 22MnB5, Kerbformzahl  $K_t = 1$

Tabelle 6.20: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus

Parameter	$HV_0 [\text{HV } 0,05]$	$HV_{1,\text{max}} [\text{HV } 0,05]$	$HV_{1,\text{max}}/HV_0 [-]$
Referenz	480	549	1,14
Verschleiß	480	564	1,17

pressgehärtetem 22MnB5 mit Kerbformzahl  $K_t = 1$



Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Abbildung 6.34 und Abbildung 6.35 zeigen die fotografische Dokumentation sowie die Anteile der charakteristischen Schnittflächenkenngrößen des pressgehärteten Werkstoffes 22MnB5 für die Scherschneidstrategien Referenz und Verschleiß.

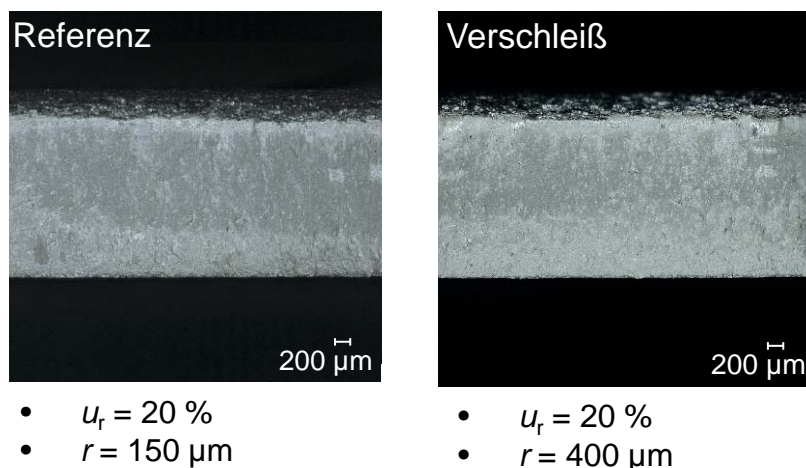


Abbildung 6.34: Optische Schnittflächenausprägung 22MnB5,pressgehärtet, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

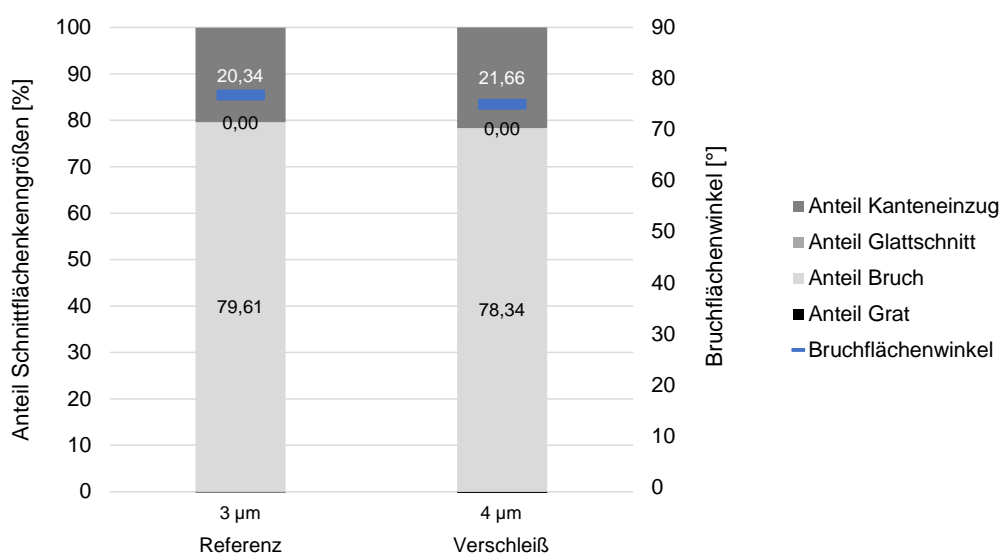


Abbildung 6.35: Anteil charakteristischer Schnittflächenkenngrößen 22MnB5,pressgehärtet, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Beide Scherschneidstrategien brechen spröde von der Matrizenkante und bilden keinen Glattschnittanteil aus. Der Anteil des Kanteneinzugs beträgt 20,34 %, gefolgt von einem Bruchflächenanteil von 79,61 %. Die absolute Grathöhe beträgt 3 µm, der Bruchflächenwinkel  $\beta$  liegt bei 76,83 °.

Eine Verrundung der Schneidstempelkante auf  $r = 400 \mu\text{m}$  bei gleichbleibendem Schneidspalt soll den Verschleißzustand eines Schneidstempels darstellen. Eine Erhöhung des Schneidkantenradius auf  $r = 400 \mu\text{m}$  hat zur Folge, dass der Anteil des Kanteneinzugs aufgrund des zu Beginn des Prozesses größeren Schneidspaltes auf 21,66 % zunimmt und der Bruchflächenanteil entsprechend auf 78,34 % abnimmt. Die Grathöhe beträgt  $4 \mu\text{m}$ , der Bruchflächenwinkel sinkt auf Grund des höheren Kanteneinzugs auf  $75,0^\circ$ .

Der Bruchflächenbereich beider Strategien weist, verglichen mit dem Bruchflächenzustand der ungekerbten Proben eine höhere Rauheit auf, siehe Tabelle 6.21. Die Oberflächenrauheit im Bruchflächenanteil ist für die Strategie Referenz höher als für die Strategie Verschleiß.

Wie bereits beschrieben verursacht der Härteprozess des 22MnB5 eine Streuung der Grundhärte des Werkstoffes, die Verteilung der Härte über die Blechdicke ist nicht homogen. Die minimale Härte des Grundwerkstoffes beträgt 460 HV 0,05, die maximale Härte 500 HV 0,05. Unter Berücksichtigung des Härtegradienten der Grundhärte zeigen die Proben der Referenzstrategie mit Schneidkantenradius  $r = 150 \mu\text{m}$  ein geringeres Niveau der Aufhärtung, siehe Tabelle 6.22.

Tabelle 6.21: Ergebnisse der Rauheitsmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus pressgehärtetem 22MnB5 mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Parameter	Glattschnitt			Bruch		
	$R_{a,G} [\mu\text{m}]$	$R_{z,G} [\mu\text{m}]$	$R_{max,G} [\mu\text{m}]$	$R_{a,B} [\mu\text{m}]$	$R_{z,B} [\mu\text{m}]$	$R_{max,B} [\mu\text{m}]$
Referenz	-	-	-	2,51	10,87	15,11
Verschleiß	-	-	-	2,19	9,46	13,24

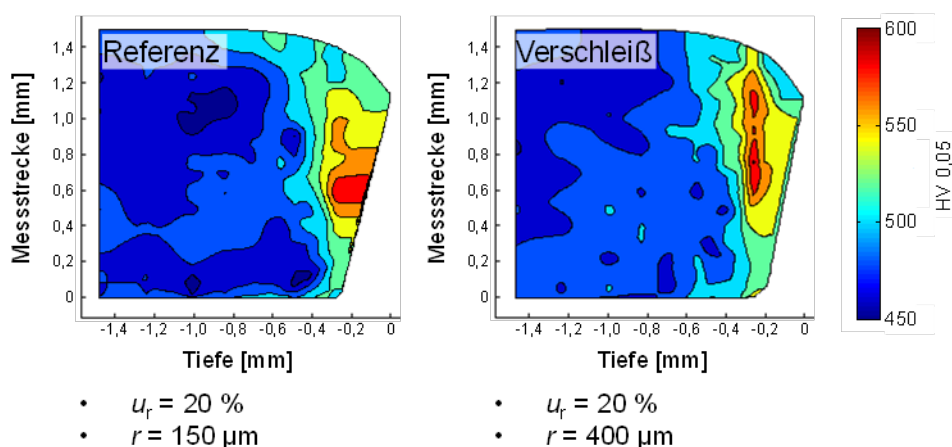


Abbildung 6.36: Aufhärtung der Schereinflusszone 22MnB5,pressgehärtet, Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Tabelle 6.22: Ergebnisse der Mikrohärtmessungen an schergeschnittenen Schwingproben aus pressgehärtetem 22MnB5 mit Kerbformzahl  $K_t = 2,5$

Parameter	$HV_0$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}$ [HV 0,05]	$HV_{1,max}/HV_0$ [-]
Referenz	480	583	1,21
Verschleiß	480	599	1,25

### 6.1.4 Zusammenfassung

In Tabelle 6.23 sind alle an den ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ ) gemessenen Härtewerte der Randzone und Oberflächenrauheit aus den Kapiteln 6.1.1 bis 6.1.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.23: Randzonenhärte und Oberflächenrauheit der ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ ) in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands

Werkstoff	Kantenzustand	Härte Randzone [HV <sub>0,1</sub> / HV <sub>0,05</sub> ]	Rauheit R <sub>z</sub> [µm]		Glattschnittanteil [%]	
			Kantenfläche Glattschn. / Bruchfl.	Walzoberfläche senkr. WR (mit Beschichtung)		
DC04	Poliert	108	0,6	8,3	-	
	Laserstrahlgeschnitten	133	7,0		-	
	Scher- geschnitten	Referenz	248		2,9 / 26,6	58
	Verschleiß	256	0,7 / 30,5		63	
DP800	Poliert	255	0,4	5,3	-	
	Laserstrahlgeschnitten	471	7,8		-	
	Scher- geschnitten	Referenz	380		1,2 / 11,0	10
	Verschleiß	386	0,6 / 15,5		30	
	Beschichtung	354	0,9 / 17,5		18	
	Eigenspannung	362	1,1 / 12,6		10	
	Glattschnittanteil	345	2,7 / 10,7		16	
CP800	Poliert	279	0,4	6,7	-	
	Laserstrahlgeschnitten	377	6,5		-	
	Scher- geschnitten	Referenz	375		1,3 / 12,6	18
DP1000	Poliert	332	0,3	3,6	-	
	Laserstrahlgeschnitten	475	6,6		-	
	Scher- geschnitten	Referenz	404		1,3 / 9,4	9
CP1000	Poliert	313	0,4	3,7	-	
	Scher- geschnitten	Referenz	357		1,3 / 10,2	11
22MnB5	Poliert	498	0,4	11,0	-	
	Laserstrahl- geschnitten	Variante 1	552		5,3	-
	Variante 2	476	8,6		-	
	Scher- geschnitten	Referenz	549		9,9 / 2,4	10
	Verschleiß	564	- / 1,6		0	

Tabelle 6.24: Randzonenhärte und Oberflächenrauheit der gekerbten Flachproben ( $K_t = 2,5$ ) in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands

Werkstoff	Kantenzustand	Härte Randzone [HV0,1 / HV0,05]	Rauheit $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]		Glattschnittanteil [%]	
			Kantenfläche <i>Glattschn. / Bruchfl.</i>	Walzoberfläche senkr. WR ( <i>mit Beschichtung</i> )		
DC04	Poliert	108	0,6	8,3	-	
	Laserstrahlgeschnitten	133	7,0		-	
	Scher- geschnitten      Referenz	232	6,6 / 69,6		54	
DP800	Poliert	255	0,4	5,3	-	
	Laserstrahlgeschnitten	471	7,8		-	
	Scher- geschnitten	Referenz	357		1,5 / 6,2	16
		Verschleiß	381		0,5 / 8,0	45
		Beschichtung	368		0,6 / 6,4	21
	Glattschnittanteil	384	-		92	
22MnB5	Poliert	498	0,4	11,0	-	
	Laserstrahl- geschnitten	Variante 1	552		5,3	-
		Variante 2	476		8,6	-
	Scher- geschnitten	Referenz	583		- / 10,9	0
		Verschleiß	599		- / 9,5	0

## 6.2 Quasistatischer Zugversuch

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den quasistatischen Zugversuchen präsentiert, die an den ungekerbten und gekerbten Flachproben aus den verschiedenen Werkstoffen mit den unterschiedlichen Kantenbearbeitungszuständen durchgeführt wurden.

In Tabelle 6.25 ist die Versuchsmatrix zu den quasistatischen Zugversuchen abgebildet. Der Versuchsmatrix ist zu entnehmen, welcher Werkstoff mit welcher Probengeometrie und welchem Kantenbearbeitungszustand untersucht wurde.

Tabelle 6.25: Versuchsmatrix der quasistatischen Zugversuche an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus den Werkstoffen DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5

Kantenbearbeitungszustand	DC04		DP800			CP800	DP1000	CP1000	PHS (22MnB5)	
	$K_t = 1$	2,5	$K_t = 1$	2,5	4,6	$K_t = 1$	$K_t = 1$	$K_t = 1$	$K_t = 1$	2,5
Referenz Fräsen/Polieren	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Scherschneiden 1 (Referenz)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Scherschneiden 2 (Verschleiß)			x	x	x				x	
Laserstrahlschn. 1 (22MnB5: Erst Härten, anschließend Laserstrahlschn.)	x	x	x	x		x	x		x	x
Laserstrahlschn. 2 (22MnB5: Erst Laserstrahlschn., anschließend Härten)										x

### 6.2.1 Ungekerbte Flachproben

Die Ergebnisse aus den quasistatischen Zugversuchen an ungekerbten Flachproben aus den verschiedenen Werkstoffen und den verschiedenen Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten sind in Tabelle 6.26 abgebildet. Die Ergebnisse stellen jeweils den Mittelwert aus mindestens fünf Einzelversuchen dar. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach den Angaben in Kapitel 5.2.

Für die Fertigung der ungekerbten schergeschnittenen Proben stand nur ein Werkzeug zur Verfügung um die ungekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  in Abbildung 4.3 herzustellen. Daher konnten die Zugversuche zur Untersuchung des Kanteneinfluss aufgrund der Vergleichbarkeit nicht mit den genormten Proben aus Abbildung 4.2 durchgeführt werden. Stattdessen wurden die ungekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  aus Abbildung 4.3 verwendet.

Tabelle 6.26: Versuchsergebnisse aus den quasistatischen Zugversuchen an ungekerbten Flachproben aus DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und gehärtetem 22MnB5

Werkstoff	Kantenbearbeitungszustand	Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]		0,2 % Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]		Gleichmaß- dehnung $A_g$ [%]		Bruch- dehnung $A_{10}$ [%]	
		MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
DC04	Poliert	283	1	158	1	27,2	0,3	71,3	0,8
	Laserstrahlgeschnitten	286	0	163	1	26,7	0,5	71,4	1,1
	Schergeschnitten Referenz	290	0	184	3	24,7	0,6	70,2	0,9
	Schergeschnitten Verschleiß	291	2	178	3	25,4	0,8	71,7	0,6
DP800	Poliert	813	5	500	22	14,3	0,3	30,8	0,4
	Lasergehärtet	855	2	579	3	12,2	0,2	29,5	0,3
	Schergeschnitten Referenz	804	10	495	9	14,0	0,4	30,4	0,8
	Schergeschnitten Verschleiß	804	8	512	63	13,1	0,5	20,0	1,4
CP800	Poliert	912	7	705	31	8,4	0,5	22,1	1,0
	Laserstrahlgeschnitten	890	7	655	20	9,1	0,5	23,5	0,2
	Schergeschnitten Referenz	897	11	669	20	8,0	0,4	22,8	1,3
DP1000	Poliert	1024	10	729	54	9,4	0,3	22,6	0,4
	Laserstrahlgeschnitten	1012	4	928	6	5,3	0,1	19,2	0,5
	Schergeschnitten Referenz	1017	16	781	30	8,8	0,3	21,2	1,0
CP1000	Poliert	1028	2	965	10	4,7	0,2	19,7	0,5
	Schergeschnitten Referenz	1012	5	914	11	5,2	0,1	19,2	0,7
22MnB5 gehärtet	Poliert	1491	7	1161	54	3,9	0,3	14,7	0,5
	Laserstrahlgeschnitten Variante 1	1503	9	1220	82	3,9	0,1	15,1	0,4
	Schergeschnitten Referenz	1492	17	1258	40	3,5	0,4	10,7	1,8
	Schergeschnitten Verschleiß	1484	6	1303	74	3,4	0,3	12,7	0,6

## 6.2.2 Gekerbte Flachproben

In Tabelle 6.27 und Tabelle 6.28 sind die Ergebnisse aus den quasistatischen Kerbzugversuchen an gekerbten Flachproben aus den verschiedenen Werkstoffen und den verschiedenen Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten abgebildet. Die Er-

gebnisse stellen jeweils den Mittelwert aus mindestens drei Einzelversuchen dar. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach den Angaben in Kapitel 5.4.

Tabelle 6.27: Versuchsergebnisse aus den quasistatischen Kerbzugversuchen an gekerbten Flachproben aus DC04, DP800 und gehärtetem 22MnB5 (1)

Werkstoff	Kerbformzahl	Kantenbearbeitungszustand	Kerbzugfestigkeit $R_{m,k}$ [MPa]		Gesamte Verlängerung $\Delta l_{ges}$ [mm]		Bleibende Verlängerung $\Delta l_{bl}$ [mm]	
			MW	s	MW	s	MW	s
DC04	2,5	Poliert	299	2	12,1	0,1	9,2	0,0
	2,5	Schergeschnitten Referenz	302	1	11,9	0,1	9,2	0,1
DP800	2,5	Poliert	792	3	8,4	0,0	2,2	0,0
	2,5	Schergeschnitten Referenz	780	3	7,6	0,2	1,8	0,2
	4,6	Poliert	851	11	5,3	0,1	1,1	0,1
	4,6	Schergeschnitten Referenz	822	9	4,7	0,1	0,8	0,1
	4,6	Schergeschnitten Verschleiß	796	17	4,4	0,1	0,6	0,0
22MnB5 gehärtet	2,5	Poliert	1522	17	8,7	0,3	0,5	0,2
	2,5	Laserstrahlgeschnitten Variante 1	1518	12	9,0	0,1	0,6	0,1
	2,5	Laserstrahlgeschnitten Variante 2	1504	17	8,8	0,1	0,4	0,1
	2,5	Schergeschnitten Referenz	1505	17	8,5	0,3	0,5	0,2

Tabelle 6.28: Versuchsergebnisse aus den quasistatischen Kerbzugversuchen an gekerbten Flachproben aus DC04, DP800 und gehärtetem 22MnB5 (2)

Werkstoff	Kerbformzahl	Kantenbearbeitungszustand	Brucharbeit $W_{ges}$ [J]		Plastischer Anteil $W_{pl}$ [J]	
			MW	s	MW	s
DC04	2,5	Poliert	214	1	183	1
	2,5	Schergeschnitten Referenz	212	2	183	2
DP800	2,5	Poliert	313	0	137	1
	2,5	Schergeschnitten Referenz	266	10	105	8
	4,6	Poliert	119	2	38	1
	4,6	Schergeschnitten Referenz	95	3	24	1
	4,6	Schergeschnitten Verschleiß	86	5	19	2
22MnB5 gehärtet	2,5	Poliert	402	18	52	17
	2,5	Laserstrahlgeschnitten Variante 1	426	0	59	7
	2,5	Laserstrahlgeschnitten Variante 2	412	5	52	7
	2,5	Schergeschnitten Referenz	390	14	53	13





### 6.3.1 DC04

In Abbildung 6.37 sind die 50 %-Wöhlerlinien und die Versuchspunkte aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben ( $K_t = 1$ ) aus DC04 abgebildet. Dargestellt sind die Ergebnisse der Proben mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten. Bei der Herstellung der schergeschnittenen Proben wurde die Schneidstrategie „Referenz“ verwendet, siehe Kapitel 4.3.3. Abbildung 6.38 zeigt die 50 %-Wöhlerlinien und die Versuchspunkte der gekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$ . Es sind ebenfalls die Ergebnisse der Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten (Referenz) abgebildet.

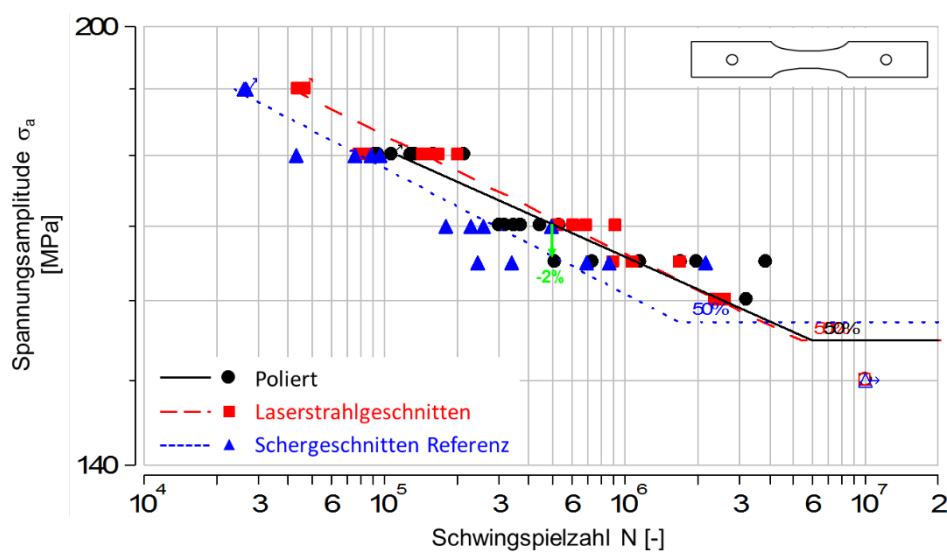


Abbildung 6.37: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DC04, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

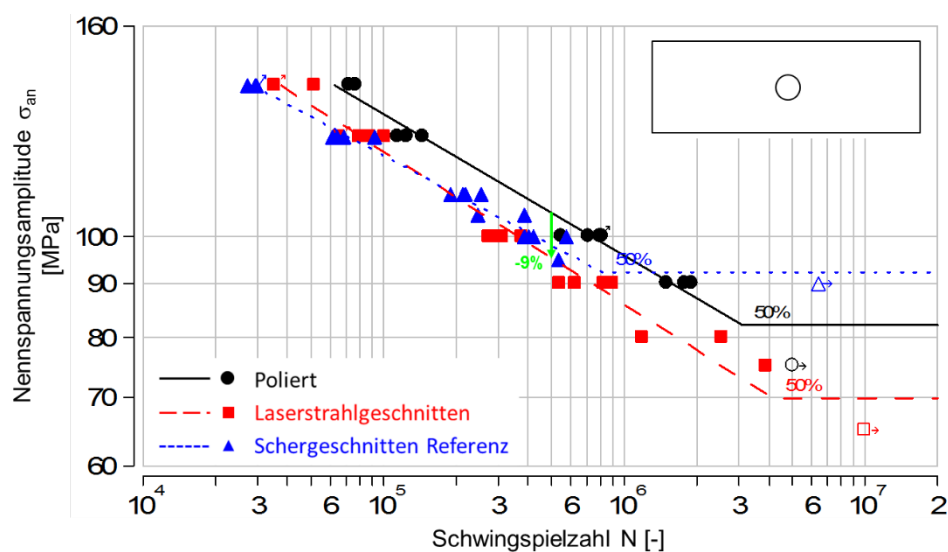


Abbildung 6.38: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DC04, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 2,5$ ,  $R = -1$

In Tabelle 6.30 sind die Kennwerte der Wöhlerlinien aus Abbildung 6.37 und Abbildung 6.38 eingetragen. Der aus den Versuchsergebnissen ermittelte Kanteneinfluss sowie die dynamische Stützwirkung nach den Gleichungen (2.4) und (2.5), werden in Tabelle 6.31 präsentiert. Beide Größen werden sowohl bei einer Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Bereich der Dauerfestigkeit ausgewertet.

Tabelle 6.30: Wöhlerlinien der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an Flachproben aus DC04

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Zeitfestigkeit			Schätzwert für Dauerfestigkeit	
			Nennspannungsamplitude $\sigma_{an, 50\%}$ [MPa] $N = 5 \times 10^5$	Neigungsexponent $k$	Streuweite $T_N$	Dauerfestigkeit (Maximum-Likelihood) $P_A = 50\%$ $\sigma_{AD, ML}$ [MPa]	Eckschwingspielzahl $N_D$
Poliert	1	-1	170	26,4	3,7	155	6,01E+06
	2,5	-1	105	7,3	1,6	82	3,09E+06
Laserstrahlgeschnitten	1	-1	172	23,3	2,1	155	5,42E+06
	2,5	-1	96	6,7	2,0	70	4,16E+06
Scher- geschnitten Referenz	1	-1	166	22,6	4,1	157	1,71E+06
	2,5	-1	98	8,1	1,6	92	8,24E+05

Tabelle 6.31: Einfluss der Kantenbearbeitung und die dynamische Stützwirkung aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus DC04

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Einfluss des Kantenzustands		Dynamische Stützwirkung			
			Relative Schwingfestigkeit $\sigma_{an,x}/\sigma_{an, poliert}$		Zeitfestigkeit $N=5 \times 10^5$		Dauerfestigkeit $N_D$	
			Zeitfestigkeit $N=5 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$	Kerbwirkungszahl $K_f$	Dynamische Stützzahl $n_\sigma$	Kerbwirkungszahl $K_f$	Dynamische Stützzahl $n_\sigma$
Poliert	1	-1						
	2,5	-1			1,6	1,54	1,9	1,32
Laserstrahlgeschnitten	1	-1	1,01	1,00				
	2,5	-1	0,91	0,85	1,8	1,40	2,2	1,13
Scher- geschnitten Referenz	1	-1	0,98	1,01				
	2,5	-1	0,93	1,12	1,7	1,48	1,7	1,46

### 6.3.2 DP800

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus DP800 präsentiert. Abbildung 6.39 zeigt die 50 %-Wöhlerlinien zusammen mit den Versuchspunkten der Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  für die Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten. Für die schergeschnittenen Kantenzustände sind die Ergebnisse der Proben abgebildet, die mit den Schneidstrategien Referenz und Verschleiß hergestellt wurden. Dieselben Kantenzustände wurden an den gekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  untersucht. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Abbildung 6.40 dargestellt. Bei den gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  wurde hingegen auf den laserstrahlgeschnittenen Kantenzustand verzichtet, siehe Abbildung 6.41.

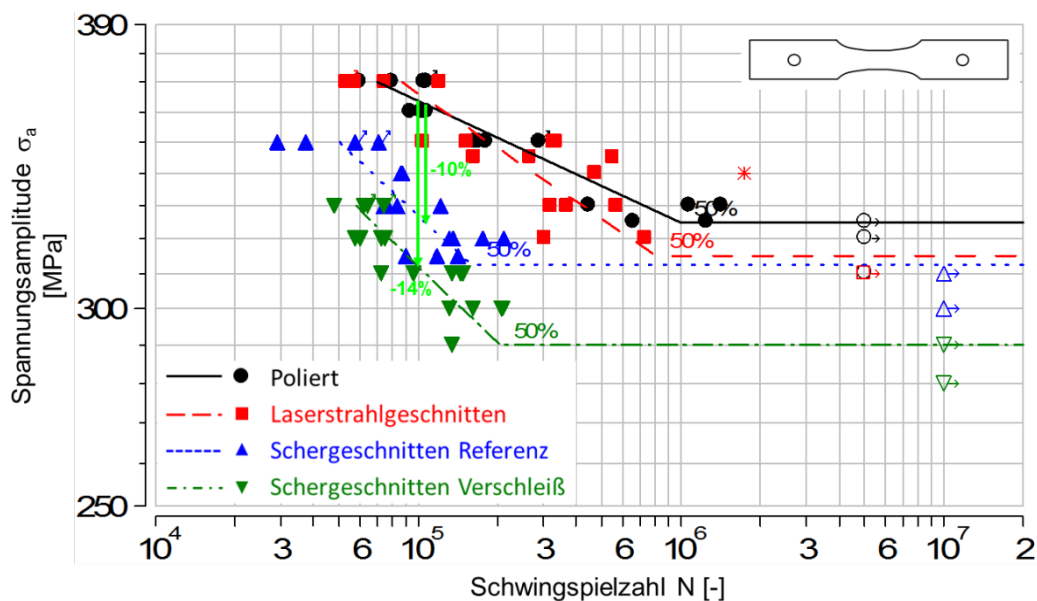


Abbildung 6.39: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

An den ungekerbten und gekerbten Flachproben aus DP800 werden unterschiedliche Schneidstrategien bei der Herstellung von schergeschnittenen Proben hinsichtlich des Einflusses auf das Schwingfestigkeitsverhaltens untersucht. In Abbildung 6.42 sind die 50 %-Wöhlerlinien der ungekerbten Flachproben abgebildet und in Abbildung 6.43 die 50 %-Wöhlerlinien der gekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$ . Die Proben wurden mit den Scherschneidstrategien Referenz, Verschleiß, Glattschnitt, Eigenspannungszustand und Beschichtung hergestellt. Die unterschiedlichen Scherschneidstrategien werden in Kapitel 4.3.3 erläutert. Aus den in Kapitel ... aufgeführten Gründen ließ sich die Scherschneidstrategie Eigenspannungszustand bei der Herstellung der Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  nicht anwenden. Somit konnten keine Versuche mit dieser Probenvariante durchgeführt werden.

Tabelle 6.32 enthält die Kennwerte aller Wöhlerlinien, die an Flachproben aus DP800 ermittelt wurden. Aus den dargestellten 50 %-Wöhlerlinien wird in Tabelle 6.33 der Kanteneinfluss, die dynamische Stützwirkung nach den Gleichungen (2.4) und (2.5) und die Mittelspannungsempfindlichkeit nach Gleichung (2.6) ausgewertet. Die Auswertung erfolgt sowohl bei einer Schwingenspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Bereich der Dauerfestigkeit.

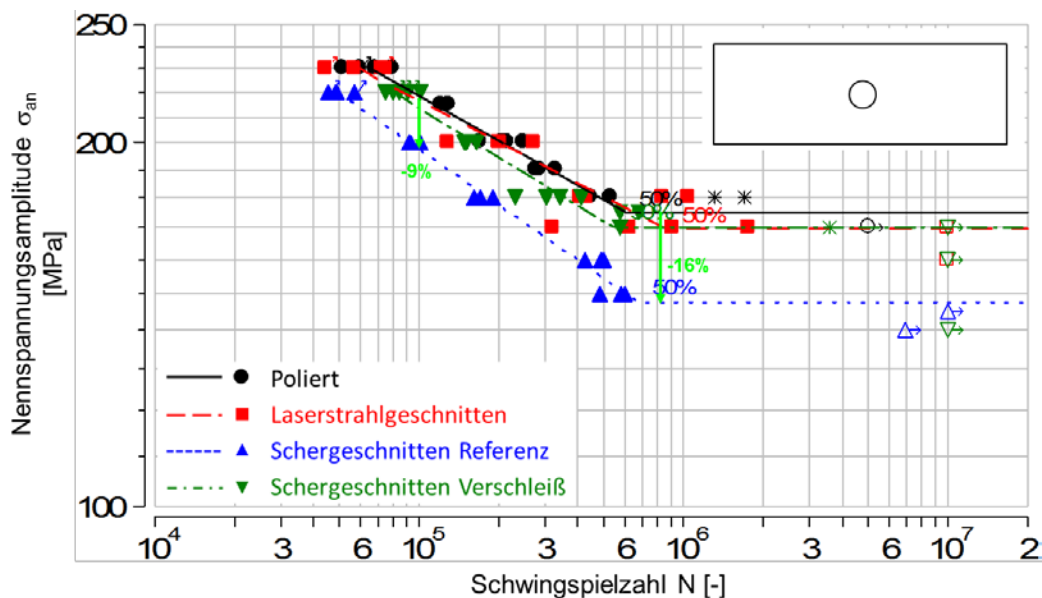


Abbildung 6.40: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 2,5$ ,  $R = -1$

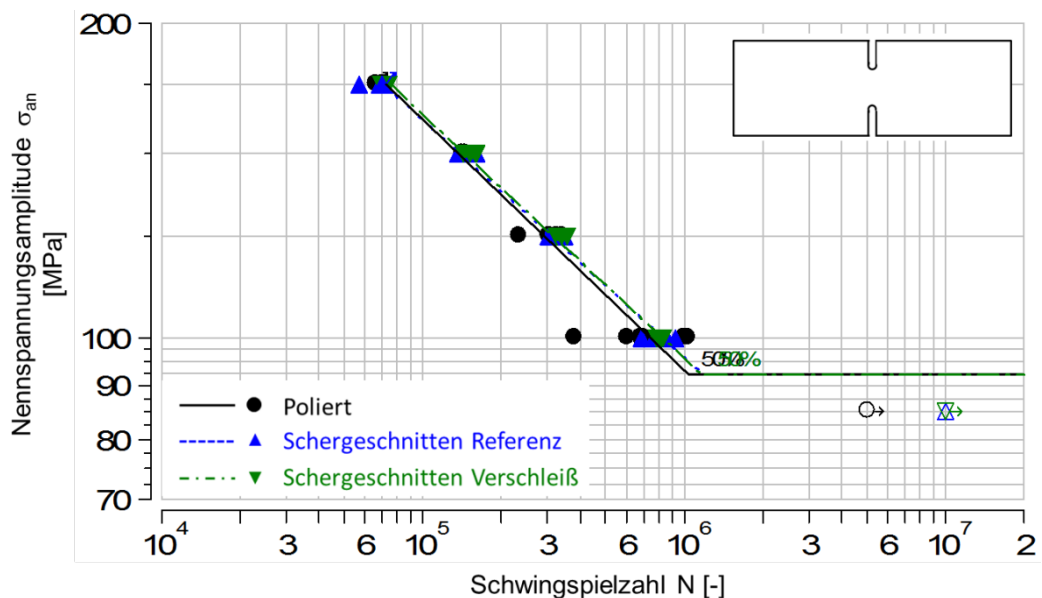


Abbildung 6.41: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 4,6$ ,  $R = -1$

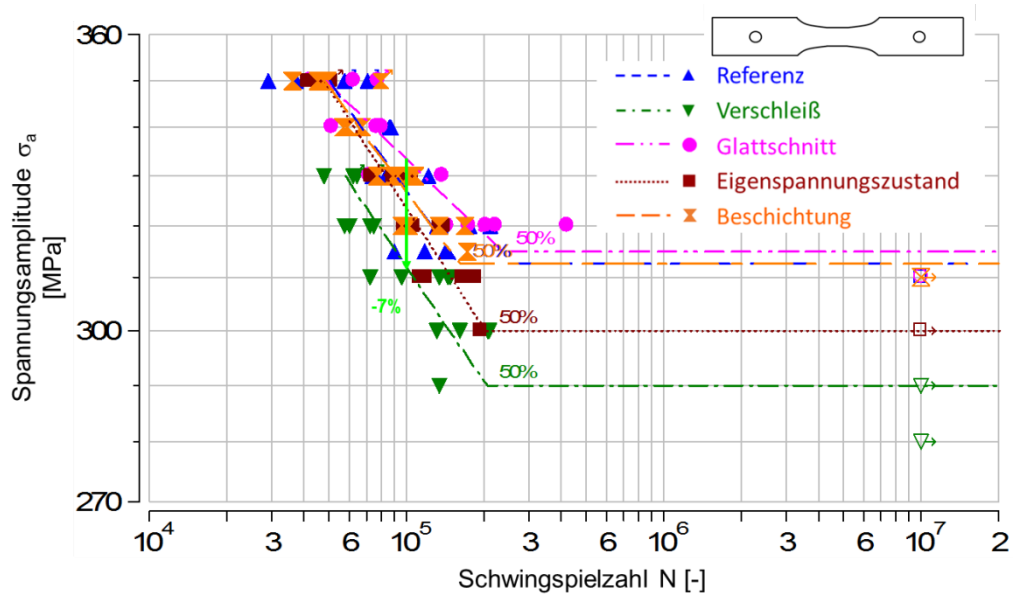


Abbildung 6.42: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Schergeschnitten, Schneidstrategien: Referenz, Verschleiß, Glattschnitt, Eigenspannungszustand, Beschichtung, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

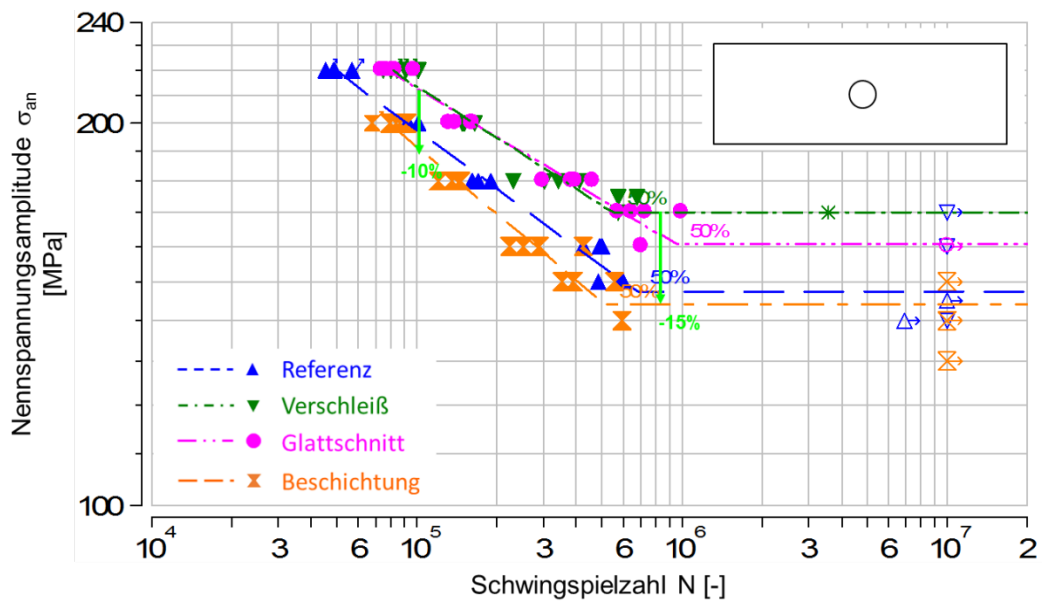


Abbildung 6.43: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Schergeschnitten, Schneidstrategien: Referenz, Verschleiß, Glattschnitt, Beschichtung, Flachproben  $K_t = 2,5$ ,  $R = -1$

Tabelle 6.32: Wöhlerlinien der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an Flachproben aus DP800

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Zeitfestigkeit			Schätzwert für Dauerfestigkeit	
			Nennspannungsamplitude $\sigma_{an, 50\%}$ [MPa] $N = 1 \times 10^5$	Neigungsexponent $k$	Streuweite $T_N$	Dauerfestigkeit (Maximum-Likelihood) $P_A = 50\%$ $\sigma_{AD, ML}$ [MPa]	Eckschwingspielzahl $N_D$
Poliert	1,0	-1	364	20,4	2,6	325	9,94E+05
	2,5	-1	218	8,1	1,4	175	5,98E+05
	2,5	0,1	180	8,8	4,6	150	5,01E+05
	4,6	-1	162	4,2	1,2	92	1,04E+06
Laserstrahlgeschnitten	1,0	-1	366	13,8	3,6	315	8,11E+05
	2,5	-1	217	8,8	3,2	169	8,81E+05
Scher- geschnitten Referenz	1,0	-1	328	10,3	2,3	312	1,62E+05
	2,5	-1	198	6,5	1,4	147	6,83E+05
	4,6	-1	162	4,4	1,1	92	1,19E+06
Scher- geschnitten Verschleiß	1,0	-1	312	9,8	2,0	290	2,07E+05
	2,5	-1	214	7,5	1,7	170	5,62E+05
	4,6	-1	164	4,3	1,0	92	1,19E+06
Scher- geschnitten Beschichtung	1,0	-1	328	10,6	1,8	312	1,67E+05
	2,5	-1	192	5,7	1,6	144	5,23E+05
Scher- geschnitten Eigenspannungszustand	1,0	-1	324	9,4	1,6	300	2,06E+05
Scher- geschnitten Glattschnittanteil	1,0	-1	334	15,0	2,4	315	2,39E+05
	2,5	-1	213	8,0	1,7	161	9,58E+05

Tabelle 6.33: Einfluss der Kantenbearbeitung, dynamische Stützwirkung und Mittelspannungsempfindlichkeit aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus DP800

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_f$	Lastverhältnis $R$	Einfluss des Kantenzustands		Dynamische Stützwirkung				Mittelspannungsempfindlichkeit $M [-]$	
			Relative Schwingfestigkeit $\sigma_{an,x}/\sigma_{an,poliert}$		Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$		Dauerfestigkeit $N_D$		Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$
			Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$	Kerbwirkungszahl $K_f$	Dynamische Stützzahl $n_\sigma$	Kerbwirkungszahl $K_f$	Dynamische Stützzahl $n_\sigma$		
Poliert	1,0	-1								
	2,5	-1			1,7	1,50	1,9	1,35		
	2,5	0,1							0,17	0,14
	4,6	-1			2,2	2,05	3,5	1,30		
Laserstrahlgemacht	1,0	-1	1,01	0,97						
	2,5	-1	1,00	0,97	1,7	1,48	1,9	1,34		
Scher- gemacht Referenz	1,0	-1	0,90	0,96						
	2,5	-1	0,91	0,84	1,7	1,51	2,1	1,18		
	4,6	-1	1,00	1,00	2,0	2,27	3,4	1,36		
Scher- gemacht Verschleiß	1,0	-1	0,86	0,89						
	2,5	-1	0,98	0,97	1,5	1,71	1,7	1,47		
	4,6	-1	1,01	1,00	1,9	2,42	3,2	1,46		
Scher- gemacht Beschichtung	1,0	-1	0,90	0,96						
	2,5	-1	0,88	0,82	1,7	1,46	2,2	1,15		
Scher- gemacht Eigenspannungszustand	1,0	-1	0,89	0,92						
Scher- gemacht Glattschnittanteil	1,0	-1	0,92	0,97						
	2,5	-1	0,98	0,92	1,6	1,59	2,0	1,28		

### 6.3.3 CP800

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  aus CP800 dargestellt. In Abbildung 6.44 sind die 50 %-Wöhlerlinien zusammen mit den Versuchspunkten für die Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten abgebildet. Die schergeschnittenen Proben wurden mit der Schneidstrategie Referenz gefertigt. In Tabelle 6.34 sind die Kennwerte der ermittelten Wöhlerlinien eingetragen. Aus den dargestellten 50 %-Wöhlerlinien wird in Tabelle 6.35 der Kanteneinfluss ausgewertet. Die Auswertung wird sowohl bei einer Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Bereich der Dauerfestigkeit durchgeführt.

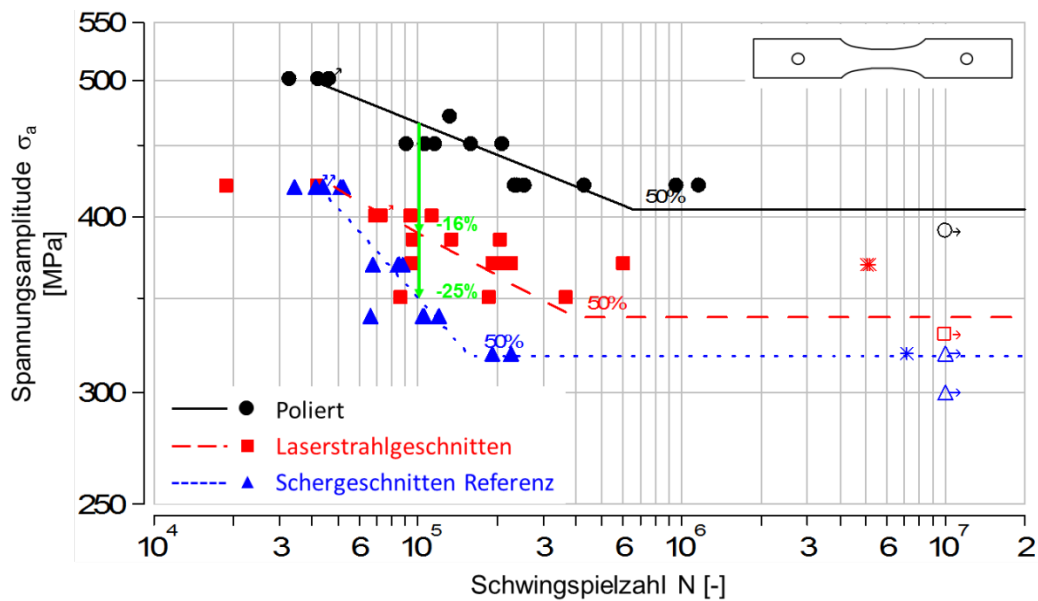


Abbildung 6.44: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff CP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

Tabelle 6.34: Wöhlerlinien der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an Flachproben aus CP800

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Zeitfestigkeit			Schätzwert für Dauerfestigkeit	
			Nennspannungsamplitude $\sigma_{an, 50\%}$ [MPa] $N = 1 \times 10^5$	Neigungsexponent $k$	Streuweite $T_N$	Dauerfestigkeit (Maximum Likelihood) $P_A = 50\%$ $\sigma_{AD, ML}$ [MPa]	Eckschwingspielzahl $N_D$
Poliert	1,0	-1	466	13,3	4,0	405	6,56E+05
Laserstrahlgeschnitten	1,0	-1	390	10,0	4,8	340	3,97E+05
Schergeschnitten Referenz	1,0	-1	352	4,8	1,9	319	1,60E+05



Tabelle 6.35: Einfluss der Kantenbearbeitung aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus CP800

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Einfluss des Kantenzustands	
			Relative Schwingfestigkeit $\sigma_{an,x}/\sigma_{an,poliert}$	
			Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$
Poliert	1,0	-1		
Laserstrahlgeschnitten	1,0	-1	0,84	0,84
Schergeschnitten Referenz	1,0	-1	0,75	0,79

### 6.3.4 DP1000

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  aus DP1000 präsentiert. In Abbildung 6.45 sind die 50 %-Wöhlerlinien zusammen mit den Versuchspunkten für die Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Die schergeschnittenen Proben wurden mit der Schneidstrategie Referenz gefertigt.

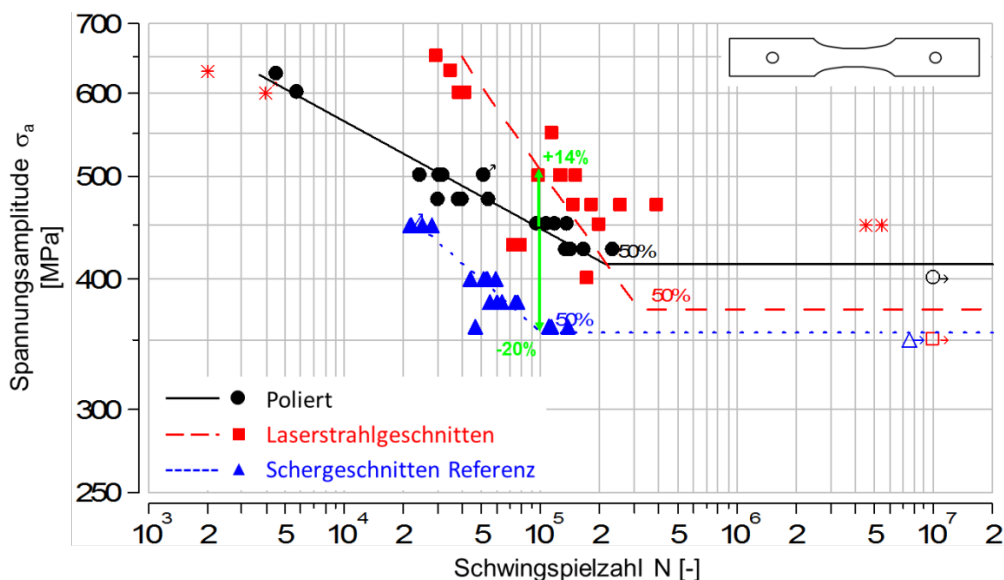


Abbildung 6.45: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP1000, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

In Tabelle 6.36 sind die Kennwerte der ermittelten Wöhlerlinien enthalten. Aus den dargestellten 50 %-Wöhlerlinien wird in Tabelle 6.37 der Kanteneinfluss ausgewertet. Die Auswertung

wird sowohl bei einer Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Bereich der Dauerfestigkeit durchgeführt.

Tabelle 6.36: Wöhlerlinien der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an Flachproben aus DP1000

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Zeitfestigkeit			Schätzwert für Dauerfestigkeit	
			Nennspannungsamplitude $\sigma_{an, 50\%}$ [MPa] $N = 1 \times 10^5$	Neigungsexponent $k$	Streuweite $T_N$	Dauerfestigkeit (Maximum Likelihood) $P_A = 50\%$ $\sigma_{AD, ML}$ [MPa]	Eckschwingspielzahl $N_D$
Poliert	1,0	-1	446	9,8	2,1	412	2,14E+05
Laserstrahlgesechnitten	1,0	-1	510	3,8	4,1	374	3,20E+05
Scheresechnitten Referenz	1,0	-1	355	5,6	1,4	355	1,00E+05

Tabelle 6.37: Einfluss der Kantenbearbeitung aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus DP1000

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Einfluss des Kantenzustands	
			Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$
Poliert	1,0	-1		
Laserstrahlgesechnitten	1,0	-1	1,14	0,91
Scheresechnitten Referenz	1,0	-1	0,80	0,86

### 6.3.5 CP1000

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  aus CP1000 präsentiert. In Abbildung 6.46 sind die 50 %-Wöhlerlinien zusammen mit den Versuchspunkten für die Kantenzustände poliert und schergeschnitten dargestellt. Die schergeschnittenen Proben wurden mit der Schneidstrategie Referenz gefertigt.

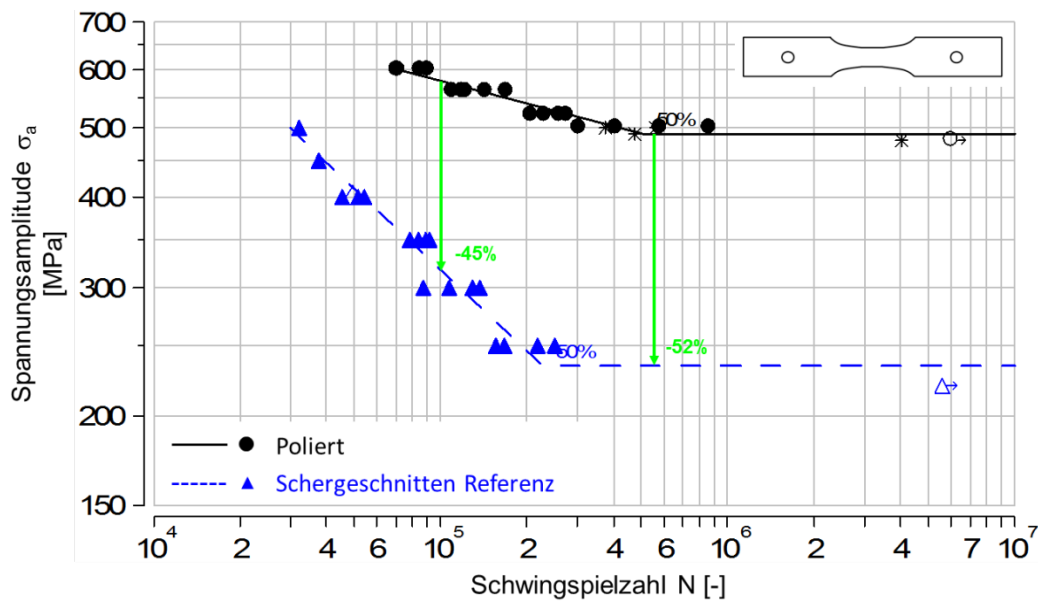


Abbildung 6.46: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff CP1000, Kantenzustände: Poliert, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

Tabelle 6.38: Wöhlerlinien der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an Flachproben aus CP1000

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Zeitfestigkeit			Schätzwert für Dauerfestigkeit	
			Nennspannungsamplitude $\sigma_{an, 50\%}$ [MPa] $N = 1 \times 10^5$	Neigungsexponent $k$	Streuweite $T_N$	Dauerfestigkeit (Maximum Likelihood) $P_A = 50\%$ $\sigma_{AD, ML}$ [MPa]	Eckschwingspielzahl $N_D$
Poliert	1,0	-1	580	9,7	2,1	490	5,10E+05
Schergeschnitten Referenz	1,0	-1	319	2,7	1,5	235	2,29E+05

Tabelle 6.38 enthält die Kennwerte der ermittelten Wöhlerlinien. Aus den dargestellten 50 %-Wöhlerlinien wird in Tabelle 6.39 der Kanteneinfluss ausgewertet. Die Auswertung wird sowohl

bei einer Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Bereich der Dauerfestigkeit durchgeführt.

Tabelle 6.39: Einfluss der Kantenbearbeitung aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus CP1000

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Einfluss des Kantenzustands	
			Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$
Poliert	1,0	-1		
Schergeschnitten Referenz	1,0	-1	0,55	0,48

### 6.3.6 22MnB5

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus gehärtetem 22MnB5 präsentiert. In Abbildung 6.47 sind die 50 %-Wöhlerlinien zusammen mit den Versuchspunkten der Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  für die Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben wird zwischen Variante 1 und Variante 2 unterschieden. Bei der Fertigung der Proben nach Variante 1 wird zuerst die Wärmebehandlung des 22MnB5 durchgeführt und anschließend die Proben aus den gehärteten Platinen durch Laserstrahlschneiden entnommen. Bei der Fertigung der Proben nach Variante 2 wird die Reihenfolge der Prozessschritte umgedreht. Es werden zuerst die Proben durch Laserstrahlschneiden aus den nicht gehärteten Platinen entnommen, anschließend wird die Wärmebehandlung der Proben durchgeführt. Für die schergeschnittenen Kanten sind die Ergebnisse der Proben abgebildet, die mit den Schneidstrategien Referenz und Verschleiß hergestellt wurden. Dieselben Kantenzustände wie an den ungekerbten Proben wurden ebenfalls an den gekerbten Flachproben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  untersucht. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Abbildung 6.48 dargestellt.

An den Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  und den Kantenzuständen poliert und laserstrahlgeschnitten nach Variante 1 wurde außerdem der Mittelspannungseinfluss untersucht, siehe Kapitel 2.3. Neben den Versuchen bei wechselnder Beanspruchung ( $R = -1$ ) wurden daher auch

Versuche bei schwellender Beanspruchung mit dem Lastverhältnis  $R = 0,1$  durchgeführt. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Abbildung 6.49 dargestellt.

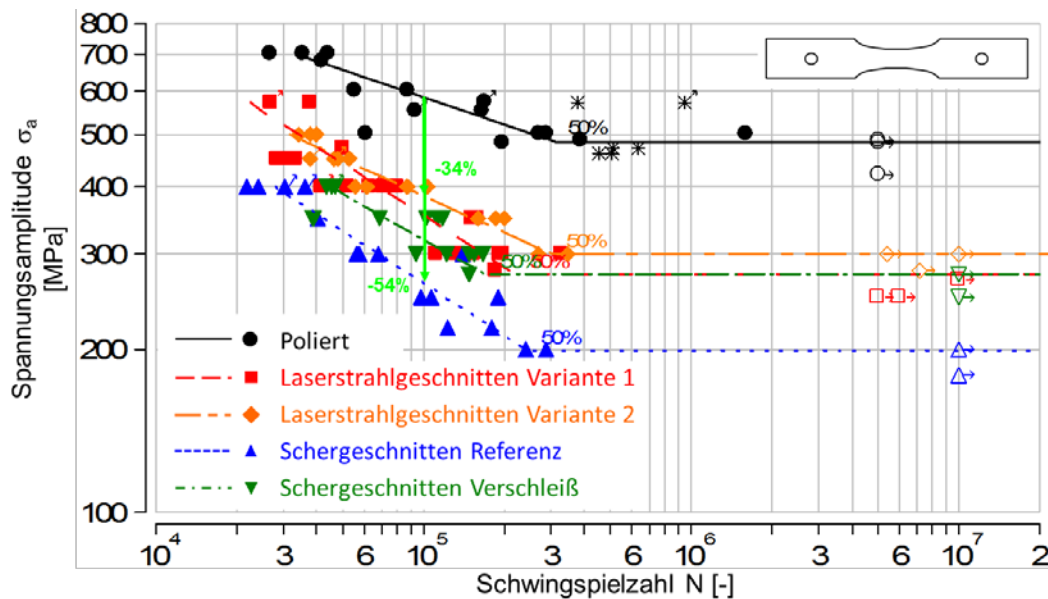


Abbildung 6.47: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1 und Variante 2, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

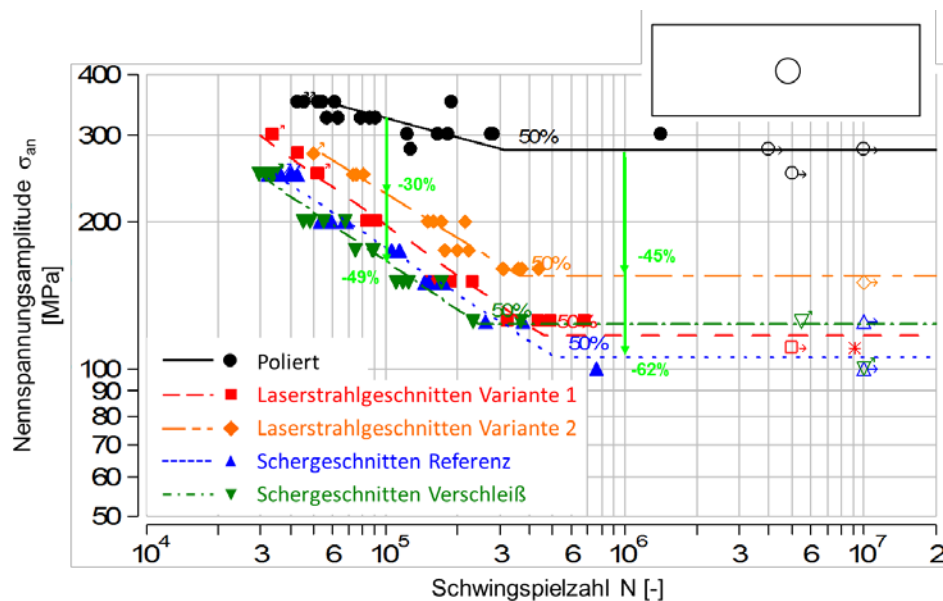


Abbildung 6.48: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1 und Variante 2, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 2,5$ ,  $R = -1$

Des Weiteren wurde an den ungekerbten Proben der Einfluss durch die Al-Si Beschichtung auf das Schwingfestigkeitsverhalten untersucht. Dafür wurde bei Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen (Variante 1) Kanten die Beschichtung mechanisch entfernt und die entste-

hende Oberfläche feingeschliffen und poliert. In Abbildung 6.50 sind die 50 %-Wöhlerlinien und die Versuchspunkte der unbeschichteten Proben zusammen mit denen der beschichteten Proben dargestellt, um auf diese Weise den Beschichtungseinfluss zu verdeutlichen.

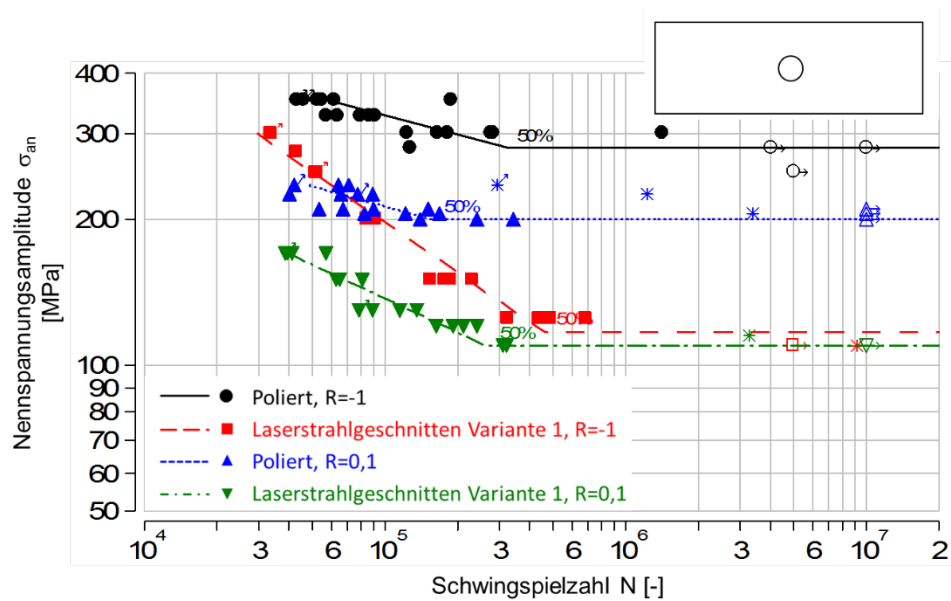


Abbildung 6.49: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1, Flachproben  $K_t = 2,5$ ,  $R = -1$  und  $R = 0,1$

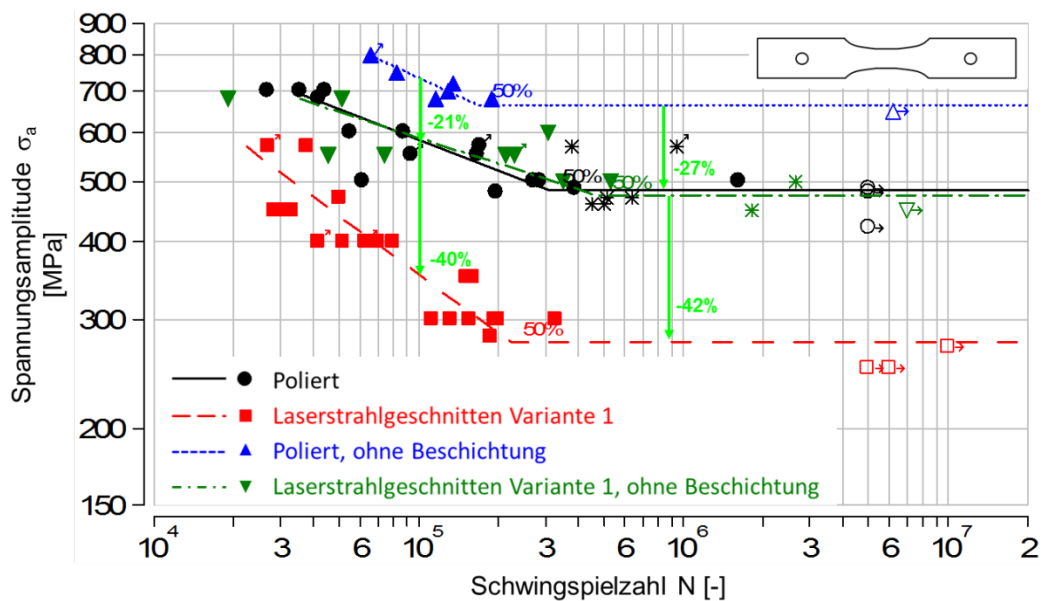


Abbildung 6.50: 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1, mit und ohne Al-Si Beschichtung, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

In Tabelle 6.40 sind alle Wöhlerlinien-Kennwerte, von den Flachproben aus gehärtetem 22MnB5 enthalten. Aus den dargestellten 50 %-Wöhlerlinien wird in Tabelle 6.41 der Kanten- einfluss sowie der Beschichtungseinfluss und in Tabelle 6.42 die dynamische Stützwirkung nach

den Gleichungen (2.4) und (2.5) und die Mittelspannungsempfindlichkeit nach Gleichung (2.6) ausgewertet. Die Auswertung wird sowohl bei einer Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Bereich der Dauerfestigkeit durchgeführt.

Tabelle 6.40: Wöhlerlinien der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an Flachproben aus gehärtetem 22MnB5

Kantenbearbeitungs- zustand	AlSi- Beschichtung	Kerbform- zahl $K_t$	Last- verhältnis R	Zeitfestigkeit			Schätzwert für Dauerfestigkeit	
				Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an, 50\%}$ [MPa] $N = 1 \times 10^5$	Neigungs- exponent k	Streu- spanne $T_N$	Dauer- festigkeit (Maximum- Likelihood) $P_A = 50\%$ $\sigma_{AD, ML}$ [MPa]	Eckschwing- spielzahl $N_D$
Poliert	beschichtet	1,0	-1	585	6,1	7,8	484	3,13E+05
	unbeschichtet	1,0	-1	737	5,2	1,7	665	1,71E+05
	beschichtet	2,5	-1	326	7,6	7,6	280	3,19E+05
	beschichtet	2,5	0,1	213	7,2	3,0	200	1,58E+05
Laserstrahl- geschnitten Variante 1	beschichtet	1,0	-1	355	3,2	2,5	275	2,24E+05
	unbeschichtet	1,0	-1	590	7,2	9,3	474	4,82E+05
	beschichtet	2,5	-1	198	2,9	1,7	117	4,63E+05
	beschichtet	2,5	0,1	138	4,4	1,8	110	2,69E+05
Laserstrahl- geschnitten Variante 2	beschichtet	1,0	-1	386	4,4	1,8	300	3,07E+05
	beschichtet	2,5	-1	229	3,3	1,6	155	3,62E+05
Scher- geschnitten Referenz	beschichtet	1,0	-1	266	3,1	2,2	199	2,48E+05
	beschichtet	2,5	-1	178	3,1	1,5	106	5,17E+05
Scher- geschnitten Verschleiß	beschichtet	1,0	-1	321	3,6	2,4	275	1,74E+05
	beschichtet	2,5	-1	167	3,0	1,6	124	2,46E+05

Tabelle 6.41: Einfluss der Kantenbearbeitung und Einfluss der Al-Si Beschichtung aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus gehärtetem 22MnB5

Kantenbearbeitungszustand	AlSi-Beschichtung	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Einfluss des Kantenzustands		Beschichtungseinfluss	
				Relative Schwingfestigkeit $\sigma_{an,x}/\sigma_{an,poliert}$		Relative Schwingfestigkeit $\sigma_{an,beschichtet}/\sigma_{an,unbeschichtet}$	
				Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$	Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$	Dauerfestigkeit $N_D$
Poliert	beschichtet	1,0	-1			0,79	0,73
	unbeschichtet	1,0	-1				
	beschichtet	2,5	-1				
	beschichtet	2,5	0,1				
Laserstrahl-geschnitten Variante 1	beschichtet	1,0	-1	0,61	0,57	0,60	0,58
	unbeschichtet	1,0	-1	0,80	0,71		
	beschichtet	2,5	-1	0,61	0,42		
	beschichtet	2,5	0,1	0,65	0,55		
Laserstrahl-geschnitten Variante 2	beschichtet	1,0	-1	0,66	0,62		
	beschichtet	2,5	-1	0,70	0,55		
Scher-geschnitten Referenz	beschichtet	1,0	-1	0,45	0,41		
	beschichtet	2,5	-1	0,55	0,38		
Scher-geschnitten Verschleiß	beschichtet	1,0	-1	0,55	0,57		
	beschichtet	2,5	-1	0,51	0,44		



Tabelle 6.42: Die dynamische Stützwirkung und die Mittelspannungsempfindlichkeit aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Flachproben aus gehärtetem 22MnB5

Kantenbearbeitungszustand	AlSi-Beschichtung	Kerbformzahl $K_t$	Lastverhältnis $R$	Dynamische Stützwirkung				Mittelspannungsempfindlichkeit $M [-]$	
				Zeitfestigkeit $N=1 \times 10^5$		Dauerfestigkeit $N_D$		$N=1 \times 10^5$	$N_D$
				Kerbwirkungszahl $K_f$	Dynamische Stützzahl $n_\sigma$	Kerbwirkungszahl $K_f$	Dynamische Stützzahl $n_\sigma$		
Poliert	beschichtet	1,0	-1						
	unbeschichtet	1,0	-1						
	beschichtet	2,5	-1	1,8	1,39	1,7	1,45		
	beschichtet	2,5	0,1					0,43	0,33
Laserstrahlgeschnitten Variante 1	beschichtet	1,0	-1						
	unbeschichtet	1,0	-1						
	beschichtet	2,5	-1	1,8	1,39	2,4	1,06		
	beschichtet	2,5	0,1					0,36	0,05
Laserstrahlgeschnitten Variante 2	beschichtet	1,0	-1						
	beschichtet	2,5	-1	1,7	1,48	1,9	1,29		
Scher- geschnitten Referenz	beschichtet	1,0	-1						
	beschichtet	2,5	-1	1,5	1,67	1,9	1,33		
Scher- geschnitten Verschleiß	beschichtet	1,0	-1						
	beschichtet	2,5	-1	1,9	1,30	2,2	1,13		

## 6.4 Dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen präsentiert. Der Versuchsmatrix in Tabelle 6.43 ist zu entnehmen, welcher Werkstoff mit welchen Kantenbearbeitungszuständen untersucht wird. In den folgenden Unterkapiteln werden die Versuchsergebnisse der Proben aus den verschiedenen Werkstoffen mit den unterschiedlichen Kantenzuständen präsentiert. Im Anhang A sind zusätzlich alle ermittelten Dehnungswöhlerlinien aus Tabelle 6.43 zusammen mit den entsprechenden Einzelversuchsergebnissen und den zyklischen Werkstoffkennwerten abgebildet. Die Versuchsdurchführung und -auswertung erfolgt nach den Vorgaben in Kapitel 5.6 und Kapitel 2.5.1.

Tabelle 6.43: Versuchsmatrix der dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an ungekerbten ( $K_t = 1$ ) Proben

Kantenbearbeitung	Werkstoffe					
	DC04	DP800	CP800	DP1000	CP1000	PHS (22MnB5)
Referenz Fräsen anschließend Polieren	x	x	x	x	x	x
Scherschneiden 1 Strategie: Referenz	x	x	x	x	x	x
Scherschneiden 2 Strategie: Verschleiß	x	x				x
Laserstrahlschneiden Variante 1 (22MnB5: Erst Härten, anschließend Laserstrahlschneiden)	x	x	x	x		x
Laserstrahlschneiden Variante 2 (22MnB5: Erst Laserstrahlschneiden, anschließend Härten)						x

### 6.4.1 DC04

In Abbildung 6.51 sind die Versuchsergebnisse der Proben aus DC04 mit den Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Bei den schergeschnittenen Proben wird zwischen den Schneidstrategien Referenz und Verschleiß bei der Probenherstellung unterschieden. Abgebildet sind je Kantenzustand die Dehnungswöhlerlinie sowie die plastische und elastische Gerade zusammen mit den Versuchspunkten. In Abbildung 6.52 sind die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Kantenbearbeitungszustände zusammen mit den Versuchspunkten dargestellt. Der Verfestigungskoeffizient und -exponent, welche die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschreiben, werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Zusätzlich ist im Diagramm in Abbildung 6.52 die Erstbelastungskurve dargestellt.

In Tabelle 6.44 sind die zyklischen Werkstoffkennwerte eingetragen, welche die Dehnungswöhlerlinien und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Abbildung 6.51 und Abbildung 6.52 beschreiben. Außerdem wird der Einfluss des Kantenzustands bei einer Schwingspielzahl im LCF-Bereich und bei einer Schwingspielzahl im HCF-Bereich ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit der Dehnungswöhlerlinie von den Proben mit polierten Kanten.

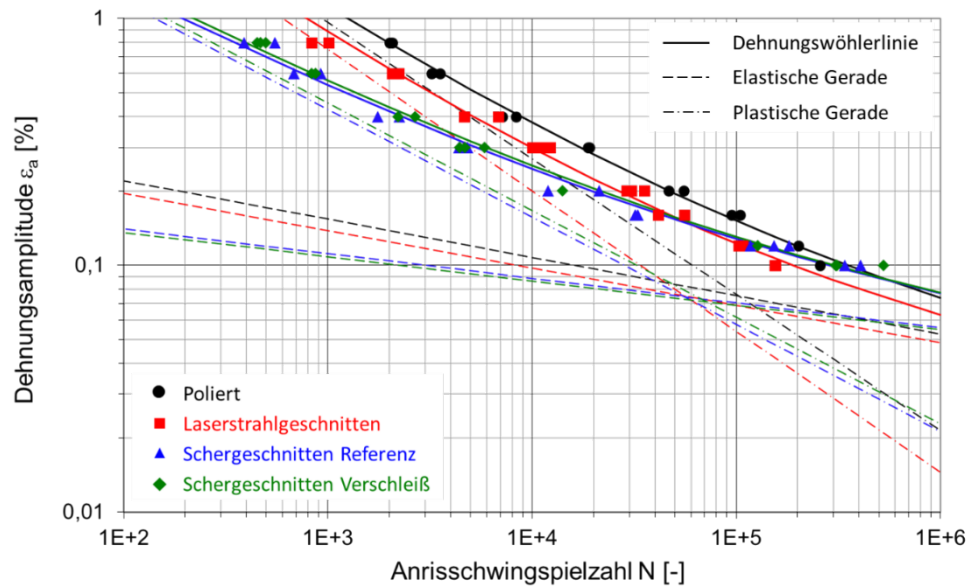


Abbildung 6.51: Dehnungswöhlerlinien, Werkstoff DC04, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

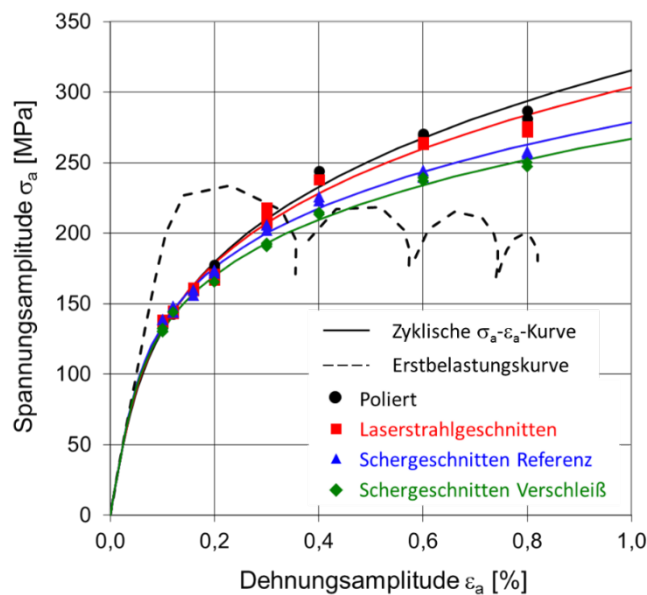


Abbildung 6.52: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Erstbelastungskurve, Werkstoff DC04, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß

Tabelle 6.44: Zyklische Werkstoffkennwerte, Werkstoff DC04, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß

Kantenbearbeitungszustand	Zyklische Werkstoffkennwerte nach Manson, Morrow, Coffin				Zyklische Werkstoffkennwerte aus Kompatibilitätsbedingung			Einfluss des Kantenzustands	
	Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_f$ [MPa]	Schwingfestigkeits-exponent $b$ [-]	Duktilitätskoeffizient $\varepsilon'_f$ [m/m]	Duktilitäts-exponent $c$ [-]	Zyklische Streckgrenze $R'_{p0,2}$ [MPa]	Verfestigungskoeffizient $K'$ [MPa]	Verfestigungs-exponent $n'$ [-]	Bezogene Gesamtdehnungsamplitude $\varepsilon_{a,x}/\varepsilon_{a,\text{poliert}}$	
								LCF $N=10^3$	HCF $N=5 \times 10^5$
Poliert	1066	-0,156	0,635	-0,551	209	1212	0,283		
Laserstrahlgeschnitten	925	-0,151	0,573	-0,571	207	1072	0,264	0,79	0,84
Schergeschnitten Referenz	506	-0,100	0,117	-0,435	199	829	0,230	0,48	0,99
Schergeschnitten Verschleiß	486	-0,098	0,122	-0,433	192	782	0,226	0,50	1,00

## 6.4.2 DP800

In Abbildung 6.53 sind die Versuchsergebnisse der Proben aus DP800 mit den Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Für die schergeschnittenen Kanten sind die Ergebnisse der Proben abgebildet, die mit den Schneidstrategien Referenz und Verschleiß hergestellt wurden. Abgebildet sind je Kantenzustand die Dehnungswöhlerlinie sowie die plastische und elastische Gerade zusammen mit den Versuchspunkten. Im Diagramm in Abbildung 6.54 sind die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Kantenbearbeitungszustände zusammen mit den Versuchspunkten dargestellt. Der Verfestigungskoeffizient und -exponent, welche die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschreiben, werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Zusätzlich ist im Diagramm in Abbildung 6.54 die Erstbelastungskurve dargestellt.

In Tabelle 6.45 sind die zyklischen Werkstoffkennwerte eingetragen, welche die Dehnungswöhlerlinien und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Abbildung 6.53 und Abbildung 6.54 beschreiben. Außerdem wird der Einfluss des Kantenzustands bei einer Schwingspielzahl im LCF-Bereich und bei einer Schwingspielzahl im HCF-Bereich ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit der Dehnungswöhlerlinie von den Proben mit polierten Kanten.

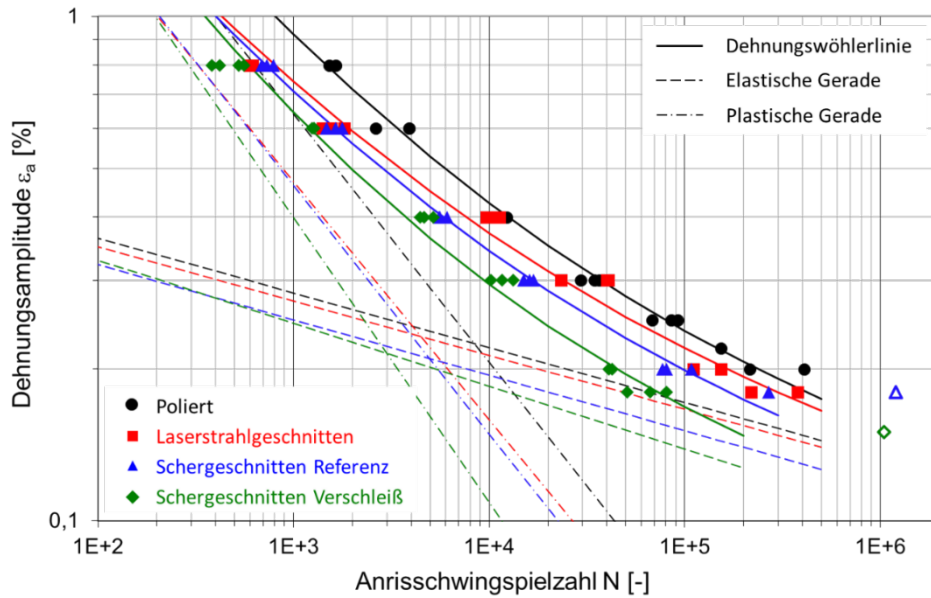


Abbildung 6.53: Dehnungswöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

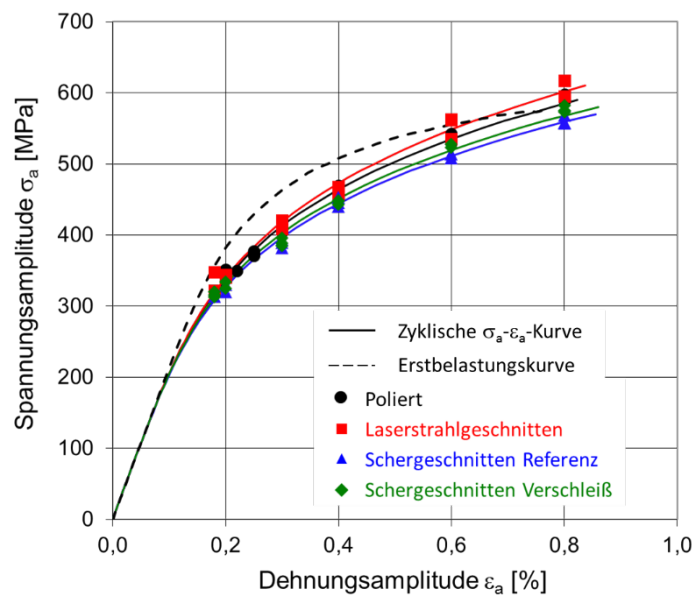


Abbildung 6.54: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Erstbelastungskurve, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß

Tabelle 6.45: Zyklische Werkstoffkennwerte, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz und Verschleiß

Kantenbearbeitungszustand	Zyklische Werkstoffkennwerte nach Manson, Morrow, Coffin				Zyklische Werkstoffkennwerte aus Kompatibilitätsbedingung			Einfluss des Kantenzustands	
	Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_f$ [MPa]	Schwingfestigkeits-exponent $b$ [-]	Duktilitätskoeffizient $\varepsilon'_f$ [m/m]	Duktilitäts-exponent $c$ [-]	Zyklische Streckgrenze $R'_{p0,2}$ [MPa]	Verfestigungskoeffizient $K'$ [MPa]	Verfestigungsexponent $n'$ [-]	Bezogene Gesamtdehnungsamplitude $\varepsilon_{a,N}/\varepsilon_{a,\text{poliert}}$	
								LCF $N=10^3$	HCF $N=10^5$
Poliert	1390	-0,108	0,267	-0,491	474	1858	0,220		
Laserstrahlgeschnitten	1329	-0,107	0,170	-0,472	485	1986	0,227	0,81	0,92
Schergeschnitten Referenz	1240	-0,110	0,193	-0,491	445	1793	0,224	0,77	0,83
Schergeschnitten Verschleiß	1373	-0,125	0,290	-0,564	456	1806	0,222	0,70	0,70

### 6.4.3 CP800

In Abbildung 6.55 sind die Versuchsergebnisse der Proben aus CP800 mit den Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Bei der Herstellung der schergeschnittenen Proben wurde die Schneidstrategie Referenz angewendet. Abgebildet sind je Kantenzustand die Dehnungswöhlerlinie sowie die plastische und elastische Gerade zusammen mit den Versuchspunkten. Im Diagramm in Abbildung 6.56 sind die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Kantenbearbeitungszustände zusammen mit den Versuchspunkten dargestellt. Der Verfestigungskoeffizient und -exponent, welche die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschreiben, werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Zusätzlich ist im Diagramm in Abbildung 6.56 die Erstbelastungskurve dargestellt.

In Tabelle 6.46 sind die zyklischen Werkstoffkennwerte eingetragen, welche die Dehnungswöhlerlinien und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Abbildung 6.55 und Abbildung 6.56 beschreiben. Außerdem wird der Einfluss des Kantenzustands bei einer Schwingspielzahl im LCF-Bereich und bei einer Schwingspielzahl im HCF-Bereich ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit der Dehnungswöhlerlinie von den Proben mit polierten Kanten.

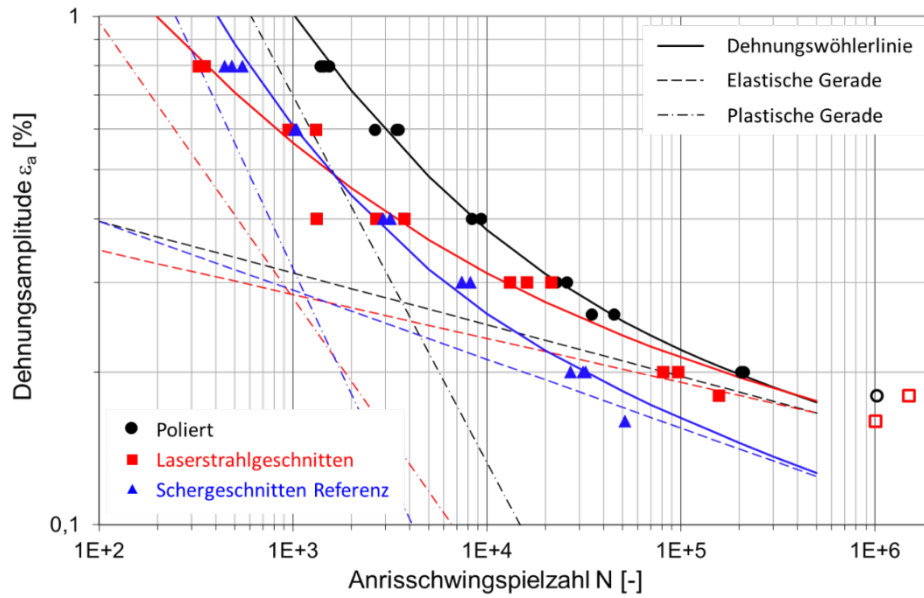


Abbildung 6.55: Dehnungswöhlerlinien, Werkstoff CP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

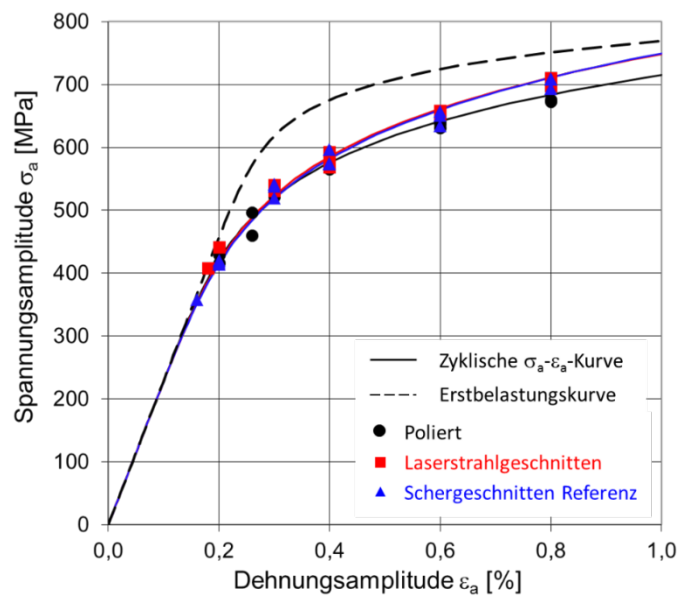


Abbildung 6.56: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Erstbelastungskurve, Werkstoff CP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz

Tabelle 6.46: Zyklische Werkstoffkennwerte, Werkstoff CP800, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz

Kantenbearbeitungszustand	Zyklische Werkstoffkennwerte nach Manson, Morrow, Coffin				Zyklische Werkstoffkennwerte aus Kompatibilitätsbedingung			Einfluss des Kantenzustands	
	Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_f$ [MPa]	Schwingfestigkeits-exponent $b$ [-]	Duktilitätskoeffizient $\epsilon'_f$ [m/m]	Duktilitäts-exponent $c$ [-]	Zyklische Streckgrenze $R'_{p0,2}$ [MPa]	Verfestigungskoeffizient $K'$ [MPa]	Verfestigungs-exponent $n'$ [-]	Bezogene Gesamtdehnungsamplitude $\epsilon_{a,N}/\epsilon_{a,\text{poliert}}$	
								LCF $N=10^3$	HCF $N=10^5$
Poliert	1556	-0,102	1,684	-0,722	601	1446	0,141		
Laserstrahlgeschnitten	1257	-0,087	0,174	-0,544	615	1663	0,160	0,56	0,96
Schergeschnitten Referenz	1860	-0,136	1,617	-0,819	612	1717	0,166	0,60	0,73

#### 6.4.4 DP1000

In Abbildung 6.57 sind die Versuchsergebnisse der Proben aus DP1000 mit den Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Bei der Herstellung der schergeschnittenen Proben wurde die Schneidstrategie Referenz angewendet. Abgebildet sind je Kantenzustand die Dehnungswöhlerlinie sowie die plastische und elastische Gerade zusammen mit den Versuchspunkten. Im Diagramm in Abbildung 6.58 sind die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Kantenbearbeitungszustände zusammen mit den Versuchspunkten dargestellt. Der Verfestigungskoeffizient und -exponent, welche die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschreiben, werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Zusätzlich ist im Diagramm in Abbildung 6.58 die Erstbelastungskurve dargestellt.

In Tabelle 6.47 sind die zyklischen Werkstoffkennwerte eingetragen, welche die Dehnungswöhlerlinien und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Abbildung 6.57 und Abbildung 6.58 beschreiben. Außerdem wird der Einfluss des Kantenzustands bei einer Schwingspielzahl im LCF-Bereich und bei einer Schwingspielzahl im HCF-Bereich ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit der Dehnungswöhlerlinie von den Proben mit polierten Kanten.



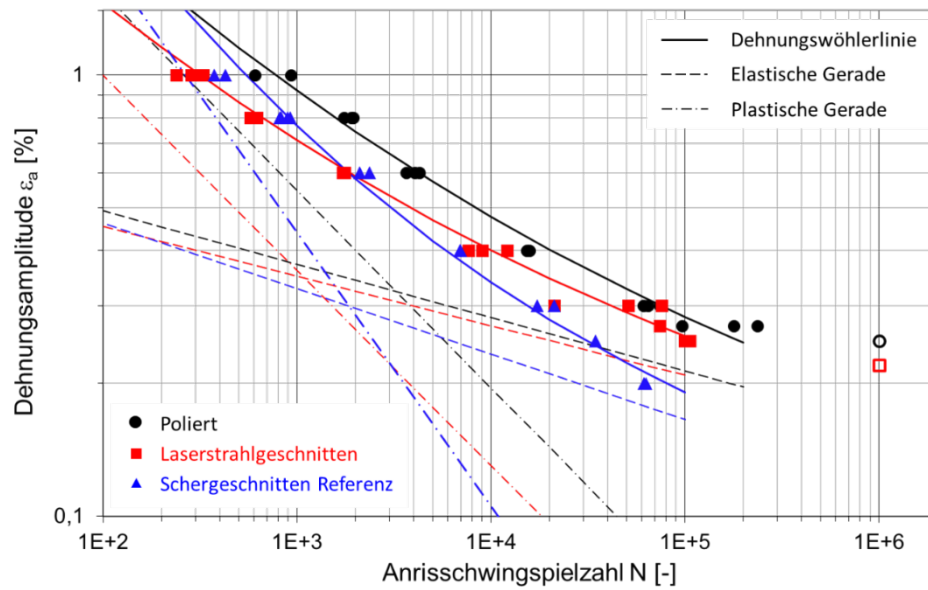


Abbildung 6.57: Dehnungswöhlerlinien, Werkstoff DP1000, Kantenzustände: Poliirt, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

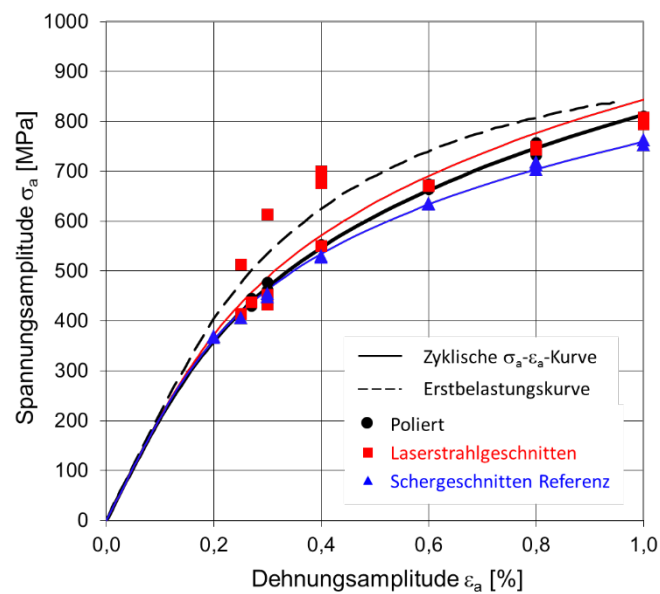


Abbildung 6.58: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Erstbelastungskurve, Werkstoff DP1000, Kantenzustände: Poliirt, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz

Tabelle 6.47: Zyklische Werkstoffkennwerte, Werkstoff DP1000, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz

Kantenbearbeitungszustand	Zyklische Werkstoffkennwerte nach Manson, Morrow, Coffin				Zyklische Werkstoffkennwerte aus Kompatibilitätsbedingung			Einfluss des Kantenzustands	
	Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_f$ [MPa]	Schwingfestigkeits-exponent $b$ [-]	Duktilitätskoeffizient $\epsilon'_f$ [m/m]	Duktilitäts-exponent $c$ [-]	Zyklische Streckgrenze $R'_{p0,2}$ [MPa]	Verfestigungskoeffizient $K'$ [MPa]	Verfestigungs-exponent $n'$ [-]	Bezogene Gesamtdehnungsamplitude $\epsilon_{a,N}/\epsilon_{a,Poliert}$	
								LCF $N=10^3$	HCF $N=10^5$
Poliert	1980	-0,121	0,165	-0,448	601	3221	0,270		
Laserstrahlgeschnitten	1741	-0,112	0,104	-0,442	640	3089	0,253	0,77	0,91
Schergeschnitten Referenz	2142	-0,148	0,489	-0,620	576	2541	0,239	0,83	0,68

### 6.4.5 CP1000

In Abbildung 6.59 sind die Versuchsergebnisse der Proben aus CP1000 mit den Kantenbearbeitungszuständen poliert und schergeschnitten dargestellt. Bei der Herstellung der schergeschnittenen Proben wurde die Schneidstrategie Referenz angewendet. Abgebildet sind je Kantenzustand die Dehnungswöhlerlinie sowie die elastische und plastische Gerade zusammen mit den Versuchspunkten.

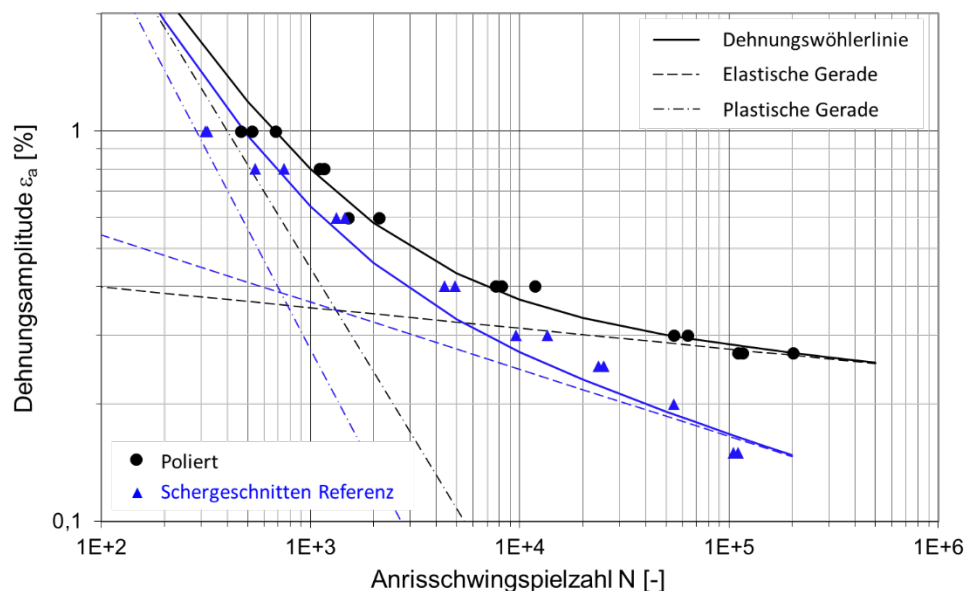


Abbildung 6.59: Dehnungswöhlerlinien, Werkstoff CP1000, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten, schergeschnitten Referenz, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

Im Diagramm in Abbildung 6.60 sind die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Kantenbearbeitungszustände zusammen mit den Versuchspunkten dargestellt. Der Verfestigungskoeffizient und -exponent, welche die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschreiben, werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Zusätzlich ist im Diagramm in Abbildung 6.60 die Erstbelastungskurve dargestellt.

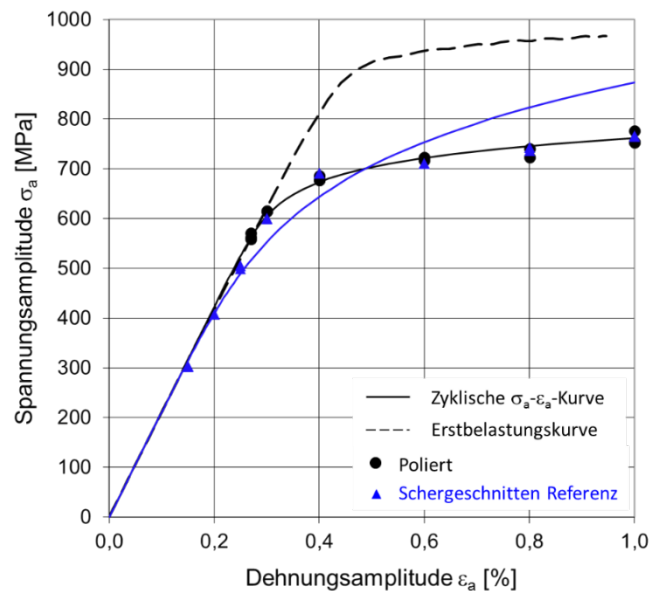


Abbildung 6.60: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Erstbelastungskurve, Werkstoff CP1000, Kantenzustände: Poliert, schergeschnitten Referenz

In Tabelle 6.48 sind die zyklischen Werkstoffkennwerte eingetragen, welche die Dehnungswöhlerlinien und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Abbildung 6.59 und Abbildung 6.60 beschreiben. Außerdem wird der Einfluss des Kantenzustands bei einer Schwingspielzahl im LCF-Bereich und bei einer Schwingspielzahl im HCF-Bereich ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit der Dehnungswöhlerlinie von den Proben mit polierten Kanten.

Tabelle 6.48: Zyklische Werkstoffkennwerte, Werkstoff CP1000, Kantenzustände: Poliert, schergeschnitten Referenz

Kantenbearbeitungszustand	Zyklische Werkstoffkennwerte nach Manson, Morrow, Coffin				Zyklische Werkstoffkennwerte aus Kompatibilitätsbedingung			Einfluss des Kantenzustands	
	Schwingfestigkeitskoeffizient $\sigma'_f$ [MPa]	Schwingfestigkeits-exponent $b$ [-]	Duktilitätskoeffizient $\epsilon'_f$ [m/m]	Duktilitäts-exponent $c$ [-]	Zyklische Streckgrenze $R'_{p0,2}$ [MPa]	Verfestigungskoeffizient $K'$ [MPa]	Verfestigungs-exponent $n'$ [-]	Bezogene Gesamtdehnungsamplitude $\epsilon_{a,x}/\epsilon_{a,poliert}$	
								LCF $N=10^3$	HCF $N=10^5$
Poliert	1116	-0,053	3,665	-0,883	711	1032	0,060		
Schergeschnitten Referenz	2843	-0,172	6,626	-1,024	729	2069	0,168	0,80	0,59

### 6.4.6 22MnB5

In Abbildung 6.61 sind die Versuchsergebnisse der Proben aus gehärtetem 22MnB5 mit den Kantenbearbeitungszuständen poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten dargestellt. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben wird zwischen Variante 1 und Variante 2 unterschieden. Für die schergeschnittenen Kanten sind die Ergebnisse der Proben abgebildet, die mit den Schneidstrategien Referenz und Verschleiß hergestellt wurden. Abgebildet sind je Kantenzustand die Dehnungswöhlerlinie sowie die plastische und elastische Gerade zusammen mit den Versuchspunkten. Im Diagramm in Abbildung 6.62 sind die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Kantenbearbeitungszustände zusammen mit den Versuchspunkten dargestellt. Der Verfestigungskoeffizient und -exponent, welche die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschreiben, werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Zusätzlich ist im Diagramm in Abbildung 6.62 die Erstbelastungskurve dargestellt.

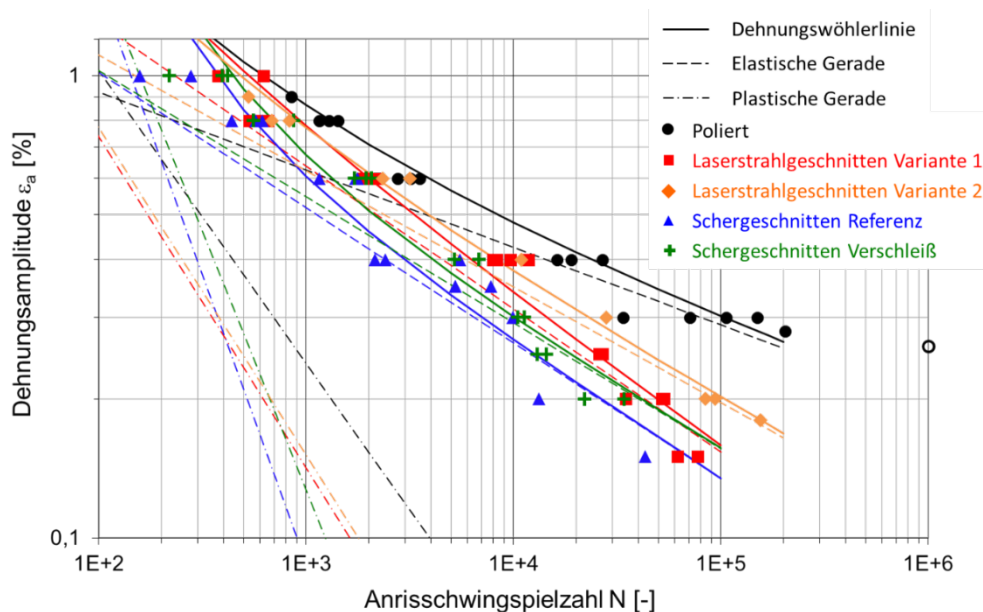


Abbildung 6.61: Dehnungswöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1 und Variante 2, schergeschnitten Referenz und Verschleiß, Flachproben  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

In Tabelle 6.49 sind die zyklischen Werkstoffkennwerte eingetragen, welche die Dehnungswöhlerlinien und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Abbildung 6.61 und Abbildung 6.62 beschreiben. Außerdem wird der Einfluss des Kantenzustands bei einer Schwingenspielzahl im LCF-Bereich und bei einer Schwingenspielzahl im HCF-Bereich ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über einen Vergleich mit der Dehnungswöhlerlinie von den Proben mit polierten Kanten.

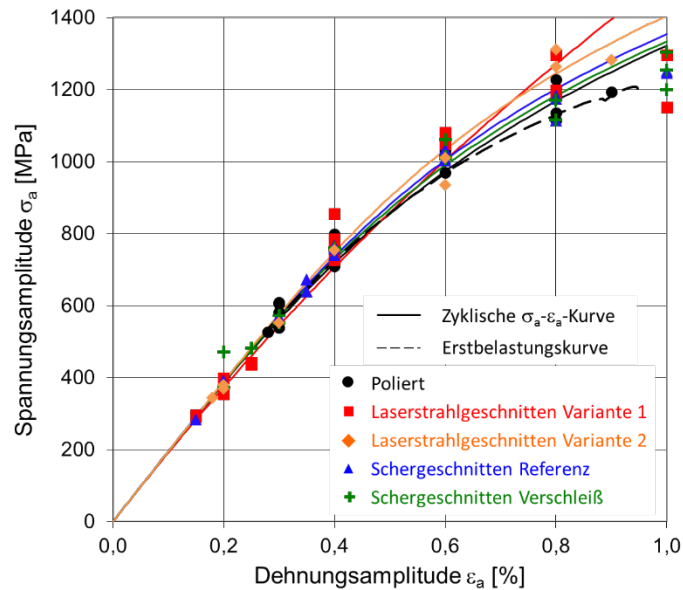


Abbildung 6.62: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Erstbelastungskurve, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1 und Variante 2, schergeschnitten Referenz und Verschleiß

Tabelle 6.49: Zyklische Werkstoffkennwerte, Werkstoff 22MnB5 gehärtet, Kantenzustände: Poliert, laserstrahlgeschnitten Variante 1 und Variante 2, schergeschnitten Referenz und Verschleiß

Kantenbearbeitungs- zustand	Zyklische Werkstoffkennwerte nach Manson, Morrow, Coffin				Zyklische Werkstoffkennwerte aus Kompatibilitätsbedingung			Einfluss des Kantenzustands	
	Schwing- festigkeits- koeffizient $\sigma'_f$ [MPa]	Schwing- festigkeits- exponent b [-]	Duktilitäts- koeffizient $\epsilon'_f$ [m/m]	Duktilitäts- exponent c [-]	Zyklische Streck- grenze $R'_{p0,2}$ [MPa]	Ver- festigungs- koeffizient K' [MPa]	Ver- festigungs- exponent n' [-]	Bezogene Gesamtdehnungsamplitude $\epsilon_{a,x}/\epsilon_{a,poliert}$	
								LCF N=10 <sup>3</sup>	HCF N=10 <sup>5</sup>
Poliert	4360	-0,167	0,293	-0,633	1170	6028	0,264		
Laserstrahl- geschnitten Variante 1	13033	-0,309	0,330	-0,717	1443	21016	0,431	0,90	0,52
Laserstrahl- geschnitten Variante 2	8144	-0,250	0,328	-0,708	1345	12072	0,353	0,89	0,67
Scher- geschnitten Referenz	9658	-0,298	11,672	-1,249	1221	5375	0,239	0,70	0,43
Scher- geschnitten Verschleiß	8482	-0,273	6,210	-1,118	1191	5430	0,244	0,78	0,51

## 6.5 Rissausgangsortanalyse

In homogen beanspruchten Proben oder Bauteilbereichen beginnt der Ermüdungsriss immer von der Stelle zu wachsen, an welcher der ungünstigste Zustand hinsichtlich des Schwingfestigkeitsverhaltens vorliegt. Der Gefüge- und Oberflächenzustand an diesen versagenskritischen Stellen ist ausschlaggebend für die örtliche Schwingfestigkeit und somit für die Anrisslebensdauer der Probe oder des Bauteils. Die Ermittlung des Rissausgangsorts erfolgt über eine mikroskopische Analyse der Bruchflächen an den versagten Proben. Bei den untersuchten Flachproben in diesem Forschungsvorhaben ging der Ermüdungsriss je nach Werkstoff, Probengeometrie und Kantenbearbeitungszustand von unterschiedlichen Stellen an der Probenoberfläche aus. Diese Rissausgangsorte werden in Abbildung 6.63 schematisch dargestellt. An dem Rissausgangsort Walzoberfläche liegen ein Oberflächen- und Gefügestand vor, der von der Kantenbearbeitung unbeeinflusst sind. Die Walzoberfläche im kantennahen Bereich hingegen wird beispielsweise durch Gefügeumwandlungen oder Kaltverfestigungen bei der Kantenbearbeitung beeinflusst. An der Kantenfläche liegen Werkstoff- und Oberflächenzustände vor, die jeweils vom Werkstoff sowie der Kantenbearbeitung abhängig sind und in der Randzonencharakterisierung in Kapitel 6.1 beschrieben werden. Bei den schergeschnittenen Proben wird die Kantenfläche nach Abbildung ... in die Bereiche Kanteneinzug, Glattschnittfläche und Bruchfläche unterteilt. In den folgenden Unterkapiteln wird der vornehmlich auftretende Rissausgangsort bei den verschiedenen Probenvarianten beschrieben.

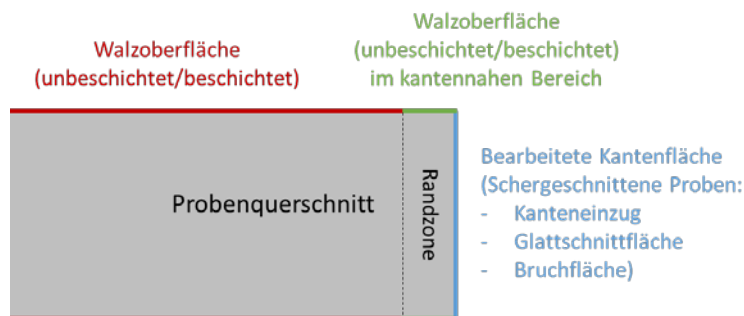


Abbildung 6.63: Schematische Darstellung der Rissausgangsorte an der Probenoberfläche einer Flachprobe

### 6.5.1 DC04

In Tabelle 6.50 sind die unter schwingender Beanspruchung auftretenden Rissausgangsorte an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) und gekerbten ( $K_t = 2,5$ ) Flachproben aus DC04 abgebildet. Dabei wird für die Kennzeichnung der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „s“ und für die dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „d“ verwendet.

Tabelle 6.50: Rissausgangsorte bei dehnungs- (d) und spannungskontrollierten (s) Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus DC04

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Rissausgangsort					
		Walzoberfläche	Walzoberfläche im kanten-nahen Bereich	Kantenfläche	Schergeschnittene Kantenfläche		
					Glattschnittfläche	Bruchfläche	Kanteneinzug
Poliert	1,0	s, d					
	2,5		s				
Laserstrahl-geschnitten	1,0			s, d			
	2,5			s			
Scher-geschnitten Referenz	1,0					s, d	
	2,5					s	
Scher-geschnitten Verschleiß	1,0					d	

Tabelle 6.50 ist zu entnehmen, dass je nach Kantenbearbeitung unterschiedliche Rissausgangsorte vorliegen. Während der Ermüdungsriss bei den Proben mit polierten Kanten von der Walzoberfläche zu wachsen beginnt (siehe Abbildung 6.64), geht er bei den laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben von der Kantenfläche aus. Bei den schergeschnittenen Proben wurde außerdem festgestellt, dass der Rissausgangsort immer im Bereich der Bruchfläche liegt. Die Tatsache, dass der Ermüdungsriss bei den Proben mit polierten Kanten nicht von der Kantenfläche, sondern von der Walzoberfläche ausgeht, lässt sich mit der höheren Rautiefe an der Walzoberfläche erklären, siehe Tabelle 6.1. Zwischen den dehnungskontrollierte und den spannungskontrollierten Versuchen an den ungekerbten Proben, konnte bezüglich der Rissausgangsorte kein Unterschied festgestellt werden.

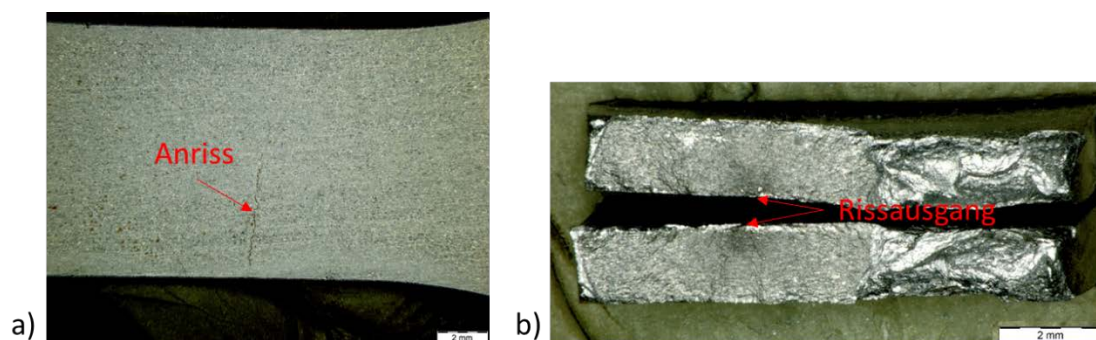


Abbildung 6.64: Rissausgangsort Walzoberfläche bei einer ungekerbten Flachprobe aus DC04 mit polierten Kanten, a) Draufsicht Walzoberfläche, b) Bruchflächen

### 6.5.2 DP800

In Tabelle 6.51 sind die unter schwingender Beanspruchung auftretenden Rissausgangsorte an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) und gekerbten ( $K_t = 2,5$  und  $4,6$ ) Flachproben aus DP800 abgebildet. Dabei wird für die Kennzeichnung der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „s“ und für die dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „d“ verwendet.

Tabelle 6.51: Rissausgangsorte bei dehnungs- (d) und spannungskontrollierten (s) Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus DP800

Kantenbearbeitungs-zustand	Kerbform-zahl $K_t$	Rissausgangsort					
		Walz-ober-fläche	Walz-ober-fläche im kanten-nahen Bereich	Kanten-fläche	Schergeschnittene Kantenfläche		
					Glatt-schnitt-fläche	Bruch-fläche	Kanten-ein-zug
Poliert	1,0	s, d					
	2,5		s				
	4,7			s			
Laserstrahl-geschnitten	1,0	s, d		d			
	2,5		s				
Schergeschnitten Referenz	1,0					s, d	
	2,5					s	
	4,7					s	
Schergeschnitten Verschleiß	1,0					s, d	
	2,5					s	
	4,7					s	
Schergeschnitten Beschichtung	1,0					s	
	2,5					s	
Schergeschnitten Eigenspannungs-zustand	1,0					s	
	2,5						
Schergeschnitten Glattschnitt	1,0					s	
	2,5						s

Bei den Proben mit polierten Kanten ist zu beobachten, dass der Rissausgangsort mit zunehmender Kerbschärfe von der Walzoberfläche ( $K_t = 1$ ) über die Walzoberfläche im kantennahen Bereich ( $K_t = 2,5$ ) an die Kantenfläche ( $K_t = 4,6$ ) wechselt. Eine Erklärung dafür, dass der Ermüdungsriss bei den Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 1$  und  $2,5$  mit polierten Kanten nicht von der Kantenfläche, sondern von der Walzoberfläche ausgeht, ist die höhere Oberflächenrauheit an der Walzoberfläche, siehe Tabelle 6.1. Bei den gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  ist die Beanspruchung an der Kantenfläche im Kerbgrund aufgrund der örtlichen Spannungsüberhöhung und dem steilen Spannungsabfall, deutlich größer als in den umliegenden Bereichen an der Walzoberfläche. Dementsprechend beginnt der Ermüdungsriss an der Kantenfläche.



Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben liegt der Rissausgangsort unter spannungskontrollierter Beanspruchung an der Walzoberfläche ( $K_t = 1$ ) beziehungsweise an der Walzoberfläche im kantennahen Bereich ( $K_t = 2,5$ ). Bei dehnungskontrollierter Beanspruchung kommt es zu der Besonderheit, dass je nach Beanspruchungshöhe unterschiedliche Rissausgangsorte an den ungekerbten Flachproben auftreten, siehe Abbildung 6.65. Bei den Versuchen die mit einer Dehnungsamplitude  $\varepsilon_a > 0,4 \%$  durchgeführt wurden, liegt der Rissausgangsort an der laserstrahlgeschnittenen Kantenfläche. Bei einer Beanspruchung mit  $\varepsilon_a \leq 0,4 \%$  beginnt der Ermüdungsriss an der Walzoberfläche. Dieser Wechsel des Rissausgangsortes in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe hängt mit der Härtung des Randzonengefüges infolge des Laserstrahlschneidens zusammen und wird in Kapitel 7.2.2 detailliert beschrieben.

Der Rissausgangsort bei den schergeschnittenen Proben liegt immer an der Bruchfläche der Schnittkante. Abbildung 6.66 zeigt dies exemplarisch an einer ungekerbten Probe aus DP800, die mit der Schneidstrategie Verschleiß hergestellt wurde. Eine Ausnahme stellen die gekerbten Proben dar, die mit der Schneidstrategie Glattschnitt hergestellt wurden. Hier geht der Ermüdungsriss vom Kanteneinzug an der Schnittkante aus.

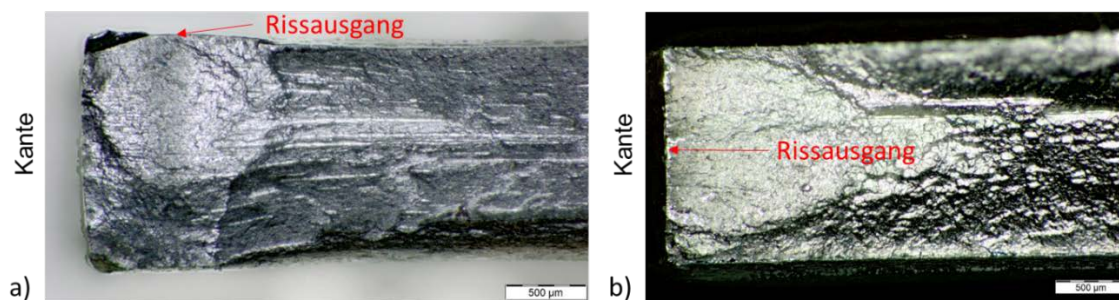


Abbildung 6.65: Rissausgangsorte an laserstrahlgeschnittenen Flachproben aus DP800 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung, a) Walzoberfläche wenn  $\varepsilon_a \leq 0,4 \%$ , b) Kantenfläche wenn  $\varepsilon_a > 0,4 \%$

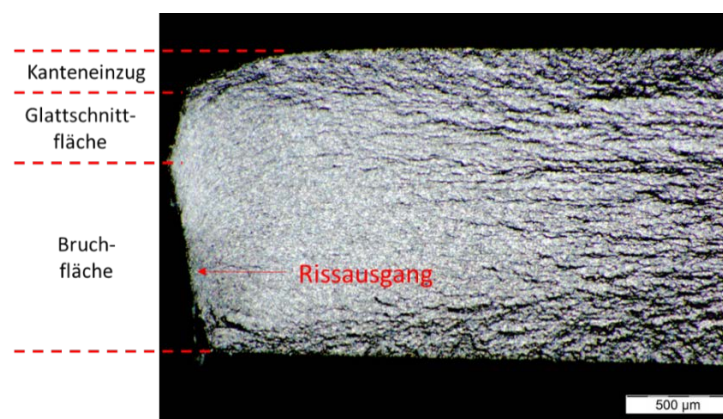


Abbildung 6.66: Bruchfläche mit Rissausgang einer schergeschnittenen ungekerbten Flachprobe aus DP800, hergestellt mit der Schneidstrategie Verschleiß

### 6.5.3 CP800

In Tabelle 6.52 sind die unter schwingender Beanspruchung auftretenden Rissausgangsorte an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) Flachproben aus CP800 abgebildet. Dabei wird für die Kennzeichnung der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „s“ und für die dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „d“ verwendet.

Tabelle 6.52: Rissausgangsorte bei dehnungs- (d) und spannungskontrollierten (s) Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben aus CP800

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Rissausgangsort					
		Walzoberfläche	Walzoberfläche im kanten-nahen Bereich	Kantenfläche	Schergeschnittene Kantenfläche		
Glattschnittfläche	Bruchfläche				Kanteneinzug		
Poliert	1,0	s, d					
Laserstrahl-geschnitten	1,0			s, d			
Scher-geschnitten Referenz	1,0					s, d	

Es konnte festgestellt werden, dass der Ermüdungsriss bei den Proben mit polierten Kanten von der Walzoberfläche ausgeht, siehe Abbildung 6.67. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben liegt der Rissausgangsort an der Kantenfläche und bei den schergeschnittenen Proben an der Bruchfläche der Schnittkante. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben muss darauf hingewiesen werden, dass der Ermüdungsriss von fertigungsbedingten Einzelkerben an der Kantenfläche ausgeht, wie es in Abbildung 6.68 exemplarisch dargestellt ist. Auf die Entstehung solcher Kerben beim Laserstrahlschneiden des CP800 wird in Kapitel 6.1.2 eingegangen.

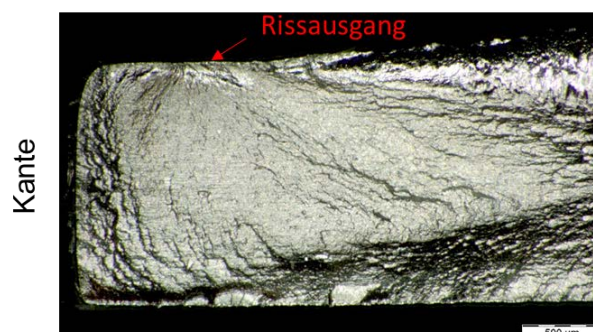


Abbildung 6.67: Bruchfläche einer ungekerbten Flachprobe aus CP800 mit polierten Kanten

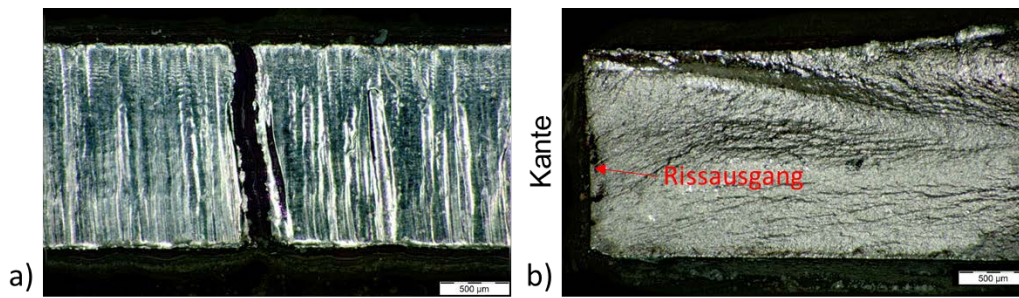


Abbildung 6.68: Rissausgang von einer fertigungsbedingten Einzelkerbe an einer laserstrahl-geschnittenen Kante, Werkstoff CP800, a) Draufsicht Laserschnittkante, b) Bruchfläche

### 6.5.4 DP1000

In Tabelle 6.53 sind die unter schwingender Beanspruchung auftretenden Rissausgangsorte an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) Flachproben aus DP1000 abgebildet. Dabei wird für die Kennzeichnung der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „s“ und für die dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „d“ verwendet.

Tabelle 6.53: Rissausgangsorte bei dehnungs- (d) und spannungskontrollierten (s) Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben aus DP1000

Kantenbearbeitungs-zustand	Kerbform-zahl $K_t$	Rissausgangsort					
		Walz-ober-fläche	Walz-ober-fläche im kanten-nahen Bereich	Kanten-fläche	Schergeschnittene Kantenfläche		
					Glatt-schnitt-fläche	Bruch-fläche	Kanten-ein-zug
Poliert	1,0	s, d					
Laserstrahl-geschnitten	1,0	s, d		d			
Scher-geschnitten Referenz	1,0					s, d	

Unter spannungskontrollierter Beanspruchung geht der Ermüdungsriss bei den laserstrahl-geschnittenen Proben von der Walzoberfläche aus. Unter dehnungskontrollierter Beanspruchung treten je nach Beanspruchungshöhe unterschiedliche Rissausgangsorte auf, siehe Abbildung 6.69. Bei den Versuchen, die mit einer Dehnungsamplitude  $\epsilon_a > 0,4\%$  durchgeführt werden, liegt der Rissausgangsort an der laserstrahl-geschnittenen Kantenfläche. Bei einer Beanspruchung mit  $\epsilon_a < 0,4\%$  beginnt der Ermüdungsriss an der Walzoberfläche. Bei einer Beanspruchung mit  $\epsilon_a = 0,4\%$  treten beide Rissausgangsorte an den Proben auf. Dieser Wechsel des Rissausgangsortes in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe hängt mit der Härtung des Rand-zonengefüges infolge des Laserstrahl-schneidens zusammen und wird in Kapitel 7.2.4 detailliert beschrieben.

Bei den schergeschnittenen Proben beginnt der Ermüdungsriss immer an der Bruchfläche der Schnittkante.

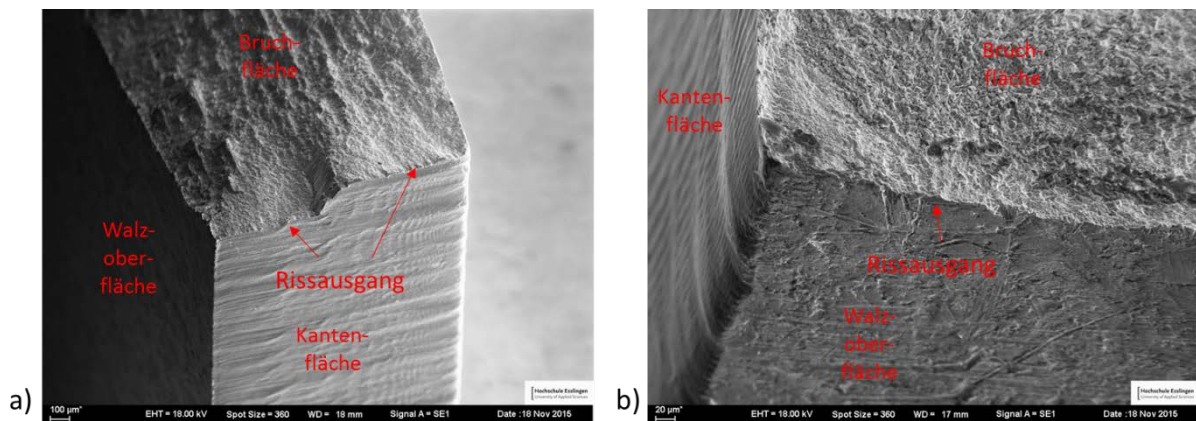


Abbildung 6.69: Rissausgangsorte an laserstrahlgeschnittenen Flachproben aus DP1000 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung, a) Kantenfläche wenn  $\epsilon_a > 0,4 \%$ , b) Walzoberfläche wenn  $\epsilon_a < 0,4 \%$

### 6.5.5 CP1000

In Tabelle 6.54 sind die unter schwingender Beanspruchung auftretenden Rissausgangsorte an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) Flachproben aus CP1000 abgebildet. Dabei wird für die Kennzeichnung der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „s“ und für die dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „d“ verwendet. Wie Tabelle 6.54 zu entnehmen ist, geht das Ermüdungsversagen bei den Proben mit polierten Kanten von der Walzoberfläche und bei den schergeschnittenen Proben von der Bruchfläche an der Schnittkante aus.

Tabelle 6.54: Rissausgangsorte bei dehnungs- (d) und spannungskontrollierten (s) Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben aus CP1000

Kantenbearbeitungszustand	Kerbformzahl $K_t$	Walzoberfläche	Rissausgangsort				
			Walzoberfläche im kanten-nahen Bereich	Kantenfläche	Schergeschnittene Kantenfläche		
					Glattschnittfläche	Bruchfläche	Kanteneinzug
Poliert	1,0	s, d					
Schergeschnitten Referenz	1,0					s, d	

### 6.5.6 22MnB5

In Tabelle 6.55 sind die unter schwingender Beanspruchung auftretenden Rissausgangsorte an den ungekerbten ( $K_t = 1$ ) und gekerbten ( $K_t = 2,5$  und  $4,6$ ) Flachproben aus DP800 abgebildet. Dabei wird für die Kennzeichnung der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „s“ und für die dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche „d“ verwendet.

Tabelle 6.55: Rissausgangsorte bei dehnungs- (d) und spannungskontrollierten (s) Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus gehärtetem 22MnB5

Kantenbearbeitungszustand	AlSi-Beschichtung	Kerbformzahl $K_t$	Rissausgangsort					
			Walzoberfläche	Walzoberfläche im kantennahen Bereich	Kantenfläche	Schergeschnittene Kantenfläche		
						Glattschnittfläche	Bruchfläche	Kanteneinzug
Poliert	beschichtet	1,0	s, d					
	unbeschichtet	1,0	s		s			
	beschichtet	2,5	s					
Laserstrahlgeschnitten Variante 1	beschichtet	1,0		s, d				
	unbeschichtet	1,0			s			
	beschichtet	2,5		s				
Laserstrahlgeschnitten Variante 2	beschichtet	1,0			s			
	beschichtet	2,5			s			
Schergeschnitten Referenz	beschichtet	1,0					s, d	
	beschichtet	2,5					s	
Schergeschnitten Verschleiß	beschichtet	1,0					s, d	
	beschichtet	2,5					s	

Tabelle 6.55 ist zu entnehmen, dass der Rissausgangsort bei den ungekerbten und gekerbten Proben mit polierten Kanten an der Walzoberfläche mit Al-Si Beschichtung auftritt. Die ungekerbten Proben ohne Al-Si Beschichtung mit polierten Kanten haben eine rundum polierte Oberfläche. Aufgrund desselben Zustands an der gesamten Probenoberfläche kann kein einheitlicher Rissausgangsort bei den Proben festgestellt werden. Der Ermüdungsriss beginnt sowohl an der Kante als auch an der Walzoberfläche.

Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben der Variante 1 liegt der Rissausgangsort im kantennahen Bereich an der Walzoberfläche. Wird die Al-Si Beschichtung an den ungekerbten Proben entfernt, wechselt der Rissausgangsort an die Kantenfläche. In Abbildung 6.70 sind die Rissausgangsorte der beschichteten und unbeschichteten Proben exemplarisch dargestellt. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben der Variante 2 mit Al-Si Beschichtung liegt der Rissausgangsort, im Gegensatz zu den beschichteten Proben der Variante 1, an der Kantenfläche, siehe Abbildung 6.71.

Bei allen schergeschnittenen Probenvarianten geht der Ermüdungsriss immer von der Bruchfläche an der Schnittkante aus.

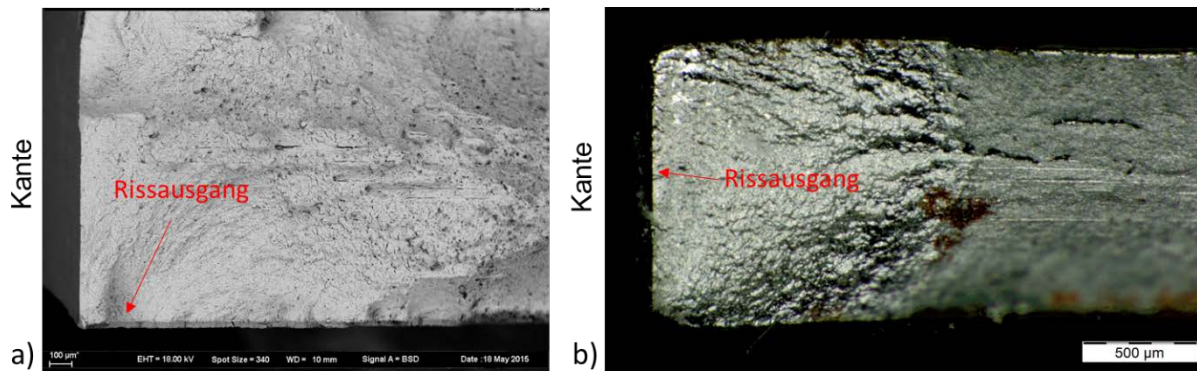


Abbildung 6.70: Bruchflächen an ungekerbten laserstrahlgeschnittenen (Variante 1) Flachproben aus gehärtetem 22MnB5, a) mit Al-Si Beschichtung, b) ohne Al-Si Beschichtung

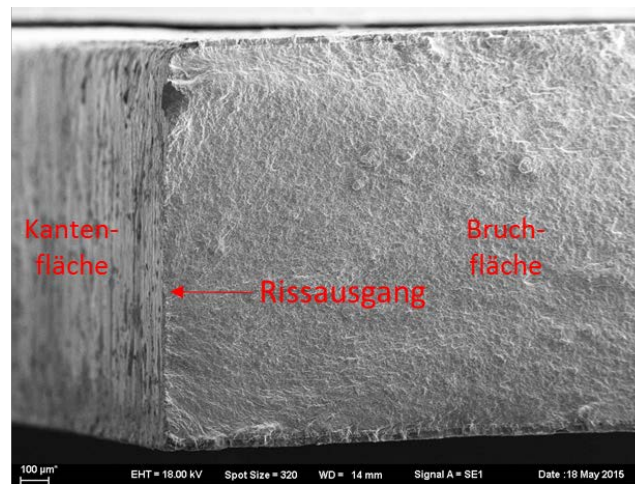


Abbildung 6.71: Rissausgangsort an einer ungekerbten laserstrahlgeschnittenen (Variante 2) Flachprobe aus gehärtetem 22MnB5

## 6.6 Bauteilsschwingfestigkeitsversuch

Eine Übersicht zu den durchgeführten zyklischen Bauteilversuchen mit DP800 als Grundwerkstoff gibt die nachfolgende Tabelle 6.56 über alle Kantenbearbeitungszustände wider.

Tabelle 6.56: Übersicht der Bauteilversuche mit DP800 im gekerbten Hutprofil und der erreichten Schwingspiele auf unterschiedlichen Kraftniveaus in Abhängigkeit der Kantenbearbeitung

Werkstoff	Kantenbearbeitung	Kraft [kN]	Schwingspiele	Bemerkung
<b>DP800</b>	<b>Referenz: Gefräst u. poliert</b>	5,6	319.094	Versagen sonstige
		5,6	156.811	Versagen sonstige
		5,6	288.603	Versagen sonstige
		5,1	511.829	Versagen sonstige
		5,1	459.298	Versagen sonstige
		5,1	516.007	Versagen sonstige
<b>DP800</b>	<b>Laserschneiden</b>	5,6	128.559	Anriss Freischnitt
		5,1	149.058	Anriss Freischnitt
		5,1	123.151	Anriss Freischnitt
		5,6	88.107	Anriss Freischnitt
		5,6	92.026	Versagen sonstige
		5,1	157.970	Anriss Freischnitt
<b>DP800</b>	<b>Scherschneiden</b>	5,1	120.257	Versagen sonstige
		5,1	134.218	Versagen sonstige
		4,6	274.246	Versagen sonstige
		4,6	194.291	Versagen sonstige
		4,1	880.708	Versagen sonstige
		4,1	194.112	Versagen sonstige
<b>DP800</b>	<b>Scherschneiden Verschleiß</b>	5,1	68.427	Versagen sonstige
		4,6	207.389	Versagen sonstige
		4,6	282.188	Versagen sonstige
		4,1	1.096.747	Versagen sonstige
		4,1	638.618	Versagen sonstige

Die Variation der Kraftniveaus bezieht sich im Wesentlichen auf  $F_{\max}$  5,1 kN und 4,6 kN bzw. 4,1 kN. Zu den einzelnen Versuchen sind jeweils die erreichten Schwingspielzahlen bis Anriss aufgelistet sowie die Beschreibung der jeweiligen Versagensform. Anrisse, die nicht im ge-

wünschten Bereich des Freischnittes detektiert wurden, sind mit „Versagen sonstige“ bezeichnet. Dies bezieht sich hauptsächlich auf ein Versagen an einer Fügeverbindung. Die Darstellung der Versuchsergebnisse für DP800 im Wöhlerdiagramm findet sich in Abbildung 6.72.

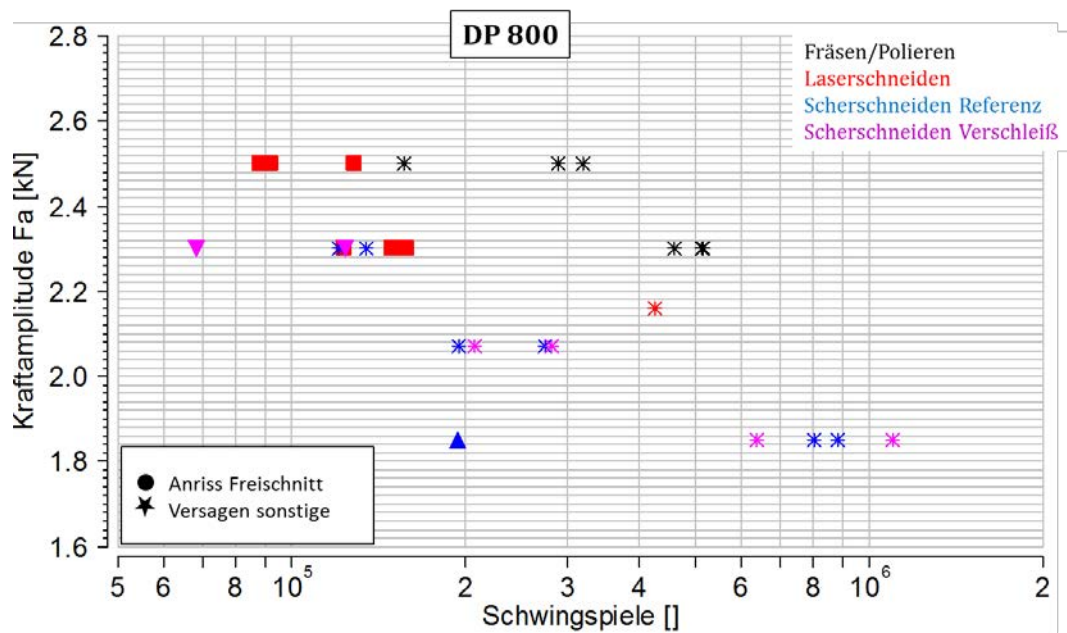


Abbildung 6.72: Versuchsergebnisse der Bauteilversuche im Wöhlerdiagramm für unterschiedliche Kantenbearbeitungszustände, Grundwerkstoff gekerbtes Hutprofil: DP800

Tendenziell kann aus den Versuchen mit DP800 am Beispiel des Lastniveaus  $F_a = 2,5$  kN entnommen werden, dass sich für die polierte Kante eine höhere Lebensdauer im Vergleich zur lasergeschnittenen Kante ergibt. In Bezug auf eine Kraftamplitude in Höhe von  $F_a = 2,3$  kN ist im Mittel ein früheres Versagen bei schergeschnittener Kante (Verschleiß) im Vergleich zur lasergeschnittenen Kante erkennbar. Über alle Versuche betrachtet, ergibt sich für die bauteilnahen Versuche eine deutlich längere Laufzeit in Form höherer Schwingspiele bei gefräst und anschließend polierter Kante im Freischnitt, als für die lasergeschnittenen und schergeschnittenen Kantenzustände.

Ein Schwingbruchversagen am Freischnitt für einen schergeschnittenen DP 800 ist in Abbildung 6.73 dargestellt.





Abbildung 6.73: Anriss im Bereich des schergeschnittenen (Referenz) Freischnittes, am Beispiel DP800

Eine Bruchfläche ist in Abbildung 6.74 für den Mehrphasenstahl DP800 dargestellt. Die Kantenbearbeitung dieser geprüften Bauteilprobe war Scherschneiden mit Verschleiß, so dass sich eine hohe Rauheit innerhalb des Bruchanteils ergibt.

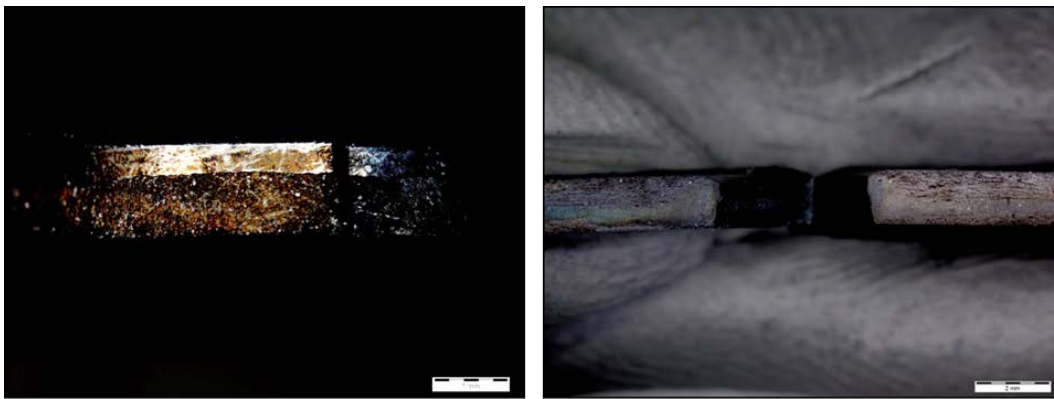


Abbildung 6.74: Bruchfläche der schergeschnittenen Kante mit Einfluss Verschleiß, Grundwerkstoff: DP800

Analog zu den Schwingfestigkeitsversuchen mit DP800 wurden die Versuche mit einem DP1000 durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 6.57 zusammengestellt.

Tabelle 6.57: Übersicht der Bauteilversuche mit DP1000 im gekerbten Hutprofil und der erreichten Schwingspiele auf unterschiedlichen Kraftniveaus in Abhängigkeit der Kantenbearbeitung

Werkstoff	Kantenbearbeitung	Kraft [kN]	Schwingspiele	Bemerkung
<b>DP1000</b>	<b>Referenz: Gefräst u. poliert</b>	5,6	302.190	Versagen sonstige
		5,6	103.524	Anriss Freischnitt
		5,6	369.250	Versagen sonstige
		5,1	346.181	Versagen sonstige
		5,1	536.907	Versagen sonstige
		5,1	424.475	Versagen sonstige
<b>DP1000</b>	<b>Laserschneiden</b>	5,6	180.999	Anriss Freischnitt
		5,6	79.844	Anriss Freischnitt
		5,6	68.973	Anriss Freischnitt
		5,1	105.457	Anriss Freischnitt
		5,1	410.386	Anriss Freischnitt
		5,1	376.796	Anriss Freischnitt
<b>DP1000</b>	<b>Scherschneiden</b>	5,1	212.376	Anriss Freischnitt
		5,1	503.665	Versagen sonstige
		4,6	443.564	Versagen sonstige
		4,6	856.907	Versagen sonstige
		4,6	829.623	Versagen sonstige
		4,6	820.979	Versagen sonstige

Die Darstellung der Versuchsergebnisse der Bauteilversuche an DP 1000 im Wöhlerdiagramm findet sich in Abbildung 6.75.

Tendenziell tritt bei der lasergeschnittenen Kante das Schwingbruchversagen im Freischnitt früher ein als bei einer polierten Kante. Die Versuchsergebnisse auf dem Lastniveau 2,3 kN geben Hinweise auf ein schlechteres Schwingfestigkeitsverhalten der schergeschnittenen Kante im Vergleich zur lasergeschnittenen Kante. Das beste Schwingfestigkeitsverhalten ergibt sich bei der polierten Kante.

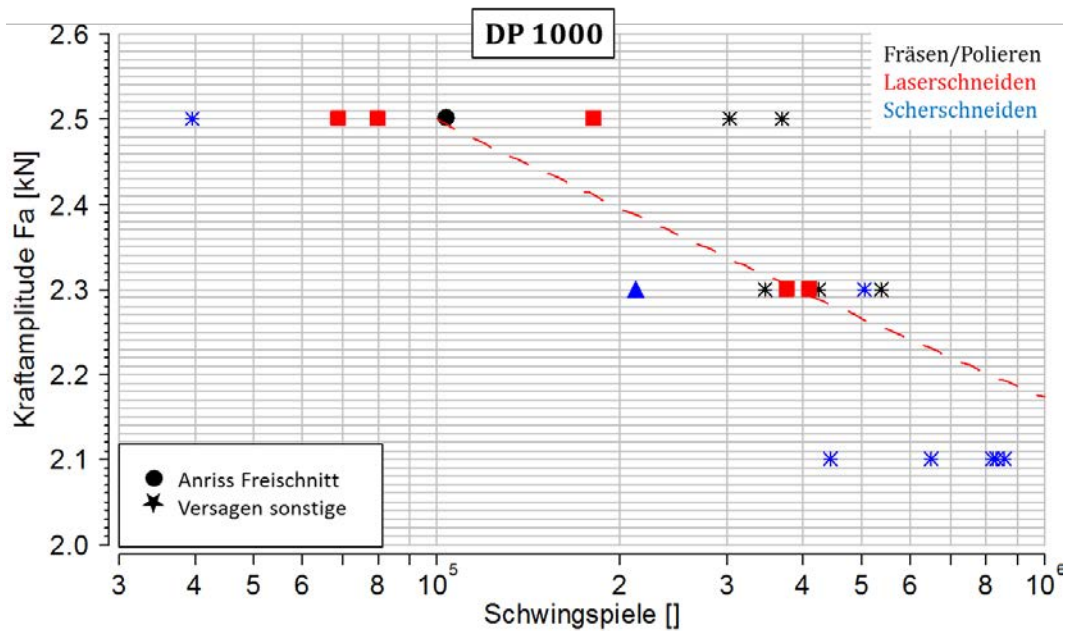


Abbildung 6.75: Versuchsergebnisse der Bauteilversuche im Wöhlerdiagramm für unterschiedliche Kantenbearbeitungszustände, Grundwerkstoff gekerbtes Hutprofil: DP 1000

Wie im Fall des DP800 zeigt sich bei den Bauteilproben aus DP1000 ebenfalls ein Versagen im Freischnitt bei unterschiedlichen Kantenbearbeitungen, welches von der Kante ausgehend in den Grundwerkstoff verläuft, Abbildung 6.76.



Abbildung 6.76: Anriss im Bereich des lasergeschnittenen Freischnittes, am Beispiel DP1000

Abbildung 6.77 zeigt die Bruchfläche einer lasergeschnittenen Kante des Freischnittes eines DP1000 nach der zyklischen Bauteilprüfung. Obwohl auch ein Schweißspritzer im Bereich des Anriss gefunden werden konnte, ist ein Rissausgang von der lasergeschnittenen Oberfläche zu erkennen.

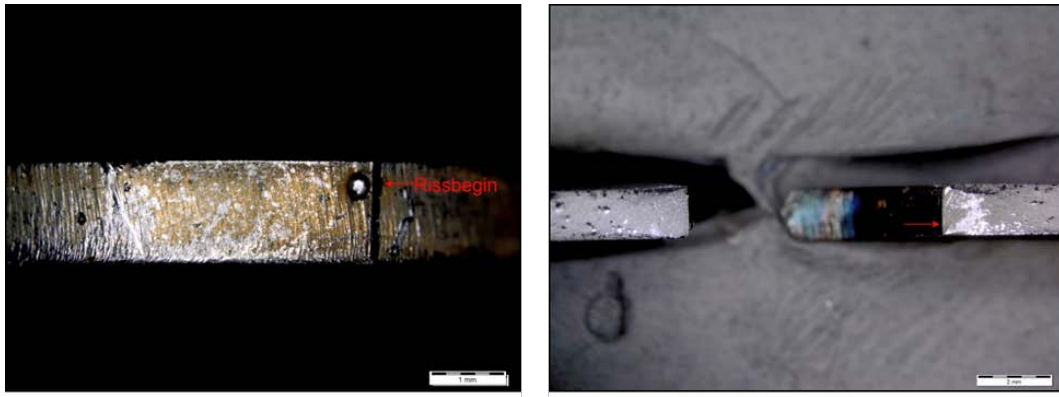


Abbildung 6.77: Bruchfläche der lasergeschnittenen Kante, Grundwerkstoff: DP1000

## 7 Diskussion der Versuchsergebnisse

### 7.1 Quasistatischer Zugversuch

#### 7.1.1 Ungekerbte Flachproben

Um den Einfluss des Kantenzustands auf die Zugfestigkeit der verschiedenen Werkstoffe zu untersuchen, sind in Abbildung 7.1 die Werte der Zugfestigkeit aus Tabelle 6.26 in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands aufgetragen. Es lässt sich feststellen, dass das Laserstrahlschneiden und Scherschneiden keinen nennenswerten Einfluss auf die Zugfestigkeit der verschiedenen Werkstoffe hat. Gegenüber dem Referenzzustand, liegt die Zu- oder Abnahme der Zugfestigkeit bei den verschiedenen Kantenzuständen bei unter 3 %.

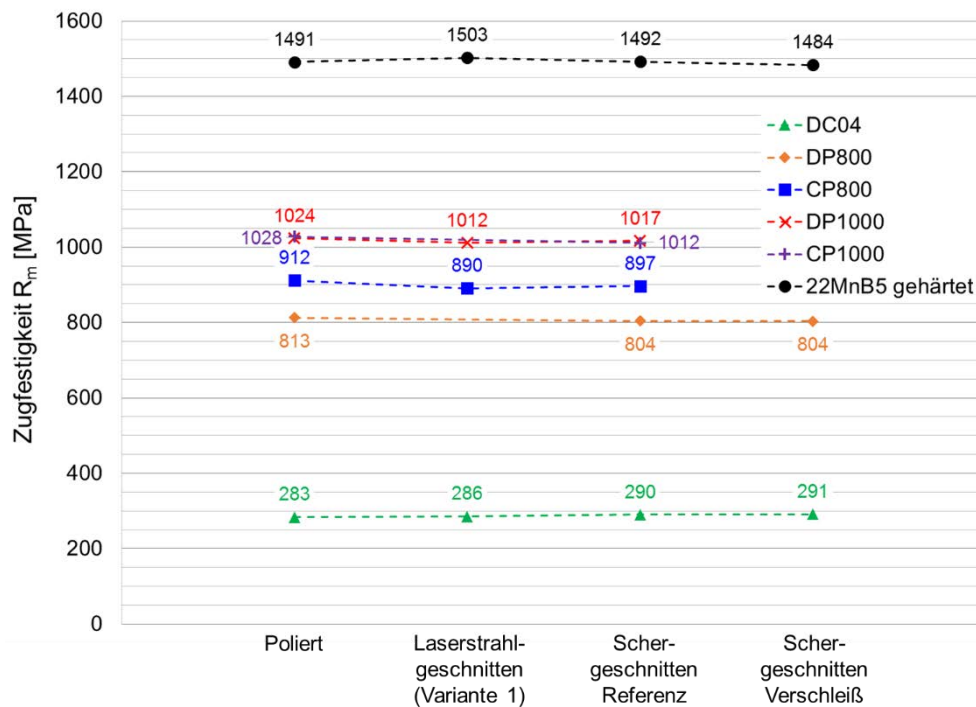


Abbildung 7.1: Einfluss des Kantenzustands auf die Zugfestigkeit ungekerbter Flachproben

Bei Betrachtung der Dehngrenze in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands in Abbildung 7.2 fällt auf, dass die Dehngrenze des DC04, des DP1000 und des gehärteten 22MnB5 durch das Laserstrahlschneiden und Scherschneiden im Vergleich zum Referenzzustand zunimmt. Am deutlichsten ist dieser Effekt bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP1000 festzustellen. Erklären lässt sich das mit der Zunahme der Dehngrenze des Randzonengefüges aufgrund der Kaltverfestigung beim Scherschneiden beziehungsweise der Wärmebehandlung beim Laserstrahlschneiden, siehe Kapitel 6.1.2 und 6.1.3. Bei den laserstrahl- und schergeschnittenen Proben aus DP800, CP800 und CP1000, deren Randzonen zum Teil erheblich aufgehärtet beziehungsweise verfestigt sind gegenüber dem Grundgefüge, ist in Abbildung 7.2 hingegen kei-

ne Zunahme der Dehngrenze zu beobachten. Die Dehngrenze des DP800 ändert sich nur geringfügig gegenüber den Proben mit polierten Kanten. Die Dehngrenze des CP800 und CP1000 fällt bei den laserstrahl- und schergeschnittenen Proben im Mittel deutlich ab im Vergleich zu den Proben mit polierten Kanten. Des Weiteren lässt sich in Tabelle 6.26 eine relativ starke Streuung der Versuchsergebnisse bei der Feststellung der Dehngrenze beobachten. Der beschriebene Kanteneinfluss auf die Dehngrenze geht somit größtenteils im Streuband unter. Dementsprechend ist für die Dehngrenze der Werkstoffe kein einheitlicher und eindeutiger Einfluss durch den Kantenzustand feststellbar.

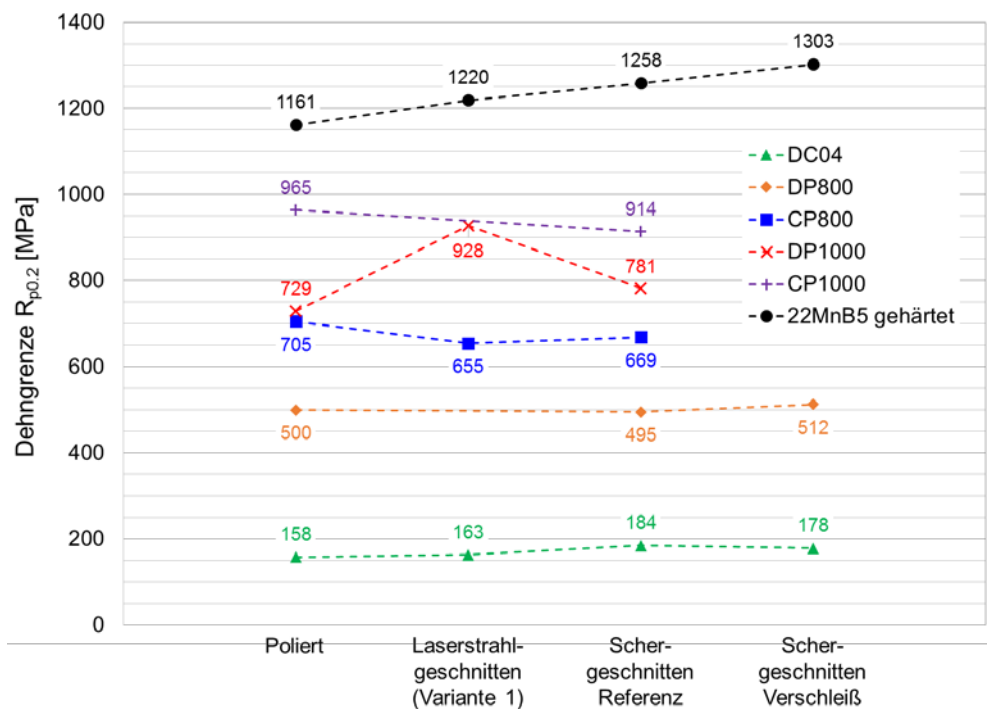


Abbildung 7.2: Einfluss des Kantenzustands auf die Dehngrenze ungekerbter Flachproben

In Abbildung 7.3 ist die Gleichmaßdehnung der ungekerbten Proben in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands dargestellt. Wie man feststellen kann, wird die Gleichmaßdehnung durch den Kantenzustand nur geringfügig beeinflusst. Tendenziell ist die Gleichmaßdehnung der laserstrahl- und schergeschnittenen Proben etwas kleiner als die der Proben mit polierten Kanten. Eine Ausnahme stellen die laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP1000 dar. In diesem Fall ist durch das Laserstrahlschneiden ein deutlicher Abfall der Gleichmaßdehnung gegenüber den Proben mit polierten Kanten festzustellen.

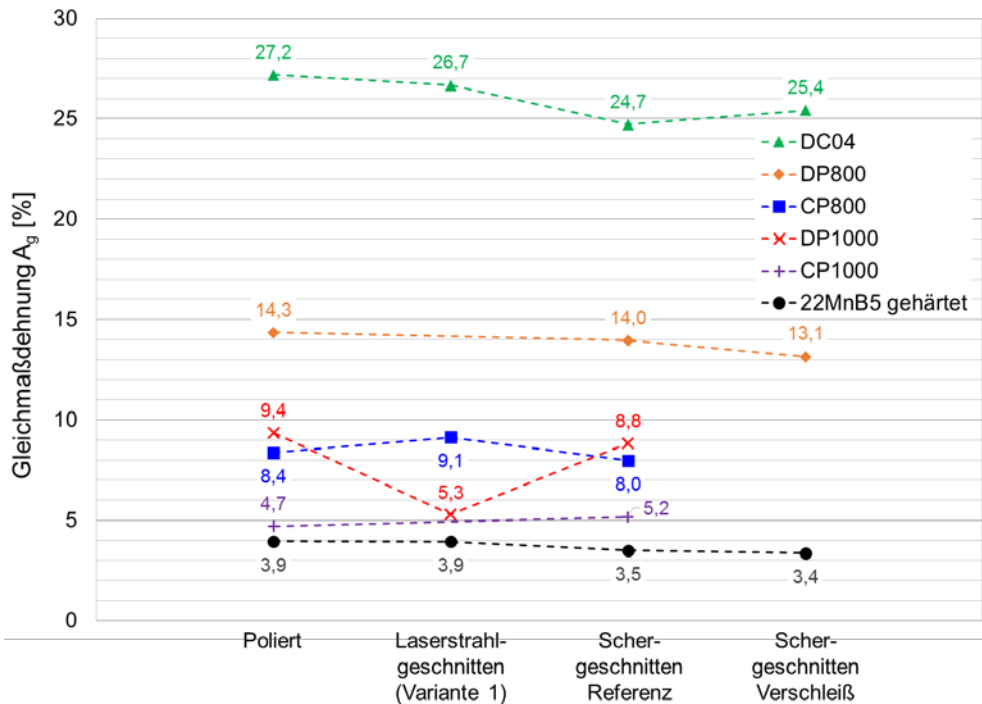


Abbildung 7.3: Einfluss des Kantenzustands auf die Gleichmaßdehnung ungekerbter Flachproben

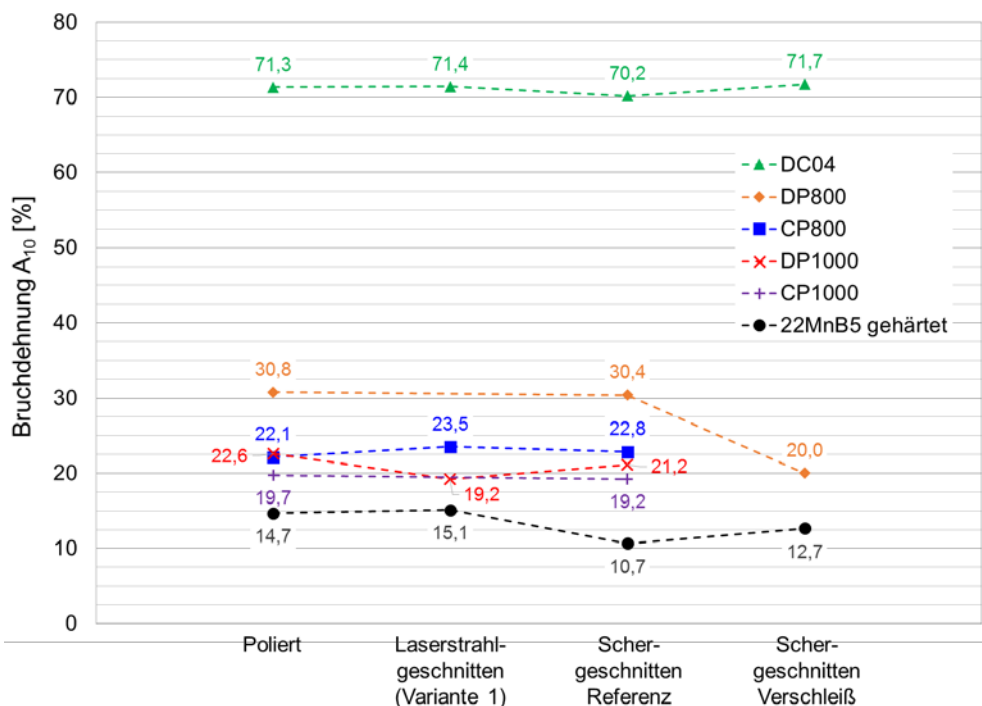


Abbildung 7.4: Einfluss des Kantenzustands auf die Bruchdehnung ungekerbter Flachproben

Durch die Kaltverfestigung beim Scherschneiden wird die Bruchdehnung der Randzone bei den schergeschnittenen Proben gegenüber der Bruchdehnung des Grundgefüges herabgesetzt. Daher wird erwartet, dass die Bruchdehnung der schergeschnittenen Proben kleiner ist als bei den Proben mit polierten Kanten. In Abbildung 7.4 ist jedoch nur vereinzelt bei den Proben aus DP800 und 22MnB5 ein Abfall der Bruchdehnung bei den schergeschnittenen Proben feststell-

bar. Am deutlichsten ist dieser Abfall bei den Proben aus DP800 festzustellen, die mit der Scherschneidstrategie Verschleiß hergestellt wurden. Bei den anderen Werkstoffen ist kein signifikanter Kanteneinfluss auf die Bruchdehnung zu erkennen.

Ein einheitlich auftretender Kanteneinfluss auf die mechanisch-technologischen Kennwerte, welcher mit den Zustandsänderungen in der Randzone begründbar ist, kann an den Zugversuchsergebnissen der ungekerbten Flachproben aus den verschiedenen Werkstoffen somit nicht festgestellt werden.

### 7.1.2 Gekerbte Flachproben

In Abbildung 7.5 ist die Kerbzugfestigkeit der gekerbten Flachproben mit den Kerbformzahlen  $K_t = 2,5$  und  $4,6$  in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands dargestellt. Die Werte der Kerbzugfestigkeit wurden Tabelle 6.27 entnommen.

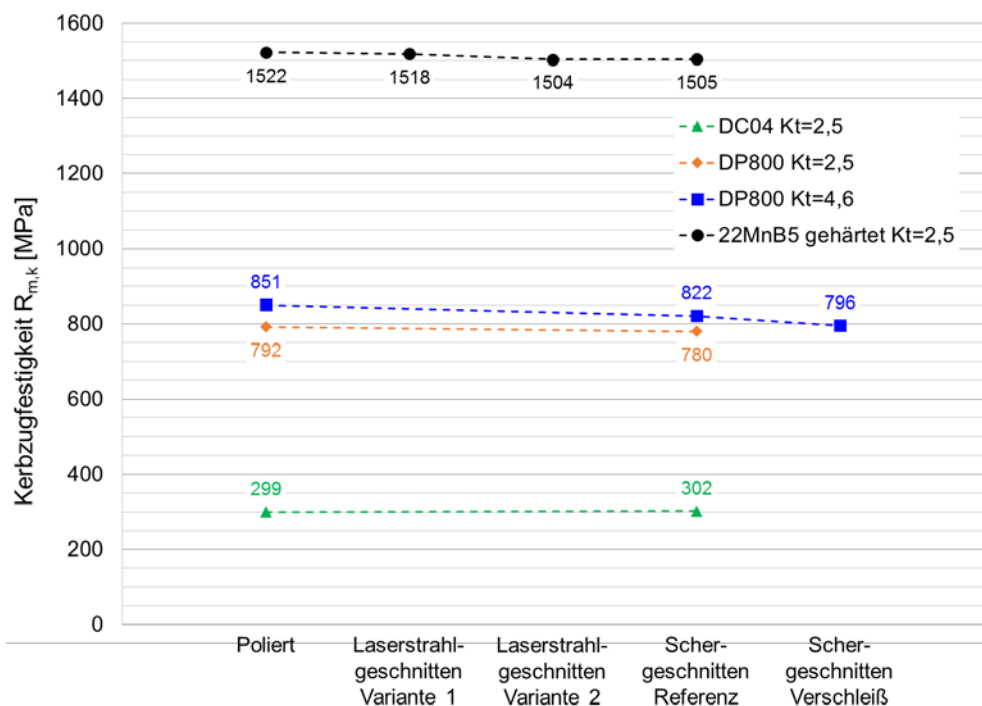


Abbildung 7.5: Einfluss des Kantenzustands auf die Kerbzugfestigkeit gekerbter Flachproben

Bei den Proben aus DC04 und 22MnB5 ist nahezu kein Einfluss durch den Kantenzustand auf die Kerbzugfestigkeit feststellbar. Bei den schergeschnittenen Proben aus DP800 ist hingegen ein Abfall der Kerbzugfestigkeit gegenüber den Proben mit polierten Kanten zu beobachten. Am deutlichsten ist dies an den scharf gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  zu erkennen. Die höhere Kerbzugfestigkeit von den Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  gegenüber den Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  kann damit begründet werden, dass die Querdehnungsbehinderung im Kerbgrund mit steigender Kerbschärfe zunimmt.



In Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 ist die Brucharbeit und der plastische Anteil der Brucharbeit der gekerbten Proben in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands dargestellt. In beiden Diagrammen ist bei den schergeschnittenen Proben aus DP800 jeweils eine Abnahme der Brucharbeit beziehungsweise des plastischen Anteils der Brucharbeit feststellbar. Diese Abnahme des Umformungsvermögens lässt sich mit der Kaltverfestigung der Randzone aufgrund des Scherschneidens begründen. Da das Umformvermögen der kaltverfestigten Randzone kleiner ist als das Umformvermögen des Grundgefüges, tritt bei den schergeschnittenen Proben das Spröbruchversagen, ausgehend von der Schnittkante, bei einer geringeren Arbeitsaufnahme statt, als bei den Proben mit polierten Kanten.

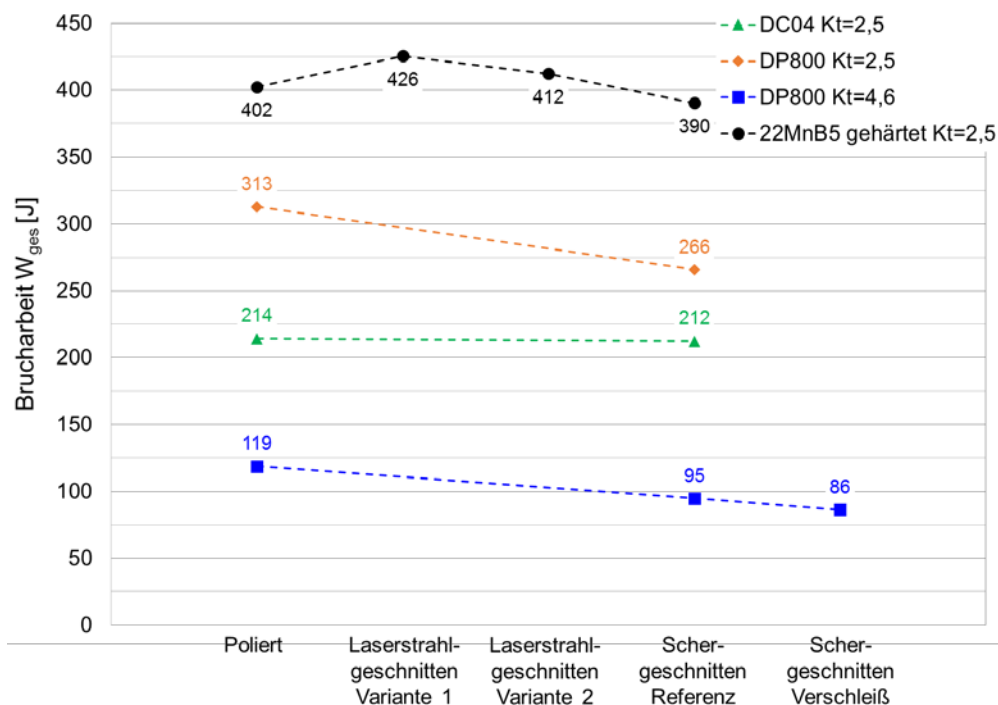


Abbildung 7.6: Einfluss des Kantenzustands auf die Brucharbeit gekerbter Flachproben

Bei den schergeschnittenen Proben aus DC04 und 22MnB5 ist solch eine Abnahme der Brucharbeit und des plastischen Anteils der Brucharbeit nicht feststellbar, beziehungsweise fällt deutlich geringer aus. Im Fall der DC04-Proben lässt sich das mit der sehr hohen Zähigkeit des Werkstoffs erklären. Ist die Umformbarkeit der Randzone erreicht und es entsteht ein Anriss, so kommt es nicht wie bei den DP800-Proben zum Spröbruchversagen der Probe, sondern lediglich die Randzone reißt ein und das umgebende Probenmaterial wird weiter plastisch verformt. Bei den schergeschnittenen Proben aus 22MnB5 wurde in Kapitel 6.1.3 eine deutlich geringere Kaltverfestigung der Randzone gegenüber dem Grundgefüge festgestellt als bei den Proben aus DP800. Somit ist auch so gut wie keine Abnahme der Brucharbeit, beziehungsweise des plastischen Anteils der Brucharbeit, in Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 gegenüber den Proben mit polierten Kanten feststellbar.

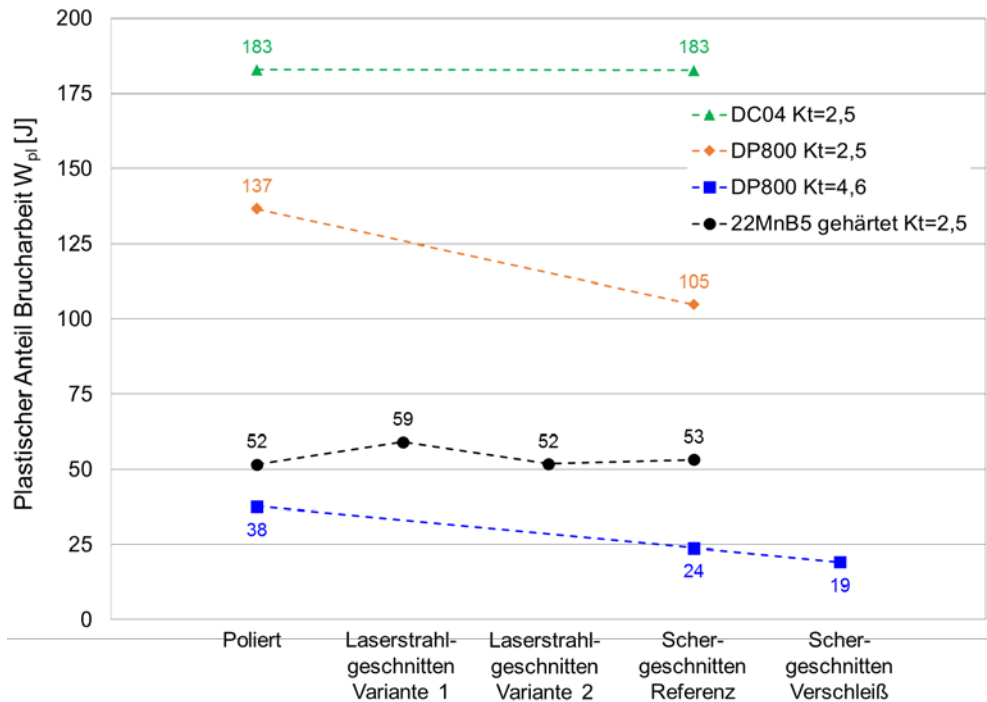


Abbildung 7.7: Einfluss des Kantenzustands auf den plastischen Anteil der Brucharbeit gekerbter Flachproben

Im Gegensatz zu den ungekerbten Proben ist an den Zugversuchsergebnissen der gekerbten Proben ein deutlicher Kanteneinfluss feststellbar. Das lässt sich damit begründen, dass bei den gekerbten Proben, aufgrund der geometrisch bedingten Spannungsüberhöhung die höchstbeanspruchte Stelle im Kerbgrund im Bereich der Randzone liegt. Das bedeutet, dass die Festigkeit und Umformbarkeit der Proben vom Zustand der Randzone bestimmt wird. Bei einer homogenen Spannungsverteilung über den Querschnitt wie bei den ungekerbten Proben, wird die Festigkeit und Umformbarkeit der Proben hingegen vom Zustand des Grundgefüges bestimmt, das den deutlich größeren Anteil am Probenquerschnitt einnimmt und gleich hoch beansprucht wird wie das Randzonengefüge. Dennoch konnte auch bei den gekerbten Proben aus den verschiedenen Werkstoffen kein einheitlicher Kanteneinfluss auf die Kennwerte aus dem Kerbzugversuch in Tabelle 6.26 festgestellt werden.

## 7.2 Einfluss der Kantenbearbeitung auf das Schwingfestigkeitsverhalten

### 7.2.1 DC04

Die Ergebnisse aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an den ungekerbten Flachproben aus DC04 mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten in Abbildung 6.37 zeigen, dass im Zeitfestigkeitsbereich kein, beziehungsweise nur ein sehr geringer Einfluss durch die Kantenbearbeitung auftritt. Die Zeitfestigkeitsgeraden der Proben mit polierten und laserstrahlgeschnittenen Kanten verlaufen nahezu deckungsgleich. Bei den schergeschnittenen Proben wird ein Abfall der Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich von ca. 2 % gegenüber dem polierten Kantenzustand festgestellt. Aufgrund des flachen Verlaufs der Zeitfestigkeitsgeraden entspricht das nahezu einer Halbierung der Anrisslebensdauer.

Bei den Versuchsergebnissen der gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  in Abbildung 6.38, tritt ein größerer Einfluss durch den Kantenzustand auf die Schwingfestigkeit auf als bei den ungekerbten Proben. Der in Tabelle 6.31 ermittelte Abfall der Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich beträgt bei den laserstrahlgeschnittenen Proben ca. 9 % und bei den schergeschnittenen Proben ca. 7 %.

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus den dehnungskontrollierten Versuchen in Abbildung 6.51 ist mit zunehmender Dehnungsamplitude ein steigender Einfluss durch die Kantenbearbeitung feststellbar. So fällt die ertragbare Gesamtdehnungsamplitude der schergeschnittenen Proben im LCF-Bereich bei  $10^3$  Schwingspielen um ca. 50 % ab, siehe Tabelle 6.44. Mit zunehmender Schwingspielzahl nähern sich die Dehnungswöhlerlinien der schergeschnittenen Proben dem Referenzzustand an. So ist im HCF-Bereich bei  $5 \times 10^5$  Schwingspielen, wie bei den spannungskontrollierten Versuchen an den ungekerbten Proben, kein Einfluss durch den Kantenzustand feststellbar. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben fällt dieser Effekt des zunehmenden Kanteneinfluss mit steigender Dehnungsamplitude deutlich geringer aus.

Mit den Ergebnissen aus den dehnungskontrollierten Versuchen lässt sich auch der höhere Kanteneinfluss bei den gekerbten Proben unter spannungskontrollierter Beanspruchung erklären. Die örtlichen Dehnungsamplituden im Kerbgrund der Proben liegen über den Dehnungsamplituden, die unter spannungskontrollierter Beanspruchung an den ungekerbten Proben auftreten. Nach den Ergebnissen der dehnungskontrollierten Versuche ist mit zunehmender Dehnungsamplitude ein steigender Einfluss durch die Kantenbearbeitung feststellbar.

Der geringe Kanteneinfluss im HCF-Bereich beziehungsweise im Zeitfestigkeitsbereich unter nahezu rein elastischer Probenbeanspruchung ist erwartungsgemäß und lässt sich mit der Kerbempfindlichkeit des DC04 aufgrund seiner hohen Duktilität erklären, siehe Kapitel 3.2.1. Um

den unerwarteten Abfall der Schwingfestigkeit im LCF-Bereich erklären zu können, müssen die Ergebnisse der Rissausgangsortanalyse in Kapitel 6.5.1 und der Randzonencharakterisierung in Kapitel 6.1 betrachtet werden. Nach der Rissausgangsortanalyse geht der Ermüdungsriss bei den Proben mit polierten Kanten von der Walzoberfläche aus. Bei den laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben liegt der Rissausgangsort an der Kantenfläche. Somit ist eindeutig, dass der Abfall der Schwingfestigkeit im LCF-Bereich durch den Zustand der Randzone infolge der Probenfertigung verursacht wird. Die Randzonen der laserstrahl- und schergeschnittenen Proben unterscheiden sich von den Proben mit polierter Kante durch ein härteres Randzonengefüge. Im Fall der schergeschnittenen Proben außerdem durch eine deutlich höhere Oberflächenrauheit an der Bruchfläche der Schnittkante. Der Einfluss durch die Oberflächenrauheit ist beim DC04, wie bereits erwähnt, vernachlässigbar. Bei den hohen plastischen Dehnungsanteilen im LCF-Bereich, bis hin zur quasistatischen Festigkeit, ist ebenfalls kein Einfluss durch die Oberflächenrauheit zu erwarten, siehe Kapitel 3.2.3. Bei der Probenfertigung in die Randzone eingebrachte Eigenspannungen würden sich bei den hohen Plastifizierungen im LCF-Bereich bereits nach wenigen Schwingspielen abbauen und können somit auch nicht die Ursache für den Schwingfestigkeitsabfall sein. Demnach müssen die Kaltverfestigungen, beziehungsweise der aufgehärtete Gefügestand infolge der Wärmebehandlung die Ursache für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich sein. Eine weitere Erklärung dafür ist, dass die Lage der plastischen Geraden von der Duktilität des Werkstoffs abhängig ist. Die zyklischen Kennwerte, welche die plastische Gerade beschreiben, werden daher auch als Duktilitätskoeffizient und Duktilitätsexponent bezeichnet. Die Duktilität der Randzone wird durch die Aufhärtung infolge des Laserstrahl- oder Scherschneidens jedoch stark herabgesetzt. Dieser Abfall der Duktilität in der Randzone hat zur Folge, dass die plastische Gerade zu geringeren Festigkeiten verschoben wird, wie an den Versuchsergebnissen in Abbildung 6.51 deutlich zu erkennen ist, und ist somit die Ursache für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich.

Vergleicht man den Verlauf der zyklischen  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve der Proben mit polierten Kanten in Abbildung 6.52 mit dem Verlauf der Erstbelastungskurve, lässt sich feststellen, dass der DC04 je nach Dehnungsamplitude entweder zyklisch entfestigt oder verfestigt. Zyklische Entfestigung tritt bei Dehnungsamplituden  $\epsilon_a < 0,4 \%$  auf. Zyklische Verfestigung bei Dehnungsamplituden  $\epsilon_a \geq 0,4 \%$ . Des Weiteren fällt auf, dass die Versuchspunkte und zyklischen  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurven der schergeschnittenen Proben bei hohen Dehnungsamplituden deutlich niedrigere Festigkeiten aufweisen im Vergleich zu den Proben mit polierten Kanten. Das ist entgegen der Erwartungen, wonach der Oberflächenzustand keinen Einfluss auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve hat [11], [62]. Eine Erklärung dafür liefern die Wechselverformungskurven aus den dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen. In Abbildung 7.8 sind exemplarisch die Wechselverformungskurven von je einer Probe mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und

schergeschnittenen Kanten aus einem Versuchslauf mit einer Dehnungsamplitude von  $\varepsilon_a = 0,8\%$  abgebildet. Betrachtet man den Verlauf der Wechselverformungskurve von der Probe mit polierten Kanten, so fällt auf, dass kein stabilisierter Bereich auftritt, wie es in Abbildung 2.8 schematisch dargestellt wird. Stattdessen verfestigt der Werkstoff kontinuierlich bis die Probe versagt. Aufgrund der Vorschädigung an der Kante durch das Scherschneiden versagen die schergeschnittenen Proben in Abbildung 7.8 bereits bei niedrigeren Festigkeitswerten als die Probe mit polierter Kante. Daraus resultiert, dass die Versuchspunkte und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der schergeschnittenen Proben bei hohen Dehnungsamplituden deutlich niedrigere Festigkeiten aufweisen im Vergleich zu den Proben mit polierten Kanten.

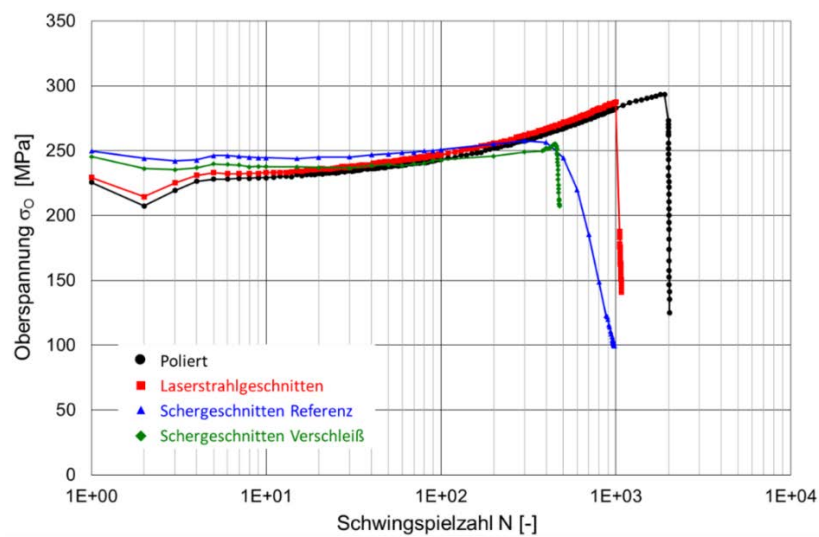


Abbildung 7.8: Wechselverformungskurven aus dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Flachproben aus DC04

## 7.2.2 DP800

Den Versuchsergebnissen der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche an ungekerbten und gekerbten ( $K_t = 2,5$ ) Flachproben aus DP800 in Abbildung 6.39 und Abbildung 6.40 ist zu entnehmen, dass das Laserstrahlschneiden nahezu keinen Einfluss auf die Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich hat. Während bei den ungekerbten Proben im Übergangsbereich zwischen Zeit- und Dauerfestigkeit ein geringer Schwingfestigkeitsabfall der laserstrahlgeschnittenen Proben gegenüber den Proben mit polierten Kanten auftritt, verlaufen die Zeitfestigkeitsgeraden bei den gekerbten Proben deckungsgleich. Die Rissausgangsortanalyse der laserstrahlgeschnittenen Proben in Kapitel 6.5.2 hat ergeben, dass der Ermüdungsriss unter spannungskontrollierter Beanspruchung bei beiden Probengeometrie nicht von der Kante, sondern wie bei den polierten Proben von der Walzoberfläche ausgeht. Das bedeutet, dass die gehärtete martensitische Randzone, die durch das Laserstrahlschneiden entsteht (siehe Kapitel 6.1.2), eine größere Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsgebiet besitzt als die Walzoberfläche des DP800.

Dasselbe Schwingfestigkeitsverhalten zeigt sich bei dehnungskontrollierter Beanspruchung der ungekerbten laserstrahlgeschnittenen Proben im HCF-Bereich in Abbildung 6.53. Die Versuchspunkte liegen nahezu deckungsgleich mit den Versuchspunkten der Proben mit polierten Kanten. Auch hier liegt der Rissausgangsort bei beiden Probenvarianten an der Walzoberfläche außerhalb der Randzone. Dementsprechend nähert sich die Dehnungswöhlerlinie der laserstrahlgeschnittenen Proben mit steigender Schwingzahl an die Dehnungswöhlerlinie der Proben mit polierten Kanten an. Im LCF-Bereich bei einer Dehnungsamplitude von  $\varepsilon_a > 0,4\%$  versagen die laserstrahlgeschnittenen Proben bei deutlich geringeren Schwingzahlen als die Proben mit polierten Kanten. Der Ermüdungsriss geht nicht mehr von der Walzoberfläche aus, sondern von der Kantenfläche. Somit liegt im LCF-Bereich ein Kanteneinfluss auf die Schwingfestigkeit vor, der dafür sorgt, dass die Dehnungswöhlerlinien der Proben mit laserstrahlgeschnittenen und polierten Kanten mit zunehmender Dehnungsamplitude, beziehungsweise abnehmender Schwingzahl, auseinanderlaufen.

Um den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie und den Wechsel des Rissausgangsorts zu erklären, sind in Abbildung 7.9 schematisch die Dehnungswöhlerlinien der Randzone aus dem martensitischen Gefüge und des Grundwerkstoffs DP800 mit Walzoberfläche dargestellt.

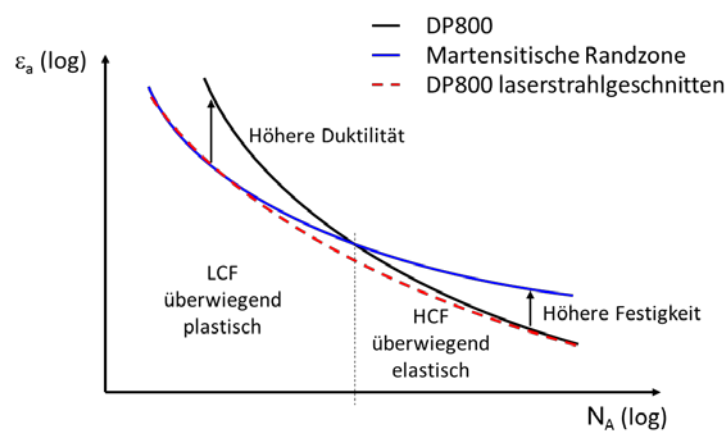


Abbildung 7.9: Einfluss der Duktilität und der Festigkeit auf den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie, schematisch nach [106]

Die beiden Dehnungswöhlerlinien überschneiden sich im Übergang vom LCF- in den HCF-Bereich. Im LCF-Bereich verläuft die Dehnungswöhlerlinie der martensitischen Randzone aufgrund der geringeren Duktilität unterhalb der Dehnungswöhlerlinie des Grundwerkstoffs. Im HCF-Bereich besitzt der Grundwerkstoff aufgrund der niedrigeren Festigkeit die geringere Schwingfestigkeit. Da an den laserstrahlgeschnittenen Proben beide Gefügestände auftreten und der Ermüdungsriss immer von dem Bereich mit der geringeren Schwingfestigkeit ausgeht, nähert sich die zugehörige Dehnungswöhlerlinie im LCF- und HCF-Bereich jeweils an die Dehnungswöhlerlinie mit der geringeren Schwingfestigkeit an, wie in Abbildung 7.9 dargestellt.

Die Versuchsergebnisse der ungekerbten Proben mit schergeschnittenen Kanten in Abbildung 6.39, weisen einen deutlichen Kanteneinfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten unter spannungskontrollierter Beanspruchung auf. Bei den Proben, die mit der Schneidstrategie Referenz hergestellt wurden, wird im Zeitfestigkeitsgebiet ein Schwingfestigkeitsabfall von ca. 10 % gegenüber den Proben mit polierten Kanten gemessen. Der Schwingfestigkeitsabfall der Proben, welche mit der Schneidstrategie Verschleiß hergestellt wurden, ist mit ca. 14 % etwas größer. Zudem verlaufen die Zeitfestigkeitsgeraden der beiden Scherschneidvarianten steiler als die Zeitfestigkeitsgerade der Proben mit polierten Kanten und knicken bei geringeren Schwingspielzahlen ab in die Dauerfestigkeit, siehe Tabelle 6.32. Die schergeschnittenen Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  in Abbildung 6.40 zeigen ein anderes Schwingfestigkeitsverhalten bezüglich des Kanteneinflusses als die ungekerbten Proben. Während die Versuchsergebnisse der Proben mit der Schneidstrategie Referenz einen Abfall der Schwingfestigkeit zwischen ungefähr 9 und 16 % gegenüber den Proben mit polierten Kanten aufweisen (siehe Tabelle 6.33), liegt der Schwingfestigkeitsabfall bei den Proben der Scherschneidstrategie Verschleiß bei ca. 3 %.

Interessanterweise ist bei den scharf gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  kein Einfluss durch das Scherschneiden auf die Schwingfestigkeit feststellbar. Die Wöhlerlinie der Proben mit polierten Kanten verläuft in Abbildung 6.41 deckungsgleich mit den Wöhlerlinien der Scherschneidvarianten Referenz und Verschleiß. Das entspricht der Erwartung, wonach der Oberflächeneinfluss mit zunehmender Kerbschärfe abnimmt [10]. In diesem Fall wird das Schwingfestigkeitsverhalten durch die dominierende Makrokerbe bestimmt.

Bei Betrachtung der Dehnungswöhlerlinien der schergeschnittenen Proben in Abbildung 6.53 ist ein nahezu konstanter Abfall der Schwingfestigkeit im LCF- und HCF-Bereich gegenüber dem Referenzzustand mit polierten Kanten feststellbar. Der Abfall der Schwingfestigkeit im HCF-Bereich entspricht dem Abfall der Schwingfestigkeit unter spannungskontrollierter Beanspruchung. Bei beiden Probenvarianten liegt der Rissausgangsort bei allen Versuchen an der Bruchfläche der Schnittkante. Es tritt also kein Wechsel des Rissausgangsorts auf wie bei den laserstrahlgeschnittenen Proben. Betrachtet man die Versuchsergebnisse der Proben, welche mit der Schneidstrategie Verschleiß hergestellt wurden, so fällt auf, dass die Versuchspunkte durch die Dehnungswöhlerlinie nur mangelhaft approximiert werden, beispielsweise im Vergleich zu den Versuchsergebnisse der Proben mit polierten Kanten. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass im LCF- und HCF-Bereich unterschiedliche Ursachen für das zyklische Versagen verantwortlich sind. Um dies nachzuweisen, wurden in Abbildung 7.10 die Versuchsergebnisse der Proben im LCF- und HCF-Bereich getrennt ausgewertet und zusammen mit den Versuchsergebnissen der polierten Proben im Wöhlerdiagramm dargestellt. Die resultierende Dehnungswöhlerlinie der Proben aus dem LCF-Bereich nähert sich mit steigender Schwingspielzahl dem Referenzzustand an und

zeigt damit einen ähnlichen Verlauf wie die Dehnungswöhlerlinie der laserstrahlgeschnittenen Proben. Die Dehnungswöhlerlinie der Proben aus dem HCF-Bereich hingegen entfernt sich mit zunehmender Schwingspielzahl von der Referenzwöhlerlinie. Mit abnehmender Schwingspielzahl und zunehmender Dehnungsamplitude ist wiederum eine Annäherung an den Referenzzustand feststellbar. Dieses Ergebnis der getrennten Auswertung der Versuche im LCF- und HCF-Bereich ist ein weiteres Zeichen dafür, dass im LCF-Bereich eine Abnahme der Duktilität in der Randzone für den Abfall der Schwingfestigkeit verantwortlich ist. In diesem Fall resultiert die Abnahme der Duktilität aus der Kaltverfestigung beim Scherschneiden. Der Schwingfestigkeitsabfall im HCF-Bereich lässt sich hingegen mit der Oberflächenrauheit an der Bruchfläche der Schnittkante begründen. Dass trotz unterschiedlicher Versagensmechanismen bei den Proben kein Wechsel des Rissausgangsorts im LCF- und HCF-Bereich auftritt, ist damit zu begründen, dass die Zustände die jeweils zum Versagen führen im selben Probenbereich, an der Bruchfläche der Schnittkante, auftreten.

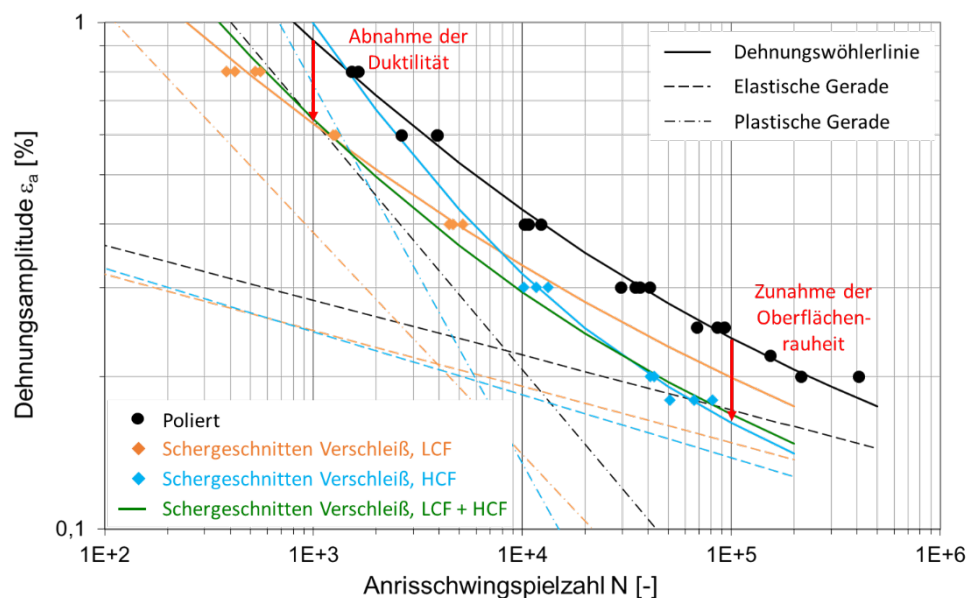


Abbildung 7.10: Getrennte Auswertung der Versuchsergebnisse im LCF- und HCF-Bereich von schergeschnittenen (Verschleiß) Proben aus DP800 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung

Vergleicht man den Verlauf der zyklischen  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurve der Proben mit polierten Kanten in Abbildung 6.54 mit der Erstbelastungskurve lässt sich feststellen, dass der DP800 bei niedrigen Dehnungsamplituden  $\varepsilon_a < 0,6\%$  zyklisch entfestigt und sich bei hohen Dehnungsamplituden  $\varepsilon_a \geq 0,6\%$  neutral verhält, also weder zyklisch verfestigt noch entfestigt. Vergleicht man die  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurven der laserstrahl- und schergeschnittenen Proben mit der  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurven der polierten Proben so fällt auf, dass nur ein sehr geringer Kanteneinfluss festzustellen ist. Das entspricht der Erwartung, wonach der Oberflächenzustand keinen Einfluss auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve hat [11], [62].



### 7.2.2.1 Einfluss der Scherschneidparameter auf das Schwingfestigkeitsverhalten

Die unterschiedlichen Schwingfestigkeiten, die bei den schergeschnittenen Proben zwischen den Schneidstrategien Referenz und Verschleiß in Abbildung 6.39, Abbildung 6.40 und Abbildung 6.53 auftreten, zeigen dass die Wahl der Scherschneidparameter bei der Probenfertigung einen Einfluss auf deren Schwingfestigkeit hat. Um in Hinblick auf das Schwingfestigkeitsverhalten die optimale Scherschneidstrategie zu ermitteln, sind in Abbildung 6.42 und Abbildung 6.43 die Versuchsergebnisse aller schergeschnittenen Probenvarianten mit den Kerbformzahlen  $K_t = 1$  und  $2,5$  abgebildet. Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass bei den ungekerbten Proben mit der Schneidstrategie Glattschnitt die höchste Schwingfestigkeit erzielt wird. Die geringste Schwingfestigkeit weisen die Proben auf, die mit der Schneidstrategie Verschleiß hergestellt wurden. Bei den gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  wird mit den Schneidstrategien Glattschnitt und Verschleiß die höchste Schwingfestigkeit erzielt. Der Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten beträgt bei beiden Probenvarianten gerade einmal 2 %. Die niedrigste Schwingfestigkeit bei den gekerbten Proben ( $K_t = 2,5$ ) haben die Proben, welche mit der Schneidstrategie Beschichtung hergestellt wurden.

Der Vergleich zwischen dem Schwingfestigkeitsverhalten der ungekerbten und gekerbten Proben einer Schneidstrategie zeigt, dass die jeweilige Schneidstrategie bei einem offenen Schnitt (ungekerbt) eine andere Auswirkung auf die Schwingfestigkeit haben kann als bei einem geschlossenen Schnitt (gekerbt). Die Ursache liegt in der Entstehung von unterschiedlichen Kantenzuständen je nach Schneidverfahren, siehe Kapitel 3.3.2 und Kapitel 6.1.3.

Der Ermüdungsriss geht bei allen schergeschnittenen Proben von der Bruchfläche an der Schnittkante aus, siehe Tabelle 6.51. Die einzige Ausnahme stellen die gekerbten Proben dar, welche mit der Schneidstrategie Glattschnitt hergestellt wurden. Aufgrund des nahezu nicht vorhandenen Bruchflächenanteils (siehe Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16), liegt der Rissausgangsort nicht an der Bruchfläche, sondern am Kanteneinzug der Schnittkante. Verantwortlich für das Schwingfestigkeitsverhalten der Probe ist der Werkstoff- und Oberflächenzustand am Rissausgangsort. Daher wird im Folgenden untersucht, ob die ermittelte Schwingfestigkeit mit einer der gemessenen Größen, die den Zustand der Schnittkante beschreiben, korreliert. Dafür ist in Abbildung 7.11 die relative Schwingfestigkeit der ungekerbten und gekerbten schergeschnittenen Probenvarianten über der Rauheit am Versagensort aufgetragen. Die relative Schwingfestigkeit bezieht sich auf die Schwingfestigkeit der Proben mit polierten Kanten im Zeitfestigkeitsbereich bei  $10^5$  Schwingspielen. Im Fall der gekerbten Proben, die mit der Schneidstrategie Glattschnitt hergestellt wurden, bei welchen der Ermüdungsriss vom Kanteneinzug ausgeht, wird die mittlere Rautiefe an der Walzoberfläche als Rauheitsmaß verwendet.

Bei allen anderen Probenvarianten wird die mittlere Rautiefe der Bruchfläche verwendet. Die abgebildeten Rauheitswerte sind den Tabellen in Kapitel 6.1.4 zu entnehmen.

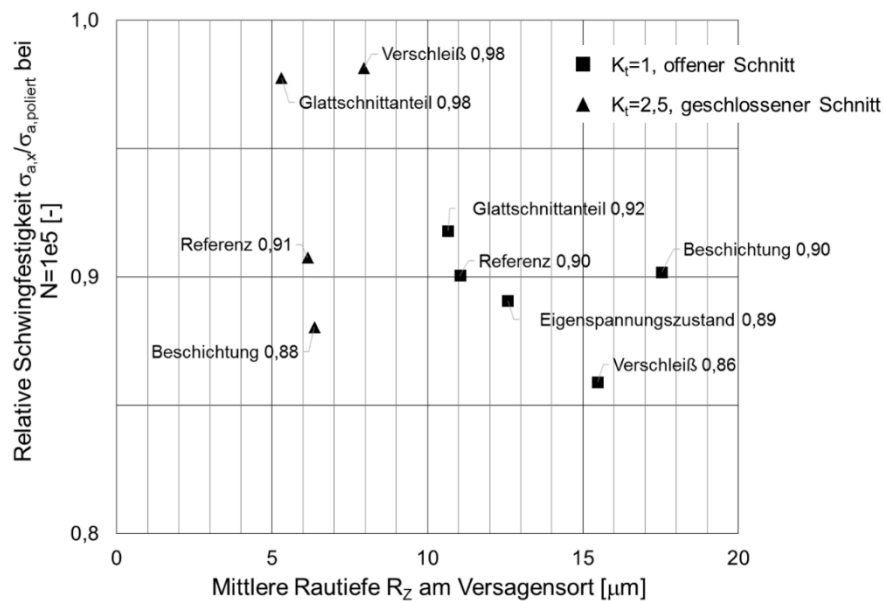


Abbildung 7.11: Einfluss der Rauheit auf die Schwingfestigkeit von schergeschnittenen Flachproben aus DP800

In Abbildung 7.11 ist zu erkennen, dass bei den ungekerbten Proben mit zunehmender Rauheit an der Bruchfläche die Schwingfestigkeit nahezu linear abnimmt. Eine Ausnahme stellen dabei die Proben dar, die mit der Schneidstrategie Beschichtung hergestellt wurden. Bei den gekerbten Proben hingegen ist keine Korrelation zwischen der Rauheit am Versagensort und der Schwingfestigkeit feststellbar. Auffällig ist, dass die an den gekerbten Proben gemessenen Rautiefen in Abbildung 7.11 alle kleiner sind, als die an den ungekerbten Proben gemessenen Rautiefen.

Im Rahmen der Randzonencharakterisierung wurden an den Schnittkanten außerdem Härtemessungen durchgeführt, um auf diese Weise die durch den Schneidprozess verursachten Kaltverfestigungen in der Randzone abbilden zu können, siehe Kapitel 6.1.3. Kaltverfestigungen in oberflächennahen Gefügebereichen beziehungsweise eine gesteigerte Oberflächenhärte können nach Kapitel 3.2.2 einen positiven Einfluss auf die Schwingfestigkeit haben. Um im Fall der schergeschnittenen Proben einen möglichen Einfluss der Härte auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen, ist in Abbildung 7.12 die relative Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich der schergeschnittenen Probenvarianten über der jeweils in der Randzone gemessenen maximalen Vickers-Härte aufgetragen. Die abgebildeten Härtewerte sind den Kapiteln 6.1.3.2 und 6.1.4 zu entnehmen.

Bei Betrachtung von Abbildung 7.12 ist beim Vergleich der ungekerbten und gekerbten Proben keine einheitliche Tendenz feststellbar. Bei den ungekerbten Proben ist mit zunehmender Härte

in der Randzone eine tendenziell abnehmende Schwingfestigkeit festzustellen. Während bei den gekerbten Proben die zwei Varianten mit der größten maximalen Härte auch die höchste Schwingfestigkeit besitzen. Dazu muss erwähnt werden, dass der Bereich, in welchem der maximale Härtewert gemessen wurde, nicht zwingend mit dem Ausgangsort des Ermüdungsrisses übereinstimmen muss. Dementsprechend ist es fraglich, ob mit dem maximal gemessenen Härtewert in der Randzone das Schwingfestigkeitsverhalten der schergeschnittenen Proben beschrieben werden kann.

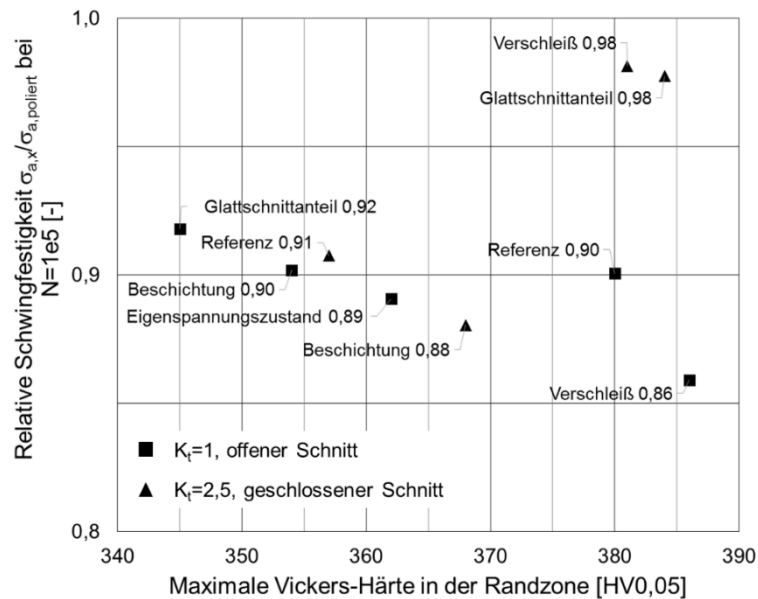


Abbildung 7.12: Einfluss der Härte auf die Schwingfestigkeit von schergeschnittenen Flachproben aus DP800

In Abbildung 7.13 sind daher die Härteplots der verschiedenen Probenvarianten aus Abbildung 7.12 für einen direkten Vergleich abgebildet. Bei den ungekerbten Proben ( $K_t = 1$ ) wird die höchste Schwingfestigkeit von der Probenvariante Glattschnitt erzielt deren Schnittkante sich durch eine sehr geringe Tiefe der Schereinflusszone, eine niedrige Maximalhärte und einen nahezu rechtwinkligen Schnittkantenverlauf gegenüber den anderen Probenvarianten hervorhebt. Eine geringe Tiefe der Schereinflusszone und ein nahezu rechtwinkliger Schnittkantenverlauf führt auch bei den gekerbten Proben ( $K_t = 2,5$ ) der Probenvariante Glattschnitt zu einer hohen Schwingfestigkeit.

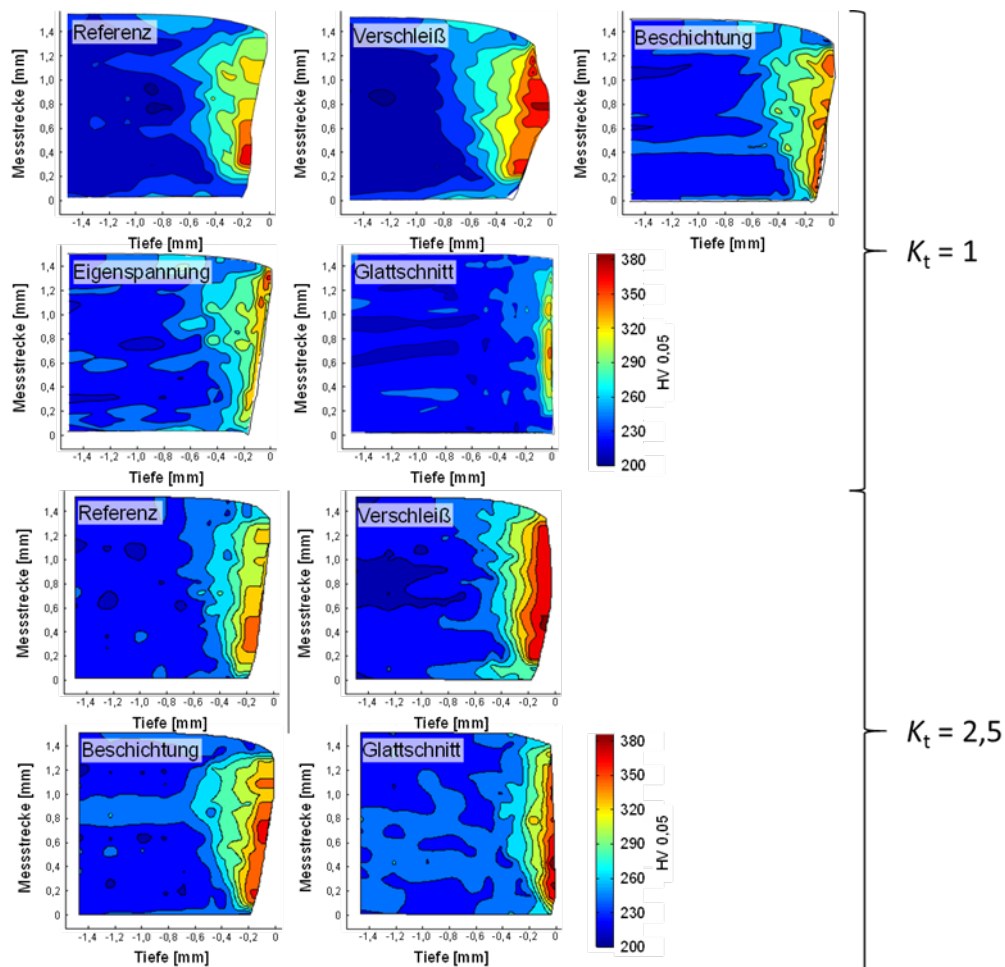


Abbildung 7.13: Aufhärtung der Schereinflusszone DP800, Kerbformzahl  $K_t = 1$  und  $2,5$

Des Weiteren kann erwartet werden, dass der Anteil der Glattschnitt- beziehungsweise der Bruchfläche an der Schnittkante einen Einfluss auf die Schwingfestigkeit hat. Nimmt der Glattschnittanteil zu und gleichzeitig der Bruchflächenanteil ab, so kann das aus statistischer Sicht zu einer Zunahme der Schwingfestigkeit führen, da der Flächenanteil, von welchem das Ermüdungsversagen ausgeht, abnimmt. Um dies zu überprüfen ist in Abbildung 7.14 die relative Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsbereich über dem Glattschnittanteil der schergeschnittenen Probenvarianten aufgetragen. Bei den ungekerbten Proben ist in Abbildung 7.14 kein Zusammenhang zwischen dem Glattschnittanteil und der Schwingfestigkeit feststellbar. Bei den gekerbten Proben besitzen die Varianten mit dem höchsten Glattschnittanteil an der Schnittkante auch die höchste Schwingfestigkeit.

Auffällig ist, dass sowohl bei den ungekerbten als auch den gekerbten Proben mit der Schneidstrategie Glattschnitt das beste Schwingfestigkeitsverhalten der schergeschnittenen Proben erzielt wird. Das erwünschte Ziel einer Maximierung des Glattschnittanteils wurde nur bei den gekerbten Proben erreicht. Bei der Herstellung der ungekerbten Proben mit dieser Schneidstrategie wird ein zweistufiger Schnitt mit einer sehr geringen Nachschneidzugabe verwendet, siehe Kapitel 4.3.3. Aufgrund der Vermutung, dass die geringe Nachschneidzugabe von

0,4 mm bei den ungekerbten Flachproben für das gute Schwingfestigkeitsverhalten verantwortlich ist, wurden in [107] weitere zweistufige Schneidstrategien bei der Herstellung von ungekerbten Flachproben aus DP800 angewendet und hinsichtlich des Schwingfestigkeitsverhaltens bewertet. Dabei hat sich herausgestellt, dass bei Anwendung der Schneidstrategie mit der kleinsten Nachschneidzugabe von 0,2 mm, der geringste Schwingfestigkeitsabfall von nur 3 % gegenüber dem Referenzzustand erzielt wird. Die Schnittkanten, welche mit dieser Schneidstrategie erzeugt wurden, weisen den geringsten maximalen Härtewert in der Randzone auf im Vergleich zu den Schnittkanten der übrigen Schneidstrategien. Außerdem ist der kaltverfestigte Gefügebereich ausgehend von der Schnittkantenfläche deutlich kleiner als bei den anderen Schneidstrategien.

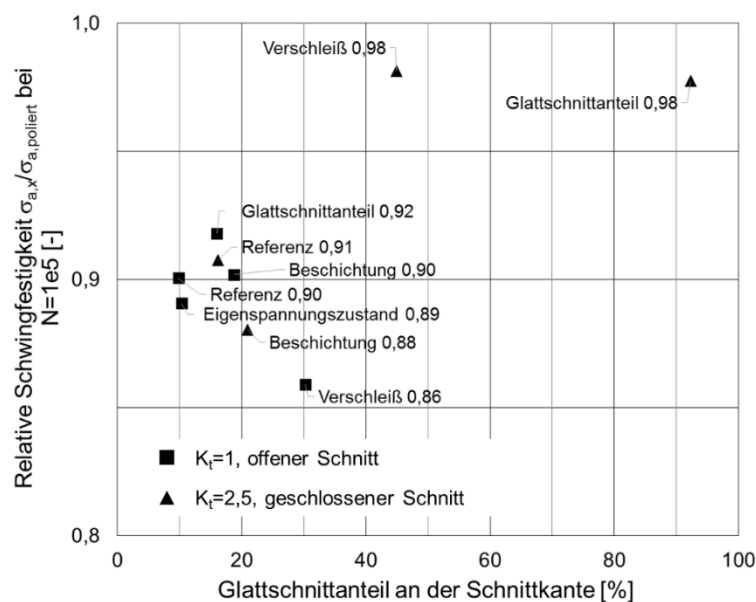


Abbildung 7.14: Einfluss des Glattschnittanteils auf die Schwingfestigkeit von schergeschnittenen Flachproben aus DP800

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich der Schwingfestigkeitseinfluss beim Scherschneiden nicht auf eine maßgebende Einflussgröße reduzieren lässt, sondern vielmehr eine günstige Kombination der verschiedenen Einflussgrößen anzustreben ist, um so den Schwingfestigkeitseinfluss zu minimieren. Dafür sollte ein Zustand an der Schnittkante angestrebt werden, welcher dem polierten Kantenzustand am ähnlichsten ist. So wird bei den vorliegenden Untersuchungen mit der folgenden Kombination der Zustandsgrößen an der Schnittkante das beste Schwingfestigkeitsverhalten erzielt:

- Geringe Tiefe des kaltverfestigten Gefügebereichs hinter der Schnittkante
- Rechtwinklige Schnittkante
- Maximierung des Glattschnittanteils.
- Geringe Oberflächenrauheit an der Bruchfläche

Dieser Zustand konnte mit der Schneidstrategie Glattschnittanteil sowohl im offenen als auch im geschlossenen Schnitt bei der Herstellung der ungekerbten und gekerbten Flachproben erzielt werden. Allgemein lässt sich feststellen, dass der geschlossene Schnitt durchschnittlich zu einem geringeren Abfall der Schwingfestigkeit gegenüber den Proben mit polierten Kanten führt als der offene Schnitt.

### 7.2.3 CP800

Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus CP800 ist unter spannungskontrollierter Beanspruchung ein deutlicher Kanteneinfluss auf die Schwingfestigkeit feststellbar, siehe Abbildung 6.44. Die Abnahme der Schwingfestigkeit beträgt im Zeitfestigkeitsbereich gegenüber den Proben mit polierten Kanten ca. 16 %. Wie bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP800 ist die Randzone der Proben gegenüber dem Grundgefüge deutlich aufgehärtet, siehe Kapitel 6.1.2. Der Ermüdungsriss bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus CP800 geht von fertigungsbedingten Einzelkerben an der Kantenfläche aus, siehe Kapitel 6.5.3. Das deutet daraufhin, dass diese Kerben einen Einfluss auf das Versuchsergebnis haben. Ein Vergleich mit dem Schwingfestigkeitsverhalten der laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP800 ist daher nicht möglich. Des Weiteren variiert der Kantenbearbeitungszustand der Proben je nach Anzahl und Geometrie der vorliegenden Kerben. Dies macht sich deutlich an der hohen Streuung der Versuchsergebnisse bemerkbar, siehe Tabelle 6.34.

Das Verhalten der laserstrahlgeschnittenen Proben aus CP800 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung in Abbildung 6.55 ist mit dem der Proben aus DP800 in Abbildung 6.53 vergleichbar. Die Dehnungswöhlerlinie der laserstrahlgeschnittenen Proben nähert sich mit steigender Schwingzahl im HCF-Bereich an die Dehnungswöhlerlinie der Proben mit polierter Kante an. Mit abnehmender Schwingzahl im LCF-Bereich liegt ein zunehmender Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierter Kante vor. Jedoch kommt es zu keinem Wechsel des Rissausgangsortes wie bei den Proben aus DP800. Der Ermüdungsriss geht, wie unter spannungskontrollierter Beanspruchung, von den fertigungsbedingten Einzelkerben an der Kantenfläche aus. Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse fällt auf, dass die Versuchspunkte durch die Dehnungswöhlerlinie nur mangelhaft approximiert werden. Im Gegensatz zu der Dehnungswöhlerlinie deuten die Versuchspunkte im HCF-Bereich auf einen Abfall der Schwingfestigkeit gegenüber dem Referenzzustand hin. Wird die Dehnungswöhlerlinie bei einer Lebensdauerabschätzung verwendet ist im HCF-Bereich daher mit einer nicht-konservativen Lebensdauervorhersage zu rechnen. Der zunehmende Abfall der Schwingfestigkeit im LCF-Bereich gegenüber den Proben mit polierter Kante lässt sich auch in diesem Fall mit der abnehmenden

Duktilität der Randzone aufgrund der fertigungsbedingten Aufhärtung gegenüber dem Grundgefüge erklären.

Die schergeschnittenen Proben aus CP800 zeigen in Abbildung 6.44 unter spannungskontrollierter Beanspruchung ebenfalls einen deutlichen Schwingfestigkeitsabfall im Zeitfestigkeitsbereich von 25 % gegenüber den Proben mit polierten Kanten. Der Abknickpunkt in den Dauerfestigkeitsbereich liegt außerdem bei einer deutlich kleineren Schwingspielzahl als bei den Proben mit laserstrahlgeschnittenen oder polierten Kanten.

Unter dehnungskontrollierter Beanspruchung ist in Abbildung 6.55 sowohl im LCF-Bereich als auch im HCF-Bereich ein signifikanter Schwingfestigkeitsabfall an den schergeschnittenen Proben gegenüber dem Referenzzustand feststellbar. Wie bei den schergeschnittenen (Verschleiß) Proben aus DP800 ist auch bei den schergeschnittenen Proben aus CP800 auffällig, dass die Versuchspunkte bei sehr hohen und sehr niedrigen Dehnungsamplituden durch die Dehnungswöhlerlinie nicht gut angenähert werden. Daher wird eine getrennte Auswertung der Versuchspunkte im LCF-Bereich und HCF-Bereich durchgeführt, siehe Abbildung 7.15. Die Dehnungswöhlerlinie der Versuchspunkte im LCF-Bereich nähert sich mit zunehmender Schwingspielzahl an den Referenzzustand an. Mit abnehmender Schwingspielzahl hingegen nimmt der Schwingfestigkeitsabfall zu. Umgekehrt verhält es sich mit der Dehnungswöhlerlinie der Versuchspunkte im HCF-Bereich, die mit zunehmender Schwingspielzahl einen zunehmenden Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierter Kante aufweist und sich mit abnehmender Schwingspielzahl an den Referenzzustand annähert. Der Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich beziehungsweise im HCF-Bereich lässt sich wie bei den Proben aus DP800 mit einer Abnahme der Duktilität der Randzone infolge der Kaltverfestigung und einer Zunahme der Oberflächenrauheit an der Bruchfläche der Schnittkante begründen. Da in beiden Fällen die Versagensursache (Abnahme Duktilität und Zunahme Oberflächenrauheit) im selben Probenbereich liegt, kommt es zu keinem Wechsel des Rissausgangsortes. Der Ermüdungsriss geht immer von der Bruchfläche an der Schnittkante aus. In Abbildung 7.15 ist außerdem zu sehen, dass die Dehnungswöhlerlinie bei einer Auswertung ohne Trennung von LCF- und HCF-Bereich, teilweise rechts von den Versuchspunkten verläuft und in diesen Bereichen somit zu einer nicht-konservativen Lebensdauer vorhersage führen kann.

Beim Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve der Proben mit polierten Kanten und der Erstbelastungskurve in Abbildung 6.56 lässt sich feststellen, dass der CP800 unter zyklischer Beanspruchung entfestigt. Des Weiteren ist in Abbildung 6.56 nur ein sehr geringer Kanteneinfluss auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve feststellbar. Die Versuchspunkte der verschiedenen Probenvarianten liegen nahezu deckungsgleich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

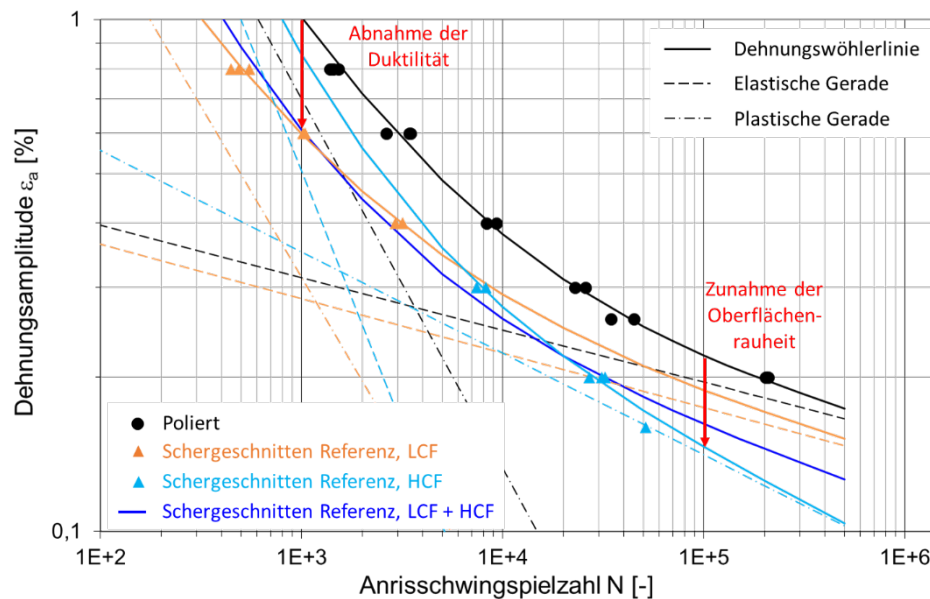


Abbildung 7.15: Getrennte Auswertung der Versuchsergebnisse im LCF- und HCF-Bereich von schergeschnittenen (Referenz) Proben aus CP800 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung

#### 7.2.4 DP1000

Das Laserstrahlschneiden führt bei den ungekerbten Flachproben unter spannungskontrollierter Beanspruchung zu einer hohen Streuung der Versuchsergebnisse, siehe Tabelle 6.36. Im Mittel tritt in Abbildung 6.45 im Zeitfestigkeitsbereich bei  $10^5$  Schwingspielen eine Zunahme der Schwingfestigkeit gegenüber den Proben mit polierten Kanten von ca. 14 % auf. Die abgeschätzte Dauerfestigkeit der laserstrahlgeschnittenen Proben kann aufgrund der hohen Streuung der Versuchsergebnisse als etwa gleich groß angesehen werden wie die der Proben mit polierten Kanten. Sowohl bei den laserstrahlgeschnittenen Proben als auch bei den Proben mit polierten Kanten geht der Ermüdungsriss von der Walzoberfläche aus, siehe Tabelle 6.53. Das bedeutet, dass die beim Laserstrahlschneiden entstehende Randzone eine höhere Schwingfestigkeit besitzt als das Grundgefüge des DP1000. Verantwortlich dafür ist die martensitische Gefügewandlung in der Randzone infolge des Laserstrahlschneidens, siehe Kapitel 6.1.2. Die Zunahme der Schwingfestigkeit lässt sich nur damit begründen, dass die Randzone aus martensitischem Gefüge die Proben in einem versagenskritischen Bereich mit der hohen Festigkeit unterstützt. Somit ist der Randzone eine tragende Wirkung zuzuschreiben.

Unter dehnungskontrollierter Beanspruchung ist bei den laserstrahlgeschnittenen Proben im LCF-Bereich in Abbildung 6.57 ein deutlicher Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten festzustellen. Dieser Schwingfestigkeitsabfall lässt mit steigender Schwingspielzahl, beziehungsweise sinkender Dehnungsamplitude nach und die Dehnungswöhlerlinie



der laserstrahlgeschnittenen Proben nähert sich im HCF-Bereich dem Referenzzustand an. Unter dehnungskontrollierter Beanspruchung traten an den laserstrahlgeschnittenen Proben je nach Beanspruchungsniveau unterschiedliche Rissausgangsorte auf, siehe Kapitel 6.5.4. Im LCF-Bereich, bei  $\varepsilon_a > 0,4 \%$ , geht der Ermüdungsriss von der Kantenfläche aus. Im HCF-Bereich, bei  $\varepsilon_a < 0,4 \%$ , geht der Ermüdungsriss hingegen, wie unter spannungskontrollierter Beanspruchung, von der Walzoberfläche im Grundgefüge aus. Um den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie und den Wechsel des Rissausgangsorts zu erklären, sind in Abbildung 7.16 schematisch die Dehnungswöhlerlinien der Randzone aus dem martensitischen Gefüge und des Grundwerkstoffs mit Walzoberfläche dargestellt. Die beiden Dehnungswöhlerlinien überschneiden sich im Übergang vom LCF- in den HCF-Bereich. Im LCF-Bereich verläuft die Dehnungswöhlerlinie der Randzone aufgrund der geringeren Duktilität unterhalb der Dehnungswöhlerlinie des Grundwerkstoffs. Im HCF-Bereich besitzt der Grundwerkstoff aufgrund der niedrigeren Festigkeit die geringere Schwingfestigkeit. Da an den laserstrahlgeschnittenen Proben beide Gefügestände auftreten und der Ermüdungsriss immer von dem Bereich mit der geringeren Schwingfestigkeit ausgeht, nähert sich die Dehnungswöhlerlinie im LCF- und HCF-Bereich jeweils an die Dehnungswöhlerlinie mit der geringeren Schwingfestigkeit an, siehe Abbildung 7.16.

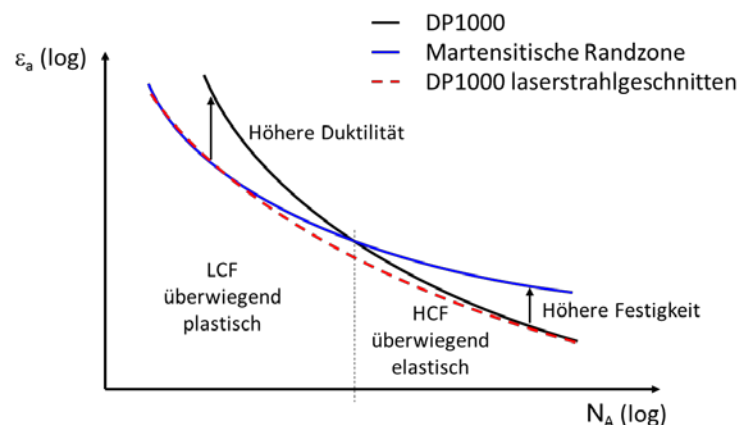


Abbildung 7.16: Einfluss der Duktilität und der Festigkeit auf den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie, schematisch nach [106]

An den Versuchsergebnissen der schergeschnittenen Proben in Abbildung 6.45 ist unter spannungskontrollierter Beanspruchung ein deutlicher Kanteneinfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten zu beobachten. So tritt im Zeitfestigkeitsgebiet ein Schwingfestigkeitsabfall von ca. 20 % gegenüber den Proben mit polierten Kanten auf. Des Weiteren verläuft die Zeitfestigkeitsgerade der schergeschnittenen Proben steiler als die der Proben mit polierten Kanten und knickt bei einer geringeren Schwingzahl in die Dauerfestigkeit ab, siehe Tabelle 6.36. Der Ermüdungsriss geht bei allen Proben von der Bruchfläche an der Schnittkante aus.

Bei Betrachtung der Dehnungswöhlerlinie der schergeschnittenen Proben in Abbildung 6.57 ist mit steigender Schwingspielzahl, beziehungsweise sinkender Dehnungsamplitude, ein zunehmender Schwingfestigkeitsabfall gegenüber dem Referenzzustand festzustellen. Der Rissausgangsort liegt bei allen Proben an der Bruchfläche der Schnittkante. Es tritt also kein Wechsel des Rissausgangsorts auf wie bei den laserstrahlgeschnittenen Proben. Betrachtet man bei den schergeschnittenen Proben in Abbildung 6.57 die Lage der Versuchspunkte und vergleicht sie mit dem Verlauf der Dehnungswöhlerlinie, so fällt auf, dass die Versuchspunkte durch die Dehnungswöhlerlinie nur mangelhaft approximiert werden. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass im LCF- und HCF-Bereich unterschiedliche Ursachen für das zyklische Versagen verantwortlich sind. Um dies nachzuweisen, werden in Abbildung 7.17 die Versuchsergebnisse im LCF- und HCF-Bereich getrennt ausgewertet und zusammen mit den Versuchsergebnissen der polierten Proben im Wöhlerdiagramm dargestellt. Die resultierende Dehnungswöhlerlinie der Proben aus dem LCF-Bereich nähert sich mit steigender Schwingspielzahl dem Referenzzustand an und zeigt damit qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie die Dehnungswöhlerlinie der laserstrahlgeschnittenen Proben. Die Dehnungswöhlerlinie der Proben aus dem HCF-Bereich hingegen entfernt sich mit zunehmender Schwingspielzahl von der Referenzwöhlerlinie. Mit abnehmender Schwingspielzahl und zunehmender Dehnungsamplitude ist eine Annäherung an die Referenzwöhlerlinie feststellbar. Der Verlauf der Dehnungswöhlerlinien bei einer getrennten Versuchsauswertung weist darauf hin, dass im LCF-Bereich eine Abnahme der Duktilität in der Randzone für den Abfall der Schwingfestigkeit verantwortlich ist. In diesem Fall resultiert die Abnahme der Duktilität aus der Kaltverfestigung beim Scherschneiden. Der Schwingfestigkeitsabfall im HCF-Bereich lässt sich hingegen mit der hohen Oberflächenrauheit an der Bruchfläche der Schnittkante begründen. Dass trotz unterschiedlicher Versagensmechanismen bei den Proben kein Wechsel des Rissausgangsorts im LCF- und HCF-Bereich auftritt, ist damit zu erklären, dass die Zustände, die jeweils zum Versagen führen, im selben Probenbereich an der Bruchfläche der Schnittkante auftreten.

Vergleicht man den Verlauf der zyklischen  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurve der Proben mit polierten Kanten in Abbildung 6.58 mit dem Verlauf der Erstbelastungskurve ist festzustellen, dass der DP1000 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung zyklisch entfestigt. Bei den Versuchspunkten der laserstrahlgeschnittenen Proben ist zu beobachten, dass bei einigen Proben die stabilisierte Hysteresese eine deutlich höhere Festigkeit aufweist, als bei den restlichen Proben. Dieses Verhalten ist ungewöhnlich und kann nicht begründet werden. Die restlichen Versuchspunkte der laserstrahlgeschnittenen Proben liegen deckungsgleich mit den Versuchspunkten der Proben mit polierten Kanten. An den Versuchspunkten und der zyklischen  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurve der schergeschnittenen Proben in Abbildung 6.58 ist ebenfalls nur einen vernachlässigbar geringer Kanteneinfluss

zu beobachten. Das entspricht der Erwartung, wonach der Oberflächenzustand keinen Einfluss auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve hat [11], [62].

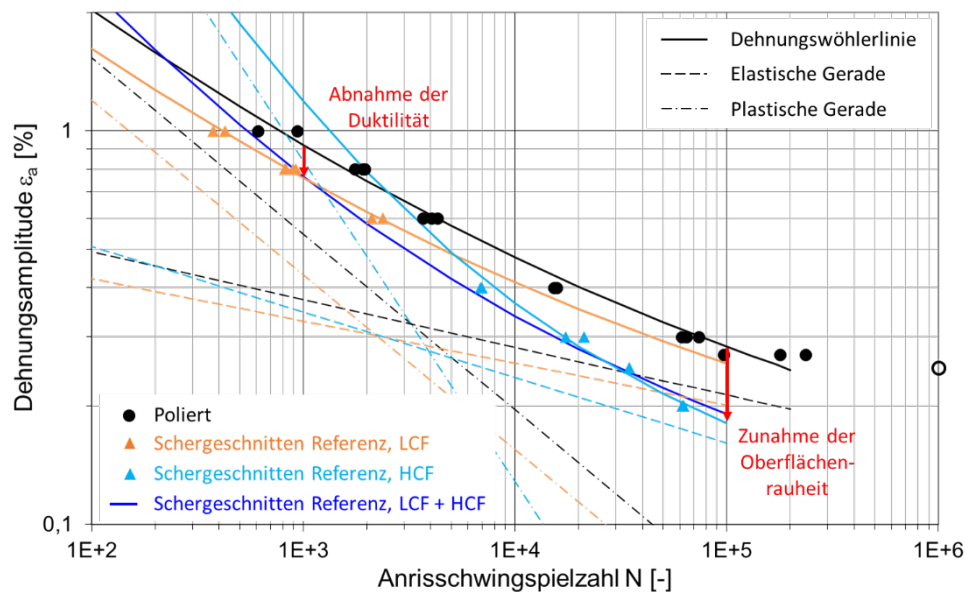


Abbildung 7.17: Getrennte Auswertung der Versuchsergebnisse im LCF- und HCF-Bereich von schergeschnittenen (Referenz) Proben aus DP1000 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung

### 7.2.5 CP1000

Die schergeschnittenen Proben aus CP1000 weisen in Abbildung 6.46 unter spannungskontrollierter Beanspruchung einen erheblichen Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten auf. So beträgt der Schwingfestigkeitsabfall im Zeitfestigkeitsgebiet ca. 45 % und im Bereich der Dauerfestigkeit sogar über 50 %. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Zeitfestigkeitsgerade der schergeschnittenen Proben sehr steil verläuft. Der Neigungsexponent  $k$  beträgt nur 2,7. Außerdem knickt die Zeitfestigkeitsgerade schon nach ca.  $2 \times 10^5$  Schwingspielen in die Dauerfestigkeit ab, siehe Tabelle 6.38. Dies sind Anzeichen dafür, dass es sich bei der ermittelten Wöhlerlinie um eine Rissfortschrittswöhlerlinie handelt. Das bedeutet, dass Anrisse oder Defekte die bei der Probenherstellung entstanden sind unter zyklischer Beanspruchung zu wachsen beginnen. Somit entfällt die Rissinitiierungsphase und die Lebensdauer besteht nur aus Rissfortschrittsphase. Der Ermüdungsriss geht bei den schergeschnittenen Proben von der Bruchfläche an der Schnittkante aus und bei den Proben mit polierten Kanten von der Walzoberfläche, siehe Tabelle 6.54. Dementsprechend ist eindeutig der Kantenzustand für den Schwingfestigkeitsabfall verantwortlich.

Unter dehnungskontrollierter Beanspruchung ist in Abbildung 6.59 sowohl im LCF-Bereich als auch im HCF-Bereich ein signifikanter Schwingfestigkeitsabfall an den schergeschnittenen Proben gegenüber dem Referenzzustand feststellbar. Bei Betrachtung der Versuchspunkte und der

Dehnungswöhlerlinie der schergeschnittenen Proben fällt sofort auf, dass die Versuchspunkte durch die Dehnungswöhlerlinie nur sehr schlecht approximiert werden. Da vermutet wird, dass die Ursache dafür unterschiedliche Versagensmechanismen im LCF- und HCF-Bereich sind, wird in Abbildung 7.18 eine getrennte Auswertung der Versuchspunkte in den beiden Bereichen durchgeführt. Die Dehnungswöhlerlinie der Versuchspunkte im LCF-Bereich verläuft mit zunehmender Schwingspielzahl nahezu deckungsgleich mit der Dehnungswöhlerlinie der Proben mit polierten Kanten. Mit abnehmender Schwingspielzahl hingegen ist ein zunehmender Schwingfestigkeitsabfall festzustellen. Umgekehrt verhält es sich mit der Dehnungswöhlerlinie der Versuchspunkte im HCF-Bereich, die mit steigender Schwingspielzahl einen zunehmenden Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierter Kante aufweist und mit abnehmender Schwingspielzahl sogar oberhalb der Referenzwöhlerlinie verläuft. Der Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich lässt sich wie bei den Proben aus DP1000 mit einer Abnahme der Duktilität der Randzone infolge der Kaltverfestigung begründen. Der Schwingfestigkeitsabfall im HCF-Bereich wird hingegen durch eine Zunahme der Oberflächenrauheit an der Bruchfläche der Schnittkante gegenüber den Proben mit polierten Kanten verursacht. Da in beiden Fällen die Versagensursache (Abnahme Duktilität und Zunahme Oberflächenrauheit) im selben Probenbereich liegt, kommt es zu keinem Wechsel des Rissausgangsortes. Der Ermüdungsriß geht immer von der Bruchfläche an der Schnittkante aus, siehe Tabelle 6.54. In Abbildung 7.15 ist außerdem zu sehen, dass die Dehnungswöhlerlinie bei einer Auswertung ohne Trennung von LCF- und HCF-Bereich teilweise auf der nicht-konservativen Seite der Versuchspunkte verläuft und in diesen Bereichen somit zu einer Überschätzung der Lebensdauer führen kann.

Beim Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve der Proben mit polierten Kanten und der Erstbelastungskurve in Abbildung 6.60 lässt sich feststellen, dass der CP1000 zyklisch entfestigt. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Versuchspunkte der schergeschnittenen Proben deckungsgleich mit den Versuchspunkten der Proben mit polierten Kanten im Diagramm liegen. Dementsprechend liegt beim CP1000 kein Kanteneinfluss auf die stabilisierte Hysterese vor. Die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve der schergeschnittenen Proben verläuft jedoch deutlich abseits der Versuchspunkte. Die Ursache dafür ist, dass die Kennwerte, welche die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreiben, mit der Kompatibilitätsbedingung ermittelt wurden. Durch den hohen Kanteneinfluss wird der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie gegenüber der Referenzwöhlerlinie stark beeinflusst. Über die Kompatibilitätsbedingung wirkt sich dieser Einfluss auch auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve aus. Auch wenn im Spannungs-Dehnungs-Diagramm an der Lage der Versuchspunkte kein Kanteneinfluss festgestellt werden kann. Das bedeutet, dass bei einem hohen Kanteneinfluss die Kompatibilität zwischen Dehnungswöhlerlinie und zyklischer Spannungs-Dehnungs-Kurve nicht mehr erfüllt wird.

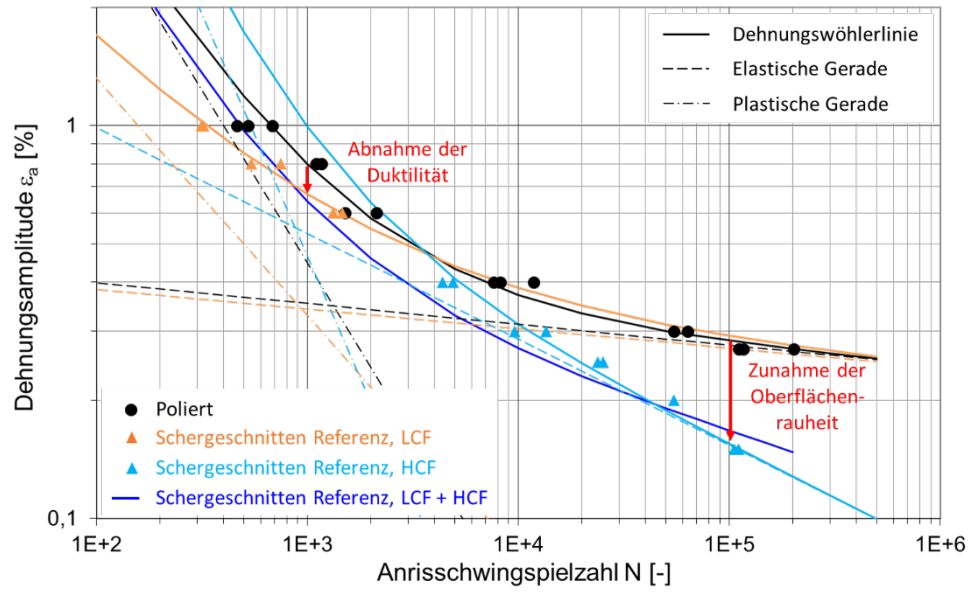


Abbildung 7.18: Getrennte Auswertung der Versuchsergebnisse im LCF- und HCF-Bereich von schergeschnittenen (Referenz) Proben aus CP1000 unter dehnungskontrollierter Beanspruchung

### 7.2.6 22MnB5

In Abbildung 6.47 und Abbildung 6.48 ist zu erkennen, dass der Kantenzustand einen erheblichen Einfluss auf die Schwingfestigkeit der ungekerbten und gekerbten Proben aus gehärtetem 22MnB5 unter spannungskontrollierter Beanspruchung hat. Der Schwingfestigkeitsabfall der laserstrahlgeschnittenen Proben gegenüber den Proben mit polierten Kanten liegt im Zeitfestigkeitsbereich zwischen 30 und 39 %. Der Schwingfestigkeitsabfall der schergeschnittenen Proben liegt sogar zwischen 45 und 55 % im Zeitfestigkeitsbereich. Dabei verlaufen die Zeitfestigkeitsgeraden der laserstrahl- und schergeschnittenen Proben auffällig steil und der Neigungsexponent  $k$  beträgt zwischen 2,9 und 4,4. Außerdem knicken die Zeitfestigkeitsgeraden bei sehr kleinen Schwingungszahlen in die Dauerfestigkeit ab, siehe Tabelle 6.40. Dies sind Anzeichen dafür, dass es sich bei den ermittelten Wöhlerlinien um Rissfortschrittswöhlerlinien handelt. Das bedeutet, dass Anrisse oder Defekte, die bei der Probenherstellung entstanden sind, unter zyklischer Beanspruchung zu wachsen beginnen. Somit entfällt die Rissinitiierungsphase und die Lebensdauer besteht nur aus Rissfortschrittsphase.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die laserstrahlgeschnittenen Proben der Variante 2 eine etwas höhere Schwingfestigkeit haben als die Proben der Variante 1. Werden die Proben also zuerst laserstrahlgeschnitten und anschließend die Wärmebehandlung durchgeführt (Variante 2), so werden höhere Lebensdauern erzielt als bei umgekehrter Prozessreihenfolge. Der Rissausgangsort liegt nach Tabelle 6.55 bei den Proben der Variante 2 an der Kantenfläche, wohingegen der Ermüdungsriss bei den laserstrahlgeschnittenen Proben der Variante 1 von der beschichteten Walzoberfläche im Bereich nahe der Schnittkante ausgeht. Bei den Proben mit polierten Kanten geht der Ermüdungsriss ebenfalls von der beschichteten Walzoberfläche aus. Das stimmt mit den Ergebnissen in [84] überein, worin Mikrorisse in der Diffusionsschicht zwischen Al-Si Beschichtung und 22MnB5-Werkstoff für die Lage des Rissausgangsorts und den Schwingfestigkeitsabfall bei laserstrahlgeschnittenen (Variante 1) Proben verantwortlich gemacht werden, siehe Kapitel 3.3.1.

Um einen möglichen Einfluss der Al-Si Beschichtung auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen, wurde bei laserstrahlgeschnittenen Proben der Variante 1 und bei Proben mit polierten Kanten die Al-Si Beschichtung mechanisch entfernt und die blanke Walzoberfläche anschließend feingeschliffen und poliert. Die Versuchsergebnisse in Abbildung 6.49 zeigen bei beiden Probenvarianten eine erhebliche Zunahme der Schwingfestigkeit gegenüber den Proben mit Al-Si Beschichtung. Die Entfernung der Beschichtung sorgt außerdem dafür, dass der Rissausgangsort bei den laserstrahlgeschnittenen Proben an die Kantenfläche wechselt. Das zeigt, dass bei den beschichteten laserstrahlgeschnittenen Proben der Variante 1 eine Kombination aus Beschichtungseinfluss und Kanteneinfluss für den hohen Schwingfestigkeitsabfall verantwortlich ist. Beim indust-

riellen Einsatz des pressgehärteten 22MnB5 ist eine Beschichtung unverzichtbar. Jedoch kann mit den Versuchsergebnissen aufgezeigt werden, welches Schwingfestigkeitspotential eine Verbesserung der Beschichtung haben kann. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Al-Si Beschichtung wird in [85] aufgezeigt. Darin wird nachgewiesen, dass die Dichte der Mikrorisse in der Diffusionsschicht von der Austenitisierungszeit abhängig ist. Der Nachweis, dass eine geringere Rissdichte auch zu einem besseren Schwingfestigkeitsverhalten führt, wurde jedoch nicht erbracht.

Bei den schergeschnittenen Proben geht der Ermüdungsriss ausschließlich von der Bruchfläche an der Schnittkante aus. Demnach wird der Schwingfestigkeitsabfall eindeutig vom Kantenzustand und nicht von der Beschichtung verursacht. Bei den ungekerbten schergeschnittenen Proben haben diejenigen der Schneidstrategie Referenz eine höhere Schwingfestigkeit als die Proben der Schneidstrategie Verschleiß. Bei den gekerbten Proben hingegen haben die Proben die mit der Schneidstrategie Verschleiß hergestellt wurden, die höhere Schwingfestigkeit.

Bei den gekerbten Proben führt der geringe Schneidspalt bei der Herstellung der Proben mit der Schneidstrategie Referenz zu Rissen im Gefüge hinter der Bruchfläche und zu starken lokalen Kaltverfestigungen im Bereich der Bruchfläche. Damit lässt sich die geringere Schwingfestigkeit im Vergleich zu den gekerbten Proben der Schneidstrategie Verschleiß begründen.

Dass es sich bei dem gehärteten 22MnB5 um einen sehr harten und spröden Werkstoff mit geringer Umformbarkeit handelt, ist am Verlauf der Dehnungswöhlerlinie der Proben mit polierten Kanten in Abbildung 6.61 zu erkennen. Alle Versuchspunkte liegen im HCF-Bereich und die elastische und plastische Gerade schneiden sich bereits bei unter 200 Schwingspielen. Mit zunehmender Schwingspielzahl im HCF-Bereich ist wie bei den spannungskontrollierten Versuchen ein erheblicher Einfluss durch das Laserstrahlschneiden und Scherschneiden feststellbar. Der hohe Schwingfestigkeitsabfall bewirkt einen deutlich steileren Verlauf der elastischen Geraden. Betrachtet man in Tabelle 6.49 die Werte des Schwingfestigkeitsexponenten  $b$ , so fällt auf, dass die Werte bei den laserstrahl- und schergeschnittenen Probenvarianten kleiner sind als  $-0,2$ . Nach [105] wird jedoch gefordert, dass der Neigungsexponent nicht kleiner als  $-0,2$  sein darf. Würde man dieser Forderung im vorliegenden Fall nachkommen, könnten die Versuchspunkte im HCF-Bereich mit der Dehnungswöhlerlinie nicht angenähert werden. Die Dehnungswöhlerlinie würde auf der nicht-konservativen Seite der Versuchspunkte verlaufen und somit auf den entsprechenden Belastungsniveaus zu nicht-konservativen Lebensdauervorhersagen führen. Es wird daher empfohlen für die Abbildung eines hohen Kanteneinfluss die Forderung nach [105] außer Kraft zu setzen und Werte die kleiner als  $-0,2$  sind für den Neigungsexponenten  $b$  zuzulassen.

Mit abnehmender Schwingspielzahl und zunehmender Dehnungsamplitude nähern sich die Dehnungswöhlerlinien und die Versuchspunkte der laserstrahl- und schergeschnittenen Probenvarianten dem Referenzzustand an. Der Kanteneinfluss nimmt also mit sinkender Schwingspielzahl ab. Ein Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich wie bei den Werkstoffen DC04, DP800 und CP800, der mit der Aufhärtung beziehungsweise den Kaltverfestigungen in der Randzone begründet werden kann, liegt beim 22MnB5 nicht vor. Dies lässt sich mit der geringen Härtesteigerung in der Randzone gegenüber dem Grundgefüge erklären, die bei den anderen Werkstoffen für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich verantwortlich gemacht wird. Die Aufhärtung der Randzone bei den laserstrahlgeschnittenen (Variante 1) Proben liegt bei ca. 10 % und bei den schergeschnittenen Proben zwischen 15 und 25 % gegenüber dem Grundgefüge. Des Weiteren tritt der beschriebene Schwingfestigkeitsabfall bei den anderen Werkstoffen im LCF-Bereich auf, das heißt bei einer wechselnden Verformung, bei welcher der plastische Dehnungsanteil dominiert. Bei den dehnungskontrollierten Versuchen an den Proben aus gehärteten 22MnB5 in Abbildung 6.61 dominiert jedoch immer der elastische Dehnungsanteil. Somit ist vor allem die höhere Oberflächenrauheit am Rissausgangsort, verbunden mit der hohen Kerbempfindlichkeit des gehärteten 22MnB5 für den hohen Schwingfestigkeitsabfall im HCF-Bereich verantwortlich.

Bei einem Vergleich der Erstbelastungskurve mit der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve der Proben mit polierten Kanten in Abbildung 6.62 ist festzustellen, dass der Werkstoff sich unter zyklischer Beanspruchung bei  $\varepsilon_a \leq 0,6 \%$  neutral verhält. Bei  $\varepsilon_a > 0,6 \%$  beginnt der Werkstoff unter zyklischer Beanspruchung zu entfestigen. Die Versuchspunkte der verschiedenen Probenvarianten in Abbildung 6.62 liegen bei Dehnungsamplituden  $\varepsilon_a \leq 0,6 \%$  deckungsgleich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Das heißt es ist kein Kanteneinfluss feststellbar. Mit steigenden Dehnungsamplituden nimmt die Streuung der Versuchspunkte deutlich zu. Ein eindeutiger Kanteneinfluss ist bei hohen Dehnungsamplituden jedoch auch nicht zu erkennen. Die abgebildeten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der verschiedenen Probenvarianten werden mit der Kompatibilitätsbedingung bestimmt, siehe Kapitel 2.5.1.5. Die Versuchspunkte der laserstrahlgeschnittenen Proben nach Variante 1 sowie die Versuchspunkte der schergeschnittenen Proben werden durch die jeweilige zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve bei hohen Dehnungsamplituden nicht gut approximiert. Das bedeutet, die Kompatibilität zwischen Dehnungswöhlerlinie und zyklischer Spannungs-Dehnungs-Kurve wird in diesen Fällen nicht mehr erfüllt. Verantwortlich gemacht werden kann dafür der hohe Kanteneinfluss, der den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie stark beeinflusst und sich damit über die Kompatibilitätsbedingung auch auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve auswirkt, auch wenn hier an der Lage der Versuchspunkte kein Kanteneinfluss festgestellt werden kann.



### 7.3 Einfluss des Werkstoffs auf das Schwingfestigkeitsverhalten

In Abbildung 7.19 ist die Schwingfestigkeit im Zeitfestigkeitsgebiet bei  $10^5$  Schwingspielen über der Zugfestigkeit des Werkstoffs in Abhängigkeit der Probengeometrie und des Kantenzustands abgebildet. Die abgebildeten Schwingfestigkeiten wurden unter rein wechselnder ( $R = -1$ ) spannungskontrollierter Beanspruchung ermittelt. Die abgebildeten Schwingfestigkeiten wurden an den Probengeometrie aus Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 mit den Kerbformzahlen  $K_t = 1, 2,5$  und  $4,6$  jeweils für die Kantenzustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten ermittelt. Bei den schergeschnittenen Probenvarianten wurde bei einigen der abgebildeten Werkstoffe der Einfluss der Schneidstrategie auf das Schwingfestigkeitsverhalten untersucht. Sind für einen Werkstoff und eine Probengeometrie in Abbildung 7.19 daher zwei Schwingfestigkeitswerte für den schergeschnittenen Kantenzustand abgebildet, so kennzeichnen diese Werte die Schneidstrategie mit welcher die maximale und die minimale Schwingfestigkeit erzielt wurde.

In Abbildung 7.19 ist zu beobachten, dass der Einfluss des Kantenzustands auf die Schwingfestigkeit stark von der Zugfestigkeit des Werkstoffs abhängig ist. Dabei ist weniger die zunehmende Zugfestigkeit für den zunehmenden Kanteneinfluss verantwortlich, als vielmehr die sinkende Duktilität des Werkstoffs, siehe Kapitel 7.1. Während an den Proben aus DC04 nur ein sehr geringer Kanteneinfluss auftritt, nimmt die Schwingfestigkeit des gehärteten 22MnB5 durch das Laserstrahl- oder Scherschneiden nahezu um die Hälfte ab im Vergleich zu den Proben mit polierten Kanten. Des Weiteren ist in Abbildung 7.19 zu erkennen, dass die Schwingfestigkeit der laserstrahlgeschnittenen Proben eines Werkstoffs immer größer ist, als die Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben aus demselben Werkstoff. Das bedeutet hinsichtlich der Schwingfestigkeit ist das Laserstrahlschneiden dem Scherschneiden vorzuziehen.

Stellt die Kante unter Schwingbeanspruchung die versagenskritische Stelle am Bauteil dar, ist es zwingend erforderlich diesen Schwingfestigkeitsunterschied zwischen den laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Probenvarianten im Entwicklungsprozess des Bauteils zu berücksichtigen. Ansonsten kann es zu einer nicht-konservativen Auslegung des schergeschnittenen Serienbauteils kommen, da das laserstrahlgeschnittene Prototypenbauteil, mit welchem die Freigabeversuche für das Betriebsfestigkeitsverhalten durchgeführt werden, eine höhere Schwingfestigkeit aufweist.

Das bessere Schwingfestigkeitsverhalten der laserstrahlgeschnittenen Proben ist zum einen zurückzuführen auf die bessere Oberflächenqualität an der Schnittkante gegenüber den schergeschnittenen Proben. Zum anderen wirkt sich bei den Werkstoffen DP800, CP800 und DP1000 die martensitische Gefügeumwandlung in der Randzone infolge des Laserstrahlschneidens positiv auf das Schwingfestigkeitsverhalten aus.

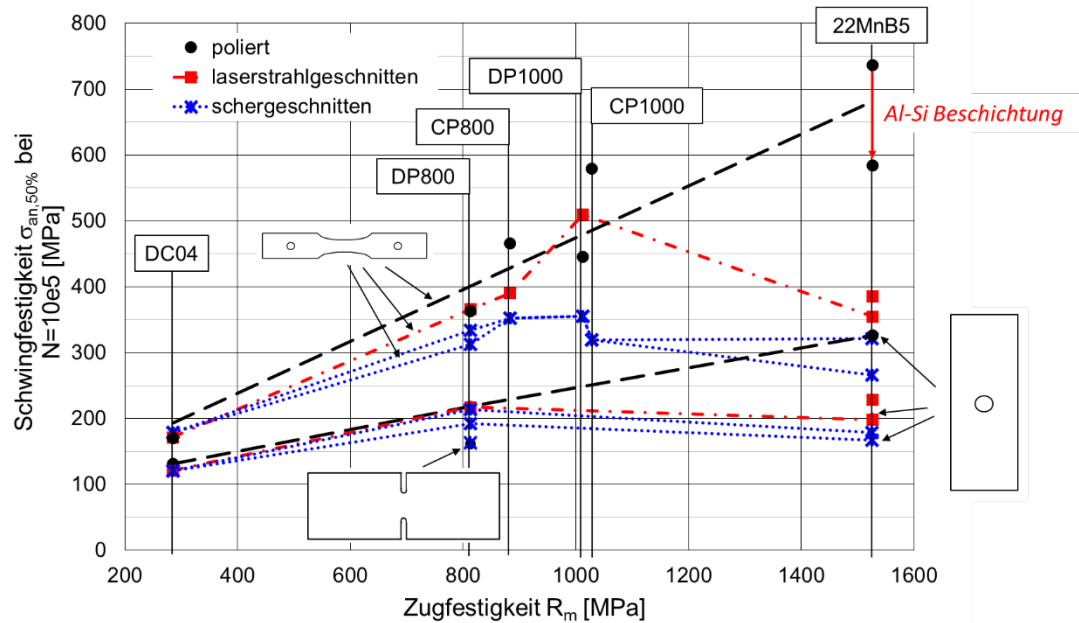


Abbildung 7.19: Einfluss des Laserstrahl- und Scherschneidens auf die Schwingfestigkeit verschiedener Feinblechstähle unter spannungskontrollierter Beanspruchung,  $R = -1$

Interessant ist auch, dass ab einer Zugfestigkeit zwischen 800 und 900 MPa eine Erhöhung der Werkstofffestigkeit zu keiner Zunahme der Schwingfestigkeit führt, wenn die Proben schergeschnitten werden. So liegt die Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben aus 22MnB5 zum Teil unterhalb der Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben aus DP800, obwohl der 22MnB5 eine fast doppelt so große Zugfestigkeit besitzt wie der DP800.

Weiterhin kann man in Abbildung 7.19 beobachten, dass der Einfluss des Kantenzustands mit steigender Kerbformzahl abnimmt. Besonders deutlich ist dies an den Proben aus DP800 zu erkennen. Während bei den ungekerbten Proben ein deutlicher Kanteneinfluss auf die Schwingfestigkeit erkennbar ist, sind die Schwingfestigkeiten der polierten und schergeschnittenen Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$  gleich groß und weisen somit keinen Einfluss durch die Kantenbearbeitung auf. Der Einfluss der Probengeometrie auf das Schwingfestigkeitsverhalten wird im folgend Kapitel 7.4 detailliert betrachtet.

Es war zu erwarten, dass der Einfluss durch den Kantenzustand im hohen Maße von der Festigkeit beziehungsweise von der Zähigkeit des Werkstoffs abhängig ist. Begründen lässt sich das mit der steigenden Kerbempfindlichkeit bei zunehmender Festigkeit und abnehmender Zähigkeit, siehe [2] und [3]. In der FKM-Richtlinie [58] wird daher mit Gleichung (3.17) der Abfall der Schwingfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit und der Zugfestigkeit des Werkstoffs bei  $10^6$  Schwingspielen ermittelt. Um zu prüfen, ob der Schwingfestigkeitsabfall bei den untersuchten Proben nach der FKM-Richtlinie zuverlässig eingeschätzt wird, wird der Abminderungsfaktor nach Gleichung (3.17) für die ungekerbten schergeschnittenen Proben der Schneidstrategie Referenz ermittelt. Dafür werden die gemittelten Rautiefen am Versagensort, also der Bruch-

fläche an der Schnittkante, aus Kapitel 6.1.3 verwendet und die jeweilige Zugfestigkeit des Werkstoffs aus Tabelle 4.2. Mit dem berechneten Abminderungsfaktor  $f_{R,\sigma}$  wird anschließend die experimentell ermittelte Dauerfestigkeit der Proben mit polierten Kanten  $\sigma_{D,poliert}$  herabgesetzt, siehe Gleichung (7.1). Die auf diese Weise abgeschätzte Schwingfestigkeit nach FKM-Richtlinie  $\sigma_{a,FKM}$  wird in Abbildung 7.20 den experimentell ermittelten Werten gegenübergestellt.

$$\sigma_{a,FKM} = f_{R,\sigma} \cdot \sigma_{D,poliert} \quad (7.1)$$

Es ist zu erkennen, dass die abgeschätzte Schwingfestigkeit nach der FKM-Richtlinie bei den schergeschnittenen Proben aus CP800, CP1000 und 22MnB5 zum Teil erheblich größer ist als die experimentell ermittelten Werte. Eine Abschätzung des Schwingfestigkeitsabfalls infolge Oberflächeneinfluss nach der FKM-Richtlinie würde demnach zu einer nicht-konservativen Lebensdauervorhersage führen. Bei den Werkstoffen DC04, DP800 und DP1000 liegt man mit der Abschätzung nach FKM-Richtlinie auf der sicheren Seite.

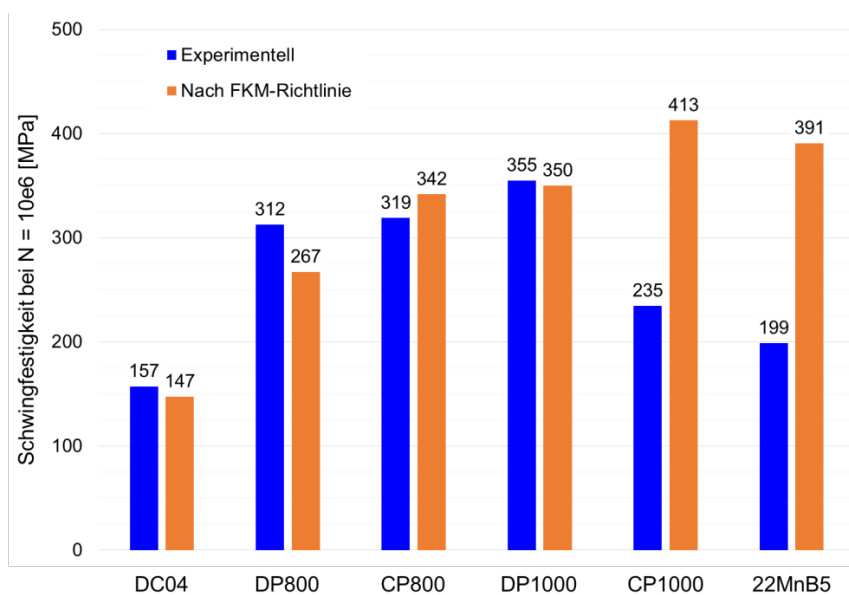


Abbildung 7.20: Vergleich zwischen experimenteller und nach FKM-Richtlinie [58] abgeschätzter Schwingfestigkeit bei  $10^6$  Schwingspielen von ungekerbten schergeschnittenen (Referenz) Flachproben,  $R = -1$

## 7.4 Einfluss der Probengeometrie auf das Schwingfestigkeitsverhalten

In diesem Kapitel soll untersucht werden, ob sich der an ungekerbten Proben auftretende Kanteneinfluss von dem an gekerbten Proben auftretenden Kanteneinfluss unterscheidet. Dafür sind in Abbildung 7.21, Abbildung 7.22 und Abbildung 7.23 die relativen Schwingfestigkeiten der

ungekerbten und gekerbten Flachproben aus den Werkstoffen DC04, DP800 und gehärtetem 22MnB5 in Abhängigkeit des Kantenzustands abgebildet.

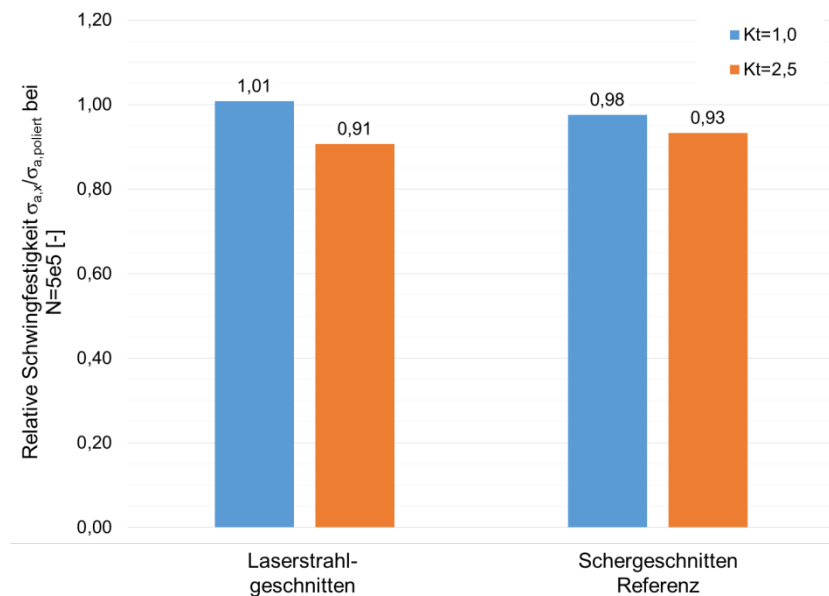


Abbildung 7.21: Vergleich des Kanteneinfluss bei ungekerbten und gekerbten Flachproben aus DC04,  $R = -1$

Beim DC04 in Abbildung 7.21 nimmt der Kanteneinfluss sowohl bei den laserstrahlgeschnittenen als auch bei den schergeschnittenen gekerbten Proben im Vergleich zu den ungekerbten Proben zu. Dieses Verhalten ist ungewöhnlich, da eigentlich erwartet wird, dass der Kanteneinfluss mit steigender Kerbformzahl abnimmt. Betrachtet man die Dehnungswöhlerlinien der DC04-Proben in Abbildung 6.51 so fällt auf, dass der Kanteneinfluss mit steigender Dehnungsamplitude zunimmt. Es ist zu vermuten, dass bei den gekerbten Proben die örtliche Beanspruchung im Kerbgrund unter spannungskontrollierter Beanspruchung höher liegt als bei den ungekerbten Proben bei gleicher Schwingspielzahl und somit der höhere Kanteneinfluss zu erklären ist.

Bei den Proben aus DP800 in Abbildung 7.22 ist bei den Schneidstrategien Referenz und Beschichtung ein nahezu gleich großer Kanteneinfluss bei den ungekerbten und gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  feststellbar. Bei den Schneidstrategien Verschleiß und Glattschnitt ist an den gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  im Vergleich zu den ungekerbten Proben ein deutlich geringerer Kanteneinfluss zu beobachten. Dies ist nicht unbedingt auf die Zunahme der Kerbschärfe zurückzuführen. Vielmehr sind die unterschiedlichen Zustände an der Schnittkante, die sich bei einem offenen Schnitt ( $K_t = 1$ ) im Vergleich zu einem geschlossenen Schnitt ( $K_t = 2,5$ ) ergeben verantwortlich für den unterschiedlich großen Kanteneinfluss, siehe auch Kapitel 7.2.2.1. Bei den scharf gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 4,6$ , die mit der Schneidstrategie Referenz und Verschleiß hergestellt wurden, ist hingegen kein Kanteneinfluss

auf die Schwingfestigkeit festzustellen. Das entspricht der Erwartung, wonach der Oberflächen-einfluss mit zunehmender Kerbschärfe abnimmt [10]. In diesem Fall ist die Spannungsüberhöhung im Kerbgrund so groß, dass das Schwingfestigkeitsverhalten von der Makrokerbe bestimmt wird. Einflüsse wie der Kantenzustand oder die Oberfläche sind vernachlässigbar.

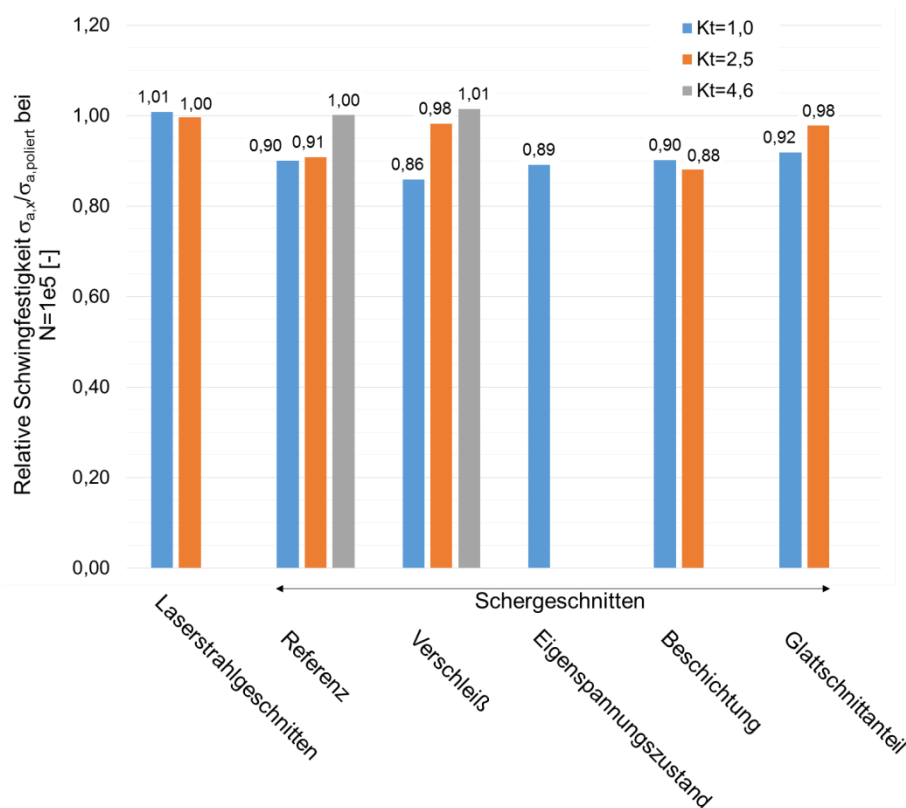


Abbildung 7.22: Vergleich des Kanteneinfluss bei ungekerbten und gekerbten Flachproben aus DP800, R=-1

Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus gehärtetem 22MnB5 in Abbildung 7.23 liegt kein Unterschied zwischen dem Kantenzustand an den ungekerbten und den gekerbten Proben vor, wie etwa bei den schergeschnittenen Proben. Der Kantenzustand ist somit unabhängig von der Probengeometrie, siehe Kapitel 6.1.2. Der zu beobachtende Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den polierten Proben ist bei den ungekerbten und gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  nahezu gleich groß. Demnach wird der Schwingfestigkeitsabfall in diesem Fall nicht von der Probengeometrie beeinflusst. Bei den ungekerbten und gekerbten Proben, die mit den Scherschneidstrategien Referenz und Verschleiß hergestellt wurden, ist wie bei den schergeschnittenen Proben aus DP800 kein eindeutiger Einfluss der Probengeometrie auf den Schwingfestigkeitsabfall festzustellen. Bei den gekerbten Proben der Schneidstrategie Referenz ist der Schwingfestigkeitsabfall kleiner als bei den ungekerbten Proben. Bei den Proben der Schneidstrategie Verschleiß ist es umgekehrt. Dieses uneinheitliche Verhalten der ungekerbten und gekerbten schergeschnittenen Proben bezüglich des Schwingfestigkeitsabfalls lässt sich wie bei den DP800-Proben mit den unterschiedlichen Kantenzuständen an den verschiedenen Pro-

bengeometrien trotz gleicher Schneidstrategie begründen. Ein Einfluss durch die Probengeometrie ist daher nicht festzustellen, beziehungsweise wird von dem Kanteneinfluss überlagert.

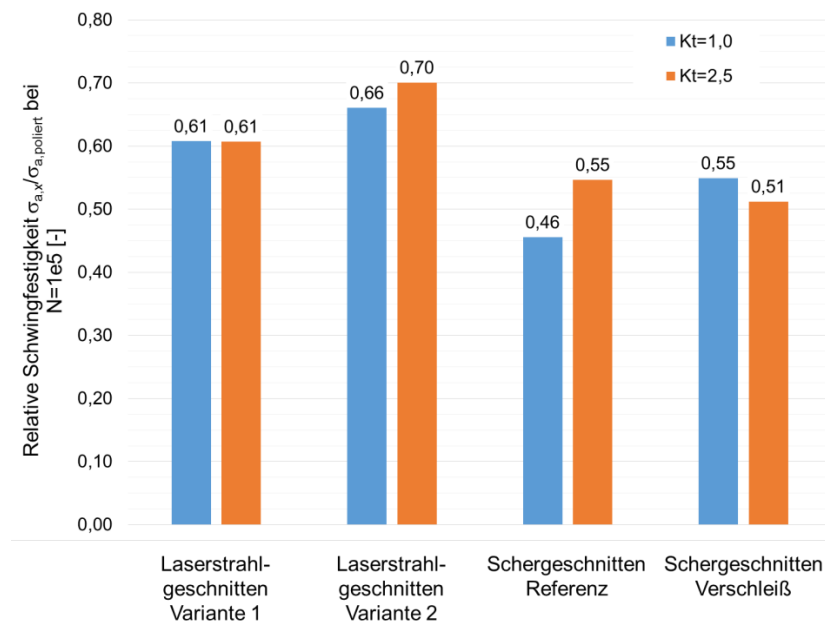


Abbildung 7.23: Vergleich des Kanteneinfluss bei ungekerbten und gekerbten Flachproben aus gehärtetem 22MnB5,  $R = -1$

## 7.5 Einfluss der Mittelspannung auf das Schwingfestigkeitsverhalten

An gekerbten Proben mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  aus gehärtetem 22MnB5 mit polierten und laserstrahlgeschnittenen (Variante 1) Kanten wurde untersucht, wie sich der hohe Kanteneinfluss auf die Mittelspannungsempfindlichkeit auswirkt. Dafür wurden zusätzlich zu den Versuchen unter wechselnder Beanspruchung Versuche mit schwellender Beanspruchung bei dem Lastverhältnis  $R = 0,1$  an den beiden Probenvarianten durchgeführt. Tabelle 6.42 ist zu entnehmen, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit bei den Proben mit polierten Kanten im Zeitfestigkeitsbereich  $M = 0,43$  und im Dauerfestigkeitsbereich  $M = 0,33$  beträgt. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben hingegen sinkt die Mittelspannungsempfindlichkeit auf  $M = 0,36$  im Zeitfestigkeitsbereich und nur  $M = 0,05$  im Dauerfestigkeitsbereich. Das bedeutet, dass bei einem sehr hohen Schwingfestigkeitsabfall infolge des Kanteneinflusses eine aufgebrauchte Mittelspannung nahezu keine Auswirkung auf die Schwingfestigkeit im Dauerfestigkeitsbereich hat. Das ist auch an den Wöhlerlinien der laserstrahlgeschnittenen Proben in Abbildung 6.49 zu erkennen, die unter wechselnder und schwellender Beanspruchung eine nahezu identische Dauerfestigkeit aufweisen.

## 7.6 Versagensmechanismen unter dehnungskontrollierter Beanspruchung

Die Ergebnisse der dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche in Kapitel 6.4 zeigen, dass der Kantenzustand einen zum Teil erheblichen Einfluss auf den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie haben kann. Dabei führt das Laserstrahlschneiden und Scherschneiden immer zu einem Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten. Außerdem wurde beobachtet, dass der Schwingfestigkeitsabfall neben dem Kantenzustand und dem Werkstoff auch von der Beanspruchungshöhe abhängig ist. So konnte in Kapitel 7.2 festgestellt werden, dass im LCF-Bereich und HCF-Bereich unterschiedliche Versagensmechanismen für den Schwingfestigkeitsabfall verantwortlich sind. Im Folgenden sollen diese Versagensmechanismen genauer betrachtet werden.

### 7.6.1 LCF-Bereich

Es ist allgemein bekannt, dass Werkstoffe mit einer höheren Festigkeit aufgrund der geringeren Duktilität kürzere Lebensdauern im LCF-Bereich erreichen, als Werkstoffe mit einer geringeren Festigkeit, siehe Abbildung 7.9. Bei den laserstrahl- und schergeschnittenen Proben führt eine prozessbedingte Aufhärtung oder Verfestigung des schnittkantennahen Werkstoffgefüges zu demselben Effekt.

So hatte beispielsweise das Laserstrahlschneiden der Proben aus DP800, CP800 und DP1000 zur Folge, dass in der Wärmeeinflusszone nahe der Schnittkante eine martensitische Gefügeumwandlung stattfindet. Diese Aufhärtung der Randzone führte im LCF-Bereich aufgrund der Festigkeitszunahme zu einem deutlichen Schwingfestigkeitsabfall. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP800 und DP1000 kommt es außerdem zu einem Wechsel des Rissausgangsorts zwischen den Versuchen im HCF- und LCF-Bereich. Während der Ermüdungsriss bei den Versuchen im HCF-Bereich von der Walzoberfläche am Grundgefüge ausgeht, wechselt er bei den Versuchen im LCF-Bereich an die Kantenfläche. Dies ist ein deutliches Anzeichen dafür, dass bei den Proben die aufgehärtete Randzone verantwortlich für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich ist.

Das gleiche Verhalten kann bei den Dehnungswöhlerlinien der schergeschnittenen Proben aus DC04 in Abbildung 6.51 festgestellt werden. Im LCF-Bereich tritt ein hoher Schwingfestigkeitsabfall auf, während die Dehnungswöhlerlinien sich im HCF-Bereich dem Referenzzustand annähern. In diesem Fall ist die Kaltverfestigung an der Schnittkante für die Abnahme der Duktilität in der Randzone und somit für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich verantwortlich.

Ähnlich verhält es sich bei den schergeschnittenen Proben aus DP800 und CP800, wenn die Versuchspunkte im LCF-Bereich separat ausgewertet werden. Die ermittelte LCF-Dehnungswöhlerlinie weist im LCF-Bereich einen deutlichen Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten auf und nähert sich mit zunehmender Schwingspielzahl im HCF-Bereich der Referenzwöhlerlinie an, siehe Abbildung 7.10 und Abbildung 7.15. Auch in diesem Fall ist die Kaltverfestigung an der Schnittkante für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich verantwortlich.

Kennzeichnend für den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich ist immer eine deutliche Verschiebung der plastischen Geraden gegenüber der plastischen Geraden des Referenzzustands zu geringeren Schwingfestigkeiten. Die Lage der elastischen Geraden verändert sich vergleichsweise nur minimal, was das Zusammenlaufen der Dehnungswöhlerlinien mit steigender Schwingspielzahl bewirkt.

In Abbildung 7.24 wird dieses Verhalten im LCF-Bereich bei abnehmender Duktilität in der Randzone vereinfacht nachgebildet, indem die plastische Gerade des Referenzzustands mit einem konstanten Faktor zu niedrigeren Schwingfestigkeiten verschoben wird, während die elastische Gerade unverändert bleibt.

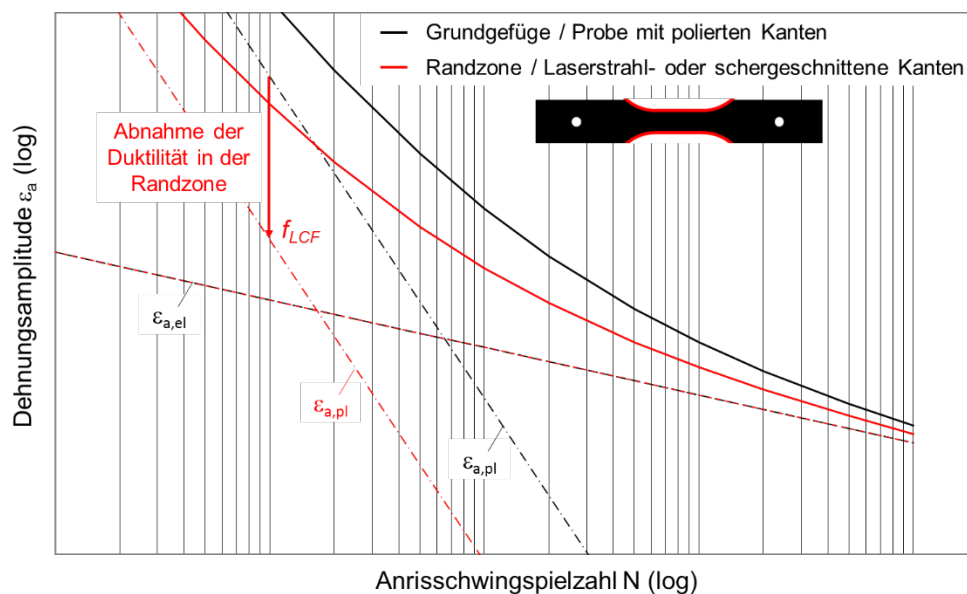


Abbildung 7.24: Einfluss einer abnehmenden Duktilität in der Randzone auf die plastische Gerade und die Dehnungswöhlerlinie, schematisch

Um den Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich nachbilden zu können, muss eine Korrelation zwischen dem Abminderungsfaktor der plastischen Geraden und einer Zustandsgröße gefunden werden, welche die Abnahme der Duktilität in der Randzone gegenüber dem Grundgefüge beschreibt. Daher ist in Abbildung 7.25 der plastische Dehnungsanteil  $\varepsilon_{a,pl}$  der Gesamtdehnungsamplitude, der bei  $10^3$  Schwingspielen ermittelt wird, über der lokalen Vickershärte in der



Randzone aufgetragen. Abgebildet sind die Werte der Proben aus DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5 mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten. Die Härtewerte entsprechen bei den polierten Proben der Härte des Grundgefüges aus Tabelle 6.3. Bei den schergeschnittenen Proben ist die maximal gemessene Vickershärte an der Schnittkante abgebildet. Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben wird die gemittelte Gefügehärte in der Wärmeeinflusszone ebenfalls aus Tabelle 6.3 verwendet.

Bei allen Werkstoffen ist an den abfallenden Trendlinien deutlich zu erkennen, dass der Wert des plastischen Dehnungsanteils mit steigender Gefügehärte in der Randzone abnimmt. Das bedeutet, dass die plastische Gerade mit steigender Aufhärtung der Randzone gegenüber dem Grundgefüge zu immer kleineren Schwingfestigkeiten verschoben wird. Das bestätigt die Annahme, wonach die steigende Härte beziehungsweise Festigkeit und die damit verbundene abnehmende Duktilität in der Randzone für die Abnahme der Schwingfestigkeit im LCF-Bereich verantwortlich ist. Wie stark der plastische Dehnungsanteil bei steigender Randzonenhärte abnimmt, ist von Werkstoff zu Werkstoff stark verschieden, wie an den unterschiedlichen Neigungen der Trendlinien in Abbildung 7.25 zu erkennen ist.

Das Uniform Material Law kurz UML nach [21] dient zur Abschätzung synthetischer Dehnungswöhlerlinien basierend auf der Zugfestigkeit des Werkstoffs, siehe Kapitel 2.5.1.4. Nach dem UML nimmt der Duktilitätskoeffizient  $\varepsilon_f'$  ab einem bestimmten  $R_m$ -E-Verhältnis mit zunehmender Zugfestigkeit ab, siehe Gleichungen (2.13) bis (2.15). Da eine zunehmende Festigkeit bedeutet, dass gleichzeitig die Duktilität abnimmt, soll im Folgenden geprüft werden, ob der Schwingfestigkeitsabfall der plastischen Geraden im LCF-Bereich mit dem UML erfasst werden kann. Dafür wird die Zugfestigkeit mit der Näherungsgleichung (7.2) aus der Vickershärte abgeschätzt nach [108]. Die Werte des plastischen Dehnungsanteils, die sich nach dem UML bei  $10^3$  Schwingspielen errechnen lassen, sind ebenfalls in Abbildung 7.25 über der Vickershärte aufgetragen.

$$R_m \approx 3,3 \cdot HV \quad (7.2)$$

Vergleicht man die Werte der verschiedenen Werkstoffe mit dem Verlauf des plastischen Dehnungsanteils nach dem UML, so lässt sich feststellen, dass das UML in grober Näherung einen gemittelten Verlauf aller abgebildeten Werte darstellt. Um den genauen Abfall des plastischen Dehnungsanteils in Abhängigkeit der zunehmenden Randzonenhärte abzuschätzen, ist das UML jedoch zu ungenau. So wird beispielsweise beim DC04 der Abfall des plastischen Dehnungsanteils aufgrund der zunehmenden Randzonenhärte mit dem UML deutlich unterschätzt. Eine Berücksichtigung des abnehmenden plastischen Dehnungsanteils nach dem UML würde in diesem

Fall zu einem nicht-konservativen Verlauf der abgeschätzten Dehnungswöhlerlinie im LCF-Bereich führen.

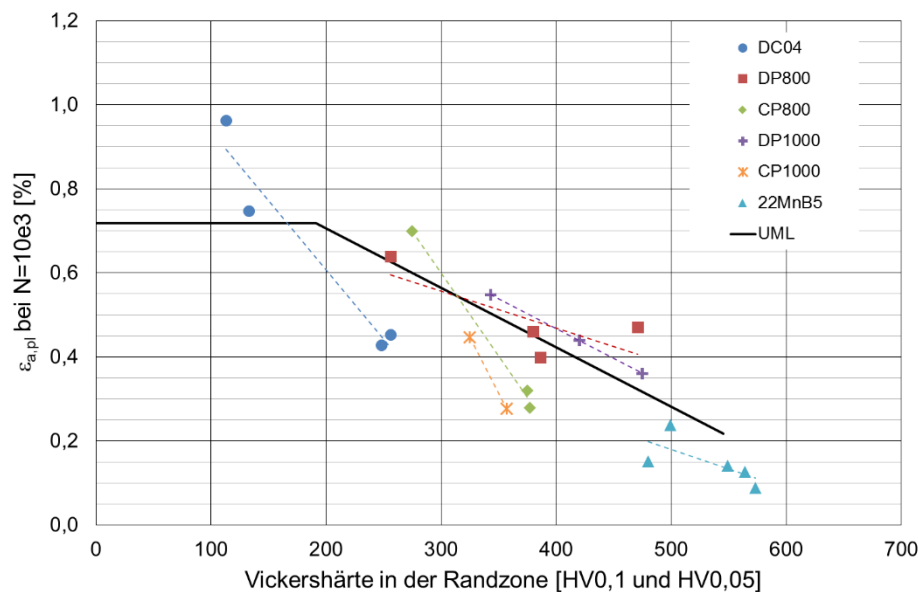


Abbildung 7.25: Plastischer Dehnungsanteil im LCF-Bereich ( $N = 10^3$ ) aufgetragen über der Randzonenhärte von Proben aus DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5 mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten

Neben dem UML gibt es weitere synthetische Ansätze zur Ableitung der zyklischen Kennwerte aus den mechanisch-technologischen Kennwerten. Die Ansätze nach [98] und [13], genannt „Material Law of Steel Sheet“ (MLSS) und „Method of Variable Slopes“ (MVS), beziehen sich explizit auf die zyklischen Kennwerte von Stahlfeinblech. Beide Verfahren bieten außerdem die Möglichkeit die zyklischen Kennwerte des Referenzzustands infolge eines Umformprozesses anzupassen. Eine Weiterentwicklung des MVS erfolgte in [109]. Da die experimentell ermittelte Dehnungswöhlerlinien des Referenzzustands im vorliegenden Forschungsvorhaben bei allen Werkstoffen mit dem UML besser abgebildet werden als mit dem MLSS und den beiden Varianten des MVS, werden die Ansätze im vorliegenden Zusammenhang nicht weiter berücksichtigt. Dennoch ist zu erwähnen, dass auch das MVS eine abfallende Schwingfestigkeit im LCF-Bereich bei zunehmender Werkstofffestigkeit berücksichtigt. Dies erfolgt indem der Duktilitätskoeffizient  $c$  verkleinert wird und die plastische Gerade dadurch einen steileren Verlauf annimmt.

Nach Gleichung (7.3) lässt sich aus dem Vergleich des plastischen Dehnungsanteils des polierten Kantenzustands und einem abweichenden Kantenzustand bei  $10^3$  Schwingspielen im LCF-Bereich der Abminderungsfaktor  $f_{LCF}$  ermitteln. Dieser Abminderungsfaktor ist in Abbildung 7.26 in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands abgebildet.

$$f_{LCF} = \frac{\varepsilon_{a,pl,N=10e3,Kante}}{\varepsilon_{a,pl,N=10e3,poliert}} \quad (7.3)$$

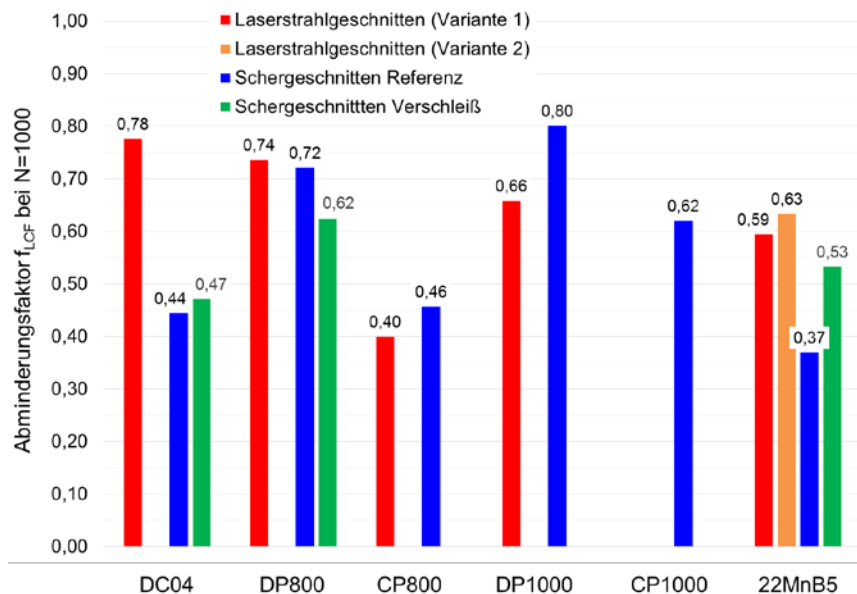


Abbildung 7.26: Abminderungsfaktor  $f_{LCF}$  des plastischen Dehnungsanteil bei 1000 Schwingspielen in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands

In Abbildung 7.26 kann ebenfalls keine eindeutige Korrelation zwischen dem Abminderungsfaktor und dem Werkstoff beziehungsweise dem Kantenzustand festgestellt werden.

## 7.6.2 HCF-Bereich

Die schergeschnittenen Proben aus DP800, CP800, DP1000, CP1000, 22MnB5 sowie die laserstrahlgeschnittenen Proben aus 22MnB5 weisen im HCF-Bereich unter dehnungskontrollierter Beanspruchung einen zum Teil erheblichen Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten auf. Während im LCF-Bereich eine abnehmende Duktilität in der Randzone zu einer abnehmenden Schwingfestigkeit führt, ist im HCF-Bereich eine Verschlechterung der Oberflächenqualität verantwortlich für den Schwingfestigkeitsabfall.

Um die Versagensmechanismen im HCF- und LCF-Bereich getrennt voneinander beurteilen zu können, wurden die Versuche im HCF-Bereich an den schergeschnittenen Proben aus DP800, CP800, DP1000 und CP1000 (siehe Abbildung 7.10, Abbildung 7.15, Abbildung 7.17 und Abbildung 7.18) separat ausgewertet. Bei den Proben aus dem hochfesten Werkstoff 22MnB5 in Abbildung 6.61 ist keine separate Versuchsauswertung notwendig, da die Ergebnisse aller durchgeführten Versuche im HCF-Bereich liegen. Bei allen HCF-Dehnungswöhlerlinien kann mit steigender Schwingspielzahl ein zunehmender Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten festgestellt werden. Mit sinkender Schwingspielzahl nähern sich die HCF-

---

Dehnungswöhlerlinien dem Referenzzustand an oder schneiden ihn sogar und zeigen somit einen abnehmenden Schwingfestigkeitsabfall. Das deutet darauf hin, dass der Einfluss durch die Rauheit an der Oberfläche mit zunehmender Beanspruchung erwartungsgemäß abnimmt.

Während im LCF-Bereich die Verschlechterung der Schwingfestigkeit hauptsächlich von dem plastischen Dehnungsanteil ausgeht, sind im HCF-Bereich sowohl der plastische als auch der elastische Dehnungsanteil am Schwingfestigkeitsabfall beteiligt. Der zunehmende Schwingfestigkeitsabfall mit steigender Schwingspielzahl wird durch einen steileren Verlauf der plastischen und elastischen Geraden verursacht. Das bedeutet, die Duktilitäts- und Schwingfestigkeitsexponenten  $c$  und  $b$  werden kleiner gegenüber dem Referenzzustand. Dass nicht nur der elastische, sondern auch der plastische Dehnungsanteil zum Schwingfestigkeitsabfall beiträgt, zeigt, dass die abnehmende Duktilität in der Randzone nicht nur im LCF-Bereich, sondern auch im HCF-Bereich Auswirkung auf das Schwingfestigkeitsverhalten hat.

In Abbildung 7.27 ist dieses Verhalten exemplarisch dargestellt. Dabei werden die elastische und plastische Gerade im Transition-Point  $P_t$  fixiert und im HCF-Bereich um den entsprechenden Schwingfestigkeitsabfall herabgesetzt. Die Geraden rotieren somit um den Transition-Point und es tritt lediglich im HCF-Bereich ein Abfall der Schwingfestigkeit gegenüber dem Referenzzustand auf. Dieses nachgebildete Verhalten stellt eine Idealisierung dar. Bei keinem der Werkstoffe rotierten die beiden Geraden um exakt diesen Punkt. Eine geeignete Korrelation von einem der zyklischen Kennwerte mit einer Zustandsgröße, die mitverantwortlich für den Schwingfestigkeitsabfall im HCF-Bereich ist, wie beispielsweise die Zugfestigkeit oder die Rauheit am Versagensort, konnte bei keinem der Werkstoffe festgestellt werden.

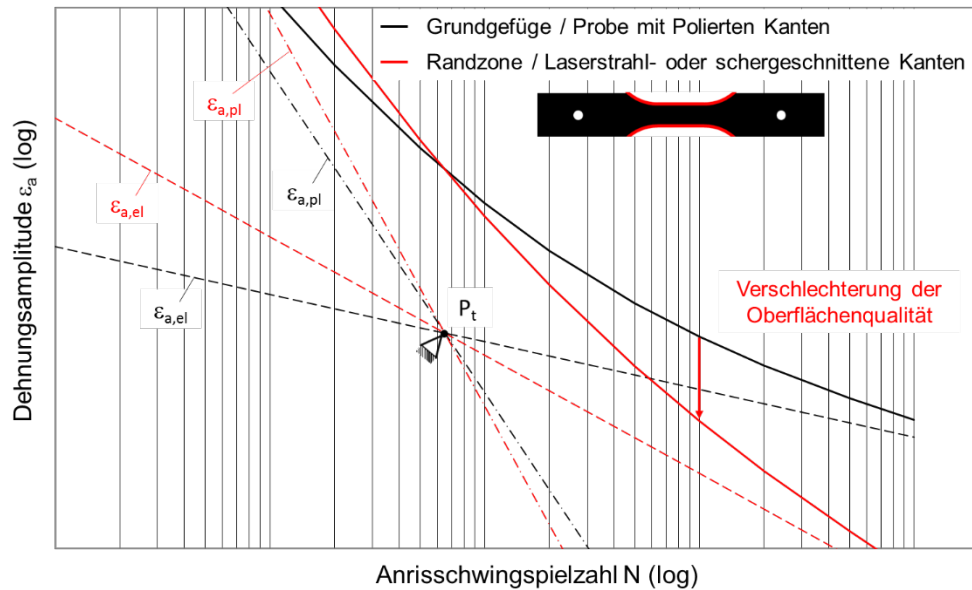


Abbildung 7.27: Einfluss einer Verschlechterung der Oberflächenqualität auf die elastische und plastische Gerade sowie die Dehnungswöhlerlinie, schematisch

Ein ähnliches Verhalten wie unter dehnungskontrollierter Beanspruchung kann an den Wöhlerlinien unter spannungskontrollierter Beanspruchung beobachtet werden. Bei den Wöhlerlinien der schergeschnittenen Proben aus DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5 nimmt der Neigungsexponent  $k$  ab und verursacht so einen steileren Verlauf der Zeitfestigkeitsgeraden. Das führt ebenfalls zu einem zunehmenden Schwingfestigkeitsabfall mit steigender Schwingspielzahl.

Mit Gleichung (2.8) kann anhand der Spannungsamplitude und dem E-Modul der elastische Dehnungsanteil  $\varepsilon_{a,el}$  aus den spannungskontrollierten Versuchen berechnet werden. Auf diese Weise kann die Zeitfestigkeitsgerade in das Diagramm der Dehnungswöhlerlinie übertragen werden und müsste im Idealfall deckungsgleich mit der elastischen Geraden verlaufen. Um dies zu überprüfen, ist in Abbildung 7.28 der Wert von  $\varepsilon_{a,el}$  aus den spannungskontrollierten Versuchen über  $\varepsilon_{a,el}$  aus den dehnungskontrollierten Versuchen bei  $10^5$  Schwingspielen in Abhängigkeit des Werkstoffs abgebildet.

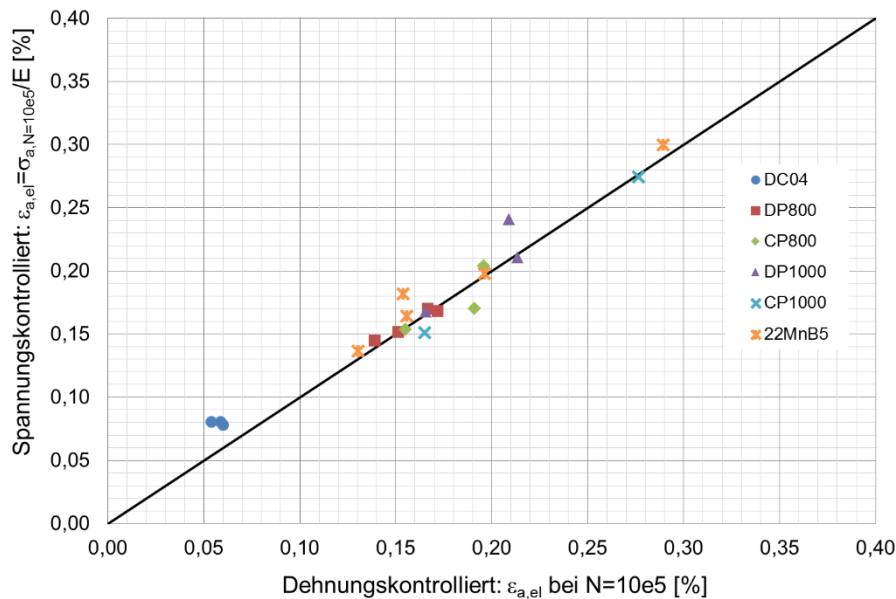


Abbildung 7.28: Vergleich der elastischen Dehnungsanteile bei  $10^5$  Schwingspielen aus den spannungs- und dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an ungekerbten Proben mit polierten, laserstrahlgelassenen und schergelassenen Kanten

Es ist festzustellen, dass die beschriebene Bedingung bei allen Werkstoffen und Kantenzuständen hinreichend gut erfüllt wird. Das bedeutet, dass die Abminderung der elastischen Geraden im HCF-Bereich aus den spannungskontrollierten Versuchen auf die dehnungskontrollierten Versuche übertragbar ist. Dementsprechend können Abminderungsfaktoren, welche den Oberflächeneinfluss unter spannungskontrollierter Beanspruchung berücksichtigen, auch auf den elastischen Dehnungsanteil im HCF-Bereich angewendet werden.

## 7.7 Bauteilschwingfestigkeitsversuche

Die dargestellten Ergebnisse der Bauteilschwingfestigkeitsversuche zeigen eine Tendenz des Einflusses der jeweiligen Kantenbearbeitung auf. Nachfolgend soll nochmal der Einfluss der Kantenbearbeitung bei unterschiedlichen Werkstoffgüten diskutiert werden.

Abbildung 7.29 zeigt am Beispiel Laserschneiden das resultierende Schwingfestigkeitsverhalten der bauteilnahen Proben von DP800 und DP1000 in Abhängigkeit der Kraftamplitude auf.

Auf dem Lastniveau  $F_a = 2,3$  kN zeigt der Werkstoff DP 1000 ein deutlich besseres Schwingfestigkeitsverhalten im Vergleich zu DP 800. Auf dem höheren Lastniveau ergibt sich eine uneinheitliche Tendenz hinsichtlich des Werkstoffeinflusses.

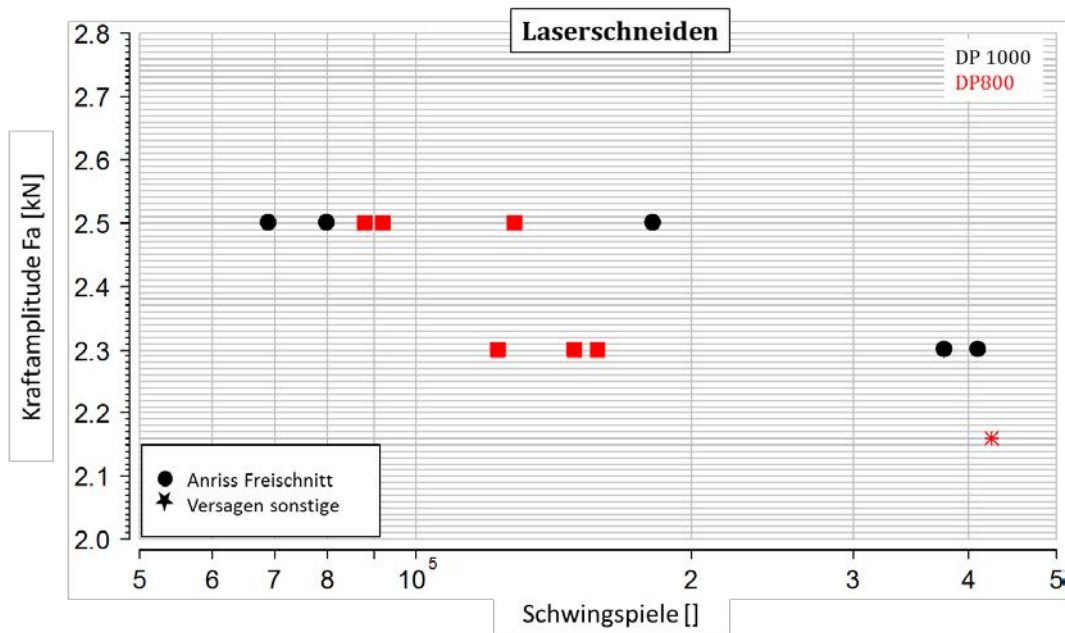


Abbildung 7.29: Wöhlerdiagramm für lasergeschnittene Bauteile aus Werkstoffen DP 800 und DP 1000

Der Werkstoffeinfluss beim Scherschneiden ist in Abbildung 7.30 dargestellt. Da nur bei den wenigsten Bauteilen das Versagen am Freischnitt auftritt, lässt sich keine belastbare Aussage zum Werkstoffeinfluss ableiten.

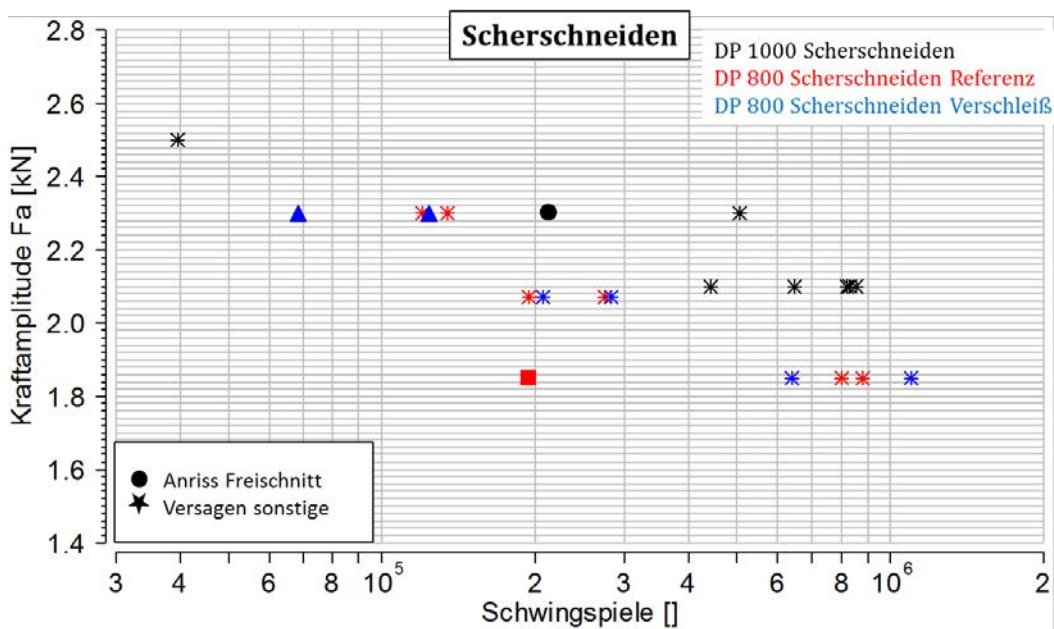


Abbildung 7.30: Darstellung der Schwingfestigkeitseigenschaften für die Kantenbearbeitung Scherschneiden in Abhängigkeit des untersuchten Werkstoffes

Die Ergebnisse auf dem Lastniveau  $F_a = 2,3$  kN geben einen Hinweis auf ein besseres Schwingfestigkeitsverhalten des Werkstoffes DP 1000 gegenüber DP 800.

---

Zusammenfassend zeigen sich die experimentellen Versuche mit der dargestellten bauteilnahen Probengeometrie als nicht ganz eindeutig in Bezug auf den Einfluss der Kantenbearbeitung. Es konnten sehr starke Einflüsse der vorhergehenden Fertigung beim Abkanten und auch beim anschließenden Fügen der einzelnen Profile zueinander festgestellt werden, die dem Einfluss der untersuchten Kantenbearbeitungen im Freischnitt überwiegen können. Um eine bauteilnahe Probengeometrie für zukünftige Vergleiche des Einflusses der Kantenbearbeitung unterschiedlicher Grundwerkstoffe heranziehen zu können, bedarf es noch konstruktiver und fertigungstechnischer Optimierungen. Insbesondere sollte das Augenmerk auf den Bauteilbereich des Freischnittes mit sich anschließenden Flansch gelegt werden. Einige T-Stoßprofile zeigten einen Einfluss der thermischen Füge­technik auf. Dennoch konnte mittels dieser Prinzipbauteilgeometrie eine Tendenz aufgezeigt werden, die sich mit den Ergebnissen aus den zyklischen Versuchsergebnissen mittels gekerbten Flachproben decken. Die wenigen auswertbaren Versuche zeigen hinsichtlich des Schwingfestigkeitsverhaltens die gleiche Reihenfolge wie bei den Probenversuchen: Scherschneiden < Laserschneiden < Fräsen/Polieren.



## 8 Vorschlag zur Berücksichtigung des Kantenzustands im Örtlichen Dehnungskonzept

Eines der Ziele des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, eine Möglichkeit darzustellen, wie sich die an polierten Kanten ermittelten zyklischen Werkstoffkennwerte auf andere Kantenbearbeitungszustände übertragen lassen, um auf diese Weise den Kanteneinfluss bei einer Lebensdauerauslegung nach dem Örtlichen Dehnungskonzept berücksichtigen zu können, siehe Kapitel 1.2.

In Kapitel 7.6 werden die Versagensmechanismen beschrieben, die bei den laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben unter dehnungskontrollierter Beanspruchung im LCF- und HCF-Bereich zu einem Abfall der Schwingfestigkeit gegenüber den Proben mit polierten Kanten führen. Diese Versagensmechanismen sollen nun verwendet werden, um die Dehnungswöhlerlinie für einen beliebigen Kantenzustand aus der Dehnungswöhlerlinie des Referenzzustands abzuleiten.

Es wurde aufgezeigt, dass die abnehmende Duktilität in der Randzone sowohl im LCF-Bereich als auch im HCF-Bereich zu einer Abminderung des plastischen Dehnungsanteils gegenüber dem Referenzzustand führt. Für die abnehmende Duktilität in der Randzone sind Kaltverfestigungen beim Scherschneiden oder Gefügeumwandlungen beim Laserstrahlschneiden verantwortlich. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird die plastische Gerade des Referenzzustands um den konstanten Faktor  $f_{LCF} < 1$  nach Gleichung (7.3) zu geringeren Schwingfestigkeiten verschoben werden, siehe Abbildung 7.24. Durchgeführt wird diese Verschiebung durch eine Absenkung des Duktilitätskoeffizient des Referenzzustands  $\varepsilon'_{f,poliert}$  um den beschriebenen Faktor:

$$\varepsilon'_{f,Kante} = f_{LCF} \cdot \varepsilon'_{f,poliert} \quad (8.1)$$

Die Neigung der plastischen Geraden, der Duktilitätsexponent  $c$ , bleibt im Sinne einer Parallelverschiebung unverändert. Für den Faktor  $f_{LCF}$  konnte keine geeignete Korrelation mit der Randzonenhärte oder dem Kantenbearbeitungszustand gefunden werden, die für eine zuverlässige Bestimmung von  $f_{LCF}$  geeignet ist. Daher wird bei der Festlegung von  $f_{LCF}$  empfohlen, sich an den ermittelten Werten in Abbildung 7.25 oder Abbildung 7.26 zu orientieren.

Eine Verschlechterung der Oberflächenqualität an den Schnittkanten führt bei den schergeschnittenen Proben aus den hochfesten Stählen DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5 im HCF-Bereich zu einem zum Teil erheblichen Schwingfestigkeitsabfall, der mit steigender Schwingspielzahl zunimmt. Um diesen Schwingfestigkeitsabfall im HCF-Bereich zu berücksichti-

gen, wird eine Rotation der elastischen Geraden des Referenzzustands um den Transition-Point  $P_t$  durchgeführt. Die elastische Gerade wird dafür im Transition-Point fixiert und bei einer definierten Schwingspielzahl im HCF-Bereich um den Abminderungsfaktor  $f_{HCF} < 1$  zu einer kleineren Dehnungsamplitude verschoben. In Abbildung 8.3 ist die Rotation der elastischen Geraden gemeinsam mit der Parallelverschiebung der plastischen Geraden zur Anpassung der Referenz-Dehnungswöhlerlinie an den Kantenzustand schematisch dargestellt.

Für die Festlegung des Abminderungsfaktors  $f_{HCF}$  bieten sich dem Anwender verschiedene Möglichkeiten. Liegt ein Werkstoff vor, der in seinen Festigkeits- und Gefügeeigenschaften einem der Werkstoffe aus dem vorliegenden Vorhaben ähnelt, können die experimentell ermittelten Abminderungsfaktoren aus den spannungs- und dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen bei  $10^5$  Schwingspielen verwendet werden. Diese Werte sind in den entsprechenden Ergebnistabellen in Kapitel 6.3 und 6.4 zu finden. In Kapitel 7.6.2 konnte festgestellt werden, dass die Abminderung der elastischen Geraden und der Zeitfestigkeitsgeraden bei  $10^5$  Schwingspielen im HCF-Bereich übereinstimmen. Dementsprechend ist es zulässig, die Abminderungsfaktoren aus den spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen für die Absenkung der elastischen Geraden im HCF-Bereich zu verwenden:

$$f_{HCF} = \frac{\varepsilon_{a,el,N=10e5,Kante}}{\varepsilon_{a,el,N=10e5,poliert}} \quad (8.2)$$

Unterscheidet sich hingegen der vorliegende Stahl-Feinblech-Werkstoff in seinen Festigkeits- und Gefügeeigenschaften deutlich von den Werkstoffen im vorliegenden Forschungsvorhaben, kann der Abminderungsfaktor  $f_{HCF}$  anhand der Zugfestigkeit, des Kantenzustands und der Kerbformzahl mit Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2 abgeschätzt werden. In den beiden Abbildungen ist  $f_{HCF}$  in Abhängigkeit des Werkstoffs, des Kantenzustands und der Kerbgeometrie dargestellt. Die abgebildeten Werte für  $f_{HCF}$  entsprechen den experimentell ermittelten Werten der relativen Schwingfestigkeit aus den Ergebnistabellen in Kapitel 6.3.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit  $f_{HCF}$  anhand von gültigen Regelwerken wie der FKM-Richtlinie [58] zu bestimmen. Da sich der Abminderungsfaktor in diesem Fall auf die Schwingfestigkeit bei  $10^6$  Schwingspielen bezieht, müsste die Schwingspielzahl, bei welcher der Faktor angesetzt wird, entsprechend angepasst werden. Dabei ist zu beachten, dass mit [58] der Kanteneinfluss über die Oberflächenrauheit bei den hochfesten Werkstoffen CP800, CP1000 und 22MnB5 zum Teil erheblich unterschätzt wird und somit nicht in der Lage ist den auftretenden Kanteneinfluss zuverlässig zu erfassen, siehe Abbildung 7.20.

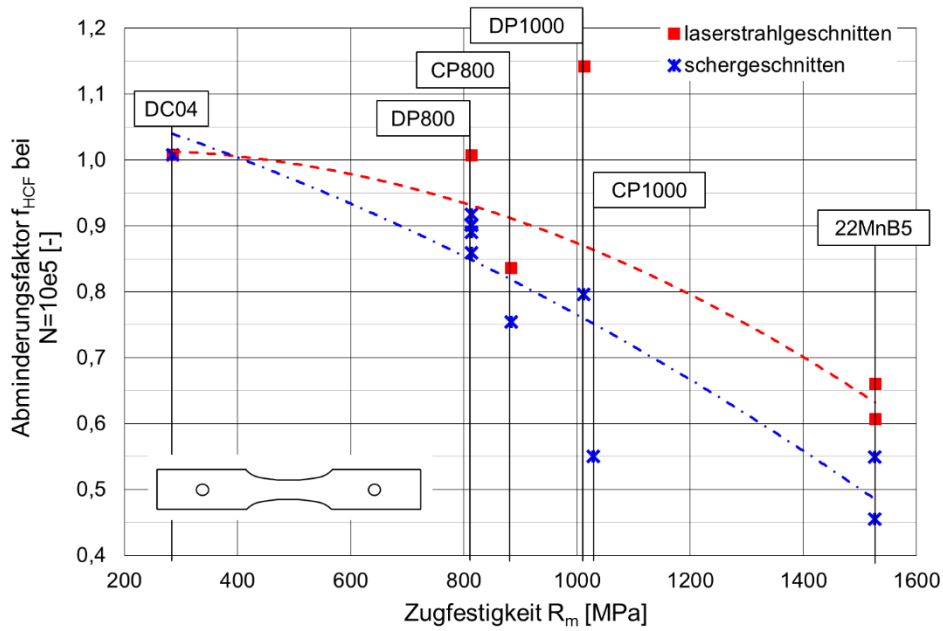


Abbildung 8.1: Abminderungsfaktor  $f_{HCF}$  aus spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Kantenzustands,  $K_t = 1$ ,  $R = -1$

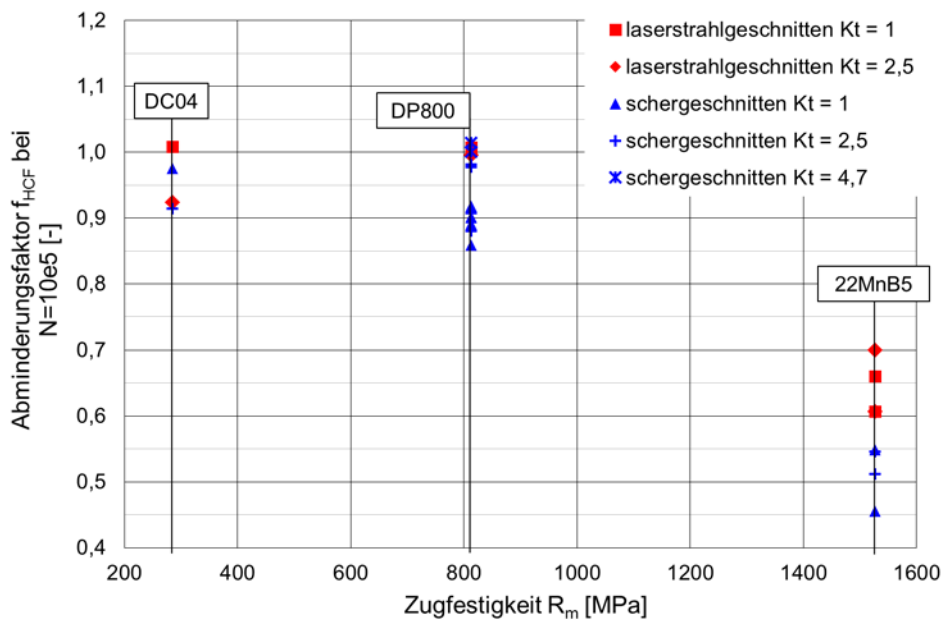


Abbildung 8.2: Abminderungsfaktor  $f_{HCF}$  aus spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen in Abhängigkeit des Werkstoffs, des Kantenzustands und der Kerbgeometrie,  $R = -1$

Durch die Rotation der elastischen Geraden wird der Schwingfestigkeitskoeffizient  $\sigma_f'$  und der Schwingfestigkeitsexponent  $b$  an den Kantenzustand angepasst. Die beiden Kennwerte lassen sich über das Aufstellen der Geradengleichung mithilfe der Zweipunkteform unter Beachtung der doppeltlogarithmischen Darstellung bestimmen. Verwendet wird dafür der Transition-Point sowie der Punkt, welcher bei einer definierten Schwingspielzahl auf der elastischen Geraden des Referenzzustands liegt und um den Faktor  $f_{HCF}$  abgemindert wird.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise zur Anpassung der elastischen Geraden an den Kantenzustand wird der in Kapitel 7.6.2 festgestellte steilere Verlauf der elastischen Geraden nachgebildet und auf diese Weise der mit steigender Schwingspielzahl zunehmende Schwingfestigkeitsabfall berücksichtigt. Für den Rotationspunkt der elastischen Geraden konnte keine geeignete Korrelation mit einer Zustandsgröße festgestellt werden. Bei Betrachtung der entsprechenden Dehnungswöhlerlinien in Kapitel 6.4 und 7.2 lässt sich feststellen, dass der Punkt, um welchen die elastische Gerade rotiert, in den meisten Fällen im Bereich nahe des Transition-Points liegt. Um für alle Werkstoffe einen einheitlichen und gleichzeitig werkstoffspezifischen Rotationspunkt festzulegen, wurde daher der Transition-Point ausgewählt.

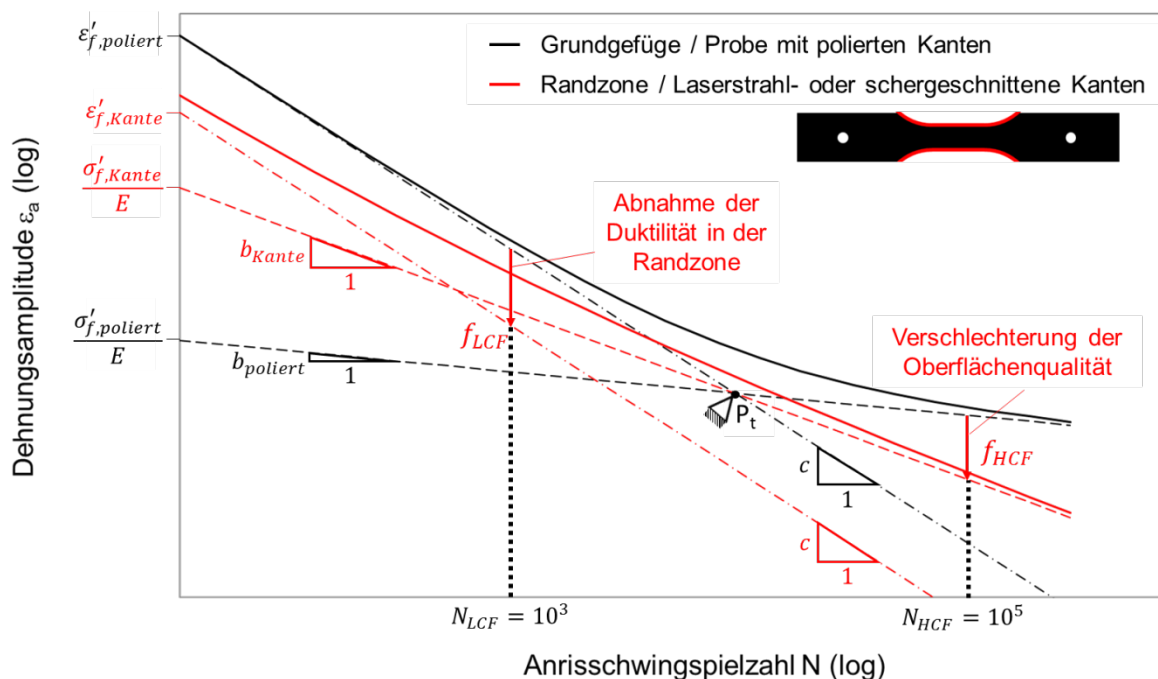


Abbildung 8.3: Einfluss einer Abnahme der Randzonenduktilität und der Verschlechterung der Oberflächenqualität auf die elastische und plastische Gerade sowie auf die Dehnungswöhlerlinie, schematisch

Bei der Anpassung der plastischen und elastischen Geraden aus dem Referenzzustand an den Kantenzustand mit der in diesem Kapitel beschriebenen Methode ist folgendes zu beachten. Mit zunehmender Werkstofffestigkeit liegt der Transition-Point bei immer niedrigeren Schwingspielzahlen. Der LCF-Bereich wird dementsprechend kleiner. Gleichzeitig nimmt der Kanteneinfluss im HCF-Bereich mit steigender Werkstofffestigkeit zu. Das bedeutet, dass in diesem Fall der Anpassung der elastischen Geraden an den Kantenzustand mit  $f_{HCF}$  für eine zuverlässige Abschätzung des Kanteneinflusses eine größere Bedeutung zukommt als der Verschiebung der plastischen Geraden. Umgekehrt verhält es sich bei Stahl-Feinblechen niedriger Festigkeit. Aufgrund der höheren Duktilität liegt der Transition-Point bei deutlich größeren Schwingspielzahlen. Der LCF-Bereich ist entsprechend größer. Gleichzeitig nimmt mit sinkender Werkstoffes-

tigkeit der Oberflächeneinfluss im HCF-Bereich ab, siehe Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Verschiebung der plastischen Geraden mit  $f_{LCF}$  ausschlaggebend ist für eine zuverlässige Abschätzung des Kanteneinflusses. Dieser Zusammenhang wird bei der Validierung der Methode in Kapitel 8.1 noch einmal verdeutlicht.

An den Ergebnissen aus den dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen an Proben aus den Werkstoffen DP800, CP800, DP1000, CP1000 und 22MnB5 wurde festgestellt, dass der Kantenzustand keinen Einfluss auf die stabilisierte Hysterese hat, siehe Kapitel 7.2. Die Versuchspunkte der laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben liegen deckungsgleich mit den Versuchspunkten der Proben mit polierten Kanten im zyklischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Dementsprechend darf auch der Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve keinen Kanteneinfluss aufweisen. Die zyklischen Kennwerte  $K'$  und  $n'$ , welche die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreiben, werden in der Regel mit der Kompatibilitätsbedingung (Kapitel 2.5.1.5) aus den vier zyklischen Kennwerten berechnet, welche die Dehnungswöhlerlinie beschreiben. Wird mit der in diesem Kapitel beschriebenen Methode der Verlauf der Referenz-Dehnungswöhlerlinie und damit die sie beschreibenden zyklischen Kennwerte an den Kantenzustand angepasst, so entstehen kantenspezifische zyklische Kennwerte, die von dem Referenzzustand abweichen. Diese Abweichung würde sich bei Anwendung der Kompatibilitätsbedingung auch auf den Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve auswirken, obwohl dieser, den Versuchsergebnissen nach, vom Kantenzustand unbeeinflusst ist. Die Kompatibilitätsbedingung wird somit bei einem auftretenden Kanteneinfluss nicht mehr erfüllt. Dies ist bei den Werkstoffen CP1000 und 22MnB5, bei welchen ein sehr hoher Kanteneinfluss auftritt, am deutlichsten zu erkennen, siehe Kapitel 7.2.4 und 7.2.5. Für die Berücksichtigung des Kanteneinfluss bei der rechnerischen Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept muss daher die Kompatibilitätsbedingung außer Kraft gesetzt werden und die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve des Referenzzustands verwendet werden.

## 8.1 Validierung der Methode

Im Folgenden soll an einigen Beispielen überprüft werden, wie gut der jeweilige Kantenzustand mit der beschriebenen Methode abgebildet werden kann. Dafür werden die aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinien den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Für den Abminderungsfaktor  $f_{LCF}$  werden die Werte in Abbildung 7.26 verwendet. Der Abminderungsfaktor  $f_{HCF}$  wird bei  $10^5$  Schwingspielen (bzw.  $N = 5 \times 10^5$  bei DCO4) angesetzt. Die verwendeten Werte für  $f_{HCF}$  stammen aus den spannungskontrollierten Versuchen und sind in den entsprechenden Ergebnistabellen in Kapitel 6.3 in der Spalte „Relative Schwingfestigkeit“ zu finden.

Bei den schergeschnittenen Proben aus DC04 in Abbildung 8.4 werden mit der beschriebenen Methode zur Berücksichtigung des Kanteneinflusses die Versuchsergebnisse im LCF-Bereich gut abgebildet. Mit steigender Schwingspielzahl wird jedoch eine zu große Abminderung des plastischen Dehnungsanteils gegenüber dem Referenzzustand abgeschätzt. Das führt im HCF-Bereich zu einer Überschätzung des Schwingfestigkeitsabfalls auch wenn die elastische Gerade gegenüber dem Referenzzustand nahezu unverändert verläuft und demnach ein nur sehr geringer Kanteneinfluss im HCF-Bereich vorliegt. Bei sehr duktilen Werkstoffen, wie dem DC04, dominiert bei einer Wechselverformung der plastische Dehnungsanteil über einen großen Schwingspielzahlbereich und hat auch noch im HCF-Bereich einen bedeutenden Anteil an der Gesamtdehnungsamplitude. Daher wirkt sich eine konstante Abminderung der plastischen Geraden auch relativ stark auf den Verlauf der Dehnungswöhlerlinie im HCF-Bereich aus. Dies gilt es bei der Anwendung der Methode zur Ableitung einer kantenspezifischen Dehnungswöhlerlinie insbesondere bei duktilen Werkstoffen zu berücksichtigen.

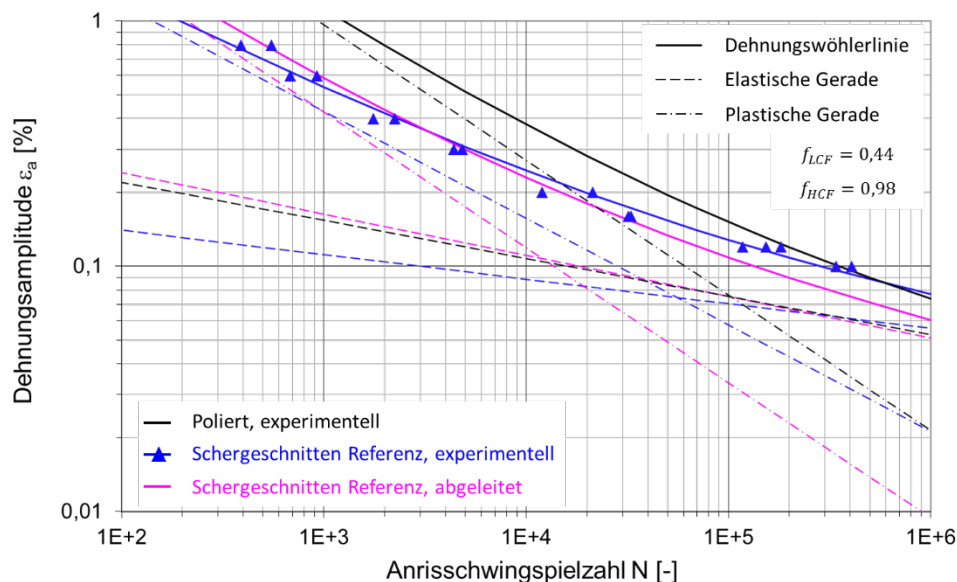


Abbildung 8.4: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff DC04, Kantenzustände: Poliert und schergeschnitten Referenz

Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP800 konnte im HCF-Bereich kein Schwingfestigkeitsabfall gegenüber den Proben mit polierten Kanten festgestellt werden. Daher bleibt die elastische Gerade aus dem Referenzzustand bei der Ableitung einer kantenspezifischen Dehnungswöhlerlinie in Abbildung 8.5 unverändert und nur die plastische Gerade wird aufgrund der abnehmenden Duktilität in der Randzone abgesenkt. Die experimentell ermittelte Dehnungswöhlerlinie wird in diesem Fall sehr gut von der abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie abgebildet.

Bei den schergeschnittenen Proben aus DP800 in Abbildung 8.6 wird die Lage der plastischen Geraden aus den Versuchsergebnissen mit der Methode ebenfalls sehr gut abgeschätzt. Die abge-

leitete elastische Gerade verläuft im LCF-Bereich deutlich oberhalb der experimentell ermittelten elastischen Geraden und führt daher im LCF-Bereich sowie im Übergangsbereich zum HCF-Bereich zu einer leichten Überschätzung der Anrisslebensdauer. Dieser Abschätzungsfehler könnte beispielsweise über eine Verkleinerung von  $f_{LCF}$  korrigiert werden.

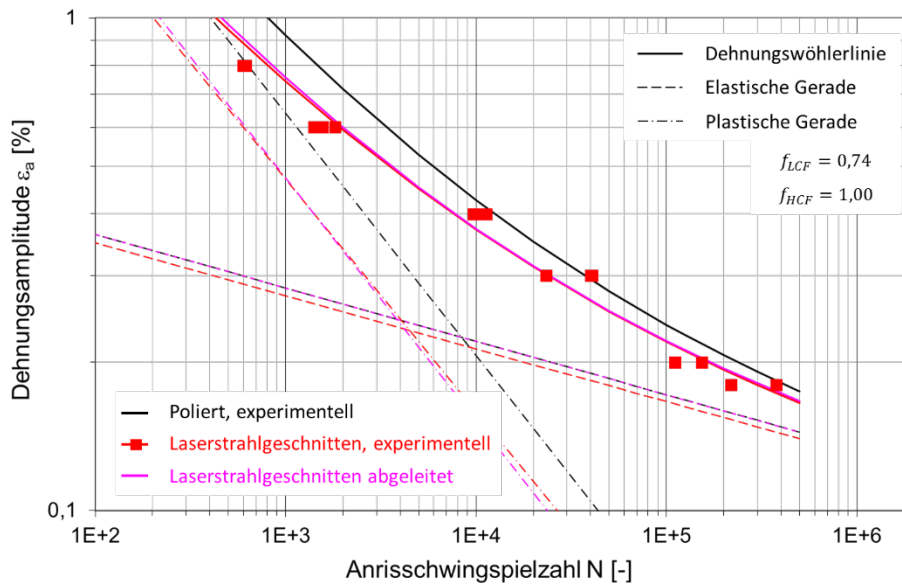


Abbildung 8.5: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert und laserstrahlgeschnitten

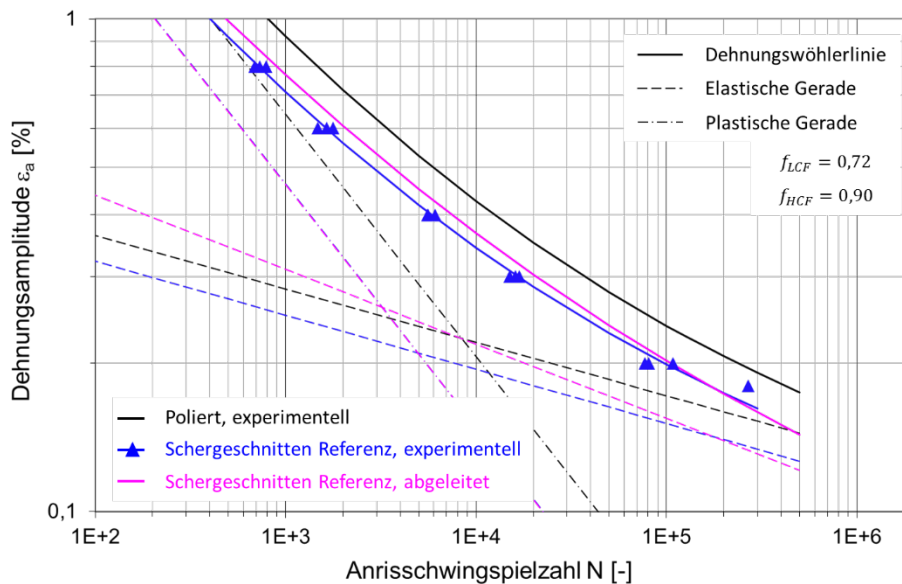


Abbildung 8.6: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff DP800, Kantenzustände: Poliert und schergeschnitten Referenz

Der gleiche Effekt lässt sich bei der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie bei schergeschnittenen Proben aus CP800 in Abbildung 8.7 beobachten. Auch hier wird der elastische Anteil im LCF-Bereich aufgrund der Rotation um den Transition-Point etwas überschätzt und es kommt dadurch zu einer leichten Überschätzung der Anrisslebensdauer im LCF-Bereich

sowie im Übergang zum HCF-Bereich. Auch in diesem Fall könnte der entstehende Fehler durch eine Verkleinerung von  $f_{LCF}$  korrigiert werden.

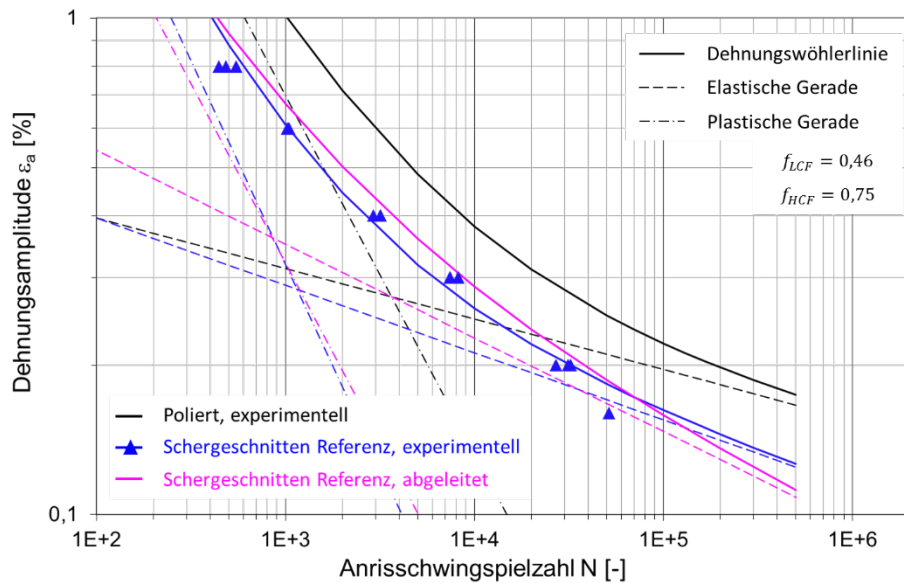


Abbildung 8.7: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff CP800, Kantenzustände: Poliert und schergeschnitten Referenz

Bei den laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben aus gehärtetem 22MnB5 in Abbildung 8.8 und Abbildung 8.9 wird der Schwingfestigkeitsabfall mit der beschriebenen Methode zur Ableitung einer kantenspezifischen Dehnungswöhlerlinie aus dem Referenzzustand ebenfalls sehr gut berücksichtigt.

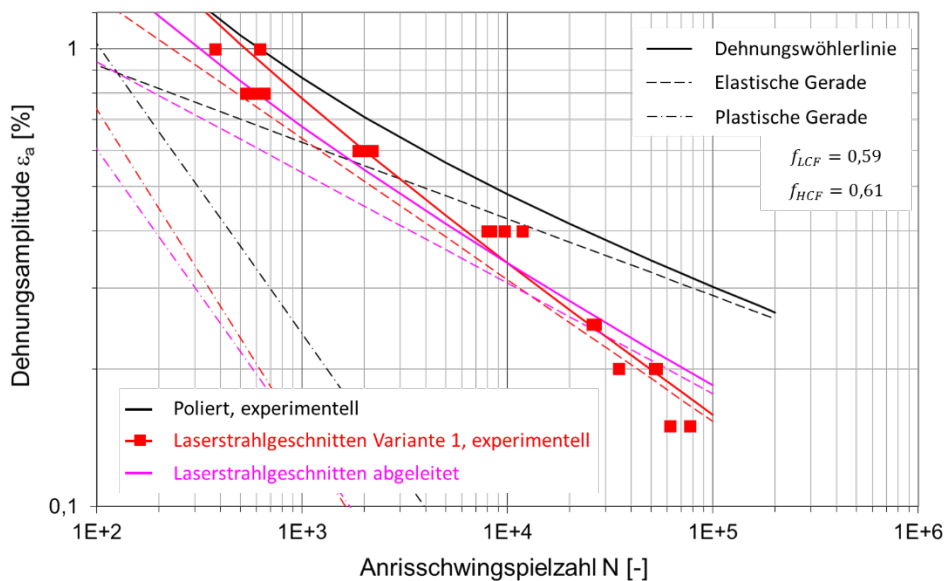


Abbildung 8.8: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff 22MnB5, Kantenzustände: Poliert und laserstrahlgeschnitten



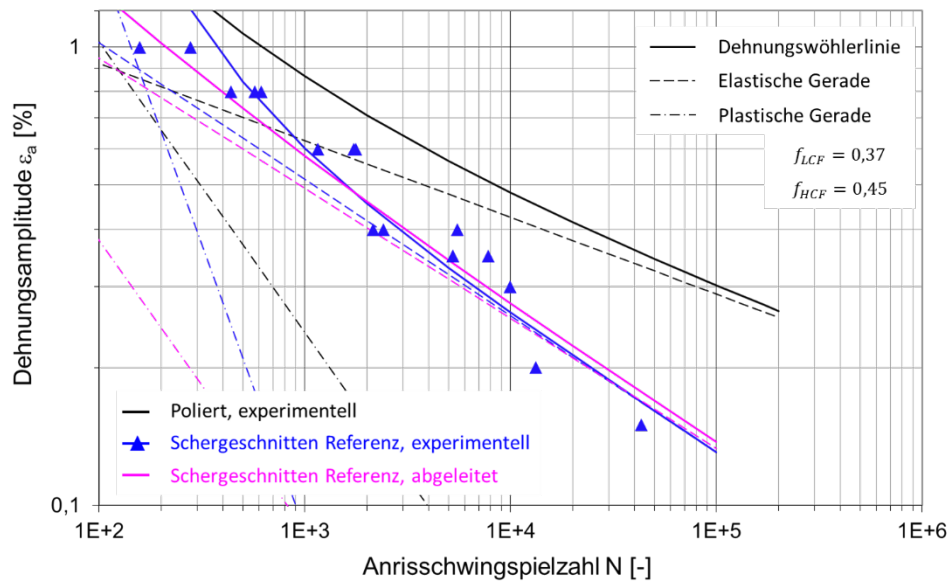


Abbildung 8.9: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff 22MnB5, Kantenzustände: Poliert und schergeschnitten Referenz

Bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP1000 konnte im HCF-Bereich kein Schwingfestigkeitsabfall festgestellt werden. Daher bleibt die elastische Gerade aus dem Referenzzustand bei der Ableitung einer kantenspezifischen Dehnungswöhlerlinie in Abbildung 8.10 unverändert und nur die plastische Gerade wird aufgrund der abnehmenden Duktilität in der Randzone abgesenkt. Die experimentell ermittelte Dehnungswöhlerlinie wird von der abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie sehr gut abgebildet.

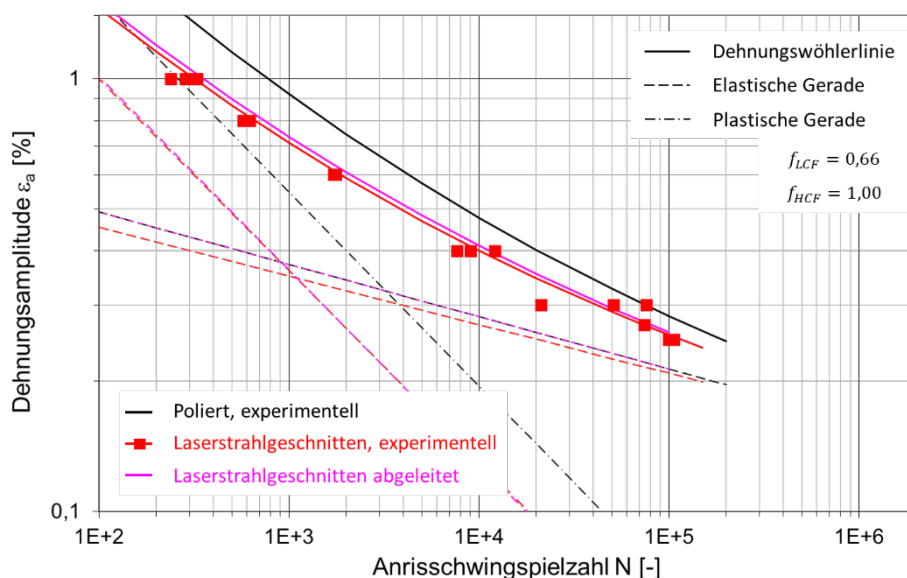


Abbildung 8.10: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff DP1000, Kantenzustände: Poliert und laserstrahlgeschnitten

Bei den schergeschnittenen Proben aus DP1000 in Abbildung 8.11 verläuft die abgeleitete elastische Gerade im LCF-Bereich und im Übergang zum HCF-Bereich oberhalb der experimentell ermittelten elastischen Geraden. Des Weiteren wird die Abminderung der plastischen Geraden im HCF-Bereich deutlich zu gering abgeschätzt. Das führt insgesamt dazu, dass der auftretende Schwingfestigkeitsabfall im LCF- und HCF-Bereich unterschätzt und die Anrisslebensdauer mit der abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie somit überschätzt wird. Dieser Abschätzungsfehler könnte beispielsweise über eine Verkleinerung von  $f_{LCF}$  korrigiert werden.

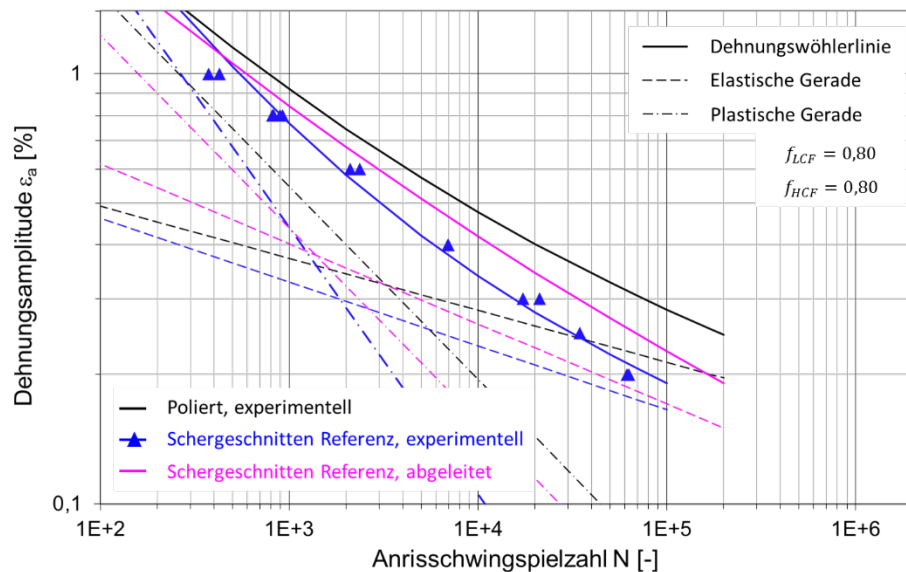


Abbildung 8.11: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff DP1000, Kantenzustände: Poliert und schergeschnitten Referenz

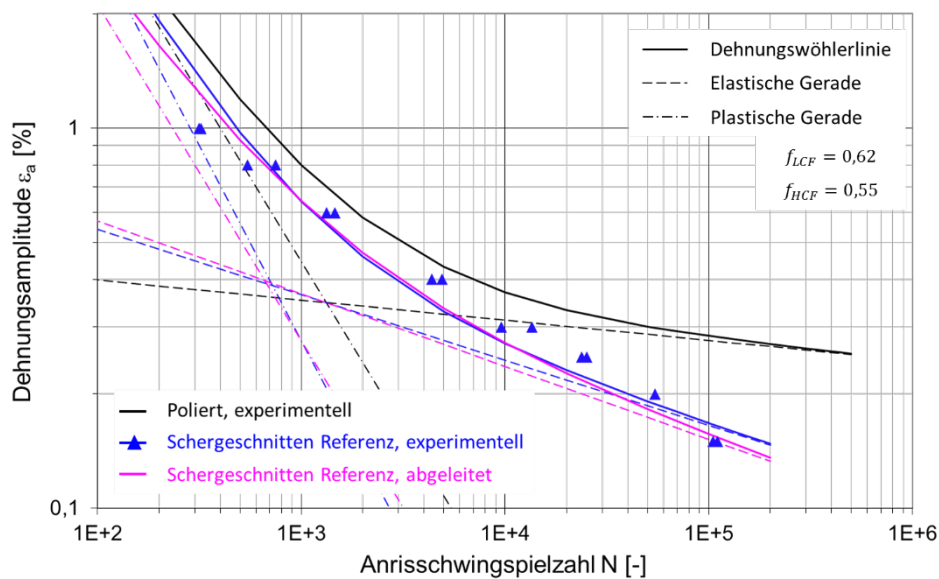


Abbildung 8.12: Vergleich der aus dem Referenzzustand abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie mit dem Versuchsergebnis, Werkstoff CP1000, Kantenzustände: Poliert und schergeschnitten Referenz

Bei den schergeschnittenen Proben aus CP1000 wird mit der beschriebenen Methode zur Ableitung einer kantenspezifischen Dehnungswöhlerlinie aus dem Referenzzustand eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt, siehe Abbildung 8.12.

## 8.2 Vergleich der Methode mit dem $\kappa$ -P-Verfahren

Ein weiteres Verfahren zur Berücksichtigung des Kanteneinflusses ist das in Kapitel 3.2.3 beschriebene  $\kappa$ -P-Verfahren, wonach die Schädigungsparameterwöhlerlinie um den konstanten Faktor  $\kappa$  in Lastrichtung abgemindert wird. Dabei beschreibt  $\kappa$  das Schwingfestigkeitsverhältnis von einer Probe mit rauher Oberfläche zu einer Probe mit polierter Oberfläche, siehe Gleichung (3.19). Das  $\kappa$ -P-Verfahren soll im Folgenden mit der neuen, im vorherigen Kapitel beschriebenen Methode verglichen werden. Für den Abminderungsfaktor  $\kappa$  wird dabei der gleiche Wert wie für  $f_{HCF}$  verwendet. Die Werte sind den entsprechenden Ergebnistabellen in Kapitel 6.3 in der Spalte „Relative Schwingfestigkeit“ zu entnehmen. Für einen Vergleich der Methoden werden mit den zyklischen Kennwerten die Schädigungsparameterwöhlerlinien nach Gleichung (2.23) ermittelt.

In Abbildung 8.13 sind die Schädigungsparameterwöhlerlinien der ungekerbten Proben aus DC04 mit polierten und schergeschnittenen Kanten zusammen mit den Schädigungsparameterwöhlerlinien abgebildet, welche nach den verschiedenen Methoden aus dem Referenzzustand abgeleitet wurden.

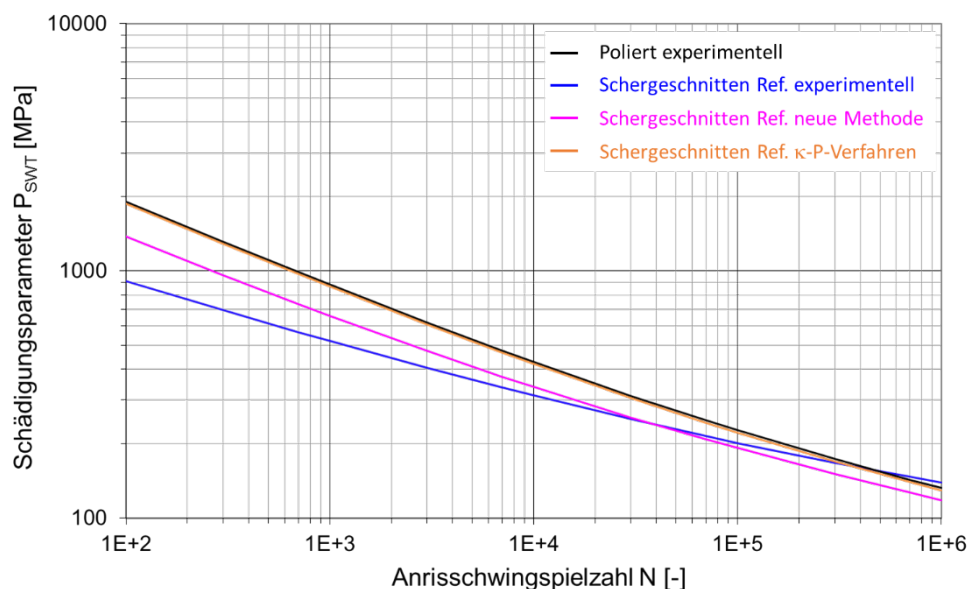


Abbildung 8.13: Vergleich verschiedener Methoden zur Berücksichtigung des Kanteneinflusses anhand der Schädigungsparameterwöhlerlinie von ungekerbten Flachproben aus DC04

Aufgrund des nur sehr geringen Kanteneinflusses im HCF-Bereich ist die Schädigungsparameterwöhlerlinie nach dem  $\kappa$ -P-Verfahren nur minimal gegenüber der Referenzwöhlerlinie verschoben. Dadurch wird mit dem  $\kappa$ -P-Verfahren die Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben im HCF-Bereich gut erfasst. Aufgrund des konstanten Abminderungsfaktors ist die Methode jedoch nicht in der Lage, den gleichzeitig im LCF-Bereich auftretenden Schwingfestigkeitsabfall infolge der abnehmenden Duktilität in der Randzone zu berücksichtigen.

Ein ähnliches Ergebnis kann auch bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aus DP800 oder DP1000 erwartet werden, bei welchen ebenfalls nur ein Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich auftritt, jedoch nicht im HCF-Bereich.

In Abbildung 8.14 und Abbildung 8.15 sind dieselben Schädigungsparameterwöhlerlinien dargestellt für Proben aus gehärtetem 22MnB5 und CP1000. Bei beiden Werkstoffen liegt ein sehr hoher Schwingfestigkeitsabfall aufgrund des Kantenzustands im HCF-Bereich vor, welcher von dem  $\kappa$ -P-Verfahren zuverlässig erfasst wird. Der konstante Abminderungsfaktor hat jedoch zur Folge, dass der Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich nach dem  $\kappa$ -P-Verfahren deutlich zu groß angenommen wird.

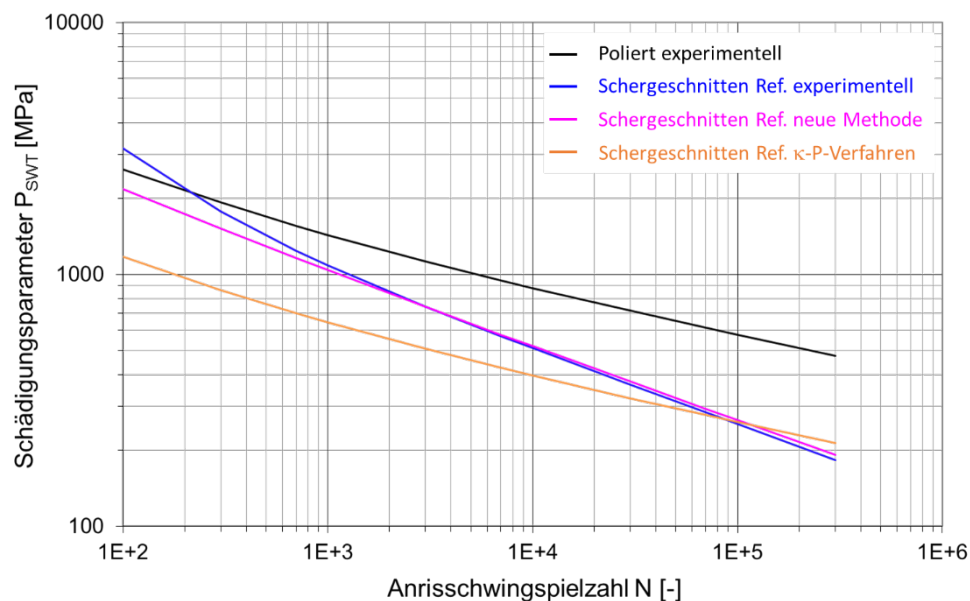


Abbildung 8.14: Vergleich verschiedener Methoden zur Berücksichtigung des Kanteneinfluss anhand der Schädigungsparameterwöhlerlinie von ungekerbten Flachproben aus 22MnB5

An diesen Beispielen wird die Schwäche des  $\kappa$ -P-Verfahrens deutlich. Aufgrund des konstanten Abminderungsfaktors  $\kappa$  kann der Kanteneinfluss nicht in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe berücksichtigt werden und es ist somit keine getrennte Betrachtung von LCF- und HCF-Bereich möglich. Das führt dazu, dass der Schwingfestigkeitsabfall im LCF-Bereich in der Regel nicht richtig erfasst wird. Mit der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens neu entwickel-

ten Methode werden hingegen die Oberflächeneinflüsse im LCF- und HCF-Bereich getrennt berücksichtigt. So ist in Abbildung 8.13, Abbildung 8.14 und Abbildung 8.15 deutlich zu erkennen, dass bei Betrachtung des gesamten Beanspruchungsbereichs die experimentell ermittelten Schädigungsparameterwöhlerlinien der schergeschnittenen Proben mit der neu entwickelten Methode besser abgebildet werden als mit dem  $\kappa$ -P-Verfahren. Das führt letztendlich auch zu einer genaueren Abschätzung der Anrisslebensdauer bei einer Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept.

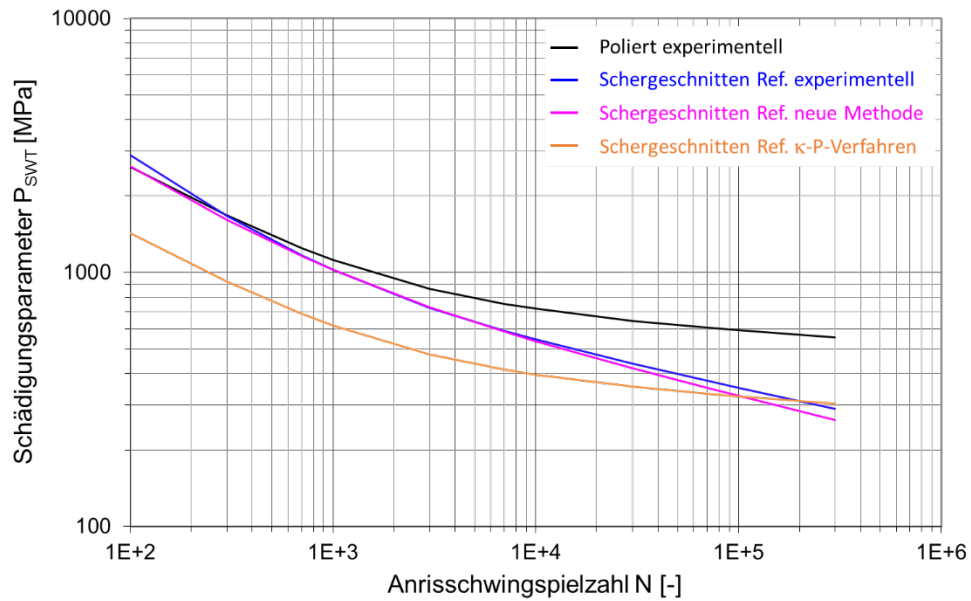


Abbildung 8.15: Vergleich verschiedener Methoden zur Berücksichtigung des Kanteneinfluss anhand der Schädigungsparameterwöhlerlinie von ungekerbten Flachproben aus CP1000

## 9 Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept

### 9.1 Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die Vorhersagegüte der neu entwickelten Methode bei der Lebensdauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept überprüft. Dafür werden die aus dem Referenzzustand abgeleiteten zyklischen Kennwerte für eine Lebensdauerabschätzung der ungekerbten und gekerbten Flachproben mit laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten verwendet. Im Anschluss werden exemplarisch die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen aus den spannungskontrollierten Versuchen verglichen.

Mit der in Kapitel 8 beschriebenen Methode werden der Duktilitätskoeffizient  $\varepsilon'_f$ , der Schwingfestigkeitskoeffizient  $\sigma'_f$  und der Schwingfestigkeitsexponent  $b$  des Referenzzustands an den vorliegenden Kantenzustand angepasst. In Kapitel 7.2 wurde festgestellt, dass der Einfluss des Kantenzustands auf die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve bei allen Werkstoffen, mit Ausnahme dem DC04, vernachlässigbar gering ist. Daher werden bei den folgenden Lebensdauerabschätzungen der laserstrahl- und schergeschnittenen Proben der zyklische Verfestigungskoeffizient  $K'$  und -exponent  $n'$  des Referenzzustands verwendet.

Die Berechnungen werden mit der Software winLIFE durchgeführt. Die Randbedingungen für die Berechnung werden aus den experimentellen Versuchen übernommen. Demnach wird ein Lastverhältnis von  $R = -1$  beziehungsweise  $R = 0,1$  vorgegeben und mit konstanten Lastamplituden gerechnet. Die Ermittlung der örtlichen elastisch-plastischen Beanspruchungen der Proben erfolgt nach Neuber [22], siehe Kapitel 2.5.1.6. Für die Schädigungsrechnung wird der  $P_{\text{SWT}}$ -Parameter nach [24] verwendet, welcher in Kapitel 2.5.1.7 genauer erklärt wird. Bei dem mittelspannungsfreien Lastverhältnis  $R = -1$  wird der Schädigungsparameter jedoch keinen Einfluss auf die Berechnung haben. Das Versagenskriterium Anriss wird beim Erreichen einer Schädigungssumme von  $D = 1$  festgelegt.

Des Weiteren gibt winLIFE dem Anwender die Möglichkeit, eine Stützwirkung über eine Stützzahl  $n_s$  zu berücksichtigen, indem die  $P_{\text{SWT}}$ -Wöhlerlinie um den Faktor  $n_s > 1$  in Lastrichtung angehoben wird und somit bei gleichem Lastniveau höhere Schwingspielzahlen errechnet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Stützwirkung im Örtlichen Dehnungskonzept ist in Kapitel 3.1.6 nachzulesen.

Um zu zeigen, dass eine Berücksichtigung der Stützwirkung bei der rechnerischen Lebensdauerabschätzung unbedingt notwendig ist, sind in Abbildung 9.1 die Wöhlerlinien der gekerbten Proben aus DP800 mit polierten Kanten zusammen mit den Berechnungsergebnissen abgebil-

det. Dabei wurde die rechnerische Lebensdauerabschätzung jeweils einmal ohne eine Berücksichtigung der Stützwirkung durchgeführt, also  $n_s = 1$  gesetzt, und einmal mit Berücksichtigung der Stützwirkung. Die dabei verwendeten Werte für  $n_s$  entsprechen den experimentell ermittelten Werten der dynamischen Stützzahl  $n_\sigma$  im Dauerfestigkeitsbereich aus Tabelle 6.33. In Abbildung 9.1 ist deutlich zu erkennen, dass eine Nichtberücksichtigung der Stützwirkung zu stark konservativen Berechnungsergebnissen führt. Daher wird bei allen folgenden Berechnungen die Stützwirkung mit den experimentell ermittelten dynamischen Stützzahlen im Dauerfestigkeitsbereich berücksichtigt. Um vom Kantenzustand unabhängige Stützzahlen zu verwenden, werden dabei immer die Stützzahlen verwendet, welche mit den Proben mit polierten Kanten ermittelt wurden.

An den Wöhlerlinien der scharf gekerbten Proben ( $K_t = 4,6$ ) in Abbildung 9.1 ist zu erkennen, dass das Berechnungsergebnis auch bei einer Berücksichtigung der Stützwirkung noch sehr konservativ ausfällt und somit die verwendete Stützzahl zu klein ist.

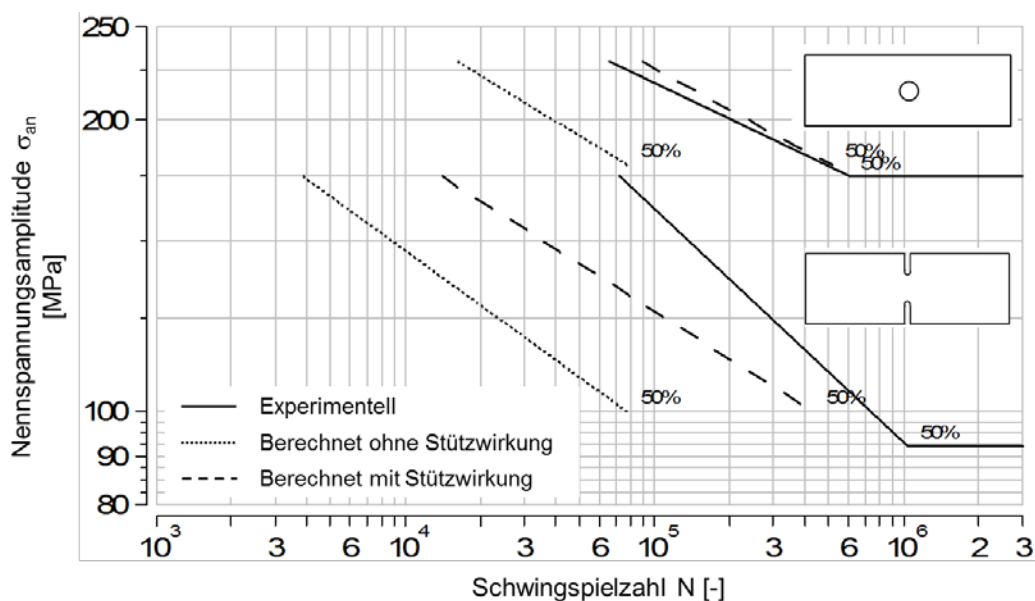


Abbildung 9.1: Experimentelle und berechnete 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kantenzustand: Poliert, Flachproben  $K_t = 2,5$  und  $4,6$ ,  $R = -1$

## 9.2 Ergebnisse

In Abbildung 9.2 und Abbildung 9.3 sind die experimentell ermittelten Wöhlerlinien der ungekerbten und gekerbten Proben aus DP800 mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und scherge-schnittenen (Referenz) Kanten zusammen mit den berechneten Wöhlerlinien abgebildet. Die berechneten Wöhlerlinien sind dabei gestrichelt eingezeichnet. Der Kantenzustand ist farblich gekennzeichnet. In Abbildung 9.4, Abbildung 9.5 und Abbildung 9.7 sind die experimentellen und berechneten 50 %-Wöhlerlinien der ungekerbten und gekerbten Flachproben aus den

Werkstoffen CP800, 22MnB5 und DP1000 abgebildet. Dabei werden ebenfalls Proben mit polierten, laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten berücksichtigt.

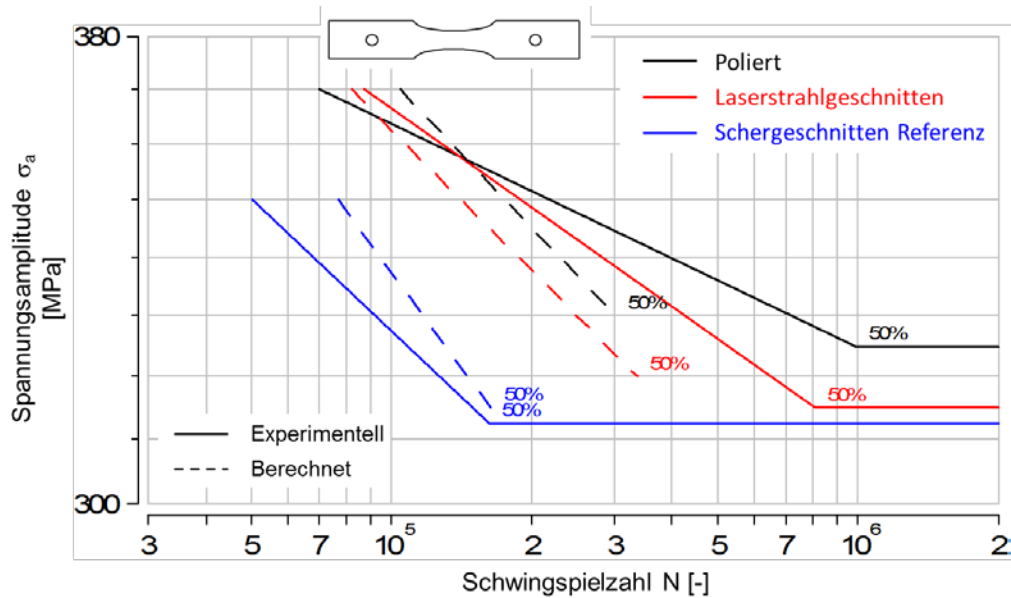


Abbildung 9.2: Experimentelle und berechnete 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kanten-zustand: Poliert, laserstrahl- und schergeschnitten, Flachproben  $K_t = 1,0$ ,  $R = -1$

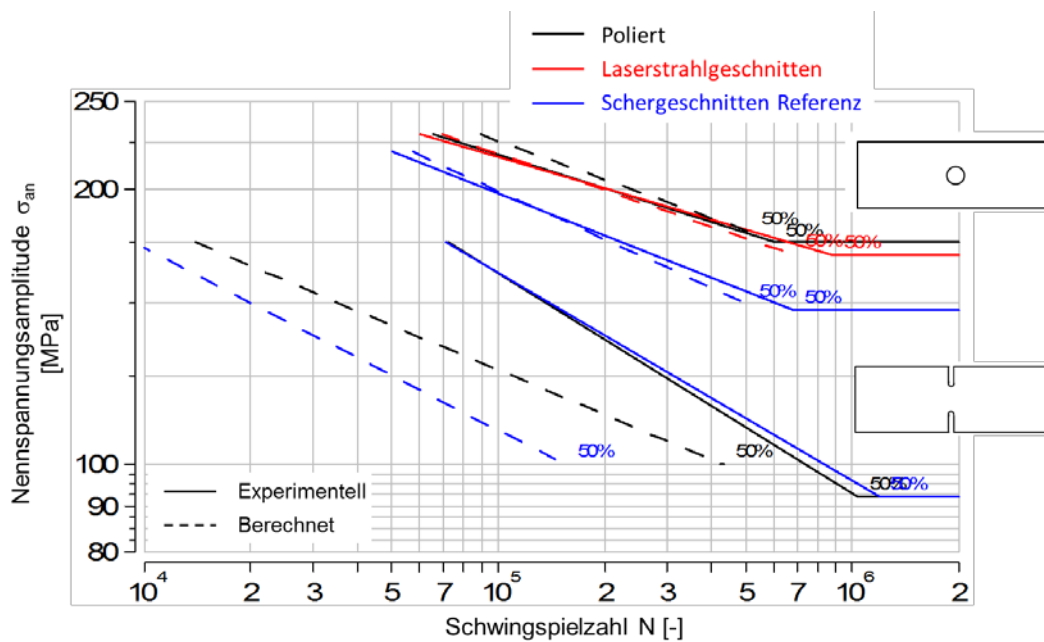


Abbildung 9.3: Experimentelle und berechnete 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP800, Kanten-zustand: Poliert, laserstrahl- und schergeschnitten, Flachproben  $K_t = 2,5$  und  $4,6$ ,  $R = -1$



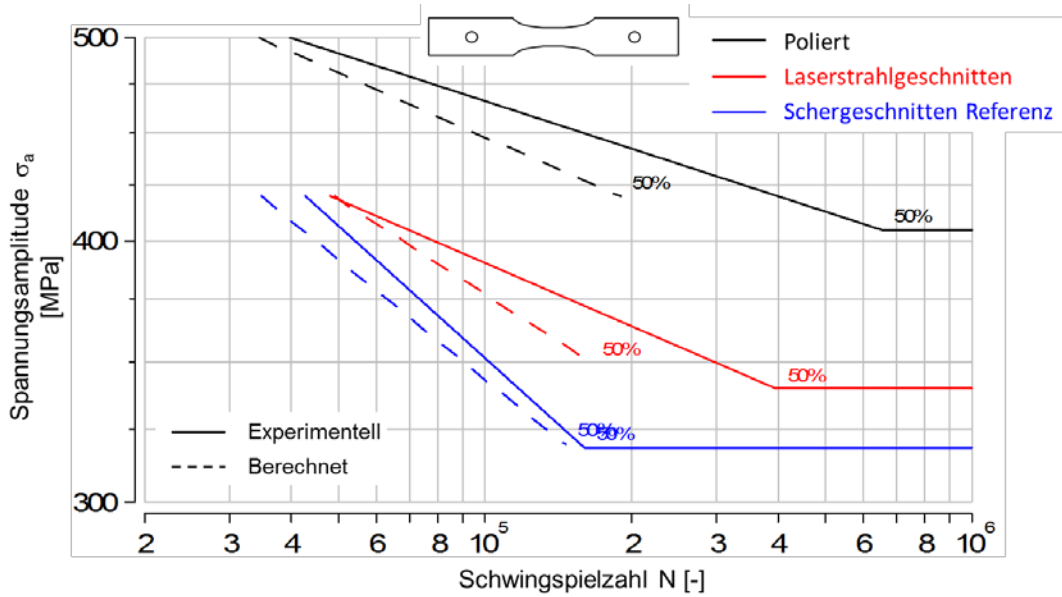


Abbildung 9.4: Experimentelle und berechnete 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff CP800, Kanten-zustand: Poliert, laserstrahl- und schergeschnitten, Flachproben  $K_t = 1,0$ ,  $R = -1$

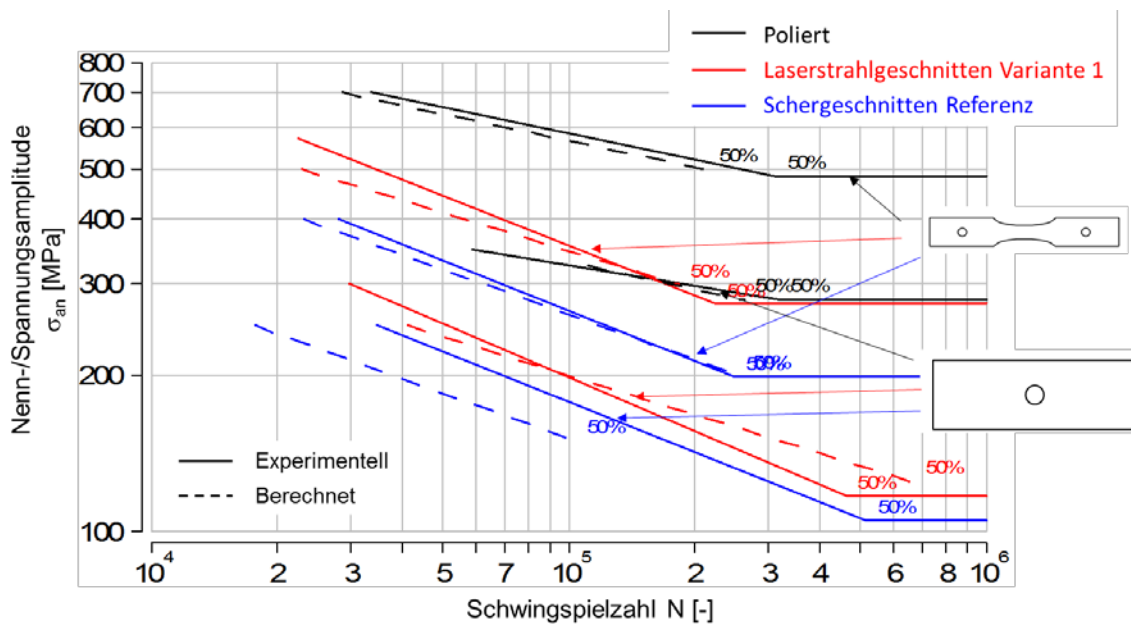


Abbildung 9.5: Experimentelle und berechnete 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5, Kanten-zustand: Poliert, laserstrahl- und schergeschnitten, Flachproben  $K_t = 1,0$  und  $2,5$ ,  $R = -1$

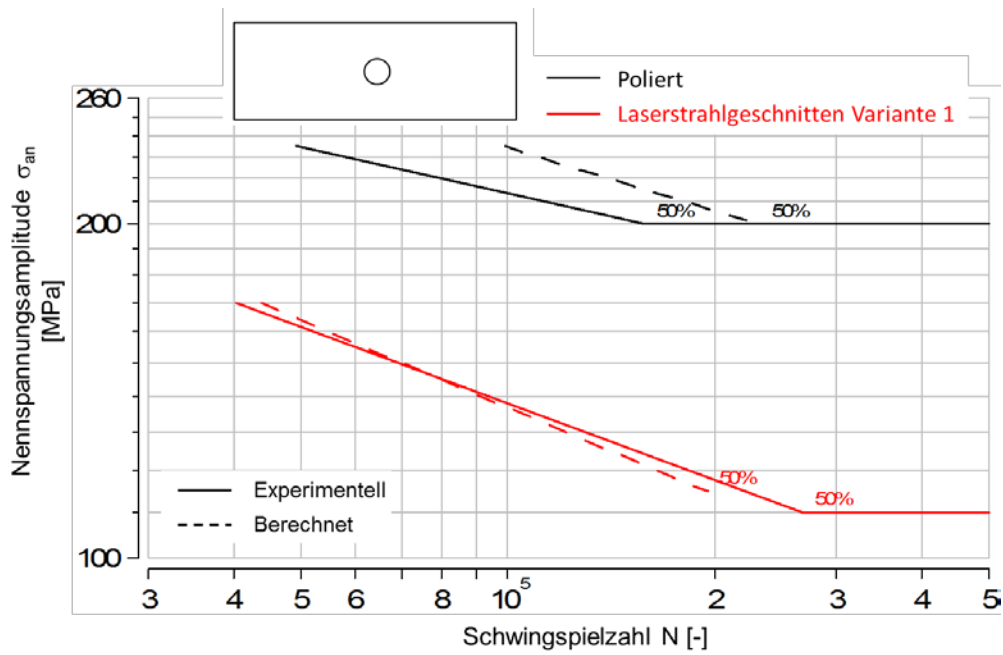


Abbildung 9.6: Experimentelle und berechnete 50%-Wöhlerlinien, Werkstoff 22MnB5, Kanten-zustand: Poliert und laserstrahlgeschnitten, Flachproben  $K_t = 2,5$ ,  $R = 0,1$

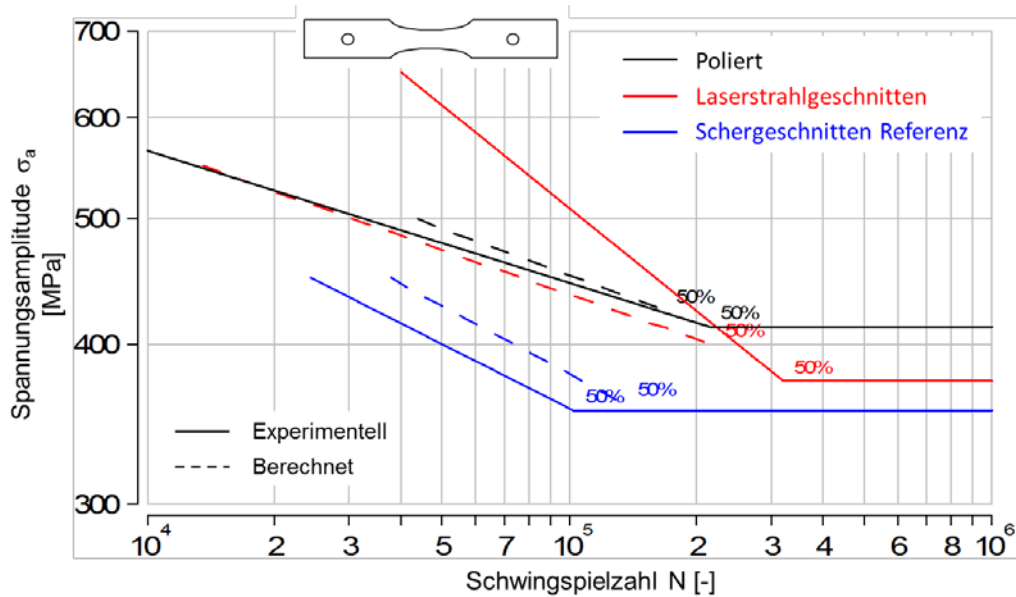


Abbildung 9.7: Experimentelle und berechnete 50 %-Wöhlerlinien, Werkstoff DP1000, Kanten-zustand: Poliert, laserstrahl- und schergeschnitten, Flachproben  $K_t = 1,0$ ,  $R = -1$

### 9.3 Diskussion der rechnerischen Lebensdauerabschätzung

Bei der Lebensdauerabschätzung der ungekerbten Proben aus DP800 in Abbildung 9.2 ist zu erkennen, dass die berechnete Wöhlerlinie des Referenzzustands deutlich steiler verläuft als die experimentell ermittelte Wöhlerlinie. Dadurch kommt es im unteren Zeitfestigkeitsgebiet zu stark konservativen Berechnungsergebnissen. Zurückzuführen ist dies auf einen zu steilen Verlauf der entsprechenden Dehnungswöhlerlinie im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit, beziehungsweise auf eine schlechte Approximation der Versuchspunkte in diesem Bereich, siehe Abbildung 6.53. Das liegt unter anderem daran, dass dieser Bereich nur mit wenigen Versuchspunkten belegt ist und somit der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie in diesem Bereich von Versuchspunkten vorgegeben wird, welche bei deutlich höheren Beanspruchungen liegen. Dieses Phänomen ist bekannt bei der Abbildung der Dehnungswöhlerlinie nach dem Ansatz von Manson, Coffin und Morrow.

Da die zyklischen Kennwerte für die Lebensdauerabschätzung der laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben aus dem Referenzzustand abgeleitet werden, ist auch bei diesen Kantenzuständen der zu steile Verlauf der berechneten Wöhlerlinien in Abbildung 9.2 zu erkennen. Im Allgemeinen kann jedoch festgestellt werden, dass der Kanteneinfluss bei der Lebensdauerabschätzung mit der neuen Methode gut erfasst wird. So tritt bei den laserstrahlgeschnittenen Proben aufgrund der Verschiebung der plastischen Geraden in Abbildung 8.5 ein leichter Schwingfestigkeitsabfall gegenüber dem Referenzzustand auf. Der Schwingfestigkeitsabfall der schergeschnittenen Proben wird im Bereich der Dauerfestigkeit sehr gut erfasst, mit abnehmender Schwingspielzahl ist das Berechnungsergebnis jedoch zunehmend nicht-konservativ. Dies lässt sich mit dem Verlauf der Dehnungswöhlerlinien in Abbildung 8.6 erklären. Wo ebenfalls mit zunehmender Beanspruchung ein nicht-konservativer Verlauf der abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie im Vergleich zur experimentell ermittelten Dehnungswöhlerlinie festzustellen ist. Wie in Kapitel 8 bereits erwähnt, ließe sich dieser Fehler mit einer Verkleinerung des Abminderungsfaktors  $f_{LCF}$  korrigieren.

Bei den Proben aus DP800 mit der Kerbformzahl  $K_t = 2,5$  in Abbildung 9.3 werden mit der Lebensdauerabschätzung die experimentellen Wöhlerlinien aller Kantenzustände sehr gut abgebildet. Das gute Berechnungsergebnis lässt sich einerseits mit der richtigen Abschätzung des Kanteneinflusses begründen, andererseits wird mit der verwendeten Stützzahl die auftretende Stützwirkung gut erfasst. Dies ist bei den scharf gekerbten Proben in Abbildung 9.3 nicht der Fall. Die Berechnungsergebnisse sind bereits bei der Abschätzung des Referenzzustands deutlich zu konservativ. Dementsprechend ist die konstante Stützzahl zu klein um die auftretende Stützwirkung über den gesamten Beanspruchungsbereich zuverlässig zu berücksichtigen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass bei der Lebensdauerabschätzung der scharf gekerbten scherge-

schnittenen Proben ein Schwingfestigkeitsabfall infolge des Kanteneinflusses angenommen wird. An den experimentell ermittelten Wöhlerlinien tritt jedoch kein Schwingfestigkeitsabfall auf. In Kapitel 7.2.2 wird dafür der sinkende Oberflächeneinfluss bei zunehmender Kerbschärfe verantwortlich gemacht. Im Rückschluss bedeutet das, dass bei der Berechnung von scharf gekerbten Strukturen die zyklischen Kennwerte des Referenzzustands für die Berechnung verwendet werden sollten, um ein zu konservatives Berechnungsergebnis zu vermeiden.

Das Berechnungsergebnis der Lebensdauerabschätzung von den ungekerbten Proben aus CP800 mit polierten Kanten in Abbildung 9.4 stimmt sehr gut mit dem experimentellen Ergebnis überein. Der Schwingfestigkeitsabfall infolge des Kanteneinflusses bei den laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Proben wird ebenfalls sehr gut erfasst.

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und Berechnungsergebnissen ist auch bei den ungekerbten und gekerbten Proben aus 22MnB5 unter wechselnder Beanspruchung in Abbildung 9.5 festzustellen. Bei schwellender Beanspruchung der gekerbten Proben in Abbildung 9.6 ist festzustellen, dass die Lebensdauerabschätzung des Referenzzustands zu einem nicht-konservativen Berechnungsergebnis führt. Die Ursache dafür kann nur eine Unterschätzung der Mittelspannungsempfindlichkeit mit dem Schädigungsparameter sein. Bei den gekerbten laserstrahlgeschnittenen Proben unter schwellender Beanspruchung ist hingegen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnis und Versuchsergebnis festzustellen. Das zeigt, dass die in Kapitel 8 beschriebene Methode zur Berücksichtigung des Kanteneinflusses auch bei schwellender Beanspruchung zuverlässig anwendbar ist.

Bei den ungekerbten Proben aus DP1000 in Abbildung 9.7 wird der Referenzzustand mit der Lebensdauerabschätzung sehr gut abgebildet. Infolge der Verschiebung der plastischen Geraden in Abbildung 8.10 tritt bei dem Berechnungsergebnis der laserstrahlgeschnittenen Proben ein leichter Schwingfestigkeitsabfall gegenüber dem Berechnungsergebnis des Referenzzustands auf. Dadurch wird das Versuchsergebnis im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit gut abgebildet. Der unerwartete Verlauf der Zeitfestigkeitsgeraden bei Schwingfestigkeiten oberhalb des Referenzzustands kann über die in Kapitel 8 beschriebene Ableitung der Referenzdehnungswöhlerlinie nicht erfasst werden. Wie in Kapitel 8 bereits angemerkt, führt der nicht-konservative Verlauf der abgeleiteten Dehnungswöhlerlinie der schergeschnittenen Proben in Abbildung 8.11 auch zu einem leicht nicht-konservativen Berechnungsergebnis in Abbildung 9.7. Wie in Kapitel 8 bereits empfohlen, kann dieser Abschätzungsfehler über eine Verkleinerung des Abminderungsfaktors  $f_{LCF}$  korrigiert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die entwickelte Methode eine zuverlässige Möglichkeit darstellt, um den Schwingfestigkeitsabfall infolge des Kanteneinflusses bei der Lebens-

---

dauerabschätzung mit dem Örtlichen Dehnungskonzept zu berücksichtigen. Um die Methode gezielt einsetzen zu können und nicht unnötig konservative Berechnungsergebnisse zu erzeugen, sollte zukünftig untersucht werden, ab welcher Kerbschärfe der Einfluss des Kantenzustands auf die Schwingfestigkeit vernachlässigbar wird.

## 10 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war unter anderem die experimentelle Ermittlung des Kanteneinfluss auf das Festigkeitsverhalten von Stahlfeinblechen unter quasistatischer und insbesondere unter schwingender Beanspruchung in Abhängigkeit der Kantenbearbeitung, des Werkstoffs, der Beanspruchungsart und des Spannungsgradienten. Dafür wurden spannungs- und dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche an ungekerbten und gekerbten Flachproben aus den sechs Stahlfeinblechgüten DC04, DP800, CP800, DP1000, CP1000 und pressgehärteten 22MnB5 durchgeführt. Es wurden die Kantenbearbeitungszustände poliert, laserstrahlgeschnitten und schergeschnitten untersucht.

Ausgehend vom Referenzzustand mit polierten Kanten führt das Laserstrahlschneiden und Scherschneiden bei allen untersuchten Stählen zu einer Verschlechterung der Schwingfestigkeit. Dabei liegt die Schwingfestigkeit der schergeschnittenen Proben stets unterhalb der Schwingfestigkeit der laserstrahlgeschnittenen Proben.

Der Entwicklungsprozess eines Karosseriebauteils kann grob in drei Entwicklungsstadien unterteilt werden: Das berechnete Bauteil aus der Vorauslegung, das Prototypenbauteil und das Serienbauteil. Während die rechnerische Vorauslegung anhand von Werkstoffkennwerten erfolgt, welche an Proben mit polierten Kanten ermittelt wurden, wird das Prototypenbauteil mit Fertigungsverfahren wie dem Laserstrahlschneiden hergestellt, das sich bei der geringen Stückzahl effizient einsetzen lässt. Das Serienbauteil wird in der Regel durch Scherschneiden gefertigt. Sofern die Kante unter Schwingbeanspruchung die versagenskritische Stelle am Bauteil darstellt, tritt zwischen den verschiedenen Entwicklungsstadien ein Schwingfestigkeitsabfall auf, der im Entwicklungsprozess des Bauteils unbedingt berücksichtigt werden muss um eine nicht-konservative Bauteilauslegung zu vermeiden. Bedenkt man, dass die Freigabeversuche für das Betriebsfestigkeitsverhalten mit dem Prototypenbauteil durchgeführt werden, muss insbesondere der Schwingfestigkeitsabfall zwischen laserstrahlgeschnittenen und schergeschnittenen Kanten beachtet werden.

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die Abnahme der Schwingfestigkeit gegenüber dem polierten Kantenzustand mit steigender Werkstofffestigkeit zunimmt. Entsprechend verschlechtert sich die Schwingfestigkeit des DC04 durch das Scherschneiden lediglich um drei Prozent. Beim gehärteten 22MnB5-Stahl verursacht das Scherschneiden hingegen eine Abnahme der Schwingfestigkeit von bis zu 54 Prozent gegenüber dem Referenzzustand. Es wurde außerdem festgestellt, dass der Kanteneinfluss mit steigender Kerbformzahl abnimmt.

Des Weiteren sollten im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werkstoffspezifische Scherschneidparameter bestimmt werden im Hinblick auf eine Optimierung des Schwingfestigkeitsverhaltens. Dafür wurden bei der Herstellung der schergeschnittenen Proben verschiedene Schneidstrategien verwendet, die sich bezüglich der Größe des Schneidspalts, den Kantenradien der Schneidaktivelemente, der Beschichtung der Schneidaktivelemente und dem Schneidverfahren (einstufig und mehrstufig) unterscheiden. Oberflächen- und Mikrohärtmessungen auf der Schnittkante und in der Randzone haben gezeigt, dass durch die Variation der Scherschneidparameter sowohl die Geometrie der entstehenden Schnittfläche als auch der Gefügestand innerhalb der Schereinflusszone in hohem Maße beeinflusst wird. Dabei hat sich herausgestellt, dass ein hoher Glattschnittanteil sowie eine gleichmäßige Kaltverfestigung über die Probendicke an der Schnittkante einen positiven Einfluss auf die Anrisslebensdauer der Proben haben. Eine Vergrößerung des Glattschnittanteils wurde bei den ungekerbten Proben (offener Schnitt) erreicht, indem die Schnittkante mit einer sehr geringen Zugabe ( $z = 0,4$  mm) in einem zweiten Schnitt nachgeschnitten wurde. Bei den schergeschnittenen Lochproben (geschlossener Schnitt) wurde eine Erhöhung des Glattschnittanteils mit einem vergrößerten Schneidkantenradius an dem Schneidaktivelement erzielt.

Anhand der Versuchsergebnisse aus den dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuchen konnte festgestellt werden, dass die Abnahme der Schwingfestigkeit von den ungekerbten laserstrahl- und schergeschnittenen Proben gegenüber dem Referenzzustand (polierte Kante) unterschiedliche Ursachen hat, je nachdem ob die Versuche im LCF- oder im HCF-Bereich durchgeführt wurden. So wirken sich im LCF-Bereich vor allem die durch die Kantenbearbeitung verursachten Kaltverfestigungen und Gefügeumwandlungen negativ auf die Schwingfestigkeit aus. Wohingegen im HCF-Bereich die höhere Rauheit an der Schnittkante in Verbindung mit der Werkstofffestigkeit für die Verschlechterung der Schwingfestigkeit verantwortlich ist. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichts wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie man diesen Effekt bei der Lebensdaueranalyse von Stahlblech mit dem Örtlichen Dehnungskonzept berücksichtigen kann, um die zyklischen Werkstoffkennwerte, welche an Proben mit polierten Kanten ermittelt wurden, auf Bauteile mit laserstrahl- oder schergeschnittenen Kanten zu übertragen. Dafür wird die plastische Gerade, aufgrund der abnehmenden Duktilität in der Randzone verursacht durch die Verfestigung des Werkstoffgefüges, mit einem konstanten Faktor zu geringeren Schwingfestigkeiten verschoben. Die elastische Gerade wird um den Schnittpunkt von plastischer und elastischer Geraden (Transition-Point) rotiert, so dass mit zunehmender Schwingzahl ein zunehmender Schwingfestigkeitsabfall gegenüber dem Referenzzustand auftritt. Mit der Rotation der elastischen Geraden wird die Verschlechterung der Oberflächenqualität an den Schnittkanten gegenüber den Proben mit polierten Kanten berücksichtigt. Als Maß für die Verschiebung der plastischen Geraden und die Rotation der elastischen Geraden

werden die Abminderungsfaktoren  $f_{LCF}$  und  $f_{HCF}$  eingeführt, die den Schwingfestigkeitsabfall bei einer definierten Schwingspielzahl beschreiben. Die mit dieser Methode erzeugten Dehnungswöhlerlinien zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Dehnungswöhlerlinien.

Bei der Lebensdaueranalyse hat sich außerdem gezeigt, dass für eine zuverlässige Lebensdauerabschätzung von Strukturen aus Stahlfeinblech nach dem Örtlichen Dehnungskonzept zwingend die dynamische Stützwirkung berücksichtigt werden muss.



## 11 Danksagung und Förderhinweis

Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und des Arbeitskreises 17 „Leichtbau“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) e.V. für die Unterstützung des Forschungsvorhabens und die Diskussion der Ergebnisse. Besonderer Dank gilt Frau Dr. Kathleen Klaus für die Leitung und Organisation des projektbegleitenden Ausschusses.

Der projektbegleitende Ausschuss setzte sich aus folgenden Vertretern der Wirtschaft zusammen:

Daimler AG, Frau Dr. Kathleen Klaus

Daimler AG, Herr Frank Buschbeck

Adam Opel AG, Herr Rene Wolf

Voestalpine Stahl GmbH, Herr Josef Hinterdorfer

Kirchhoff Automotive GmbH, Herr Markus Löcker

ThyssenKrupp Steel Europe AG, Herr Hans-Erich Giese

Benteler Automobiltechnik GmbH, Herr Dr. Andreas Frehn

Ford Research & Advanced Engineering Europe, Herr Raphael Koch

MAN Truck & Bus AG Europe, Herr Stefan Guserle

Das Vorhaben A284 der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall Verarbeitenden Industrie e. V. (AVIF) wurde von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) vorgelegt und von der Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V. gefördert. Eine Erweiterung des Forschungsvorhabens wurde aus Eigenmitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) finanziert. Die Ergebnisse aus der Projekterweiterung wurden im vorliegenden Bericht mit aufgenommen. Die Versuche, die im Rahmen der Projekterweiterung durchgeführt wurden, sind in den Versuchsmatrizen in den folgenden Abbildungen rot unterlegt. Die grün unterlegten Felder kennzeichnen die Versuche aus dem Forschungsvorhaben A284 der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall Verarbeitenden Industrie e. V. (AVIF), das von der Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V. gefördert wurde.

Kantenbearbeitung	Werkstoffe					
	DC04	DP800	CP800	DP1000	CP1000	PHS (22MnB5)
Referenz Fräsen/Polieren	x	x	x	x	x	x
Schneiden 1 (Referenz)	x	x	x	x	x	x
Schneiden 2 (Verschleiß)	x	x				x
Laser 1 (22MnB5 erst härten, anschließend lasern)	x	x	x	x		x
Laser 2 (22MnB5 erst lasern, anschließend härten)						x

Versuchsmatrix der quasistatischen Zugversuche und dehnungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche, AVIF-Forschungsvorhaben A284 (grün), Projekterweiterung durch die FAT (rot)

Versuchs-/Fertigungsparameter	Kantenbearbeitung	Spannungsverhältnis R	Werkstoffe und Formzahl $K_f$									
			DC04		DP800			CP800	DP1000	CP1000	PHS (22MnB5)	
			$K_f=1$	2,5	$K_f=1$	2,5	4,6	$K_f=1$	$K_f=1$	$K_f=1$	$K_f=1$	2,5
Referenz Fräsen/Polieren	-1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	0,1				x							x
Schneiden 1 (Referenz)	-1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Schneiden 2 (Verschleiß)	-1			x	x	x					x	x
Schneiden 3 (Beschichtung)	-1			x	x							
Schneiden 4 (Eigenspannungszustand)	-1			x	x							
Schneiden 5 (Glattschnittanteil)	-1			x	x							
Laser 1 (22MnB5: erst härten, anschließend laserstrahlschneiden)	-1	x	x	x	x		x	x			x	x
	0,1											x
Laser 2 (22MnB5: erst laserstrahlschneiden, anschließend härten)	-1										x	x

Versuchsmatrix der spannungskontrollierten Schwingfestigkeitsversuche, AVIF-Forschungsvorhaben A284 (grün), Projekterweiterung durch die FAT (rot)

---

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] Sonsino, C. M., Kaufmann, H., Masendorf, R., Hatscher, A., Zenner, H., Bork, C.-P., Hinterdorfer, J., Sonne, H. M., Engl, B., Steinbeck, G.: Werkstoffkennwerte für die Lebensdauerberechnung von Strukturen aus Stahlfeinblechen für den Automobilbau, *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik* 35, Nr. 8, 2004, 522-533
- [2] Radaj, D., Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit, Springer-Verlag, Berlin, 2007 (3. Auflage)
- [3] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Springer-Verlag, Berlin, 2006 (3. Auflage)
- [4] Wanner, A., Lang, K.-H.: Produktentstehung: Entwicklung, Werkstoffkunde, Fertigung, Vorlesungsunterlagen, Institut für Werkstoffkunde, Karlsruher Institut für Technologie, 2008
- [5] Neuber, H.: Kerbspannungslehre, Springer-Verlag, Berlin, 1985 (3. Auflage)
- [6] Neuber, H.: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen, *Konstruktion* 20, Nr. 7, 1968, 245-251
- [7] Issler, L., Ruoss, H., Häfele, P.: Festigkeitslehre Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin, 1997 (2. Auflage)
- [8] Weixing, Y., Kaiquan, X., Yi, G.: On the Fatigue Notch Factor  $K_f$ , *International Journal of Fatigue* Volume 17, No. 4, 1995, 245-251
- [9] Kloos, K. H.: Einfluß des Oberflächenzustandes und der Probengröße auf die Schwingfestigkeitseigenschaften, *VDI-Berichte*, Nr. 268, 1976, 63-76
- [10] Liu, J.: Dauerfestigkeitsberechnung metallischer Bauteile, Habilitationsschrift, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen an der Technische Universität Clausthal, Papierflieger, 2001
- [11] Seeger, T., Vormwald, M.: Betriebsfestigkeit auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen, Seminarunterlagen, Fachgebiet Werkstoffmechanik an der Technischen Universität Darmstadt, 2014
- [12] Häfele, P.: Betriebsfestigkeit, Vorlesungsunterlagen, Fakultät für Fahrzeugtechnik, Hochschule Esslingen, 2016
- [13] Hatscher, A.: Abschätzung der zyklischen Kennwerte von Stählen, Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen an der Technische Universität Clausthal, Papierflieger, 2004
- [14] Masing, G.: Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing, *Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics*, Zürich, 1926, 332-335

- 
- [15] Wikipedia: Stand vom 26. April 2017, [https://de.wikipedia.org/wiki/Kerbgrundkonzept/media/File:Hysteresen\\_Memory3.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Kerbgrundkonzept/media/File:Hysteresen_Memory3.png)
- [16] Ramberg, W., Osgood, W. R.: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, NACA Technical Note, No. 902, 1943, 1-28
- [17] Morrow, J. D.: Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, ASTM STP 378, 1965, 45-87
- [18] Manson, S. S.: Behaviour of Materials Under Conditions of Thermal Stress, NACA Technical Note, No. 2933, 1953
- [19] Manson, S. S.: Fatigue: A Complex Subject – Some Simple Approximations, Experimental Mechanics Volume 7, 1965, 193-226
- [20] Coffin, L. F.: A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, Transactions ASME 76, 1954, 931-950
- [21] Bäumel, A., Seeger, T.: Materials Data for Cyclic Loading, Supplement 1, Materials Science Monographs 61, 1990
- [22] Neuber, H.: Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain-Law, Transactions ASME, Journal of Applied Mechanics 28, 1961, 544-550
- [23] Heuler, P.: Anrißlebensdauervorhersage bei zufallsartiger Belastung auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen, Dissertation, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik an der Technischen Universität Darmstadt, Heft 40, 1983
- [24] Smith, K. N., Watson, P., Topper, T. H.: A Stress-Strain-Function for the Fatigue of Metals, Journal of Materials Volume 5, No. 4, 1970, 767-778
- [25] Palmgren, A. G.: Die Lebensdauer von Kugellagern, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 14, 1924, 339-341
- [26] Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics 12, No. 3, 1945, A159-A164
- [27] Trumpf: Stand vom 11. April 2017, [https://www.trumpf.com/de\\_DE/anwendungen/laserschneiden/](https://www.trumpf.com/de_DE/anwendungen/laserschneiden/)
- [28] Kaast: Stand vom 11. April 2017, [http://www.kaast.de/\\_technologie/\\_schneidsysteme/\\_allg\\_laser](http://www.kaast.de/_technologie/_schneidsysteme/_allg_laser)
- [29] Rofin: Stand vom 11. April 2017, <https://www.rofin.de/anwendungen/laserschneiden/baustahl/>
- [30] Fraunhofer ILT: Stand vom 11. April 2017, <http://www.ilt.fraunhofer.de/de/media-thek/prospekte/themenbroschuere-laserstrahlschneiden.html>

- 
- [31] Rofin: Stand vom 11. April 2017, <https://www.rofin.de/anwendungen/laser-schneiden/baustahl/>
- [32] Rohse, T.: Einfluss des Kantenbearbeitungszustands auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Stahlfeinblechen, Bachelorthesis, Labor für Werkstoff- und Fügetechnik an der Hochschule Esslingen, 2015
- [33] DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [34] Liewald, M., Kappes, J., Hank, R.: Schnittgratfreies Scherschneiden mittels Konter-schneiden, UTFscience, Verlag Meisenbach GmbH, 2010
- [35] Held, C., Schleich, R., Sindel, M., Liewald, M.: Untersuchungen zum Einfluss der Verfestigung von schergeschnittenen Kanten auf folgende Umformprozesse, Bamberg, Verlag Meisenbach GmbH, 2009
- [36] Tönshoff, H. K., Denkena, B., Siegert, K., Ladwig, U.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, Kapitel Trennen, Springer-Verlag, Berlin, 2011 (23. Auflage)
- [37] DIN 9870-2: Begriffe der Stanztechnik – Fertigungsverfahren und Werkzeuge zum Zerteilen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1972
- [38] Hoffmann, H., Neugebauer, R., Spur, G.: Handbuch Umformen, Carl Hanser Verlag, München, 2012 (1. Auflage)
- [39] Schmidt, R.-A.: Umformen und Feinschneiden – Handbuch für Verfahren, Stahlwerkstoffe, Teilegestaltung, Carl Hanser Verlag, München, 2012 (1. Auflage)
- [40] VDI 3368: Schneidspalt-, Schneidstempel- und Schneidplattenmaße für Schneidwerkzeuge der Stanztechnik, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin, 1982
- [41] Döge, E., Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik, Springer-Verlag, Berlin, 2010 (2. Auflage)
- [42] Hörmann, F.: Einfluss der Prozessparameter auf einstufige Scherschneidverfahren zum Ausschneiden in endkonturnaher Form, Dissertation, Technische Universität München, 2008
- [43] Schmöckel, D., Schlagau, S., Balbach, R., Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft (Band 3), Kapitel Sonderverfahren des Zug-Druck-Umformens, Springer-Verlag, Berlin, 1990 (2. Auflage)
- [44] Schumann, H., Öttel, H.: Metallografie, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2005 (14. Auflage)
- [45] VDI 2906-5: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall, Blatt 5 – Feinschneiden, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin, 2014

- 
- [46] Hoogen, M.: Einfluss der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von Aluminiumfeinblechen, Dissertation, Technische Universität München, 1999
- [47] VDI 2906-1: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall, Blatt 1 – Allgemeines, Kenngrößen, Werkstoffe, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [48] Pfaff, K. O.: Über das Lochen austenitischer rostfreier Feinbleche, Technische Hochschule Darmstadt, 1972
- [49] Timmerbeil, F. W.: Untersuchung des Schneidvorgangs beim Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt, Dissertation, Hochschule Hannover, 1957
- [50] Fritsch, C.: Einfluss der Prozessparameter auf das Feinschneiden von Aluminiumlegierungen, Hieronymus, München, 2002
- [51] VDI 2906-2: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall, Blatt 2 – Scherschneiden, Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [52] Grässel, O., Krüger, L., Frommeyer, G., Meyer, L.M.: High Strength FeMn(Al, Si) TRIP TWIP Steels Development – Properties – Application, International Journal of Plasticity Volume 16, 2000, 1391-1409
- [53] Scheib, S., Sartkulvanich, P., Altan, T.: Examining Edge Cracking in Hole Flanging AHSS, Part II: Modeling of blanking, Stamping Journal, FMA Publication, 2008
- [54] Kühlewein, R.: Einfluss der Prozessparameter auf das Nachschneiden scher-geschnittener Konturen, Dissertation, Technische Universität München, 2003
- [55] Kuhlmann, E. P.: Schabbearbeitung für die Fertigbearbeitung von Stanzteilen, Werkstatttechnik und Maschinenbau, Nr. 44, Berlin, 1954
- [56] Guidi, A.: Nachschneiden und Feinschneiden, Carl Hanser Verlag, München, 1965
- [57] Stieler, M.: Untersuchung über die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile bei Raumtemperatur, Dissertation, TH Stuttgart, 1954
- [58] FKM-Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), 2012
- [59] Heckel, K., Köhler, J.: Experimentelle Untersuchung des statistischen Größeneinflusses im Dauerschwingversuch an ungekerbten Stahlproben, Zeitschrift für Werkstofftechnik 2, 1975, 52-54
- [60] Heckel, K.: Wirkung von Kerben bei schwingender Beanspruchung, in: Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung (Hrsg.: Dahl, W.) Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1978

- 
- [61] Böhm, J., Heckel, K.: Die Vorhersage von Dauerschwingfestigkeit unter Berücksichtigung des statistischen Größeneinflusses, Zeitschrift für Werkstofftechnik 13, 1982, 120-128
- [62] Boller, C.: Der Einfluß von Probengröße und Oberflächenrauigkeit auf Lebensdauerabschätzungen bei Betrachtung der örtlichen Beanspruchungen, Dissertation, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik an der TH Darmstadt, Heft 49, 1991
- [63] Kuguel, R.: A Relation Between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced From the Concept of Highly Stressed Volume, ASTM Proceedings 61, 1962, 732-748
- [64] Sonsino, C. M.: Zur Bewertung des Schwingfestigkeitsverhaltens von Bauteilen mit Hilfe örtlicher Beanspruchungen, Konstruktion 45, 1993, 25-33
- [65] Liu, J., Zenner, H.: Berechnung der Dauerschwingfestigkeit unter Berücksichtigung der spannungsmechanischen und statistischen Stützziffer, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 22, 1991, 187-196
- [66] Fiedler, M., Vormwald, M.: Berechnung von Anrisslebensdauern auf Basis des Örtlichen Konzepts, Seminarband, Werkstoffmechanikseminar, Odenwald, 2016
- [67] Pomp, A., Hempel, M.: Wechselfestigkeiten und Kerbwirkungszahlen von unlegierten und legierten Baustählen bei 20°C und -78°C, Archiv Eisenhüttenwesen 21, 1950, 53-66
- [68] Topper, T. H., Gowda, C. V. B.: Local Stress-Strain-Approach to Fatigue Analysis and Design, Konferenzbericht, Design Engineering Conference and Show, Chicago, 1970
- [69] Hollmann, C.: Die Übertragbarkeit von Schwingfestigkeitseigenschaften im Örtlichen Konzept, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen an der TU Dresden, 2004
- [70] Lehr, E.: Oberflächenempfindlichkeit und innere Arbeitsaufnahme der Werkstoffe bei Schwingbeanspruchung, Metallkunde 20, 1928, 78-84
- [71] Siebel, E., Gaier, M.: Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerfestigkeit metallischer Bauteile, VDI-Zeitschrift 97, Nr. 5, 1955, 121-126
- [72] Gaier, M.: Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile bei Raumtemperatur, Dissertation, TH Stuttgart, 1955
- [73] DIN ISO 4287-1: Oberflächengestalt – Begriffe, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächengestalt, Deutsches Institut für Normung e.V., 1994
- [74] Fessenmayer, W.: Oberflächenrauigkeit, FKM-Forschungshefte Nr. 196, Vorhaben 156, Frankfurt, 1995
- [75] Syren, B.: Der Einfluß spanender Bearbeitung auf das Biegewechselverformungsverhalten von Ck 45 in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen, Dissertation,

- Universität Karlsruhe, 1975
- [76] El Haddad, M. H., Topper, T. H., Smith, K. N.: Prediction of Non Propagating Cracks, Engineering Fracture Mechanics Volume 11, 1979, 573-584
- [77] Vormwald, M.: Anrisslebensdauervorhersage auf der Basis der Schwingbruchmechanik für kurze Risse, Dissertation, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Technische Hochschule Darmstadt, Heft 47, 1989
- [78] Wurm, A.: Ermittlung umformtechnischer Verfahrensgrenzen und Potenzialbewertung neuer hochfester Karosseriestähle, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2007
- [79] Gläsner, T., Sunderkötter, C., Rommel, S., Volk, W., Hoffmann, H., Golle, R.: Evaluation eines Verfahrens zur Bestimmung der Kantenrissensitivität von hochfesten Stählen Bamberg, Verlag Meisenbach GmbH, 2015
- [80] Kaufmann, H., Schönherr, W., Sonsino, C. M.: Schwingfestigkeit von hochfesten Feinkornbaustählen im brenngeschnittenen Zustand, Sonderdruck aus "Schweißen und Schneiden" 47, Nr. 3, 1995, 174-186
- [81] Sperle, J.: Influence of Parent Metal Strength on the Fatigue Strength of Parent Material with Machined and Thermally Cut Edges, Welding in the World 52, 2008, 79-92
- [82] Mäntyjärvi, K., Väisänen, A., Karjalainen, J. A.: Cutting Method Influence of the Fatigue Resistance of Ultra-high-strength Steel, International Journal of Material Forming 2, 2009, 547-550
- [83] Thomas, D., Whittaker, M., Bright, G., Gao, Y.: The Influence of Mechanical and CO<sub>2</sub> Laser Cut-edge Characteristics on the Fatigue Life Performance of High Strength Automotive Steels, Journal of Materials Processing Technology 211, 2011, 263-274
- [84] Lara, A., Picas, I., Casellas, D.: Effect of the Cutting Process on the Fatigue Behaviour of Press Hardened and High Strength Dual Phase Steels, Journal of Materials Processing Technology 213, 2013, 1908-1919
- [85] Windmann, M., Röttger, A., Theisen, W.: Formation of Intermetallic Phases in Al-coated Hot-stamped 22MnB5 Sheets in Terms of Coating Thickness and Si Content, Surface & Coatings Technology 246, 2014, 17-25
- [86] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung, Springer-Verlag, Berlin, 1990 (2. Auflage)
- [87] Hilbert, H. L.: Stanzereitechnik, Band I, Schneidende Werkzeuge, Carl Hanser Verlag, München, 1972
- [88] Meurling, F., Melander, A., Linder, J., Larsson, M.: The Influence of Mechanical and Laser Cutting on the Fatigue Strengths of Carbon and Stainless Sheet Steels, Scandinavian Journal of Metallurgy 30, 2001, 309-319



- 
- [89] Maronne, E., Galtier, A., Robert, J.-L., Ishikawa, T.: Cutting Process Influence on Fatigue Sheet Properties, Transactions on Engineering Science 40, 2003, 13-22
- [90] DIN EN ISO 6982-1: Metallische Werkstoff - Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [91] VDEh: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die mechanischen Kennwerte von Feinblechen aus Stahl, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 2003
- [92] N. N.: Produktbroschüre Hochleistungs-Stanzautomat BSTA 1600, Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz, 2013
- [93] N. N.: Betriebsanleitung Hochleistungs-Stanzautomat BSTA 1600, Bruderer AG, Frasnacht, Schweiz, 2008
- [94] Troxler, D.: Merkmale und Einsatzgebiete von Hochleistungs-Stanzautomaten, Presentechnik – Teil 3, Bänder Bleche Rohre, Nr. 12, 2003
- [95] DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, CEN Europäisches Komitee für Normung, 2005
- [96] Gevatter, H.-J., Grünhaupt, U.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, Springer-Verlag, 2006
- [97] DIN EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [98] Masendorf, R.: Einfluss der Umformung auf die zyklischen Werkstoffkennwerte von Feinblechen, Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen an der Technische Universität Clausthal, Papierflieger, 2000
- [99] Sheiki, S.: Herstellung und Bewertung der Umformbarkeit von reibrührgeschweißten Tailored Blanks aus Aluminiumlegierungen, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der Universität Duisburg-Essen, 2005
- [100] Röcker, O.: Untersuchung zur Anwendung hoch- und höchstfester Stähle für walzprofilierte Fahrzeugstrukturkomponenten, Dissertation, Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin, 2008
- [101] Weist, C.: Der Kerbzugversuch als Einfachprüfverfahren für das richtungsabhängige Umformvermögen von Blechwerkstoffen, Bericht aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, Springer-Verlag, 1987
- [102] Steinbeis-Transferzentrum BWF Esslingen: Prüfanweisung – Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von gekerbten Grundwerkstoffproben und gefügten Proben im Kerbzugversuch, Interne Prüfanweisung des Prüflaboratoriums Steinbeis-Transferzentrum BWF Esslingen, 2016

- 
- [103] Özkara, M.: Anrisslebensdauer von Stahlfeinblech, Masterthesis, Labor für Werkstoff- und Fügechnik an der Hochschule Esslingen, 2015
- [104] Thum, M., Özkara, M., Metzger, M., Kantop, M.: Experimentelle und rechnerische Ermittlung des Kanteneinflusses auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Stahlfeinblech, Projektbericht, Labor für Werkstoff- und Fügechnik an der Hochschule Esslingen, 2016
- [105] VDEh: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die mechanischen Kennwerte von Feinblechen aus Stahl, Stahl-Eisen Prüfblatt 1240, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 2003
- [106] Maier, H. J., Niendorf, T., Bürgel, R.: Handbuch Hochtemperatur – Werkstofftechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015 (5. Auflage)
- [107] Paetzold, I., Dittmann, F.; Feistle, M., Golle, R.; Haefele, P., Volk, W.: Influence of shear cutting parameters on the fatigue behavior of a dual-phase steel , Journal of Physics: Conference Series, Vol. 896, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/896/1/012107
- [108] DIN EN ISO 18265: Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [109] Wagener, R. W.: Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude, Dissertation, Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der Technischen Universität Clausthal, 2007

# Anhang

## A Ergebnisse dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche

Tabelle A.1: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																	
DC04, $t=1,5$ mit polierten Kanten																	
E-Modul Zugversuch [GPa]		212,3	Schwingspielzahl $N_i$	Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$													Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]		Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	Dehnungen					Spannungen			Risslage <sup>1)</sup>	
							$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_r$ [-]	
1	1	0,60	0,5	3538	3670	1769	0,600	-0,600	0,600	0,473	0,127	-1,0	268	-273	271	-1,0	A
2	2	0,80	0,5	2001	2023	1001	0,800	-0,800	0,800	0,665	0,135	-1,0	283	-290	287	-1,0	A
3	3	0,30	1,0	19077	20051	9539	0,300	-0,300	0,300	0,200	0,100	-1,0	211	-212	211	-1,0	A
4	4	0,40	0,5	7130	7132	3565	0,400	-0,400	0,400	0,287	0,113	-1,0	239	-240	239	-1,0	A
5	5	0,20	2,0	55463	59704	27732	0,200	-0,200	0,200	0,118	0,082	-1,0	175	-175	175	-1,0	A
6	6	0,60	0,5	3210	3211	1605	0,600	-0,600	0,600	0,473	0,127	-1,0	267	-272	270	-1,0	A
7	7	0,30	1,0	18815	19819	9408	0,300	-0,300	0,300	0,198	0,102	-1,0	216	-216	216	-1,0	A
8	8	0,20	2,0	46827	49126	23414	0,200	-0,200	0,200	0,116	0,084	-1,0	178	-178	178	-1,0	A
9	10	0,16	3,0	104761	119859	52381	0,160	-0,160	0,160	0,084	0,076	-1,0	162	-161	161	-1,0	A
10	11	0,80	0,5	2060	2061	1030	0,800	-0,800	0,800	0,668	0,132	-1,0	279	-283	281	-1,0	A
11	12	0,40	0,5	8325	8333	4163	0,400	-0,400	0,400	0,285	0,115	-1,0	243	-245	244	-1,0	A
12	13	0,16	3,0	94951	95992	47476	0,160	-0,160	0,160	0,085	0,075	-1,0	161	-160	160	-1,0	A
13	14	0,12	3,0	201930	220609	100965	0,120	-0,120	0,120	0,053	0,067	-1,0	142	-143	143	-1,0	A
14	16	0,10	1,0	256448	275600	128224	0,100	-0,100	0,100	0,037	0,063	-1,0	130	-137	134	-1,1	A

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)

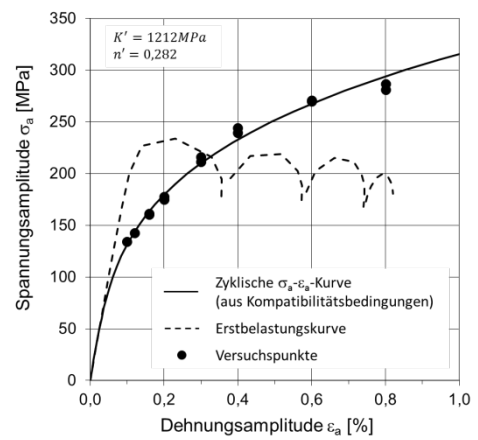
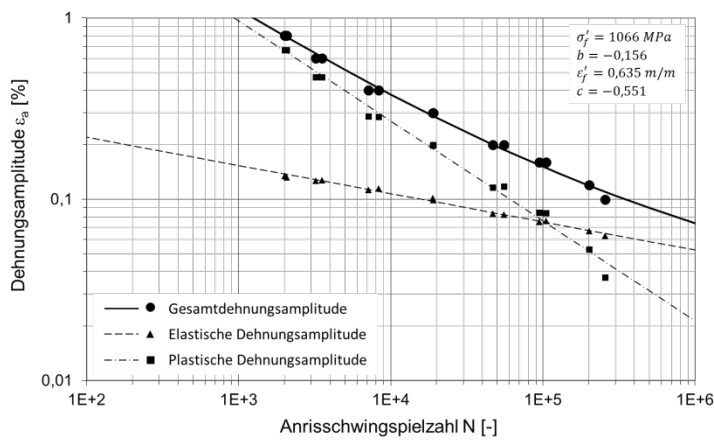
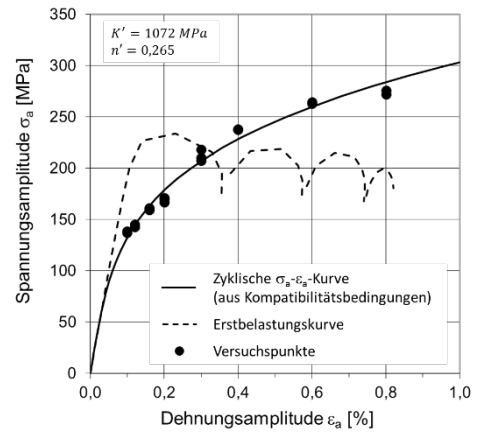
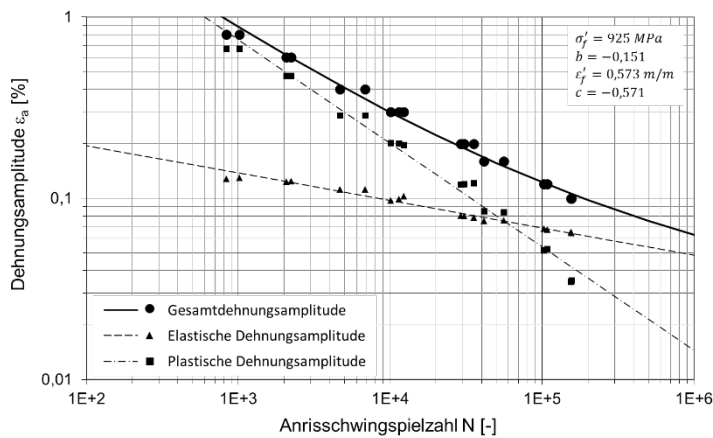


Abbildung A.1: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DC04, Kantenbearbeitungszustand: Poliert

Tabelle A.2: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
DC04, $t=1,5$ mit laserstrahlgeschnittenen Kanten																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		212,3		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>	
							$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\epsilon$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]		
1	1	0,60	0,5	2222	2296	1111	0,600	-0,600	0,600	0,475	0,125	-1,0	263	-266	264	-1,0	B-1	
2	2	0,16	3,0	55911	59712	27956	0,160	-0,160	0,160	0,084	0,076	-1,0	161	-162	161	-1,0	C-1	
3	3	0,80	0,5	1012	1078	506	0,800	-0,800	0,800	0,670	0,130	-1,0	273	-279	276	-1,0	B-1	
4	4	0,12	3,0	102612	110368	51306	0,120	-0,120	0,120	0,052	0,068	-1,0	145	-145	145	-1,0	C-0	
5	5	0,30	1,0	11376	11618	5688	0,300	-0,300	0,300	0,201	0,099	-1,0	209	-212	210	-1,0	C-0	
6	6	0,40	0,5	6820	7847	3410	0,400	-0,400	0,400	0,288	0,112	-1,0	236	-240	238	-1,0	B-0/C-1	
7	7	0,30	1,0	12232	13197	6116	0,300	-0,300	0,300	0,197	0,103	-1,0	217	-219	218	-1,0	C-1	
8	8	0,60	0,5	2068	2260	1034	0,600	-0,600	0,600	0,476	0,124	-1,0	261	-265	263	-1,0	B-1	
9	9	0,10	3,0	154882	181348	77441	0,100	-0,100	0,100	0,035	0,065	-1,0	139	-138	139	-1,0	C-1	
10	10	0,80	0,5	833	834	417	0,800	-0,800	0,800	0,672	0,128	-1,0	270	-274	272	-1,0	C-0	
11	11	0,10	3,0	155310	180597	77655	0,100	-0,100	0,100	0,035	0,065	-1,0	138	-136	137	-1,0	C-1	
12	12	0,30	1,0	10069	10856	5035	0,300	-0,300	0,300	0,202	0,098	-1,0	207	-208	207	-1,0	C-1	
13	13	0,12	2,0	107696	145591	53848	0,120	-0,120	0,120	0,053	0,067	-1,0	147	-139	143	-0,9	B-0 + C-1	
14	13_2	0,40	0,5	4664	4919	2332	0,400	-0,400	0,400	0,288	0,112	-1,0	237	-239	238	-1,0	C-1	
15	14	0,20	1,0	29120	29257	14560	0,200	-0,200	0,200	0,119	0,081	-1,0	174	-168	171	-1,0	C-0	
16	14_2	0,16	2,0	41352	44699	20676	0,160	-0,160	0,160	0,085	0,075	-1,0	160	-159	160	-1,0	C-0	
17	15	0,20	1,0	30726	36457	15363	0,200	-0,200	0,200	0,120	0,080	-1,0	173	-167	170	-1,0	B-0	
18	16	0,20	1,0	35441	37879	17721	0,200	-0,200	0,200	0,122	0,078	-1,0	164	-169	167	-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)



---

Abbildung A.2: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DC04, Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten

Tabelle A.3: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
DC04, t=1,5 mit schergeschnittenen Kanten (Referenz)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		212,3		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\sigma$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	10	0,80	0,5	549	977	275	-	0,800	-0,800	0,800	0,679	0,121	-1,0	257	-256	257	-1,0	B-1/2 + D/1
2	9	0,12	2,0	117250	118189	58625	213	0,120	-0,120	0,120	0,052	0,068	-1,0	153	-136	145	-0,9	B-1/1
3	18	0,60	0,5	921	1474	461	-	0,600	-0,600	0,600	0,485	0,115	-1,0	246	-243	245	-1,0	B-0/1 + B-1/2
4	17	0,16	1,5	32080	32305	16040	219	0,160	-0,160	0,160	0,087	0,073	-1,0	164	-148	156	-0,9	B-1/1 + C-0/2
5	21	0,30	1,0	4402	6110	2201	208	0,300	-0,300	0,300	0,205	0,095	-1,0	204	-200	202	-1,0	C-1/2
6	25	0,10	2,0	339433	386963	169717	241	0,100	-0,100	0,100	0,035	0,065	-1,0	149	-129	139	-0,9	A
7	14	0,80	0,5	388	389	194	-	0,800	-0,800	0,800	0,678	0,122	-1,0	258	-258	258	-1,0	B-0 + B-1
8	13	0,30	1,0	4830	5168	2415	223	0,300	-0,300	0,300	0,203	0,097	-1,0	209	-203	206	-1,0	B-1/1 + D/2
9	26	0,12	2,0	181920	182685	90960	233	0,120	-0,120	0,120	0,050	0,070	-1,0	156	-141	149	-0,9	B-1/2
10	15	0,16	1,0	33050	33208	16525	218	0,160	-0,160	0,160	0,085	0,075	-1,0	165	-155	160	-0,9	C-0/2
11	27	0,40	0,5	1756	1770	878	201	0,400	-0,400	0,400	0,295	0,105	-1,0	223	-223	223	-1,0	C-0/1 + B-1/2
12	28	0,20	1,0	21306	22779	10653	224	0,200	-0,200	0,200	0,118	0,082	-1,0	177	-171	174	-1,0	B-0/2 + B-1/1
13	8	0,40	0,5	2237	3280	1119	216	0,400	-0,400	0,400	0,294	0,106	-1,0	227	-224	226	-1,0	C-1/1 + B-0/2
14	22	0,20	1,0	12023	17466	6012	215	0,200	-0,200	0,200	0,119	0,081	-1,0	177	-167	172	-0,9	C-1/2
15	50	0,10	1,5	407943	452567	203972	210	0,100	-0,100	0,100	0,037	0,063	-1,0	140	-128	134	-0,9	A
16	11	0,60	0,5	682	1299	341	-	0,600	-0,600	0,600	0,487	0,113	-1,0	239	-241	240	-1,0	B-0
17	20	0,12	2,0	153603	166339	76802	210	0,120	-0,120	0,120	0,052	0,068	-1,0	148	-140	144	-0,9	B-0

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

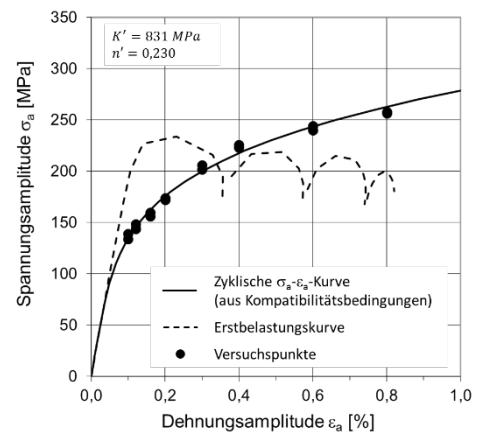
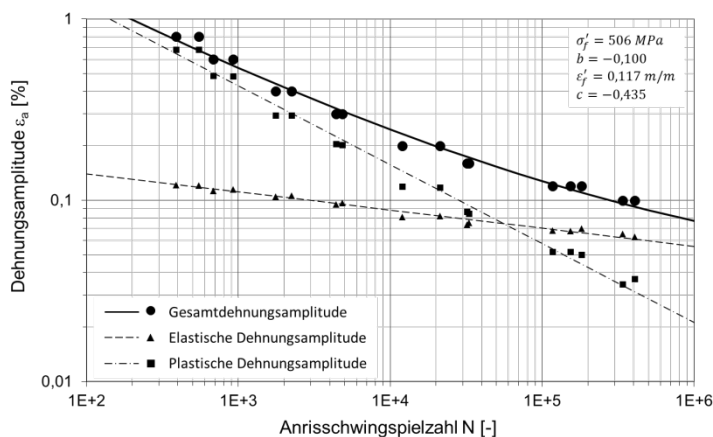


Abbildung A.3: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DC04, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Referenz

Tabelle B.4: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
DC04, $t=1,5$ mit schergeschnittenen Kanten (Verschleiß)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		212,3		Schwingspiel- zahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben- nr.	Deh- nungs- ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre- quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.- ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\sigma$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	V15	0,80	0,5	468	476	234	-	0,800	-0,800	0,800	0,682	0,118	-1,0	247	-253	250	-1,0	B-1
2	V16	0,20	1,0	14142	14917	7071	212	0,200	-0,200	0,200	0,122	0,078	-1,0	168	-163	166	-1,0	B-1
3	V14	0,12	2,0	127292	140460	63646	229	0,120	-0,120	0,120	0,052	0,068	-1,0	150	-138	144	-0,9	B-1
4	V13	0,60	0,5	831	1727	416	119	0,600	-0,600	0,600	0,487	0,113	-1,0	236	-243	240	-1,0	B-0
5	V23	0,10	2,0	312033	365642	156017	230	0,100	-0,100	0,100	0,038	0,062	-1,0	140	-125	133	-0,9	B-0
6	V12	0,80	0,5	451	1009	226	-	0,800	-0,800	0,800	0,683	0,117	-1,0	246	-249	248	-1,0	B-0
7	V11	0,60	0,5	871	1709	436	-	0,600	-0,600	0,600	0,488	0,112	-1,0	236	-238	237	-1,0	B-0
8	V10	0,10	2,0	527000	579821	263500	224	0,100	-0,100	0,100	0,039	0,061	-1,0	138	-122	130	-0,9	A
9	V21	0,80	0,5	498	500	249	-	0,800	-0,800	0,800	0,683	0,117	-1,0	244	-251	248	-1,0	C-0
10	V20	0,40	0,5	2206	3921	1103	-	0,400	-0,400	0,400	0,299	0,101	-1,0	214	-213	214	-1,0	B-0
11	V19	0,40	0,5	2678	3590	1339	-	0,400	-0,400	0,400	0,299	0,101	-1,0	215	-215	215	-1,0	B-0
12	V17	0,10	2,0	306479	316455	153240	-	0,100	-0,100	0,100	0,039	0,061	-1,0	139	-122	131	-0,9	B-1
13	V6	0,30	0,5	4677	4796	2339	195	0,300	-0,300	0,300	0,210	0,090	-1,0	192	-189	191	-1,0	B-1
14	V7	0,30	0,5	5872	9207	2936	202	0,300	-0,300	0,300	0,209	0,091	-1,0	193	-193	193	-1,0	B-0
15	V8	0,30	0,5	4422	5902	2211	204	0,300	-0,300	0,300	0,210	0,090	-1,0	191	-193	192	-1,0	B-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)

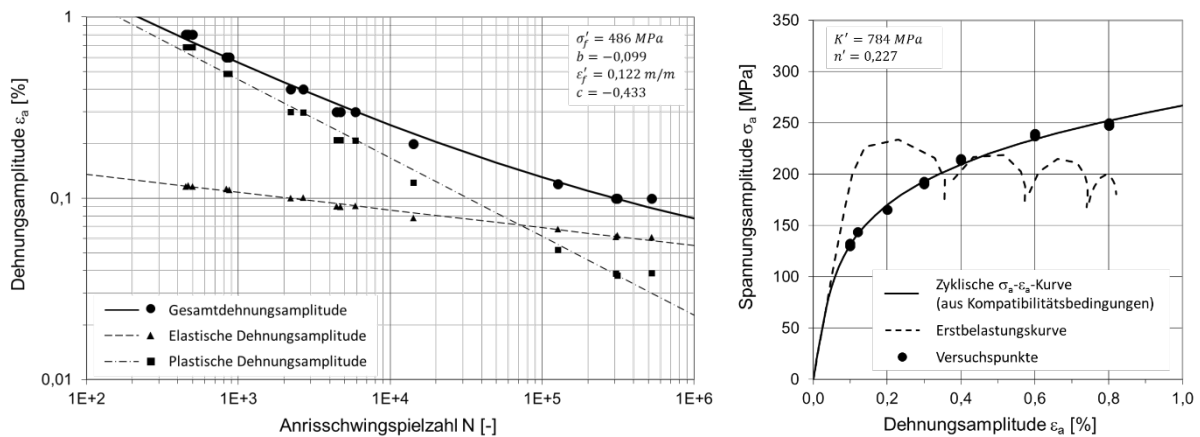


Abbildung A.4: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DC04, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Verschleiß

Tabelle A.5: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
DP800, $t=1,5$ mit polierten Kanten																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		215,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	3	0,30	1,0	40720	40851	20360	212	0,300	-0,300	0,300	0,109	0,191	-1,0	402	-420	411	-1,0	A
2	4	0,60	0,5	2631	2634	1316	209	0,600	-0,600	0,600	0,351	0,249	-1,0	531	-542	536	-1,0	A
3	5	0,30	1,0	36520	37064	18260	208	0,300	-0,300	0,300	0,113	0,187	-1,0	395	-412	404	-1,0	A
4	6	0,40	1,0	10690	13896	5345	208	0,400	-0,400	0,400	0,188	0,212	-1,0	451	-463	457	-1,0	A
5	7	0,30	1,0	29470	29568	14735	226	0,300	-0,300	0,300	0,110	0,190	-1,0	402	-417	409	-1,0	A
6	8	0,80	0,5	1517	1518	759	207	0,800	-0,800	0,800	0,527	0,273	-1,0	581	-596	589	-1,0	A
7	9	0,80	0,5	1640	1673	820	213	0,800	-0,800	0,800	0,523	0,277	-1,0	588	-607	597	-1,0	A
8	10	0,60	0,5	3910	4036	1955	205	0,600	-0,600	0,600	0,354	0,246	-1,0	523	-536	530	-1,0	A
9	11	0,40	1,0	12265	12295	6133	210	0,400	-0,400	0,400	0,182	0,218	-1,0	463	-476	470	-1,0	A
10	12	0,25	1,0	92150	95657	46075	206	0,250	-0,250	0,250	0,076	0,174	-1,0	366	-382	374	-1,0	A
11	13	0,40	1,0	10230	10243	5115	211	0,400	-0,400	0,400	0,188	0,212	-1,0	451	-463	457	-1,0	A
12	14	0,30	1,0	34520	35380	17260	209	0,300	-0,300	0,300	0,112	0,188	-1,0	398	-413	406	-1,0	A
13	15	0,25	1,0	85408	94915	42704	205	0,250	-0,250	0,250	0,078	0,172	-1,0	360	-383	371	-1,1	D
14	16	0,60	0,5	3890	3891	1945	211	0,600	-0,600	0,600	0,348	0,252	-1,0	537	-548	542	-1,0	A
15	17	0,25	1,0	68160	68278	34080	222	0,250	-0,250	0,250	0,075	0,175	-1,0	369	-386	378	-1,0	A
16	18	0,22	3,0	153180	168447	76590	208	0,220	-0,220	0,220	0,058	0,162	-1,0	339	-361	350	-1,1	A
17	19	0,20	3,0	215477	291312	107739	221	0,200	-0,200	0,200	0,039	0,161	-1,0	332	-363	348	-1,1	A
18	20	0,20	3,0	406818	430522	203409	218	0,200	-0,200	0,200	0,037	0,163	-1,0	332	-371	351	-1,1	A

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)

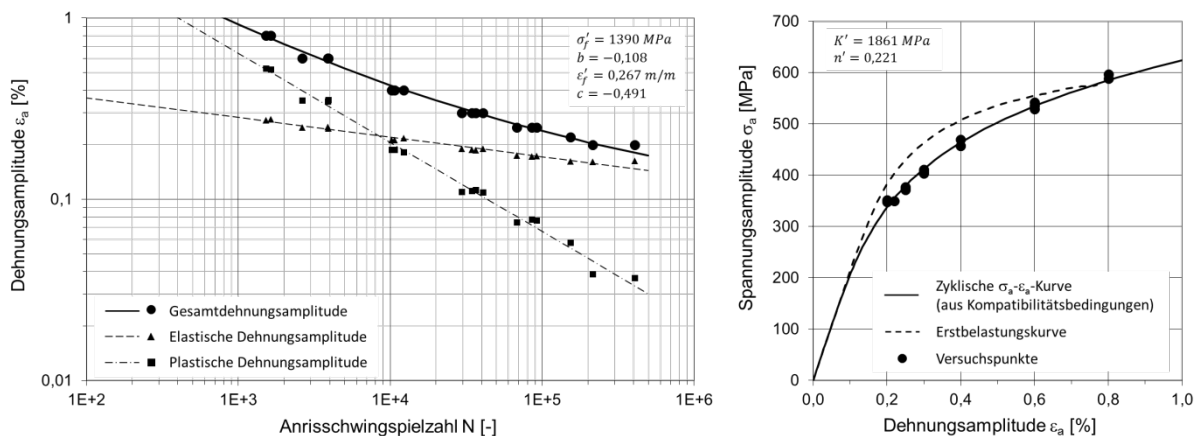


Abbildung A.5: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP800, Kantenbearbeitungszustand: Poliert



Tabelle A.6: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																			
DP800, $t=1,5$ mit laserstrahlgeschnittenen Kanten																			
E-Modul Zugversuch [GPa]		215,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$													Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>	
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]		
1	1	0,80	0,5	598	623	299	209	0,800	-0,800	0,800	0,514	0,286	-1,0	605	-629	617	-1,0	C-1	
2	2	0,60	0,5	1815	1931	908	197	0,600	-0,600	0,600	0,352	0,248	-1,0	527	-543	535	-1,0	C-1	
3	3	0,20	3,0	153179	164646	76590	215	0,200	-0,200	0,200	0,040	0,160	-1,0	336	-352	344	-1,0	A	
4	4	0,40	1,0	9690	10240	4845	201	0,400	-0,400	0,400	0,188	0,212	-1,0	449	-465	457	-1,0	A	
5	5	0,30	2,0	40598	42973	20299	212	0,300	-0,300	0,300	0,106	0,194	-1,0	410	-427	419	-1,0	A	
6	6	0,80	0,5	619	651	310	210	0,800	-0,800	0,800	0,524	0,276	-1,0	584	-605	595	-1,0	C-1	
7	7	0,20	3,0	110408	141014	55204	211	0,200	-0,200	0,200	0,042	0,158	-1,0	331	-350	340	-1,1	A	
8	8	0,16	3,0	135719	135720	67860	218	0,160	-0,160	0,160	0,014	0,146	-1,0	298	-332	315	-1,1	A	
9	9	0,30	1,0	40041	41093	20021	212	0,300	-0,300	0,300	0,105	0,195	-1,0	413	-429	421	-1,0	A	
10	10	0,30	1,0	23388	26955	11694	210	0,300	-0,300	0,300	0,111	0,189	-1,0	401	-416	408	-1,0	A	
11	11	0,60	0,5	1554	1555	777	218	0,600	-0,600	0,600	0,339	0,261	-1,0	555	-569	562	-1,0	C-1	
12	12	0,40	1,0	10055	10076	5028	210	0,400	-0,400	0,400	0,185	0,215	-1,0	458	-470	464	-1,0	A	
13	13	0,18	3,0	378094	408762	189047	230	0,180	-0,180	0,180	0,019	0,161	-1,0	344	-351	347	-1,0	A	
14	14	0,60	0,5	1404	1406	702	215	0,600	-0,600	0,600	0,339	0,261	-1,0	555	-571	563	-1,0	C-0	
15	16	0,40	1,0	11272	12169	5636	203	0,400	-0,400	0,400	0,183	0,217	-1,0	461	-474	468	-1,0	A	
16	17	0,18	3,0	218474	255508	109237	206	0,180	-0,180	0,180	0,031	0,149	-1,0	314	-330	322	-1,1	A	

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

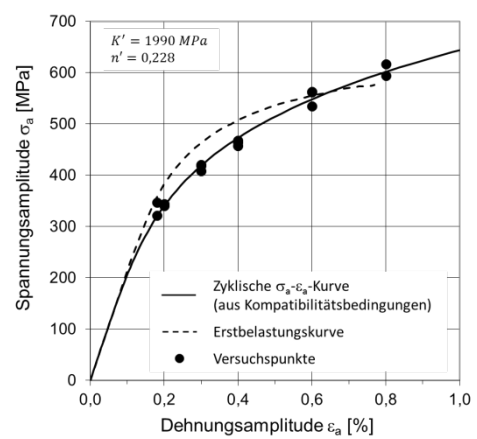
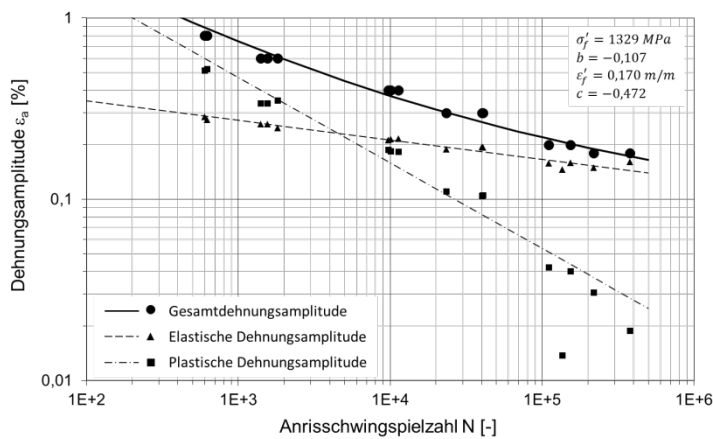


Abbildung A.6: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP800, Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten

Tabelle A.7: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																				
DP800, $t=1,5$ mit schergeschnittenen Kanten (Referenz)																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		215,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$														Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>		
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\sigma$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]			
1	R31	0,20	1,0	108443	148464	54222	196	0,200	-0,200	0,200	0,051	0,149	-1,0	318	-323	321	-1,0	C-1		
2	R17	0,60	0,5	1777	1780	889	189	0,600	-0,600	0,600	0,364	0,236	-1,0	505	-511	508	-1,0	C-0		
3	R39	0,30	1,0	16875	16898	8438	196	0,300	-0,300	0,300	0,123	0,177	-1,0	380	-383	382	-1,0	C-0		
4	R36	0,80	0,5	790	791	395	196	0,800	-0,800	0,800	0,541	0,259	-1,0	551	-564	558	-1,0	C-0		
5	R10	0,60	0,5	1646	1650	823	185	0,600	-0,600	0,600	0,362	0,238	-1,0	509	-518	514	-1,0	C-0		
6	R09	0,18	2,0	268420	268881	134210	206	0,180	-0,180	0,180	0,034	0,146	-1,0	310	-318	314	-1,0	C-0		
7	R19	0,40	1,0	6096	6100	3048	195	0,400	-0,400	0,400	0,193	0,207	-1,0	443	-449	446	-1,0	C-0 / C-1		
8	R40	0,20	2,0	77210	77568	38605	204	0,200	-0,200	0,200	0,047	0,153	-1,0	325	-335	330	-1,0	C-0		
9	R18	0,40	1,0	5568	6041	2784	213	0,400	-0,400	0,400	0,190	0,210	-1,0	448	-458	453	-1,0	C-1		
10	R35	0,80	0,5	733	734	367	199	0,800	-0,800	0,800	0,536	0,264	-1,0	562	-575	569	-1,0	C-0		
11	R37	0,30	1,0	16090	16152	8045	201	0,300	-0,300	0,300	0,117	0,183	-1,0	391	-397	394	-1,0	C-0		
12	R25	0,18	3,0	-	1200000	-	199	0,180	-0,180	0,180	0,037	0,143	-1,0	307	-310	309	-1,0	Durchläufer		
13	R25hoch	0,80	0,5	685	714	343	195	0,800	-0,800	0,800	0,541	0,259	-1,0	551	-565	558	-1,0	C-1		
14	R28	0,30	1,0	15031	15221	7516	199	0,300	-0,300	0,300	0,120	0,180	-1,0	385	-393	389	-1,0	B-1		
15	R30	0,20	1,5	80910	85150	40455	209	0,200	-0,200	0,200	0,047	0,153	-1,0	330	-331	331	-1,0	B-1		
16	R34	0,60	0,5	1474	1539	737	198	0,600	-0,600	0,600	0,362	0,238	-1,0	512	-516	514	-1,0	C-1		
17	R23	0,40	0,5	5618	5637	2809	197	0,400	-0,400	0,400	0,196	0,204	-1,0	439	-442	441	-1,0	C-0		

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

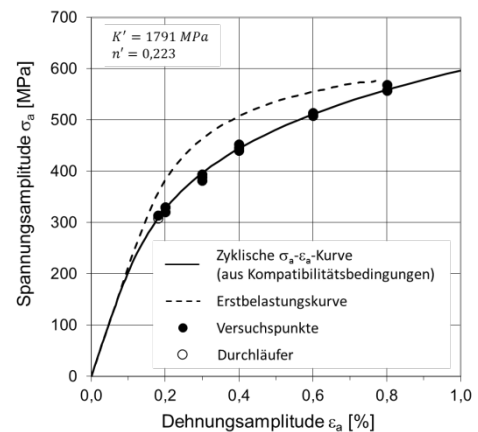
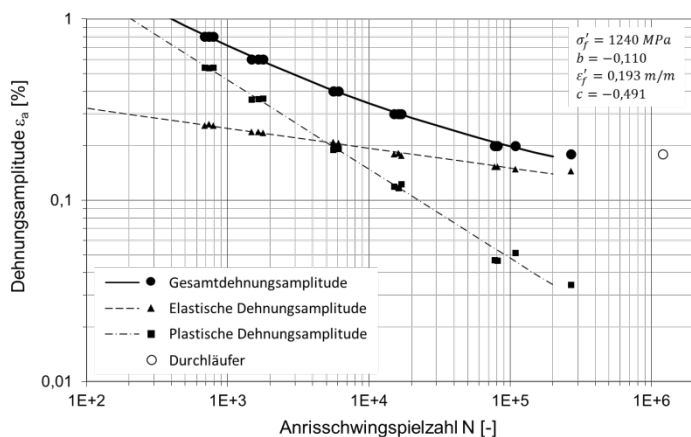


Abbildung A.7: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP800, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Referenz

Tabelle A.8: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																			
DP800, $t=1,5$ mit schergeschnittenen Kanten (Verschleiß)																			
E-Modul Zugversuch [GPa]		215,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$													Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>	
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\epsilon$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]		
1	48	0,30	1,5	13250	13366	6625	195	0,300	-0,300	0,300	0,120	0,180	-1,0	386	-390	388	-1,0	B-1	
2	34	0,60	0,5	1278	1290	639	190	0,600	-0,600	0,600	0,357	0,243	-1,0	516	-531	524	-1,0	B-1	
3	55	0,20	2,0	42560	48463	21280	200	0,200	-0,200	0,200	0,049	0,151	-1,0	322	-327	325	-1,0	C-1	
4	36	0,20	2,0	40879	45027	20440	204	0,200	-0,200	0,200	0,045	0,155	-1,0	335	-333	334	-1,0	B-1	
5	37	0,80	0,5	525	714	263	205	0,800	-0,800	0,800	0,530	0,270	-1,0	571	-594	583	-1,0	B-0	
6	40	0,18	2,0	66374	77062	33187	207	0,180	-0,180	0,180	0,031	0,149	-1,0	318	-323	321	-1,0	C-1	
7	42	0,40	0,5	4640	4678	2320	203	0,400	-0,400	0,400	0,193	0,207	-1,0	441	-453	447	-1,0	B-1	
8	43	0,18	2,0	50680	51132	25340	215	0,180	-0,180	0,180	0,034	0,146	-1,0	319	-312	316	-1,0	C-0	
9	38	0,40	0,5	4442	5666	2221	202	0,400	-0,400	0,400	0,192	0,208	-1,0	443	-454	449	-1,0	B-0	
10	39	0,30	1,0	10186	10836	5093	207	0,300	-0,300	0,300	0,116	0,184	-1,0	392	-400	396	-1,0	B-1	
11	33	0,60	0,5	1243	1345	622	197	0,600	-0,600	0,600	0,355	0,245	-1,0	518	-538	528	-1,0	B-1 + C-0	
12	41	0,18	2,0	80910	83680	40455	202	0,180	-0,180	0,180	0,035	0,145	-1,0	313	-313	313	-1,0	C-0	
13	54	0,80	0,5	383	520	192	200	0,800	-0,800	0,800	0,533	0,267	-1,0	566	-584	575	-1,0	B-0	
14	29	0,80	0,5	420	588	210	199	0,800	-0,800	0,800	0,533	0,267	-1,0	567	-583	575	-1,0	B-0	
15	30	0,30	1,0	11682	12269	5841	199	0,300	-0,300	0,300	0,121	0,179	-1,0	386	-384	385	-1,0	B-1	
16	26	0,40	1,0	5190	6226	2595	197	0,400	-0,400	0,400	0,195	0,205	-1,0	441	-445	443	-1,0	B-0 + C-1	
17	44	0,15	3,0	-	1046000	-	207	0,150	-0,150	0,150	0,016	0,134	-1,0	295	-281	288	-1,0	Durchläufer	
18	44 hoch	0,80	0,5	559	566	280	200	0,800	-0,800	0,800	0,534	0,266	-1,0	564	-581	573	-1,0	B-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)

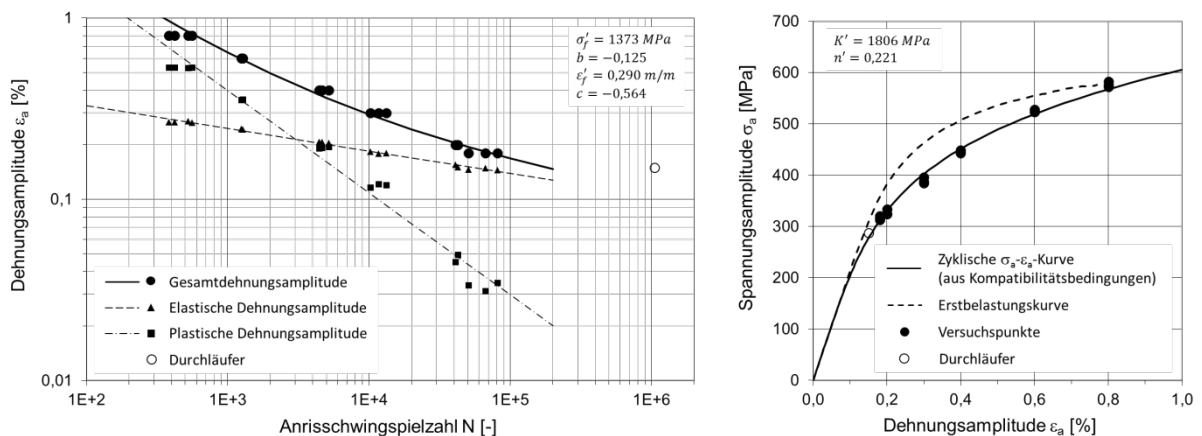


Abbildung A.8: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP800, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Verschleiß

Tabelle A.9: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP800, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																			
CP800, $t=1,5$ mit polierten Kanten																			
E-Modul Zugversuch [GPa]		228,9		Schwingspiel- zahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$													Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben- nr.	Deh- nungs- ampl. $\varepsilon_a$ [%]	Fre- quenz $f$ [Hz]			Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.- ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen					Spannungen				
				$\varepsilon_{max}$ [%]	$\varepsilon_{min}$ [%]					$\varepsilon_{a,t}$ [%]	$\varepsilon_{a,p}$ [%]	$\varepsilon_{a,e}$ [%]	$R_\sigma$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]		
1	2	0,26	3,0	34594	35229	17297	220	0,260	-0,260	0,260	0,043	0,217	-1,0	487	-506	497	-1,0	C-1	
2	3	0,60	0,5	3416	3517	1708	207	0,600	-0,600	0,600	0,320	0,280	-1,0	635	-648	642	-1,0	B-0	
3	4	0,40	1,0	9300	9549	4650	218	0,400	-0,400	0,400	0,141	0,259	-1,0	587	-601	594	-1,0	C-1	
4	5	0,80	0,5	1382	1392	691	215	0,800	-0,800	0,800	0,504	0,296	-1,0	667	-686	677	-1,0	B-1	
5	6	0,26	3,0	45000	50148	22500	212	0,260	-0,260	0,260	0,059	0,201	-1,0	475	-446	461	-0,9	A	
6	7	0,80	0,5	1435	1543	718	220	0,800	-0,800	0,800	0,491	0,309	-1,0	699	-717	708	-1,0	C-1	
7	8	0,60	0,5	2637	2733	1319	217	0,600	-0,600	0,600	0,321	0,279	-1,0	629	-647	638	-1,0	C-1	
8	9	0,20	3,0	203049	206268	101525	225	0,200	-0,200	0,200	0,012	0,188	-1,0	415	-444	430	-1,1	C-1	
9	10	0,40	1,0	8317	9929	4159	214	0,400	-0,400	0,400	0,153	0,247	-1,0	558	-574	566	-1,0	B-0	
10	11	0,18	3,0	-	1019187	-	229	0,180	-0,180	0,180	0,006	0,174	-1,0	356	-441	399	-1,2	Durchläufer	
11	12	0,30	1,0	22820	23667	11410	215	0,300	-0,300	0,300	0,072	0,228	-1,0	517	-526	522	-1,0	C-1	
12	13	0,80	0,5	1529	1819	765	210	0,800	-0,800	0,800	0,506	0,294	-1,0	669	-678	674	-1,0	B-0	
13	14	0,30	1,0	25820	25922	12910	215	0,300	-0,300	0,300	0,068	0,232	-1,0	529	-532	531	-1,0	A	
14	15	0,60	0,5	3484	3485	1742	209	0,600	-0,600	0,600	0,324	0,276	-1,0	629	-633	631	-1,0	A	
15	16	0,20	1,0	209604	227027	104802	219	0,200	-0,200	0,200	0,018	0,182	-1,0	408	-426	417	-1,0	C-1	

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
(Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

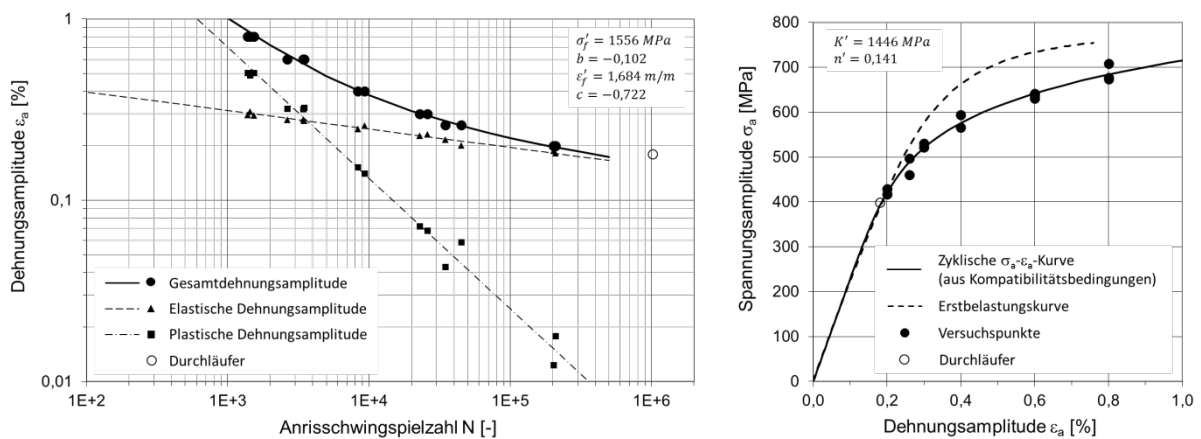
Abbildung A.9: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: CP800, Kantenbearbeitungszustand: Poliert

Tabelle A.10: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																				
CP800, $t=1,5$ mit laserstrahlgeschnittenen Kanten																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		228,9		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$														Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>		
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\epsilon$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]			
1	1	0,30	1,0	16000	16195	8000	209	0,300	-0,300	0,300	0,068	0,232	-1,0	527	-535	531	-1,0	C-0		
2	2	0,40	1,0	1323	1338	662	197	0,400	-0,400	0,400	0,151	0,249	-1,0	591	-547	569	-0,9	C-0		
3	3	0,20	2,0	96827	99859	48414	215	0,200	-0,200	0,200	0,008	0,192	-1,0	434	-447	441	-1,0	C-0		
4	4	0,40	1,0	2674	2761	1337	212	0,400	-0,400	0,400	0,147	0,253	-1,0	577	-583	580	-1,0	B-1		
5	5	0,20	2,0	80909	82387	40455	215	0,200	-0,200	0,200	0,008	0,192	-1,0	425	-456	441	-1,1	C-0		
6	6	0,80	0,5	350	362	175	218	0,800	-0,800	0,800	0,495	0,305	-1,0	688	-708	698	-1,0	C-1		
7	7	0,60	0,5	1308	1513	654	220	0,600	-0,600	0,600	0,315	0,285	-1,0	647	-659	653	-1,0	C-1 + B-0		
8	8	0,30	1,0	13137	16336	6569	223	0,300	-0,300	0,300	0,064	0,236	-1,0	539	-543	541	-1,0	B-0		
9	9	0,80	0,5	325	338	163	226	0,800	-0,800	0,800	0,489	0,311	-1,0	701	-721	711	-1,0	B-1		
10	10	0,18	0,5	156387	177057	78194	228	0,180	-0,180	0,180	0,002	0,178	-1,0	397	-418	408	-1,1	C-0		
11	11	0,60	0,5	944	1383	472	231	0,600	-0,600	0,600	0,312	0,288	-1,0	649	-668	659	-1,0	C-0		
12	12	0,16	3,0	-	1002358	-	234	0,160	-0,160	0,160	0,007	0,153	-1,0	337	-363	350	-1,1	Durchläufer		
13	13	0,40	1,0	3730	3741	1865	236	0,400	-0,400	0,400	0,141	0,259	-1,0	586	-600	593	-1,0	C-0		
14	14	0,30	1,0	21282	21288	10641	239	0,300	-0,300	0,300	0,067	0,233	-1,0	526	-543	535	-1,0	C-0		
15	16	0,18	3,0	-	1484979	-	223	0,180	-0,180	0,180	0,008	0,172	-1,0	369	-418	394	-1,1	Durchläufer		

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

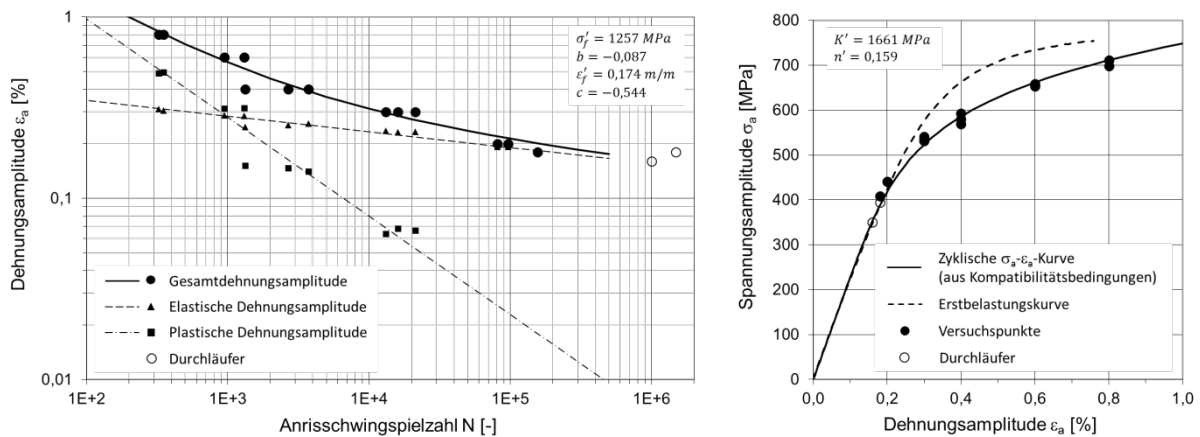


Abbildung A.10: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: CP800, Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten

Tabelle A.11: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																				
CP800, $t=1,5$ mit schergeschnittenen Kanten (Referenz)																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		228,9		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$														Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>		
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]			
1	17	0,60	0,5	1044	1087	522	206	0,600	-0,600	0,600	0,323	0,277	-1,0	631	-638	635	-1,0	C-1		
2	27	0,80	0,5	446	447	223	211	0,800	-0,800	0,800	0,491	0,309	-1,0	701	-716	709	-1,0	C-0		
3	28	0,40	1,0	3186	3192	1593	212	0,400	-0,400	0,400	0,139	0,261	-1,0	595	-598	597	-1,0	C-0 + C-1		
4	53	0,40	1,0	3172	3181	1586	207	0,400	-0,400	0,400	0,149	0,251	-1,0	574	-574	574	-1,0	C-0 + C-1		
5	29	0,30	1,0	7426	7449	3713	215	0,300	-0,300	0,300	0,065	0,235	-1,0	540	-536	538	-1,0	C-0 + C-1		
6	33	0,30	1,0	8230	9056	4115	218	0,300	-0,300	0,300	0,063	0,237	-1,0	543	-540	542	-1,0	C-1		
7	18	0,80	0,5	549	550	275	208	0,800	-0,800	0,800	0,497	0,303	-1,0	687	-701	694	-1,0	C-0		
8	32	0,16	3,0	51582	63335	25791	226	0,160	-0,160	0,160	0,004	0,156	-1,0	357	-359	358	-1,0	C-1		
9	34	0,60	0,5	1020	1082	510	212	0,600	-0,600	0,600	0,316	0,284	-1,0	645	-656	651	-1,0	C-1		
10	19	0,20	2,0	27020	27496	13510	218	0,200	-0,200	0,200	0,017	0,183	-1,0	417	-419	418	-1,0	C-0		
11	55	0,20	2,0	31189	36302	15595	219	0,200	-0,200	0,200	0,016	0,184	-1,0	425	-416	421	-1,0	C-1		
12	20	0,30	1,0	7418	7461	3709	217	0,300	-0,300	0,300	0,073	0,227	-1,0	523	-517	520	-1,0	C-0		
13	54	0,80	0,5	486	502	243	209	0,800	-0,800	0,800	0,490	0,310	-1,0	701	-717	709	-1,0	C-1		
14	30	0,60	0,5	1040	1041	520	213	0,600	-0,600	0,600	0,313	0,287	-1,0	654	-660	657	-1,0	C-0 + C-1		
15	51	0,20	1,0	32174	38159	16087	217	0,200	-0,200	0,200	0,019	0,181	-1,0	416	-412	414	-1,0	C-1		
16	52	0,40	1,0	2928	2941	1464	206	0,400	-0,400	0,400	0,149	0,251	-1,0	575	-574	575	-1,0	C-0		

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

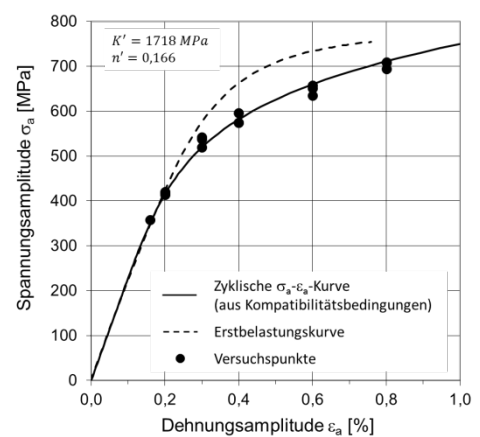
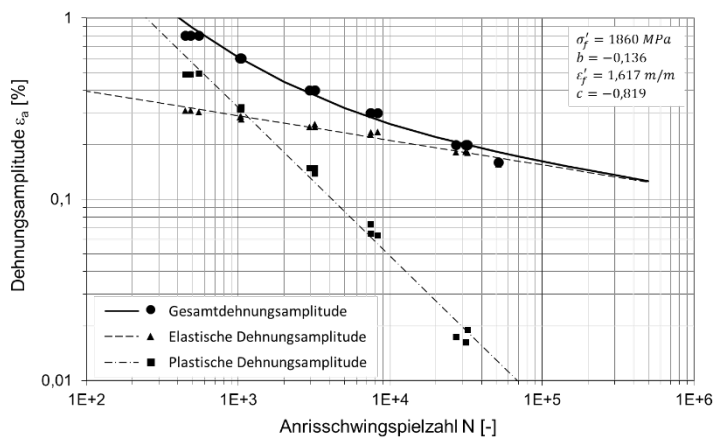


Abbildung A.11: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: CP800, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Referenz

Tabelle A.12: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 gehärtet, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																				
22MnB5, $t=1,5$ mit polierten Kanten																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		195,1		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$														Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\varepsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>		
								$\varepsilon_{max}$ [%]	$\varepsilon_{min}$ [%]	$\varepsilon_{a,t}$ [%]	$\varepsilon_{a,p}$ [%]	$\varepsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]			
1	1	0,30	1,0	105925	119315	52963	207	0,300	-0,300	0,300	-0,010	0,310	-1,0	581	-630	606	-1,1	A		
2	2	0,40	0,5	18995	19076	9498	208	0,400	-0,400	0,400	-0,009	0,409	-1,0	776	-821	799	-1,1	A		
3	3	0,40	0,5	26884	30436	13442	185	0,400	-0,400	0,400	0,027	0,373	-1,0	701	-753	727	-1,1	A		
4	4	0,60	0,5	3194	3207	1597	196	0,600	-0,600	0,600	0,056	0,544	-1,0	1022	-1102	1062	-1,1	D		
5	5	0,80	0,5	1285	1286	643	192	0,800	-0,800	0,800	0,218	0,582	-1,0	1065	-1207	1136	-1,1	A		
6	6	0,60	0,5	3515	3518	1758	186	0,600	-0,600	0,600	0,103	0,497	-1,0	920	-1021	971	-1,1	A		
7	10	0,40	0,5	16218	16787	8109	183	0,400	-0,400	0,400	0,036	0,364	-1,0	673	-747	710	-1,1	A		
8	11	0,28	3,0	203892	244201	101946	188	0,280	-0,280	0,280	0,010	0,270	-1,0	519	-534	527	-1,0	C-0/C-1		
9	13	0,30	3,0	33729	39522	16865	190	0,300	-0,300	0,300	0,024	0,276	-1,0	495	-583	539	-1,2	A		
10	14	0,80	0,5	1427	1431	714	190	0,800	-0,800	0,800	0,229	0,571	-1,0	1063	-1166	1115	-1,1	C-0/C-1		
11	15	0,30	1,0	70795	73779	35398	204	0,300	-0,300	0,300	-0,012	0,312	-1,0	637	-581	609	-0,9	A		
12	22	0,60	0,5	2759	2761	1380	202	0,600	-0,600	0,600	0,072	0,528	-1,0	981	-1078	1029	-1,1	A		
13	31	0,80	0,5	1154	1155	577	200	0,800	-0,800	0,800	0,171	0,629	-1,0	1177	-1279	1228	-1,1	A		
14	32	0,30	1,0	150000	154450	75000	196	0,300	-0,300	0,300	0,001	0,299	-1,0	559	-606	583	-1,1	A		
15	34	0,90	0,5	847	850	424	191	0,900	-0,900	0,900	0,288	0,612	-1,0	1145	-1242	1194	-1,1	A		
16	35	0,26	3,0	-	1030022	-	200	0,260	-0,260	0,260	0,003	0,257	-1,0	485	-519	502	-1,1	Durchläufer		

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
(Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

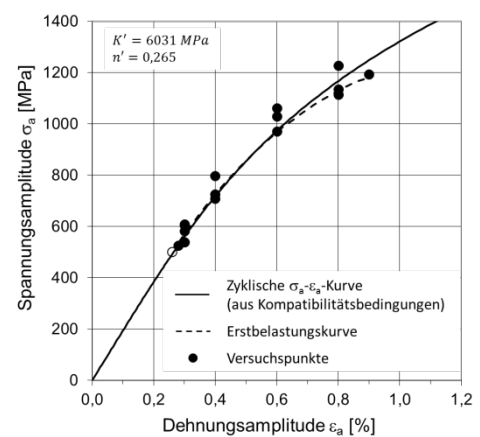
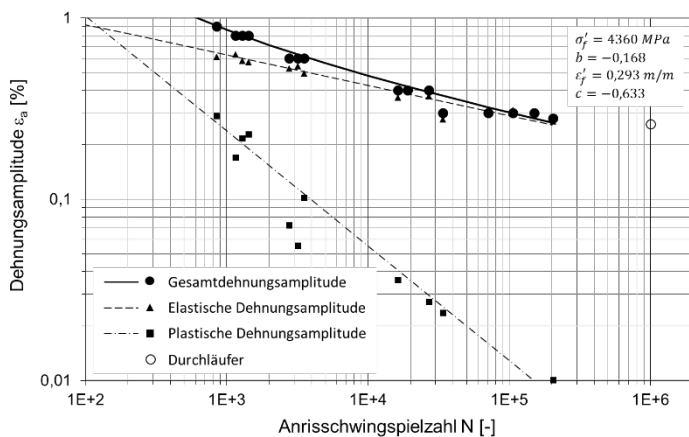
Abbildung A.12: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\varepsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: 22MnB5 gehärtet, Kantenbearbeitungszustand: Poliert

Tabelle A.13: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 gehärtet, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
22MnB5, $t=1,5$ mit laserstrahlgeschnittenen Kanten (Variante 1)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		195,1		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Bemerkungen
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_\epsilon$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	1	0,80	0,5	653	683	327	181	0,800	-0,800	0,800	0,191	0,609	-1,0	1150	-1224	1187	-1,1	C-1
2	2	0,60	0,5	2045	2068	1023	193	0,600	-0,600	0,600	0,050	0,550	-1,0	1043	-1102	1073	-1,1	C-0
3	3	0,25	3,0	25822	30688	12911	195	0,250	-0,250	0,250	0,027	0,223	-1,0	432	-439	436	-1,0	C-0
4	4	0,40	1,0	11850	12312	5925	183	0,400	-0,400	0,400	0,027	0,373	-1,0	720	-735	728	-1,0	C-0
5	5	0,25	3,0	26823	31872	13412	194	0,250	-0,250	0,250	0,024	0,226	-1,0	443	-440	441	-1,0	C-0
6	6	0,20	3,0	52180	55983	26090	188	0,200	-0,200	0,200	0,018	0,182	-1,0	353	-358	355	-1,0	?
7	7	0,40	1,0	9683	9824	4842	194	0,400	-0,400	0,400	0,006	0,394	-1,0	759	-779	769	-1,0	C-0
8	8	0,20	3,0	53211	57554	26606	187	0,200	-0,200	0,200	0,019	0,181	-1,0	350	-358	354	-1,0	C-0
9	9	1,00	0,5	621	646	311	178	1,000	-1,000	1,000	0,410	0,590	-1,0	1104	-1196	1150	-1,1	C-1
10	10	0,60	0,5	2198	2343	1099	190	0,600	-0,600	0,600	0,046	0,554	-1,0	1054	-1109	1082	-1,1	C-1
11	11	0,80	0,5	586	588	293	186	0,800	-0,800	0,800	0,186	0,614	-1,0	1161	-1236	1198	-1,1	C-0
12	12	1,00	0,5	376	385	188	297	1,000	-1,000	1,000	0,335	0,665	-1,0	1312	-1282	1297	-1,0	C-0
13	13	0,40	1,0	8166	8431	4083	189	0,400	-0,400	0,400	-0,039	0,439	-1,0	862	-850	856	-1,0	C-1
14	14	0,80	0,5	532	533	266	191	0,800	-0,800	0,800	0,136	0,664	-1,0	1321	-1271	1296	-1,0	C-1
15	15	0,60	0,5	1871	1902	936	195	0,600	-0,600	0,600	0,049	0,551	-1,0	1087	-1061	1074	-1,0	C-1
16	17	0,15	2,0	77357	91387	38679	197	0,150	-0,150	0,150	-0,002	0,152	-1,0	306	-288	297	-0,9	C-1
17	16	0,60	0,5	2112	2277	1056	189	0,600	-0,600	0,600	0,063	0,537	-1,0	1004	-1093	1049	-1,1	C-1
18	18	0,20	1,5	34713	45297	17357	200	0,200	-0,200	0,200	-0,004	0,204	-1,0	396	-399	398	-1,0	C-1
19	19	0,40	0,5	7979	8081	3990	189	0,400	-0,400	0,400	0,015	0,385	-1,0	734	-767	751	-1,0	?
20	20	0,15	2,0	61814	61815	30907	197	0,150	-0,150	0,150	0,001	0,149	-1,0	295	-286	291	-1,0	?
21	21	0,40	1,0	8300	8613	4150	189	0,400	-0,400	0,400	0,019	0,381	-1,0	718	-768	743	-1,1	C-0
22	22	0,40	0,5	7834	8012	3917	198	0,400	-0,400	0,400	-0,002	0,402	-1,0	756	-813	785	-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)

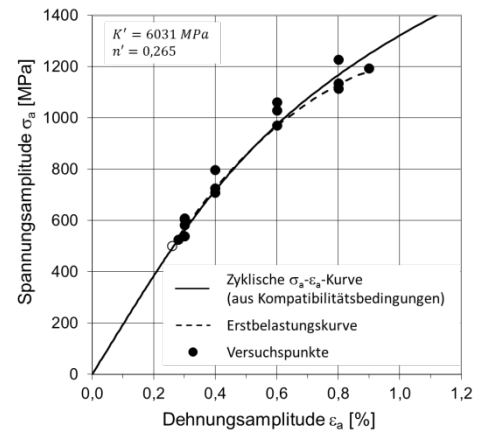
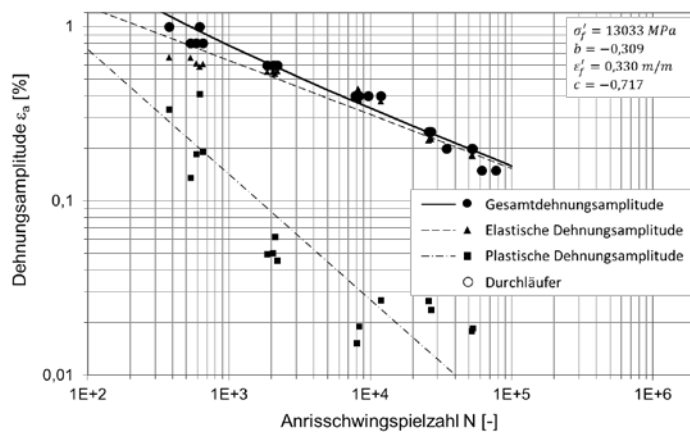


Abbildung A.13: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: 22MnB5 gehärtet, Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten Variante 1



Tabelle A.14: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 gehärtet, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 2),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																			
22MnB5, $t=1,5$ mit laserstrahlgeschnittenen Kanten (Variante 2)																			
E-Modul Zugversuch [GPa]		195,1		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$													Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen					Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>		
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]		$R_\sigma$ [-]	
1	56	0,80	0,5	684	685	342	193	0,800	-0,800	0,800	0,128	0,672	-1,0	1263	-1359	1311	-1,1	C-1	
2	57	0,60	1,0	2345	2360	1173	186	0,600	-0,600	0,600	0,082	0,518	-1,0	972	-1048	1010	-1,1	C-0	
3	21	0,60	0,5	3165	3176	1583	174	0,600	-0,600	0,600	0,120	0,480	-1,0	896	-975	936	-1,1	C-1	
4	22	0,80	0,5	828	829	414	188	0,800	-0,800	0,800	0,153	0,647	-1,0	1224	-1302	1263	-1,1	C-1	
5	52	0,30	1,0	28086	29228	14043	185	0,300	-0,300	0,300	0,017	0,283	-1,0	555	-551	553	-1,0	C-0	
6	53	0,90	0,5	527	527	264	187	0,900	-0,900	0,900	0,243	0,657	-1,0	1236	-1328	1282	-1,1	C-1	
7	33	0,20	3,0	84139	93501	42070	190	0,200	-0,200	0,200	0,005	0,195	-1,0	386	-375	381	-1,0	C-1	
8	6	0,20	3,0	93669	104262	46835	183	0,200	-0,200	0,200	0,011	0,189	-1,0	366	-373	370	-1,0	C-1	
9	55	0,40	1,0	10927	13635	5464	188	0,400	-0,400	0,400	0,013	0,387	-1,0	758	-752	755	-1,0	C-1	
10	54	0,18	3,0	155310	174983	77655	191	0,180	-0,180	0,180	0,004	0,176	-1,0	342	-345	344	-1,0	C-0	

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

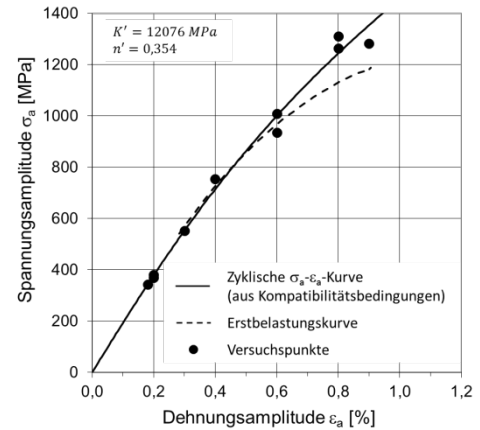
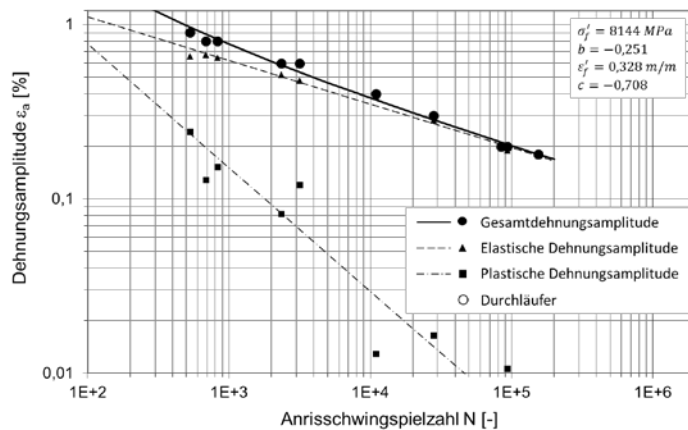


Abbildung A.14: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: 22MnB5 gehärtet, Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten Variante 2

Tabelle A.15: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 gehärtet, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
22MnB5, $t=1,5$ mit schergeschnittenen Kanten (Referenz)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		195,1		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	43	0,80	0,5	570	571	285	187	0,800	-0,800	0,800	0,198	0,602	-1,0	1135	-1214	1175	-1,1	B-1 + C-0
2	19	0,30	1,0	9940	10172	4970	191	0,300	-0,300	0,300	0,008	0,292	-1,0	559	-580	570	-1,0	C-1 + C-0
3	45	0,60	0,5	1736	1740	868	183	0,600	-0,600	0,600	0,069	0,531	-1,0	1009	-1061	1035	-1,1	C-1
4	53	0,40	0,5	2400	2849	1200	187	0,400	-0,400	0,400	0,020	0,380	-1,0	747	-735	741	-1,0	B-1
5	44	0,35	0,5	7763	7934	3882	185	0,350	-0,350	0,350	0,022	0,328	-1,0	630	-649	640	-1,0	C-0
6	55	0,80	0,5	614	770	307	186	0,800	-0,800	0,800	0,228	0,572	-1,0	1074	-1156	1115	-1,1	B-0
7	31	0,20	1,0	13228	37815	6614	197	0,200	-0,200	0,200	-0,001	0,201	-1,0	386	-398	392	-1,0	B-0 + C-1
8	51	0,35	0,5	5240	6439	2620	194	0,350	-0,350	0,350	0,005	0,345	-1,0	661	-685	673	-1,0	C-1
9	52	0,60	0,5	1158	1159	579	182	0,600	-0,600	0,600	0,083	0,517	-1,0	981	-1038	1010	-1,1	C-0
10	39	0,40	0,5	2146	2279	1073	192	0,400	-0,400	0,400	0,010	0,390	-1,0	751	-769	760	-1,0	C-0
11	46	0,15	2,0	43152	50426	21576	193	0,150	-0,150	0,150	0,004	0,146	-1,0	284	-286	285	-1,0	C-0
12	47	0,60	0,5	1770	2598	885	186	0,600	-0,600	0,600	0,085	0,515	-1,0	977	-1032	1005	-1,1	C-1 + D
13	35	0,80	0,2	438	439	219	186	0,800	-0,800	0,800	0,193	0,607	-1,0	1144	-1224	1184	-1,1	C-0
14	34	0,40	0,5	5500	8009	2750	194	0,400	-0,400	0,400	0,007	0,393	-1,0	746	-787	767	-1,1	B-0
15	42	1,00	0,1	278	279	139	188	1,000	-1,000	1,000	0,358	0,642	-1,0	1208	-1297	1253	-1,1	C-0
16	36	1,00	0,1	158	171	79	180	1,000	-1,000	1,000	0,361	0,639	-1,0	1203	-1291	1247	-1,1	?

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B=zwischen den Schnitten, C=außerhalb der Schnitten, D=unter den Schnitten (oben), E=unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

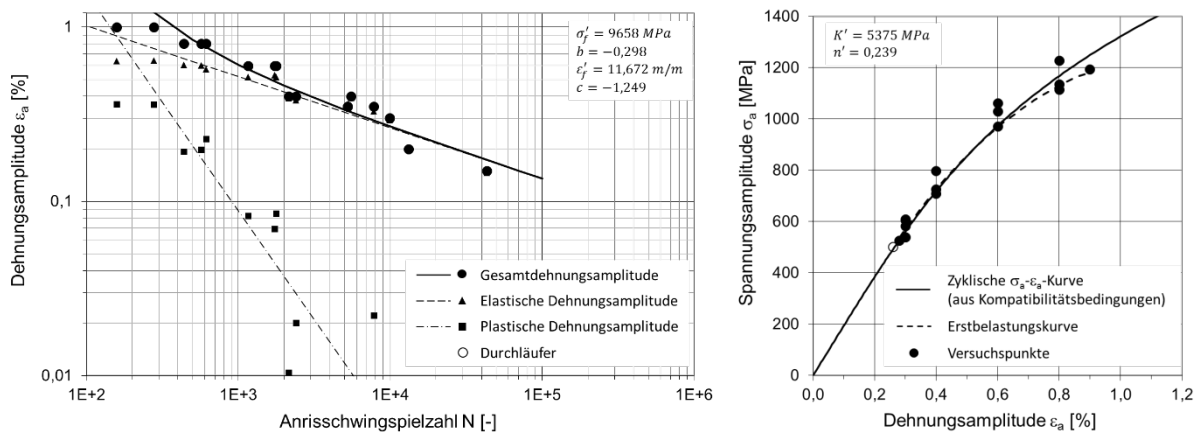


Abbildung A.15: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: 22MnB5 gehärtet, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Referenz

Tabelle A.16: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 gehärtet, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
22MnB5, $t=1,5$ mit schergeschnittenen Kanten (Verschleiß)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		195,1		Schwingspiel- zahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben- nr.	Deh- nungs- ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre- quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.- ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	36	0,30	1,0	11272	18639	5636	185	0,300	-0,300	0,300	0,017	0,283	-1,0	547	-557	552	-1,0	C-1
2	39	0,60	0,5	2058	2112	1029	192	0,600	-0,600	0,600	0,083	0,517	-1,0	954	-1063	1009	-1,1	C-1
3	43	0,25	3,0	12980	13836	6490	193	0,250	-0,250	0,250	0,003	0,247	-1,0	476	-486	481	-1,0	C-0
4	47	0,80	0,5	557	572	279	187	0,800	-0,800	0,800	0,200	0,600	-1,0	1121	-1219	1170	-1,1	C-1
5	38	0,25	3,0	14388	25941	7194	196	0,250	-0,250	0,250	0,003	0,247	-1,0	476	-488	482	-1,0	C-1
6	42	0,20	3,0	34119	37580	17060	189	0,200	-0,200	0,200	0,009	0,191	-1,0	366	-380	373	-1,0	C-0
7	44	0,60	0,5	1715	1765	858	186	0,600	-0,600	0,600	0,056	0,544	-1,0	1033	-1091	1062	-1,1	C-0
8	52	0,40	0,5	5165	5239	2583	192	0,400	-0,400	0,400	0,010	0,390	-1,0	748	-772	760	-1,0	C-1
9	51	0,40	0,5	6823	7437	3412	191	0,400	-0,400	0,400	0,013	0,387	-1,0	722	-787	755	-1,1	C-1
10	50	0,30	1,0	10500	13356	5250	193	0,300	-0,300	0,300	0,007	0,293	-1,0	561	-582	572	-1,0	C-1
11	49	0,80	0,5	868	878	434	184	0,800	-0,800	0,800	0,228	0,572	-1,0	1065	-1168	1117	-1,1	C-1
12	54	0,60	0,5	1945	2013	973	188	0,600	-0,600	0,600	0,081	0,519	-1,0	978	-1048	1013	-1,1	C-1
13	55	0,20	3,0	22050	22536	11025	189	0,200	-0,200	0,200	-0,042	0,242	-1,0	493	-450	472	-0,9	C-1
14	53	1,00	0,1	394	395	197	179	1,000	-1,000	1,000	0,357	0,643	-1,0	1200	-1308	1254	-1,1	C-1
15	46	1,00	0,1	219	223	110	188	1,000	-1,000	1,000	0,332	0,668	-1,0	1252	-1355	1304	-1,1	C-1
16	45	0,15	3,0	-	1000000	-	184	0,150	-0,150	0,150	0,009	0,141	-1,0	270	-280	275	-1,0	Durchläufer
17	45 hoch	1,00	0,1	419	426	210	179	1,000	-1,000	1,000	0,385	0,615	-1,0	1140	-1258	1199	-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)

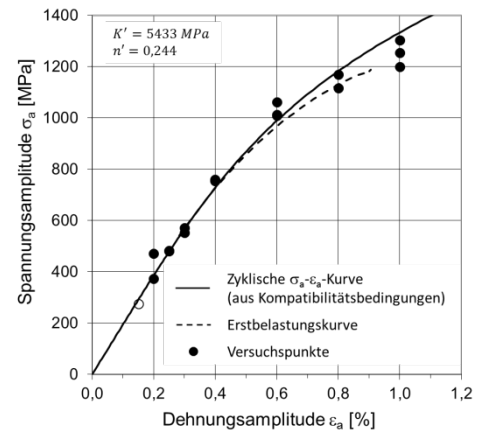
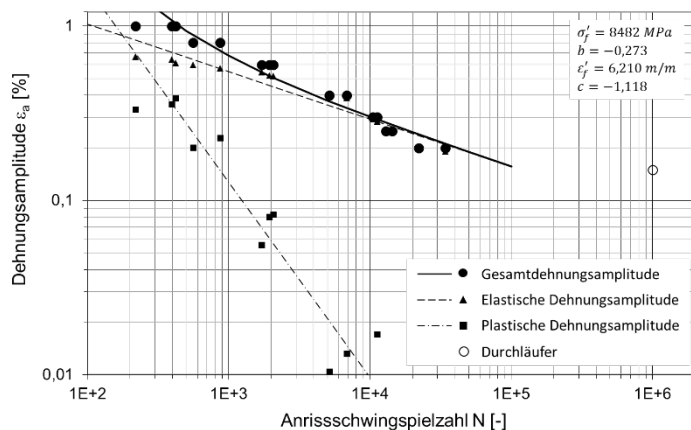
Abbildung A.16: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: 22MnB5 gehärtet, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnittene Verschleiß

Tabelle A.1: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP1000, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																				
DP1000, $t=1,4$ mit polierten Kanten																				
E-Modul Zugversuch [GPa]		211,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$														Bemerkungen
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen						Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]			
1	2	0,60	1,0	3665	3680	1833	202	0,600	-0,600	0,600	0,281	0,319	-1,0	661	-688	675	-1,0	A		
2	3	0,80	0,5	1748	1766	874	210	0,800	-0,800	0,800	0,442	0,358	-1,0	740	-775	758	-1,0	A		
3	4	0,30	1,0	64550	64881	32275	215	0,300	-0,300	0,300	0,074	0,226	-1,0	464	-491	478	-1,1	A		
4	5	0,25	3,0	-	1000000	-	203	0,250	-0,250	0,250	0,051	0,199	-1,0	428	-416	422	-1,0	Durchläufer		
5	5 hoch	1,00	0,1	608	609	304	201	1,000	-1,000	1,000	0,617	0,383	-1,0	788	-833	811	-1,1	A		
6	6	0,30	1,0	73875	81218	36938	205	0,300	-0,300	0,300	0,081	0,219	-1,0	453	-472	463	-1,0	A		
7	7	0,27	3,0	235710	236010	117855	211	0,270	-0,270	0,270	0,060	0,210	-1,0	437	-453	445	-1,0	A		
8	8	0,40	0,8	15235	15367	7618	205	0,400	-0,400	0,400	0,139	0,261	-1,0	545	-561	553	-1,0	A		
9	9	0,40	1,0	15750	15932	7875	205	0,400	-0,400	0,400	0,139	0,261	-1,0	542	-561	552	-1,0	A		
10	10	0,80	0,5	1942	1948	971	205	0,800	-0,800	0,800	0,454	0,346	-1,0	718	-747	733	-1,0	A		
11	11	0,60	0,5	4283	4288	2142	204	0,600	-0,600	0,600	0,284	0,316	-1,0	656	-681	669	-1,0	A / D		
12	12	1,00	0,1	933	957	467	205	1,000	-1,000	1,000	0,621	0,379	-1,0	783	-820	802	-1,0	A		
13	13	0,30	2,0	61210	61301	30605	207	0,300	-0,300	0,300	0,082	0,218	-1,0	449	-472	461	-1,1	A		
14	14	0,60	0,5	4036	4447	2018	199	0,600	-0,600	0,600	0,286	0,314	-1,0	651	-678	665	-1,0	A		
15	15	0,27	2,0	178440	178583	89220	205	0,270	-0,270	0,270	0,064	0,206	-1,0	423	-449	436	-1,1	A		
16	16	0,80	0,3	1905	1923	953	191	0,800	-0,800	0,800	0,452	0,348	-1,0	720	-753	737	-1,0	A		
17	17	0,27	2,0	96389	99567	48195	200	0,270	-0,270	0,270	0,067	0,203	-1,0	423	-436	430	-1,0	A		

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

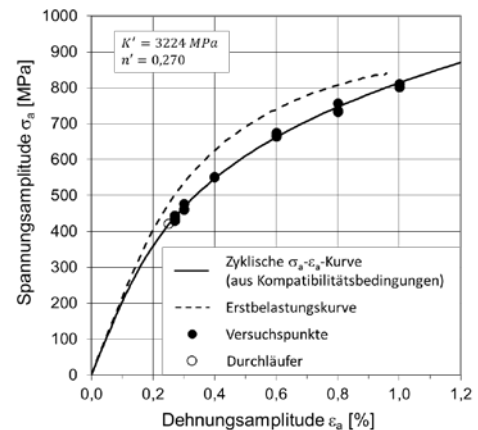
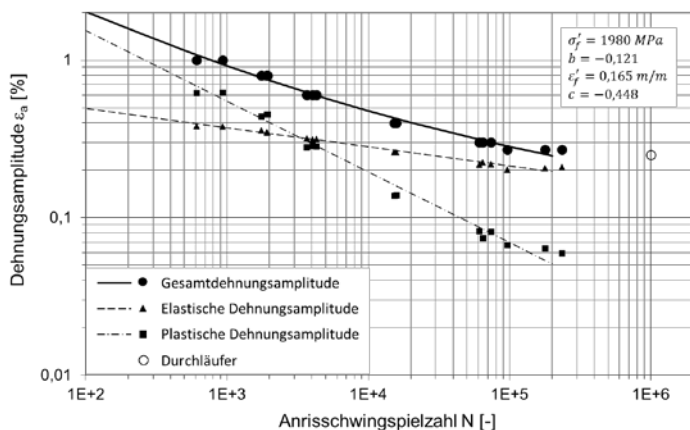


Abbildung A.1: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP1000, Kantenbearbeitungszustand: Poliert

Tabelle A.2: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP1000, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
DP1000, $t=1,4$ mit laserstrahlgeschnittenen Kanten																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		211,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	1	0,60	1,0	1717	1752	859	200	0,600	-0,600	0,600	0,283	0,317	-1,0	662	-680	671	-1,0	C-1
2	2	0,80	0,5	621	636	311	200	0,800	-0,800	0,800	0,448	0,352	-1,0	730	-760	745	-1,0	C-1
3	3	0,30	2,0	21232	21408	10616	207	0,300	-0,300	0,300	0,010	0,290	-1,0	592	-635	614	-1,1	A
4	4	1,00	0,1	239	247	120	205	1,000	-1,000	1,000	0,618	0,382	-1,0	792	-825	809	-1,0	C-0
5	5	0,40	1,0	9028	9402	4514	206	0,400	-0,400	0,400	0,140	0,260	-1,0	542	-559	551	-1,0	C-1 + A
6	6	0,27	2,0	74280	74516	37140	209	0,270	-0,270	0,270	0,063	0,207	-1,0	431	-446	439	-1,0	A
7	7	0,60	0,5	1767	1768	884	208	0,600	-0,600	0,600	0,282	0,318	-1,0	647	-698	673	-1,1	B-1 + C-0
8	8	0,80	0,5	575	576	288	199	0,800	-0,800	0,800	0,448	0,352	-1,0	728	-761	745	-1,0	C-0 + C-1
9	9	1,00	0,1	285	466	143	189	1,000	-1,000	1,000	0,624	0,376	-1,0	776	-816	796	-1,1	B-0
10	10	0,80	0,5	600	517	300	203	0,800	-0,800	0,800	0,446	0,354	-1,0	735	-764	750	-1,0	C-1
11	11	0,25	2,0	99450	100268	49725	208	0,250	-0,250	0,250	0,007	0,243	-1,0	500	-527	514	-1,1	A
12	12	0,40	1,0	12082	12167	6041	191	0,400	-0,400	0,400	0,080	0,320	-1,0	663	-690	677	-1,0	C-0 + A
13	13	0,40	1,0	7670	7995	3835	202	0,400	-0,400	0,400	0,069	0,331	-1,0	678	-723	701	-1,1	C-1
14	14	0,30	2,0	50880	51052	25440	199	0,300	-0,300	0,300	0,086	0,214	-1,0	447	-459	453	-1,0	A
15	15	0,30	3,0	76090	76332	38045	177	0,300	-0,300	0,300	0,096	0,204	-1,0	432	-433	433	-1,0	A
16	16	0,22	3,0	-	1030665	-	193	0,220	-0,220	0,220	0,042	0,178	-1,0	367	-386	377	-1,1	Durchläufer
17	16 hoch	1,00	0,2	328	329	164	189	1,000	-1,000	1,000	0,624	0,376	-1,0	776	-814	795	-1,0	C-0
18	17	0,25	2,0	105925	116673	52963	205	0,250	-0,250	0,250	0,054	0,196	-1,0	407	-423	415	-1,0	A

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)

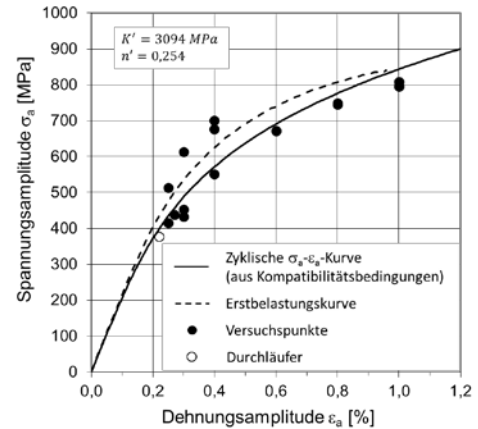
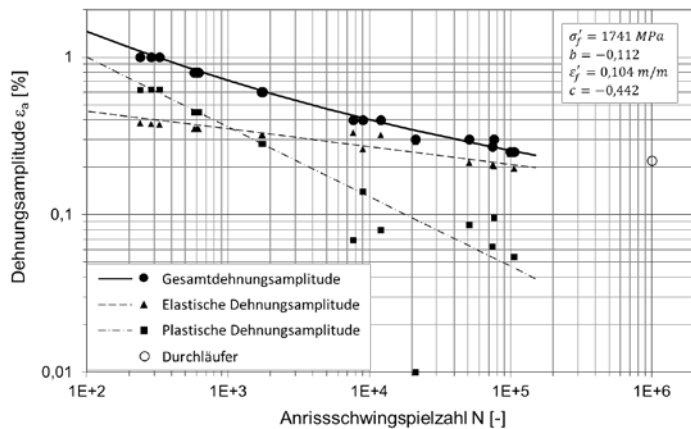


Abbildung A.2: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP1000, Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten

Tabelle A.3: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP1000, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
DP1000, $t=1,4$ mit schergeschnittenen Kanten (Referenz)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		211,6		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	R30	0,80	0,5	817	984	409	196	0,800	-0,800	0,800	0,460	0,340	-1,0	708	-730	719	-1,0	B-0
2	R32	0,60	0,5	2108	2210	1054	194	0,600	-0,600	0,600	0,300	0,300	-1,0	627	-644	636	-1,0	B-1
3	R6	0,30	2,0	17330	17503	8665	202	0,300	-0,300	0,300	0,088	0,212	-1,0	450	-448	449	-1,0	B-1
4	R31	0,25	2,0	34710	35023	17355	201	0,250	-0,250	0,250	0,058	0,192	-1,0	409	-404	407	-1,0	B-1
5	R33	0,40	1,0	6892	6932	3446	200	0,400	-0,400	0,400	0,149	0,251	-1,0	525	-537	531	-1,0	C-0
6	R34	0,20	2,0	61731	70489	30866	206	0,200	-0,200	0,200	0,027	0,173	-1,0	374	-360	367	-1,0	C-1 / A
7	R96	1,00	0,3	428	472	214	196	1,000	-1,000	1,000	0,639	0,361	-1,0	750	-777	764	-1,0	B-0
8	R95	0,80	0,5	920	1032	460	194	0,800	-0,800	0,800	0,462	0,338	-1,0	702	-727	715	-1,0	B-0
9	R37	1,00	0,3	376	443	188	197	1,000	-1,000	1,000	0,644	0,356	-1,0	738	-770	754	-1,0	B-0
10	R93	0,60	0,5	2375	2416	1188	193	0,600	-0,600	0,600	0,299	0,301	-1,0	627	-645	636	-1,0	C-1
11	R14	0,30	2,0	21210	21295	10605	197	0,300	-0,300	0,300	0,085	0,215	-1,0	453	-457	455	-1,0	B-1
12	R7	0,20	2,0	62806	73731	31403	207	0,200	-0,200	0,200	0,025	0,175	-1,0	371	-368	370	-1,0	B-0 + C-1
13	R35	0,40	1,0	6976	7022	3488	202	0,400	-0,400	0,400	0,150	0,250	-1,0	523	-533	528	-1,0	B-1
14	R94	0,80	0,5	895	1020	448	193	0,800	-0,800	0,800	0,463	0,337	-1,0	701	-726	714	-1,0	B-0
15	R13	0,80	0,5	830	835	415	197	0,800	-0,800	0,800	0,467	0,333	-1,0	695	-713	704	-1,0	B-1

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

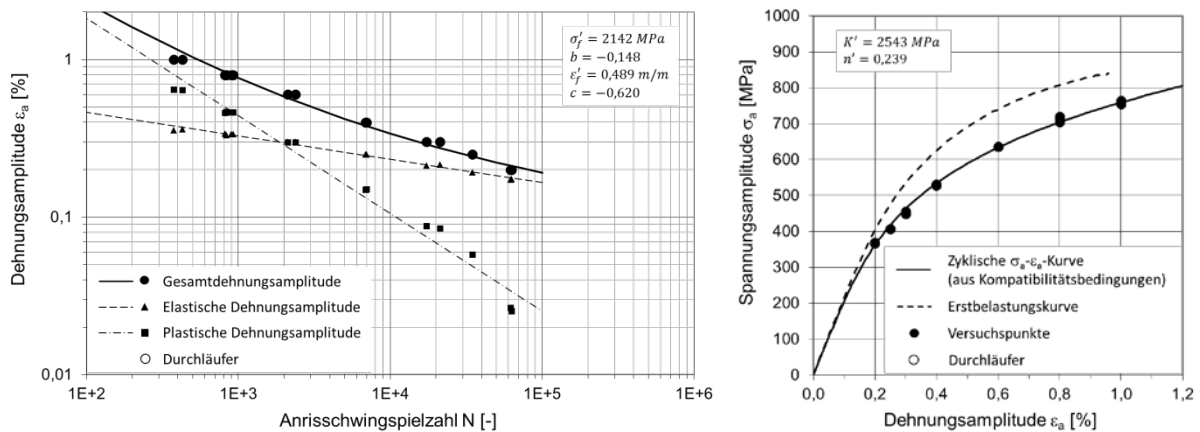


Abbildung A.3: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: DP1000, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Referenz

Tabelle A.4: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP1000, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
CP1000, $t=1,4$ mit polierten Kanten																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		211,4		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												
lfd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	$E$ [GPa]	Dehnungen						Spannungen				Bemerkungen
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	$R_\sigma$ [-]	
1	1	0,80	0,5	1104	1165	552	202	0,800	-0,800	0,800	0,449	0,351	-1,0	726	-756	741	-1,0	A
2	2	0,60	0,5	1512	1513	756	204	0,600	-0,600	0,600	0,258	0,342	-1,0	710	-737	724	-1,0	A
3	3	0,60	0,3	2120	2273	1060	202	0,600	-0,600	0,600	0,261	0,339	-1,0	704	-729	717	-1,0	A
4	5	0,25	3,0	-	1002870	-	195	0,250	-0,250	0,250	0,021	0,229	-1,0	452	-517	485	-1,1	Durchläufer
5	5 hoch	1,00	0,3	525	571	263	189	1,000	-1,000	1,000	0,643	0,357	-1,0	736	-773	755	-1,1	A
6	6	0,30	3,0	54520	54696	27260	205	0,300	-0,300	0,300	0,010	0,290	-1,0	609	-619	614	-1,0	C-0
7	7	0,40	1,0	7656	8160	3828	210	0,400	-0,400	0,400	0,075	0,325	-1,0	670	-702	686	-1,0	A
8	8	0,27	3,0	110408	149158	55204	212	0,270	-0,270	0,270	0,000	0,270	-1,0	563	-580	572	-1,0	A
9	9	0,40	1,0	11844	12087	5922	201	0,400	-0,400	0,400	0,080	0,320	-1,0	658	-696	677	-1,1	A
10	10	0,80	0,5	1162	1335	581	202	0,800	-0,800	0,800	0,458	0,342	-1,0	706	-741	724	-1,0	A + B-0
11	11	1,00	0,3	681	693	341	208	1,000	-1,000	1,000	0,644	0,356	-1,0	736	-771	754	-1,0	A
12	12	0,27	3,0	201480	201889	100740	209	0,270	-0,270	0,270	0,006	0,264	-1,0	553	-565	559	-1,0	A
13	13	0,27	3,0	116410	116529	58205	211	0,270	-0,270	0,270	0,004	0,266	-1,0	560	-565	563	-1,0	C-1
14	14	0,30	2,0	63250	63611	31625	208	0,300	-0,300	0,300	0,009	0,291	-1,0	607	-623	615	-1,0	A
15	15	0,40	1,0	8188	8770	4094	200	0,400	-0,400	0,400	0,080	0,320	-1,0	669	-686	678	-1,0	A
16	16	1,00	0,3	465	497	233	205	1,000	-1,000	1,000	0,632	0,368	-1,0	760	-794	777	-1,0	A

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

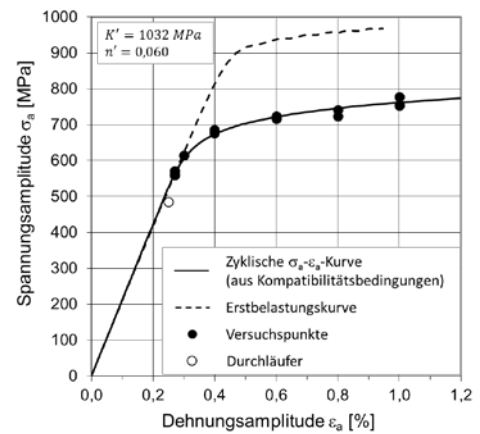
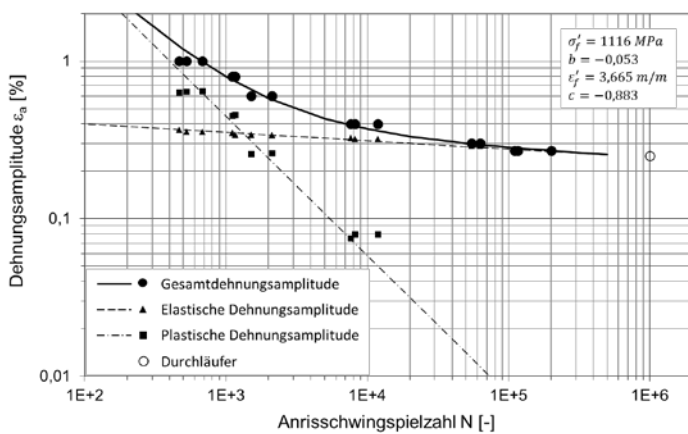


Abbildung A.4: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: CP1000, Kantenbearbeitungszustand: Poliert

Tabelle A.5: Versuchsprotokoll, dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP1000, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Zusammenstellung Ergebnisse dehnungskontrollierte Versuche																		
CP1000, $t=1,4$ mit schergeschnittenen Kanten (Referenz)																		
E-Modul Zugversuch [GPa]		211,4		Schwingspielzahl $N_i$		Ergebnisse bei halber Anrisslebensdauer $N=N_i/2=N_{50}$												Bemerkungen
Ifd. Nr.	Proben-nr.	Dehnungs-ampl. $\epsilon_a$ [%]	Fre-quenz $f$ [Hz]	Anriss $N_i$	Bruch $N_B$ bzw. Vers.-ende $N_E$	$N_{50}$	E [GPa]	Dehnungen					Spannungen				Risslage <sup>1)</sup>	
								$\epsilon_{max}$ [%]	$\epsilon_{min}$ [%]	$\epsilon_{a,t}$ [%]	$\epsilon_{a,p}$ [%]	$\epsilon_{a,e}$ [%]	$R_c$ [-]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]		$R_\sigma$ [-]
1	R48	0,60	0,5	1326	1629	663	193	0,600	-0,600	0,600	0,264	0,336	-1,0	701	-721	711	-1,0	C-1
2	R47	0,30	2,0	13536	13851	6768	204	0,300	-0,300	0,300	0,016	0,284	-1,0	591	-611	601	-1,0	C-0
3	R18	0,80	0,5	750	821	375	193	0,800	-0,800	0,800	0,452	0,348	-1,0	724	-749	737	-1,0	A
4	R36	0,25	2,0	23796	24305	11898	202	0,250	-0,250	0,250	0,014	0,236	-1,0	494	-505	500	-1,0	C-0
5	R46	0,40	1,0	4908	4944	2454	199	0,400	-0,400	0,400	0,073	0,327	-1,0	682	-700	691	-1,0	C-1
6	R6	0,20	2,0	54638	57357	27319	207	0,200	-0,200	0,200	0,007	0,193	-1,0	402	-413	408	-1,0	C-0
7	R45	0,80	0,5	544	575	272	196	0,800	-0,800	0,800	0,449	0,351	-1,0	730	-756	743	-1,0	B-0
8	R43	0,15	3,0	110408	174757	55204	206	0,150	-0,150	0,150	0,006	0,144	-1,0	300	-307	304	-1,0	C-1
9	R38	0,60	0,5	1464	1872	732	195	0,600	-0,600	0,600	0,264	0,336	-1,0	698	-723	711	-1,0	B-0
10	R51	0,30	2,0	9582	10195	4791	203	0,300	-0,300	0,300	0,016	0,284	-1,0	588	-612	600	-1,0	C-0
11	R52	0,15	3,0	105051	125106	52526	205	0,150	-0,150	0,150	0,007	0,143	-1,0	297	-308	303	-1,0	C-1 + C-0
12	R10	1,00	0,3	322	344	161	191	1,000	-1,000	1,000	0,638	0,362	-1,0	749	-780	765	-1,0	B-1
13	R7	1,00	0,3	314	434	157	197	1,000	-1,000	1,000	0,638	0,362	-1,0	751	-781	766	-1,0	B-0
14	R27	0,40	1,0	4382	4383	2191	193	0,400	-0,400	0,400	0,073	0,327	-1,0	685	-697	691	-1,0	C-1
15	R8	0,25	2,0	25250	26223	12625	206	0,250	-0,250	0,250	0,011	0,239	-1,0	505	-507	506	-1,0	C-0

1) Risslage: A= von der Oberfläche, B= zwischen den Schnitten, C= außerhalb der Schnitten, D= unter den Schnitten (oben), E= unter den Schnitten (unten)  
 0: Aufnehmerseite, 1: Gegenüberliegende Seite  
 (Bsp: B-0: zw. Schnitten auf Aufnehmerseite)

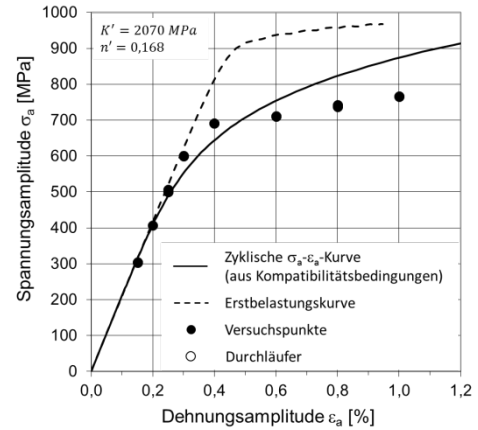
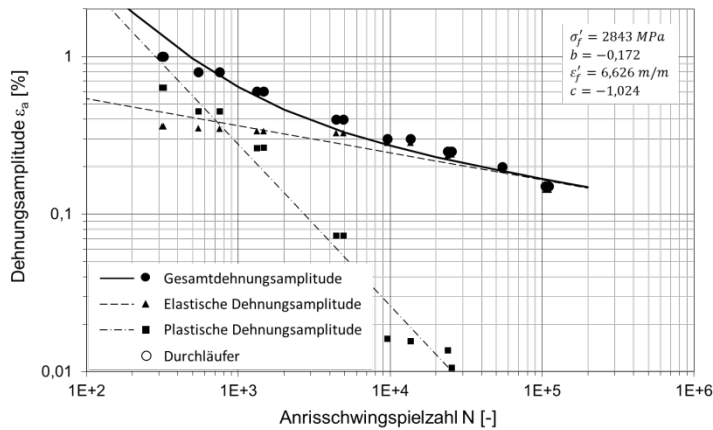


Abbildung A.5: Dehnungswöhlerlinie und zyklische  $\sigma_a$ - $\epsilon_a$ -Kurve, Werkstoff: CP1000, Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten Referenz



## B Ergebnisse spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche

Tabelle B.1: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Werkstoff:		DC04							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		1P							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis R:		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	1	1,50	9,98	15,0	170	0,00	2,55	5,32E+05	Bruch
2	2	1,50	9,97	15,0	180	0,00	2,69	9,37E+04	Bruch
3	3	1,50	9,99	15,0	165	0,00	2,47	1,99E+06	Bruch
4	4	1,50	9,97	15,0	180	0,00	2,69	1,29E+05	Bruch
5	5	1,49	9,92	14,8	165	0,00	2,44	1,70E+06	Bruch
6	6	1,49	9,98	14,9	180	0,00	2,68	2,13E+05	Bruch
7	7	1,50	9,99	15,0	180	0,00	2,70	1,34E+05	Bruch
8	8	1,50	9,96	14,9	170	0,00	2,54	3,47E+05	Bruch
9	9	1,50	9,96	14,9	170	0,00	2,54	4,44E+05	Bruch
10	10	1,49	9,98	14,9	165	0,00	2,45	3,86E+06	Bruch
11	11	1,51	9,99	15,1	150	0,00	2,262	10000000	Durchläufer
12	11 hoch	1,51	9,99	15,1	180	0,00	2,715	107390	Bruch
13	12	1,5	10	15,0	170	0,00	2,553	316100	Bruch
14	13	1,53	10	15,3	165	0,00	2,525	510710	Bruch
15	14	1,52	10,03	15,2	165	0,00	2,515	1147490	Bruch
16	15	1,51	10	15,1	170	0,00	2,567	299674	Bruch
17	16	1,5	9,98	15,0	180	0,00	2,695	160272	Bruch
18	17	1,49	9,98	14,9	170	0,00	2,528	370411	Bruch
19	18	1,49	9,99	14,9	160	0,00	2,382	3204030	Bruch
20	19	1,49	10	14,9	180	0,00	2,682	91020	Bruch
21	20	1,5	10	15,0	165	0,00	2,475	734277	Bruch

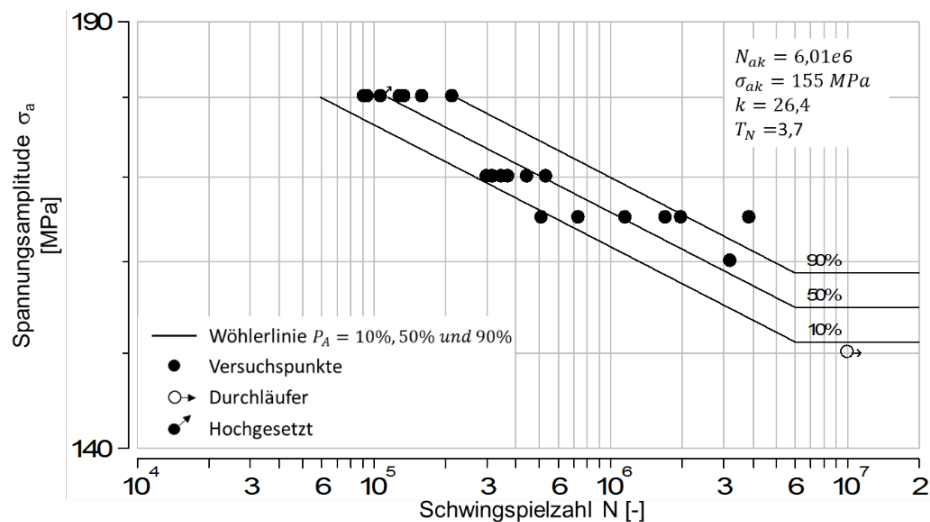


Abbildung B.1: Wöhlerlinie, DC04, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.2: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DC04				
Kantenbearbeitungszustand:					Laserstrahlgeschnitten				
Kurzbezeichnung:					1L				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis R:					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	1	1,50	10,04	15,1	170	0,00	2,56	5,26E+05	Bruch
2	2	1,50	10,06	15,1	180	0,00	2,72	1,58E+05	Bruch
3	3	1,50	10,05	15,1	170	0,00	2,56	6,14E+05	Bruch
4	4	1,50	10,04	15,1	180	0,00	2,71	1,69E+05	Bruch
5	5	1,50	10,07	15,1	180	0,00	2,72	1,46E+05	Bruch
6	6	1,50	10,04	15,1	165	0,00	2,49	1,08E+06	Bruch
7	7	1,50	10,04	15,1	170	0,00	2,56	6,90E+05	Bruch
8	8	1,49	10,09	15,0	180	0,00	2,71	2,03E+05	Bruch
9	9	1,50	10,06	15,1	190	0,00	2,87	4,65E+04	Bruch
10	10	1,50	10,06	15,1	190	0,00	2,87	4,40E+04	Bruch
11	11	1,50	10,06	15,1	170	0,00	2,57	9,23E+05	Bruch
12	12	1,48	10,06	14,9	160	0,00	2,38	2,46E+06	Bruch
13	13	1,50	10,04	15,1	190	0,00	2,86	4,70E+04	Bruch
14	14	1,48	10,05	14,9	150	0,00	2,23	1,00E+07	Durchläufer
15	14 hoch	1,48	10,05	14,9	190	0,00	2,83	4,52E+04	Bruch
16	15	1,49	10,05	15,0	165	0,00	2,47	1,70E+06	Bruch
17	16	1,50	10,04	15,1	160	0,00	2,41	2,64E+06	Bruch
18	17	1,49	10,07	15,0	160	0,00	2,40	2,40E+06	Bruch
19	18	1,49	10,05	15,0	165	0,00	2,47	8,95E+05	Bruch

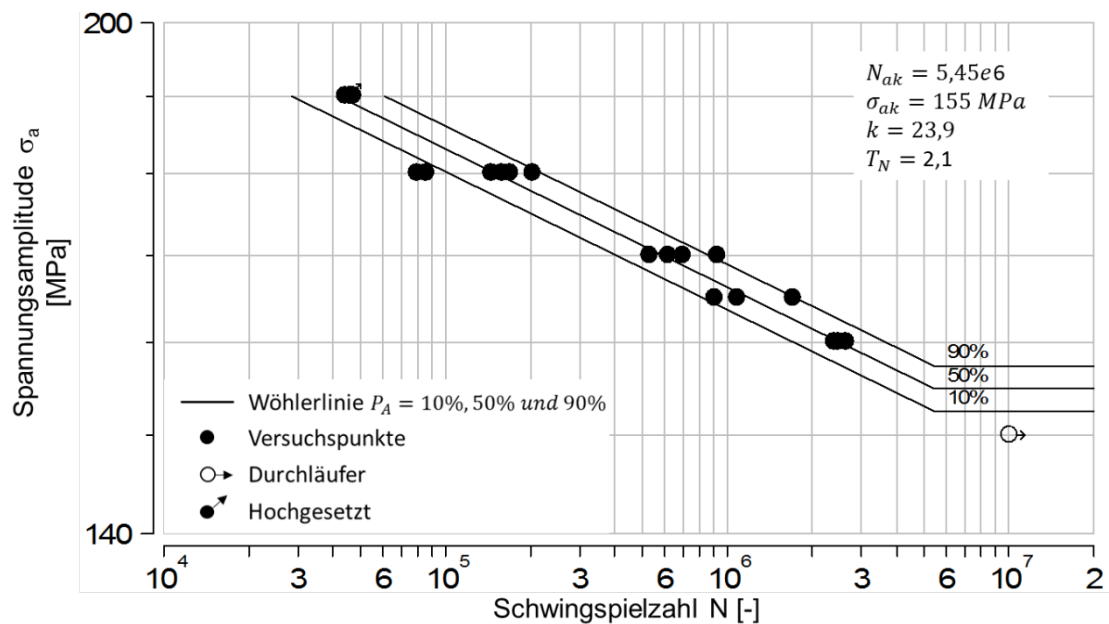
Abbildung B.2: Wöhlerlinie, DC04, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.3: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DC04				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten, Strategie: Referenz				
Kurzbezeichnung:					1SR				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis R:					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	R6	1,53	10,00	15,3	180	0,00	2,75	9,58E+04	Bruch
2	R7	1,53	10,00	15,3	170	0,00	2,60	4,95E+05	Bruch
3	R12	1,52	10,00	15,2	165	0,00	2,51	2,15E+06	Bruch
4	R49	1,53	10,01	15,3	170	0,00	2,60	2,29E+05	Bruch
5	R16	1,52	10,01	15,2	164	0,00	2,50	8,61E+05	Bruch
6	R19	1,54	10,01	15,4	190	0,00	2,93	2,63E+04	Bruch
7	R24	1,51	10,01	15,1	170	0,00	2,57	2,57E+05	Bruch
8	R53	1,52	10,00	15,2	165	0,00	2,51	3,38E+05	Bruch
9	R54	1,54	10,02	15,4	180	0,00	2,78	7,53E+04	Bruch
10	R52	1,50	10,01	15,0	180	0,00	2,71	8,76E+04	Bruch
11	R33	1,53	10,03	15,3	170	0,00	2,61	1,80E+05	Bruch
12	R42	1,52	10,05	15,3	165	0,00	2,52	6,95E+05	Bruch
13	R32	1,51	10,01	15,1	190	0,00	2,87	2,63E+04	Bruch
14	R30	1,51	10,01	15,1	190	0,00	2,87	2,61E+04	Bruch
15	R51	1,49	10,03	14,9	150	0,00	2,24	1,00E+07	Durchläufer
16	R51 hoch	1,49	10,03	14,9	190	0,00	2,84	2,65E+04	Bruch
17	R23	1,55	10,04	15,6	165	0,00	2,57	2,45E+05	Bruch
18	R55	1,52	10,02	15,2	180	0,00	2,74	4,29E+04	Bruch

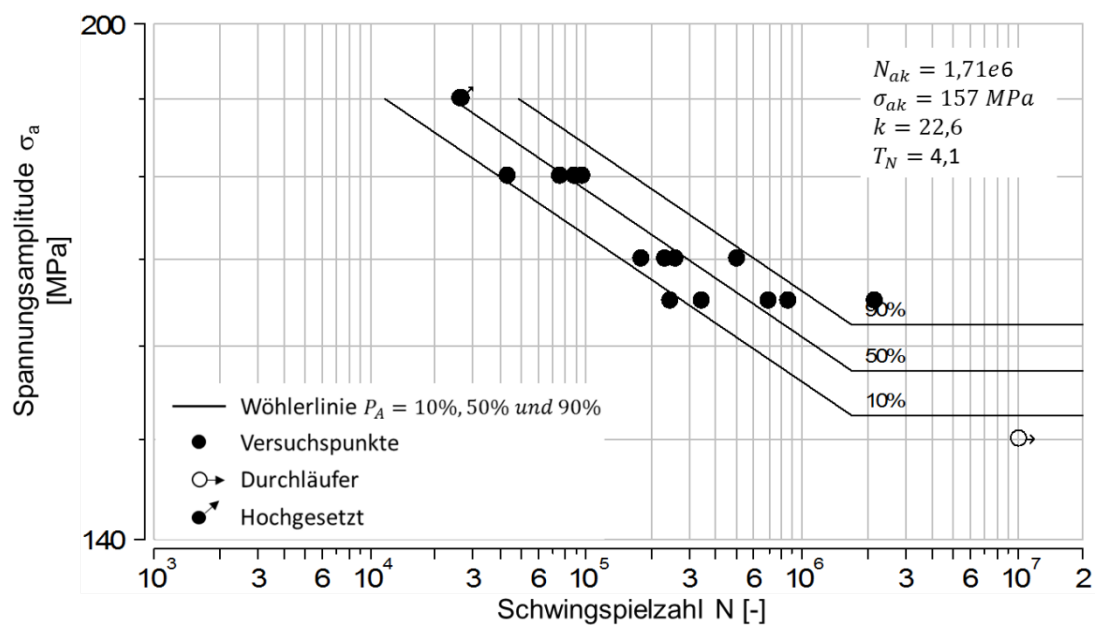
Abbildung B.3: Wöhlerlinie, DC04, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.4: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:										DC04
Kantenbearbeitungszustand:										Poliert
Kurzbezeichnung:										1P
Kerbformzahl $K_t$ :										2,5
Lastverhältnis $R$ :										-1
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	59,98	12,07	71,9	50	0,00	3,59	5,00E+06	Durchläufer
2	2	1,50	60,21	12,07	72,2	50	0,00	3,61	4,00E+06	Durchläufer
3	1 hoch	1,50	59,98	12,07	71,9	75	0,00	5,39	5,00E+06	Durchläufer
4	2 hoch	1,50	60,21	12,07	72,2	100	0,00	7,22	7,91E+05	Anriss
5	3	1,50	59,98	12,07	71,9	125	0,00	8,98	1,15E+05	Anriss
6	4	1,50	60,18	12,04	72,2	125	0,00	9,03	1,25E+05	Anriss
7	5	1,50	60,08	12,06	72,0	100	0,00	7,20	7,07E+05	Anriss
8	6	1,50	59,94	12,06	71,8	90	0,00	6,47	1,50E+06	Anriss
9	7	1,50	59,98	12,24	71,6	125	0,00	8,95	1,44E+05	Anriss
10	8	1,50	59,91	12,17	71,6	100	0,00	7,16	5,45E+05	Anriss
11	9	1,50	60,00	12,06	71,9	90	0,00	6,48	1,91E+06	Anriss
12	10	1,50	59,96	12,09	71,8	140	0,00	10,05	7,15E+04	Anriss
13	11	1,50	59,99	12,20	71,7	140	0,00	10,04	7,64E+04	Anriss
14	12	1,50	59,95	12,04	71,9	100	0,00	7,20	8,09E+05	Anriss
15	13	1,50	59,98	12,09	71,8	90	0,00	6,47	1,78E+06	Anriss

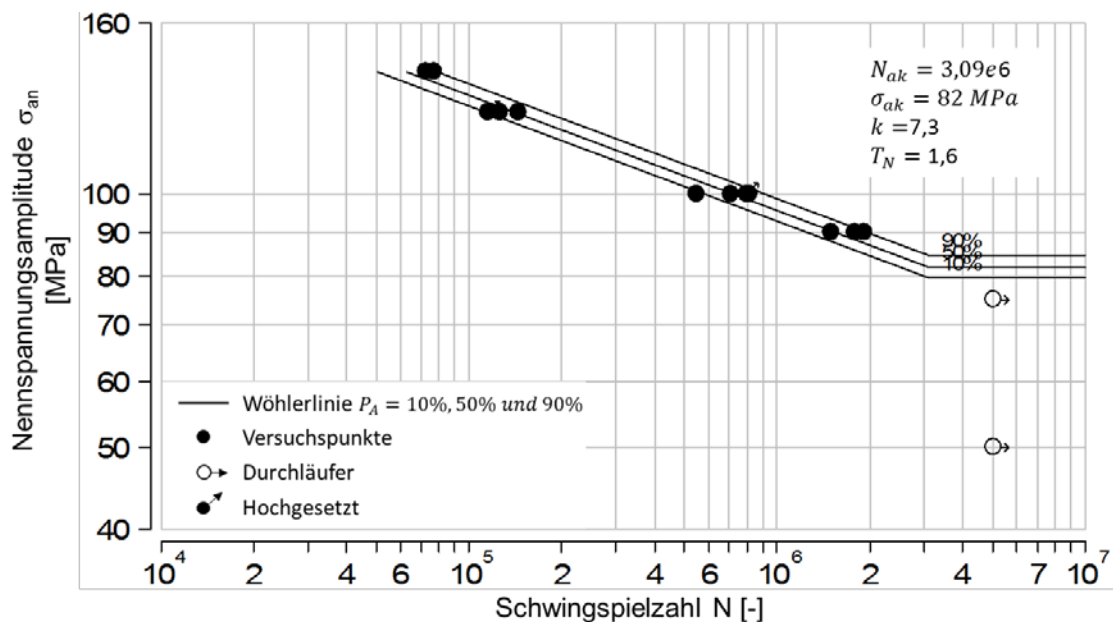
Abbildung B.4: Wöhlerlinie, DC04, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.5: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DC04								
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten								
Kurzbezeichnung:		1L								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	60,01	11,95	72,1	125	0,00	9,01	1,01E+05	Anriss
2	2	1,50	60,02	11,96	72,1	140	0,00	10,09	5,17E+04	Anriss
3	3	1,50	60,02	11,95	72,1	125	0,00	9,01	8,80E+01	Anriss
4	4	1,49	60,00	11,96	71,6	100	0,00	7,16	3,77E+05	Anriss
5	5	1,49	60,03	11,96	71,6	100	0,00	7,16	3,13E+05	Anriss
6	6	1,49	60,05	11,95	71,7	125	0,00	8,96	8,68E+04	Anriss
7	7	1,49	60,03	11,92	71,7	100	0,00	7,14	3,06E+05	Anriss
8	8	1,49	60,04	11,99	71,6	90	0,00	6,45	9,03E+05	Anriss
9	9	1,49	60,03	11,96	71,6	90	0,00	6,45	6,30E+05	Anriss
10	10	1,48	60,01	11,93	71,2	75	0,00	5,34	6,70E+06	Durchläufer
11	10 hoch	1,48	60,01	11,93	71,2	140	0,00	9,96	3,55E+04	Anriss
12	11	1,48	60,01	11,92	71,2	90	0,00	6,41	8,25E+05	Anriss
13	12	1,49	60,02	11,92	71,7	80	0,00	5,73	2,54E+06	Anriss
14	13	1,51	60,01	12,09	72,4	90	0,00	6,53	5,39E+05	Anriss
15	14	1,51	60,04	12,01	72,5	125	0,00	9,07	8,01E+04	Anriss
16	15	1,51	60,02	12,00	72,5	100	0,00	7,25	2,76E+05	Anriss
17	16	1,51	60,02	12,00	72,5	80	0,00	5,80	1,15E+06	Anriss
18	17	1,51	60,05	11,99	72,6	65	0,00	4,72	1,00E+07	Durchläufer
19	17 hoch	1,51	60,05	11,99	72,6	125	0,00	9,071	65900	Anriss

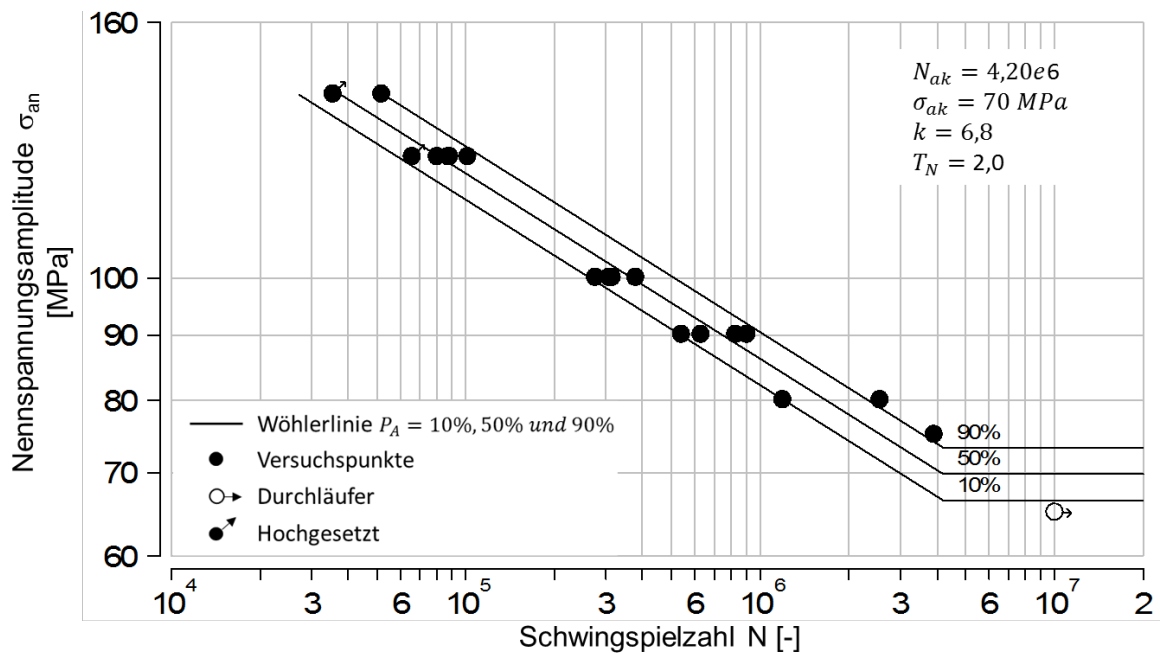
Abbildung B.5: Wöhlerlinie, DC04, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.6: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DC04, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DC04								
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Referenz								
Kurzbezeichnung:		2SR								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	R6	1,50	59,88	11,98	71,9	125	0,00	8,98	6,85E+04	Anriss
2	R7	1,49	59,89	11,97	71,4	100	0,00	7,14	5,76E+05	Anriss
3	R8	1,50	59,92	11,98	71,9	90	0,00	6,47	6,40E+06	Durchläufer
4	R9	1,49	59,91	11,98	71,4	125	0,00	8,93	9,15E+04	Anriss
5	R10	1,49	59,93	11,97	71,5	100	0,00	7,15	3,86E+05	Anriss
6	R11	1,49	59,94	11,98	71,5	110	0,00	7,86	2,19E+05	Anriss
7	R8 hoch	1,50	59,92	11,98	71,9	140	0,00	10,07	2,92E+04	Anriss
8	R26	1,49	59,98	11,98	71,5	110	0,00	7,87	2,15E+05	Anriss
9	R27	1,49	59,96	11,98	71,5	100	0,00	7,15	4,02E+05	Anriss
10	R28	1,50	59,98	11,98	72,0	100	8,80	7,20	4,19E+05	Anriss
11	R29	1,50	59,92	11,98	71,9	125	0,00	8,99	6,45E+04	Anriss
12	R12	1,49	59,95	11,98	71,5	110	0,00	7,86	1,91E+05	Anriss
13	R30	1,50	59,94	11,99	71,9	105	0,00	7,55	2,46E+05	Anriss
14	R19	1,50	59,87	11,97	71,9	140	0,00	10,06	2,73E+04	Anriss
15	R20	1,49	59,89	11,98	71,4	110	0,00	7,85	2,56E+05	Anriss
16	R21	1,49	59,91	11,98	71,4	125	0,00	8,93	6,17E+04	Anriss
17	R22	1,49	59,95	11,99	71,5	105	0,00	7,50	3,87E+05	Anriss
18	R23	1,50	59,97	11,99	72,0	95	0,00	6,84	5,35E+05	Anriss
19	R24	1,5	59,99	11,99	72,0	140	0,00	10,08	2,97E+04	Anriss

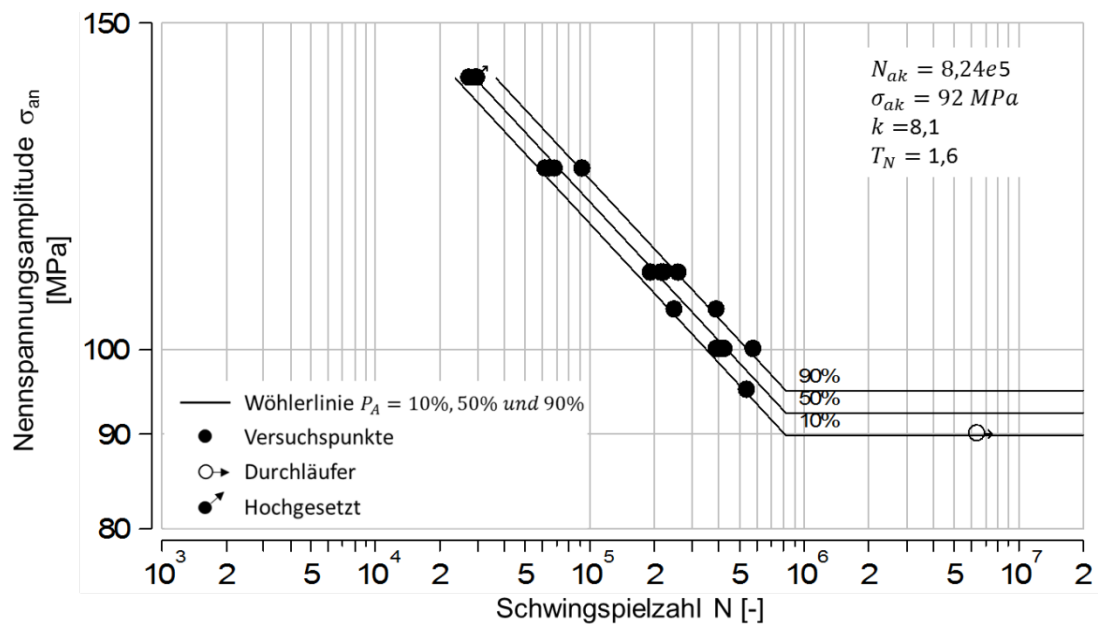
Abbildung B.6: Wöhlerlinie, DC04, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.7: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		2P							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	9,91	14,9	360	0,00	5,35	1,03E+05	Bruch
2	2	1,49	9,94	14,8	350	0,00	5,18	1,69E+05	Bruch
3	3	1,49	9,92	14,8	310	0,00	4,58	5,00E+06	Durchläufer
4	4	1,49	9,93	14,8	350	0,00	5,18	1,64E+05	Bruch
5	5	1,48	9,94	14,7	330	0,00	4,86	4,42E+05	Bruch
6	6	1,49	9,93	14,8	320	0,00	4,74	5,00E+06	Durchläufer
7	6 hoch	1,49	9,93	14,8	350	0,00	5,18	2,88E+05	Bruch
8	7	1,49	9,92	14,8	325	0,00	4,80	6,57E+05	Bruch
9	8	1,49	9,90	14,8	325	0,00	4,79	5,00E+06	Durchläufer
10	8 hoch	1,49	9,90	14,8	370	0,00	5,46	1,07E+05	Bruch
11	9	1,49	9,92	14,8	350	0,00	5,17	1,81E+05	Bruch
12	10	1,49	9,91	14,8	370	0,00	5,46	7,92E+04	Bruch
13	11	1,49	9,92	14,8	370	0,00	5,47	1,05E+05	Bruch
14	12	1,49	9,92	14,8	325	0,00	4,80	1,25E+06	Bruch
15	13	1,50	9,93	14,9	360	0,00	5,36	9,27E+04	Bruch
16	14	1,49	9,94	14,8	360	0,00	5,33	1,05E+05	Bruch
17	15	1,48	9,94	14,7	360	0,00	5,30	1,07E+05	Bruch
18	16	1,50	9,90	14,9	370	0,00	5,49	5,97E+04	Bruch
19	17	1,5	9,95	14,9	330	0,00	4,93	1,42E+06	Bruch
20	18	1,49	9,93	14,8	330	0,00	4,88	1,07E+06	Bruch

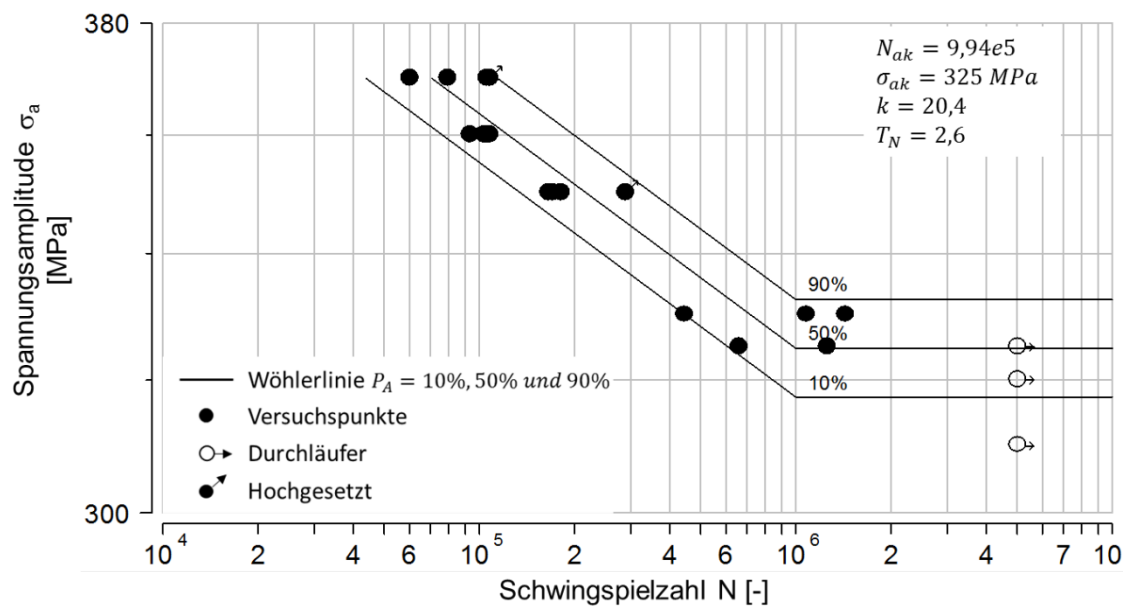
Abbildung B.7: Wöhlerlinie, DP800, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.8: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP800				
Kantenbearbeitungszustand:					Laserstrahlgeschnitten				
Kurzbezeichnung:					2L				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis $R$ :					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,49	10,03	14,9	370	0,00	5,53	7,47E+04	Bruch
2	2	1,48	10,05	14,9	350	0,00	5,21	3,26E+05	Bruch
3	3	1,48	10,05	14,9	340	0,00	5,06	1,74E+06	Einspannbruch
4	4	1,50	10,05	15,1	370	0,00	5,58	5,73E+04	Bruch
5	5	1,51	10,04	15,2	345	0,00	5,23	1,63E+05	Bruch
6	6	1,48	10,03	14,8	345	0,00	5,12	5,49E+05	Bruch
7	7	1,48	10,04	14,9	350	0,00	5,20	3,33E+05	Bruch
8	8	1,49	10,04	15,0	345	0,00	5,16	2,67E+05	Bruch
9	9	1,48	10,04	14,9	340	0,00	5,05	4,73E+05	Bruch
10	10	1,48	10,04	14,9	370	0,00	5,50	1,21E+05	Bruch
11	11	1,50	10,04	15,1	350	0,00	5,27	1,04E+05	Bruch
12	12	1,50	10,03	15,0	330	0,00	4,97	3,22E+05	Bruch
13	13	1,50	10,05	15,1	330	0,00	4,98	5,70E+05	Bruch
14	14	1,51	10,05	15,2	330	0,00	5,01	3,69E+05	Bruch
15	15	1,50	10,05	15,1	310	0,00	4,67	5,00E+06	Durchläufer
16	15 hoch	1,50	10,05	15,1	370	0,00	5,58	5,36E+04	Bruch
17	16	1,50	10,04	15,1	350	0,00	5,27	1,53E+05	Bruch
18	17	1,50	10,04	15,1	320	0,00	4,82	7,33E+05	Bruch
19	18	1,5	10,04	15,1	320	0,00	4,82	3,02E+05	Bruch

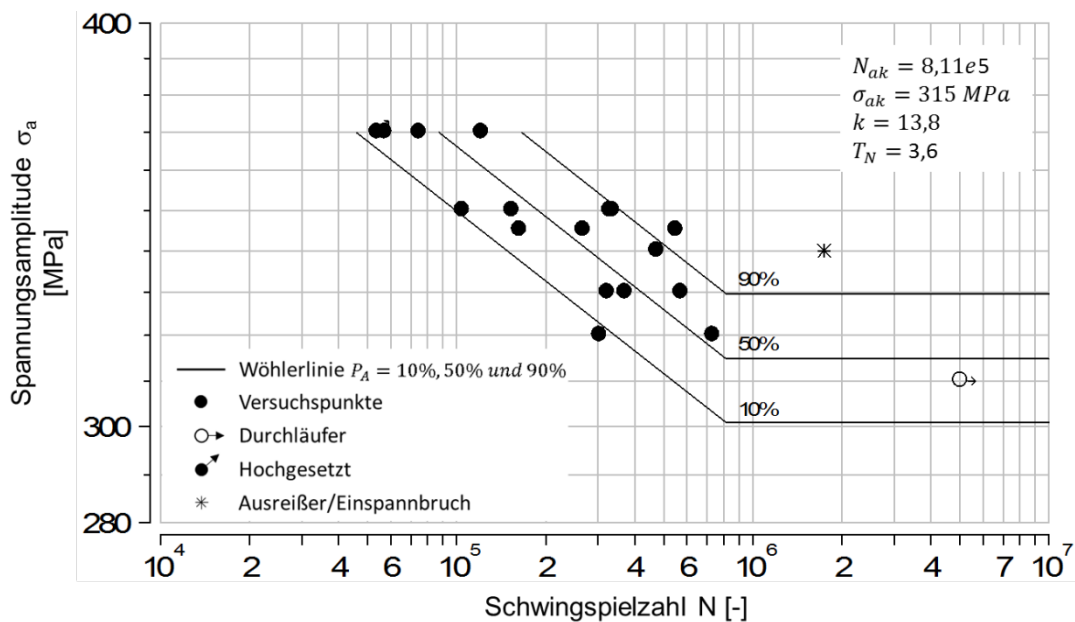
Abbildung B.8: Wöhlerlinie, DP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$



Tabelle B.9: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP800				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten, Strategie: Referenz				
Kurzbezeichnung:					2SR				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis R:					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	R27	1,51	10,00	15,1	350	0,00	5,29	2,91E+04	Bruch
2	R5	1,50	10,00	15,0	320	0,00	4,80	1,31E+05	Bruch
3	R2	1,51	10,00	15,1	350	0,00	5,29	3,72E+04	Bruch
4	R38	1,52	10,00	15,2	300	0,00	4,56	1,00E+07	Durchläufer
5	R21	1,49	10,01	14,9	320	0,00	4,77	1,36E+05	Bruch
6	R6	1,51	10,00	15,1	320	0,00	4,83	2,12E+05	Bruch
7	R11	1,50	10,00	15,0	330	0,00	4,95	1,22E+05	Bruch
8	R24	1,50	10,00	15,0	330	0,00	4,95	7,61E+04	Bruch
9	R38 hoch	1,52	10,00	15,2	350	0,00	5,32	5,74E+04	Bruch
10	R7	1,51	10,01	15,1	320	0,00	4,84	1,76E+05	Bruch
11	R1	1,50	9,97	15,0	330	0,00	4,94	7,36E+04	Bruch
12	R8	1,50	10,00	15,0	330	0,00	4,95	8,36E+04	Bruch
13	R15	1,51	10,02	15,1	310	0,00	4,69	1,00E+07	Durchläufer
14	R20	1,49	10,00	14,9	340	0,00	5,07	8,68E+04	Bruch
15	R14	1,50	10,00	15,0	340	0,00	5,10	8,62E+04	Bruch
16	R16	1,48	10,01	14,8	315	0,00	4,67	1,18E+05	Bruch
17	R3	1,49	10,00	14,9	315	0,00	4,69	8,96E+04	Bruch
18	R29	1,49	10,01	14,9	315	0,00	4,70	1,42E+05	Bruch
19	R15 hoch	1,51	10,02	15,1	350	0,00	5,30	7,08E+04	Bruch

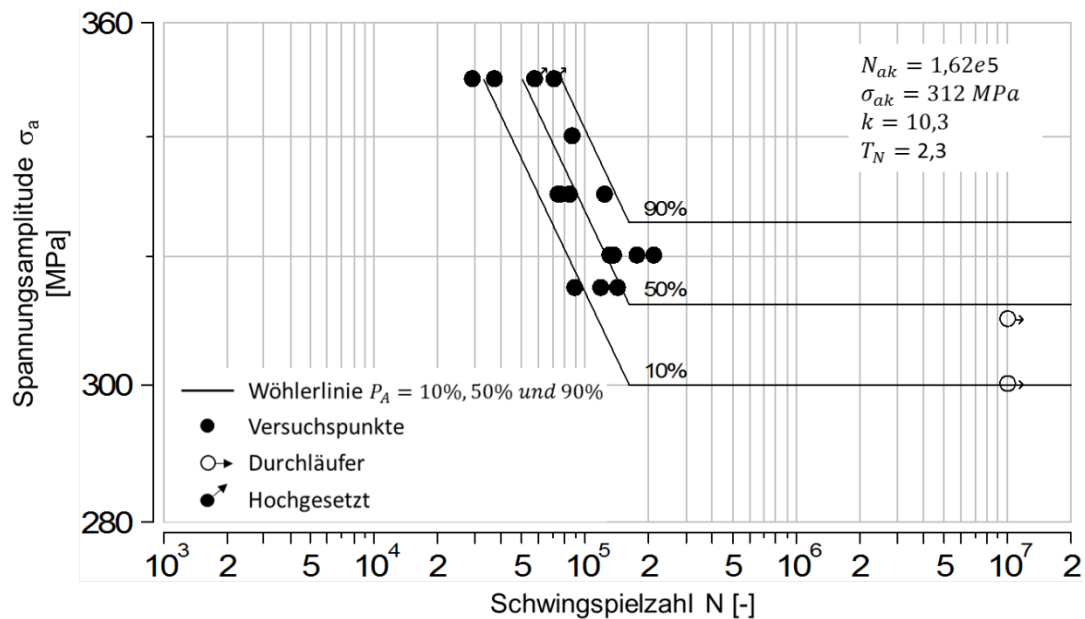
Abbildung B.9: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.10: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP800				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten, Strategie: Verschleiß				
Kurzbezeichnung:					2V				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis $R$ :					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	V6	1,50	10,10	15,2	310	0,00	4,70	9,57E+04	Bruch
2	V7	1,50	10,11	15,2	330	0,00	5,00	4,87E+04	Bruch
3	V8	1,51	10,12	15,3	310	0,00	4,74	7,27E+04	Bruch
4	V9	1,50	10,11	15,2	310	0,00	4,70	1,48E+05	Bruch
5	V10	1,50	10,13	15,2	300	0,00	4,56	1,62E+05	Bruch
6	V11	1,51	10,06	15,2	280	0,00	4,25	1,00E+07	Durchläufer
7	V13	1,50	10,07	15,1	310	0,00	4,68	1,44E+05	Bruch
8	V16	1,51	10,08	15,2	310	0,00	4,72	1,34E+05	Bruch
9	V15	1,50	10,09	15,1	300	0,00	4,54	2,06E+06	Bruch
10	V17	1,50	10,08	15,1	300	0,00	4,54	2,09E+05	Bruch
11	V11 hoch	1,51	10,06	15,2	330	0,00	5,01	6,19E+04	Bruch
12	V14	1,50	10,11	15,2	300	0,00	4,55	1,31E+05	Bruch
13	V19	1,50	10,11	15,2	290	0,00	4,40	1,34E+05	Bruch
14	V20	1,50	10,07	15,1	290	0,00	4,38	1,00E+07	Durchläufer
15	V20 hoch	1,50	10,07	15,1	330	0,00	4,98	7,40E+04	Bruch
16	V21	1,50	10,10	15,2	330	0,00	5,00	6,41E+04	Bruch
17	V22	1,51	10,10	15,3	320	0,00	4,88	7,23E+04	Bruch
18	V23	1,50	10,12	15,2	320	0,00	4,86	7,49E+04	Bruch
19	V25	1,5	10,14	15,2	320	0,00	4,87	5,76E+04	Bruch
20	V24	1,49	10,14	15,1	320	0,00	4,83	5,99E+04	Bruch

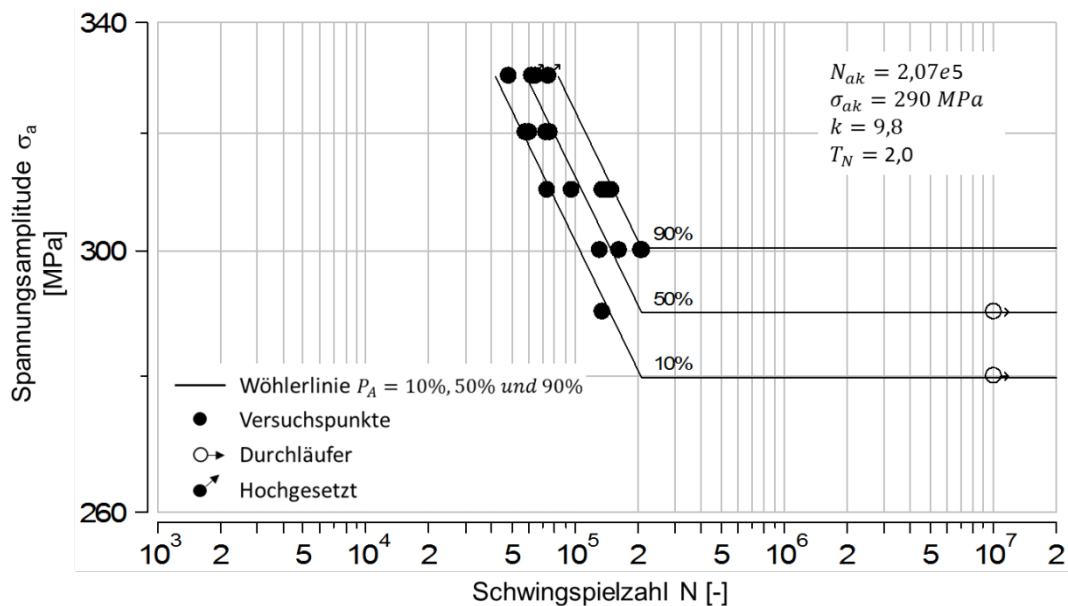
Abbildung B.10: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.11: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Beschichtung),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Beschichtung							
Kurzbezeichnung:		2SB							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	B29	1,51	9,97	15,1	350	0,00	5,27	4,82E+04	Bruch
2	B28	1,51	9,97	15,1	330	0,00	4,97	9,33E+04	Bruch
3	B27	1,51	9,98	15,1	330	0,00	4,97	1,02E+05	Bruch
4	B26	1,51	9,97	15,1	310	0,00	4,67	1,00E+07	Durchläufer
5	B34	1,52	9,98	15,2	350	0,00	5,31	3,60E+04	Bruch
6	B25	1,50	9,98	15,0	330	0,00	4,94	8,86E+04	Bruch
7	B26 hoch	1,51	9,97	15,1	350	0,00	5,27	8,00E+04	Bruch
8	B24	1,51	9,97	15,1	320	0,00	4,82	1,34E+05	Bruch
9	B33	1,51	9,98	15,1	320	0,00	4,82	1,68E+05	Bruch
10	B32	1,52	9,97	15,2	320	0,00	4,85	1,02E+05	Bruch
11	B31	1,51	9,97	15,1	350	0,00	5,27	4,54E+04	Bruch
12	B30	1,51	9,97	15,1	330	0,00	4,97	1,08E+05	Bruch
13	B18	1,51	9,97	15,1	320	0,00	4,82	9,55E+04	Bruch
14	B19	1,50	9,98	15,0	315	0,00	4,72	1,72E+05	Bruch
15	B20	1,50	9,98	15,0	350	0,00	5,24	4,93E+04	Bruch
16	B21	1,51	9,97	15,1	315	0,00	4,74	3,67E+06	Einspannungsbruch
17	B22	1,50	9,98	15,0	330	0,00	4,94	7,70E+04	Bruch
18	B23	1,50	9,96	14,9	340	0,00	5,08	5,70E+04	Bruch
19	B15	1,50	9,97	15,0	340	0,00	5,09	6,68E+04	Bruch
20	B17	1,51	9,96	15,0	340	0,00	5,11	5,89E+04	Bruch

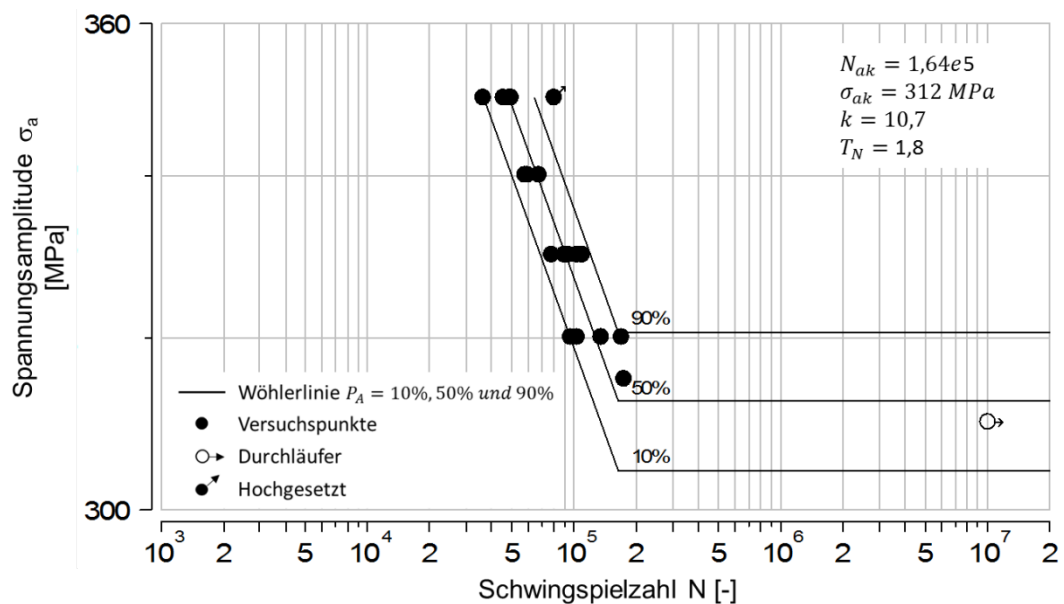
Abbildung B.11: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Beschichtung),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.12: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Eigenspannungszustand),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP800				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten, Strategie: Eigenspannungszustand				
Kurzbezeichnung:					2SE				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis $R$ :					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	E33	1,52	9,91	15,1	320	0,00	4,82	9,77E+04	Bruch
2	E32	1,53	9,92	15,2	310	0,00	4,71	1,19E+05	Bruch
3	E34	1,52	9,91	15,1	310	0,00	4,67	1,13E+05	Bruch
4	E20	1,51	9,94	15,0	300	0,00	4,50	1,95E+05	Bruch
5	E21	1,53	9,94	15,2	310	0,00	4,71	1,66E+05	Bruch
6	E23	1,53	10,02	15,3	300	0,00	4,60	1,00E+07	Durchläufer
7	E24	1,52	9,91	15,1	310	0,00	4,67	1,87E+05	Bruch
8	E22	1,51	10,05	15,2	320	0,00	4,86	1,40E+05	Bruch
9	E14	1,51	9,94	15,0	320	0,00	4,80	1,07E+05	Bruch
10	E25	1,51	9,96	15,0	330	0,00	4,96	1,06E+05	Bruch
11	E10	1,51	10,06	15,2	320	0,00	4,86	1,35E+05	Bruch
12	E16	1,50	9,93	14,9	330	0,00	4,92	9,34E+04	Bruch
13	E17	1,52	9,94	15,1	350	0,00	5,29	4,17E+04	Bruch
14	E15	1,49	9,92	14,8	350	0,00	5,17	4,37E+04	Bruch
15	E13	1,49	9,92	14,8	350	0,00	5,17	4,78E+04	Bruch
16	E12	1,52	9,90	15,0	330	0,00	4,97	7,28E+04	Bruch
17	E23 hoch	1,53	10,02	15,3	350	0,00	5,37	5,11E+04	Bruch
18	E27	1,51	9,93	15,0	330	0,00	4,95	8,90E+04	Bruch

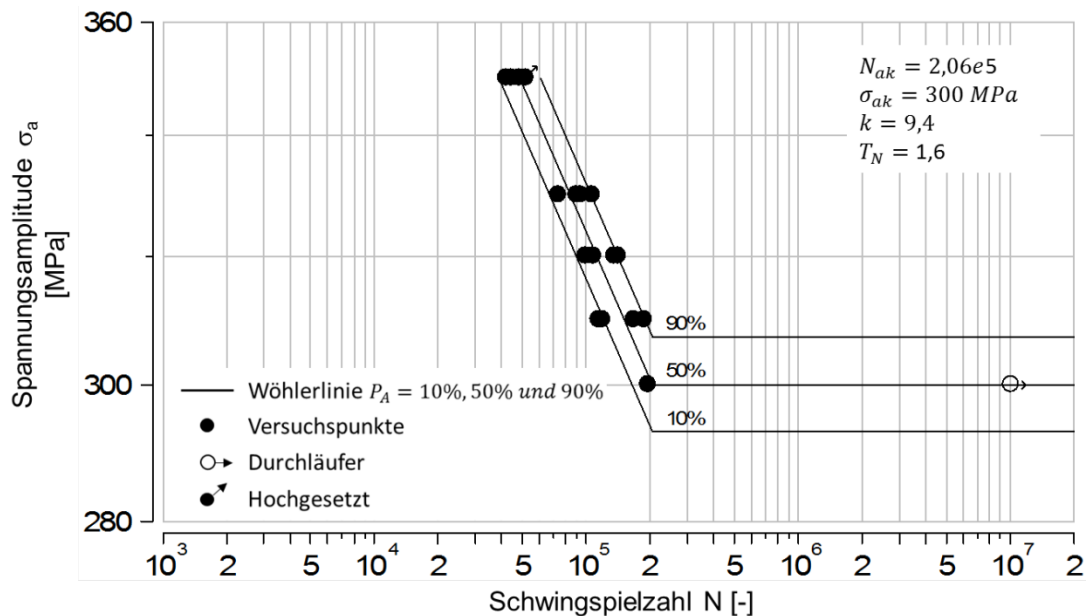
Abbildung B.12: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Eigenspannungszustand),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.13: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Glattschnittanteil),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP800				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten, Strategie: Glattschnittanteil				
Kurzbezeichnung:					2SG				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis $R$ :					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	G25	1,50	9,99	15,0	320	0,00	4,80	2,22E+05	Bruch
2	G32	1,53	10,06	15,4	350	0,00	5,39	4,81E+04	Bruch
3	G31	1,51	10,02	15,1	310	0,00	4,69	1,00E+07	Durchläufer
4	G30	1,51	10,05	15,2	320	0,00	4,86	1,44E+05	Bruch
5	G29	1,51	10,00	15,1	350	0,00	5,29	4,19E+04	Bruch
6	G27	1,49	10,06	15,0	330	0,00	4,95	9,44E+04	Bruch
7	G26	1,50	10,04	15,1	330	0,00	4,97	7,15E+04	Bruch
8	G19	1,51	9,98	15,1	330	0,00	4,98	8,91E+04	Bruch
9	G28	1,50	10,05	15,1	320	0,00	4,82	1,74E+05	Bruch
10	G17	1,51	9,99	15,1	330	0,00	4,98	1,38E+05	Bruch
11	G31 hoch	1,51	10,02	15,1	350	0,00	5,30	7,75E+04	Bruch
12	G18	1,50	10,00	15,0	320	0,00	4,80	4,19E+05	Bruch
13	G20	1,51	9,99	15,1	350	0,00	5,28	6,22E+04	Bruch
14	G21	1,51	10,00	15,1	340	0,00	5,13	7,96E+04	Bruch
15	G23	1,52	10,03	15,2	340	0,00	5,18	5,12E+04	Bruch
16	G24	1,50	9,99	15,0	340	0,00	5,09	7,67E+04	Bruch
17	G22	1,52	9,99	15,2	340	0,00	5,16	7,88E+04	Bruch
18	G14	1,52	9,99	15,2	320	0,00	4,86	2,02E+05	Bruch

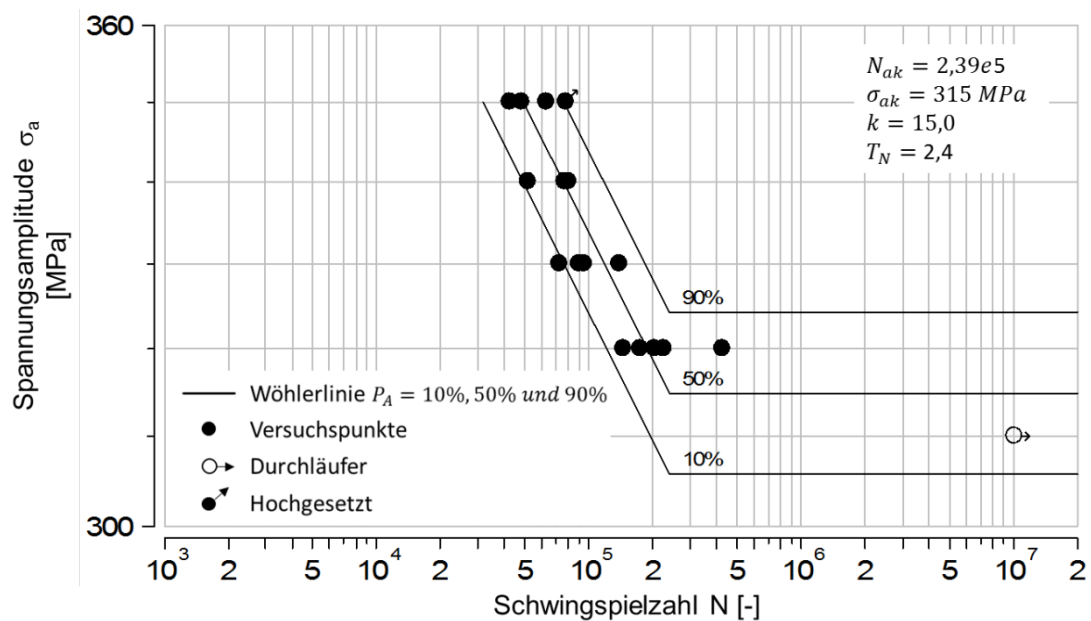
Abbildung B.13: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Glattschnittanteil),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.14: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

		Werkstoff:		DP800						
		Kantenbearbeitungszustand:		Poliert						
		Kurzbezeichnung:		2P						
		Kerbformzahl $K_t$ :		2,5						
		Lastverhältnis $R$ :		-1						
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	60,04	12,07	72,0	200	0,00	14,39	1,69E+05	Anriss
2	2	1,50	60,03	12,09	71,9	200	0,00	14,38	2,15E+05	Anriss
3	3	1,50	60,07	12,07	72,0	230	0,00	16,56	7,87E+04	Anriss
4	4	1,50	60,04	12,05	72,0	180	0,00	12,96	1,71E+06	Anriss
5	5	1,50	60,06	12,08	72,0	230	0,00	16,55	5,13E+04	Anriss
6	6	1,50	60,04	12,09	71,9	180	0,00	12,96	5,28E+05	Anriss
7	7	1,50	60,07	12,07	72,0	170	0,00	12,24	5,00E+06	Durchläufer
8	7 hoch	1,50	60,07	12,07	72,0	230	0,00	16,56	5,95E+04	Anriss
9	8	1,50	60,04	12,16	71,8	200	0,00	14,37	2,47E+05	Anriss
10	9	1,50	60,07	12,02	72,1	230	0,00	16,55	6,77E+04	Anriss
11	10	1,49	60,03	12,02	71,5	200	0,00	14,31	2,06E+05	Anriss
12	11	1,49	60,06	12,02	71,6	180	0,00	12,88	1,31E+06	Anriss
13	12	1,49	60,06	12,01	71,6	215	0,00	15,39	1,28E+05	Anriss
14	13	1,49	60,07	12,02	71,6	215	0,00	15,39	1,21E+05	Anriss
15	14	1,50	60,09	12,02	72,1	190	0,00	13,69	2,85E+05	Anriss
16	15	1,50	60,09	11,97	72,2	180	0,00	12,99	4,45E+05	Anriss
17	16	1,49	60,12	12,02	71,7	190	0,00	13,62	3,26E+05	Anriss
18	17	1,49	60,01	12,02	71,5	190	0,00	13,59	2,76E+05	Anriss

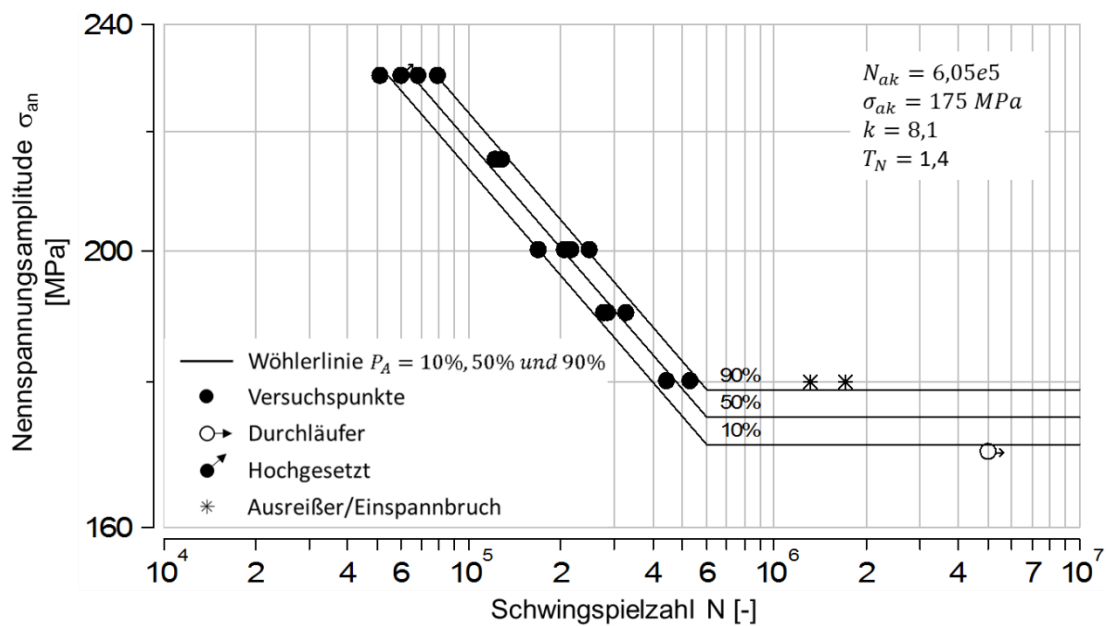
Abbildung B.14: Wöhlerlinie, DP800, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.15: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=0,1$ 

Werkstoff:										DP800
Kantenbearbeitungszustand:										Poliert
Kurzbezeichnung:										2P
Kerbformzahl $K_t$ :										2,5
Lastverhältnis R:										0,1
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	41	1,50	60,19	12,06	72,2	160	0,00	11,55	8,06E+05	Bruch
2	42	1,49	60,17	12,06	71,7	180	0,00	12,90	1,32E+05	Bruch
3	43	1,49	60,18	12,06	71,7	190	0,00	13,62	7,32E+04	Bruch
4	44	1,50	60,17	12,09	72,1	150	0,00	10,82	2,88E+06	Einspannungsbruch
5	45	1,50	60,20	12,12	72,1	170	0,00	12,26	1,00E+05	Bruch
6	46	1,50	60,20	12,13	72,1	170	0,00	12,26	2,17E+05	Bruch
7	47	1,50	60,20	12,11	72,1	160	0,00	11,54	1,27E+05	Bruch
8	48	1,50	60,13	12,08	72,1	160	0,00	11,53	1,91E+06	Einspannungsbruch
9	49	1,50	60,17	12,06	72,2	180	0,00	12,99	1,10E+05	Bruch
10	50	1,50	60,20	12,10	72,2	170	0,00	12,27	1,25E+05	Bruch
11	51	1,49	60,23	12,09	71,7	190	0,00	13,63	5,09E+04	Bruch

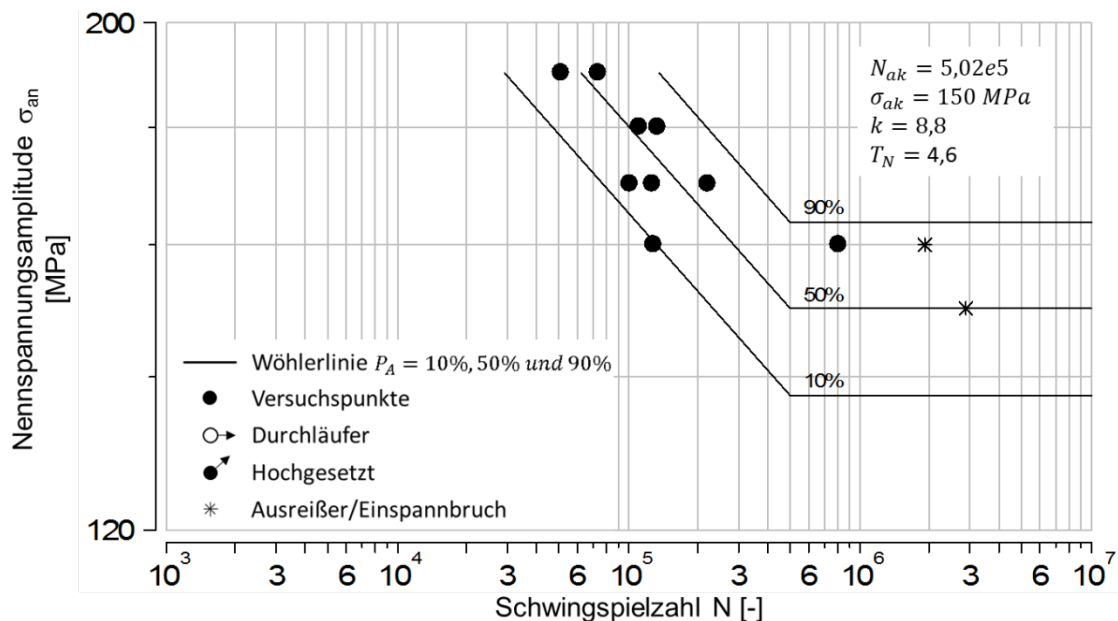
Abbildung B.15: Wöhlerlinie, DP800, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=0,1$

Tabelle B.16: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800								
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten								
Kurzbezeichnung:		2L								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis R:		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	1	1,50	59,95	11,98	72,0	200	0,00	14,40	2,01E+05	Anriss
2	2	1,50	59,99	11,98	72,0	200	0,00	14,40	2,03E+05	Anriss
3	3	1,50	59,98	11,99	72,0	200	0,00	14,40	2,73E+05	Anriss
4	4	1,50	59,98	12,00	72,0	230	0,00	16,56	7,50E+04	Anriss
5	5	1,50	59,97	11,98	72,0	180	0,00	12,96	4,28E+05	Anriss
6	6	1,50	59,98	11,97	72,0	180	0,00	12,96	4,06E+05	Anriss
7	7	1,50	59,98	12,00	72,0	230	0,00	16,56	5,70E+04	Anriss
8	8	1,50	59,99	11,58	72,6	230	0,00	16,71	5,67E+04	Anriss
9	9	1,50	59,99	11,98	72,0	170	0,00	12,24	1,76E+06	Anriss
10	10	1,50	59,98	11,99	72,0	180	0,00	12,96	1,05E+06	Anriss
11	11	1,50	60,00	11,97	72,0	170	0,00	12,24	9,13E+05	Anriss
12	12	1,50	59,97	11,98	72,0	170	0,00	12,24	6,30E+05	Anriss
13	13	1,50	59,97	11,99	72,0	160	0,00	11,52	1,00E+07	Durchläufer
14	13 hoch	1,50	59,97	11,99	72,0	230	0,00	16,56	7,28E+04	Anriss
15	14	1,51	60,03	12,01	72,5	170	0,00	12,33	3,22E+05	Anriss
16	15	1,50	60,00	11,97	72,0	200	0,00	14,41	1,29E+05	Anriss
17	16	1,50	60,01	11,96	72,1	180	0,00	12,97	8,36E+05	Anriss
18	17	1,50	60,00	11,90	72,2	170	0,00	12,25	1,00E+07	Durchläufer
19	17 hoch	1,5	60	11,9	72,2	230	0,00	16,57	4,45E+04	Anriss

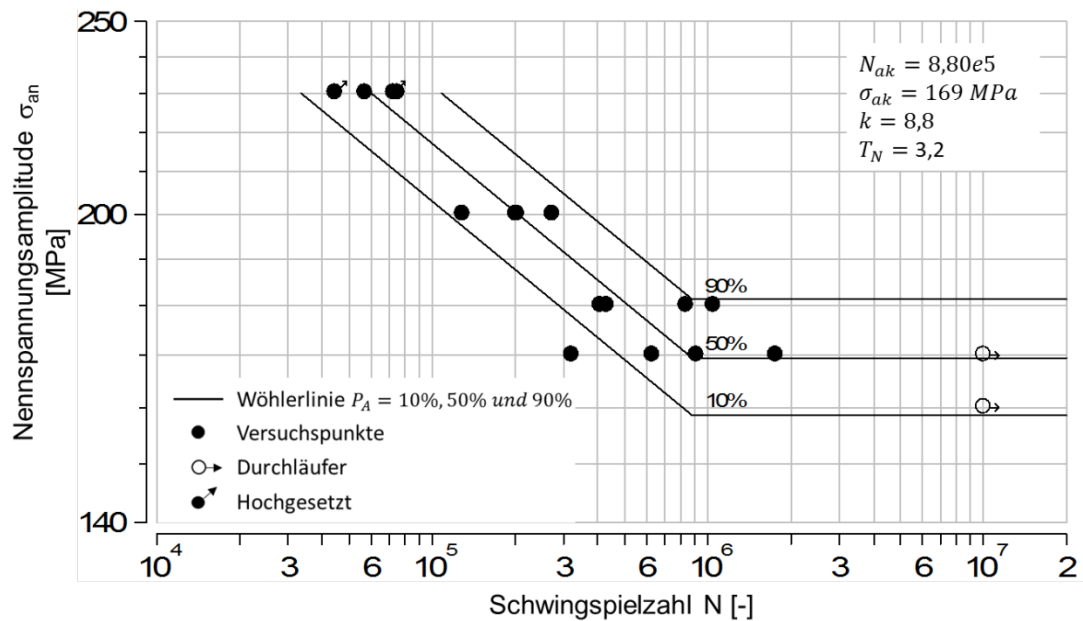
Abbildung B.16: Wöhlerlinie, DP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$



Tabelle B.17: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800								
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Referenz								
Kurzbezeichnung:		2SR								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	R6	1,49	59,98	11,99	71,5	180	0,00	12,87	1,89E+05	Anriss
2	R7	1,50	59,99	12,00	72,0	140	0,00	10,08	7,00E+06	Durchläufer
3	R8	1,49	59,83	11,99	71,3	200	0,00	14,26	9,17E+04	Anriss
4	R9	1,48	59,81	12,00	70,8	180	0,00	12,74	1,62E+05	Anriss
5	R7 hoch	1,50	59,99	12,00	72,0	220	0,00	15,84	5,72E+04	Anriss
6	R12	1,50	59,97	11,99	72,0	200	0,00	14,39	1,01E+05	Anriss
7	R13	1,49	59,95	12,00	71,4	160	0,00	11,43	4,87E+05	Anriss
8	R14	1,47	59,93	12,00	70,5	220	0,00	15,50	4,92E+04	Anriss
9	R15	1,48	59,95	12,00	71,0	200	0,00	14,19	9,34E+04	Anriss
10	R16	1,47	59,96	11,99	70,5	160	0,00	11,28	4,98E+05	Anriss
11	R10	1,48	59,94	11,99	71,0	150	0,00	10,65	6,04E+05	Anriss
12	R11	1,50	59,95	11,99	71,9	150	0,00	10,79	5,83E+05	Anriss
13	R18	1,50	59,99	11,99	72,0	180	0,00	12,96	1,71E+05	Anriss
14	R19	1,49	59,99	11,99	71,5	150	0,00	10,73	4,82E+05	Anriss
15	R20	1,50	59,99	12,00	72,0	220	0,00	15,84	4,85E+04	Anriss
16	R21	1,50	59,96	12,00	71,9	160	0,00	11,51	4,24E+05	Anriss
17	R22	1,49	59,96	11,99	71,5	145	0,00	10,36	1,00E+07	Durchläufer
18	R22 hoch	1,49	59,96	11,99	71,5	220	0,00	15,73	4,54E+04	Anriss

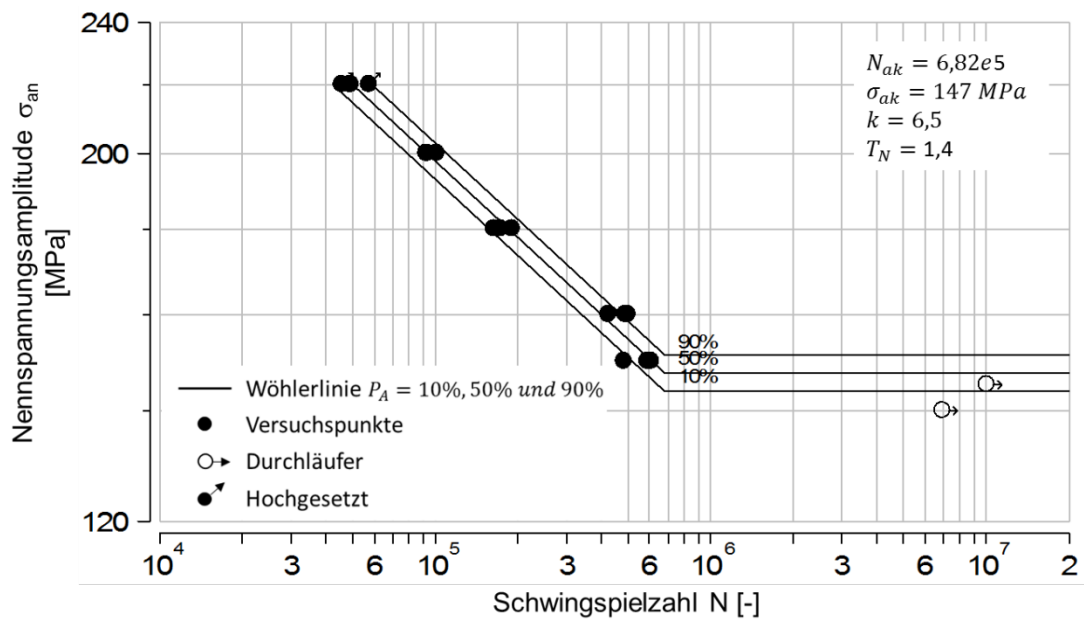
Abbildung B.17: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.18: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800								
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Verschleiß								
Kurzbezeichnung:		2SR								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis R:		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	V6	1,50	59,96	11,94	72,0	140	0,00	10,08	1,00E+07	Durchläufer
2	V6 hoch	1,50	59,96	11,94	72,0	220	0,00	15,85	8,40E+04	Anriss
3	V30	1,50	59,92	11,97	71,9	180	0,00	12,95	4,11E+05	Anriss
4	V29	1,49	59,92	11,96	71,5	160	0,00	11,43	1,00E+07	Durchläufer
5	V29 hoch	1,49	59,92	11,96	71,5	220	0,00	15,72	9,11E+04	Anriss
6	V7	1,50	59,92	11,98	71,9	200	0,00	14,38	1,51E+05	Anriss
7	V8	1,48	59,96	11,93	71,1	170	0,00	12,08	5,77E+05	Anriss
8	V9	1,48	59,94	11,93	71,1	180	0,00	12,79	2,32E+05	Anriss
9	V10	1,49	59,92	11,90	71,5	200	0,00	14,31	1,48E+05	Anriss
10	V11	1,50	59,95	11,93	72,0	200	0,00	14,41	1,65E+05	Anriss
11	V12	1,49	59,96	11,93	71,6	170	0,00	12,18	1,00E+07	Durchläufer
12	V12 hoch	1,49	59,96	11,93	71,6	220	0,00	15,74	7,98E+04	Anriss
13	V13	1,49	59,97	11,92	71,6	200	0,00	14,32	1,50E+05	Anriss
14	V14	1,48	59,92	11,93	71,0	180	0,00	12,78	3,05E+05	Anriss
15	V15	1,47	59,92	11,93	70,5	180	0,00	12,70	3,44E+05	Anriss
16	V26	1,48	59,91	11,92	71,0	220	0,00	15,63	7,52E+04	Anriss
17	V25	1,49	59,91	11,92	71,5	220	0,00	15,73	1,01E+05	Anriss
18	V22	1,49	59,95	11,93	71,5	170	0,00	12,16	3,57E+06	Einspannungsbruch
19	V18	1,48	59,91	11,93	71,0	170	0,00	12,07	1,00E+07	Durchläufer
20	V24	1,48	59,94	11,94	71,0	175	0,00	12,43	6,79E+05	Anriss
21	V23	1,47	59,94	11,94	70,6	175	0,00	12,35	5,73E+05	Anriss

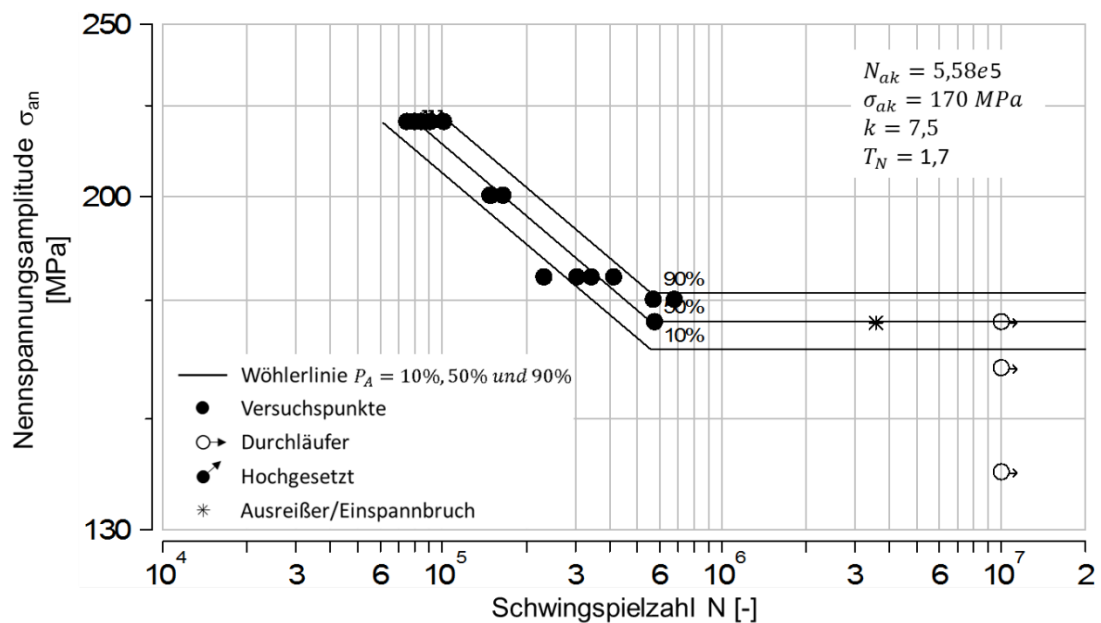
Abbildung B.18: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.19: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Beschichtung),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff: DP800										
Kantenbearbeitungszustand: Schergeschnitten, Strategie: Beschichtung										
Kurzbezeichnung: 2SB										
Kerbformzahl $K_t$ : 2,5										
Lastverhältnis R: -1										
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl N	Bemerkung
1	B6	1,50	59,93	11,99	71,9	160	0,00	11,51	2,53E+05	Anriss
2	B7	1,49	59,89	12,00	71,4	140	0,00	9,99	5,96E+05	Anriss
3	B8	1,49	59,96	12,00	71,5	130	0,00	9,29	1,00E+07	Durchläufer
4	B8 hoch	1,49	59,96	12,00	71,5	220	0,00	15,72	-	ungültig
5	B9	1,48	59,96	11,96	71,0	200	0,00	14,21	8,58E+04	Anriss
6	B17	1,50	59,94	11,99	71,9	200	0,00	14,39	7,92E+04	Anriss
7	B11	1,49	59,95	11,99	71,5	140	0,00	10,00	1,00E+07	Durchläufer
8	B12	1,47	59,97	11,97	70,6	160	0,00	11,29	2,90E+05	Anriss
9	B13	1,50	59,99	11,99	72,0	200	0,00	14,40	9,23E+04	Anriss
10	B14	1,49	59,96	11,94	71,5	200	0,00	14,31	8,36E+04	Anriss
11	B15	1,48	59,89	11,99	70,9	160	0,00	11,34	4,24E+05	Anriss
12	B16	1,50	59,95	11,97	72,0	160	0,00	11,52	2,24E+05	Anriss
13	B10	1,50	59,99	11,99	72,0	140	0,00	10,08	1,00E+07	Durchläufer
14	B23	1,50	59,84	12,03	71,7	180	0,00	12,91	1,20E+05	Anriss
15	B24	1,50	59,93	12,03	71,9	180	0,00	12,93	1,44E+05	Anriss
16	B25	1,50	59,93	12,03	71,9	180	0,00	12,93	1,47E+05	Anriss
17	B26	1,50	59,84	12,02	71,7	180	0,00	12,91	1,36E+05	Anriss
18	B27	1,50	59,96	12,00	71,9	150	0,00	10,79	3,88E+05	Anriss
19	B28	1,52	59,95	12,04	72,8	150	0,00	10,92	1,00E+07	Durchläufer
20	B20	1,51	59,90	12,02	72,3	150	0,00	10,85	5,58E+05	Anriss
21	B10 hoch	1,50	59,99	11,99	72,0	200	0,00	14,40	6,77E+04	Anriss
22	B18	1,51	59,94	12,01	72,4	150	0,00	10,86	3,53E+05	Anriss

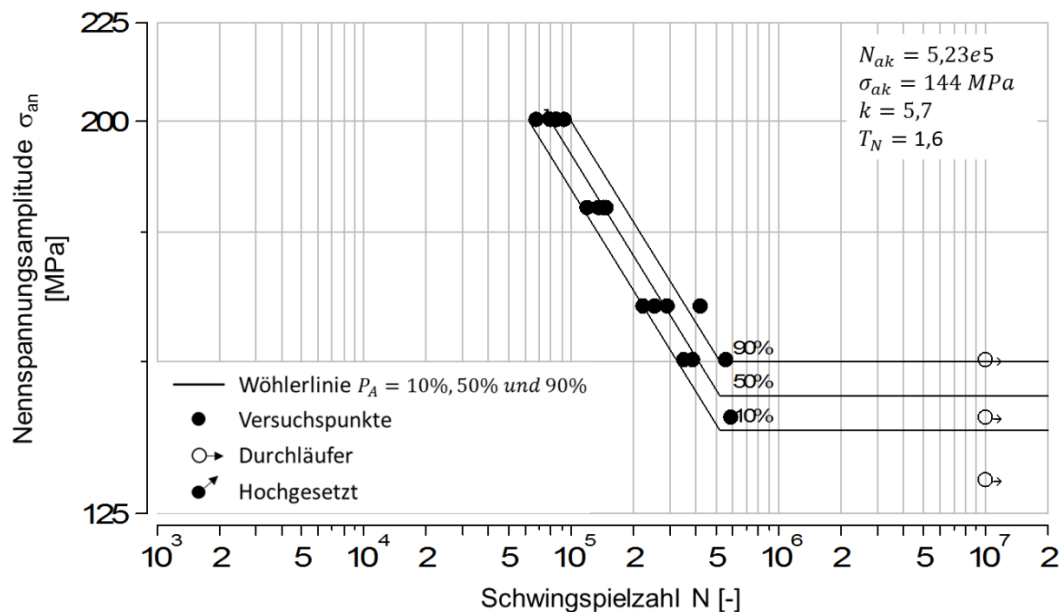
Abbildung B.19: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Beschichtung),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.20: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Glattschnittanteil),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800								
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Glattschnittanteil								
Kurzbezeichnung:		2SG								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	G8	1,50	59,93	11,93	72,0	180	0,00	12,96	3,82E+05	Anriss
2	G13	1,49	59,94	11,95	71,5	200	0,00	14,30	1,38E+05	Anriss
3	G15	1,49	59,86	11,95	71,4	200	0,00	14,28	1,32E+05	Anriss
4	G14	1,49	59,93	11,95	71,5	180	0,00	12,87	2,97E+05	Anriss
5	G12	1,48	59,94	11,94	71,0	200	0,00	14,21	1,62E+05	Anriss
6	G16	1,50	59,91	11,95	71,9	180	0,00	12,95	4,57E+05	Anriss
7	G17	1,49	59,94	11,93	71,5	220	0,00	15,74	8,05E+04	Anriss
8	G19	1,49	59,91	11,96	71,4	170	0,00	12,15	9,89E+05	Anriss
9	G20	1,50	59,97	11,92	72,1	220	0,00	15,86	7,32E+04	Anriss
10	G24	1,49	59,95	11,94	71,5	220	0,00	15,74	9,70E+04	Anriss
11	G21	1,48	59,91	11,95	71,0	180	0,00	12,78	3,95E+05	Anriss
12	G22	1,49	59,96	11,96	71,5	200	0,00	14,30	1,60E+05	Anriss
13	G23	1,49	59,94	11,93	71,5	220	0,00	15,73	7,68E+04	Anriss
14	G25	1,49	59,95	11,96	71,5	170	0,00	12,16	5,68E+05	Anriss
15	G26	1,50	59,89	11,96	71,9	220	0,00	15,82	8,29E+04	Anriss
16	G27	1,50	59,94	11,96	72,0	170	0,00	12,24	6,44E+05	Anriss
17	G28	1,48	59,92	11,99	70,9	170	0,00	12,06	7,23E+05	Anriss
18	G10	1,50	59,90	11,96	71,9	160	0,00	11,51	7,01E+05	Anriss
19	G29	1,50	59,93	11,99	71,9	160	0,00	11,51	1,00E+07	Durchläufer
20	G30	1,50	59,97	11,99	72,0	160	0,00	11,52	1,00E+07	Durchläufer

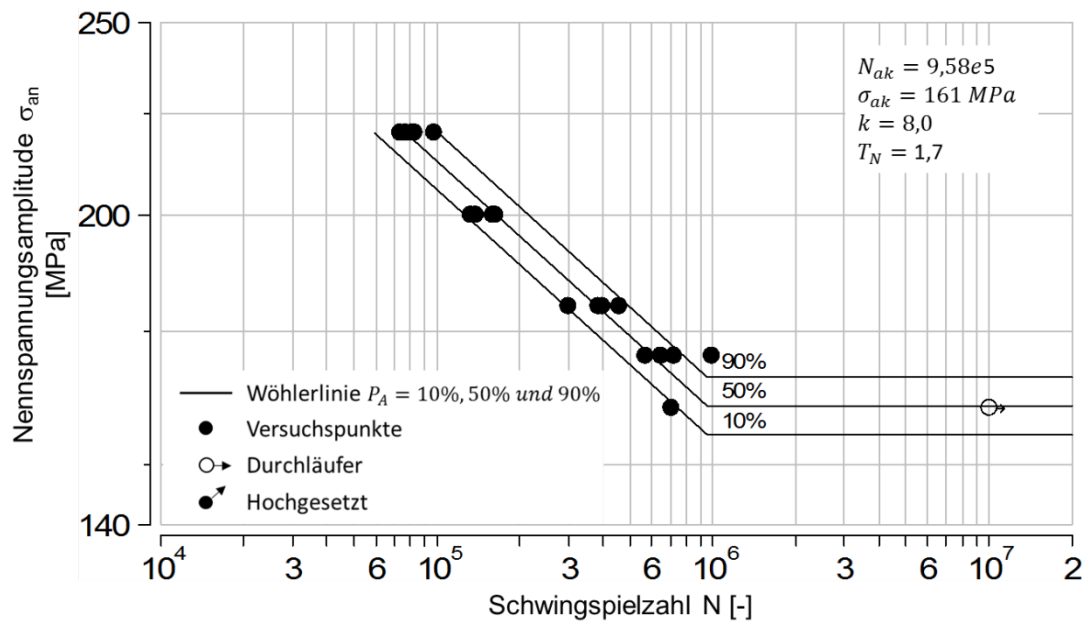
Abbildung B.20: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Glattschnittanteil),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.21: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, polierte Kanten,  $K_t=4,6$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		2P							
Kerbformzahl $K_t$ :		4,6							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,47	30,02	44,1	100	0,00	4,41	6,00E+05	Anriss
2	2	1,47	30,04	44,2	150	0,00	6,62	1,41E+05	Anriss
3	3	1,48	30,07	44,5	150	0,00	6,67	1,44E+05	Anriss
4	4	1,47	30,06	44,2	100	0,00	4,42	1,03E+06	Anriss
5	5	1,48	30,03	44,4	100	0,00	4,45	3,77E+05	Anriss
6	6	1,48	30,03	44,4	125	0,00	5,55	2,33E+05	Anriss
7	7	1,47	30,03	44,1	85	0,00	3,76	5,00E+06	Durchläufer
8	7 hoch	1,47	30,03	44,1	175	0,00	7,71	6,58E+04	Anriss
9	8	1,48	30,06	44,5	125	0,00	5,56	3,04E+05	Anriss
10	9	1,47	30,08	44,2	125	0,00	5,53	3,04E+05	Anriss
11	10	1,48	30,06	44,5	100	0,00	4,45	6,77E+05	Anriss
12	11	1,47	30,02	44,1	125	0,00	5,52	3,42E+05	Anriss
13	12	1,48	29,75	44,0	100	0,00	4,41	6,98E+05	Anriss
14	13	1,49	29,93	44,6	125	0,00	5,58	3,03E+05	Anriss
15	14	1,48	29,95	44,3	125	0,00	5,54	3,24E+05	Anriss
16	15	1,48	29,99	44,4	100	0,00	4,44	9,91E+05	Anriss
17	16	1,48	29,97	44,4	150	0,00	6,65	1,41E+05	Anriss
18	17	1,48	29,99	44,4	100	0,00	4,44	9,98E+05	Anriss
19	18	1,49	30,34	45,2	150	0,00	6,78	1,41E+05	Anriss
20	19	1,49	30,33	45,2	175	0,00	7,91	6,97E+04	Anriss
21	20	1,50	30,28	45,4	175	0,00	7,95	7,15E+04	Anriss

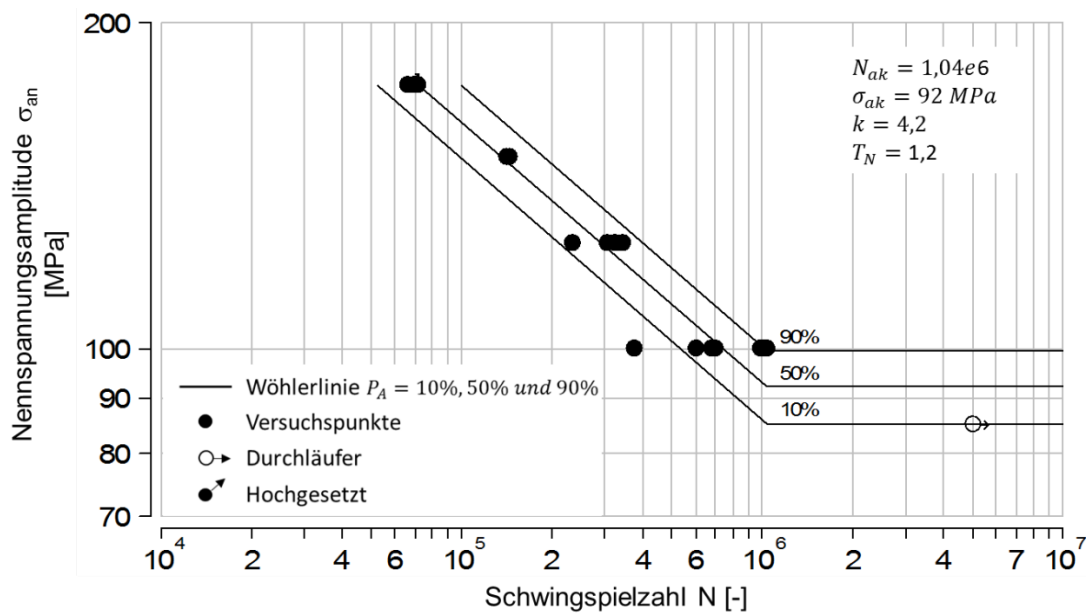
Abbildung B.21: Wöhlerlinie, DP800, polierte Kanten,  $K_t=4,6$ ,  $R=-1$

Tabelle B.22: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=4,6$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Referenz							
Kurzbezeichnung:		2SR							
Kerbformzahl $K_t$ :		4,6							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	R27	1,50	29,13	43,7	150	0,00	6,55	1,57E+05	Anriss
2	R25	1,50	29,11	43,7	125	0,00	5,46	3,48E+05	Anriss
3	R33	1,50	29,12	43,7	100	0,00	4,37	7,61E+05	Anriss
4	R26	1,50	29,11	43,7	150	0,00	6,55	1,36E+05	Anriss
5	R32	1,50	29,11	43,7	125	0,00	5,46	3,03E+05	Anriss
6	R31	1,50	29,12	43,7	100	0,00	4,37	8,61E+05	Anriss
7	R28	1,50	29,10	43,7	150	0,00	6,55	1,61E+05	Anriss
8	R34	1,50	29,12	43,7	125	0,00	5,46	3,22E+05	Anriss
9	R35	1,50	29,11	43,7	100	0,00	4,37	9,30E+05	Anriss
10	R11	1,50	29,12	43,7	150	0,00	6,55	1,56E+05	Anriss
11	R12	1,50	29,13	43,7	85	0,00	3,71	1,00E+07	Durchläufer
12	R12 hoch	1,50	29,13	43,7	175	0,00	7,65	7,07E+04	Anriss
13	R13	1,50	29,13	43,7	175	0,00	7,65	7,18E+04	Anriss
14	R14	1,50	29,12	43,7	100	0,00	4,37	8,37E+05	Anriss
15	R15	1,50	29,13	43,7	175	0,00	7,65	6,82E+04	Anriss
16	R29	1,50	29,12	43,7	125	0,00	5,46	3,15E+05	Anriss
17	R30	1,50	29,12	43,7	100	0,00	4,37	6,88E+05	Anriss
18	R17	1,50	29,12	43,7	175	0,00	7,64	5,70E+04	Anriss
19	R18	1,50	29,11	43,7	150	0,00	6,55	1,48E+05	Anriss

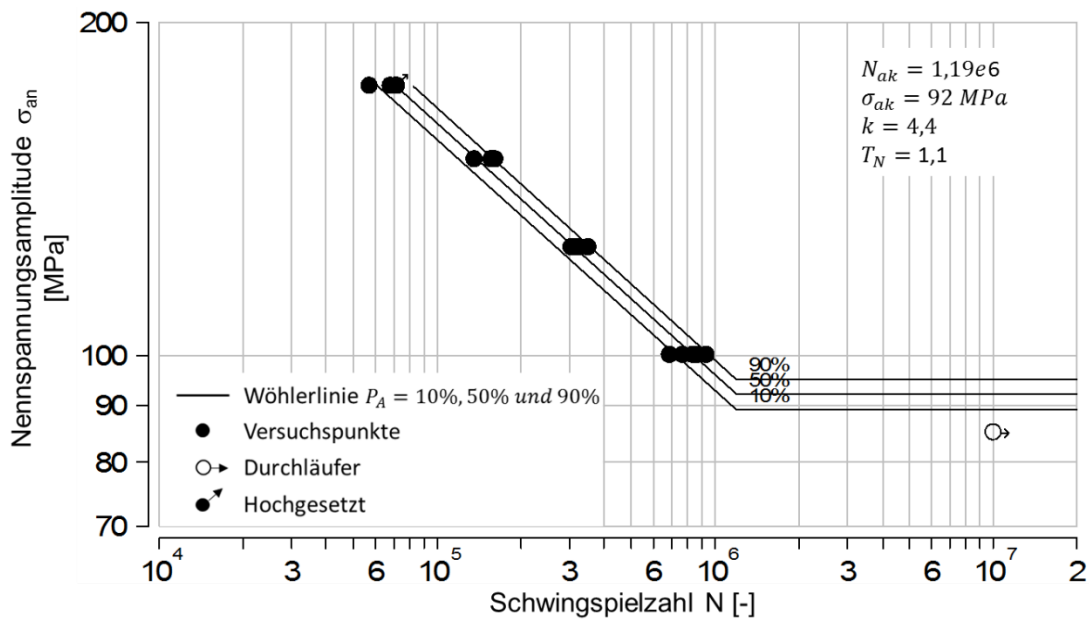
Abbildung B.22: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=4,6$ ,  $R=-1$

Tabelle B.23: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=4,6$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Verschleiß							
Kurzbezeichnung:		2SV							
Kerbformzahl $K_t$ :		4,6							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	V11	1,50	29,13	43,7	85	0,00	3,71	1,00E+07	Durchläufer
2	V11 hoch	1,50	29,13	43,7	175	0,00	7,65	7,02E+04	Anriss
3	V12	1,50	29,13	43,7	150	0,00	6,55	1,52E+05	Anriss
4	V13	1,50	29,13	43,7	150	0,00	6,55	1,61E+05	Anriss
5	V14	1,50	29,13	43,7	100	0,00	4,37	7,81E+05	Anriss
6	V15	1,50	29,11	43,7	125	0,00	5,46	3,25E+05	Anriss
7	V16	1,50	29,13	43,7	100	0,00	4,37	7,89E+05	Anriss
8	V17	1,50	29,13	43,7	150	0,00	6,55	1,61E+05	Anriss
9	V18	1,50	29,09	43,6	125	0,00	5,45	3,40E+05	Anriss
10	V19	1,50	29,12	43,7	100	0,00	4,37	8,15E+05	Anriss
11	V20	1,50	29,10	43,7	175	0,00	7,64	7,23E+04	Anriss
12	V21	1,50	29,12	43,7	125	0,00	5,46	3,30E+05	Anriss
13	V22	1,50	29,12	43,7	175	0,00	7,64	6,91E+04	Anriss
14	V23	1,50	29,12	43,7	150	0,00	6,55	1,42E+05	Anriss
15	V24	1,50	29,13	43,7	100	0,00	4,37	8,28E+05	Anriss
16	V25	1,50	29,11	43,7	175	0,00	7,64	7,45E+04	Anriss
17	V26	1,50	29,10	43,7	125	0,00	5,46	3,57E+05	Anriss
18	V27	1,49	29,11	43,4	150	0,00	6,51	1,60E+05	Anriss
19	V28	1,49	29,08	43,3	100	0,00	4,33	8,24E+05	Anriss

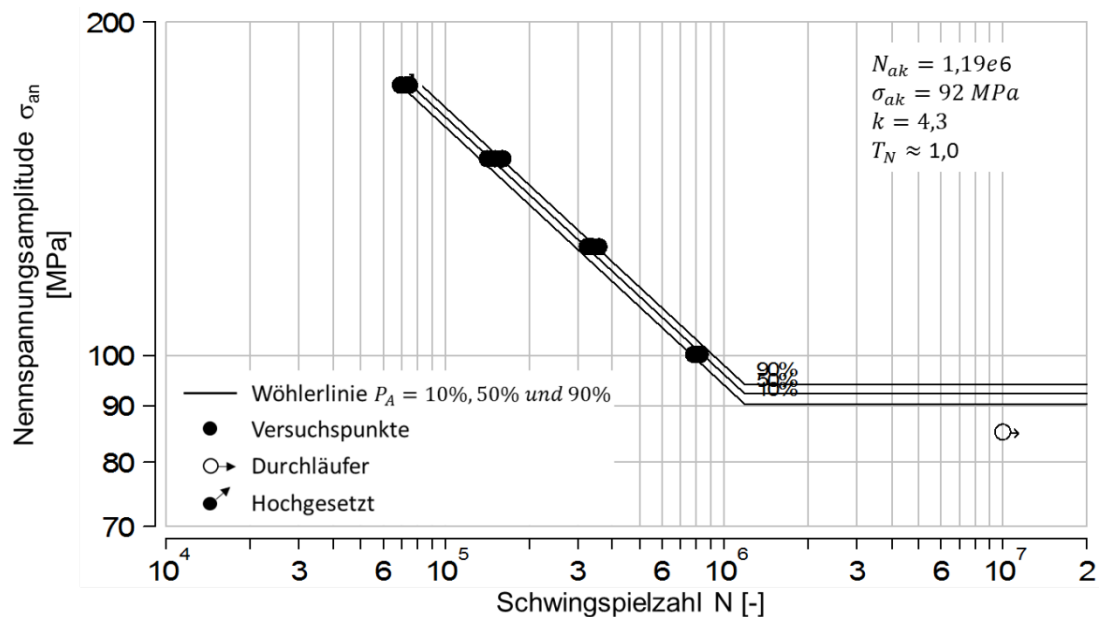
Abbildung B.23: Wöhlerlinie, DP800, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=4,6$ ,  $R=-1$

Tabelle B.24: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP800, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		CP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		3P							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,53	9,94	15,2	420	0,00	6,39	1,17E+06	Bruch
2	2	1,55	9,98	15,5	470	0,00	7,27	1,33E+05	Bruch
3	3	1,55	9,96	15,4	450	0,00	6,95	2,09E+05	Bruch
4	4	1,53	9,94	15,2	450	0,00	6,84	1,60E+05	Bruch
5	5	1,53	9,95	15,2	420	0,00	6,39	4,28E+05	Bruch
6	6	1,55	9,98	15,5	500	0,00	7,74	4,20E+04	Bruch
7	7	1,54	9,89	15,2	500	0,00	7,62	3,28E+04	Bruch
8	8	1,55	9,94	15,4	450	0,00	6,93	1,16E+05	Bruch
9	9	1,54	9,90	15,2	420	0,00	6,40	9,61E+05	Bruch
10	10	1,55	9,91	15,4	450	0,00	6,91	9,10E+04	Bruch
11	11	1,54	9,96	15,3	320	0,00	4,91	1,00E+07	Durchläufer
12	12	1,55	9,93	15,4	420	0,00	6,46	2,55E+05	Bruch
13	13	1,53	9,95	15,2	500	0,00	7,61	4,66E+04	Bruch
14	14	1,54	9,96	15,3	450	0,00	6,90	1,07E+05	Bruch
15	15	1,55	9,93	15,4	420	0,00	6,47	2,33E+05	Bruch
16	16	1,55	9,95	15,4	420	0,00	6,48	2,39E+05	Bruch
17	11 hoch	1,54	9,96	15,3	500	0,00	7,67	4,62E+04	Bruch

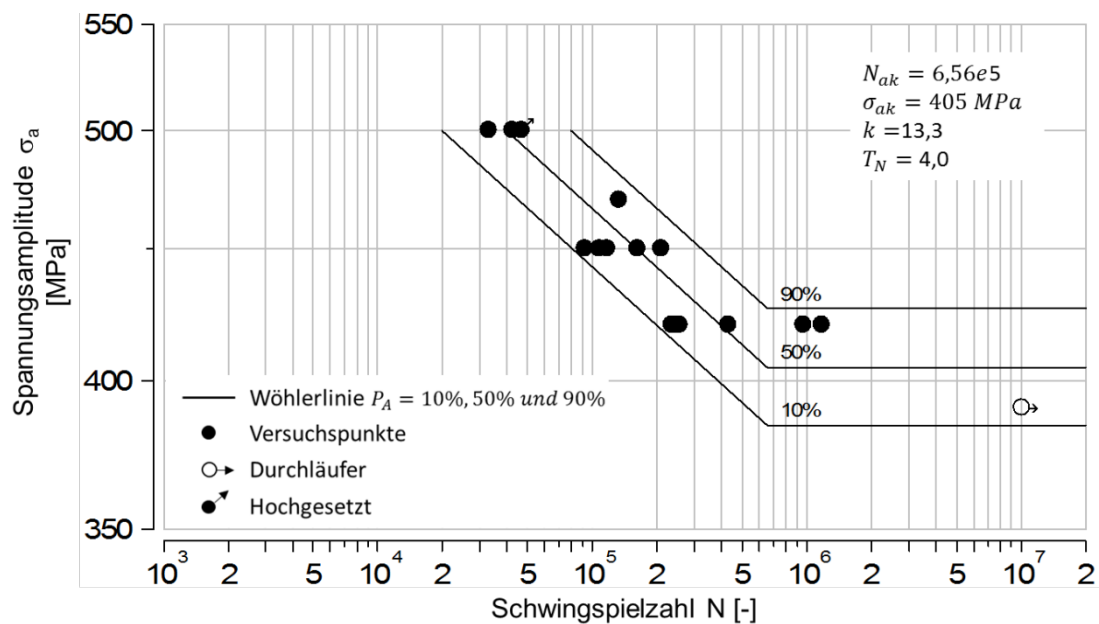
Abbildung B.24: Wöhlerlinie, CP800, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$



Tabelle B.25: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		CP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten							
Kurzbezeichnung:		3L							
Kerbförmzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,54	10,04	15,5	350	0,00	5,41	1,88E+05	Bruch
2	2	1,53	10,04	15,4	350	0,00	5,38	3,69E+05	Bruch
3	3	1,54	10,03	15,4	370	0,00	5,72	1,97E+05	Bruch
4	4	1,52	10,01	15,2	400	0,00	6,09	7,01E+04	Bruch
5	5	1,52	10,03	15,2	330	0,00	5,03	1,00E+07	Durchläufer
6	6	1,54	10,03	15,4	370	0,00	5,72	9,62E+04	Bruch
7	5 hoch	1,52	10,03	15,2	400	0,00	6,10	7,30E+04	Bruch
8	7	1,50	10,00	15,0	370	0,00	5,55	1,95E+05	Bruch
9	8	1,52	10,03	15,2	400	0,00	6,10	9,52E+04	Bruch
10	9	1,52	10,04	15,3	350	0,00	5,34	8,75E+04	Bruch
11	10	1,53	10,07	15,4	370	0,00	5,70	5,04E+06	Ausreißer
12	11	1,52	10,00	15,2	400	0,00	6,09	1,14E+05	Bruch
13	12	1,54	10,03	15,4	420	0,00	6,49	4,23E+04	Bruch
14	13	1,52	10,01	15,2	370	0,00	5,63	2,19E+05	Bruch
15	14	1,51	10,03	15,1	370	0,00	5,60	5,19E+06	Ausreißer
16	15	1,51	9,99	15,1	420	0,00	6,34	1,91E+05	Bruch
17	16	1,53	10,04	15,4	385	0,00	5,91	1,35E+05	Bruch
18	17	1,53	10,02	15,3	385	0,00	5,90	9,75E+04	Bruch
19	18	1,51	9,98	15,1	385	0,00	5,80	2,08E+05	Bruch
20	19	1,53	10,05	15,4	370	0,00	5,70	2,26E+05	Bruch
21	20	1,52	9,99	15,2	370	0,00	5,62	6,10E+05	Bruch

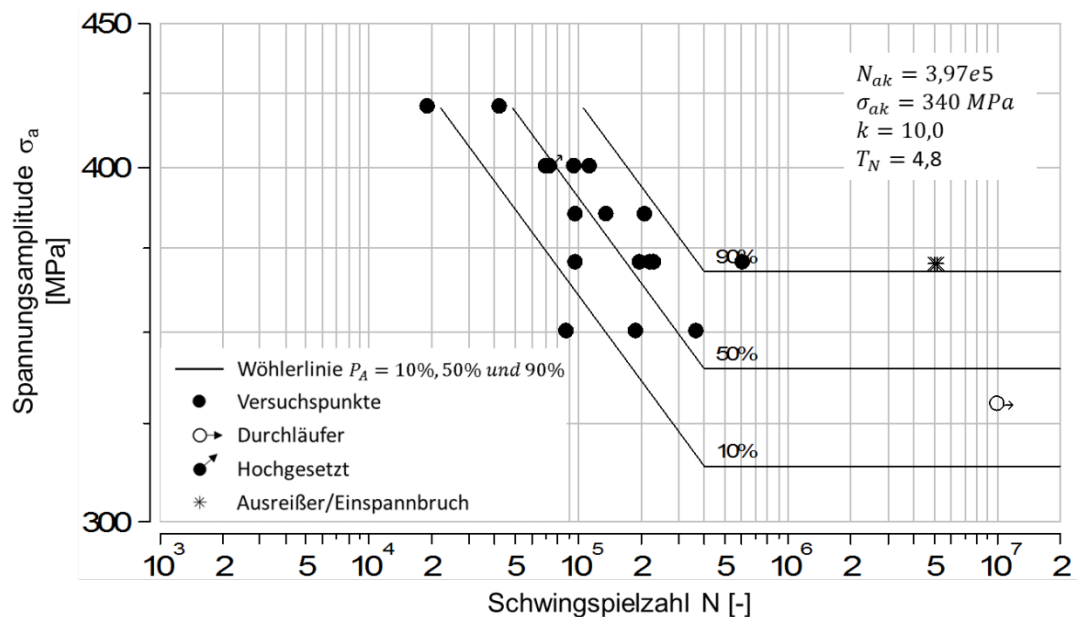
Abbildung B.25: Wöhlerlinie, CP800, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.26: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		CP800							
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Referenz							
Kurzbezeichnung:		3SR							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	R48	1,52	9,99	15,2	420	0,00	6,38	3,43E+04	Bruch
2	R49	1,51	9,99	15,1	370	0,00	5,58	8,82E+04	Bruch
3	R50	1,52	9,99	15,2	340	0,00	5,16	1,06E+05	Bruch
4	R39	1,52	10,00	15,2	340	0,00	5,17	1,05E+05	Bruch
5	R38	1,53	10,00	15,3	300	0,00	4,59	1,00E+07	Durchläufer
6	R38 hoch	1,53	10,00	15,3	420	0,00	6,43	4,37E+04	Bruch
7	R43	1,51	10,00	15,1	320	0,00	4,83	2,26E+05	Bruch
8	R46	1,54	10,00	15,4	370	0,00	5,70	6,77E+04	Bruch
9	R47	1,53	10,00	15,3	340	0,00	5,20	1,20E+05	Bruch
10	R40	1,55	10,00	15,5	370	0,00	5,74	8,54E+04	Bruch
11	R44	1,55	9,99	15,5	320	0,00	4,96	1,53E+05	Bruch
12	R45	1,51	9,99	15,1	420	0,00	6,34	5,09E+04	Bruch
13	R41	1,55	9,99	15,5	340	0,00	5,26	6,66E+04	Bruch
14	R35	1,55	9,99	15,5	320	0,00	4,96	7,15E+06	Bruch
15	R37	1,55	10,00	15,5	370	0,00	5,74	8,41E+04	Bruch
16	R42	1,51	10,00	15,1	420	0,00	6,34	5,25E+04	Bruch
17	R12	1,53	9,99	15,3	320	0,00	4,89	1,00E+07	Durchläufer
18	R12 hoch	1,53	9,99	15,3	420	0,00	6,42	4,10E+04	Bruch

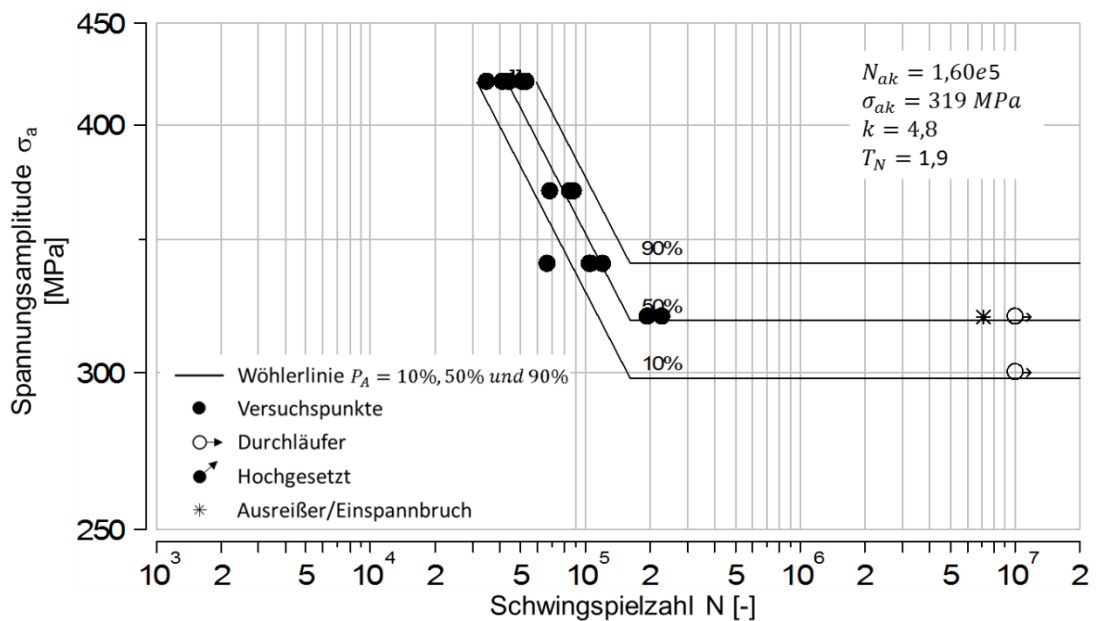
Abbildung B.26: Wöhlerlinie, CP800, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.27: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		4P							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
Ild. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	9,95	14,9	680	0,00	10,15	4,17E+04	Bruch
2	2	1,48	9,92	14,7	500	0,00	7,34	2,71E+05	Bruch
3	3	1,49	9,96	14,8	480	0,00	7,12	1,96E+05	Bruch
4	4	1,50	9,95	14,9	420	0,00	6,27	5,00E+06	Durchläufer
5	5	1,49	9,96	14,8	470	0,00	6,98	6,38E+05	Einspannungsbruch
6	6	1,49	9,92	14,8	470	0,00	6,95	5,11E+05	Einspannungsbruch
7	7	1,47	9,97	14,7	485	0,00	7,11	5,00E+06	Durchläufer
8	7 hoch	1,47	9,97	14,7	570	0,00	8,36	1,69E+05	Bruch
9	8	1,47	9,98	14,7	485	0,00	7,12	3,86E+05	Bruch
10	9	1,47	9,97	14,7	485	0,00	7,11	5,00E+06	Durchläufer
11	9 hoch	1,47	9,97	14,7	570	0,00	8,35	9,47E+05	Einspannungsbruch
12	10	1,48	9,97	14,8	570	0,00	8,41	3,79E+05	Einspannungsbruch
13	11	1,51	10,02	15,1	460	0,00	6,96	4,52E+05	Einspannungsbruch
14	12	1,51	10,02	15,1	460	0,00	6,96	5,03E+05	Einspannungsbruch
15	13	1,52	10,01	15,2	480	0,00	7,30	5,00E+06	Durchläufer
16	14	1,52	10,02	15,2	700	0,00	10,66	3,55E+04	Bruch
17	15	1,51	10,02	15,13	600	0,00	9,08	5,49E+04	Bruch
18	13 hoch	1,52	10,01	15,22	550	0,00	8,37	9,30E+04	Bruch
19	16	1,51	10,02	15,13	550	0,00	8,32	1,65E+05	Bruch
20	17	1,52	10,02	15,23	500	0,00	7,62	6,07E+04	Bruch
21	18	1,49	10,01	14,91	700	0,00	10,44	4,38E+04	Bruch
22	19	1,5	9,98	14,97	500	0,00	7,49	2,87E+05	Bruch
23	20	1,5	10,01	15,02	500	0,00	7,51	1,60E+06	Bruch
24	21	1,5	9,97	14,96	600	0,00	8,97	8,71E+04	Bruch
25	22	1,51	10,02	15,13	700	0,00	10,59	2,66E+04	Bruch
26	23	1,49	10	14,90	500	0,00	7,45	1,79E+06	Bruch

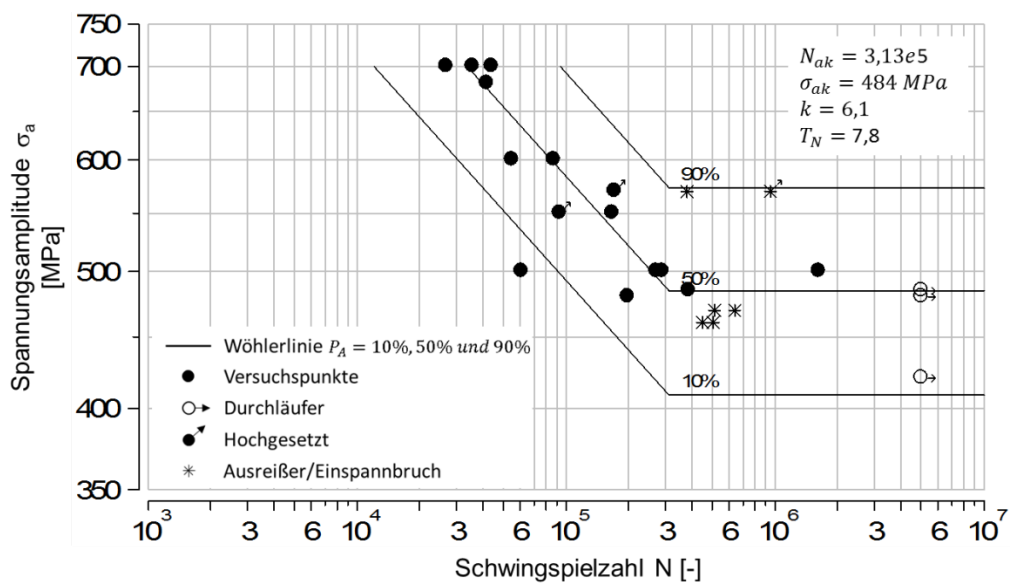
Abbildung B.27: Wöhlerlinie, 22MnB5, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.28: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 ohne Al-Si Beschichtung, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5 (ohne Al-Si Beschichtung)							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		4PoB							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,38	10,03	13,8	750	0,00	10,38	8,25E+04	Bruch
2	2	1,38	10,03	13,8	650	0,00	9,00	6,20E+06	Durchläufer
3	3	1,38	10,02	13,8	720	0,00	9,96	1,35E+05	Bruch
4	4	1,38	10,02	13,8	700	0,00	9,68	1,28E+05	Bruch
5	5	1,38	10,02	13,8	680	0,00	9,40	1,15E+05	Bruch
6	2 hoch	1,38	10,03	13,8	800	0,00	11,07	6,58E+04	Bruch
7	6	1,38	10,02	13,8	680	0,00	9,40	1,88E+05	Bruch

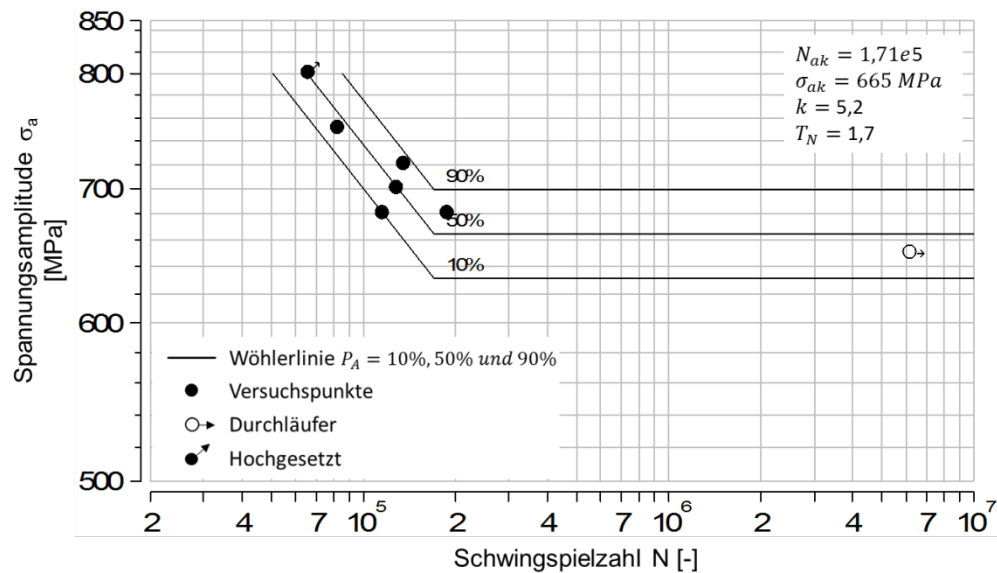
Abbildung B.28: Wöhlerlinie, 22MnB5 ohne Al-Si Beschichtung, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.29: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5							
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten Variante 1							
Kurzbezeichnung:		4LV1							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	10,05	15,1	570	0,00	8,59	3,77E+04	Bruch
2	2	1,50	10,04	15,1	470	0,00	7,08	4,99E+04	Bruch
3	3	1,50	10,04	15,1	350	0,00	5,27	1,54E+05	Bruch
4	4	1,50	10,04	15,1	350	0,00	5,27	1,52E+05	Bruch
5	5	1,50	10,04	15,1	300	0,00	4,51	1,93E+05	Bruch
6	6	1,50	10,04	15,1	250	0,00	3,77	5,00E+06	Durchläufer
7	7	1,50	10,04	15,1	300	0,00	4,52	1,55E+05	Bruch
8	6 hoch	1,50	10,04	15,1	570	0,00	8,58	2,69E+04	Bruch
9	8	1,50	10,04	15,1	400	0,00	6,02	7,06E+04	Bruch
10	9	1,50	10,04	15,1	300	0,00	4,52	1,32E+05	Bruch
11	10	1,50	10,04	15,1	350	0,00	5,27	1,60E+05	Bruch
12	11	1,50	10,04	15,1	400	0,00	6,02	8,23E+03	Bruch
13	12	1,50	10,03	15,0	300	0,00	4,51	3,27E+05	Bruch
14	13	1,50	10,04	15,1	270	0,00	4,07	1,00E+07	Durchläufer
15	13 hoch	1,50	10,04	15,1	400	0,00	6,02	6,30E+04	Bruch
16	19	1,54	9,96	15,3	400	0,00	6,14	5,21E+04	Bruch
17	20	1,52	9,98	15,2	300	0,00	4,55	1,12E+05	Bruch
18	21	1,54	9,99	15,4	300	0,00	4,62	1,92E+05	Bruch
19	22	1,52	9,87	15,0	280	0,00	4,20	1,87E+05	Bruch
20	23	1,51	9,85	14,9	250	0,00	3,72	6,00E+06	Durchläufer
21	23 hoch	1,51	9,85	14,9	400	0,00	5,95	4,16E+04	Bruch
22	24	1,52	9,98	15,2	300	0,00	4,55	1,99E+05	Bruch
23	27	1,55	10,0	15,5	450	0,00	6,98	2,84E+04	Bruch
24	28	1,52	9,89	15,0	450	0,00	6,76	3,33E+04	Bruch
25	29	1,52	9,91	15,1	450	0,00	6,78	3,14E+04	Bruch
26	30	1,52	9,98	15,2	300	0,00	4,55	1,32E+05	Bruch

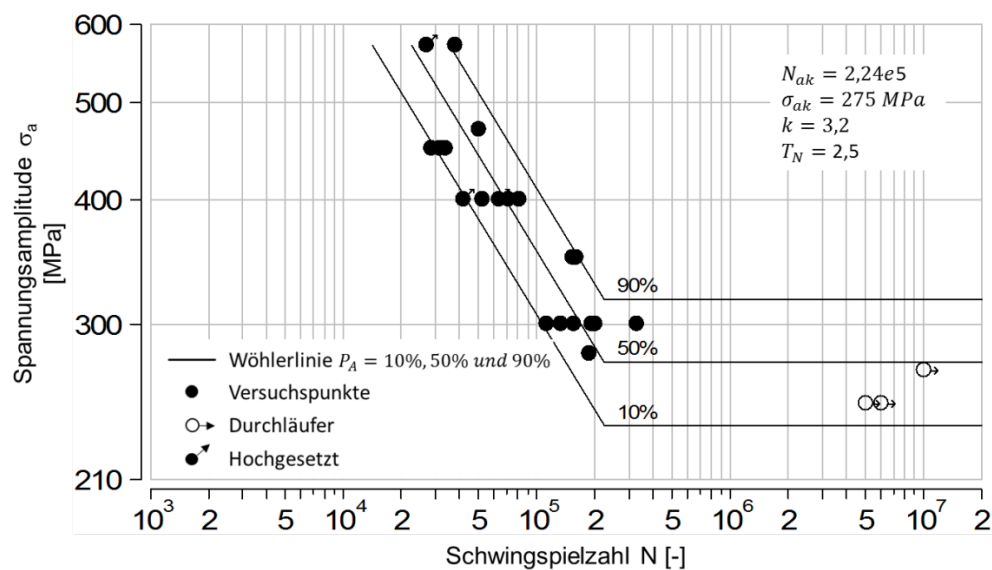
Abbildung B.29: Wöhlerlinie, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.30: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5 ohne Al-Si Beschichtung, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5 (ohne Al-Si Beschichtung)							
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten Variante 1							
Kurzbezeichnung:		4LV1oB							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,38	9,96	13,7	350	0,00	4,81	4,71E+05	Einspannungsbruch
2	2	1,38	10,00	13,8	680	0,00	9,38	1,90E+04	Bruch
3	3	1,38	9,89	13,6	550	0,00	7,51	7,59E+04	Bruch
4	4	1,38	10,01	13,8	450	0,00	6,22	1,82E+06	Bruch
5	5	1,37	10,00	13,7	500	0,00	6,85	5,30E+05	Bruch
6	6	1,37	10,00	13,7	550	0,00	7,54	4,52E+04	Bruch
7	7	1,37	9,86	13,5	680	0,00	9,19	5,13E+04	Bruch
8	8	1,37	9,99	13,7	450	0,00	6,16	4,25E+06	Durchläufer
9	9	1,37	9,86	13,5	550	0,00	7,43	2,12E+05	Bruch
10	10	1,37	9,97	13,7	500	0,00	6,83	2,64E+06	Bruch
11	8 hoch	1,37	9,99	13,7	550	0,00	7,53	2,30E+05	Bruch
12	11	1,37	9,95	13,6	600	0,00	8,18	3,08E+05	Bruch
13	12	1,37	9,95	13,6	500	0,00	6,82	3,52E+05	Bruch

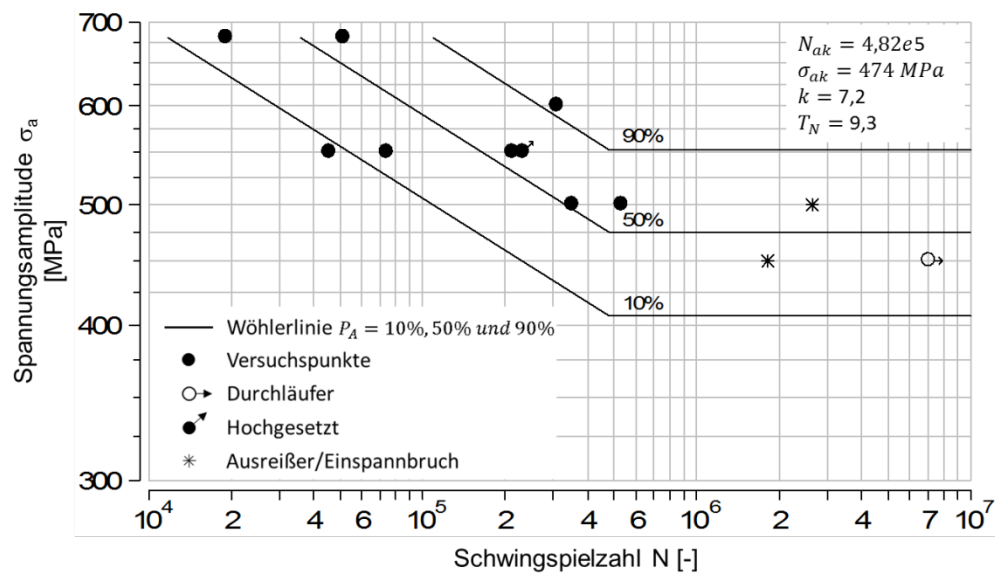
Abbildung B.30: Wöhlerlinie, 22MnB5 ohne Al-Si Beschichtung, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.31: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 2),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5							
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten Variante 2							
Kurzbezeichnung:		4LV2							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	37	1,55	9,94	15,4	400	7,53	6,16	5,58E+04	Bruch
2	38	1,55	9,97	15,5	300	5,67	4,64	2,69E+05	Bruch
3	39	1,55	9,96	15,4	280	5,28	4,32	7,12E+06	Durchläufer
4	40	1,51	10,14	15,3	300	5,61	4,59	3,46E+05	Bruch
5	39 hoch	1,55	9,96	15,4	450	8,49	6,95	3,77E+04	Bruch
6	28	10,01	1,56	15,6	300	5,73	4,68	5,40E+06	Durchläufer
7	28 hoch	1,56	10,01	15,6	450	8,59	7,03	5,30E+04	Bruch
8	29	1,54	10,02	15,4	400	7,54	6,17	6,13E+04	Bruch
9	30	1,52	9,96	15,1	400	7,40	6,06	1,03E+05	Bruch
10	31	1,54	9,99	15,4	400	7,52	6,15	8,69E+04	Bruch
11	32	1,53	9,97	15,3	350	6,53	5,34	1,87E+05	Bruch
12	42	1,52	10,00	15,2	350	6,50	5,32	1,60E+05	Bruch
13	43	1,52	10,02	15,2	450	8,38	6,85	4,79E+04	Bruch
14	23	1,55	9,93	15,4	300	5,64	4,62	1,00E+07	Durchläufer
15	23 hoch	1,55	9,93	15,4	450	8,47	6,93	4,61E+04	Bruch
16	24	1,55	10,01	15,5	350	6,64	5,43	2,00E+05	Bruch
17	25	1,54	9,88	15,2	500	9,30	7,61	4,00E+04	Bruch
18	22	1,54	10,02	15,4	500	9,43	7,72	3,42E+04	Bruch
19	23	1,54	10,01	15,4	500	9,42	7,71	3,78E+04	Bruch

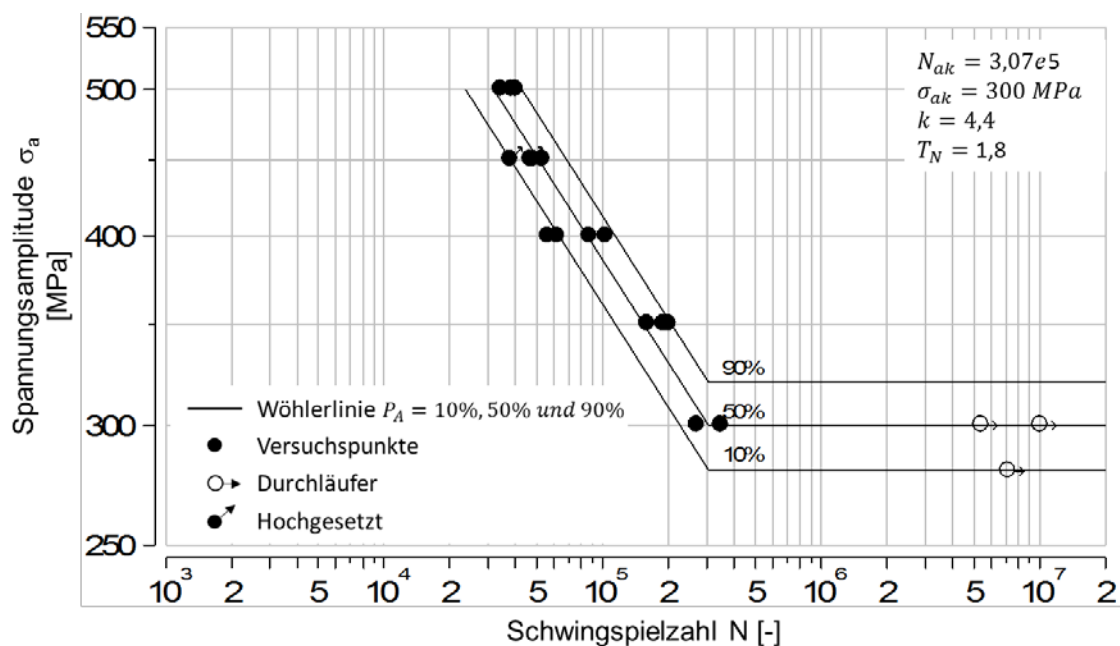
Abbildung B.31: Wöhlerlinie, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 2),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.32: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5							
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Referenz							
Kurzbezeichnung:		4SR							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	R33	1,49	9,93	14,8	400	0,00	5,92	2,20E+04	Bruch
2	R48	1,49	9,88	14,7	300	0,00	4,42	1,40E+05	Bruch
3	R32	1,50	9,94	14,9	350	0,00	5,22	4,04E+04	Bruch
4	R50	1,50	9,93	14,9	300	0,00	4,47	5,76E+04	Bruch
5	R41	1,48	9,89	14,6	350	0,00	5,12	4,01E+04	Bruch
6	R40	1,49	9,96	14,8	300	0,00	4,45	6,77E+04	Bruch
7	R38	1,48	9,95	14,7	250	0,00	3,68	1,91E+05	Bruch
8	R37	1,51	9,93	15,0	220	0,00	3,30	1,81E+05	Bruch
9	R6	1,51	9,94	15,0	400	0,00	6,00	2,42E+04	Bruch
10	R7	1,51	9,94	15,0	300	0,00	4,50	5,64E+04	Bruch
11	R8	1,51	9,95	15,0	220	0,00	3,31	1,23E+05	Bruch
12	R10	1,50	9,90	14,9	200	0,00	2,97	2,87E+05	Bruch
13	R18	1,50	9,94	14,9	180	0,00	2,68	1,00E+07	Durchläufer
14	R18 hoch	1,50	9,94	14,9	400	0,00	5,96	3,63E+04	Bruch
15	R11	1,51	9,94	15,0	200	0,00	3,00	2,41E+05	Bruch
16	R13	1,50	9,95	14,9	200	0,00	2,99	1,00E+07	Durchläufer
17	R12	1,51	9,94	15,0	250	0,00	3,75	9,77E+04	Bruch
18	R14	1,50	9,94	14,9	250	0,00	3,73	1,07E+05	Bruch
19	R13 hoch	1,5	9,95	14,9	400	0,00	5,97	3,03E+04	Bruch

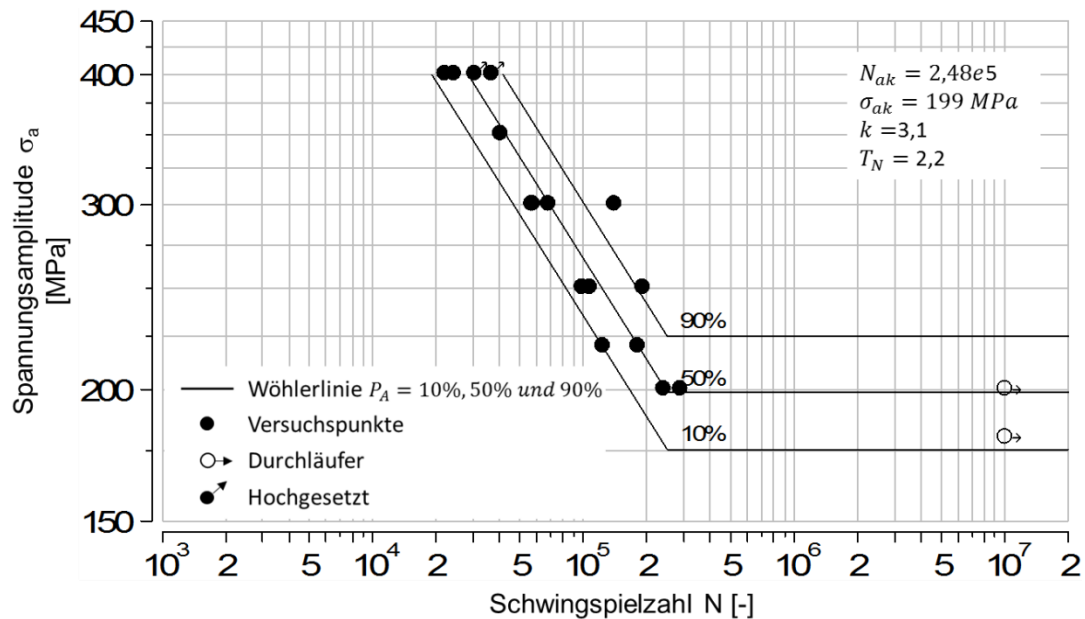
Abbildung B.32: Wöhlerlinie, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$



Tabelle B.33: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5							
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Verschleiß							
Kurzbezeichnung:		4SV							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis R:		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	V32	1,49	9,78	14,6	300	0,00	4,37	1,22E+05	Bruch
2	V17	1,49	9,67	14,4	300	0,00	4,32	1,54E+05	Bruch
3	V18	1,49	9,70	14,5	350	0,00	5,06	3,87E+04	Bruch
4	V19	1,49	9,67	14,4	350	0,00	5,05	1,03E+05	Bruch
5	V24	1,50	10,06	15,1	250	0,00	3,77	1,00E+07	Durchläufer
6	V30	1,49	10,08	15,0	350	0,00	5,26	6,87E+04	Bruch
7	V21	1,50	10,09	15,1	400	0,00	6,05	4,55E+04	Bruch
8	V23	1,52	10,09	15,3	350	0,00	5,37	3,89E+04	Bruch
9	V35	1,50	10,06	15,1	300	0,00	4,53	1,66E+05	Bruch
10	V37	1,49	10,05	15,0	300	0,00	4,49	9,41E+04	Bruch
11	V31	1,50	10,05	15,1	400	0,00	6,03	4,33E+04	Bruch
12	V33	1,49	9,76	14,5	350	0,00	5,09	1,18E+05	Bruch
13	V40	1,48	10,07	14,9	275	0,00	4,10	1,49E+05	Bruch
14	V29 hoch	1,50	10,06	15,1	400	0,00	6,04	4,52E+04	Bruch
15	V34	1,49	9,74	14,5	275	0,00	3,99	1,00E+07	Durchläufer
16	V41	1,50	10,05	15,1	300	0,00	4,52	1,48E+05	Bruch
17	V34 hoch	1,49	9,74	14,5	400	0,00	5,81	4,54E+04	Bruch
18	V22	1,52	10,06	15,3	400	0,00	6,12	4,69E+04	Bruch
19	V20	1,52	10,09	15,3	350	0,00	5,37	1,13E+05	Bruch

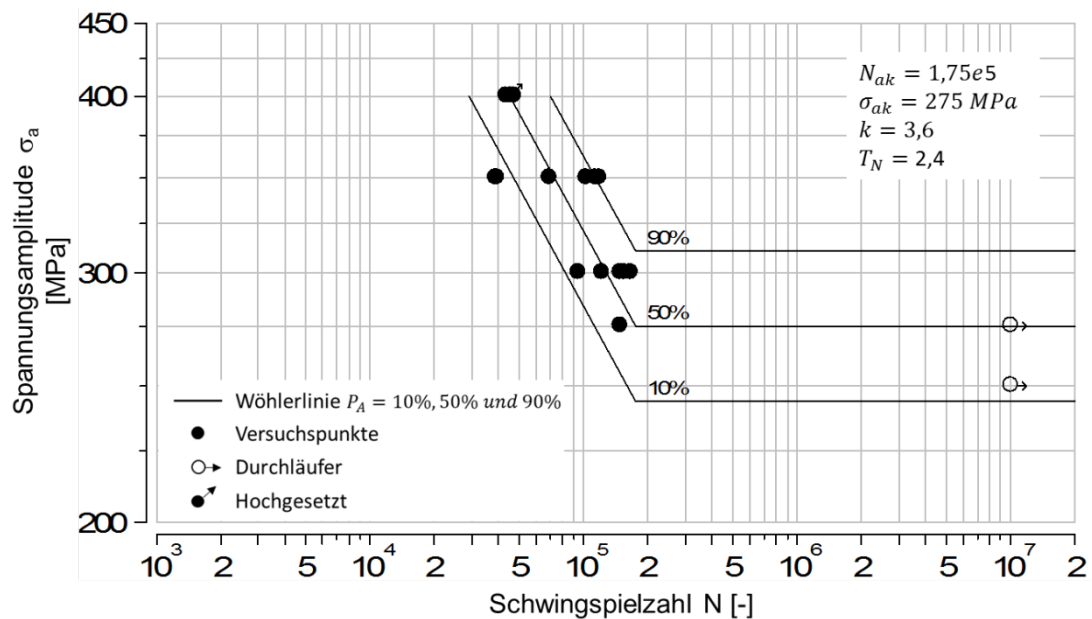
Abbildung B.33: Wöhlerlinie, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.34: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5								
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert								
Kurzbezeichnung:		4P								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	3	1,50	59,95	12,16	71,7	250	0,00	17,89	5,00E+06	Durchläufer
2	5	1,50	60,00	12,04	71,9	325	0,00	23,40	5,70E+04	Anriss
3	6	1,50	59,96	12,04	71,9	300	0,00	21,56	2,76E+05	Anriss
4	8	1,50	59,87	12,01	71,8	300	0,00	21,54	1,66E+05	Anriss
5	10	1,50	59,87	12,06	71,7	325	0,00	23,31	6,34E+04	Anriss
6	13	1,49	59,91	12,06	71,3	300	0,00	21,39	2,82E+05	Anriss
7	15	1,50	50,01	12,03	57,0	300	0,00	17,10	1,23E+05	Anriss
8	16	1,51	49,97	12,04	57,3	280	0,00	16,04	1,27E+05	Anriss
9	17	1,50	50,00	12,03	57,0	325	0,00	18,51	7,86E+04	Anriss
10	18	1,50	50,00	12,00	57,0	280	0,00	15,96	1,00E+07	Durchläufer
11	19	1,50	50,00	12,03	57,0	300	0,00	17,09	1,82E+05	Anriss
12	20	1,49	50,00	12,08	56,5	300	0,00	16,95	1,42E+06	Anriss
13	18 hoch	1,50	50,00	12,00	57,0	325	0,00	18,53	9,06E+04	Anriss
14	21	1,50	50,01	12,03	57,0	325	0,00	18,52	8,63E+04	Anriss
15	22	1,50	50,00	12,02	57,0	350	0,00	19,94	5,23E+04	Anriss
16	23	1,50	49,97	12,07	56,9	350	0,00	19,90	5,44E+04	Anriss
17	24	1,50	49,96	12,04	56,9	350	0,00	19,91	1,89E+05	Anriss
18	25	1,49	49,98	12,06	56,5	350	0,00	19,78	6,15E+04	Anriss
19	26	1,51	49,98	12,08	57,2	280	0,00	16,02	1,90E+06	Durchläufer
20	27	1,50	49,97	12,06	56,9	280	0,00	15,92	4,00E+06	Durchläufer
21	26 hoch	1,51	49,98	12,08	57,2	350	0,00	20,03	4,58E+04	Anriss
22	27 hoch	1,50	49,97	12,06	56,9	350	0,00	19,90	4,29E+04	Anriss

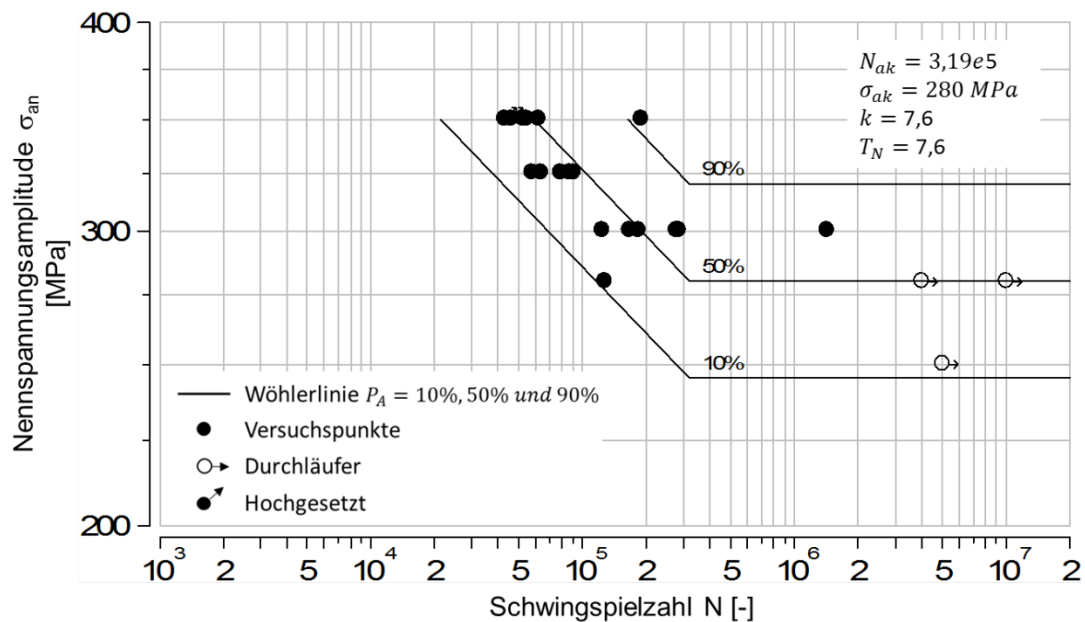
Abbildung B.34: Wöhlerlinie, 22MnB5, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.35: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=0,1$ 

Werkstoff: 22MnB5										
Kantenbearbeitungszustand: Poliert										
Kurzbezeichnung: 4P										
Kerbformzahl $K_t$ : 2,5										
Lastverhältnis R: 0,1										
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	1	1,51	50,01	12,04	57,3	225	15,77	12,90	4,04E+04	Anriss
2	2	1,51	49,99	12,01	57,3	200	14,02	11,47	3,44E+05	Anriss
3	3	1,50	50,00	12,08	56,9	200	13,90	11,38	1,00E+07	Durchläufer
4	3 hoch	1,50	50,00	12,08	56,9	225	15,64	12,80	7,76E+04	Anriss
5	4	1,51	50,02	12,07	57,3	210	14,71	12,03	6,75E+04	Anriss
6	5	1,51	50,01	11,99	57,4	210	14,73	12,06	5,36E+04	Anriss
7	6	1,50	50,01	11,96	57,1	200	13,95	11,42	1,41E+05	Anriss
8	7	1,51	50,00	12,07	57,3	205	14,35	11,74	8,28E+04	Anriss
9	8	1,50	49,84	12,07	56,7	205	14,19	11,61	3,39E+06	Einspannungsbruch
10	9	1,51	50,02	12,06	57,3	200	14,01	11,46	2,41E+05	Anriss
11	10	1,49	49,99	12,04	56,5	225	15,55	12,72	8,94E+04	Anriss
12	11	1,49	50,03	12,05	56,6	210	14,52	11,88	1,00E+07	Durchläufer
13	11 hoch	1,49	50,03	12,05	56,6	235	16,25	13,30	2,92E+05	Anriss
14	12	1,49	50,03	12,03	56,6	205	14,19	11,61	5,50E+06	Durchläufer
15	12 hoch	1,49	50,03	12,03	56,6	235	16,26	13,31	4,21E+04	Anriss
16	13	1,49	50,03	12,03	56,6	235	16,26	13,31	7,09E+04	Anriss
17	14	1,50	50,02	12,07	56,9	235	16,35	13,38	6,40E+04	Anriss
18	15	1,49	50,02	12,12	56,5	210	14,49	11,86	1,51E+05	Anriss
19	16	1,50	50,01	12,15	56,8	225	15,62	12,78	1,23E+06	Anriss
20	17	1,51	49,99	12,08	57,2	225	15,74	12,88	6,59E+04	Anriss
21	18	1,52	49,88	12,08	57,5	210	14,75	12,07	9,01E+04	Anriss
22	19	1,50	49,93	12,08	56,8	205	14,23	11,64	1,69E+05	Anriss
23	20	1,52	49,92	12,09	57,5	205	14,41	11,788	1,22E+05	Anriss

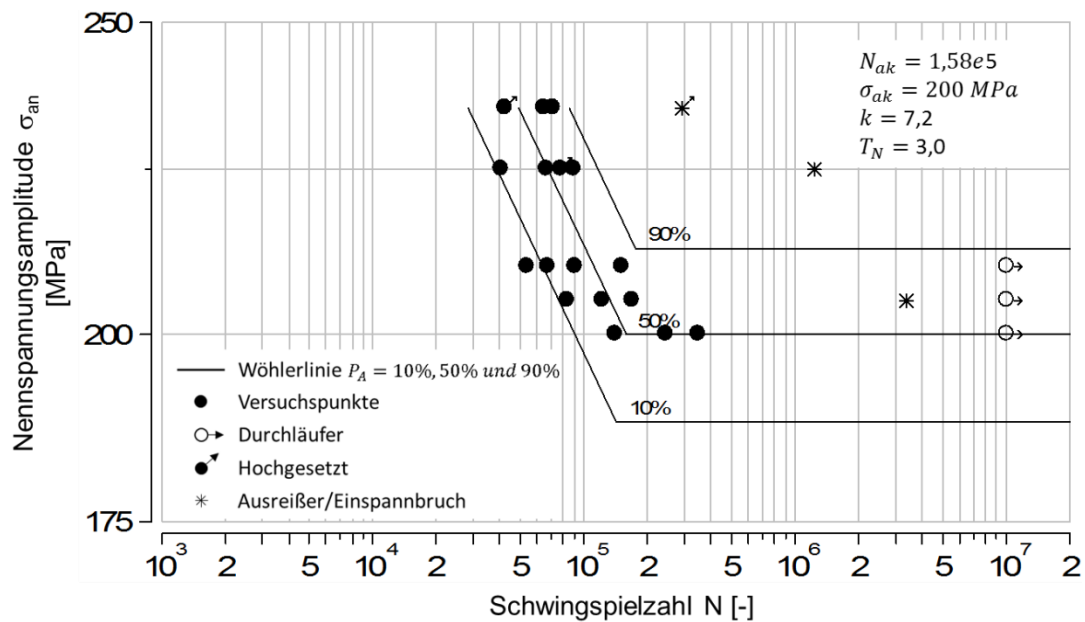
Abbildung B.35: Wöhlerlinie, 22MnB5, polierte Kanten,  $K_t=2,5$ ,  $R=0,1$

Tabelle B.36: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5								
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten Variante 1								
Kurzbezeichnung:		4LV1								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,50	60,92	11,98	73,4	300	0,00	22,00	3,36E+04	Anriss
2	2	1,50	60,02	11,92	72,2	275	0,00	19,83	4,31E+04	Anriss
3	3	1,50	60,04	11,94	72,2	250	0,00	18,04	5,19E+04	Anriss
4	4	1,50	60,03	11,94	72,1	200	0,00	14,40	9,11E+04	Anriss
5	5	1,50	60,00	11,93	72,1	150	0,00	10,08	1,89E+05	Anriss
6	6	1,50	59,95	11,92	72,0	100	0,00	7,20	5,00E+06	Durchläufer
7	6 hoch	1,50	59,95	11,92	72,0	300	0,00	21,60	3,39E+04	Anriss
8	7	1,50	59,99	11,94	72,1	150	0,00	10,08	1,77E+05	Anriss
9	8	1,50	59,90	11,52	72,6	125	0,00	9,00	4,37E+05	Anriss
10	9	1,50	59,99	11,51	72,7	110	0,00	8,00	9,15E+06	Anriss
11	10	1,50	59,98	11,52	72,7	200	0,00	14,40	8,45E+04	Anriss
12	11	1,50	59,98	11,93	72,1	125	0,00	9,00	4,92E+05	Anriss
13	12	1,50	59,99	11,53	72,7	150	0,00	10,80	1,55E+05	Anriss
14	13	1,49	60,03	11,93	71,7	200	0,00	14,33	8,89E+04	Anriss
15	16	1,50	60,00	11,95	72,1	150	0,00	10,81	2,32E+05	Anriss
16	17	1,50	60,02	12,00	72,0	125	0,00	9,00	6,84E+05	Anriss
17	18	1,51	60,02	11,97	72,6	125	0,00	9,07	3,25E+05	Anriss
18	15	1,50	60,00	11,55	72,7	200	0,00	14,42	8,79E+04	Anriss
19	20	1,49	60,02	11,97	71,6	110	0,00	7,88	5,00E+06	Durchläufer
20	20 hoch	1,49	60,02	11,97	71,6	250	0,00	17,90	5,25E+04	Anriss

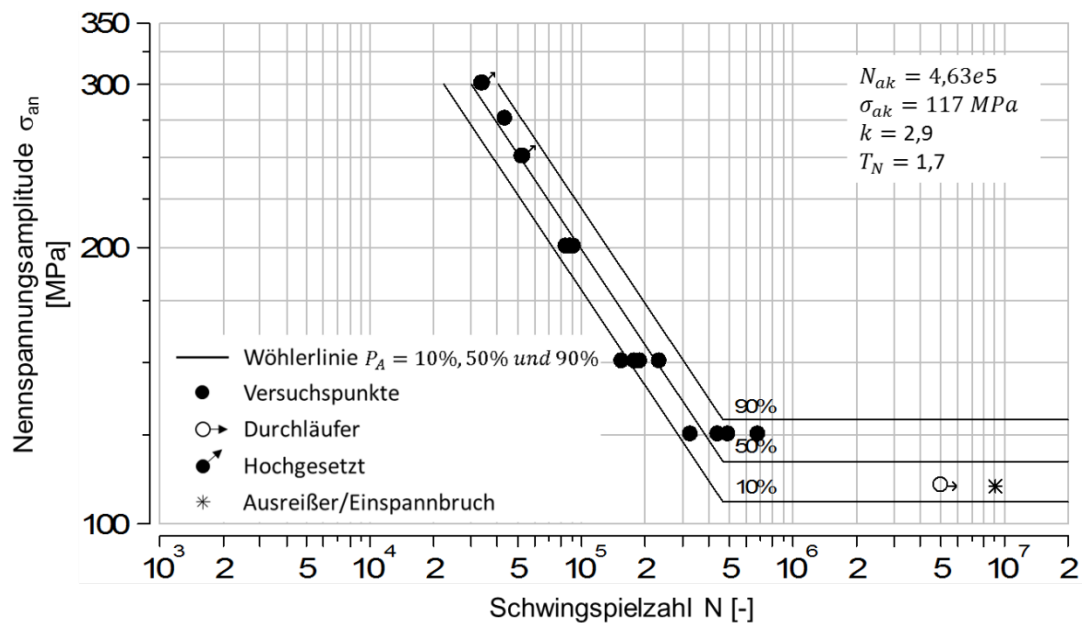
Abbildung B.36: Wöhlerlinie, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.37: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=2,5$ ,  $R=0,1$ 

Werkstoff: 22MnB5										
Kantenbearbeitungszustand: Laserstrahlgeschnitten Variante 1										
Kurzbezeichnung: 4LV1										
Kerbformzahl $K_t$ : 2,5										
Lastverhältnis $R$ : 0,1										
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,55	59,97	12,03	74,3	80	7,27	5,95	3,20E+06	Durchläufer
2	1 hoch	1,55	59,97	12,03	74,3	130	11,81	9,66	7,84E+04	Anriss
3	2	1,53	59,95	12,03	73,3	130	11,65	9,53	8,86E+04	Anriss
4	3	1,54	59,95	12,03	73,8	115	10,37	8,49	3,27E+06	Anriss
5	4	1,50	59,97	12,02	71,9	150	13,19	10,79	6,28E+04	Anriss
6	5	1,50	59,97	12,03	71,9	150	13,18	10,79	8,05E+04	Anriss
7	6	1,51	59,98	12,03	72,4	170	15,04	12,31	4,11E+04	Anriss
8	7	1,51	59,97	12,04	72,4	170	15,04	12,30	5,72E+04	Anriss
9	8	1,51	59,98	12,01	72,4	120	10,62	8,69	1,92E+05	Anriss
10	9	1,53	59,97	12,03	73,3	110	9,86	8,07	3,12E+05	Anriss
11	10	1,53	59,97	12,02	73,4	120	10,76	8,80	1,63E+05	Anriss
12	11	1,51	59,97	12,01	72,4	110	9,74	7,97	1,00E+07	Durchläufer
13	11 hoch	1,51	59,97	12,01	72,4	170	15,05	12,31	3,87E+04	Anriss
14	12	1,53	59,96	12,03	73,3	110	9,86	8,07	3,19E+05	Anriss
15	13	1,53	59,97	12,02	73,4	150	13,45	11,01	6,51E+04	Anriss
16	14	1,53	59,92	12,01	73,3	120	10,75	8,80	2,13E+05	Anriss
17	15	1,53	59,96	12,06	73,3	130	11,64	9,53	1,15E+05	Anriss
18	16	1,54	59,98	12,04	73,8	130	11,73	9,60	1,36E+05	Anriss
19	17	1,54	59,97	12,02	73,8	120	10,83	8,86	2,42E+05	Anriss
20	18	1,53	59,97	12,03	73,3	170	15,24	12,47	3,94E+04	Anriss

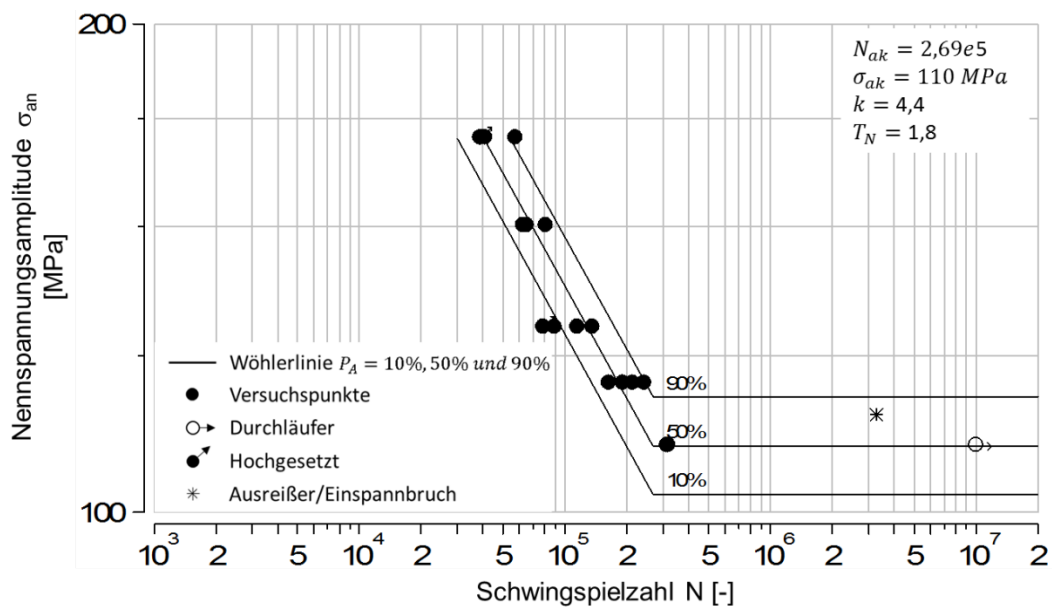
Abbildung B.37: Wöhlerlinie, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 1),  $K_t=2,5$ ,  $R=0,1$

Tabelle B.38: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 2),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5								
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten Variante 2								
Kurzbezeichnung:		4LV2								
Kerbfornzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,53	60,03	12,05	73,4	250	0,00	18,35	8,06E+04	Anriss
2	2	1,53	60,02	12,03	73,4	200	0,00	14,69	1,59E+05	Anriss
3	3	1,54	60,02	12,00	74,0	150	0,00	11,08	1,00E+07	Durchläufer
4	4	1,54	60,01	12,00	73,9	200	0,00	14,79	1,71E+05	Anriss
5	5	1,55	60,01	12,02	74,4	175	0,00	13,02	1,71E+05	Anriss
6	6	1,55	60,02	12,01	74,4	175	0,00	13,02	2,00E+05	Anriss
7	3 hoch	1,54	60,02	12,00	74,0	275	0,00	20,34	5,00E+04	Anriss
8	7	1,53	60,05	12,05	73,4	250	0,00	18,36	7,54E+04	Anriss
9	8	1,54	60,03	12,02	73,9	176	0,00	13,01	1,99E+05	Anriss
10	9	1,54	60,05	12,04	73,9	160	0,00	11,83	4,37E+05	Anriss
11	10	1,55	60,02	12,05	74,4	160	0,00	11,90	3,58E+05	Anriss
12	11	1,55	60,03	12,05	74,4	200	0,00	14,87	1,50E+05	Anriss
13	12	1,54	59,97	11,99	73,9	200	0,00	14,78	2,15E+05	Anriss
14	13	1,53	60,04	12,01	73,5	250	0,00	18,37	7,27E+04	Anriss
15	14	1,55	60,03	12,04	74,4	175	0,00	13,02	2,21E+05	Anriss
16	15	1,54	60,08	12,04	74,0	160	0,00	11,84	3,70E+05	Anriss
17	16	1,55	60,05	12,06	74,4	160	0,00	11,90	3,12E+05	Anriss
18	17	1,54	60,06	12,04	74,0	160	0,00	11,83	3,09E+05	Anriss

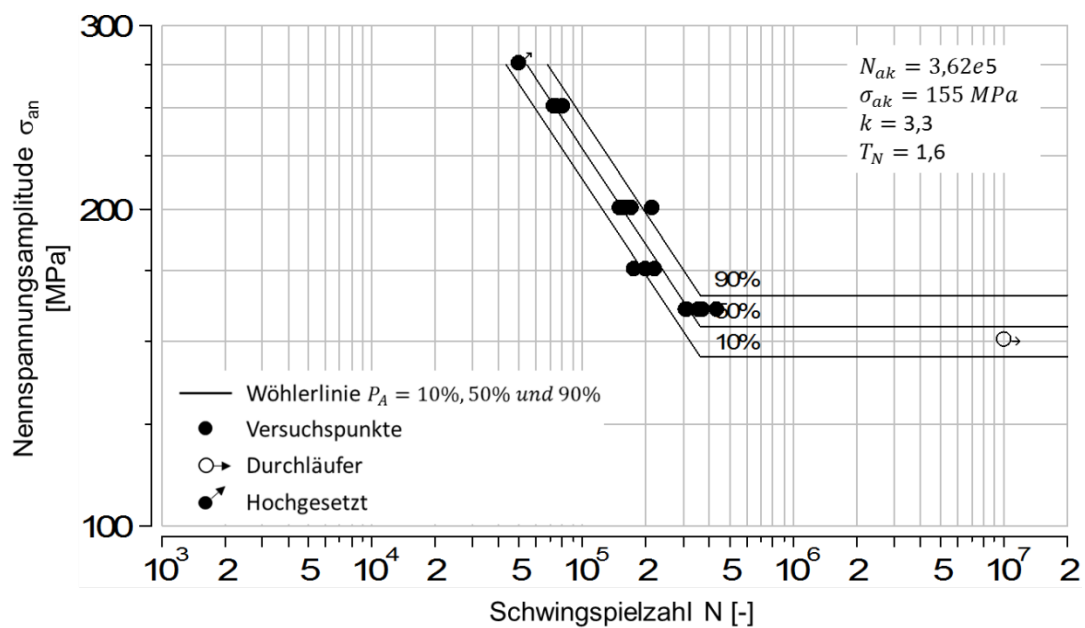
Abbildung B.38: Wöhlerlinie, 22MnB5, laserstrahlgeschnittene Kanten (Variante 2),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.39: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5								
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Referenz								
Kurzbezeichnung:		4SR								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis R:		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungsdurchmesser [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	R9	1,51	59,78	12,01	72,1	250	0,00	18,03	3,23E+04	Anriss
2	R8	1,51	59,78	12,02	72,1	200	0,00	14,42	5,91E+04	Anriss
3	R7	1,50	59,79	12,01	71,7	150	0,00	10,75	1,45E+05	Anriss
4	R6	1,50	59,91	12,04	71,8	100	0,00	7,18	7,60E+05	Anriss
5	R5	1,50	60,17	12,02	72,2	150	0,00	10,83	1,69E+05	Anriss
6	R4	1,50	60,14	12,01	72,2	150	0,00	10,83	1,75E+05	Anriss
7	R3	1,50	59,94	12,01	71,9	250	0,00	17,97	4,04E+04	Anriss
8	R2	1,49	59,91	12,01	71,4	200	0,00	14,27	6,69E+04	Anriss
9	R1	1,48	59,70	12,02	70,6	200	0,00	14,11	5,32E+04	Anriss
10	R25	1,48	59,87	12,04	70,8	200	0,00	14,16	6,69E+04	Anriss
11	R24	1,49	59,90	12,04	71,3	100	0,00	7,13	1,00E+07	Durchläufer
12	R23	1,51	59,89	11,99	72,3	250	0,00	18,08	4,27E+04	Anriss
13	R22	1,50	59,89	12,05	71,8	150	0,00	10,76	1,52E+05	Anriss
14	R20	1,48	59,90	11,99	70,9	125	0,00	8,86	1,00E+07	Durchläufer
15	R24 hoch	1,49	59,90	12,04	71,3	250	0,00	17,83	3,62E+04	Anriss
16	R20 hoch	1,48	59,90	11,99	70,9	250	0,00	17,73	3,97E+04	Anriss
17	R19	1,49	59,92	12,03	71,4	175	0,00	12,49	1,06E+05	Anriss
18	R21	1,51	59,91	12,05	72,3	175	0,00	12,65	1,14E+05	Anriss
19	R18	1,48	59,96	12,04	70,9	125	0,00	8,87	2,62E+05	Anriss
20	R15	1,50	59,93	12,04	71,8	125	0,00	8,98	3,74E+05	Anriss

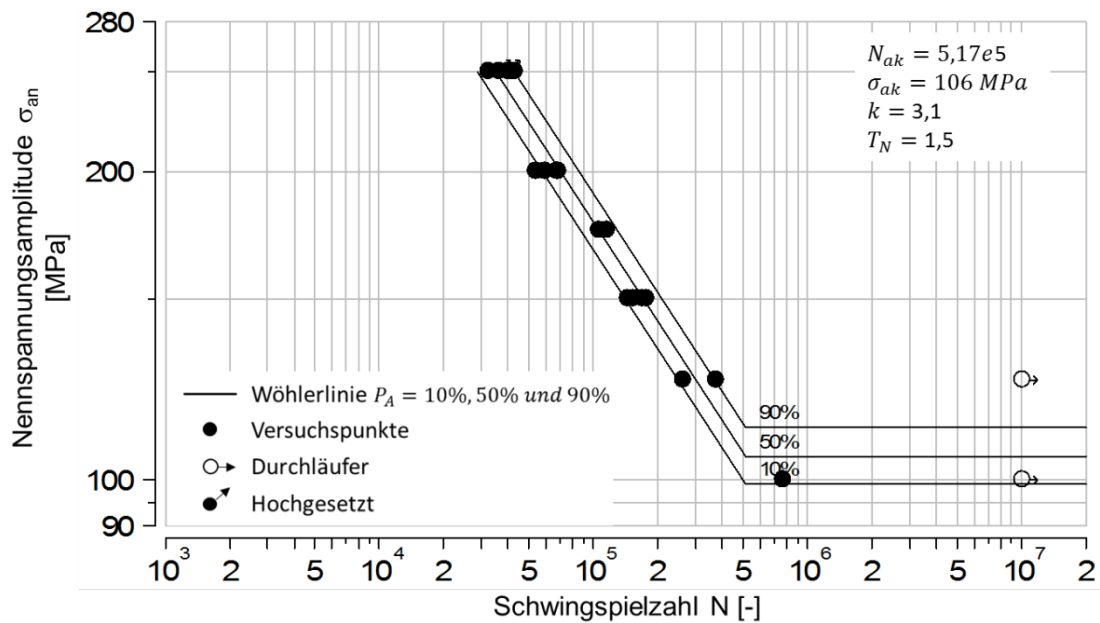
Abbildung B.39: Wöhlerlinie, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$

Tabelle B.40: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		22MnB5								
Kantenbearbeitungszustand:		Schergeschnitten, Strategie: Verschleiß								
Kurzbezeichnung:		4SV								
Kerbformzahl $K_t$ :		2,5								
Lastverhältnis $R$ :		-1								
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Bohrungs- durch- messer [mm]	Querschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	Nennspannungs- amplitude $\sigma_{an}$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Last- amplitude $F_a$ [kN]	Schwing- spielzahl $N$	Bemerkung
1	15	1,50	59,93	12,16	71,7	200	0,00	14,33	5,52E+04	Anriss
2	11	1,50	59,81	12,33	71,2	250	0,00	17,81	2,96E+04	Anriss
3	3	1,49	59,84	12,01	71,3	200	0,00	14,25	6,73E+04	Anriss
4	19	1,51	60,05	12,14	72,3	200	0,00	14,47	4,50E+04	Anriss
5	18	1,50	60,00	12,39	71,4	200	0,00	14,28	4,84E+04	Anriss
6	17	1,51	59,99	12,22	72,1	150	0,00	10,82	1,24E+05	Anriss
7	16	1,50	59,98	12,20	71,7	150	0,00	10,75	1,17E+05	Anriss
8	14	1,51	59,88	12,19	72,0	150	0,00	10,80	1,70E+05	Anriss
9	12	1,49	59,84	12,14	71,1	250	0,00	17,77	3,41E+04	Anriss
10	13	1,51	59,85	12,21	71,9	250	0,00	17,98	3,15E+04	Anriss
11	21	1,50	59,99	12,17	71,7	150	0,00	10,76	1,10E+05	Anriss
12	22	1,50	60,01	12,02	72,0	125	0,00	9,00	3,67E+05	Anriss
13	23	1,52	60,03	12,23	72,7	125	0,00	9,08	2,32E+05	Anriss
14	24	1,50	60,09	12,22	71,8	175	0,00	12,57	8,84E+04	Anriss
15	25	1,50	59,90	12,20	71,6	175	0,00	12,52	7,46E+04	Anriss
16	10	1,50	59,96	12,16	71,7	175	0,00	12,55	8,77E+04	Anriss
17	20	1,50	59,99	12,01	72,0	100	0,00	7,20	1,00E+07	Durchläufer
18	1	1,49	59,78	12,36	70,7	125	0,00	8,83	5,50E+06	Durchläufer
19	20 hoch	1,5	59,99	12,01	72,0	250	0,00	17,99	3,34E+04	Anriss
20	1 hoch	1,49	59,78	12,36	70,7	250	0,00	17,66	3,35E+04	Anriss

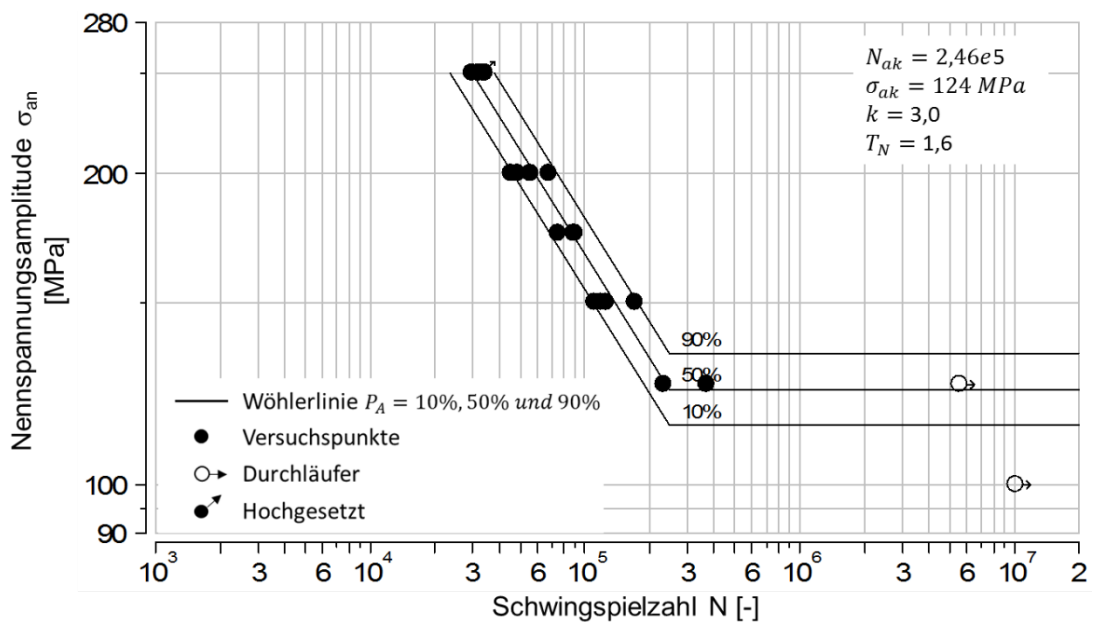
Abbildung B.40: Wöhlerlinie, 22MnB5, schergeschnittene Kanten (Verschleiß),  $K_t=2,5$ ,  $R=-1$



Tabelle B.41: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP1000, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP1000				
Kantenbearbeitungszustand:					Poliert				
Kurzbezeichnung:					5P				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis $R$ :					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,42	9,88	14,0	625	0,00	8,77	4,50E+03	Bruch
2	2	1,41	9,93	14,0	600	0,00	8,40	5,74E+03	Bruch
3	3	1,41	9,89	13,9	500	0,00	6,97	3,06E+04	Bruch
4	4	1,41	9,89	13,9	450	0,00	6,28	9,51E+04	Bruch
5	5	1,41	9,89	13,9	450	0,00	6,28	1,37E+05	Bruch
6	6	1,42	9,90	14,1	500	0,00	7,03	2,44E+04	Bruch
7	7	1,41	9,90	14,0	500	0,00	6,98	3,10E+04	Bruch
8	8	1,41	10,00	14,1	450	0,00	6,35	1,18E+05	Bruch
9	9	1,41	9,87	13,9	400	0,00	5,57	1,00E+07	Durchläufer
10	10	1,42	9,98	14,2	450	0,00	6,38	1,07E+05	Bruch
11	11	1,41	9,91	14,0	500	0,00	6,99	3,15E+04	Bruch
12	12	1,41	9,94	14,0	425	0,00	5,96	2,34E+05	Bruch
13	9 hoch	1,41	9,87	13,9	500	0,00	6,96	5,15E+04	Bruch
14	13	1,42	9,93	14,1	425	0,00	5,99	1,67E+05	Bruch
15	14	1,42	9,90	14,1	425	0,00	5,97	1,42E+05	Bruch
16	15	1,43	9,95	14,2	425	0,00	6,05	1,34E+05	Bruch
17	16	1,42	9,95	14,1	475	0,00	6,71	5,41E+04	Bruch
18	17	1,43	9,96	14,2	475	0,00	6,77	3,01E+04	Bruch
19	18	1,44	9,93	14,3	475	0,00	6,79	3,95E+04	Bruch
20	19	1,43	9,93	14,2	475	0,00	6,74	3,83E+04	Bruch

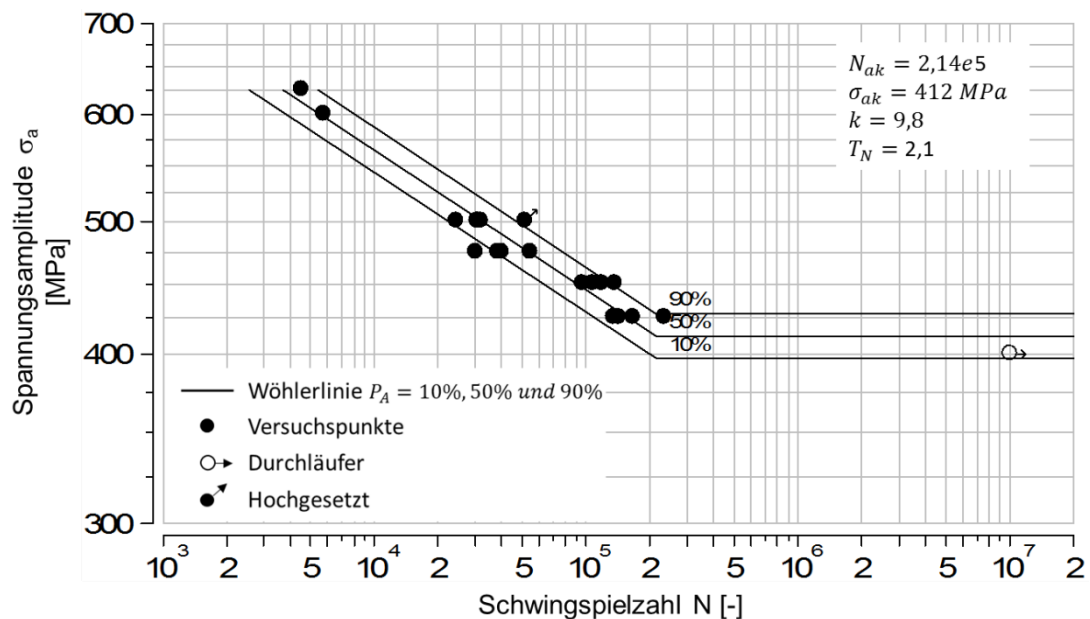
Abbildung B.41: Wöhlerlinie, DP1000, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.42: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP1000, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		DP1000							
Kantenbearbeitungszustand:		Laserstrahlgeschnitten							
Kurzbezeichnung:		5L							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,37	10,06	13,8	650	0,00	8,96	2,96E+04	Bruch
2	2	1,40	10,09	14,1	630	0,00	8,90	2,00E+03	Ausreißer
3	3	1,38	10,06	13,9	630	0,00	8,75	3,49E+04	Bruch
4	4	1,37	10,06	13,8	600	0,00	8,27	4,16E+04	Bruch
5	5	1,39	10,08	14,0	550	0,00	7,71	1,15E+05	Bruch
6	6	1,38	10,06	13,9	500	0,00	6,94	1,28E+05	Bruch
7	7	1,38	10,07	13,9	450	0,00	6,25	1,98E+05	Bruch
8	8	1,37	10,09	13,8	452	0,00	6,25	5,46E+06	Ausreißer
9	9	1,37	10,06	13,8	500	0,00	6,89	9,87E+04	Bruch
10	10	1,38	10,07	13,9	470	0,00	6,53	1,49E+05	Bruch
11	11	1,37	10,11	13,9	470	0,00	6,51	3,95E+05	Bruch
12	12	1,38	10,06	13,9	450	0,00	6,25	4,56E+06	Ausreißer
13	13	1,38	10,07	13,9	600	0,00	8,34	3,86E+04	Bruch
14	14	1,38	10,05	13,9	500	0,00	6,93	1,53E+05	Bruch
15	15	1,37	10,08	13,8	470	0,00	6,49	1,83E+05	Bruch
16	16	1,38	10,06	13,9	500	0,00	6,94	1,27E+05	Bruch
17	17	1,37	10,05	13,8	470	0,00	6,47	2,58E+05	Bruch
18	18	1,41	10,06	14,2	430	0,00	6,10	7,91E+04	Bruch
19	19	1,41	10,08	14,2	430	0,00	6,11	7,26E+04	Bruch
20	20	1,42	10,09	14,3	400	0,00	5,73	1,72E+05	Bruch
21	21	1,42	10,08	14,3	350	0,00	5,01	1,00E+07	Durchläufer
22	21 hoch	1,42	10,08	14,3	600	0,00	8,59	3,94E+03	Ausreißer

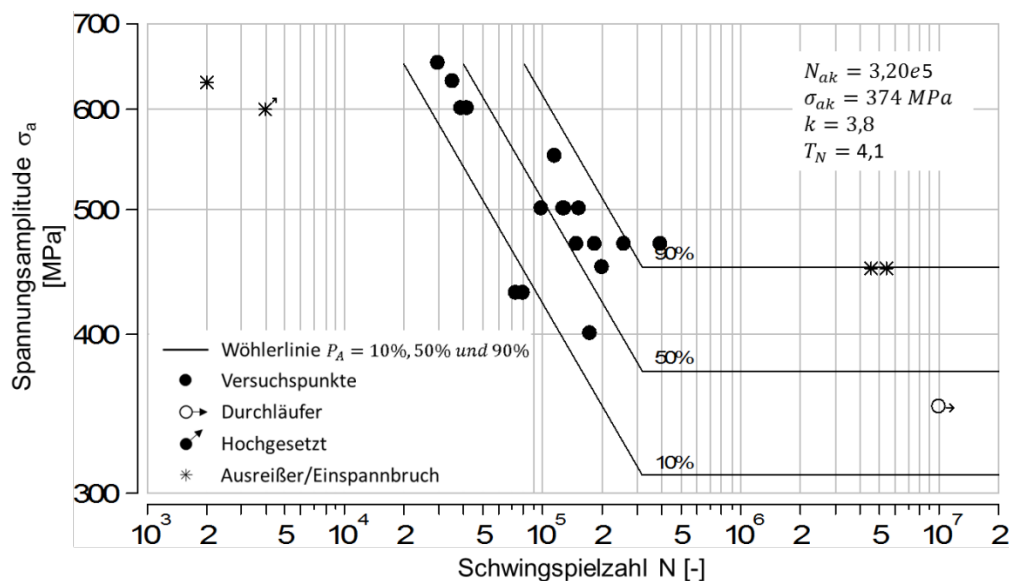
Abbildung B.42: Wöhlerlinie, DP1000, laserstrahlgeschnittene Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.43: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, DP1000, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					DP1000				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten; Strategie: Referenz				
Kurzbezeichnung:					5SR				
Kerbfornzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis R:					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	R99	1,43	9,93	14,2	450	0,00	6,39	2,77E+04	Bruch
2	R109	1,42	9,92	14,1	400	0,00	5,64	5,38E+04	Bruch
3	R111	1,43	9,92	14,2	350	0,00	4,97	7,60E+06	Durchläufer
4	R110	1,42	9,93	14,1	380	0,00	5,36	6,38E+04	Bruch
5	R108	1,42	9,93	14,1	400	0,00	5,64	5,31E+04	Bruch
6	R111 hoch	1,43	9,92	14,2	450	0,00	6,38	2,21E+04	Bruch
7	R107	1,42	9,92	14,1	380	0,00	5,35	7,39E+04	Bruch
8	R44	1,43	9,92	14,2	400	0,00	5,67	4,36E+04	Bruch
9	R39	1,42	9,95	14,1	380	0,00	5,37	5,48E+04	Bruch
10	R98	1,42	9,93	14,1	400	0,00	5,64	5,11E+04	Bruch
11	R97	1,41	9,92	14,0	380	0,00	5,32	5,95E+04	Bruch
12	R15	1,41	9,92	14,0	380	0,00	5,32	7,67E+04	Bruch
13	R12	1,42	9,92	14,1	360	0,00	5,07	4,66E+04	Bruch
14	R11	1,42	9,94	14,1	450	0,00	6,35	2,50E+04	Bruch
15	R41	1,42	9,92	14,1	360	0,00	5,07	1,14E+05	Bruch
16	R10	1,41	9,91	14,0	360	0,00	5,03	1,10E+05	Bruch
17	R9	1,41	9,93	14,0	400	0,00	5,60	5,90E+04	Bruch
18	R92	1,40	9,93	13,9	360	0,00	5,01	1,39E+05	Bruch
19	R8	1,43	9,93	14,2	450	0,00	6,39	2,18E+04	Bruch

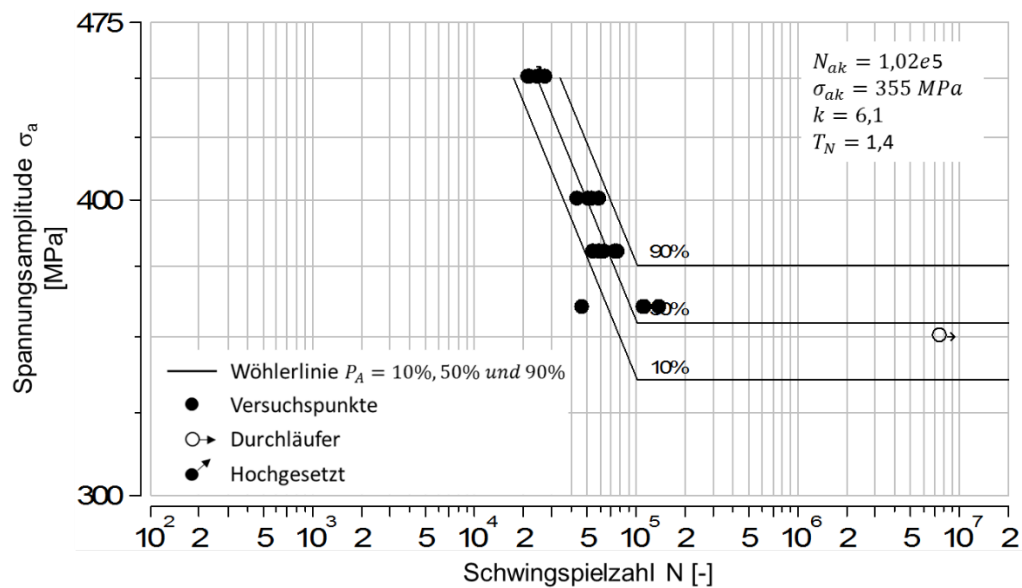
Abbildung B.43: Wöhlerlinie, DP1000, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.44: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP1000, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:		CP1000							
Kantenbearbeitungszustand:		Poliert							
Kurzbezeichnung:		6P							
Kerbformzahl $K_t$ :		1							
Lastverhältnis $R$ :		-1							
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl $N$	Bemerkung
1	1	1,40	9,88	13,8	600	0,00	8,30	8,47E+04	Bruch
2	2	1,40	9,88	13,8	560	0,00	7,75	1,21E+05	Bruch
3	3	1,39	9,98	13,9	520	0,00	7,21	2,57E+05	Bruch
4	4	1,40	9,98	14,0	520	0,00	7,27	2,29E+05	Bruch
5	5	1,40	9,92	13,9	560	0,00	7,78	1,42E+05	Bruch
6	6	1,40	9,90	13,9	600	0,00	8,32	7,07E+04	Bruch
7	7	1,40	9,92	13,9	490	0,00	6,81	4,76E+05	Einspannungsbruch
8	8	1,40	9,91	13,9	600	0,00	8,32	8,99E+04	Bruch
9	9	1,39	9,91	13,8	520	0,00	7,16	2,05E+05	Bruch
10	10	1,40	9,90	13,9	500	0,00	6,93	5,77E+05	Bruch
11	11	1,38	9,95	13,7	560	0,00	7,69	1,19E+05	Bruch
12	12	1,39	9,95	13,8	520	0,00	7,19	2,74E+05	Bruch
13	13	1,39	9,95	13,8	500	0,00	6,92	5,62E+05	Einspannungsbruch
14	14	1,39	9,97	13,9	560	0,00	7,76	1,68E+05	Bruch
15	15	1,39	9,93	13,8	500	0,00	6,90	4,07E+05	Bruch
16	16	1,40	9,92	13,9	500	0,00	6,94	3,74E+05	Einspannungsbruch
17	17	1,40	9,95	13,9	600	0,00	8,36	7,02E+04	Bruch
18	18	1,39	9,92	13,8	560	0,00	7,72	1,10E+05	Bruch
19	19	1,40	9,90	13,9	480	0,00	6,65	6,00E+06	Durchläufer
20	20	1,40	9,91	13,9	500	0,00	6,94	3,01E+05	Bruch
21	21	1,40	9,91	13,9	500	0,00	6,94	8,58E+05	Bruch
22	22	1,40	9,97	14,0	480	0,00	6,70	4,04E+06	Einspannungsbruch

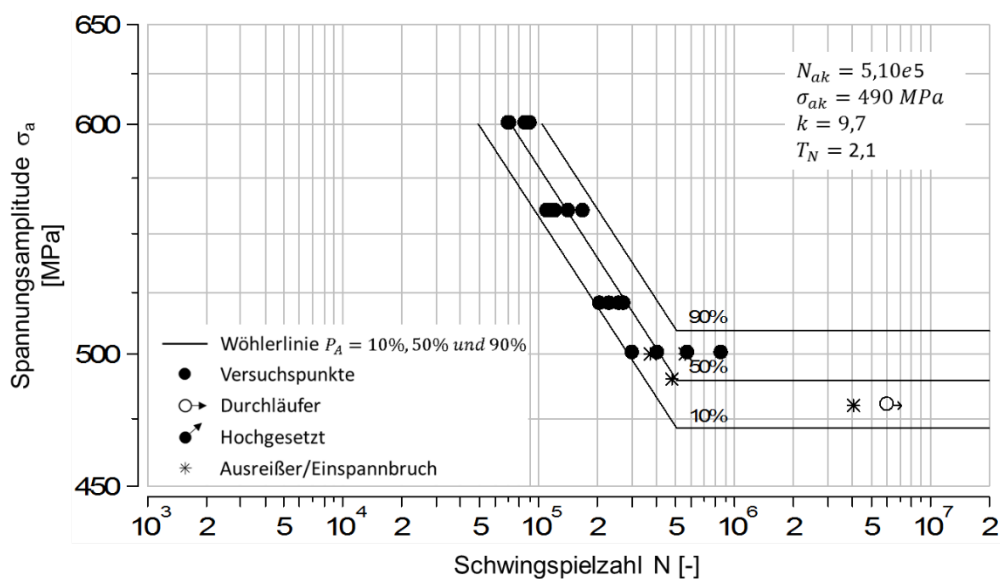
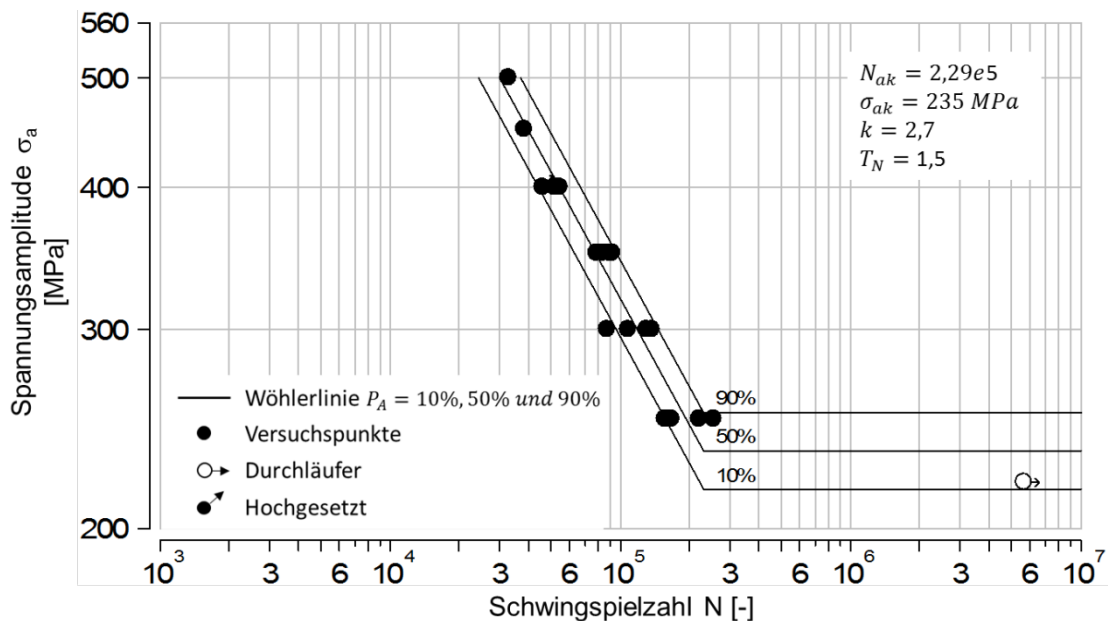
Abbildung B.44: Wöhlerlinie, CP1000, polierte Kanten,  $K_t=1$ ,  $R=-1$

Tabelle B.45: Versuchsprotokoll, spannungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche, CP1000, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$ 

Werkstoff:					CP1000				
Kantenbearbeitungszustand:					Schergeschnitten; Strategie: Referenz (homogene Schnittfläche)				
Kurzbezeichnung:					6SR				
Kerbformzahl $K_t$ :					1				
Lastverhältnis R:					-1				
lfd. Nr.	Bezeichnung Probe	Dicke [mm]	Breite [mm]	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsamplitude $\sigma_a$ [MPa]	Mittellast $F_m$ [kN]	Lastamplitude $F_a$ [kN]	Schwingspielzahl N	Bemerkung
1	R58	1,40	9,95	13,9	500	0,00	6,97	3,23E+04	Bruch
2	R60	1,40	9,96	13,9	450	0,00	6,28	3,78E+04	Bruch
3	R62	1,40	9,94	13,9	400	0,00	5,57	5,41E+04	Bruch
4	R71	1,40	9,96	13,9	350	0,00	4,88	9,16E+04	Bruch
5	R74	1,40	9,96	13,9	300	0,00	4,18	1,07E+05	Bruch
6	R75	1,40	9,96	13,9	250	0,00	3,49	1,66E+05	Bruch
7	R86	1,40	9,95	13,9	250	0,00	3,48	1,56E+05	Bruch
8	R85	1,40	9,94	13,9	250	0,00	3,48	2,51E+05	Bruch
9	R76	1,40	9,97	14,0	220	0,00	3,07	5,60E+06	Durchläufer
10	R76 hoch	1,40	9,97	14,0	400	0,00	5,58	4,55E+04	Bruch
11	R32	1,40	9,94	13,9	300	0,00	4,18	1,37E+05	Bruch
12	R31	1,40	9,93	13,9	300	0,00	4,17	1,29E+05	Bruch
13	R30	1,40	9,95	13,9	350	0,00	4,88	8,39E+04	Bruch
14	R59	1,40	9,96	13,9	350	0,00	4,88	7,80E+04	Bruch
15	R99	1,40	9,95	13,9	350	0,00	4,88	8,90E+04	Bruch
16	R102	1,40	9,96	13,9	250	0,00	3,49	2,18E+05	Bruch
17	R106	1,40	9,95	13,9	300	0,00	4,18	8,68E+04	Bruch
18	R109	1,40	9,95	13,9	400	0,00	5,57	5,14E+04	Bruch

Abbildung B.45: Wöhlerlinie, CP1000, schergeschnittene Kanten (Referenz),  $K_t=1$ ,  $R=-1$

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2012)

Nr.	Titel
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbieren aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013
251	Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
252	Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
253	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
254	Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
255	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
256	Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
257	Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
258	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
259	Erweiterung des Korbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
260	Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
261	Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013

- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
- 273 UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
- 274 Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
- 275 Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
- 276 Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
- 277 Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
- 278 Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
- 279 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
- 280 PCM from iGLAD database, 2015
- 281 Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
- 282 Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
- 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  $\chi$ 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 quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2018



## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2018

**VDA**

Verband der  
Automobilindustrie

**FAT**

Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik

Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)