

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik
Lehrstuhl Laser- und Oberflächentechnik

Aufgabenstellung zur Diplomarbeit
für Herrn Roland Grübner

Thema: „Bewertung der durch Drehen erzeugten Bauteiloberflächen in Bezug auf Oberflächenbeschaffenheit und deren Einfluss auf die Betriebsfestigkeit“

Zielsetzung:

Das Ziel ist die Analyse der Oberflächenbeschaffenheit und deren Wirkung auf die Betriebsfestigkeit an Bauteilen aus Aluminium-Knetlegierungen im Ergebnis unterschiedlicher Fertigungstechnologien bei der Drehbearbeitung. Neben der Charakterisierung der Oberflächentopographie und der Randschichteigenschaften durch eigenspannungs- und Härtemessungen soll eine Korrelation zwischen der Schwingfestigkeit der Bauteile und deren Herstellungstechnologie (Werkzeuggeometrie, Schnittgeschwindigkeit, Vorschub) abgeleitet werden. Ausgangspunkt bildet eine Literaturrecherche zum Stand der Technik zu obigen Problemstellungen. An Drehteilen aus Aluminium-Knetlegierungen sollen Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt und ausgewertet werden. Bestehende Konzepte zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit bei der Berechnung der Schwingfestigkeit sollen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf Aluminium-Knetlegierungen geprüft und bewertet sowie gegebenenfalls neue Konzepte erarbeitet werden. Im Ergebnis der Untersuchungen sollen Empfehlungen für eine wirtschaftliche Festlegung von Fertigungsparametern mit dem Ziel einer verbesserten Schwingfestigkeit der Bauteile abgeleitet werden.

Ausgehändigt am: 20.02.2005

Einzureichen am: 19.06.2005

Der von der Fachrichtung erlassenen Richtlinien zur Anfertigung der Diplomarbeit sowie die Diplomprüfungsordnung sind zu beachten.

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer, IOF, Technische Universität Dresden
Dipl.-Ing. M. Küppers, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Balke
Studienrichtungsleiter

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer
Betreuender Hochschullehrer

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Diplomand am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt.

Meinem Betreuer Herrn Dr.-Ing. Martin Küppers gilt mein besonderer Dank für seine fachliche Unterstützung, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und für die Geduld.

Bei allen Mitarbeitern des Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF möchte ich mich recht herzlich für die Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit bedanken.

Weiterhin danke ich dem Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik für die Betreuung meiner Diplomarbeit durch Prof. Beyer und für die Zusammenarbeit mit Herrn Dr.-Ing. A. Popp.

Darmstadt, Juni 2005

Roland Grübner

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

Betreuer/ Gutachter: Dipl.-Ing. M. Küppers

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. C. M. Sonsino

Technische Universität Dresden, Institut für Oberflächentechnik und
Fertigungsmesstechnik

Betreuer/ Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. U. Günther

Betreuer: Dr.-Ing. A. Popp

Selbständigkeits-Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe, und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen kenntlich gemacht worden sind.

Roland Grübner

Dresden den 20. Juni 2005

Inhalt

1	Einleitung und Aufgabenstellung	7
2	Zusammenfassung	9
3	Kenntnisstand	13
4	Versuchsprogramm	20
4.1	Probenwerkstoff	20
4.2	Probenform	20
4.3	Versuchstechnik	21
4.3.1	Versuchsmaschinen	21
4.3.2	Versuchswerkzeuge	23
4.4	Rauheitsmessung	24
4.5	Versuchsreihen	24
4.5.1	Polierte Proben	24
4.5.2	Basisversuche	25
4.5.3	Sonderversuche	27
4.5.4	Hauptversuche	29
4.6	Eigenspannungsmessung	30
4.7	Schwingfestigkeitsuntersuchungen	32
4.7.1	Prüfstände	32
4.7.2	DMS Kontrollmessungen	33
4.7.3	Verifikation der Formzahl	34
4.7.4	Anrisserfassung am servohydraulischen Prüfstand	34
5	Auswertung	36
5.1	Wöhlerversuche	36
5.1.1	Basisversuche	36
5.1.2	Hauptversuche	37
5.1.3	Sonderversuche	39
5.2	Streuung	40
5.3	Gassnerversuche	41
5.4	Lebensdauerrechnung/ Schadensakkumulation	43
5.5	Einfluss der Fertigungsparameter auf die Schwingfestigkeit	44
5.6	Einfluss der Rautiefe	46
5.7	Einfluss der Eigenspannungen	48
6	Metallographie	49
6.1	Gefüge- und Bruchflächenuntersuchungen	49
6.2	Härtemessungen	54
7	Ausblick	55
	Literaturverzeichnis	56

Formelzeichen/ Abkürzungen	59
Werkstoffzeugnis	62
Eigenspannungsmessungen	63
Diagramme	

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist, den Zusammenhang zwischen Drehverfahren, der resultierenden Oberflächenbeschaffenheit und deren Einfluss auf die Betriebsfestigkeit für Aluminium-Knetlegierungen zu untersuchen.

Hierbei steht der Einfluss der Fertigungsparameter (technologische Arbeitswerte, Werkzeuggeometrie) auf die Schwingfestigkeit im Mittelpunkt der Untersuchung. Am Beispiel der für tragende Strukturteile häufig eingesetzten Legierung AlSi1Mg T6 (EN 6082 T6) werden im Rahmen eines SEF-Projektes (Strategische Eigenforschung) der Fraunhofer-Institute IWS Dresden und LBF Darmstadt hierfür umfangreiche Versuche durchgeführt.

Unter Variation der Bearbeitungstechnologie (technologische Arbeitswerte, Werkzeuggeometrie) werden Rundproben hergestellt und deren Oberfläche über Rauigkeits- und Eigenspannungsmessungen sowie über Licht- und Raster-Elektronenmikroskopische Aufnahmen charakterisiert.

Zur Beurteilung des Einflusses der „gedrehten“ Oberfläche auf die Betriebsfestigkeit werden Schwingfestigkeitsuntersuchungen in Form von 4-Punkt-Biegeversuchen mit schwellender und wechselnder Belastung unter konstanten und variablen Amplituden durchgeführt. Für die Versuchsreihen mit Bearbeitungstechnologien für hochbeanspruchte Bauteile werden Proben mit ungekerbter und gekerbter Form untersucht. Dies bietet die Möglichkeit den Einfluss der Oberfläche bei Kerben, wie sie bei realen Bauteilen existieren, abzuschätzen.

Ein weiterer Aspekt ist die mögliche thermische Beeinflussung des Bauteiles und die daraus resultierende Erhöhung der Anrissempfindlichkeit bzw. Entfestigung der Randschicht in Abhängigkeit von der Bearbeitungstechnologie. Hierfür wird die Randschicht in Bezug auf Gefüge, Gefügeveränderung, Mikrohärtigkeit und Versagensort untersucht.

Aus den Ergebnissen lässt sich ein umfassender Rückschluss auf den Einfluss der Bearbeitungstechnologie auf die Betriebsfestigkeit im untersuchten technologischen Fenster ziehen, auch wenn nicht alle Aspekte der Betriebsfestigkeit (z.B. Temperatureinfluss, Korrosion) im Rahmen dieser Diplomarbeit berücksichtigt werden können.

Bei der Auswahl der Bearbeitungstechnologien ist die Verifizierung produktiver Fertigungsparameter (minimale Hauptzeit, maximales Zeitspannungsvolumen),

welche die Umsetzung von Leichtbaustrategien nicht in Frage stellen (keine Verringerung der Lebensdauer), vorrangig.

Mit den Ergebnissen sollen Ansätze zur Auswahl von optimalen Bearbeitungsparametern bei erhöhter Produktivität erarbeitet werden.

Hierbei sollen auch theoretische Ansätze zur Behandlung der Oberflächenrauigkeit entwickelt und zur Schwingfestigkeit in Beziehung gebracht werden. Weiterhin sollen eventuelle Unterschiede zu gültigen Richtlinien und die sich daraus ergebenden Perspektiven, einerseits aus der Sicht des Leichtbaus und andererseits aus der Sicht einer produktiven Fertigung aufgezeigt werden.

2 Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Einflusses produktiver Fertigungsparameter (minimale Hauptzeit, maximales Zeitspannungsvolumen) auf die Betriebsfestigkeit, werden Rundproben aus der Aluminium-Knetlegierung AlSi1Mg T6 unter Variation der Bearbeitungstechnologie gefertigt.

Das Versuchsprogramm teilt sich in Basisversuche und Hauptversuche. Hierbei dienen die Basisversuche zur Ermittlung der in den Hauptversuchen anzuwendenden Fertigungsparameter, sowie zur Untersuchung des Oberflächeneinflusses in einem weiten Bereich der Fertigungsparameter und Rauigkeiten.

In den Basisversuchen werden die Fertigungsparameter in 3 Versuchsblöcken variiert:

- 10 Kombinationen von Schnittgeschwindigkeiten und Vorschüben
 - 5 Kombinationen von Schnittgeschwindigkeiten und Werkzeuggeometrien
 - 5 Kombinationen von Vorschüben und Werkzeuggeometrien
- Die gemittelten Zielrautiefen betragen $6,3\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$ und $50\mu\text{m}$.

Aus den Ergebnissen der Basisversuche wurde eine Versuchsreihe „Stand der Technik“ (konventionelle Bearbeitungstechnologie) und 2 Versuchsreihen „optimierte Fertigungsparameter“ (minimale Hauptzeit durch hohe Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe) für die Hauptversuche ausgewählt.

Für die Beurteilung der Beanspruchbarkeit wurden 4-Punkt-Biege Schwingfestigkeitsversuche unter Variation der folgenden Versuchsparameter durchgeführt:

- Ungekerbte ($K_{tb} \approx 1,0$) und gekerbte ($K_{tb} = 1,66$) Proben
- Wöhler- und Gassnerversuche
- Wechselnde ($R = -1$) und schwellende ($R = 0$) Belastung

Alle drei Versuchsreihen des Hauptprogramms werden mit der für Funktionsflächen relevanten gemittelte Rautiefe $R_z = 6,3\mu\text{m}$ gefertigt.

Für die erste optimierte Parameterkombination wurde zur Produktivitätssteigerung die Schnittgeschwindigkeit erhöht, für die zweite optimierte Variante wird die Schnittgeschwindigkeit und der Eckenradius erhöht, woraus sich bei gleicher gemittelter Rautiefe R_z ein größerer Vorschub f ergibt. Hieraus folgt, dass die zweite optimierte Parameterkombination zur minimalen Hauptzeit im Rahmen des Versuchsprogramms führt.

Zur Analyse der Versagensmechanismen werden folgende Untersuchungen an den Proben durchgeführt:

- röntgenografische Eigenspannungsmessungen der Oberfläche
- Längsschliffe zur Gefüge-, Oberflächen- und Bruchausgangsuntersuchung
- REM-Aufnahmen von bearbeiteten Oberflächen und dem Bruchausgangsbereichen
- Mikrohärtemessung auf Längsschliffen zur Untersuchung der Gefügebestandteile und einer möglichen Härteänderung im Bereich der Randschicht

Fazit

Für den Bereich der Feinbearbeitung mit einer gemittelten Zielrauigkeit von $R_z = 6,3\mu\text{m}$, der für hochbeanspruchte Bauteile technisch relevant ist, ergibt sich sowohl für einstufige Beanspruchung als auch für Beanspruchung mit variabler Amplitude keine Abminderung der Schwingfestigkeit für die im Versuchsprogramm realisierten produktiveren Bearbeitungstechnologien gegenüber dem Stand der Technik. Für die optimierten Fertigungsparameter ist im Gegenteil eine Steigerung der Schwingfestigkeit für beide optimierten Parametersätze um ca. 5% zu erkennen, die aber im Rahmen einer Schwingfestigkeitsuntersuchung nicht überbewertet werden dürfen.

Zur Steigerung der Produktivität werden ausschließlich die Fertigungsparameter Schnittgeschwindigkeit v_c und Eckenradius r_e in den Hauptversuchen wie folgt variiert:

"Stand der Technik":	$v_c = 300\text{m/min}$	$r_e = 0,4\text{mm}$
optimierte Parameter:	$v_c = 550\text{m/min}$	$r_e = 0,4$ und $0,8\text{mm}$

Der Vorschub f ergibt sich aus der gewünschten Zielrautiefe von $6,3\mu\text{m}$.

Als mögliche Gründe für die Steigerung der Schwingfestigkeit der optimierten Parameter werden zwei Ansätze deutlich:

Bei den Versuchsreihen mit produktiven Bearbeitungsparametern kommt es zu einer geringeren Anzahl von „Ausbrüchen“ in der Werkstückoberfläche. Diese entstehen durch das Herausbrechen von Einschlüssen im Material. Es ist zu vermuten, dass die Einschlüsse durch die veränderten Spanbildungsmechanismen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten abgeschert werden. Da diese Fehlstellen an der Oberfläche den Versagensausgangspunkt darstellen, ist ein wesentlicher Einfluss auf die Schwingfestigkeit denkbar.

An den Proben der optimierten Versuchsreihen wurden bei den röntgenografischen Untersuchungen Druckeigenspannungen von ca. 50MPa gemessen. Im Gegensatz hierzu wiesen die nach dem „Stand der Technik“

hergestellten Proben ebenso wie der überwiegende Teil der Parameterkombinationen Zugeigenspannungen in einer ähnlichen Größenordnung auf. Druckeigenspannungen haben einen positiven Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der Oberfläche und sind somit eine mögliche Erklärung für den festgestellten Schwingfestigkeitszuwachs.

Der Vergleich der Wöhlerlinien gedrehter Proben zu den Versuchsreihen mit polierten Proben bestätigt im wesentlichen die Abminderungsfaktoren für die Oberflächenrauigkeit, die in der FKM-Richtlinie [Häne99] vorgeschlagen werden. Es lässt sich jedoch nachweisen, dass der Einfluss der Oberfläche auf die Schwingfestigkeit mit steigender Formzahl der Bauteilkerbe sinkt.

Ansätze zur Korrelation von Fertigungsparametern, Eigenspannungen und resultierenden Festigkeitseigenschaften liefern keine eindeutigen Ergebnisse und können somit nur exemplarisch und nicht allgemeingültig beschrieben werden.

Temperatureinflüsse der Bearbeitungstechnologien mit erhöhten Schnittgeschwindigkeiten auf das Randschichtgefüge sind in den metallografischen Untersuchungen nicht nachzuweisen.

Als Gegenstand weiterführender Arbeiten wird die Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere, speziell in der Automobilindustrie häufig eingesetzte, Aluminiumwerkstoffe vorgeschlagen. Im Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsbereich wäre die Entstehung von Oberflächenverfestigungen und deren Einfluss auf die Betriebsfestigkeit nachzuweisen. Dies gilt ebenso für die Übertragung der Ergebnisse auf andere Fertigungsverfahren (z.B. Fräsen, Sägen, ...). Darüber hinaus wird die Untersuchung der Eigenspannungen mit höherer Auflösung vorgeschlagen. Hierbei sollte der Eigenspannungszustand der Oberfläche in Abhängigkeit von der Mikrokontur näher untersucht werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die optimierten Fertigungsparameter (Maximierung der Produktivität), die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung an einer warmausgehärteten Al-Knetlegierung für das spanende Fertigungsverfahren „Drehen“ untersucht wurden, nicht zu einer Abminderung der Bauteilfestigkeitseigenschaften führen. Wie in Abb. 1 ersichtlich übertreffen die Versuchsreihen mit optimierten Fertigungsparametern in der Schwingfestigkeit die dem "Stand der Technik" entsprechenden im gekerbten und ungekerbten Zustand geringfügig.

Somit kann empfohlen werden die optimierten Fertigungsparameter mit Schnittgeschwindigkeiten von 550m/min und Eckenradien bis zu 0,8mm auch für hochbeanspruchte Bauteile im Rahmen des untersuchten technologischen Fensters einzusetzen.

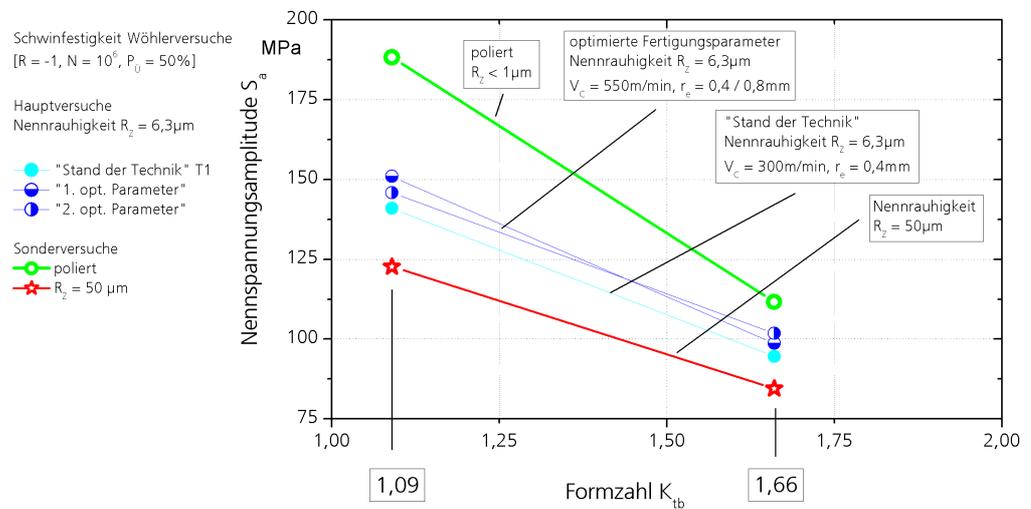


Abb. 1: Schwingfestigkeit in Abhängigkeit von der Bauteilkerbe

In weiterführenden Arbeiten ist eine Ausweitung der Untersuchungen auf zukünftige noch produktivere Bearbeitungstechnologien und andere Aluminiumlegierungen bzw. Leichtmetalle anzustreben, da sich zumindest für untersuchte Aluminium-Knetlegierungen ein positives Fazit ziehen lässt und die Möglichkeiten der Produktivitätssteigerung bei gleicher Festigkeit sich als noch nicht erschöpft darstellen.

3 Kenntnisstand

Der heutige Stand der Technik zur Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses auf die Schwingfestigkeit von Aluminium geht auf Untersuchungen von 1955 [Sieb56] zurück. Die von Siebel und Gaier [Sieb56] durchgeführten Untersuchungen sind die experimentellen Grundlage zum Rauigkeitseinfluss auf die Schwingfestigkeit bei Aluminium, weitere Quellen sind nicht bekannt. Daher bilden diese Untersuchungen [Sieb56] auch die Grundlage des rechnerischen Festigkeitsnachweises für Aluminium in seiner aktuellen Form [Häne99]. Nach dem Stand der Technik können daher keine experimentell hinterlegten Aussagen zu Schwingfestigkeitseinfluss für das spanende Fertigungsverfahren Drehen unter heutigen Bearbeitungsparametern getroffen werden.

In den FKM-Richtlinien [Häne98, Häne99] wird zur Berücksichtigung der Oberflächenstruktur bei Aluminium über einen Rauheitsfaktor $K_{R,\sigma}$ wie folgt gegeben:

$$K_{R,\sigma} = 1 - a_{R,\sigma} \cdot \lg(R_z / \mu\text{m}) \cdot \lg(2 \cdot R_m / R_{m,N,\min}) \leq 1. \quad (4 - 1)$$

Mit $R_{m,N,\min}(\text{Al}) = R_{m,N,\min}(\text{Stahl}) / 3$.

Werte für $R_{m,N,\min}$ und $a_{R,\sigma}$ werden mit Unterscheidung zwischen Knet- und Gusswerkstoffen angegeben. $a_{R,\sigma}$ wird für Knetlegierungen in der FKM-Richtlinie [Häne99] mit 0,22 angegeben. $R_{m,N,\min}$ ist die für die Werkstoffgruppe minimale Streckgrenze und wird für Al-Knetlegierungen mit 133MPa angegeben.

Aktuellere Untersuchungen an Stahlwerkstoffen zeigen allerdings auch, dass zur Beschreibung der Rauheit einer Bauteiloberfläche die Kenngrößen R_t , R_a oder R_z allein kein geeignetes Maß sind [Fess95, Günt01].

Die Bearbeitung der Oberfläche führt zu einer Veränderung des Oberflächenzustandes. Es können einerseits Verformungen auftreten, die zum Aufbau von Eigenspannungen und Oberflächenverfestigungen führen. Darüber hinaus können örtlich erhöhte Temperaturen insbesondere bei Aluminium zu Gefügeveränderungen an der Oberfläche führen und somit das Schwingfestigkeitsverhalten der oberflächennahen Bereiche beeinflussen. Der Randschichtzustand spanend gefertigter Bauteile ist ein ausschlaggebender Faktor für deren Ermüdungsfestigkeit. Moderne Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide haben insbesondere bei Anwendung produktivitätsoptimierter Zerspanungsparameter maßgeblichen Einfluss auf den

Zustand der Randschicht. Mit steigender Schnittgeschwindigkeit, steigendem Vorschub und steigendem Arbeitseingriff nimmt der Energieeintrag in die Bauteiloberfläche zu. Neben einer materialabhängig nachweisbaren Verfestigung infolge höherer Zerspankraftanteile normal zur Bauteiloberfläche haben wachsende Zerspanntemperaturen den größten Anteil am gestiegenen Energieeintrag. Dessen Auswirkungen auf die Bauteilfestigkeit sind abhängig vom Werkstückwerkstoff.

Während Forschungsarbeiten bei höherfesten Stählen für steigenden Energieeintrag einen eher positiven Lebensdauereinfluss zeigen [AiFFKM05], könnten vergleichbare Aussagen bei hochfesten Aluminiumknetlegierungen nicht zutreffen.

Dominant für die Spezifik der Aluminiumbearbeitung ist die thermische Belastung des Bauteils durch die Bearbeitungstechnologie. Für Aluminiumknetlegierungen sind Schädigungen des Bauteiles bereits bei niedrigen Temperaturen von 150°C denkbar. Es kommt dabei zum Einen zur Beeinflussung der Gefügestruktur, in Folge zur Versprödung mit dem Ergebnis der Erhöhung der Anrissempfindlichkeit. Zum Anderen führt die thermische Belastung des Bauteiles zur Entfestigung. Eine Korrelation dieser Erscheinungen zu technologischen Arbeitswerten, Werkzeuggeometrien, Schneidwerkstoffen, Bearbeitungsregimen u.a. ist bisher nicht nachgewiesen.

Es fehlen Erkenntnisse über die genauen Ursachen des Lebensdauerabfalls, seinen anteiligen Einfluss und über sein Zusammenwirken bei Aluminiumwerkstoffen und es ist nicht bekannt, ab welcher Schwelle sich unter Produktivitätsgesichtspunkten ausgewählte Zerspanungsparameter negativ auf die Bauteilfestigkeit auswirken. Ebenso ist nicht bekannt, inwieweit der Einfluss der spanenden Fertigung auf die Schwingfestigkeit von der Aluminiumlegierung abhängt.

Ein Grundproblem bei der Beurteilung des Schwingfestigkeitseinflusses von spanend gefertigten Oberflächen besteht in der Überlagerung von folgenden Effekten die bei jeder gespannten Oberfläche auftreten [Syre75]:

- Kerbwirkung durch Oberflächentopografie
- Entfestigung oder Verfestigung des Werkstoffes durch die spanende Bearbeitung (thermische Einflüsse, Umformung)
- Eigenspannungen

Eine separate Untersuchung der Teilaspekte ist nicht oder nur eingeschränkt möglich, da sich die Eigenschaften der Oberfläche durch das spanende Fertigungsverfahren ausbilden und somit miteinander gekoppelt sind.

Die Berücksichtigung der fertigungsbedingten Einflüsse auf das Schwingfestigkeitsverhalten erfolgt heute oft noch durch einen an der mittleren Rautiefe und der Zugfestigkeit orientierten Oberflächenbeiwert. Die Rautiefe allein stellt jedoch selbst für die Bewertung der Oberflächentopografie einen

ungenügenden Parameter dar, da sie lediglich eine Aussage über die Extrema trifft und somit die "Kerbschärfe" der Oberfläche nicht berücksichtigt.

Als neuer Ansatz wird mit einem bruchmechanischem Konzept von Liu [Liu01] die Oberflächenformzahl K_0 zur Beschreibung der Oberflächentopografie neben der Rauigkeit eingeführt. Grundlage dieses bruchmechanischen Konzeptes sind die Näherungsformeln 3 - 1(b) und 3 - 2 nach Neuber [Neub85] für den Spannungsintensitätsfaktor eines Risses im Kerbgrund einer Flachkerbe.

$$K_I = K_{IL} \cdot s \left\{ 1 + [(\alpha_0 - 1)^{-2.5} + (\frac{1}{s} - 1)^{-2.5}] \right\}^{-0.4} \quad (\text{Glg. 3 - 1})$$

$$s = \sqrt{\frac{t}{t+t_0}} \quad (\text{Glg. 3 - 1b})$$

$$K_{IL} = \sigma \sqrt{\pi(t+t_0)} \cdot Y_0 \quad (\text{Glg. 3 - 2})$$

K_{IL} stellt den Spannungsintensitätsfaktor eines Risses mit der Länge $t_0 + t$ dar und α_0 den Spannungskonzentrationsfaktor der Flachkerbe (siehe Abb. 2).

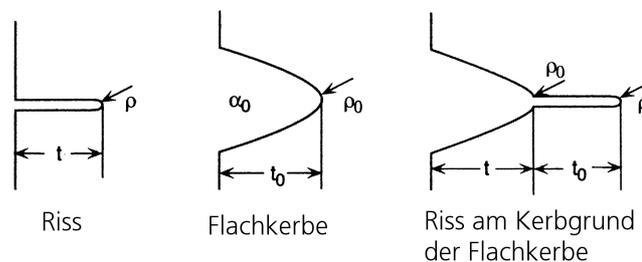


Abb. 2: Superposition Flachkerbe und Riss nach Neuber [Neub85]

Liu ordnet dem Modell nach Neuber die Kenngrößen der Oberfläche zu (siehe Abb. 3).

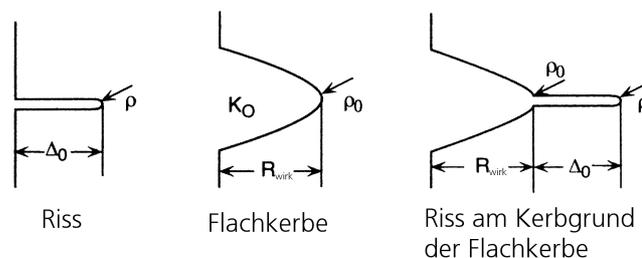


Abb. 3: Superposition Flachkerbe und Riss nach Liu [Liu01]

$$\Delta_o = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_o}{2\sigma_w Y_o} \right)^2 \quad (\text{Glg. 3 - 3})$$

$$F_o = \frac{\sigma_{aD}}{\sigma_w} = \frac{1}{1 + \left[(K_o - 1)^{-2,5} + \left(\sqrt{1 + \frac{R_{wirk}}{\Delta_o}} - 1 \right)^{-2,5} \right]^{-0,4}} \quad (\text{Glg. 3 - 4})$$

Gleichung 4 - 3 gibt Liu für die Beziehung zwischen dem Schwellwert ΔK_o des Spannungskonzentrationsfaktors und der charakteristischen Mikrostrukturlänge - Δ_o bei einer "glatten" Probe unter "dauerfester" Beanspruchung an. Somit lässt sich unter der Annahme das bei gerade "dauerfester" Beanspruchung der Schwellwert ΔK_o erreicht wird, mit den Neuber Gleichungen die Beziehung 4 - 4 nach Liu ableiten. Hierbei definiert Liu den Oberflächeneinfluss F_o als Verhältnis von "dauerfest" ertragbarer Spannungsamplitude im rauhen (σ_{aD}) wie polierten (σ_w) Oberflächenzustand.

Somit werden für die Abminderung der Schwingfestigkeit folgende Größen berücksichtigt:

- wirksame Rautiefe - R_{wirk}
- Oberflächenformzahl - K_o
- Mikrostrukturlänge - Δ_o

Die wirksame Rautiefe kann nicht unmittelbar aus der gemittelten Rautiefe R_z abgeleitet werden, da bei streuender Rauigkeit die Rautiefe am Versagensort unterschätzt wird.

Kleemann [AiFFKM05] gibt folgende Gleichung (3 - 5) zur Abschätzung von R_{wirk} mit Hilfe von R_z und R_{max} , der maximalen Rautiefe der vermessenen Strecke an:

$$R_{wirk} = \frac{R_z + R_{max}}{2} \quad (\text{Glg. 3 - 5})$$

Die Oberflächenformzahl K_o beschreibt die Spannungskonzentration durch die Mikrokerben der Oberflächentopografie. Aufgrund der geringen Kerbtiefen im Verhältnis zur Bauteilbreite können die Kerben mit sehr guter Näherung als Flachkerben angesehen werden. Für Zug/ Druck bzw. Biegung wird für Flachkerben die Gleichung 3 - 6 von Neuber [Neub85] angegeben (Parameter siehe Abb. 4).

$$K_{o,\sigma} = 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (\text{Glg. 3 - 6})$$

Zur Berücksichtigung von Mehrfachkerben wird nach [Liu01] Gleichung 3 - 6 zu Gleichung 3 - 7 erweitert (Parameter siehe Abb. 4).

$$K_{o,\sigma} = 1 + \left(2 - \frac{b}{B}\right) \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (\text{Glg. 3 - 7})$$

Als Mehrfachkerben werden aufeinanderfolgende Kerben bezeichnet die sich gegenseitig entlasten. Dies begründet sich durch die Beeinflussung des Spannungsfeldes durch eine Kerbe. Befindet sich im Einflussbereich eine weitere Kerbe wird die Spannungsüberhöhung durch die Kerbe abgemindert.

Von Liu wurden für Mehrfachkerben mit Hilfe der BEM (Boundary Element Method) Spannungsanalysen durchgeführt und für verschiedene Verhältnisse von Kerbbreite zu Kerbabstand berechnet, siehe Abb. 4.

Die Mikrostrukturlänge Δ_0 stellt die Mikrorisslänge dar, die unter "dauerfester" Beanspruchung noch nicht zu einem Risswachstum führt. Zu Grunde gelegt wird die Annahme, dass der Spannungskonzentrationsfaktor der Risspitze den Schwellwert (Begin des Rissfortschrittes) gerade nicht erreicht, Sie stellt daher einen materialabhängigen Parameter dar.

Parameterstudien von Liu sind in Abb. 5 bis Abb. 7 zusammengefasst.

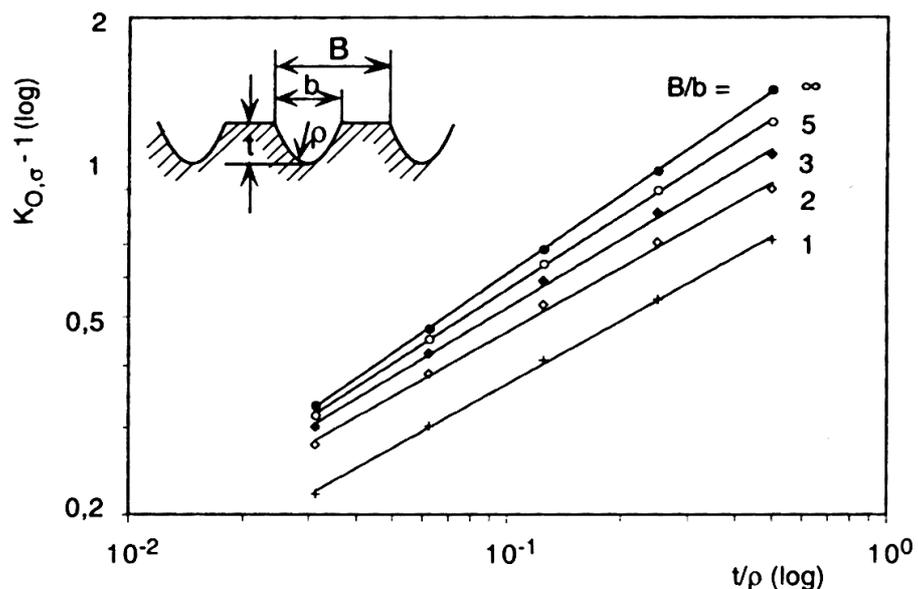


Abb. 4: Oberflächenformzahl unter Berücksichtigung von Mehrfachkerben [Liu01]

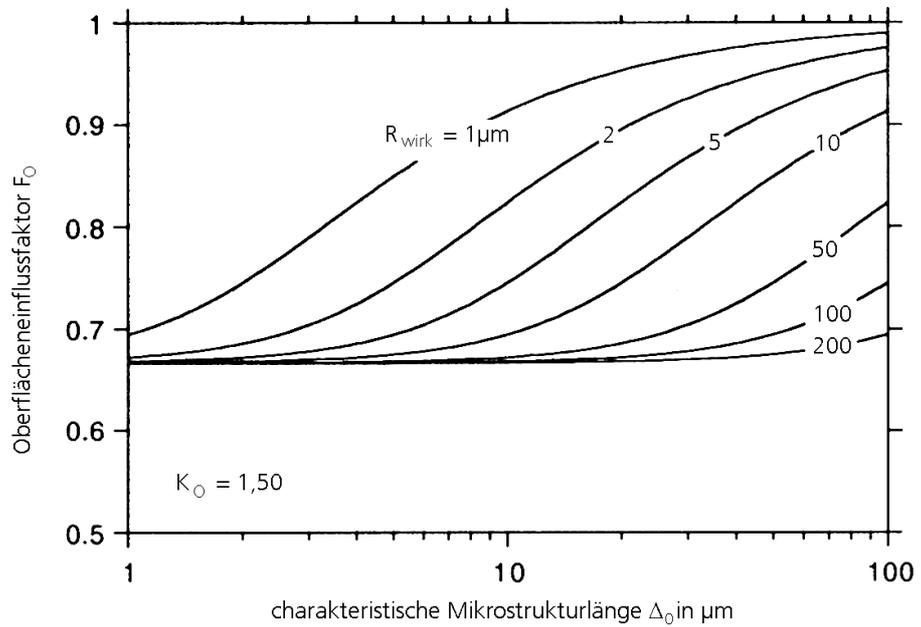


Abb. 5: Einfluss des materialabhängigen Parameters Mikrostrukturlänge [Liu01]

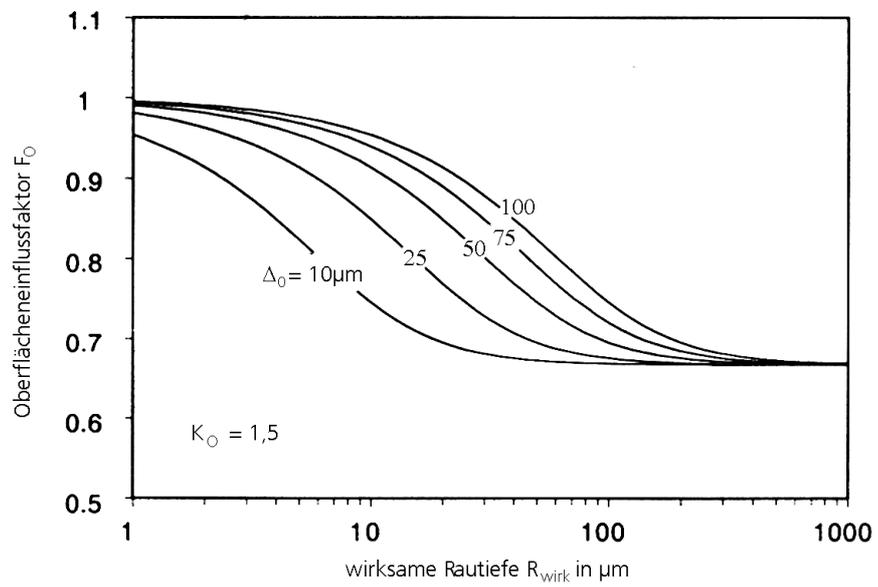


Abb. 6: Variation der Mikrostrukturlänge Δ_0 [Liu01]

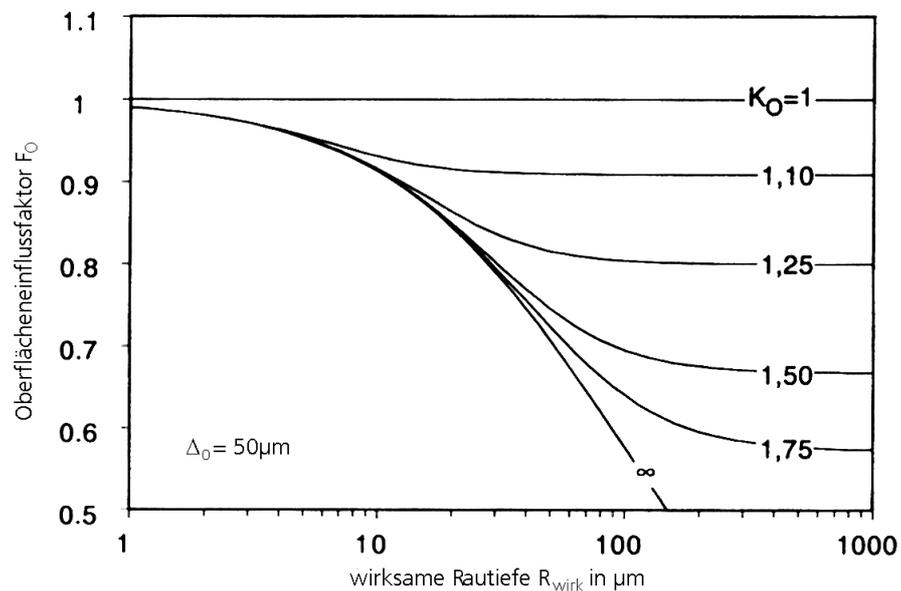


Abb. 7: Variation der Oberflächenformzahl K_0 [Liu01]

Liu liefert somit eine analytische Grundlage um die "Kerbschärfe" der Oberfläche über den Parameter Oberflächenformzahl K_0 zu berücksichtigen.

Jedoch ergeben sich aufgrund der geometrischen Grundüberlegungen des Berechnungsmodells nach Liu Grenzen der Anwendung. Insbesondere erfordert die Beurteilung des wesentlichen Einflusses der Fertigungsparameter auf die Entfestigung bzw. Verfestigung des Werkstoffes in der Randschicht weiterhin empirische Untersuchungen. Somit enthält die im eigentlichen Sinne geometrische Kenngröße Mikrostrukturlänge nicht nur eine Abhängigkeit vom Werkstoff sondern auch eine Abhängigkeit von den Fertigungsparametern.

Die Fortschritte in der Fertigungstechnik mit höheren Schnittgeschwindigkeiten und höheren Eckenradien der Schneidwerkzeuge, verbunden mit der Weiterentwicklung von Maschinen und Werkzeugen, größerer Verschleißbeständigkeit sowie Schneidhaltigkeit (Qualitätsstandzeiten) der Werkzeuge, können somit heute theoretisch nur begrenzt beschrieben werden.

Des weiteren ist der Mechanismus der Überlagerung der Effekte Oberflächenkerbwirkung, Eigenspannungen und die bereits angeführten Probleme des Temperatureinflusses (Entfestigung) bei der Bearbeitung von Aluminiumknetlegierungen nicht geklärt. Gleiches gilt für die Übertragbarkeit des Arbeitens im "normalen" Schnittgeschwindigkeitsbereich auf den Hochgeschwindigkeitsbereich (HSC) sowie für Schnittaufteilungsstrategien und deren Einfluss auf Oberfläche und Randzone der Bauteile.

4 Versuchsprogramm

4.1 Probenwerkstoff

Für die Untersuchungen wurde die aushärtbare Knetlegierung AlSi1Mg T6 (EN 6082 T6) ausgewählt. Hierbei handelt es um eine weit verbreitete Legierung für hochbelastete Aluminium-Bauteile. Der Zustand der Wärmebehandlung „T6“ steht für lösungsgeglüht und warm ausgehärtet bei 180°C über 6 Stunden.

Der Werkstoff wurde in Form von Strangpressprofilen bezogen und spanend bearbeitet.

Das Werkstoffzeugnis mit einer Übersicht der chemischen Zusammensetzung und den statischen Festigkeitswerten liegt im Anhang vor.

4.2 Probenform

Die Versuche wurden exemplarisch für das spanende Fertigungsverfahren „Drehen“ durchgeführt.

Für die Basisuntersuchungen werden ungekerbte Proben verwendet. In den Hauptuntersuchungen werden neben den ungekerbten Proben zusätzlich auch gekerbte Proben hergestellt. Damit wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom ungekerbten Zustand auf einen bauteiläquivalenten Zustand gewährleistet.

Die Formzahl der gekerbten Proben unter Biegebeanspruchung K_{tb} beträgt nach Neuber [Neub85] 1,66. Für den Übergang der „ungekerbten“ Proben zwischen Einspannung und Prüfquerschnitt ergibt sich nach Braune [Brau65] $K_{tb} = 1,09$ und wird als technisch ungekerbt gehandelt.

Die Probengeometrien sind aus Abb. 8 und Abb. 9 ersichtlich.

Der Probendurchmesser von 25mm am Prüfquerschnitt resultiert aus dem Anspruch, möglichst hohe Schnittgeschwindigkeiten zu untersuchen. Der obere Drehzahlbereich von am Markt verfügbaren Maschinen endet bei 7000min^{-1} .

Damit sind mit dem gewählten Durchmesser Schnittgeschwindigkeiten von 550m/min erreichbar. Ein größerer Durchmesser und damit höhere Schnittgeschwindigkeiten sind nicht umsetzbar, da die Spannmöglichkeiten von Drehmaschinen mit dem genannten Drehzahlbereich bis maximal 50 mm reichen. Die Probenform der ungekerbten Proben wurde in Anlehnung an das FKM-Forschungsvorhaben „Bauteiloberfläche und Schwingfestigkeit“ [AiFFKM05] für Eisenwerkstoffe übernommen, um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Die gekerbte Probenform wurde unter Beibehaltung des Nennquerschnittes mit Durchmesser 25mm aus der ungekerbten Form abgeleitet.

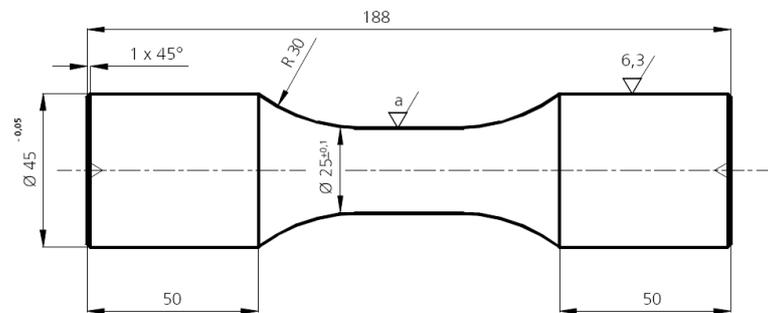


Abb. 8: Ungekerbte Probe ($K_{tb} = 1,09$)

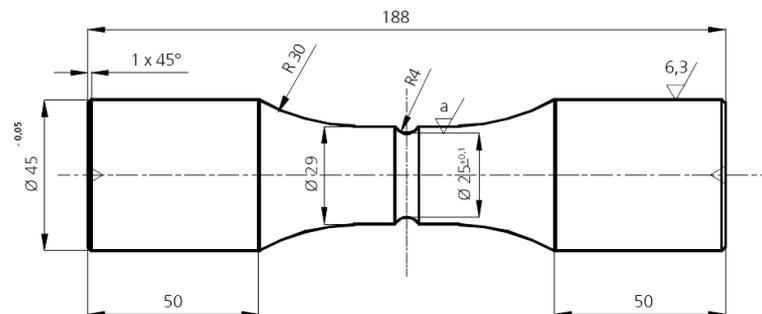


Abb. 9: Gekerbte Probe ($K_{tb} = 1,66$)

4.3 Versuchstechnik

4.3.1 Versuchsmaschinen

Die Proben werden auf zwei Drehmaschinen gefertigt.
Für den Schnittgeschwindigkeitsbereich bis 300m/min wird eine Drehmaschine vom Typ „DFS 2/2 CNC“ (Abb. 10) [DFS] eingesetzt. Die Bearbeitung mit höheren Schnittgeschwindigkeiten erfolgt mit einer Drehmaschine vom Typ „TWIN 42 Gildemeister“ (Abb. 11) [TWIN], die über einen Drehzahlbereich bis 7000min⁻¹ verfügt.

Die Drehzahl von 7000min⁻¹ stellt momentan die Obergrenze der am Markt verfügbaren Drehmaschinen mit einem Spanndurchmesser größer 40 mm dar. Zur Verifizierung eines etwaigen Maschineneinflusses wurde in das Versuchsprogramm eine Versuchsreihe mit identischen technologischen Arbeitswerten für beide Maschinen aufgenommen.

Technische Daten der Drehmaschinen:

DFS 2/2 CNC



Abb. 10

Anzahl Spindeln	1
Anzahl Schlitten	2
Drehzahl	max. 5.000 min ⁻¹
Antriebsleistung	37 kW
Vorschub	0.1... 3.000 mm/min
Eilgang	x-Achse: 6.000 mm/min, z-Achse: 12.000 mm/min
Werkzeugträger	Scheibenrevolver oben: 12; unten: 8
Werkzeugspannung	VDI50
Steuerung	ELTROPLOT der Fa. Grundig

TWIN 42 Gildemeister

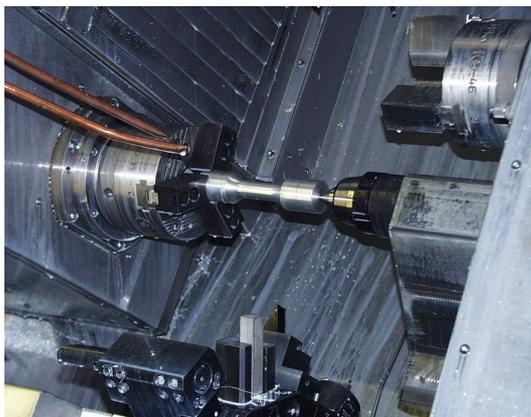


Abb. 11

Anzahl Spindeln	2
Drehzahlbereich	max. 7.000 min ⁻¹
Antriebsleistung Spindel 1, 2 (100% ED)	25, 25 kW
Querhub Spindel 2	175 mm
Spannfutterdurchmesser	160 mm
Schlittenweg (X1 / X2) plan	300 / 180 mm
Schlittenweg (Z1 / Z2) längs	650 / 650 mm
Angetriebene Werkzeugstationen	2x12
Stangendurchmesser max.	45 mm
Spindelabstand	900 mm
Steuerung	Siemens 840 D powerline; DMG ControlPanel

4.3.2 Versuchswerkzeuge

Die Probenfertigung wurde mit Werkzeugen der Firma Walter AG durchgeführt [Walt03]

Auf den Versuchsmaschinen kamen folgende Wendeschneidplattenhalter zum Einsatz:

DFS 2/2 SVVBN 2525 M11 B1

TWIN SVVBN 2020 M11 B1

Durch die Haltergeometrie ergeben sich folgende Werkzeugwinkel:

Werkzeug-Freiwinkel $\alpha = 5^\circ$

Werkzeug-Einstellwinkel $\kappa_r = 72,5^\circ$

Werkzeug-Einstellwinkel der Nebenschneide $\kappa_r' = 72,5^\circ$

Auf beiden Maschinen wurde mit den Wendeschneidplatten VCGT 11 03 XX PM2 WXN10 gespannt.

Durch die Wendeschneidplattengeometrie ergeben sich folgende

Werkzeugwinkel: Werkzeug-Orthogonal-Freiwinkel $\alpha_o = 7^\circ$

Werkzeug-Orthogonal-Spanwinkel $\chi_o = 25^\circ$

Werkzeug-Eckenwinkel $\epsilon_r = 35^\circ$

Die Bezeichnung PM2 steht für eine positive Wendeschneidplattengeometrie zur Zerspanung von Nichteisenmetallen. Bei WXN10 handelt es sich um ein mittels PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) beschichtetes Hartmetall mit einer TiCN-Schicht.

Die resultierende Werkzeuggeometrie aus Halter und Wendeschneidplatte stellt sich wie folgt dar:

Werkzeug-Orthogonal-Freiwinkel $\alpha_o = 12^\circ$

Werkzeug-Orthogonal-Spanwinkel $\chi_o = 20^\circ$

Werkzeug-Einstellwinkel $\kappa_r = 72,5^\circ$

Werkzeug-Eckenwinkel $\epsilon_r = 35^\circ$

Werkzeug-Einstellwinkel der Nebenschneide $\kappa_r' = 72,5^\circ$

4.4 Rauheitsmessung

Zur Charakterisierung des Oberflächenprofils wurde die gemittelte Rautiefe R_z nach DIN 4768 [D4768], wie aus Abb. 12 ersichtlich, ausgewählt.

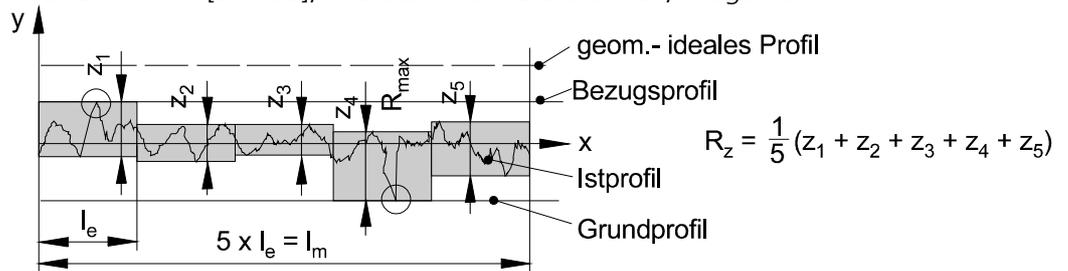


Abb. 12 Bestimmung der gemittelten Rautiefe R_z nach DIN 4768 [D4768]

Die Messung erfolgte mit einem Hommel Tester T 4000 mit Taster TK 300 sowie einer Tastlänge von 4,8 mm bei einer Tastgeschwindigkeit von 0,5mm/s. Die für die Messwerterfassung signifikanten technischen Daten sind im Abb. 13 dargestellt.

Taststrecke in mm	0,48; 1,5; 4,8; 15
Tastgeschwindigkeit in mm/s	0,15; 0,5; 1,0
Messart	Gleitkufe
Messbereich/Auflösung	80µm/0,01 µm
Cut off in mm	0,08; 0,25; 0,8; 2,5
Rauheitskenngrößen	R_a ; R_z ; R_{max} ; R_t ; ...
Profilkenngrößen	P_a ; P_z ; P_{max} ; ...



Abb. 13: Hommel Tester T4000, Hommelwerke GmbH, Schwenningen [Homm]

Die Messungen wurden 3-fach im Winkel von 120° auf dem Durchmesser verteilt durchgeführt.

4.5 Versuchsreihen

4.5.1 Polierte Proben

Das Polieren der Referenzproben sollte elektrochemisch erfolgen. Das Ziel dieser Präparationsmethode besteht darin, dass das Gefüge frei von

thermischen und mechanischen Einflüssen wird und eine quasi kerbfreie Oberfläche mit $R_z < 0,5\mu\text{m}$ entsteht.

Die Umsetzung dieses Zieles an den benannten Werkstoffen mit einem Polieraufmass von 0,25mm war jedoch mit der verfügbaren Technik nicht realisierbar. Die Proben wurden daher handpoliert. Da dazu kein gültiger Standard verfügbar ist, wurden die Proben nach einer hausinternen Vorschrift der TU Clausthal [Klee03] bearbeitet, die bereits in dem aufgeführten FKM-Projekt für Eisenwerkstoffe zur Anwendung kam [AiFFKM05].

Dies erfolgte nach dem nachfolgend dargestellten Regime in den Schritten: Polieren mit Schleifpapier (Hersteller VSM – Vereinigte Schmirgel- und Maschinenfabriken AG, Hannover [VSM03])

1. Schleifpapier 260-er Körnung
2. Schleifpapier 380-er Körnung
3. Schleifpapier 500-er Körnung
4. Schleifpapier 800-er Körnung
5. Schleifpapier 1000-er Körnung

- Schleifmittel Normalkorund in Kunstharzbindung

Polieren mit Polierpaste mit Diamantkörnung auf Filzstreifen (Hersteller Schleif- und Laepfmittel Erich Schmidt KG, Berlin [Schm03])

- | | |
|----------------------|--|
| 6. Polierpaste 750: | 10,0 μm Körnung (3-Durchgänge) |
| 7. Polierpaste 1000: | 4,0 – 5,0 μm Körnung (2-Durchgänge) |
| 8. Polierpaste 1500: | 2,0 – 4,0 μm Körnung (2-Durchgänge) |
| 9. Polierpaste 2000: | 0 - 1,0 μm Körnung (3-Durchgänge) |

Das Polieren erfolgt in Längsrichtung über die gesamte Prüflänge.

4.5.2 Basisversuche

Die Basisversuche dienen der Auswahl von Parameterkombinationen technologischer Arbeitswerte für die Hauptversuche, bei denen mit hoher Produktivität eine hohe Betriebsfestigkeit erreicht wird.

Dabei wurden folgende Fertigungsparameter variiert:

- Schnittgeschwindigkeit v_c
- Eckenradius r_e
- Vorschub f

Die Basisversuche wurden in 3 Gruppen eingeteilt:

- 10 Versuchsreihen A: - Konstanter Eckenradius $r_\epsilon = 0,4\text{mm}$
 - Kombinationen von Schnittgeschwindigkeit und Vorschüben
 - gemittelte Rautiefe $R_z = 6,3; 25; 50\mu\text{m}$ und poliert für die Kennwerte des Grundmaterials
 - Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 300$ und 550m/min
- 5 Versuchsreihen B: - gemittelte Rautiefe $R_z = 6,3$
 - Kombinationen von Schnittgeschwindigkeiten und Werkzeuggeometrien
 - Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 300$ und 550m/min
 - Eckenradius $r_\epsilon = 0,1; 0,2; 0,8\text{mm}$
- 5 Versuchsreihen C: - Schnittgeschwindigkeit $v_c = 300$ m/min
 - Kombinationen von Vorschüben und Werkzeuggeometrien

Da bei ausgelagerten Aluminium-Knetlegierungen davon auszugehen ist, dass der durch einen hohen Energieertrag hervorgerufene Temperatureinfluss Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit hat, da die Temperatur der Auslagerungshärtung bei vergleichsweise niedrigen 180°C liegt, wurde die Schnittgeschwindigkeit in 3 Stufen von 300 bis 550 m/min gesteigert. Des Weiteren wurde zur Nachweisführung des Einflusses der Werkzeuggeometrie eine Variation des Eckenradius r_ϵ von 0,1; 0,2; 0,4 und 0,8mm vorgenommen.

Bei Vorgabe einer gemittelten Zielrautiefe R_z von 6,3; 25; und $50\mu\text{m}$ ergeben sich die Vorschübe f . Die theoretischen Erwartungswerte für die erzeugte Rauheit wurde dabei nach der Näherungsformel von Bauer berechnet (Abb. 14), wobei die Gültigkeit nur im Bereich $f \geq 0,1\text{mm}$ und $R_z < 10\mu\text{m}$ nachgewiesen ist.

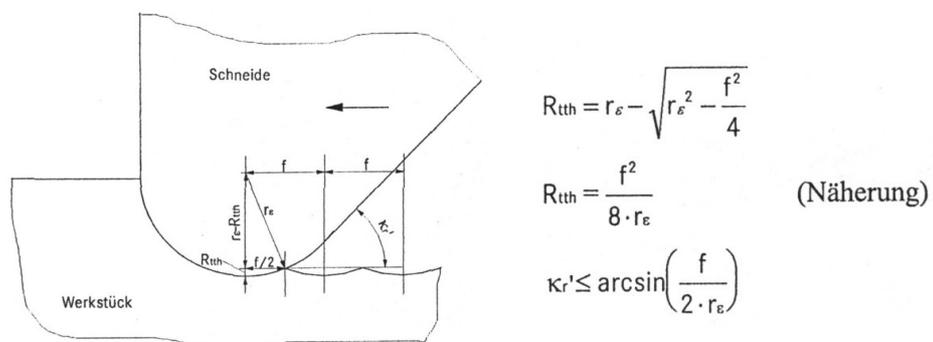


Abb. 14: Berechnung der theoretischen Rautiefe nach Bauer [Bau34]

Die so errechneten theoretischen Vorschübe f werden in den Versuchen so angepasst das die Zielrauigkeiten auch in der Praxis erreicht werden
 Die Schnitttiefe a_p wurde für den letzten Schnitt mit 0,25mm gewählt. Es kann davon ausgegangen werden, dass damit der Einfluss der Vorbearbeitung auf die Bauteiloberfläche eliminiert ist. Eine Variation der Schnitttiefe multipliziert den Versuchsaufwand und war im Rahmen dieses Diplomarbeit nicht realisierbar.

In Tab. 1 ist eine Gesamtübersicht der Basisversuche dargestellt.

Versuchsreihe	Bemerkung	Fertigungsparameter				Rauheit	
		v_c	r_e	f	Dreh- maschine	theoretisch R_z	real R_z
		m/min	mm	mm		μm	μm
Basisversuche, ungekerbt							
A-1	poliert	235*	0,8*	0,1*	DFS	< 1	0,5
A-2		298	0,4	0,11	DFS	6,2	6,9
A-3		298	0,4	0,27	DFS	24,5	24,8
A-4		298	0,4	0,378	DFS	50,0	49,9
A-5		298	0,4	0,27	TWIN	25,3	24,5
A-6		550	0,4	0,11	TWIN	6,2	4,5
A-7		550	0,4	0,27	TWIN	25,3	24,7
A-8		550	0,4	0,38	TWIN	50,0	47,8
A-9		471	0,4	0,11	TWIN	6,2	4,5
A-10		471	0,4	0,27	TWIN	24,5	24,4
B-1		298	0,2	0,06	DFS	6,4	5,6
B-2		298	0,8	0,174	DFS	6,3	7,2
B-3		550	0,1	0,07	TWIN	6,2	6,5
B-4		550	0,2	0,10	TWIN	6,3	8,3
B-5		550	0,8	0,14	TWIN	6,3	3,8
C-1		298	0,1	0,045	DFS	6,3	6,6
C-2		298	0,1	0,13	DFS	24,5	26,4
C-3		298	0,2	0,19	DFS	25,0	24,6
C-4		298	0,8	0,173	DFS	6,3	5,3
C-5		298	0,8	0,393	DFS	25,0	24,3

* Angabe der Fertigungsparameter nur zur Vollständigkeit

Tab. 1: Übersicht Basisversuche

4.5.3 Sonderversuche

Zusätzlich zu den Hauptversuchen mit gekerbten Proben sind zwei Sonderversuchsreihen mit gekerbten Proben nötig. Mit einen Versuchsumfang von jeweils 10 Proben werden polierte Proben (RP) und Proben mit einer gemittelten Rautiefe von $R_z = 50\mu\text{m}$ (RR) untersucht (siehe Tab. 2), da die gekerbten Proben der Hauptversuche alle eine gemittelte Zielrautiefe $R_z = 6,3\mu\text{m}$ aufweisen und somit ohne die Sonderversuche nur Festigkeitswerte für diesen Rauigkeitsbereich vorliegen würden.

Mit diesen extremen Rauigkeitswerten lassen sich die Hauptversuche mit gekerbten Proben in Bezug auf die Verminderung der Schwingfestigkeit in Abhängigkeit von der Rauigkeit einordnen.

	Fertigungsparameter			Dreh- maschine	Rauheit	real
	v_c	r_ϵ	f		R_z	R_z
polierte und rauhe ($R_z = 50\mu\text{m}$) Proben, gekerbt	m/min	mm	mm		μm	μm
RP poliert	235*	0,8*	-0,1*	DFS	< 1	0,9 **
RR	298,45	0,4	0,378	DFS	50	47,3 **

* Angabe der Fertigungsparameter nur zur Vollständigkeit

** Rauigkeitsmessung im Kerbgrund nur eingeschränkt möglich

Tab. 2: Sonderversuche

Zu bemerken ist, dass bei der vorgestellten Fertigung eine Rauheitsdifferenz aufgrund der unterschiedlichen Anstellung des Werkzeuges bei der Bearbeitung der achsparallelen Zylinderkontur und des Radienübergangs von $R = 29\text{mm}$ auftritt.

Dargestellt ist dieser Sachverhalt in Abb. 15 und Abb. 16.

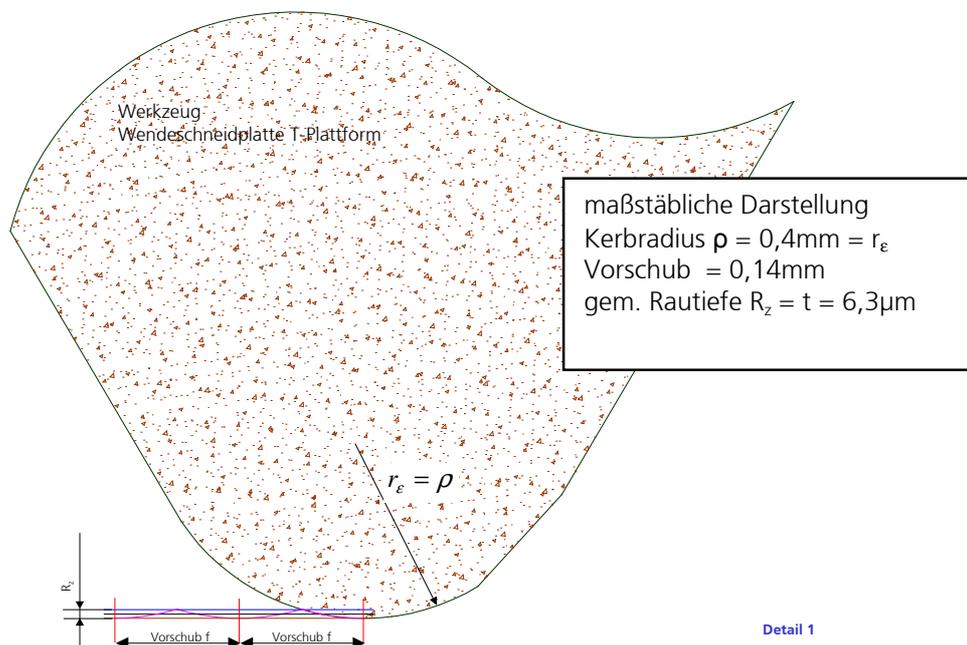


Abb. 15: Werkzeugeingriff an der Zylinderkontur $R_{z\text{IST}} = R_{z\text{SOLL}}$

Die Doppelbezeichnungen von Kerbradius und gemittelter Rautiefe ergeben sich aus der Verwendung der Parameter in den Berechnungsvorschriften nach Liu und in der DIN 4768 [D4768] bzw. DIN 6581 [D4768].

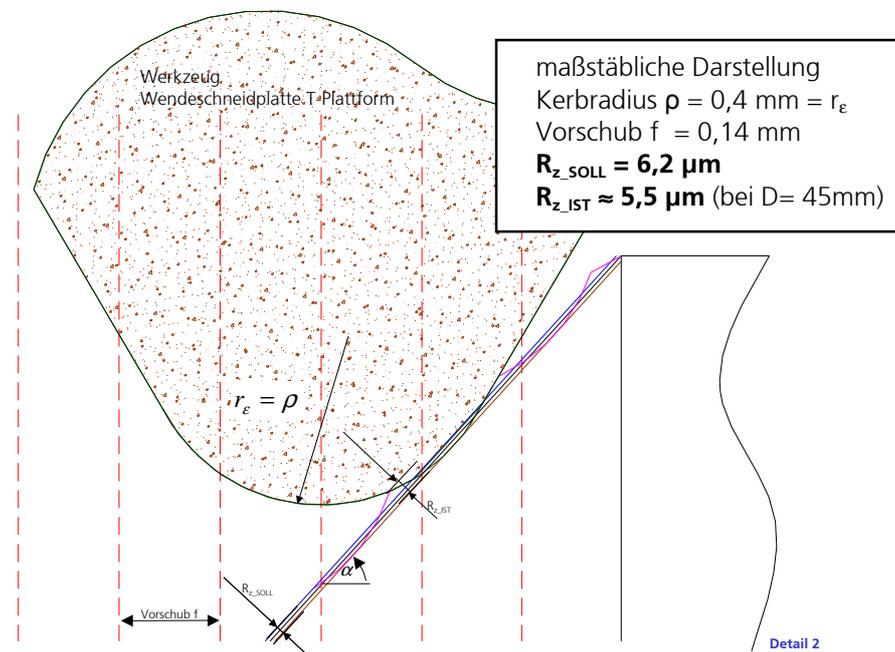


Abb. 16: Werkzeugeingriff an der Kontur $R = 30\text{mm}$ $R_{z_IST} < R_{z_SOLL}$

Bei der Probenfertigung hat sich gezeigt, dass die theoretisch ermittelte Rauheit von $R_z = 6,3\mu\text{m}$ durch den Eingriff der Nebenschneide (Schleppschnideneffekt) reduziert wird. Da dieser Sachverhalt nicht am Prüfquerschnitt auftritt, besteht keine Relevanz für die Prüfergebnisse.

4.5.4 Hauptversuche

Für die Hauptversuche wurde eine gemittelte Ziel-Rauheit von $R_z = 6,3\mu\text{m}$ zu Grunde gelegt, da davon auszugehen ist, dass diese Rauheit für hochbelastete Bauteile mit Funktionsflächen die höchste Praxisrelevanz besitzt.

Mit den optimierten Bearbeitungstechnologien wird eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 550 \text{ m/min}$ und damit eine niedrigere Hauptzeit t_H im Vergleich zum „Stand der Technik“ realisiert.

Mit der Erhöhung des Eckenradius r_e von $0,4$ auf $0,8\text{mm}$ ist bei Einhaltung der geforderten Zielrauheit eine weitere Produktivitätserhöhung durch die mögliche Vorschubsteigerung gegeben (siehe Abb. 14: Berechnungsansatz nach Bauer, geometrische Betrachtung).

Der Einfluss der zu erwartenden Erhöhung der Passivkraft auf das Schwingfestigkeitsverhalten kann über diese Versuchsführung nachgewiesen werden.

In den Hauptversuchen wurde somit ein Versuchsprogramm mit drei Parameter-Kombinationen jeweils für ungekerbte und gekerbte Proben, umgesetzt.

	Fertigungsparameter				Rauheit	
	v_c	r_e	f	maschine	theoretisch R_z	real R_z
ungekerbt	m/min	mm	mm		μm	μm
"Stand der Technik" T1	300	0,4	0,11	DFS	6,3	7,4
1. opt. Parameter T2	550	0,4	0,11	TWIN	6,3	4,4
2. opt. Parameter T3	550	0,8	0,14	TWIN	6,3	3,8
gekerbt						
"Stand der Technik" T1	300	0,4	0,11	DFS	6,3	8,0 **
1. opt. Parameter T2	550	0,4	0,11	TWIN	6,3	6,8 **
2. opt. Parameter T3	550	0,8	0,14	TWIN	6,3	6,3 **

** Rauheitsmessung im Kerbgrund nur eingeschränkt möglich

Tab. 3: Hauptversuche

4.6 Eigenspannungsmessung

An den Proben der Basisversuche werden mit Hilfe röntgenografischer Methoden die Eigenspannungen in der Oberflächenrandschicht ermittelt. Verwendet wird eine unbelastete Probe pro Versuchsreihe. Die Messung erfolgt an der Oberfläche im Bereich des theoretisch höchstbeanspruchten Querschnittes.

Gemessen wird mit einem „SEIFERT-FPM XRD 3003PTS-Diffraktometer“ mit FOX-Zusatz (Fiber Optics for X-Ray). Der Durchmesser des auf die Probe gerichteten Röntgenstrahls beträgt ca. 1mm bei einer Eindringtiefe von ca. 11,6 μm (Absorptionslänge 24,7 μm). Da bei dem ausgeführten Fertigungsverfahren „Drehen“ ein mit dem Vorschub periodischer Oberflächenzustand entsteht und ein maximaler Vorschub f vom 0,4mm auftrat, stellt die Eigenspannungsmessung eine Mittelung über diesen periodischen Oberflächenzustand dar. Hierdurch lassen sich die teilweise hohen Fehlerwerte erklären.

Gemessen wird in drei Richtungen (0°, 45° und 90° zur Proben-Achse), wie in Abb. 17 dargestellt.

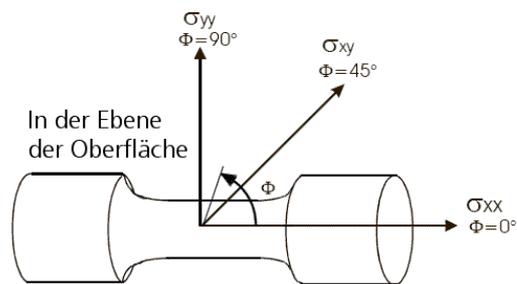


Abb. 17: Übersicht Eigenspannungsmessung

Für die Messung der Eigenspannungen und für die Errechnung der Schubspannungen wird ein E-Modul von 69GPa und eine Querkontraktionszahl ν von 0,35 angenommen.

Die Übersicht der Ergebnisse aller Messungen befindet sich im Anhang.

4.7 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

4.7.1 Prüfstände

Durchgeführt werden 4-Punkt Biege-Versuche, die reine Biegung ohne Querkraft ermöglichen. Es wird diese Belastungsart gewählt, da sie auch bei ungekerbten Proben einen Spannungsgradienten hervorruft und einen großen Bereich konstant beansprucht.

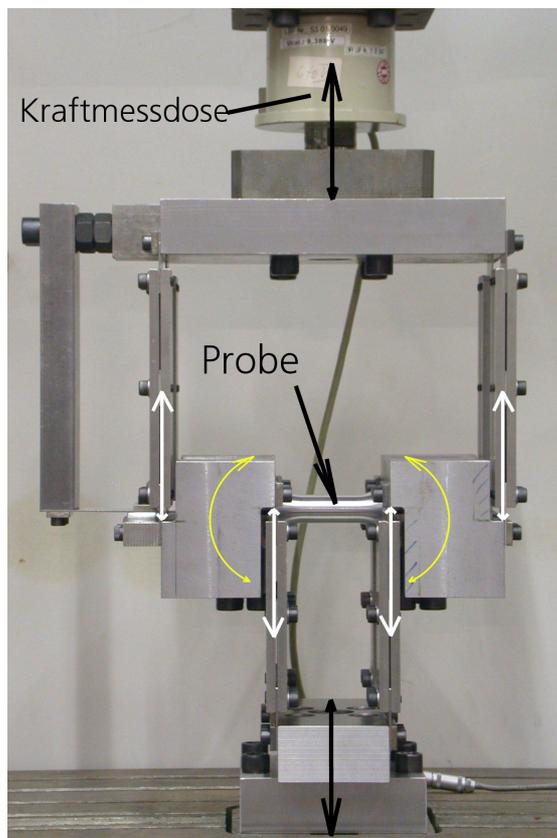


Abb. 18: 4-Punkt Biegung im Resonanzpulsler

Alle Einstufenversuche werden mit diesem Resonanzpulsler durchgeführt, hierbei wird eine Belastungsfrequenz von ca. 25Hz erreicht .

Zur Berücksichtigung variabler Belastungsamplituden werden für die Hauptversuchsreihen Betriebslastenversuche mit gaußverteilten Lastfolgen (Gassnerversuche) durchgeführt. Die Gassnerversuche werden mit einem servohydraulischen Prüfstand ausgeführt, die Frequenzbereiche liegen hier, je nach Belastungshöhe, zwischen 4 und 30 Hz.

Maschinendaten:

Resonanzpulsler Servohydraulischer Prüfstand	Bauart „Schenck“ 63kN Bauart „Schenck“ 63kN
Regelungsart	Kraftregelung
Sollwertvorgabe Gassnerversuche	MASLink mit adaptiver Amplitudenregelung

4.7.2 DMS Kontrollmessungen

Die auftretende Beanspruchung, in Abhängigkeit von der auf die Prüfeinrichtung wirkenden Kraft, wird mit jeweils einer mit DMS (Dehnungsmessstreifen) applizierten gekerbten und ungekerbten Probe überprüft. Hierbei werden für die ungekerbte Probe entlang der höchstbeanspruchten Bereiche DMS-Ketten verwendet, da die höchstbeanspruchte Stelle nicht bekannt ist. Für die gekerbte Probe wird neben der Dehnung in axialer Richtung auch die Querdehnung an der höchstbeanspruchten Stelle gemessen, da eine erhebliche Behinderung der Querkontraktion zu erwarten ist.



Abb. 19: DMS Probe gekerbt

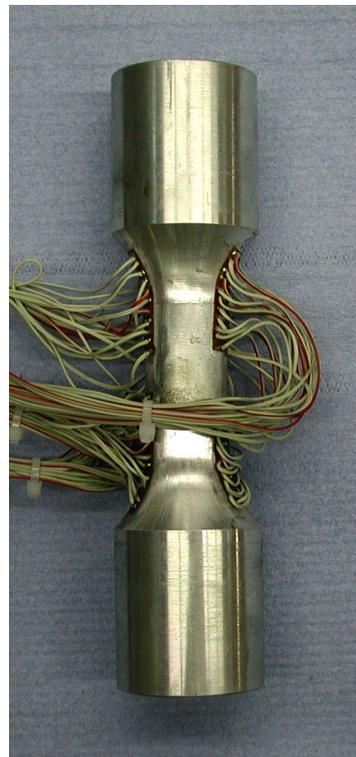


Abb. 20: DMS Probe ungekerbt

Untersucht wurden die Zustände "Eingespannt ohne Belastung" und "Eingespannt mit Belastung" (1,52kN). Ziel war den Einfluss der Einspannkräfte abzuschätzen.

Hierbei ließ sich für die gekerbten Proben kein Nachweis eines Einflusses der Einspannkräfte nachweisen ($<10\mu\text{m}$) und für die ungekerbten Proben ergeben sich negative Dehnungen im für das Versagen der Probe kritischen Bereich von ca. 50-150 μm . Mit der Annahme des E-Modules von 72GPa nach [Wern99] ergeben sich Spannungen von 3-11MPa, im Vergleich zu den Spannungsamplituden (min. 125MPa) der ungekerbten Proben in den Wöhlerversuchen stellen diese somit eine vernachlässigbare Größe dar. Um den Nachweis zu erbringen, dass kein relevanter Einfluss der Einspannung besteht, werden in Diagramm D 8.1 und 8.2 die Dehnungen unter Lasteinleitung von 1,52kN bzw. 76,2Nm der ungekerbten DMS Probe mit dem Histogramm der Versagensorte verglichen.

Bei den dargestellten Dehnungen handelt es sich um die Dehnungsanteile, die nur durch die Belastung hervorgerufen werden. Dehnung 0 entspricht dem Eingespannten lastfreien Zustand. Es zeigt sich, dass im Bereich der höchsten Beanspruchungen auch die höchste Häufigkeit des Versagens auftritt.

4.7.3 Verifikation der Formzahl

Anhand der Dehnungsmessungen lässt sich die über eine analytische Näherung bestimmte Formzahl der Probe prüfen.

Unter der Annahme, dass die Querdehnungsbehinderung für die ungekerbte Probe zu vernachlässigen ist und somit das Verhältnis der Dehnungswerte der Spannungsbezogenen Formzahl entspricht, ergibt sich eine Formzahl von $K_{\text{tb}} = 1,08$, die der theoretischen Lösung von $K_{\text{tb}} = 1,09$ gut entspricht.

Für die gekerbte Probe ergibt sich unter Verwendung der gemessenen Querdehnung ein $K_{\text{tb}} = 1,87$ und unter der Annahme unbehinderter Querdehnung ein $K_{\text{tb}} = 1,65$. Der theoretische Wert liegt mit $K_{\text{tb}} = 1,66$ deutlich näher der unkorrigierten Lösung. Da jedoch die Messung der Querdehnung nicht direkt an der höchstbelasteten Stelle möglich ist (DMS für Querdehnung klebt neben DMS für Längsdehnung siehe Abb. 19), wird die Querdehnung unterschätzt, woraus sich eine höher Formzahl ergibt.

4.7.4 Anrisserfassung am servohydraulischen Prüfstand

Als zusätzliche Aufgabe wird für die Gassnerversuche der Anriss der Probe über den Abfall der Probensteifigkeit ermittelt.

Der Vorteil dieser Methode besteht in der Wirtschaftlichkeit, da der Versuch automatisiert abläuft und keine Unterbrechung des Versuches für Zwischenuntersuchungen nötig ist.

Für die Messung der Probensteifigkeit wird in der Belastungseinrichtung im servohydraulischen Prüfstandes (Abb. 21) die Kippung der Einspannungen über eine hochauflösende Laser-Weg-Messung ermittelt. Die Kippung/ Verdrehung der Einspannungen unter konstanter Lasteinleitung wird als Maß für die Steifigkeit der Probe angesetzt. Bezogen auf die Kippung der Einspannungen zu Beginn der Versuche, wird vom Messwerterfassungssystem der Steifigkeitsabfall dimensionslos aufgetragen



Abb. 21: Messung Probensteifigkeit bei Gassnerversuchen

Durch diese Messanordnung wird eine Nachweisgrenze für einen einzelnen Anriss von >2mm Tiefe, wie in Abb. 22 markiert, erreicht.

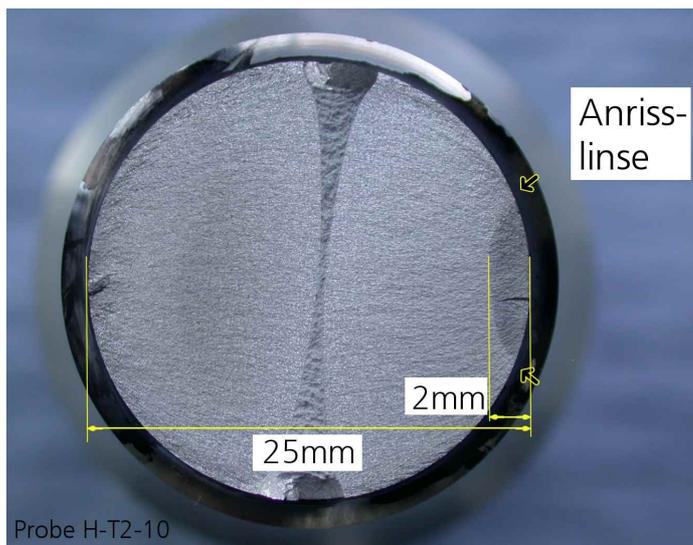


Abb. 22: Nachweisgrenze einzelner Anriss

Somit lassen sich auf Basis dieses Kriteriums Anrissgassnerlinien ermitteln.

5 Auswertung

5.1 Wöhlerversuche

Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen teilen sich in die Abschnitte Basis-, Sonder- und Hauptversuche.

Die Basisversuche dienen der Auswahl der optimierten Fertigungsparameter, welche in den Hauptversuchen den dem „Stand der Technik“ entsprechenden Fertigungsparametern gegenübergestellt werden. Die Sonderversuche enthalten zusätzliche Versuchsreihen mit gekerbten Proben, um eine Aussage zum Einfluss der geometrischen Kerbe auf den Rauigkeitseinfluss treffen zu können.

5.1.1 Basisversuche

In den Basisversuchen werden Ermüdungsversuche mit einer sinusförmigen Einstufen-Belastung mit dem Spannungsverhältnis von $R = -1$ durchgeführt. Von den für jede Versuchsreihe gefertigten 5 Proben werden jeweils 4 für die Ermüdungsversuche verwendet. Außer den in Kap.4.6 beschriebenen Eigenspannungsmessungen werden mit diesen Proben Versuche im Bereich der Zeitfestigkeit von 10^5 bis 10^6 Schwingspielen durchgeführt, um so mit wenigen Versuchen eine Aussage zu Trends im Festigkeitsverhalten der unterschiedlichen Varianten zu erhalten.

Eine Übersicht der Einzelergebnisse der Basisversuche ist im Anhang, Blatt D 1.1, zusammengefasst.

Aus den Ergebnissen im Bereich der Zeitfestigkeit werden die Wöhlerlinien mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 50\%$ ermittelt und mit folgender Formel beschrieben:

$$S_a = S_{aSt} \cdot \left(\frac{N}{N_{St}} \right)^{-\left(\frac{1}{k}\right)} \quad (5.1.1 - 1)$$

Hierbei entspricht S_{aSt} und N_{St} den Koordinaten des Stützpunktes der Wöhlerlinie und k dem Neigungsexponenten. S_{aSt} und k werden mittels des minimalen Fehlerquadrates der logarithmierten Schwingspiele zur Wöhlerlinie bestimmt.

In der Zusammenfassung, Tab. 4, zeigt sich, dass die Wöhlerlinien stark unterschiedliche Neigungen ($4,1 < k < 9,6$) aufweisen. Eine normierte Auswertung (Wöhlerlinien mit gleichen Neigungen), wie sie sich bei dem vorliegenden Versuchsumfang pro Wöhlerlinie anbieten würde, ist daher nicht sinnvoll. Eine Interpretation der Ergebnisse erfolgt ab Kapitel 5.5.

Versuchsreihe	Nennrauigkeit R_z in μm	Parameter der Wöhlerlinie	
		S_{ast} in MPa	k
$N_{ST} = 10^6$ Schwingspiele, $P_U = 50\%$			
A-1	< 1	188	7,1
A-2	6,3	145	5,3
A-3	25,0	128	4,4
A-4	50,0	123	5,2
A-5	25,0	126	5,5
A-6	6,3	150	5,7
A-7	25,0	128	4,7
A-8	50,0	120	4,3
A-9	6,3	139	4,5
A-10	25,0	124	4,2
B-1	6,3	150	5,3
B-2	6,3	141	5,2
B-3	6,3	146	5,9
B-4	6,3	141	4,6
B-5	6,3	132	3,7
C-1	6,3	170	9,6
C-2	25,0	131	4,1
C-3	25,0	145	6,3
C-4	6,3	150	6,8
C-5	25,0	133	6,0

Tab. 4: Wöhlerlinien Basisversuche, $R = -1$, jeweils 4 Proben

5.1.2 Hauptversuche

Ermittelt werden Wöhlerlinien mit einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ und $R = 0$ (wechselnd und schwellend) an den gekerbten und ungekerbten Proben der Versuchsreihen „Stand der Technik“, „1. optimierte (opt.) Parameter“ und „2. opt. Parameter“. Der Versuchsumfang liegt für jede der 6 Wöhlerlinien bei ca. 10 Proben. Durch den erhöhten Versuchsumfang ist es möglich, nicht nur die Wöhlerlinien zu bestimmen, sondern auch Aussagen über das „Abknicken“ der Wöhlerlinien bzw. das Ende des Zeitfestigkeitsbereiches zu treffen.

Es zeigt sich ein Abknickpunkt für $R = -1$ bei 10^6 Schwingspielen und für $R = 0$ bei 3 bis $5 \cdot 10^5$ Schwingspielen. Zur Vereinheitlichung wird ein Abknickpunkt der $R = 0$ Wöhlerlinien bei $3 \cdot 10^5$ Schwingspielen definiert. Der Abfall der Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt der Wöhlerlinien wird nach Sonsino [Sons05] mit 10% pro Dekade angenommen.

Wie auch in den Basisversuchen werden die Wöhlerlinien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 50\%$ gebildet, da so der Vergleich der Fertigungsverfahren ohne direkten Einfluss der Streuung möglich ist.

In Tab. 5 sind die Parameter der Wöhlerlinien nach Gleichung 5.1.1 - 1 zusammengefasst.

Probenform	Versuchsreihe	Parameter der Wöhlerlinien			
		R = -1		R = 0	
		N _{ST} = 10 ⁶ Schwingspiele		N _{ST} = 10 ⁶ Schwingspiele	
		P _Ü = 50%		P _Ü = 50%	
		S _{aSt} in MPa	k	S _{aSt} in MPa	k
ungekerbt	"Stand der Technik"	141	5,5	96	3,7
	1. opt. Parameter	151	6,6	109	4,6
	2. opt. Parameter	146	5,5	107	4,0
gekerbt	"Stand der Technik"	95	5,2	71	4,6
	1. opt. Parameter	99	4,8	77	4,9
	2. opt. Parameter	102	5,4	78	5,0

Tab. 5: Wöhlerlinien Hauptversuche, jeweils ca. 10 Proben

Die Darstellung der Wöhlerlinien erfolgt zusammen mit den Einzelergebnissen in Diagramm D 4.1-3 und D 5.1-3 und wird in Diagramm D 1.2 zusammengefasst. Die in Tab. 5 angegebenen Wöhlerlinien R = 0 werden ebenfalls mit einem Stützpunkt N_{St} = 10⁶ angegeben. Dieser „Stützpunkt“ existiert jedoch bei den R = 0 Versuchen nur virtuell, denn der Zeitfestigkeitsbereich endet bei den R = 0 Versuchen deutlich früher. Jedoch wird, um die Vergleichbarkeit zu den R = 1 Versuchen zu erhalten, dieser virtuelle Stützpunkt gewählt.

Eine Berechnung der Mittelspannungsempfindlichkeit M ist aufgrund des virtuellen Stützpunktes über die bei 10⁶ Schwingspielen ermittelten Werte somit nicht zulässig. Zur Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit wird daher der Zeitfestigkeitsbereich von 1 bis 3·10⁵ Schwingspielen benutzt, siehe Tab. 6. Die Mittelspannungsempfindlichkeit definiert sich über Gleichung:

$$M = \frac{\sigma_a(R = -1)}{\sigma_a(R = 0)} - 1 \quad (5.1.2 - 1)$$

Es ergeben sich somit folgende Mittelspannungsempfindlichkeiten M für den Bereich $R = -1$ bis $R = 0$:

Mittelspannungsempfindlichkeit M		Schwingspiele		
		$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$
ungekerbt	"Stand der Technik"	0,21	0,28	0,33
	1. opt. Parameter	0,18	0,24	0,27
	2. opt. Parameter	0,17	0,23	0,26
gekerbt	"Stand der Technik"	0,26	0,28	0,29
	1. opt. Parameter	0,30	0,29	0,29
	2. opt. Parameter	0,27	0,28	0,29

Tab. 6: Mittelspannungsempfindlichkeit M

Die Mittelspannungsempfindlichkeiten M von 0,17 bis 0,3 ordnen sich gut in den in der Literatur angegebenen Streubereich für AlMgSi1 ein, siehe Abb. 23.

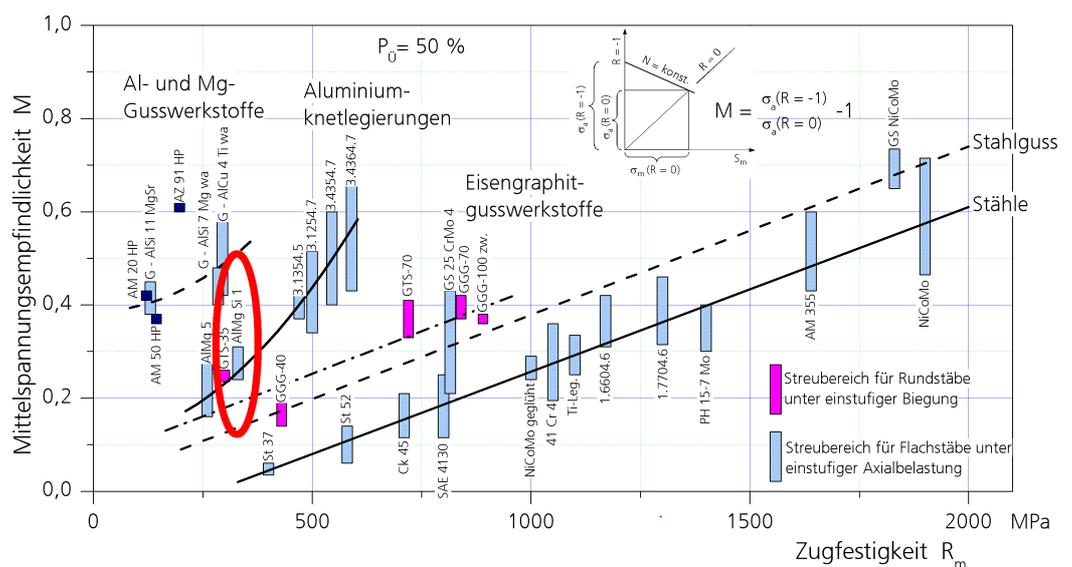


Abb. 23: Mittelspannungsempfindlichkeit metallischer Werkstoffe nach Sonsino

5.1.3 Sonderversuche

Um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit bei gekerbten Proben zu quantifizieren, werden zusätzlich zu den gekerbten Proben der Hauptversuche zwei Versuchsreihen mit Proben im polierten Zustand ($R_z < 1\mu\text{m}$) und mit besonders rauer Oberfläche ($R_z = 50\mu\text{m}$) durchgeführt. Der Umfang beträgt jeweils 10 Proben, das Spannungsverhältnis $R = -1$.

Versuchsreihe	Nennrauigkeit R_z in μm	Parameter der Wöhlerlinie	
		S_{aSt} in MPa	k
		$N_{ST} = 10^6$ Schwingspiele, $P_U = 50\%$	
poliert (PP)	< 1	112	6,9
rauh (RP)	50,0	84	4,5

Tab. 7: Wöhlerlinien Sonderversuche, $R = -1$, jeweils 10 Proben

Die ermittelten Wöhlerlinien sind in Diagramm D 2.1 zusammen mit den Ergebnissen der Versuche an gekerbten Proben der Hauptversuche dargestellt. Die Parameter der Wöhlerlinien sind in Tab. 7 zusammengefasst.

5.2 Streuung

In allen Versuchsreihen zeigte sich das Streuband deutlich kleiner als der in der Literatur [Sons05] für Aluminium-Knetlegierungen angegebenen Streuspanne der Beanspruchung T_s von 1 : 1,25.

Für das Beispiel der gekerbten Hauptversuche ist in Diagramm D 7.2 die Wöhlerlinie $R = -1$ für die Versuchsreihe "Stand der Technik" mit dem dazugehörigen Streuband dargestellt. Das Streuband richtet sich nach dem in der Literatur [Sons05] angegebenen Wert und entspricht bei der vorliegenden Wöhlerlinienneigung k von 5,16 einer Streuspanne der Schwingspielzahl T_N von 1 : 3,8. Neben der Wöhlerlinie sind die Versuchsergebnisse der gekerbten Hauptversuchsreihen dargestellt. Neben der erwähnten deutlich geringeren Streuung der Versuche gegenüber dem in der Literatur angegebenen Streuband wird ebenso deutlich, dass die optimierten Versuchsreihen sich mit 90% der Versuchsergebnisse im Bereich des Streubandes befinden jedoch deutlich oberhalb der Wöhlerlinie "Stand der Technik".

Somit sind die sich ergebenden Unterschiede zwischen den optimierten Versuchsreihen und dem "Stand der Technik" für die vorliegenden Versuchsergebnisse relevant, können jedoch für Anwendungsfälle mit höherer Streuung (Größeneinfluss, Größe höchstbelastetes Werkstoffvolumen) von untergeordneter Bedeutung sein. Die Aussage, dass die optimierten Versuchsreihen die Schwingfestigkeit der Versuchsreihe "Stand der Technik" erreichen, kann jedoch als gesichert angesehen werden.

Um einen anschaulichen Überblick über das Streuverhalten zu erhalten, sind in den Diagrammen D 6.1 - 4 die Versuchsergebnisse der Hauptversuchsreihen für die Wöhlerversuche im ungekerbten und gekerbten Zustand für die Spannungsverhältnisse $R = -1$ und $R = 0$ dargestellt. Hierbei werden die in den Versuchen erreichten Schwingspiele auf den Wert der Versuchsreihe entsprechenden Wöhlerlinie bezogen. Hierdurch wird die Streuung der Versuchsergebnisse "um" die Wöhlerlinie bezogen auf die Schwingspielzahl deutlich. Durch diese Art der Darstellung wird besonders gut die Abhängigkeit

der Streuung vom Lasthorizont erkennbar und vergleichbar. Prinzipiell lässt sich die Zunahme der Streuung mit geringerer Belastung erkennen, diese ist jedoch außerdem von Spannungsverhältnis und Formzahl abhängig.

5.3 Gassnersversuche

Reale Bauteile unterliegen im Betrieb meist einer Belastung mit variabler Amplitude. Das Schwingfestigkeitsverhalten unter einstufiger Beanspruchung ist aber in vielen Fällen nur eingeschränkt übertragbar auf die reale Beanspruchung mit variabler Amplitude. Aus diesem Grund werden Versuche mit einer gaußähnlichen Verteilung der Belastung durchgeführt. Verwendet wird hierzu eine Teilfolge mit einem Umfang von $L_{TF} = 5 \cdot 10^4$ Schwingspielen, siehe

Abb. 24, wobei die Belastungsamplituden zeitlich durchmischt aufgebracht werden.

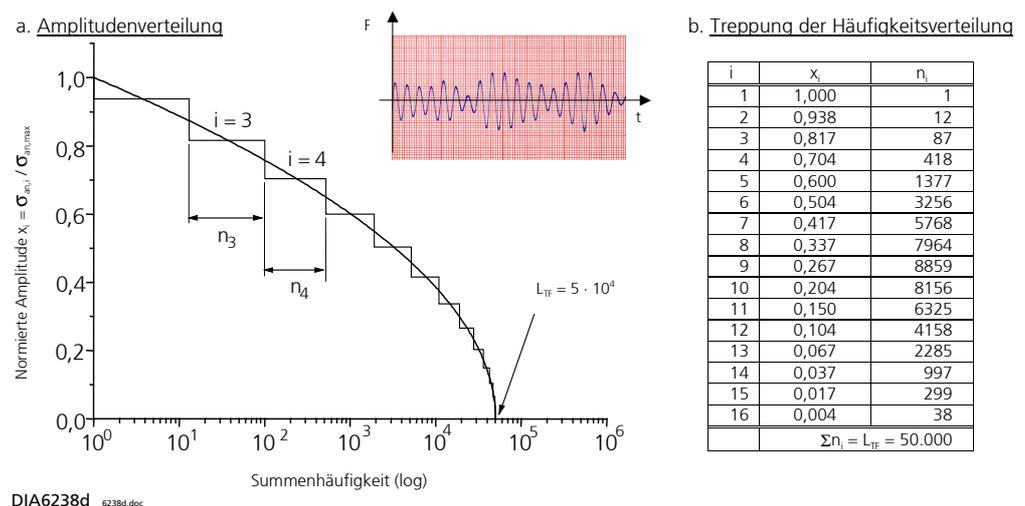


Abb. 24: Gauß'sche Häufigkeitsverteilung

Zur Auswertung der Gassnersversuche wird die gleiche Herangehensweise wie bei den Wöhlerversuchen angewendet. Es ergeben sich Geraden in doppelt logarithmischer Darstellung (maximale Spannungsamplitude des Kollektives zu erreichter Schwingspielzahl) mit den Parametern Stützpunkt ($S_{a \max St} N_{St}$) und Neigung k . Diese werden als Gassnerlinien bezeichnet.

Bestimmt werden die Gassnerlinien in einem Bereich von 10^6 bis 10^7 Schwingspielen. Unterhalb von 10^6 Schwingspielen könnten nur Brüche mit einem Lastniveau erzeugt werden, auf dem sich die maximalen Amplituden des Kollektives im Bereich der statischen Festigkeitswerte befinden würden. Dies ist für die Untersuchung der Materialermüdung im Hinblick auf auslegungsrelevante Maximalbeanspruchungen nicht sinnvoll. Aus zeitlichen Gründen werden keine Versuche oberhalb von 10^7 Schwingspielen durchgeführt.

Untersucht werden gekerbte Proben der Hauptversuchsreihen T1 - T3 mit dem Spannungsverhältnis $R = -1$ und $R = 0$, wobei das Hauptaugenmerk auf Versuchen mit $R = -1$ liegt.

Die Versuche mit dem Spannungsverhältnis $R = 0$ wurden ergänzend normiert ausgewertet, da pro Versuchsreihe lediglich zwei Versuchsergebnisse vorliegen. Hierbei werden die unter Wechselbelastung ($R = -1$) ermittelten Neigungen k übernommen.

Probenform	Versuchsreihe	Parameter der Gassnerlinien			
		R = -1		R = 0	
		$N_{ST} = 10^7$ Schwingspiele		$N_{ST} = 10^7$ Schwingspiele	
		$P_{\dot{U}} = 50\%$		$P_{\dot{U}} = 50\%$	
		$S_{a,maxSt}$ in MPa	k	$S_{a,maxSt}$ in MPa	k
gekerbt	"Stand der Technik"	140	5,6	125	5,6*
	1. opt. Parameter	149	6,5	141	6,5*
	2. opt. Parameter	153	6,8	134	6,8*

* k normiert aus den Ergebnissen $R = 1$

Tab. 8: Gassnerlinien

Anhand des in Kap. 4.7.4 beschriebenen Anrisskriteriums lassen sich Anrissgassnerlinien bestimmen. Diese sind in den Diagrammen D 4.1 - 3 zusätzlich zu den Gassnerlinien dargestellt. Es ergibt sich eine geringere Neigung, da das Verhältnis zwischen Anrisschwingspielzahl und Bruchschwingspielzahl unter höherer Beanspruchung geringer ist. Die Ergebnisse sind in Tab. 9 zusammengefasst.

Probenform	Versuchsreihe	Parameter der Anrissgassnerlinien	
		R = -1	
		$N_{ST} = 10^7$ Schwingspiele	
		$P_{\dot{U}} = 50\%$	
		S_{ast} in MPa	k
gekerbt	"Stand der Technik"	137	6,5
	1. opt. Parameter	146	7,6
	2. opt. Parameter	151	7,9

Tab. 9: Anrissgassnerlinien

Aus den Gassner- und Anrissgassnerlinien lassen sich die Verhältnisse zwischen Anrisschwingspielzahl und Bruchschwingspielzahl auf verschiedenen Beanspruchungshorizonten bestimmen (siehe Tab. 10). Es zeigen sich Verhältnisse zwischen 0,61 bis 0,94.

Gassnerversuch/ Probenform gekerbt			
	R = -1		
	P _Ü = 50%		
	Verhältnis N _A / N _B		
S _{a max} in MPa	"Stand der Technik"	1. opt. Parameter	2. opt. Parameter
200	0,61	0,63	0,69
175	0,69	0,73	0,79
150	0,79	0,86	0,94

Tab. 10: Verhältnis N_A/ N_B

5.4 Lebensdauerrechnung/ Schadensakkumulation

Um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der Schwingfestigkeitsversuche mit konstanten und variablen Amplituden ziehen zu können, werden Lebensdauerrechnungen nach der Theorie der linearen Schadensakkumulation vom Palmgren und Miner [Palm24, Miner45] durchgeführt.

Hierbei wird für jedes Schwingspiel eine Schädigung errechnet, diese ergibt sich aus der Teilschädigung die laut Wöhlerlinie auf dem entsprechenden Horizont entsteht. Die für alle Schwingspiele der Teilfolge summierte Schädigung ergibt die Schadenssumme der Teilfolge. Für Schwingspiele, die sich nicht mehr im Zeitfestigkeitsbereiches der Wöhlerlinie befinden (Schwingungsamplitude unterhalb der Schwingungsamplitude am Abknickpunkt der Wöhlerlinie) wird die modifizierte Miner-Regel nach Haibach verwendet, sie sieht eine Fortführung der Wöhlerlinie mit der Neigung 2k-1 nach dem Abknickpunkt vor. Nach Werner [Wern99] ergeben sich für die modifizierte Miner-Regel die geringsten Streuungen der Schadenssummen für die untersuchte Aluminium-Knetlegierung.

Entsprechend der Theorie der linearen Schadensakkumulation tritt das Versagen eines Bauteiles bei der Schadenssumme D = 1 ein. In der Praxis weicht die Lebensdauer teils deutlich von der Schadenssumme D = 1 ab (0,1 bis 10 [Wern99]). Dies resultiert aus den recht einfachen Annahmen der Theorie der linearen Schadensakkumulation, die z.B. einen Einfluss der Reihenfolge beim Aufbringen der Schwingspiele ausschließt. Aus vorhergehenden experimentellen Untersuchungen sind jedoch, je nach Anwendungsfall und Werkstoff, kritische Schadenssummen bekannt, diese Herangehensweise bezeichnet man als Relative-Miner-Regel [Schü73].

Für die Aluminium-Knetlegierungen werden unter Biegung, je nach Modifikation der Miner-Regel, mittlere Schadenssummen D von 0,65 bis 0,81 nach [Häne99] erreicht (Abb. 25).

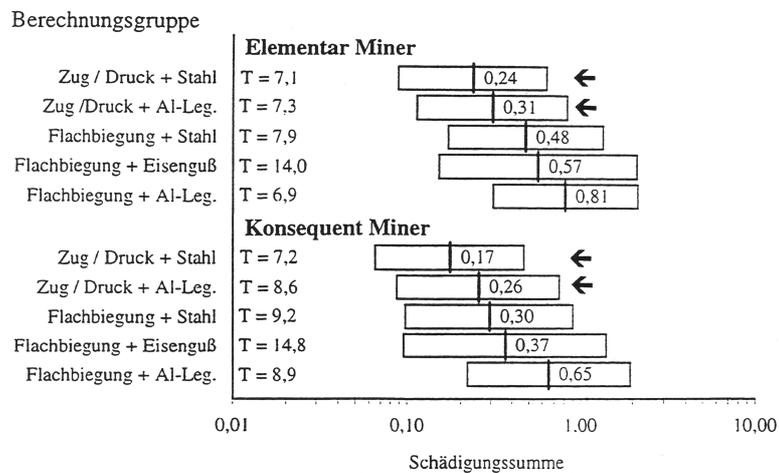


Abb. 25: Schadenssummen nach [Häne99]

Durchgeführt werden für die Wöhler- und Gassnerlinien des Spannungsverhältnisses $R = -1$ Rechnungen auf drei Horizonten (150, 175 und 200 MPa). Die Ergebnisse sind in Diagramm D 7.1 zusammengefasst.

Es ergeben sich für den "Stand der Technik" die größten Schadenssummen. Demzufolge wird die Lebensdauer für die optimierten Versuchsreihen geringfügig überschätzt, so dass sich geringere Schadenssummen ergeben. Die Abweichungen liegen jedoch hinlänglich im Bereich des in Abb. 25 angegebenen Streubandes.

5.5 Einfluss der Fertigungsparameter auf die Schwingfestigkeit

Das Hauptziel besteht in der Untersuchung des Einflusses produktiver Bearbeitungstechnologien auf die Schwingfestigkeit. Zur Steigerung der Produktivität (Hauptzeit) wurden die Parameter Schnittgeschwindigkeit v_c und der Vorschub f variiert. Des weiteren wurde über eine Erhöhung des Eckenradius r_e (größerer Vorschub bei gleicher gemittelter Rautiefe) ein Produktivitätszuwachs erreicht.

Die Rauigkeit ist für die Abminderung der Schwingfestigkeit die entscheidende Größe. Eine Untersuchung des Einflusses der angewandten Fertigungsparameter ist demzufolge nur bei einer vergleichbaren Rauigkeit bei veränderten Fertigungsparametern möglich, was im Rahmen der Hauptversuche umgesetzt wird.

In den Basisversuchen wird eine Vielzahl an Fertigungskombinationen auf verschiedenen Rauigkeitsniveaus untersucht. Bei der verwendeten Legierung AlSi1Mg T6 und im untersuchten technologischen Fenster kann kein Trend, der sich direkt aus der

Schnittgeschwindigkeit v_c oder dem Eckenradius r_e ergibt, nachgewiesen werden.

Der Einfluss der Fertigungsparameter auf die Schwingfestigkeit lässt sich somit für AlSi1Mg T6 lediglich exemplarisch für die angewendeten Parameter Beschreiben.

Um anschaulich die Abminderung der Schwingfestigkeit zu vergleichen, wird sie auf den geometrisch gleich gekerbten bzw. ungekerbten polierten Probenzustand bezogen. Für die Schwingfestigkeit wird prinzipiell der Stützpunkt bei 10^6 Schwingspielen der Wöhlerlinie $R = -1$ bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 50\%$ als Maß herangezogen.

Durch den Bezugspunkt der Versuchreihen mit polierten Proben lässt sich ein Vergleich zwischen dem Einfluss der bearbeiteten Oberfläche im gekerbten und ungekerbten Zustand ziehen. Die Bezugswerte werden den Versuchsreihen mit polierten Proben aus den Basis- und Sonderversuchen entnommen.

Aus den Werten wird deutlich, dass die produktiver gefertigten Oberflächen trotz vergleichbarer gemittelter Rautiefe bezogen auf den polierten Zustand zu einer geringeren Abminderung der Schwingfestigkeit im ungekerbten wie gekerbten Zustand führen.

ungekerbt	Festigkeit bezogen auf ungekerbte polierte Proben (Wöhler, $R = -1$, 10^6 LW, $P_{\bar{U}} = 50\%$)
"Stand der Technik", T1	75%
1. opt. Parameter, T2	80%
2. opt. Parameter, T3	78%
Rauh, $R_z = 50\mu\text{m}$, A4	65%

gekerbt	Festigkeit bezogen auf gekerbte polierte Proben (Wöhler, $R = -1$, 10^6 LW, $P_{\bar{U}} = 50\%$)
"Stand der Technik", T1	85%
1. opt. Parameter, T2	88%
2. opt. Parameter, T3	91%
Rauh, $R_z = 50\mu\text{m}$, RR	76%

Tab. 11: Fertigungseinfluss bezogen auf polierten Zustand

Dargestellt sind die Werte aus Tab. 11 in Diagramm D 3.1 in Abhängigkeit von der Formzahl der geometrischen Kerbe. Die in Diagramm D 3.1 dargestellte Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von der Formzahl in linearer Form kann nur als ein erster grober Ansatz angesehen werden. Um eine Aussage über den

Rauhigkeitseinfluss in Abhängigkeit von der Formzahl treffen zu können, ist eine Variation der Formzahl der gekerbten Proben auf weiteren Stufen nötig.

Es kann festgestellt werden, dass für die Legierung AlSi1Mg T6 im untersuchten fertigungstechnischen Fenster keine Abminderung der Schwingfestigkeit durch die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c und des Eckenradius r_e auftritt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwingfestigkeit bei ungekerbten wie gekerbten Proben um ca. 5%, steigt wenn diese mit „optimierten Parametern“ gefertigt werden.

Weiterhin wird deutlich, dass der untersuchte Rauhigkeitseinfluss durch die Bauteilkerbe abgemindert wird. Setzt man die Abminderung der Schwingfestigkeit durch die Rauhigkeit zwischen gekerbten und ungekerbten Versuchsreihen ins Verhältnis, so ergeben sich folgenden Abminderungen des Rauhigkeitseinflusses durch die Bauteilkerbe ($K_{tb} = 1,66$):

gekerbt/ ungekerbt	Abminderung des Rauhigkeitseinflusses durch die geometrische Kerbe ($K_{tb} = 1,66$)
"Stand der Technik", T1	61%
1. opt. Parameter, T2	59%
2. opt. Parameter, T3	39%
Rau, $R_z = 50\mu\text{m}$, A4/ RR	70%

Tab. 12: Kerbabhängigkeit des Rauhigkeitseinflusses

In Diagramm D 3.3 werden die Abminderungen der Versuchsreihen der Haupt- und Sonderversuche mit gekerbten und ungekerbten Proben anschaulich verglichen.

5.6 Einfluss der Rautiefe

Die Rautiefe (gemittelte Rautiefe) stellt sich in dieser Untersuchung als entscheidende Größe des Oberflächeneinflusses dar.

In Diagramm D 3.2 wird der Rauhigkeitseinfluss anhand des in der FKM-Richtlinie [Häne99] verwendeten Rauhigkeitsfaktors $K_{R,\sigma}$ (Glg. 4-1) dargestellt. Zur Einordnung der Versuchsergebnisse werden die Hauptversuche verwendet, da diese Versuchsreihen über den größten Probenumfang verfügen (ca. 10 Proben pro Wöhlerlinie). Einem theoretischen Rauhigkeitswerte von $R_z = 1\mu\text{m}$ entspricht so eine Schwingfestigkeit S_a von 165MPa ($P_{\bar{0}} = 50\%$, 10^6 Schwingspiele). Obwohl sich $K_{R,\sigma}$ nach Glg. 4-1 auf den glatten ungekerbten Probenzustand bezieht, ist die Versuchsreihe mit polierten Proben der Basisversuche aufgrund des geringen Probenumfangs als Bezugspunkt nicht geeignet.

Es wird in Diagramm D 3.2 deutlich, dass die Versuchsergebnisse die Tendenz der FKM-Richtlinie [Häne99] wiedergeben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigen somit für die ungekerbten Proben den in der FKM-Richtlinie [Häne99] angegebenen Einfluss der Rauigkeit auf die Schwingfestigkeit für AlSi1Mg T6.

5.7 Einfluss der Eigenspannungen

Fertigungsparameter/ Eigenspannungen

In den Basisversuchen wurde nachgewiesen, dass bei der Bearbeitung von AlSi1Mg T6 die Ausprägung des Eigenspannungszustandes wesentlich durch die Bearbeitungstechnologie geprägt wird.

Eine Korrelation der Fertigungsparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Eckenradius, gemittelte Rautiefe) zu Eigenspannungszuständen konnte im untersuchten technologischen Fenster nicht nachgewiesen werden.

Da die gemessenen Eigenspannungen Mittelwerte über den mit dem Vorschub f periodisch erzeugten Oberflächenzustand sind, könnten in weiterreichenden Untersuchungen höher aufgelöste Messungen der Eigenspannungen aussagekräftigere Ergebnisse liefern.

Die den Hauptversuchen entsprechenden Versuchsreihen der Basisversuche ergeben folgende Eigenspannungen in Beanspruchungsrichtung:

Hauptversuche, Nennrauigkeit $R_z = 6,3\mu\text{m}$	Eigenspannungen in Beanspruchungsrichtung in MPa	Abweichung in MPa
"Stand der Technik", T1	76	26
1. opt. Parameter, T2	-46	31
2. opt. Parameter, T3	-63	56

Tab. 13: Eigenspannungen Hauptversuche (aus Basisversuchen abgeleitet)

Aus Tab. 13 ist ersichtlich, dass die optimierten Fertigungsparameter zum Aufbau von Druckeigenspannungen führen, die unter schwingender Beanspruchung einen positiven Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der Randschicht zur Folge haben.

Einfluss der Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit

Da die Basisversuche lediglich zur Ermittlung der Fertigungsparameter für die optimierten Hauptversuche dienen, wird ein vergleichsweise geringer Versuchsumfang in den Basisversuchen (4 Versuche pro Versuchsreihe pro Wöhlerlinie) gewählt. Dieser Versuchsumfang gestattet keine abgesicherte Aussage der Ergebnisse.

Für eine Beurteilung des Einflusses der Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit ist es nötig diese unter konstanten Bedingungen zu variieren. Da jedoch die Eigenspannungen bei der Fertigung ausgebildet werden, ist dies nicht direkt realisierbar. Es lässt sich daher der Einfluss der Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit nicht vom Einfluss der Fertigungsparameter isolieren. Vielmehr bilden die Fertigungsparameter und die bei der Fertigung entstehenden Eigenspannungen eine Einheit.

Für die Hauptversuche lässt sich die Tendenz erkennen, dass die optimierten Versuchsreihen über eine geringfügig höhere Schwingfestigkeit verfügen (ca.5%, Tab. 11, D 3.1) und dies mit dem Ergebnis der Eigenspannungsmessungen (Tab. 13) und der Bewertung bezüglich der Schwingfestigkeit korreliert.

6 Metallographie

6.1 Gefüge- und Bruchflächenuntersuchungen

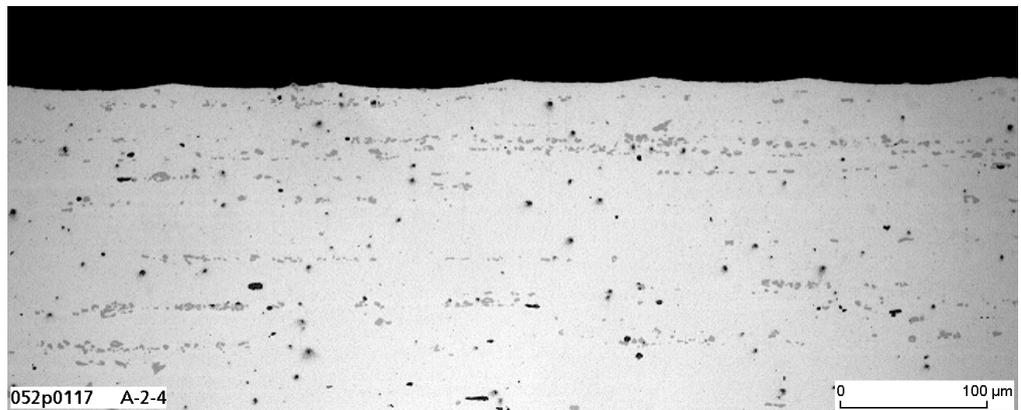
Längsschliffe

Zur Analyse des Randschichtzustands wurde pro Versuchsreihe jeweils eine Probe im Schliff in Probenlängsrichtung unter dem Lichtmikroskop untersucht. Zu erkennen ist in diesen Bildern die reale Oberflächenmikrokontur der Proben im Prüfquerschnitt.

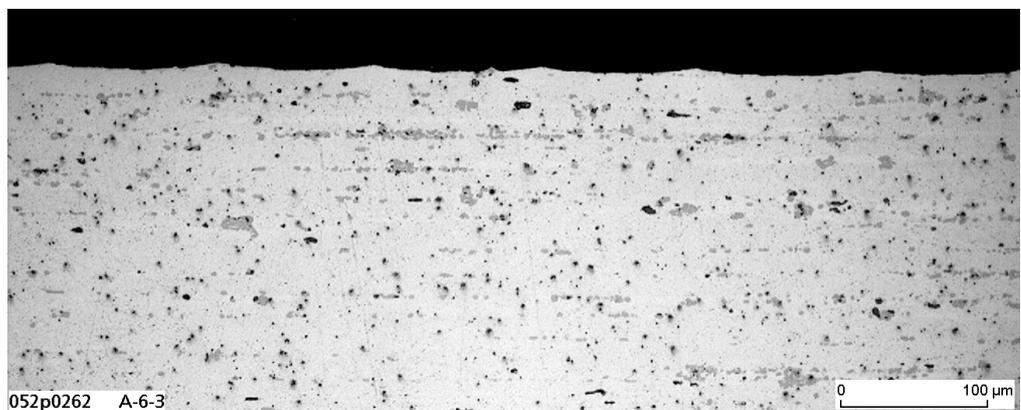
In Abb. 26 sind beispielhaft Längsschliffe der den Hauptversuchen entsprechenden Basisversuche dargestellt. Zu erkennen ist das ungeätzte Gefüge mit punktförmigen blauen Mg_2Si - und flächigen grauen $AlMnFeSi$ -Einschlüssen. Deutlich erkennbar ist die typische zeilige Gefügestruktur des stranggepressten Werkstoffs. Die Unterschiede im Anteil der Einschlüsse, wie z.B. in Abb. 26 zwischen 1. und 2. opt. Parametersatz, sind durch Inhomogenitäten im Werkstoff zu erklären und treten bei allen untersuchten Schliffen auf.

Die durch die Fertigung erzeugte Mikrokontur zeigt sich als Aneinanderreihung flacher Segmente.

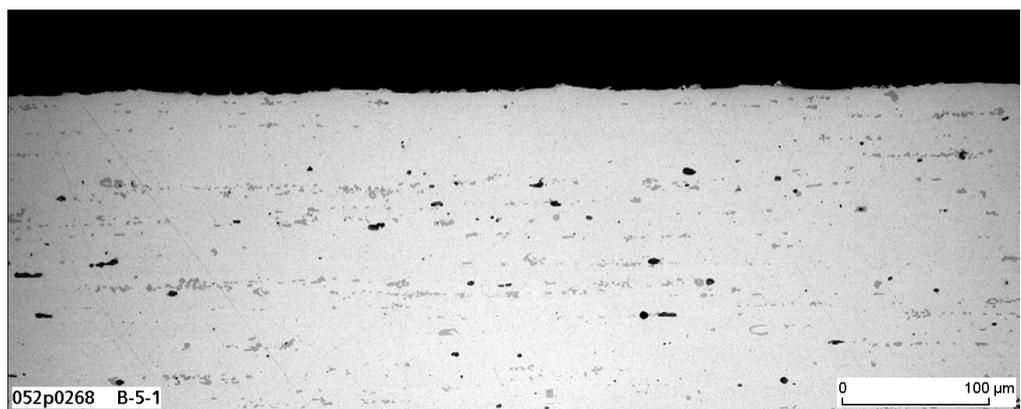
Provoziert durch die üblicherweise überhöhte Darstellung der Rautiefe durch Rauheitsmessgeräte wird die Rautiefe als technische Kerbe bewertet. Aus Abb. 26 wird ersichtlich, dass diese Betrachtungsweise so nicht sinnvoll ist.



„Stand der Technik“; v_c : 300m/min; r_e : 0,4mm; f : 0,11mm; R_z : 6,9 μ m

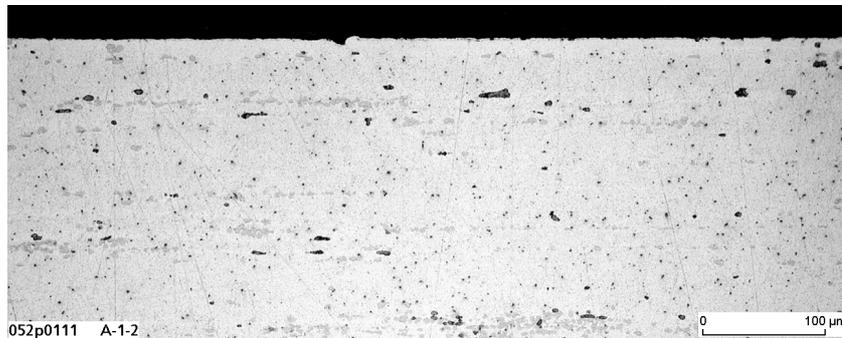


„1. opt. Parametersatz“; v_c : 550m/min; r_e : 0,4mm; f : 0,11mm; R_z : 4,5 μ m

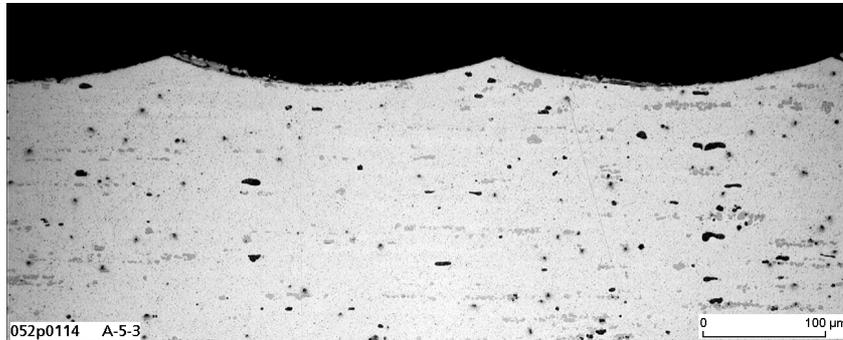


„2. opt. Parametersatz“; v_c : 550m/min; r_e : 0,8mm; f : 0,14mm; R_z : 3,8 μ m

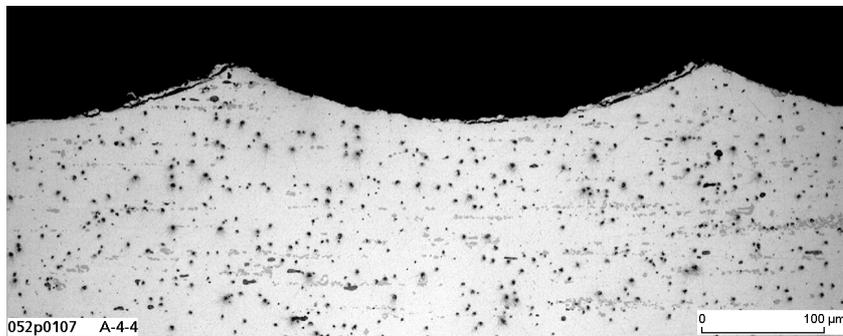
Abb. 26: Längsschliffe an Basisversuchen; ungeätzt



052p0111 A-1-2
poliert; R_z : 0,45 μ m ; A1



052p0114 A-5-3
 R_z : 24,5 μ m; v_c : 300m/min; re: 0,4mm; f: 0,27mm; A5



052p0107 A-4-4
 R_z : 49,9 μ m; v_c : 300m/min; re: 0,4mm; f: 0,378mm; A4

Abb. 27: Längsschliffe Nennrauhigkeitsklassen <1, 25, 50 μ m; ungeätzt

In den Nennrauhigkeitsklassen 25 und 50 μ m in Abb. 27 wird deutlich, dass eine Betrachtung der Oberflächenstruktur als aufeinanderfolgende Bauteilkerben in diesen Rauigkeitsklassen sinnvoll sein kann. Eine Anwendung für hochbeanspruchte Bauteile ist jedoch aufgrund der starken Abminderung der Schwingfestigkeit durch diese Rauigkeitsklassen nicht sinnfälliger und eine Untersuchung somit technisch nicht von Interesse.

Oberflächen/ Bruchausgangsbereich

An ausgewählten Proben (gekerbt und ungekerbt) der Hauptversuche mit Bearbeitungsparametern nach dem „Stand der Technik“ sowie den optimierten Parametersätzen wurde der Bruchausgangsbereich insbesondere im Hinblick auf eine Korrelation zwischen Anrissort und Oberflächenmikrokontur näher untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Versagensstelle bei allen untersuchten Proben im Bereich der maximalen Beanspruchung lag.

Ausgangspunkt für die Schwingbrüche ist in vielen Fällen ein Ausbruch an der Oberfläche in Folge der spanenden Bearbeitung. Auf den REM-Aufnahmen der Oberfläche (Abb. 28 bis Abb. 30) wird deutlich, dass diese Ausbrüche unterschiedlich ausgeprägt sind. Insbesondere für die dem „Stand der Technik“ entsprechenden Fertigungsparameter ergibt sich eine unterschiedliche Oberflächenstruktur im Vergleich zu den optimierten Fertigungsparametern.

Bei den Versuchsreihen mit optimierten Parametern kommt es zu einer geringeren Ausprägung von „Ausbrüchen“ in der Werkstückoberfläche. Es ist zu vermuten, dass die Einschlüsse des Werkstoffes durch einen veränderten Spanbildungsmechanismus bei hohen Schnittgeschwindigkeiten abgeschert werden. Da diese Fehlstellen den Versagensausgangspunkt darstellen, ist ein wesentlicher Einfluss auf die Schwingfestigkeit denkbar. Diese Effekte könnten gemeinsam mit den Druckeigenspannungen eine Erklärung für die erhöhten Schwingfestigkeiten der Versuchsreihen mit optimierten Bearbeitungsparametern darstellen.

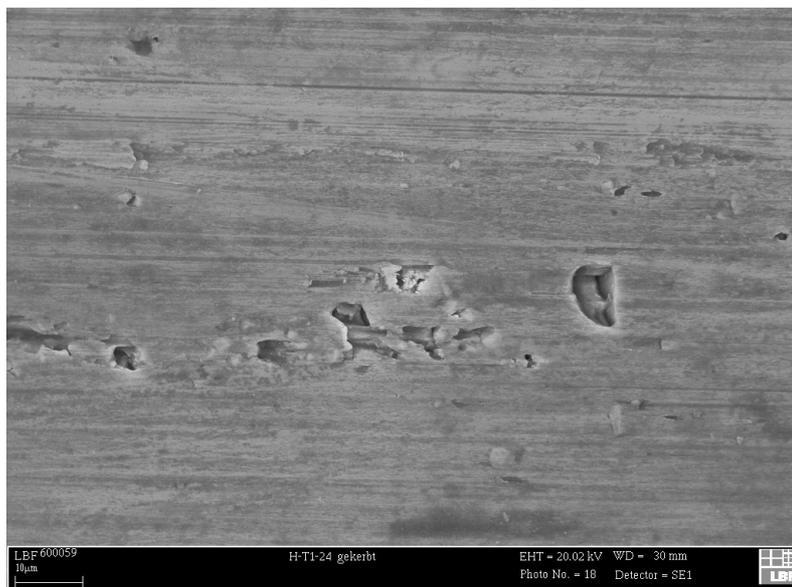


Abb. 28 : „Stand der Technik“, Ausbrüche auf der Oberfläche;
 v_c : 300m/min; r_e : 0,4mm; f : 0,11mm; R_z : 6,9µm;
Schnittvektor horizontal

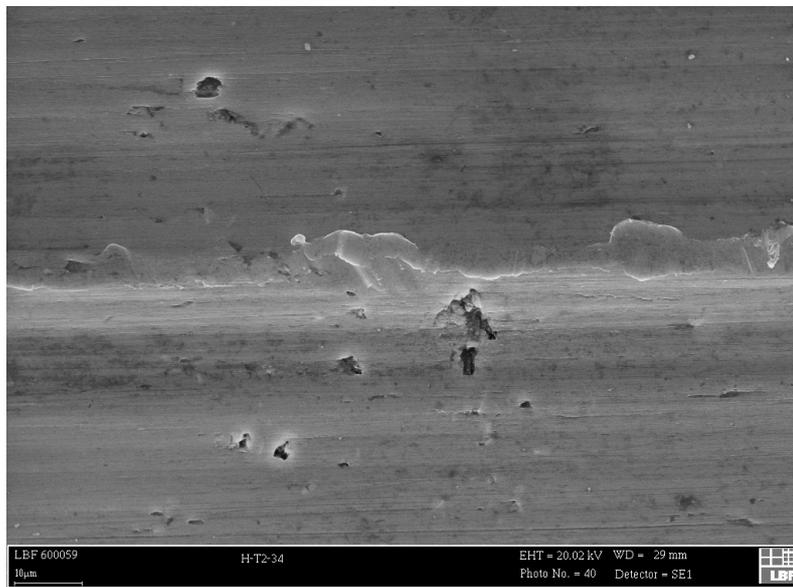


Abb. 29 : 1. opt. Parametersatz, Ausbrüche auf der Oberfläche;
 v_c : 550m/min; re: 0,4mm; f: 0,11mm; R_z : 4,5 μ m;
 Schnittvektor horizontal

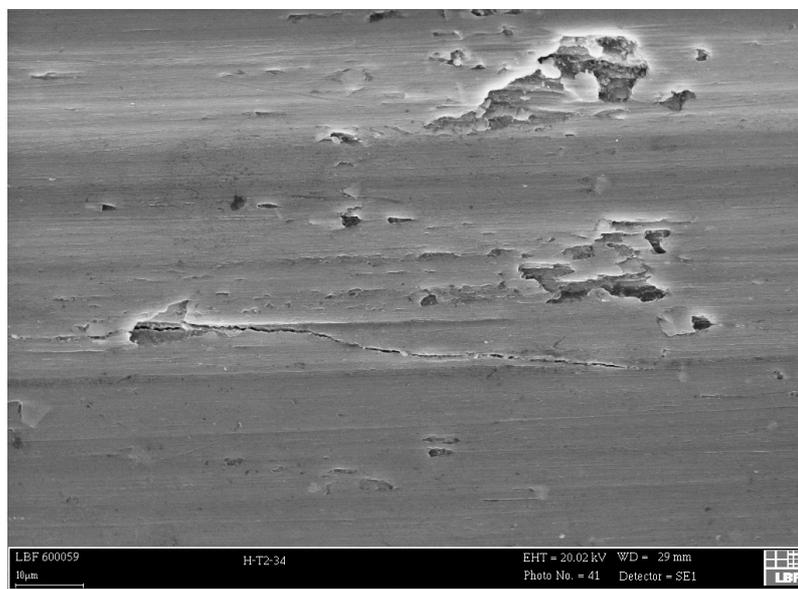


Abb. 30 : 2. opt. Parametersatz, Ausbrüche auf der Oberfläche;
 v_c : 550m/min; re: 0,8mm; f: 0,14mm; R_z : 3,8 μ m;
 Schnittvektor horizontal

6.2 Härtemessungen

Zur Validierung der Einflüsse der Fertigungsverfahren auf das Gefüge, wurden Messungen der Mikrohärtigkeit durchgeführt. Hierfür wird eine Vickers-Diamantspitze in Form einer Pyramide in die Oberfläche des metallurgischen Schliffes gepresst. Die entstehenden Abdrücke verfügen über eine diagonale Ausdehnung von lediglich 15 µm. Durch das Setzen von mehreren Abdrücken können Verläufe der Mikrohärtigkeit vom Probeninneren zur Randschicht ermittelt werden.

Es zeigte sich hierbei keine nachweisbare Abweichung der Mikrohärtigkeit im Bereich der Randschicht im Vergleich zum Probeninneren.

In Abb. 31 ist die Messung der Mikrohärtigkeit eines Einschlusses dargestellt. Hierbei wird die geringste Prüfkraft des eingesetzten Messsystems von 0,1 N realisiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Einschlüsse über eine ca. 5% erhöhte Mikrohärtigkeit verfügen. Jedoch ist in Abb. 31 ersichtlich, dass die Prüfkraft und der sich ergebende Abdruck nicht ausreichend klein sind. Es lässt sich somit keine Aussage zur Härte der Einschlüsse absolut treffen, jedoch ist die Tendenz zu einer höheren Härte im Vergleich zum Grundmaterial zu erkennen. Dies bestätigt die prinzipielle Möglichkeit des "Herausbrechens" von Gefügebestandteilen bei der spanenden Bearbeitung.

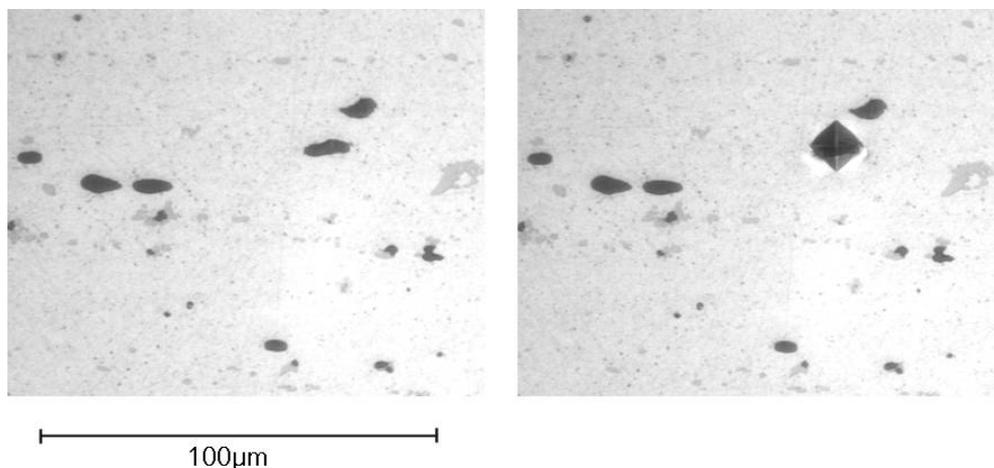


Abb. 31 : Mikrohärtemessung an Gefüge-Einschluss

7 Ausblick

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten die Übertragbarkeit der getroffenen Aussagen auf andere Aluminiumlegierungen, z.B. naturharte Legierungen, Aluminiumguss oder höherfeste Legierungen zum Gegenstand haben, da eine Allgemeingültigkeit der Ergebnisse noch nicht belegbar ist und ein Zusammenhang mit der Kerbempfindlichkeit des Werkstoffes zu vermuten ist.

Eine Ausweitung auf Magnesiumlegierungen ist ebenfalls empfehlenswert, da Magnesium ein hohes Leichtbaupotential besitzt und Bauteile aus Magnesium zunehmend zur Anwendung kommen. Hinweise oder Faktoren zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit bei Magnesium-Legierung existieren zur Zeit nicht. Aufgrund der gegenüber Aluminium gänzlich unterschiedlichen Werkstoffparameter und Bearbeitungsregime sind auch andere Wirkmechanismen und Zusammenhänge zu erwarten.

Forschungsbedarf besteht ebenfalls in der mehr grundlagenorientierten Untersuchung der lokalen Eigenspannungen in Abhängigkeit von der Oberflächentopografie als Folge des Fertigungsprozesses und deren Einfluss auf das lokale Schwingfestigkeitsverhalten. Zurzeit ist dies mit den verfügbaren röntgenografischen Messverfahren jedoch nur sehr eingeschränkt realisierbar.

Literaturverzeichnis

- [AiFFKM05] Esderts A.; Zenner H.; Kleemann, U.; Günther U.; Popp A.: AiF - FKM Forschungsvorhaben Bauteiloberfläche und Schwingfestigkeit Nr.: 13247 BG/1, 2005
- [Bau34] Messen der Oberflächengüte – Die Glätte einer mit spanabhebenden Werkzeugen bearbeiteten Oberfläche; Maschinenbau 18 (1934) 3/4
- [Brau65] Braune, F.-G.: Zusammenstellung von Formeln zur Berechnung der Kerbwirkungszahl und ähnlicher Dauerfestigkeitsverhältnisse. Maschinenbautechnik 14 (1965) 10, S. 516-520.
- [D4768] DIN 4768
Ermittlung der Rauheitskenngrößen mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Meßbedingungen
Deutsche Norm 1990
- [D6581] DIN 6581
Begriffe der Zerspantechnik – Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges
Deutsche Norm, 1985
- [DFS] Drehmaschine für Futter- und Spitzenteile DFS 2/2 CNC, VEB Großdrehmaschinenwerke 8.Mai, Karl-Marx-Stadt, 1980
- [Fess95] Fessenmayer, W.; Buschermöhle, H.; Sigwart, A.; Günther, U.:

FKM: Oberflächenrauigkeit: Vorhaben 156 Frankfurt/M:
Forschungskuratorium Maschinenbau, 1995 (Forschungsheft 196)
- [Günt01] Günther, U.; Fessenmayer, W.; Krämer, O.; Mauch, H.:
FKM: Untersuchungen zum Einfluss moderner Fräsverfahren gefertigten Oberflächen auf die Ermüdungsfestigkeit
Vorhaben 220 Frankfurt/M, 2001
Forschungskuratorium Maschinenbau, 2001 (Forschungsheft 262)
- [Haib89] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1989

- [Häne98] Hänel, B.; Haibach, E.; Seeger, T.; Wirthgen, G.; Zenner, H.:
FKM-Richtlinie – Rechnerischer Festigkeitsnachweis
Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile,
Vorhaben 154, Frankfurt/M, Forschungskuratorium Maschinenbau
1998 (Forschungsheft 183), VDMA Verlag GmbH, 1998
- [Häne99] Hänel, B.; Wirthgen, G.; Zenner, H.; Seeger, T.:
Festigkeitsnachweis Aluminium: Vorhaben Nr. 209
Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Aluminium –
Richtlinie. Frankfurt/M, Forschungskuratorium Maschinenbau,
1999 (Forschungsheft 241)
- [Hommel01] Hommel
Produktinformationen Hommel Tester T4000
Hommelwerke GmbH, Schwenningen, 2001
- [Klee03] Kleemann, U.
Arbeitsanweisung zum Polieren von Prüfproben
Hausbericht TU Clausthal, 2003
- [Liu01] Liu, J.: Dauerfestigkeitsberechnung metallischer Bauteile,
Habilitationsschrift, Tu Clausthal, 2001
- [Miner45] Miner, M.A.: Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied
Mechanics, 12 (1945) 3, S. 159-153
- [Neub85] Neuber, H.: Kerbspannungslehre, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin,
1985
- [Palm24] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern, VDI-Z 68 (1924) 14,
S. 339-341
- [Schm03] Produktinformationen und Einsatzempfehlungen
Schleif- und Laepfmittel Dietrich Schmidt KG, 2003
- [Schü73] Schütz, W.; Zenner, H.: Schadensakkumulationshypothesen zur
Lebensdauervorhersage bei schwingender Beanspruchung - Ein
kritischer Überblick, Zeitschrift für Werkstofftechnik 4 (1973) 1, S. 25-
32
- [Sieb56] Siebel, E.; Gaier, M.:
Untersuchungen über den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit
auf die Dauerfestigkeit metallischer Bauteile
VDI Z 98 (1956), S. 1715-1723
- [Sons05] Sonsino, C.M.: "Dauerfestigkeit" - Eine Fiktion, Konstruktion, 4-
2005, S. 87-92

- [Syre75] Syren, B.: Der Einfluß spanender Bearbeitung auf das Biegewechselerformungsverhalten von Ck45 in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen, Karlsruhe: TU, Diss., 1975
- [TWIN] Drehmaschine TWIN 42 Gildemeister
Produktinformation Gildemeister, 1999
- [VSM03] Produktinformationen und Einsatzempfehlungen VSM
-Vereinigte Schmirgel- und Maschinenfabriken AG, Hannover, 2003
- [Walt03] Produktinformationen und Einsatzempfehlungen Walter AG,
Tübingen, 2003
- [Wern99] Werner, S.: Zur betriebsfesten Auslegung von Bauteilen aus AlMgSi1 unter Berücksichtigung von hohen Mitteldehnungen und Spannungskonzentrationen, Universität des Saarlandes, Diss., 1999

Formelzeichen/ Abkürzungen

α	Werkzeug-Freiwinkel
α_0	Spannungskonzentrationsfaktor Flachkerbe
α_0	Werkzeug-Orthogonal-Freiwinkel
$a_{R,\sigma}$	Rauhigkeits-Einflussfaktor nach [Häne99]
BEM	Boundary Element Method
bzw	beziehungsweise
χ_0	Werkzeug-Orthogonal-
D	Schadenssumme
Δ_0	Mikrostrukturlänge
DMS	Dehnmessstreifen
DWS	Drehmaschine vom Typ „DFS 2/2 CNC“
ε_r	Werkzeug-Eckenwinkel
f	Vorschub
Glg	Gleichung
k	Neigung Wöhlerline
K_0	Oberflächenformzahl
κ_r	Werkzeug-Einstellwinkel
$K_{R,\sigma}$	Rauheitsfaktor nach [Häne99]
κ_r'	Werkzeug-Einstellwinkel der Nebenschneide

K_{tb}	Formzahl für Biegung
L_{TF}	Schwingspiele der Teilfolge für die Gassnerversuche
LW	Lastwechsel / Schwingspiele
m	Meter
min	Minute
mm	Millimeter
MPa	Megapascal ($10^6 \cdot \text{N/m}^2$)
N	Newton
N_A	Anrisschwingspielzahl
N_B	Bruchschwingspielzahl
N_{St}	Schwingspielzahl für Stützpunkt der Wöhlerlinie
opt	optimierte
PP	Versuchsreihe gekerbte Proben „poliert“
R	Spannungsverhältnis (minimale/ maximale Last)
ρ	Kerbradius Riss
ρ_0	Kerbradius Flachkerbe
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert
r_e	Eckenradius Schnittwerkzeug
R_m	Zugfestigkeit
$R_{m,N,min}$	minimale Zugfestigkeit einer Werkstoffgruppe
R_{max}	maximale Rautiefe der Messstrecke

RP	Versuchsreihe gekerbte Proben „rau“ ($R_z = 50\mu\text{m}$)
R_{wirk}	Wirksame Rauigkeit
R_z	gemittelte Rautiefe nach DIN 4768 [D4768]
S_a	Spannungsamplitude
$S_{a \text{ max}}$	maximale Spannungsamplitude
$S_{a \text{ maxSt}}$	maximale Spannungsamplitude des Stützpunktes der Gassnerlinie
σ_{aD}	Spannungsamplitude "dauerfest" ertragbar im rauhen Zustand
S_{aSt}	Spannungsamplitude des Stützpunktes der Wöhlerlinie
σ_w	Spannungsamplitude "dauerfest" ertragbar im polierten Zustand
t	Kerbtiefe
t_0	Risslänge
T1 - T3	Versuchsreihen „Stand der Technik“ T1, „1. opt. Parameter“ T2, „2. opt. Parameter“ T3
t_H	Hauptzeit
T_N	Streuspanne Schwingenspielzahl
T_S	Streuspanne Beanspruchung
TWIN	Drehmaschine vom Typ „TWIN 42 Gildemeister“
v_C	Schnittgeschwindigkeit
Y_0	Korrekturfunktion für den Spannungskonzentrationsfaktor der Flachkerbe

D

Samarco Metallurgical Werk ABNAHMEPRÜFZEUGNIS <small>Ein EN 10204-3.1.B</small>		Nr 04- 6013 Datum 17.09.03										
VERTAG Nr 643/54044146/02058 APPENDIX Nr (744/2/0081214) 26592 BESTELL Nr												
Bezeichnung der Ware <u>aluminiumstangen rund</u> Norm <u>EN 573-3/75 5-1,2,3</u>												
Legierung, Zustand <u>EN AW 6082 T6</u> Abmessungen <u>50 X3000 mm</u>												
Charge Nr <u>49499</u> Gewicht netto <u>kg</u> Kollanzahl <u>st</u>												
BEBESTELLER Rusl Trade Limited Geneva Place, 2 nd Floor, #333 Waterfront Drive, P.O., Box 3339, Road Town, Tortola, British Virgin Islands												
FRACHTEMPFÄNGER Thyssen Schulte GmbH Logistik Center NE-Metalle, Westfallstraße 185 44147 Dortmund Germany												
FESTIGKEITS-EIGEN SCHAFTEN												
Zugfestigkeit MPa		Bruchdehnung										
Soll <u>310</u>		A %										
Ist <u>358</u>		B										
Streckgrenze MPa		350 13,4 Pressbolzen Ultraschallgeprüft										
CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG, %												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Beimengungen		
Soll	min	0,7		0,40	0,6						einzel	gesamt
	max	1,3	0,50	0,10	1,2	0,25	-	0,20	0,10		0,05	0,15
Prüfergebnisse												
Probe Nr 5-4721		1,03	0,41	0,06	0,60	0,96	0,02	0,06	0,05		0,05	0,15

Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und die Ergebnisse den Vereinbarungen bei der Bestellannahme entsprechen
 Inspektor der Qualitätssicherung *[Signature]*

Eigen Spannungsmessungen

Probe	Maschine	vc	f	re	Nenn- rauheit, μm	σ_{xx} MPa	σ_{xy} MPa	σ_{yy} MPa
A1-5	DFS	235,62	0,1	0,80	Poliert	-69 ± 32 $\tau_{yz} = -4$	-73 ± 25 $\tau_{(xy)z} = +9$	-88 ± 11 $\tau_{yz} = +3$
A-2-3	DFS	298,45	0,11	0,40	6	76 ± 26 $\tau_{xz} = +9$	21 ± 26 $\tau_{(xy)z} = +23$	15 ± 36 $\tau_{yz} = +19$
A-3-3	DFS	298,45	0,27	0,40	25	118 ± 31 $\tau_{xz} = +8$	46 ± 32 $\tau_{(xy)z} = +15$	76 ± 39 $\tau_{yz} = +16$
A-4-5	DFS	298,45	0,378	0,40	50	161 ± 33 $\tau_{xz} = +15$	47 ± 24 $\tau_{(xy)z} = +10$	49 ± 26 $\tau_{yz} = +6$
A-5-5	TWIN	298,45	0,27	0,40	25	146 ± 33 $\tau_{xz} = 0$	64 ± 25 $\tau_{(xy)z} = +11$	118 ± 36 $\tau_{yz} = -13$
A-6-5	TWIN	549,78	0,11	0,40	6	-46 ± 31 $\tau_{xz} = -31$	46 ± 48 $\tau_{(xy)z} = +19$	59 ± 54 $\tau_{yz} = +19$
A-7-5V	TWIN	549,78	0,27	0,40	25	145 ± 22 $\tau_{xz} = +8$	58 ± 47 $\tau_{(xy)z} = +15$	95 ± 25 $\tau_{yz} = +4$
A-8-5	TWIN	549,78	0,38	0,40	50	152 ± 19 $\tau_{xz} = +8$	66 ± 62 $\tau_{(xy)z} = +20$	77 ± 47 $\tau_{yz} = +11$
A-9-5	TWIN	392,70	0,11	0,40	6	45 ± 33 $\tau_{xz} = +6$	67 ± 37 $\tau_{(xy)z} = +12$	64 ± 67 $\tau_{yz} = +37$
A-10-5	TWIN	392,70	0,27	0,40	25	83 ± 30 $\tau_{xz} = +16$	51 ± 31 $\tau_{(xy)z} = +12$	53 ± 61 $\tau_{yz} = +28$
B-1-1	DFS	298,45	0,06	0,2	6	91 ± 27 $\tau_{xz} = +1$	30 ± 33 $\tau_{(xy)z} = +18$	13 ± 33 $\tau_{yz} = +18$
B-2-3	DFS	298,45	0,174	0,8	6	101 ± 27 $\tau_{xz} = +10$	58 ± 36 $\tau_{(xy)z} = +16$	31 ± 48 $\tau_{yz} = +11$
B-3-5	TWIN	549,78	0,07	0,1	6	57 ± 30 $\tau_{xz} = +16$	18 ± 42 $\tau_{(xy)z} = 19$	53 ± 35 $\tau_{yz} = +2$
B-4-5	TWIN	549,78	0,1	0,2	6	21 ± 23 $\tau_{xz} = +4$	48 ± 27 $\tau_{(xy)z} = +9$	20 ± 53 $\tau_{yz} = +27$
B-5-5	TWIN	549,78	0,14	0,8	6	-63 ± 56 $\tau_{xz} = -18$	-11 ± 40 $\tau_{(xy)z} = -22$	72 ± 29 $\tau_{yz} = +10$
C-1-	DFS	298,45	0,045	0,1	6			
C-2-5	DFS	298,45	0,13	0,1	25	32 ± 24 $\tau_{xz} = +8$	45 ± 26 $\tau_{(xy)z} = +12$	66 ± 24 $\tau_{yz} = +9$
C-3-4	DFS	298,45	0,19	0,2	25	72 ± 49 $\tau_{xz} = +25$	72 ± 38 $\tau_{(xy)z} = +14$	34 ± 56 $\tau_{yz} = +8$
C-4-2	DFS	298,45	0,173	0,8	6	112 ± 23 $\tau_{xz} = -1$	11 ± 42 $\tau_{(xy)z} = +23$	-61 ± 36 $\tau_{yz} = +16$
C-5-5	DFS	298,45	0,393	0,8	25	51 ± 29 $\tau_{xz} = 13$	27 ± 25 $\tau_{(xy)z} = +13$	66 ± 81 $\tau_{yz} = +42$

