

Dauerfestigkeitsuntersuchungen von mittels selektiven Laserschmelzens hergestellten piezoelektrischen Aktormodulen

Masterarbeit

Katja Butterweck | 1485349

Maschinenbau



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen

Name: Katja Butterweck
Matrikelnummer: 1485349
Studiengang: Maschinenbau

Masterarbeit

Thema: "Dauerfestigkeitsuntersuchungen von mittels selektiven Laserschmelzens hergestellten piezoelektrischen Aktormodulen"

Eingereicht: 10.03.2014

Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Hanns A. Stoffregen

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
Fachbereich Maschinenbau
Technische Universität Darmstadt
Otto-Berndt-Str. 2
64287 Darmstadt

Aufgabenstellung

Master-Thesis für Katja Butterweck, B.Sc.

Thema:

Dauerfestigkeitsuntersuchungen von mittels selektiven Laserschmelzens
hergestellten piezoelektrischen Aktormodulen
*Fatigue Strength Analysis of via Selective Laser Melting Generated
Piezoelectric Actuator Modules*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen

Fachbereich Maschinenbau

Petersenstr. 30
64287 Darmstadt

Telefon: +49 6151 16-2156
Telefax: +49 6151 16-3356

Adaptronik beschreibt eine interdisziplinäre Technologie, mit der sich autonome Struktursysteme realisieren lassen, die sich selbständig an sich verändernde Randbedingungen anpassen. Diese sogenannten adaptiven Strukturen benötigen strukturintegrierte Aktor- und Sensorsysteme sowie eine ebenfalls strukturintegrierte, echtzeitfähige und energieautarke Regelungstechnik. Im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA ist ein innovativer Ansatz zur Herstellung piezoelektrischer Aktormodule entwickelt worden, in dem piezoelektrische Aktoren mittels selektiven Laserschmelzens (kurz: SLM) vollständig in ein metallisches Gehäuse integriert werden. Charakteristisch für SLM als additives Fertigungsverfahren ist der schichtweise Aufbau von Bauteilen direkt aus 3D-CAD-Daten ohne werkstückspezifische Werkzeuge.

Gegenstand der Masterarbeit sind Untersuchungen zur Dauerfestigkeit der entwickelten SLM-Gehäuse. Dabei sind zunächst geeignete Prüfmethode und Versuchspläne zu definieren, mittels derer sich valide Aussagen zur Dauerfestigkeit der SLM-Gehäuse treffen lassen. Darauf aufbauend sind experimentelle Untersuchungen am Fraunhofer LBF zur Dauerfestigkeit des verwendeten Edelstahl 1.4542 und später der SLM-Gehäuse durchzuführen. Dabei sind im Wesentlichen folgende Arbeitspakete (nicht abschließend) zu bearbeiten:

- Aufarbeitung des Stands der Technik zu Prüfmethode und -techniken für Dauerfestigkeitsuntersuchungen sowie zu Dauerfestigkeit von SLM-Werkstoffen und Bauteilen
- Erarbeitung von Anforderungen an die Dauerfestigkeit von mittels SLM hergestellten Piezo-Aktorgehäusen
- Entwicklung einer geeigneten Prüfmethode und Versuchsanordnung für Dauerfestigkeitsuntersuchen von SLM-Proben aus 1.4542 sowie experimentelle Durchführung dieser (u.a. unter Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit)
- Erarbeitung von kritischen Einflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit von mittels SLM hergestellten Piezo-Aktorgehäusen (ggf. unter Zuhilfenahme vorhandener mechanischer ANSYS Simulationsmodelle)
- Entwicklung einer geeigneten Prüfmethode und Versuchsanordnung für Dauerfestigkeitsuntersuchen von SLM-Aktorgehäusen sowie experimentelle Durchführung dieser
- Versuchsauswertung und Diskussion

Die Arbeit wird im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) durchgeführt und von Dipl.-Ing. David Flaschenträger (LBF) mitbetreut.

Beginn: 1. Oktober 2013
Abgabe: 31. März 2014
Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Hanns Stoffregen

Prof. Dr.-Ing. E. Abele

Erklärung

1. Hiermit erkläre ich, die vorliegende Masterarbeit ohne die Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Bad Homburg, 11. März 2014

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

2. Folgende Einverständniserklärung ist unabhängig vom Prüfungsverfahren zur Masterprüfung (ein Exemplar verbleibt bei den Prüfungsakten) und ohne Einfluss auf die Bewertung der Masterarbeit. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass Sie mit der Aufnahme in die Bibliothek nicht einverstanden sind [siehe Ziffer 2b].

- a. Mit ist bekannt, dass ein Exemplar der Masterarbeit Bestandteil der Prüfungsakte wird und bei der TU Darmstadt verbleibt [§19 Abs. 7 Diplomprüfungsordnung / Allgemeiner Teil (DPO/AT) vom 15. Juli 1991 (Amtsblatt 1992, S.23) in der Fassung der zweiten Änderung vom 7. Februar 1994 (Amtsblatt S. 441)].

- b. Ich bin damit

einverstanden

dass die Masterarbeit in den Bibliotheksbestand der TU Darmstadt aufgenommen wird und öffentlich zugänglich gemacht wird.

Bad Homburg, 11. März 2014

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

3. Die TU Darmstadt bittet Sie im Interesse eines freien Informationsaustausches, ihr Urheberrecht an der Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken nutzen zu dürfen. Sie können die Nutzung Ihres Urheberrechts durch die TU Darmstadt ohne Angabe von Gründen und ohne nachteilige Folgen für die Bewertung der Arbeit verweigern.

Ich bin damit

einverstanden

dass die TU Darmstadt das Urheberrecht an meiner Masterarbeit zu wissenschaftlichen Zwecken nutzen kann.

Bad Homburg, 11. März 2014

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Verwendete Formelzeichen und Einheiten	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Vorgehensweise.....	2
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Selektives Laserschmelzen	4
2.1.1 Fertigungsablauf beim SLM	4
2.1.2 Einrichtung und Werkstoffe zum SLM am PTW	8
2.2 Prüfmethode der Schwingfestigkeit	8
2.2.1 Dauerschwingversuch	11
2.2.2 Umlaufbiegeversuch.....	19
2.3 Prüftechniken und Analyse der Schwingfestigkeit.....	20
2.3.1 Treppenstufenverfahren.....	20
2.3.2 Perlschnurverfahren.....	21
2.3.3 Statistische Auswertung durch Streubänder	22
2.4 Prüfmaschinen am LBF	24
2.5 Schwingfestigkeitsprüfung von SLM-Proben	25
2.5.1 Bereits eingesetzte Prüfbedingungen und Versuchsaufbauten	25
2.5.2 Bekannte Ergebnisse von Schwingfestigkeitstests an SLM-Proben.....	32
2.6 Schwingfestigkeitsprüfung von SLM-Bauteilen	39
3 Versuchsplanung und -durchführung	42
3.1 Versuchsplanung	42
3.1.1 Proben- und Bauteilherstellung	43
3.1.2 Prüfmethode und -technik	45
3.1.3 Gestaltung der Schwingfestigkeitsproben.....	49
3.1.4 Prüfung der Probendichte	52
3.1.5 Prüfmaschine und Versuchsaufbau für Probengeometrien.....	53
3.1.6 Versuchsplan – Probengeometrien.....	55
3.1.7 Abschätzung kritischer Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse – Auswahl der Prüfgeometrie	57
3.1.8 Prüftechnik - Aktormodulgehäuse	61
3.1.9 Versuchsaufbau - Aktormodulgehäuse.....	62
3.1.10 Versuchsplan - Aktormodulgehäuse.....	63
3.2 Versuchsdurchführung.....	64
3.2.1 Herstellung der Proben mittels SLM	66
3.2.2 Herstellung der Aktormodulgehäuse mittels SLM	69
3.2.3 Ermittlung Schwingfestigkeit der SLM-Proben	70
3.2.4 Experimentelle Analyse der Probendichte	79

3.2.5	Ermittlung der Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse	80
4	V Versuchsergebnisse	85
4.1.1	Auswertung der Probengeometrien-Versuche in Form von Wöhlerlinien	85
4.1.2	Auswertung zur Ermittlung des Oberflächeneinflusses auf die Schwingfestigkeit von Probengeometrien	90
4.1.3	Auswertung der Bruchbeschaffenheit der Probengeometrien	92
4.1.4	Auswertung des Nachbehandlungseinflusses auf Probengeometrien	95
4.1.5	Auswertung weiterer Einflüsse auf die Schwingfestigkeit der Probengeometrien	98
4.1.6	Auswertung der Aktormodulgehäuse-Versuche in Form von Wöhlerlinien.....	101
4.1.7	Auswertung weiterer Einflüsse auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse	106
5	D Diskussion der Ergebnisse.....	109
5.1	Vergleich nachbearbeiteter Proben aus dem Werkstoff 1.4542.....	109
5.2	Vergleich abgedrehter und unbehandelter SLM-Proben.....	110
5.3	Vergleich der Schwingfestigkeitsergebnisse von Bauteilen.....	113
6	Z Zusammenfassung.....	117
7	A Ausblick.....	120
Anhang.....		CXXI
Technische Zeichnungen der Probengeometrien		CXXI
Technische Zeichnungen der Aktormodulgehäuse.....		CXXV
Fotos der gebrochenen Probengeometrien.....		CXXVIII
Fotos der geprüften Aktormodulgehäuse		CXXXI
Berechnung zur Genauigkeit der ermittelten Dichte von abgedrehten SLM Proben: ...		CXXXIII
Berechnung der Kerbwirkung bei Proben und Aktormodulgehäusen		CXXXV
Ergebnisse zum Stand der Technik von SLM-Proben.....		CXXXVII
Auswahl von Aktormodulgehäusen.....		CXXLI
Literaturverzeichnis		CXXLII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise dieser Masterarbeit	2
Abbildung 2: Datenverarbeitung für die additive Fertigung (Quelle: VDI 3404 2009, S. 7).....	5
Abbildung 3: Prozessschritte des SLM (Quelle: abgeändert nach Propawe 2005, S. 225).....	6
Abbildung 4: Treppenstufeneffekt infolge des Schichtbauprinzips (Quelle: abgeändert nach Danjou, Koehler 2010, S. 3)	7
Abbildung 5: Mechanismus des SLM (Quelle: abgeändert nach Abe et al. 2007a, S. 286).....	7
Abbildung 6: Baumdiagramm zur Einteilung der Schwingfestigkeit (Quelle: Sonsino 2008, S. 79)	9
Abbildung 7: Schwingfestigkeitskennwerte in Abhängigkeit der Zugfestigkeit R_m (Quelle: Roos, Maile 2011, S. 100)	10
Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Spannung bei schwingender Beanspruchung (Quelle: DIN 50 100 1978, S. 2)	11
Abbildung 9: Mögliche Belastungsbereiche in der Schwingfestigkeitsprüfung (Quelle: Roos, Maile 2011, S. 101)	12
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Wöhlerkurve (Typ I und Typ II) (Quelle: abgeändert nach Roos, Maile 2011, S. 103)	13
Abbildung 11: Ergebnisse eines Wöhlerversuches mit zehn Proben im Wöhlerdiagramm (Quelle: Haibach 2006, S. 24)	16
Abbildung 12: Wöhlerkurven unterschiedlicher Institute zu den Versuchsergebnissen aus Abbildung 11 (Quelle: Haibach 2006, S. 24).....	16
Abbildung 13: Anrisskennlinie für den Werkstoff NiCr20TiAl bei Raumtemperatur (Quelle: abgeändert nach Roos, Maile 2011, S. 105)	17
Abbildung 14: Minderung der Dauerfestigkeit in Abhängigkeit von Rautiefe und Zugfestigkeit (Quelle: Grubisic, Sonsino 1992, S.105)	19
Abbildung 15: Ergebnisse eines Treppenstufenversuches (Quelle: abgeändert nach Lin 2001, S. 79)	21
Abbildung 16: Statistische Auswertung der Schwingspielzahlen bis zum Bruch durch Streubandermittlung (Quelle: nach Haibach 2006, S. 31)	22

Abbildung 17: Auswertung mittels Schema und Auftrag der Überlebenswahrscheinlichkeit im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz (Quelle: Haibach 2006, S. 30; nach Rossow 1964, S. 146, 147)	23
Abbildung 18: Probenform eins mit tangentialem Übergangsradius zwischen Testbereich und Probenenden (Quelle: nach ASTM E 466 1982, S. 2)	26
Abbildung 19: Probenform zwei mit kontinuierlichem Radius zwischen den Probenenden (Quelle: nach ASTM E 466 1982, S. 2)	26
Abbildung 20: Orientierung der SLM-Bauteile im Bauraum (Quelle: abgeändert nach VDI 3405-2 2012, S. 9)	27
Abbildung 21: Wöhlerdiagramm (logarithmisch) mit beispielhaften Wöhlerlinien zu Schwingfestigkeitsversuchen mit SLM-Proben diverser Versuchsreihen	35
Abbildung 22: Wöhlerlinien von SLM-Proben aus nicht gehärtetem Edelstahl diverser Versuchsreihen	36
Abbildung 23: Poröses Bauteil zur Prüfung der Schwingfestigkeit im Druckschwellbereich (Quelle: Yavari et al. 2013, S. 4855)	39
Abbildung 24: Wöhlerkurven von vier Versuchsreihen zur Schwingfestigkeit poröser Bauteile im Druckschwellbereich abgeändert nach (Quelle: Yavari et al. 2013, S. 4852)	40
Abbildung 25: Technische Zeichnung der dünnwandigen Titan-Schwingfestigkeitsprobe (Quelle: Lipinski et al. 2013, S. 277)	40
Abbildung 26: Versuchsergebnisse und resultierende Wöhlerlinien von unbehandelten und wärmebehandelten dünnwandigen SLM-Titan-Proben (Quelle: abgeändert nach Lipinski et al. 2013, S. 277)	41
Abbildung 27: Übersicht zur Ermittlung der Schwingfestigkeit in sechs Schritten (Quelle: abgeleitet aus Morgenstern et al. 2006, S. 7)	43
Abbildung 28: Streifen-Belichtungsstrategie beim SLM (Quelle: EOS GmbH 2009b)	44
Abbildung 29: Herstellung des Aktorgehäuses mittels SLM (Quelle: abgeändert nach Stoffregen et al. 2013, S. 3)	45
Abbildung 30: Prüfmaschine Hydropuls MHF des Unternehmens IST	53
Abbildung 31: Eingespannte Probe C_00 in der Prüfmaschine Hydropuls MHF der Firma IST	54

Abbildung 32: Darstellung des logischen Ablaufs der einzelnen Versuchsreihen zur Prüfung von SLM-Proben	56
Abbildung 33: Aufbau des Aktorgehäuses (Quelle: abgeändert nach Stoffregen et al. 2011, S. 8)	57
Abbildung 34: Nach mechanischem Simulationsmodell zu erwartende Spannungen am Gehäuse (links) – Lage der maximalen Spannung am Aktormodul (rechts)	58
Abbildung 35: Ablauf der Übertragung der Werkstoff-Schwingfestigkeit auf Bauteile (Quelle: abgeändert nach Sonsino 1995)	58
Abbildung 36: Anschauungsmodelle der Aktormodulgehäuse der Typen V02T18, V02T08 und V02T05 (von links nach rechts)	61
Abbildung 37: Mögliche Lage der durch die Simulation erwarteten Spannungen im Vergleich zur ermittelten Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen unbearbeiteter Proben	61
Abbildung 38: Aktormodulgehäuse mit Bereich zum Klemmen in Prüfmaschine	63
Abbildung 39: Logische Reihenfolge der durchgeführten Versuche dieser Masterarbeit	65
Abbildung 40: Anordnung der Proben für Baujob A_00_1 (D_00, C_00, B_00 von links nach rechts)	66
Abbildung 41: SLM-Bauplatzform mit Baujob A_00_1	67
Abbildung 42: Anordnung der Proben für Baujob A_00_2 (C_10, D_00, B_00 von links nach rechts)	68
Abbildung 43: Draufsicht in Baujob A_00_2 hergestellten Proben auf der Bauplatzform	69
Abbildung 44: Fertig hergestellte Proben B_00, D_00 und C_10 (von links nach rechts) in Baujob A_00_2	69
Abbildung 45: a) Anordnung der Aktormodulgehäuse der Typen V02T08 & V02T05 im Baujob A_20_2 b) Anordnung der Aktormodulgehäuse des Typs V02T18 im Baujob A_20_3 ..	70
Abbildung 46: a) Hergestellte Käppchen für die Gehäuse V02T05, V02T08 und V02T18 b) Hergestellte Aktormodulgehäuse V02T05, V02T08 und V02T18 (von links nach rechts)	70
Abbildung 47: Probe C_00 mit einer einseitig um 7,78 mm verkürzter Einspannlänge.....	71

Abbildung 48: Belastungshorizonte der Proben C_00 nach dem Treppenstufenverfahren	72
Abbildung 49: Probe der Versuchsreihe C_10 nach Bruch eingespannt in Prüfmaschine	73
Abbildung 50: Belastungshorizonte der Proben C_10 nach dem Treppenstufenverfahren	73
Abbildung 51: Schematische Darstellung der Probenoberfläche (Spierings et al. 2013, S. 91)	75
Abbildung 52: Oberflächenaufnahme der unbearbeiteten Probe C_10_20 (1,4 mm x 1 mm) .	75
Abbildung 53: Versuchsergebnisse der Wöhlerversuche unbearbeiteter Proben.....	76
Abbildung 54: Abgedrehte Probe B_00_20.....	76
Abbildung 55: Oberflächenaufnahme der bearbeiteten Probe B_00_19	77
Abbildung 56: Rauigkeitsprofil der Probe B_00_19 entlang des roten Pfades	77
Abbildung 57: Versuchsergebnisse des Wöhlerversuches mit nachbearbeiteten Proben.....	78
Abbildung 58: Belastungshorizonte der Proben B_00 nach dem Treppenstufenverfahren	79
Abbildung 59: Belastungshorizonte der Aktormodulgehäuse V02T05 nach dem Treppenstufenverfahren	82
Abbildung 60: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfung der Aktormodulgehäuse V02T05, V02T08 und V02T18 (Wöhlerversuch)	83
Abbildung 61: Darstellung der Wöhlerlinie für Versuchsreihe C_00 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen	86
Abbildung 62: Darstellung der Wöhlerlinie der Versuchsreihe C_10 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen	87
Abbildung 63: Darstellung der gemeinsamen Wöhlerlinie aus den Versuchsreihen C_00 und C_10 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen.....	87
Abbildung 64: Darstellung der Wöhlerlinie unbearbeiteter Proben der Versuchsreihe B_00 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen....	88
Abbildung 65: Wöhlerlinie unbearbeiteter und nachbearbeiteter Proben.....	90
Abbildung 66: Bruchausgang der Probe C_00_13 (oben) ($N=1.932.924$, $\sigma_o = 220$ N/mm ²)	92
Abbildung 67: Probe C_10_5 gebrochen mit Oberflächenrissen ($N=173.644$, $\sigma_o = 400$ N/mm ²)	93
Abbildung 68: Obere Bruchkante der gedehnten Probe B_00_4 ($N = 139.007$, $\sigma_o = 500$ N/mm ²)	93

Abbildung 69: Untere Bruchfläche mit Bruchausgang der Probe C_10_4 (N= 92.823, $\sigma_0 = 500 \text{ N/mm}^2$)	93
Abbildung 70: Untere Bruchfläche (links) und zugehöriger Bruchausgang (rechts) der Probe B_00_9 (N= 860.739, $\sigma_0 = 495 \text{ N/mm}^2$)	94
Abbildung 71: Bruchausgang der Probe B_00_14 (unten) (N = 8.092.655, $\sigma_0 = 495 \text{ N/mm}^2$)	94
Abbildung 72: Obere Bruchfläche der Probe C_00_8 (N = 916.984, $\sigma_0 = 200 \text{ N/mm}^2$).....	95
Abbildung 73: Obere Bruchfläche der Probe C_10_20 (N = 943.036, $\sigma_0 = 240 \text{ N/mm}^2$).....	95
Abbildung 74: Härteprüfung der Probengeometrien	96
Abbildung 75: a) Querschliffbild unbehandelte Probe C_10_14 (N = 10^7 , $\sigma_0 = 240 \text{ N/mm}^2$) b) Querschliffbild abgedrehte Probe B_00_8 (N = 10^7 , $\sigma_0 = 490 \text{ N/mm}^2$)	96
Abbildung 76: Längsschliffbild unbehandelte Probe C_10_14 (N = 10^7 , $\sigma_0 = 240 \text{ N/mm}^2$)...	97
Abbildung 77: a) Längsschliffbild unbehandelte, unbelasteter Probe b) Längsschliffbild unbehandelte Probe C_10_14 (N = 10^7 , $\sigma_0 = 240 \text{ N/mm}^2$) c) Längsschliffbild unbehandelte Probe C_00_20 (N = 10^7 , $\sigma_0 = 200 \text{ N/mm}^2$)	97
Abbildung 78: Aufteilung der Bauplattform in Herstellungsquadranten (Beschichtung beginnt bei Quadranten I, IV, VII)	98
Abbildung 79: Wöhlerdiagramm zur Darstellung der Abhängigkeit von Herstellungsposition zur Schwingspielzahl bei Probengeometrien.....	98
Abbildung 80: Benennung der einzelnen Bruchstellen anhand einer unbehandelten Probe ...	99
Abbildung 81: Verteilung der Bruchlagen über alle gebrochenen Proben.....	99
Abbildung 82: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_10 mit und ohne korrigierte Durchmesser	100
Abbildung 83: Darstellung der Wöhlerlinie für Aktormodule V02T05 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen	102
Abbildung 84: Darstellung der Wöhlerlinie für Aktormodule V02T08 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen	102
Abbildung 85: Darstellung der Wöhlerlinie für Aktormodule V02T18 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen	103

Abbildung 86: Ergebnisse zur Schwingfestigkeit von Aktormodulen im Vergleich mit der Wöhlerlinie unbehandelter Proben	104
Abbildung 87: Aufteilung der Bauplattform in Herstellungsquadranten (Beschichtung beginnt bei Quadranten 1,2)	106
Abbildung 88: Wöhlerdiagramm zur Darstellung der Abhängigkeit von Herstellungsposition zur Schwingspielzahl für Aktormodulgehäuse V02T05	106
Abbildung 89: Benennung der einzelnen Anrisslagen eines Aktormodulgehäuses	107
Abbildung 90: Verteilung der Anrisslagen über alle gebrochenen Aktormodulgehäuse	107
Abbildung 91: Vergleich der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Forschungseinrichtungen von nachbehandelten SLM-Edelstahl-Proben.....	109
Abbildung 92: Wöhlerdiagramm mit abgedrehten Standardproben im Vergleich zu nachbearbeiteten SLM-Proben aus dem Werkstoff 1.4542	110
Abbildung 93: Vergleich der Versuchsergebnisse von behandelten und unbehandelten SLM-Proben unterschiedlicher Werkstoffe	111
Abbildung 94: Vergleich unbehandelter mit nachbearbeiteten SLM-Proben aus Edelstahl....	112
Abbildung 95: Vergleich der Versuchsergebnisse der Aktormodulgehäuse mit dünnwandigen Titanproben von Lipinski et al. (2013) und unbearbeiteten SLM-Proben	114
Abbildung 96: Technische Zeichnung Probengeometrie B_00	CXXI
Abbildung 97: Technische Zeichnung Probengeometrie C_00	CXXII
Abbildung 98: Technische Zeichnung Probengeometrie D_00	CXXIII
Abbildung 99: Technische Zeichnung Probengeometrie D_00 bearbeitet	CXXIV
Abbildung 100: Technische Zeichnung Aktormodulgehäuse V02T05	CXXV
Abbildung 101: Technische Zeichnung Kämpchen für Aktormodulgehäuse V02T05.....	CXXV
Abbildung 102: Technische Zeichnung Aktormodulgehäuse V02T08	CXXVI
Abbildung 103: Technische Zeichnung Kämpchen für Aktormodulgehäuse V02T08.....	CXXVI
Abbildung 104: Technische Zeichnung Aktormodulgehäuse V02T18	CXXVII
Abbildung 105: Technische Zeichnung Kämpchen für Aktormodulgehäuse V02T18.....	CXXVII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Prüfverfahren zur Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit nach Beanspruchungsgruppen (Quelle: nach Bagel, Schulze 2005, S. 108; Chan et al. 2013; VDI 3405-2 2012, S. 12)	9
Tabelle 2: Grenzwahungsspielzahlen für den Bereich der Dauer- beziehungsweise Langzeitfestigkeit unterschiedlicher Quellen	14
Tabelle 3: Auswertungsschema zur Berechnung der Langzeitfestigkeit mit $P_{ü} = 50\%$ des Treppenstufenversuches aus Abbildung 14.....	24
Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuchsdaten zum Stand der Technik: „Schwingfestigkeit von SLM-Proben“	28
Tabelle 5: Gegenüberstellung von Zugfestigkeit und Langzeitfestigkeit von SLM-Werkstoffen.....	37
Tabelle 6: Vergleichstabelle zum Dauerschwingversuch gegenüber dem Umlaufbiegeversuch	47
Tabelle 7: Eigenschaften zweier Probenformen für den Schwingversuch (Quelle: nach ASTM E 466 1982, S. 2)	49
Tabelle 8: Spezifikationen der Prüfmaschine Hydropuls MHF der Firma IST (Quelle: Instron 2003, S. 1)	54
Tabelle 9: Versuchsplan zur Prüfung der Schwingfestigkeit von SLM-Proben	55
Tabelle 10: Mögliche Parameter für Aktormodulgehäuse	59
Tabelle 11: Auflistung der mittels SLM hergestellten Aktormodulgehäuse.....	60
Tabelle 12: Versuche zur Ermittlung der Schwingfestigkeit von Aktormodulgehäusen.....	63
Tabelle 13: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Schwingfestigkeit	64
Tabelle 14: Fertigungsparameter für die Herstellung der SLM-Proben mit EOS M 270	67
Tabelle 15: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_00 unbearbeiteter Probengeometrie.....	71
Tabelle 16: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_10 unbearbeiteter Probengeometrie.....	74
Tabelle 17: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe B_00 nachbearbeiteter Probengeometrie ..	78
Tabelle 18: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche des Aktormodulgehäuses V02T05	81

Tabelle 19: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche der Aktormodulgehäuse V02T08.....	83
Tabelle 20: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche der Aktormodulgehäuse V02T18.....	84
Tabelle 21: Statistische Auswertung der ermittelten Wöhlerlinien der SLM-Proben	89
Tabelle 22: Statistische Auswertung der ermittelten Wöhlerlinien der SLM-Aktormodulgehäuse	103
Tabelle 23: Auswertung der Wöhlerlinien im Vergleich zu unbehandelten Proben.....	105
Tabelle 24: Vergleich der Schwingfestigkeiten von Bauteilen.....	115
Tabelle 25: Aufnahmen der gebrochenen abgedrehten Proben sortiert nach Belastungshorizont	CXXVIII
Tabelle 26: Aufnahmen der gebrochenen unbehandelten Proben sortiert nach Belastungshorizont	CXXIX
Tabelle 27: Aufnahmen der Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 sortiert nach Belastungshorizonten	CXXXI
Tabelle 28: Aufnahmen der Aktormodulgehäuse des Typs V02T08 und V02T18 sortiert nach Belastungshorizonten	CXXXII
Tabelle 29: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse zum Stand der Technik: „Schwingfestigkeit von SLM-Proben“	CXXXVII
Tabelle 30: Auswahl zur Verfügung stehender Aktormodulgehäuse und Belastungsfälle für die experimentellen Schwingfestigkeitsuntersuchungen	CXLI

Abkürzungsverzeichnis

AdRIA	Adaptronik - Research, Innovation, Application
AlSi10Mg	Aluminiumlegierung
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computer Numerical Controlled
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
Edelstahl 1.4542	Stahlsorte (17-4 PH / Herstellerbezeichnung GP1)
Edelstahl 1.4540	Stahlsorte (15-5 PH / Herstellerbezeichnung PH-1)
Edelstahl 1.4404	Stahlsorte (Herstellerbezeichnung 316L)
EMB	Electron Beam Melting - Elektronenstrahlschmelzen
EN	Europäische Norm
EOS	Electro Optical System
FEM	Finite Elemente Methode
LBF	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit früher: Laboratorium für Betriebsfestigkeit
LOEWE	Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz
Hastelloy X	Nickelbasislegierung (Ni 49,5/ Cr 22/ Fe 18/ Mo 9 / Co 1/ W)
HCF	High Cycle Fatigue
HIP	hot isostatic pressing – Heiß-Isostatisches Pressen
ISO	International Organisation for Standardization
IST	Unternehmen: Instron Structural Testing Systems (Zusammenschluss der Unternehmen Instron + Schenk)
kgf	kilogram-force (physikalische Einheit für Gewichtskraft)
MHF	medium high frequency



Polyamid 12	Kunststoff-SLS-Werkstoff (Herstellerbezeichnung: PA12)
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt
SAFD	Statistical Analysis of Fatigue Data
sim.	simuliert
SLS	Selektives Laser Sintern
SLM	Selektives Laserschmelzen
STL	Surface Tessellation Language
S.	Seite
TUD	Technische Universität Darmstadt
Ti-6Al-4V	Titanlegierung 3.7165
u.	und
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
3D	3 dimensional
&	und

Verwendete Formelzeichen und Einheiten

°	Grad (Winkel / Temperatur)
A	Fläche
a	Parameter der Weibull-Verteilung
bar	Bar
C	Celsius
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d	Prüfdurchmesser Probe
d	Stufenabstand
d _a	mittlerer Außendurchmesser Aktorbalg
d _i	mittlerer Innendurchmesser Aktorbalg
d _{max}	Einspanndurchmesser Probe
F	Kraft
g	Gramm
g	Erdbeschleunigung 9,81 m/s ²
h	Stunde
Hz	Herz
i	Indexwert
j	Indexwert
K ₁	technologischen Größeneinflussfaktor
K _F	Einflussfaktor der Oberflächenrauheit
K _V	Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung
k	Kilo
m	Milli
m	Masse

m	Parameter der Weibull-Verteilung
μm	Mikrometer
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
N	Newton
N	Schwingspielzahl
N	Anzahl der Versuche
n	Anzahl der Versuche
P _ü	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
R_a	arithmetischer Mittelwert der Rauheit des Profils
R_m	Zugfestigkeit
R_z	maximaler Abstand zwischen Profilspitze und Profital
r	Radius Aktormodulgehäuse
r_K	Kerbradius Aktormodulgehäuse
s	Sekunde
T	Streuspanne
t	Wanddicke Aktormodulgehäuse
V	Volumen
α	Kerbwinkel Aktormodulgehäuse
α_K	Formzahl
β	Kerbwirkung
δ	Dichte
ρ	Radius im Kerbgrund
ρ^*	Ersatzstrukturlänge
σ_a	Spannungsamplitude
σ_{bW}	Biegewechselfestigkeit

σ_D	ertragbare Spannungsamplitude der Grenzschwingspielzahl (Dauerfestigkeit)
$\sigma_{D_{P\ddot{u}}=50}$	Dauerfestigkeit mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %
$\sigma_{i=0}$	Spannung der untersten Stufe im Treppenstufenverfahren
σ_m	Mittelspannung
σ_o	Oberspannung
σ_S	Zug-Schwellfestigkeit
σ_{sch}	Zug-Schwellfestigkeit
σ_{Sim}	simulierte Spannung
σ_u	Unterspannung
σ_{zdW}	Zug/Druck-Wechselfestigkeit
ω	Öffnungswinkels der Kerbflanken
Δ	Differenz

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Adaptronik ist eine interdisziplinäre Technologie, die durch Verwendung fortgeschrittener Methoden der Strukturmechanik und Signalverarbeitung und unter Einbeziehung neuartiger Aktoren und Sensoren eine Überwachung und Verbesserung mechanischer Eigenschaften von Produkten ermöglicht. Außerdem lassen sich adaptive Strukturen realisieren, das heißt autonome Struktursysteme, die sich selbstständig an verändernde Randbedingungen anpassen (Hanselka et al. 2013, S.1; Eul 2011, S. 42). Einsatzschwerpunkte der Adaptronik liegen insbesondere im Leichtbau, so dass strukturintegrierte Aktor- und Sensorsysteme sowie eine strukturintegrierte, echtzeitfähige und energieautarke Regelungstechnik benötigt werden (Breitbach et al. 2004, S. 1).

Im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA ist ein innovativer Ansatz zur Herstellung piezoelektrischer Aktormodule entwickelt worden, bei dem Piezo-Aktoren durch die Fertigungstechnologie des „Selektiven Laserschmelzens“ (kurz: SLM) vollständig in einer metallischen Umhausung integriert werden können und somit der Piezo-Aktor zur Erhöhung der Lebensdauerleistung vor Umwelteinflüssen geschützt ist (Stoffregen et al. 2011, S. 1-3). Die Herstellung durch additive Fertigungsverfahren und damit dem schichtweisen Aufbau von Bauteilen direkt aus 3D-CAD-Daten ohne werkstückspezifische Werkzeuge bietet außerdem den Vorteil einer schnellen, kostengünstigen Fertigung von Einzelteilen und Prototypen sowie variabler Anpassung des Designs und damit der Anbindung an passive Strukturen (Bremen et al. 2012, S. 1).

Da sowohl das Aktormodulgehäuse als auch viele weitere Bauteile in der Praxis einer zyklischen Belastung unterliegen, ist es wichtig, Kenntnisse über das Schwingfestigkeitsverhalten des SLM-Werkstoffes beziehungsweise der SLM-Bauteile zu erlangen, um abschätzen zu können, ob diese zugemuteten, erwarteten oder möglichen Beanspruchungen auf die Dauer oder für eine vorgesehene Zeit widerstehen (Pohl 1956, S. 1, Brandl et al. 2011, S. 2).

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Ermittlung der Lebensdauer beziehungsweise der Langzeitfestigkeit von bereits entwickelten SLM-Gehäusen unter zyklischer Belastung. Durch

geeignete experimentelle Untersuchungen soll die Belastung, unter der diese Aktormodulgehäuse langzeitfest sind, möglichst genau bestimmt werden. Dazu werden zunächst Schwingfestigkeitsversuche mit SLM-Proben zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk bei der Analyse liegt insbesondere auf dem Einfluss der Oberflächenrauheit, da die unbehandelten Aktormodule eine SLM typische Oberflächenrauheit von $R_z = 100 \mu\text{m}$ aufweisen.

1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise in dieser Masterarbeit ist in Form eines Ablaufdiagrammes in Abbildung 1 dargestellt. Zu Beginn wird der Stand der Technik der bekannten Prüfmethode und -techniken für Schwingfestigkeitsuntersuchungen sowie der Fertigungstechnologie des SLM anhand der themenspezifischen Literatur aufgearbeitet. Anschließend erfolgt die Recherche nach bereits durchgeführten Schwingfestigkeitsuntersuchungen von mittels SLM hergestellten Proben und Bauteilen sowie eine Auswahl der für die folgenden Versuche genutzten Prüfmethode, Prüftechnik, Prüfmaschine und Probengeometrie. Für die zielführende Prüfung der SLM-Piezo-Aktorgehäuse müssen außerdem Anforderungen an die Langzeitfestigkeit der Gehäuse erarbeitet werden.

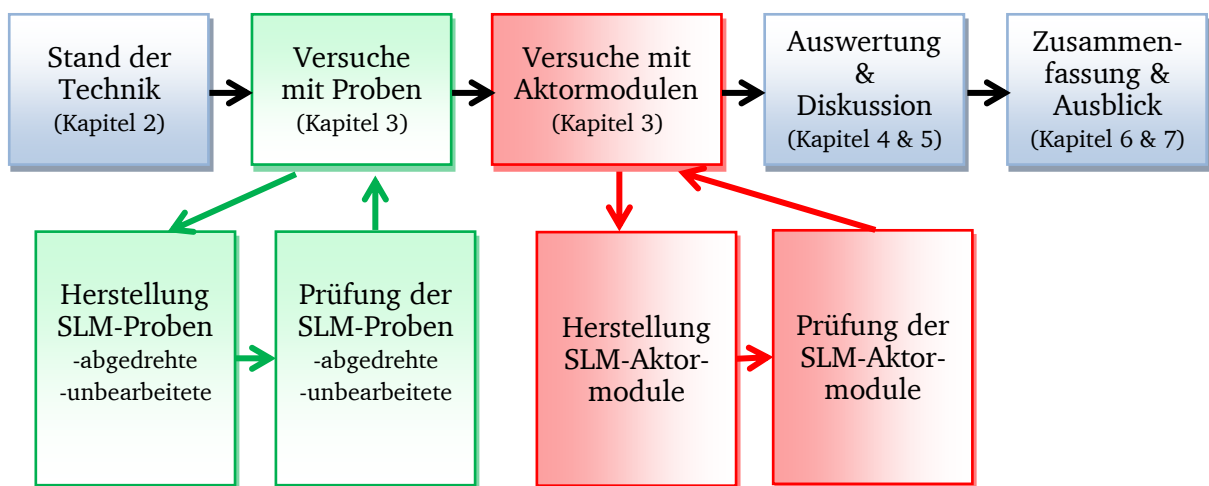


Abbildung 1: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise dieser Masterarbeit

Zur Ermittlung der Langzeitfestigkeit des Werkstoffs werden zunächst Proben geeigneter Prüfgeometrien mittels SLM hergestellt und getestet. Dabei erfolgt die Erstellung von Wöhlerlinien durch Versuche, die den Einfluss der Oberflächenrauheit aufzeigen. In einem ersten Versuch werden daher spanend nachbearbeitete Proben verwendet. Im Folgenden



werden unbehandelte Proben geprüft. Zum Abschluss der Arbeit werden die gewonnenen Erkenntnisse der Prüfgeometrieversuche auf das SLM-Gehäuse unter Zuhilfenahme der im Betrieb erwarteten lokalen maximalen Spannungen übertragen und experimentell verifiziert. Versuche zur Ermittlung der Schwingfestigkeit werden in dieser Masterarbeit im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) durchgeführt.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Technologie des SLM dargestellt. Anschließend werden die Begriffe zur Schwingfestigkeit anhand themenspezifischer Literatur aufgearbeitet und auf den Stand der Technik der entsprechenden Prüfmethode und -techniken eingegangen. Am Ende des Kapitels befindet sich die Analyse der bis zu diesem Zeitpunkt bereits durchgeführten Schwingfestigkeitsuntersuchungen von mittels SLM hergestellten Proben und Bauteilen.

2.1 Selektives Laserschmelzen

In der Fertigung lässt sich heute ein Trend zum immer kürzer werdenden Produktlebenszyklus beobachten (Buchbinder 2011, S. 1). Außerdem steigt die Nachfrage nach kleineren Losgrößen und individualisierten Produkten (Dreher 2004, S. 12), wie sie auch in der Adaption Anwendung finden (Stoffregen et al. 2011, S. 3-4). Das SLM lässt sich in die Gruppe „Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand“ einordnen (DIN 8580 2003, S. 4). Außerdem zählt es nach der VDI-Norm 3404 (2009, S. 11) zu den additiven Fertigungsverfahren. Durch den schichtweisen Aufbau ist es im Hinblick auf Geometrieänderungen ein besonders flexibles Verfahren und daher für die durch die Individualisierung entstehenden Anforderungen geeignet (VDI 3404 2009, S. 17). Typischerweise können kleine Bauteile innerhalb weniger Stunden produziert werden (Karunakaran et al. 2009, S. 1).

2.1.1 Fertigungsablauf beim SLM

Die Erstellung eines Bauteils mittels SLM kann in drei wesentliche Zeitabschnitte aufgeteilt werden: die eigentliche Produktionszeit sowie die Vor- und Nachbereitungszeit. In der Vorbereitungszeit wird die Anlage vorbereitet und das Pulver bereitgestellt. Die Nachbereitungszeit beinhaltet den Abkühlvorgang und die Entfernung des ungenutzten Pulvers (Bremen et al. 2012, S. 1). Für die Herstellung wird zunächst ein 3D-Modell des herzustellenden Bauteils, üblicherweise im STL-Datenformat, welches die Bauteiloberfläche in Dreiecksformen beschreibt, erstellt und an die maschinenzugehörige Software zur Generierung des Maschinendatensatz übergeben. Für die schichtweise Herstellung muss das generierte Modell, wie in Abbildung 2 dargestellt, gesliced werden, das heißt, es werden

Schichtinformationen aus dem CAD-Modell erstellt (Assmann 2003, S. 40; Gebhardt 2012, S. 4). Unter dem nachfolgenden Hatching ist die Erzeugung von einzelnen Vektoren, die die Belichtungsbahnen definieren, zu verstehen (Stamp 2009, S. 1841). Das 3D-Modell des herzustellenden Bauteils enthält neben dem Bauteil selbst bereits Informationen über dessen Orientierung im Bauraum. Außerdem sind dort bereits verfahrensbedingt notwendige Stützstrukturen angebracht (Meindl 2004, S. 10; Bremen et al. 2012, S. 36).

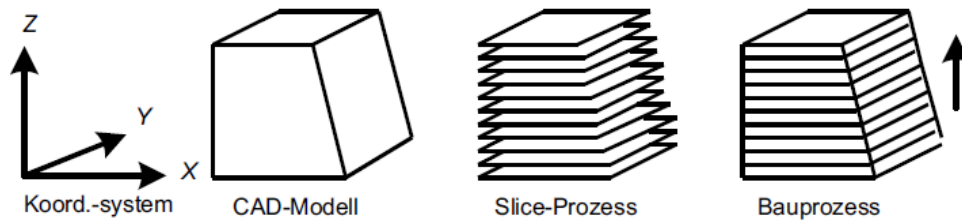


Abbildung 2: Datenverarbeitung für die additive Fertigung (Quelle: VDI 3404 2009, S. 7)

In der eigentlichen Produktionszeit lässt sich das SLM ebenfalls in drei Verfahrensschritte (siehe Abbildung 3) gliedern. Zuerst wird eine meist 20-100 μm dicke Pulverschicht auf die Bauplattform oder entsprechend auf die zuvor bearbeitete Schicht aufgetragen. Anschließend wird das Pulver gemäß den computergenerierten Konstruktionsdaten des geplanten Werkstücks an den vorgegebenen Stellen mittels Laserstrahl, welcher über Spiegel auf die definierte Bahn gelenkt wird, zum Schmelzen gebracht und somit mit der darunter liegenden Schicht verbunden (VDI 3403 2009, S. 17; Wiesner 2008, S. 54). Im dritten Schritt senkt sich die Fertigungsplattform um die Höhe einer Schichtdicke ab (Gebhardt 2012, S. 41) und es kann erneut mit dem Auftrag der nächsten Pulverschicht begonnen werden. So entsteht Schicht für Schicht das Werkstück (VDI 3403 2009, S. 6). Wenn die lose nebeneinanderliegenden Partikel im Pulverbett durch eine kurzzeitige thermische Aktivierung, zum Beispiel durch zu hohe Belichtungsgeschwindigkeit, lediglich selektiv an der Oberfläche angeschmolzen werden, resultiert nach Abkühlung ein Bauteil variierender Porosität (Hötter et al. 2012, S. 6). Werden die Partikel hingegen vollständig aufgeschmolzen, entsteht ein dichtes Bauteil (Gebhardt 2007, S. 44). Bei Metallpulvern kann eine Dichte von nahezu 100 % von den meisten Herstellern garantiert werden (VDI 3405-2 2012, S. 6, Wiesner 2008, S. 54). Um Verunreinigungen durch eine Oxidation während des Bauprozesses zu vermeiden, findet das SLM unter Sauerstoffausschluss in einer Argon- oder Stickstoffatmosphäre statt (Fockele 2005, S. 2; Guido 2012, S. 75). Das Pulverentfernen und Reinigen erfolgt typischerweise manuell durch Bürsten, mit Druckluft, durch Absaugen oder

Sandstrahlen (Gebhardt 2007, S. 42, VDI 3404 2009, S. 12). Nicht geschmolzenes Pulver kann gesiebt erneut dem Prozess zugeführt werden (Gebhardt 2007, S. 47).

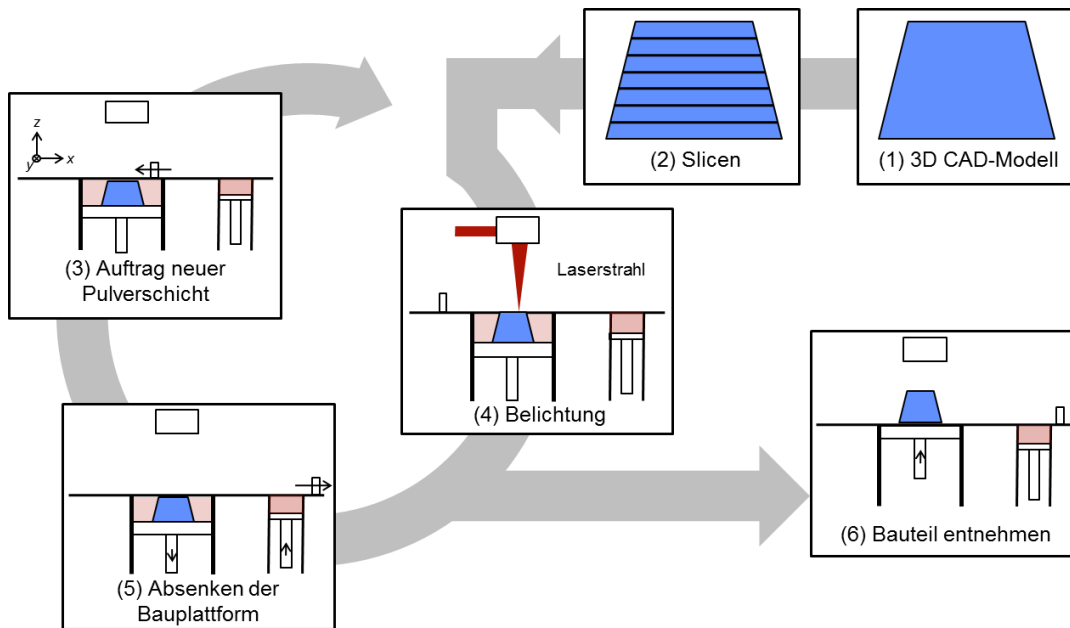


Abbildung 3: Prozessschritte des SLM (Quelle: abgeändert nach Propawe 2005, S. 225)

Nach dem Bauprozess wird die Supportstruktur der metallische Bauteile, welche zunächst von der Basisplatte abgetrennt werden, entfernt (Gebhardt 2007, S. 42). Dies erfolgt heute noch meist durch manuelle Nacharbeit. Das aus dem Pulver ausgepackte Bauteil kann dann entweder direkt verwendet oder nachbearbeitet werden. Typische Nachbehandlungen sind Oberflächenbearbeitung oder Wärmebehandlung (VDI 3404 2009, S. 7).

Verfahrensbedingte Einflüsse durch SLM

Durch den schichtweisen Aufbau des Bauteils kommt es an der Bauteiloberfläche zum sogenannten Treppenstufeneffekt (siehe Abbildung 4), welcher eine ausgeprägte Wirkung auf die Bauteiloberfläche hat (Sehr 2010, S. 78). Dieser Effekt tritt verstärkt an gewölbten sowie an zur Bauplattform geneigten Flächen auf. Die Bauflächen sollten daher möglichst senkrecht zur Schichtebene angeordnet werden (Meindl 2004, S. 94; Danjou, Koehler 2010, S. 3). Außerdem sollten Überhänge einen Winkel oberhalb von 60° aufweisen, um ein Verkleben des Beschichters zu vermeiden.

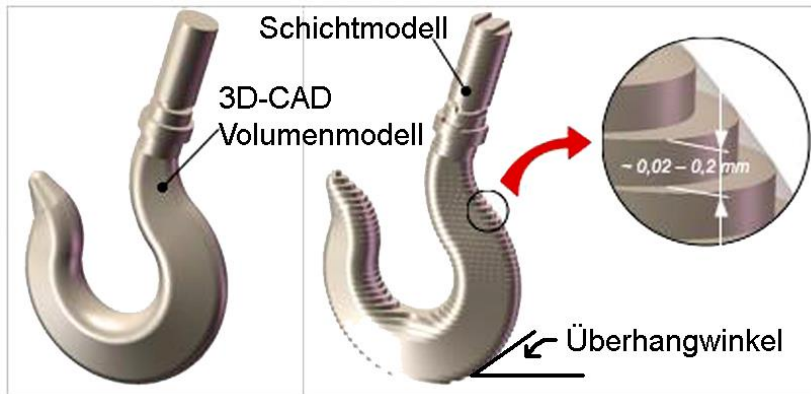
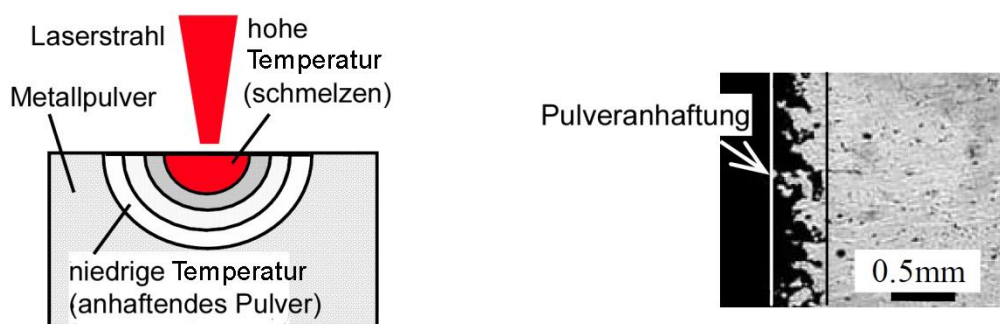


Abbildung 4: Treppenstufeneffekt infolge des Schichtbauprinzips
(Quelle: abgeändert nach Danjou, Koehler 2010, S. 3)

Des Weiteren kommt es beim SLM zur Haftung überflüssiger Pulverteilchen (siehe Abbildung 5) (Abe et al. 2007a, S. 913) an der Bauteiloberfläche, welche über Wärmeleitung thermisch aktiviert werden und dadurch an der Kontur ankleben (Gebhardt 2007, S. 48; Sehr 2010, S. 77). Die so erreichbare Oberflächengüte und Maßhaltigkeit ist durch die genannten Effekte für viele Anwendungsbereiche nicht ausreichend (Abe et al. 2007b, S. 286), so dass in der Regel eine meist noch manuelle Nacharbeit nötig ist (VDI 3404 2009, S. 7). Stabile Prozessbedingungen sind Voraussetzung für konstante mechanische Eigenschaften und zur Vermeidung ungewollter Porosität (Schröder 2012, S. 23). Auch die Scanstrategie und die Pulverauftragsrichtung haben einen Einfluss auf die Bauteildichte. Wird nur in eine Richtung Pulver aufgetragen, kann die Dichte geringer sein, als bei einem jeweils um 90° alternierenden Pulverauftrag. Gleiches gilt für den Belichtungsprozess (Kruth et al. 2010, S. 3) bei dem die einzelnen Schichten in unterschiedliche Richtungen geschmolzen werden und so eine vollständige Verbindung gewährleistet werden kann (Delago 2011, S. 609).



(a) Temperaturunterschied im Laserumkreis

(b) Querschnitt durch ein SLM-Bauteil

Abbildung 5: Mechanismus des SLM (Quelle: abgeändert nach Abe et al. 2007a, S. 286)

Weitere relevante Störgrößen beim SLM sind schwankende Laserleistung, insbesondere durch Verunreinigungen oder Beschädigungen an optischen Elementen der Strahlführung, eine ungleichmäßige Pulverqualität oder ein erhöhter Restsauerstoffanteil (Schröder 2012, S. 24). Auch die Belichtungsgeschwindigkeit muss genau eingestellt werden, da es bei zu hoher Geschwindigkeit zum sogenannten „Balling-Effekt“ kommt, bei dem das geschmolzene Material durch die Oberflächenspannung nicht ausreichend mit der unterliegenden Schicht verschmolzen wird (Hötter et al. 2012, S. 6; Ott 2012, S. 16).

2.1.2 Einrichtung und Werkstoffe zum SLM am PTW

In der am PTW verwendeten Maschine EOSINT M 270 Baujahr 2009 kommt ein Ytterbium-Faserlaser im Bereich bis 200 W Nennleistung und einer Scangeschwindigkeit von bis zu 7 m/s zum Einsatz. Die Größe des Arbeitsraumes beträgt 250 mm x 250 mm x 215 mm (x/y/z). Abhängig vom Werkstoff und der Pulverbeschaffenheit liegt die erreichbare Oberflächengüte bei einer Rauigkeit von $R_z < 45 \mu\text{m}$ nach Mikrostrahlen (EOS GmbH 2008, S. 1-2). Im Rahmen dieser Arbeit wird ein vorlegierter Edelstahl 1.4542 (Herstellerbezeichnung EOS Stainless Steel GP1, 17-4 PH, X5CrNiCuNb16-4) in feiner Pulverform mit einer empfohlenen minimalen Schichtdicke von $20 \mu\text{m}$ verwendet. Dieser nichtrostende, aushärtbare, martensitische Werkstoff zeichnet sich durch gute mechanische Eigenschaften, eine hervorragende Duktilität und hohe Korrosionsbeständigkeit aus. Laut Herstellerangaben erreicht er eine Zugfestigkeit von mindestens 850 N/mm^2 bei einer Dichte von $7,8 \text{ g/cm}^3$ (EOS GmbH 2009a S. 1-3). Am PTW durchgeführte Zugversuche ergaben eine Zugfestigkeit oberhalb von 981 N/mm^2 (Abele et al. 2014, S. 4).

2.2 Prüfmethoden der Schwingfestigkeit

Da die meisten Bauteile im Bereich des Maschinenbaus schwingend beansprucht sind, ist die Schwingfestigkeit der Werkstoffe und die Art der Konstruktionen meist wichtiger als die statische Festigkeit (Bagel, Schulze 2005, S. 106). Abbildung 6 zeigt ein Baumdiagramm zur Einteilung der Schwingfestigkeit. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Ermittlung von mechanischen Eigenschaften durch dynamische Prüfung bei schwingender Beanspruchung mit variablen Amplituden und zur Ermittlung der Schwingfestigkeit. Dabei wird insbesondere auf die möglichen Prüfmethoden und -techniken eingegangen.

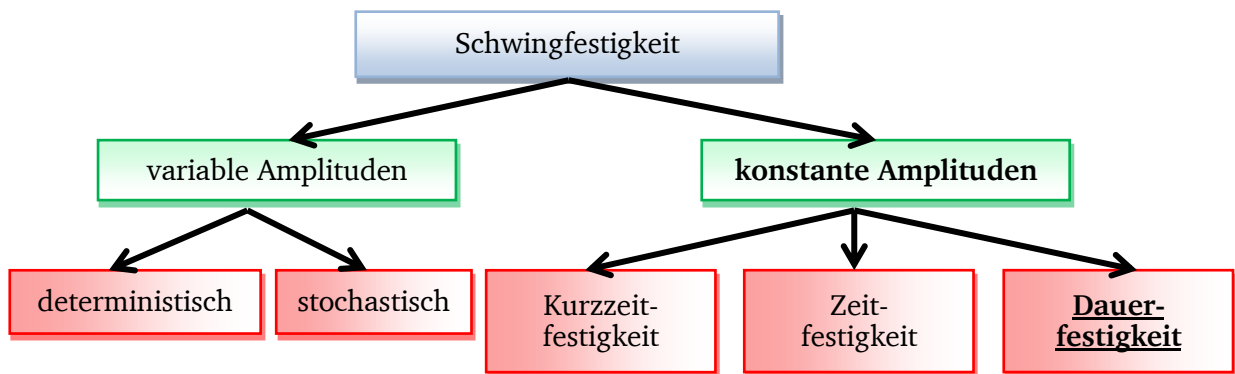


Abbildung 6: Baumdiagramm zur Einteilung der Schwingfestigkeit (Quelle: Sonsino 2008, S. 79)

Tabelle 1: Einteilung der Prüfverfahren zur Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit nach Beanspruchungsgruppen (Quelle: nach Bagel, Schulze 2005, S. 108; Chan et al. 2013; VDI 3405-2 2012, S. 12)

Beanspruchungsgruppe	Prüfverfahren / anzuwendender Versuch - Norm	Kennwerte
Zug-Druck dehnungsgeregelt	Dauerschwingversuch DIN 50 100 (dehnungsgeregelt ISO 12106)	einachsige Zug- Druckfestigkeit, Wechselfestigkeit, Schwellfestigkeit
Zug-Druck kraftgeregelt	Dauerschwingversuch DIN 50 100 (kraftgeregelt ISO 1099)	einachsige Zug- Druckfestigkeit, Wechselfestigkeit, Schwellfestigkeit
Biegung Umlaufbiegung	Umlaufbiegeversuch DIN 50 113	mehrachsiges Biegewechselfestigkeit
Biegung Dreipunkt-Biegung	Dreipunkt-Biegeversuch mit zyklischer Belastung nach EN ISO 7438	Biegefestigkeit
Biegung Flachbiegung	Flachbiegeschwingversuch DIN 50 142	mehrachsiges Biegewechselfestigkeit, Biegeschwellfestigkeit
Verdrehung	Torsionsschwingversuch	Torsionswechselfestigkeit, Torsionsschwellfestigkeit

Die Prüfverfahren zur Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit lassen sich entsprechend Bagel und Schulze (2005, S.108) und der VDI-Norm 3405-2 (2012, S.12) nach Beanspruchungsgruppen, wie in Tabelle 1 dargestellt, einteilen. Zur Prüfung additiv hergestellter Werkstoffe und Bauteile im Bereich der Widerstandsfähigkeit gegenüber wechselnden Beanspruchungen werden in der VDI-Norm 3405-2 (2012, S.13) zur Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung strahlgeschmolzener metallischer Bauteile der Dauerschwingversuch oder der Umlaufbiegeversuch empfohlen. Eine direkte Umrechnung der jeweiligen Versuchsergebnisse unterschiedlicher Belastungsgruppen, das heißt beispielsweise der Biegewechselfestigkeit in die Schwellfestigkeit ist nicht möglich. Abschätzungen sind jedoch nach Abbildung 7 zulässig. Die Näherungswerte sind für polierte Oberflächen gültig und liegen bei hohen Zugfestigkeiten unterhalb, bei niedrigen Zugfestigkeiten oberhalb des angegebenen Wertes (Roos, Maile 2011, S.108). Die Versuchsauswahl muss vorab entsprechend dem jeweils vorliegenden Anwendungsfall ausgewählt werden (VDI 3405-2, S. 12). In den folgenden Unterkapiteln wird daher genauer auf die beiden vorgeschlagenen Versuche eingegangen. Die Entscheidung welche Prüfmethode besser geeignet ist, muss in Abhängigkeit der in der Praxis auftretenden Belastungsart getroffen werden. Idealerweise entsprechen die Belastungsart sowie der Belastungsbereich im Versuchsaufbau der späteren Belastung im Einsatz der Bauteile.

Näherungswerte der Verhältnisse von $\frac{\text{Dauerschwingfestigkeit}}{\text{Zugfestigkeit}}$				
Kennwert	Zeichen	Stahl	Gusseisen	Leichtmetall
Zug/Druck-Wechselfestigkeit	σ_{zdW}	0,3 ÷ 0,45	0,2 ÷ 0,3	0,2 ÷ 0,35
Biege-Wechselfestigkeit	σ_{bW}	0,4 ÷ 0,55	0,3 ÷ 0,4	0,3 ÷ 0,5
Torsions-Wechselfestigkeit	τ_W	0,2 ÷ 0,35	0,25 ÷ 0,35	0,2 ÷ 0,3
Zug-Schwellfestigkeit	σ_{Sch}	0,5 ÷ 0,6	0,3 ÷ 0,4	-----
Biege-Schwellfestigkeit	σ_{bSch}	0,6 ÷ 0,7	0,4 ÷ 0,55	-----
Torsions-Schwellfestigkeit	τ_{Sch}	0,3 ÷ 0,4	0,4	0,3

Abbildung 7: Schwingfestigkeitskennwerte in Abhängigkeit der Zugfestigkeit R_m
(Quelle: Roos, Maile 2011, S. 100)

2.2.1 Dauerschwingversuch

Ein Dauerschwingversuch dient nach DIN 50 100 (1978, S. 2) zur Ermittlung von Kennwerten für das mechanische Verhalten von Werkstoffen oder Bauteilen bei schwingender, zyklischer und einachsiger Beanspruchung (VDI 3405-2 2012, S. 13). Nach Bagel und Schulze (2005 S. 106) sind unter schwingenden Beanspruchungen zeitlich veränderliche Beanspruchungen, die sich regelmäßig wiederholen, zu verstehen. Das Ergebnis des Dauerschwingversuches ist der Kennwert der Dauerschwingfestigkeit, der auch Dauerfestigkeit, Schwingfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit oder Langzeitfestigkeit genannt wird, und beschreibt, welchen Spannungsausschlag ein Werkstoff oder Bauteil während der gesamten Lebensdauer aushält (DIN 50 100 1978, S. 2; Schwab 2013, S. 191, 197). Die Bezeichnung der Langzeitfestigkeit berücksichtigt hier, dass Proben praktisch nur bis zu einer definierten, technisch sinnvoll gewählten, relativ großen Grenzschwingspielzahl getestet werden und daher eine entsprechende Festigkeit festgelegt werden kann (Radaj, Vormwald 2007, S. 17).

Grundbegriffe

Zunächst wird auf die Grundbegriffe der Dauerschwingbeanspruchung eingegangen. Wie in Abbildung 8 dargestellt, beschreibt ein Schwingenspiel nach DIN 50 100 (1978, S. 2) den Ablauf eines Belastungszyklus.

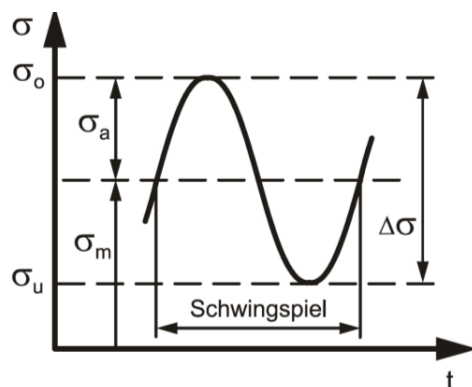


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Spannung bei schwingender Beanspruchung
(Quelle: DIN 50 100 1978, S. 2)

Die maximale Spannung σ_o wird Oberspannung genannt, während die minimale Belastung als Unterspannung σ_u bezeichnet wird. Unter der Mittelspannung σ_m ist der arithmetische Mittelwert zwischen Ober- und Unterspannung zu verstehen. Der Betrag, um den die Spannung von der Mittelspannung nach oben oder unten abweicht, wird als

Spannungsaussschlag σ_a bezeichnet (Roos, Maile 2011, S. 100). Aus der Begriffsdefinition ergeben sich entsprechend folgende Zusammenhänge:

(1) Spannungsamplitude $\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2}$ (Roos, Maile 2011, S. 100)

(2) Mittelspannung $\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}$ (Roos, Maile 2011, S. 100)

(3) Spannungsverhältnis $R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$ (Roos, Maile 2011, S. 100)

Je nach Lage der Ober- und Unterspannung werden, wie in Abbildung 9 dargestellt, drei Beanspruchungsbereiche unterschieden. Sofern der Belastungswechsel ausschließlich im Zugbereich stattfindet (a), wird dies als Zugschwellbeanspruchung bezeichnet. Unter einer Wechselbeanspruchung (c, d, e) ist der Lastwechsel zwischen Zug- und Druckbereich zu verstehen. Wenn sowohl Ober- als auch Unterspannung im Druckbereich liegen (g), handelt es sich um Druckschwellbeanspruchung. Ist die Unter- oder Oberspannung gleich Null (b, f), wird von reiner Druck-/ Zugschwellbeanspruchung gesprochen (DIN 50 100 1978, S. 2).

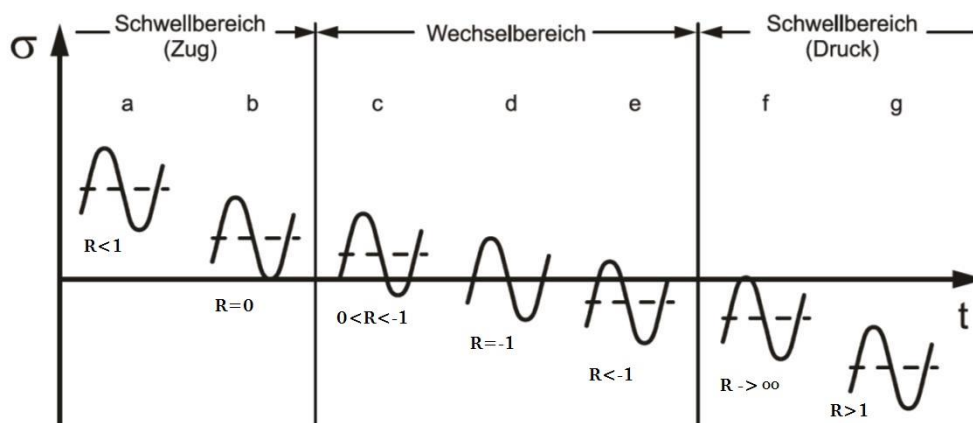


Abbildung 9: Mögliche Belastungsbereiche in der Schwingfestigkeitsprüfung (Quelle: Roos, Maile 2011, S. 101)

Der Dauerschwingversuch kann je nach Beanspruchungsbereich verschiedene Kennwerte liefern, welche in unterschiedlichen Diagrammen dargestellt werden können (VDI 3405-2 2012, S. 13). Außerdem wird zwischen spannungskontrollierter und dehnungskontrollierter Sollwertvorgabe unterschieden (Roos, Maile 2011, S. 101).

Wöhlerversuch

Nach DIN 50 100 (1978, S. 4) wird die Schwingfestigkeit mittels Kraftregelung nach dem Wöhlerverfahren geprüft. Dabei werden hinsichtlich Werkstoff, Gestaltung und Bearbeitung

sechs bis zehn gleichwertige, ungekerbte Proben einer einachsigen, zweckmäßig gestaffelten, sinusförmigen Schwingbeanspruchung zwischen zwei festen Grenzwerten unterworfen und die zugehörigen Versagensschwingspielzahlen festgestellt. Die Beanspruchung während der Prüfung einer Probe bleibt in diesem so genannten Einstufenversuch unverändert (DIN 50 100 1978, S. 4; Radaj, Vormwald 2007, S. 15, 18). Nach der VDI Norm 3405-2 (2012, S. 13) sind für eine statistische Absicherung mindestens dreißig additiv hergestellte Proben notwendig, die in der Aufbaurichtung mit den schlechteren zu erwarteten Ergebnissen gefertigt sind. Versagenskriterium ist meist der vollständige Probenbruch, kann aber auch ein Aufriss definierter Größe oder ein bestimmter Steifigkeitsabfall sein (Radaj, Vormwald 2007 S. 18). Die zyklische Belastung wird so lange fortgesetzt, bis ein Versagen festgestellt wird oder eine vorher festgelegte Grenzschwingspielzahl erreicht wird. Nicht gebrochene Proben heißen Durchläufer (Bagel, Schulze 2005, S. 107; DIN 501 00 1978, S. 5). Die Ergebnisse werden in der so genannten Wöhlerkurve dargestellt. Auf der logarithmisch geteilten Abszisse wird die Schwingspielzahl aufgetragen, während auf der ebenfalls logarithmisch geteilten Ordinate die Dauerbeanspruchung eingezeichnet wird (DIN 50 100 1978, S. 6). In Abbildung 10 ist beispielhaft eine Wöhlerlinie für einen kubisch-raumzentrierten Stahl (Typ I) und einen austenitischen Stahl (Typ II) dargestellt. Die Wöhlerkurve lässt sich, wie in Abbildung 10 dargestellt, in vier Bereiche einteilen.

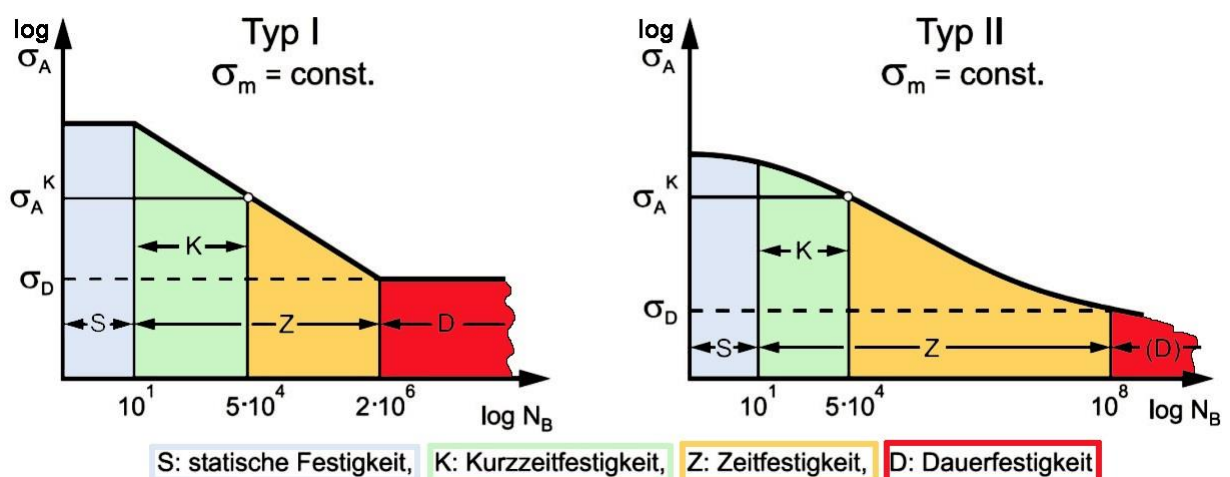


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Wöhlerkurve (Typ I und Typ II)
(Quelle: abgeändert nach Roos, Maile 2011, S. 103)

Einen ersten Anhaltspunkt für die Größe der Langzeitfestigkeit bietet bei nur einem Schwingspiel die Zugfestigkeit (Bagel, Schulze 2005, S. 109). Dieser quasistatische Bereich erstreckt sich bis zu etwa zehn Schwingspielen.

Angrenzend folgt der Bereich der Kurzzeitfestigkeit bis etwa 10^4 Schwingspiele und der Bereich der Zeitfestigkeit, der bis zum Beginn der Dauerfestigkeit reicht, und in denen die ertragbare Spannungsamplitude ständig sinkt (Radaj, Vormwald 2007, S. 20). Der Bereich der Langzeitfestigkeit, der im Englischen „High Cycle Fatigue“ (HCF) genannt wird, beginnt, wie in Tabelle 2 dargestellt, je nach Werkstoff, Bauteil und Einsatzgebiet bei einer Grenzschwingspielzahl von 10^5 bis 10^8 (Bagel, Schulze 2005, S. 107; DIN 50 100 1978, S. 4; Lin et al. 2001, S. 76; Radaj, Vormwald 2007, S. 18; Roos, Maile 2011, S. 103; Schwab 2013, S. 199 - 200). Während im Bereich der Kurzzeitfestigkeit die plastischen Dehnungen überwiegen, herrschen im Langzeitfestigkeitsbereich die elastischen Dehnungen vor (Radaj, Vormwald 2007, S. 20). Als Dauer- beziehungsweise Langzeitfestigkeit σ_D wird die beim Erreichen der Grenzschwingspielzahl ertragbare Oberspannung bezeichnet, die im Zug-Druck-Wechselbereich identisch mit der Spannungsamplitude ist (DIN 50 100 1978, S. 3; Radaj, Vormwald 2007, S. 17). Die Lage der Mittelspannung ergibt sich aus dem Spannungsverhältnis R, welches zusammen mit der Langzeitfestigkeit angegeben wird.

Tabelle 2: Grenzschwingspielzahlen für den Bereich der Dauer- beziehungsweise Langzeitfestigkeit unterschiedlicher Quellen

Quelle	Grenzschwingspielzahl
Bagel, Schulze 2005, S. 107	Langzeitfestigkeit 10^6
DIN 50 100 1978, S. 4	Stahl 10^7 / $2 \cdot 10^6$ Leichtmetalle 10^8 / $5 \cdot 10^7$
Radaj, Vormwald 2007, S. 18	Langzeitfestigkeit 10^5 Knickpunkt $10^6 - 10^7$
Roos, Maile 2011, S. 103	Typ I (siehe oben) $10^6 - 10^7$ Typ II (siehe oben) 10^8
Schwab 2013, S. 199 - 200	Typ I (siehe oben) $2 \cdot 10^6 - 10^7$ Typ II (siehe oben) 10^8
Lin et al. 2001, S. 76	Langzeitfestigkeit 10^7

Ein Gespräch mit Herrn Wagener (2013) zeigt, dass in der Praxis im Bereich der Dauerfestigkeit in der Regel nur von Langzeitfestigkeit gesprochen werden kann, da es in jedem Bauteil zu Rissen aufgrund von Inhomogenität kommt und daher kein endgültiger Dauerfestigkeitsbereich existiert. Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, nähert sich die

Wöhlerkurve von Typ I im Langzeitfestigkeitsbereich asymptotisch der Schwingspielzahl „Unendlich“ (DIN 50 100 1978, S. 4), während Kurventyp II auch bei Schwingspielzahlen oberhalb von 10^8 keinen nahezu horizontalen Verlauf zeigt. Das heißt, beim Kurventyp I kann der Werkstoff beziehungsweise das Bauteil mit der Spannung unterhalb des Abknickpunktes trotz Inhomogenität im Gefüge nahezu beliebig oft belastet werden, ohne dass es zum Versagen kommt. Diese Werkstoffe werden daher bei einer Belastung unterhalb von σ_D als langzeitfest bezeichnet. Bei Kurventyp II existiert dieser Bereich nicht. Daher wird in der Praxis als Langzeitfestigkeit die ertragbare Belastung bei 10^8 Schwingspielen festgelegt. Bei kubisch-raumzentrierten Stählen und damit ferritisch-perlitischen sowie martensitischen Stählen sowie bei heterogenen Nichteisenmetall-Legierungen verläuft die Wöhlerkurve im Allgemeinen nach Typ I. Austenitische Stähle sowie andere kubisch-flächenzentrierte Legierungen weisen in der Regel eine stetig abfallende Wöhlerkurve nach Typ II ohne ausgeprägten Langzeitfestigkeitsbereich auf (Radaj, Vormwald 2007, S. 18; Roos, Maile 2011, S. 102). Die ermittelten Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen sind generell nach DIN 50 100 (1978, S. 6) auf 5-10 N/mm² und unterhalb von 100 N/mm² auf 1 N/mm² anzugeben. Beanspruchungswerte werden mit kleinen Indizes, Festigkeitskennwerte mit großen Indizes versehen (Schwab 2013, S. 195). Als wichtige Parameter zur Beschreibung der Wöhlerlinie dienen die Steigung im Bereich der Zeit- und Kurzzeitschwingfestigkeit, die Lage des Abknickpunktes sowie die Steigung der Wöhlerkurve nach der Grenzschnwingspielzahl. Außerdem sollten Angaben zum Werkstoff, der Formzahl, dem Spannungsverhältnis, der Belastungsart sowie zu den Umgebungsbedingungen vermerkt sein (Sonsino 2008, S. 85). Bei Prüfmaschinen geringer Prüffrequenz wird außerdem nach DIN 50 100 (1978, S. 4) empfohlen, die Wöhlerkurven nur bis zu kleinen Schwingspielzahlen aufzunehmen und die Langzeitfestigkeit zu extrapolieren. Des Weiteren lässt die Ermittlung der Schwingfestigkeit der ungekerbten, glatten Werkstoffprobe Rückschlüsse auf die Langzeitfestigkeit einer gekerbten Probe oder eines Bauteils zu (Radaj, Vormwald 2007 S. 15).

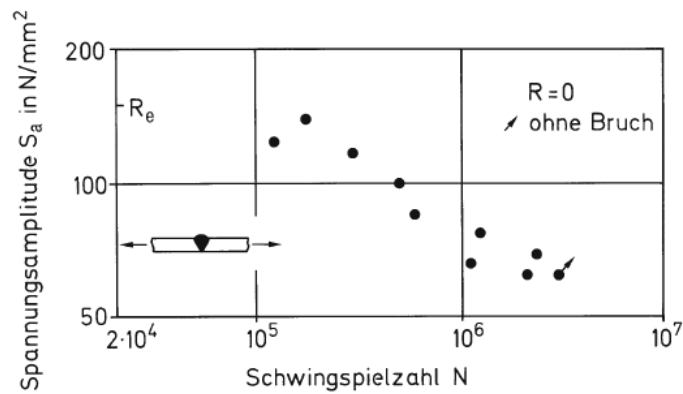


Abbildung 11: Ergebnisse eines Wöhlerversuches mit zehn Proben im Wöhlerdiagramm (Quelle: Haibach 2006, S. 24)

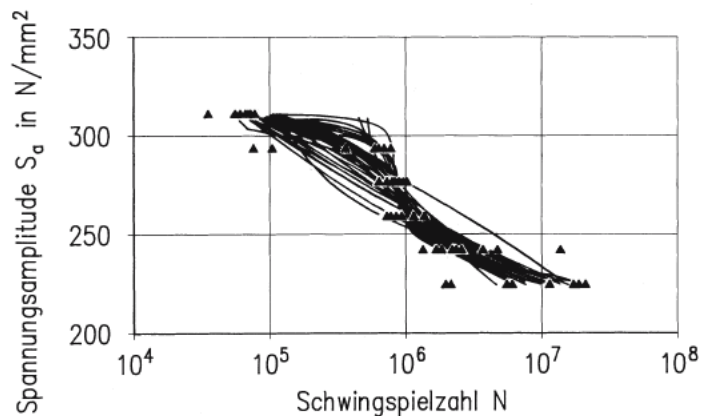


Abbildung 12: Wöhlerkurven unterschiedlicher Institute zu den Versuchsergebnissen aus Abbildung 11 (Quelle: Haibach 2006, S. 24)

Eine besondere Herausforderung stellt die in der Praxis meist geringe Anzahl der Proben dar, bei denen es aufgrund von Gefügeinhomogenität zu ausgeprägten Streuungen im Ergebnis kommen kann (Schäfer 2008, S. 4). In Abbildung 11 sind die Ergebnisse eines Wöhlerversuches dargestellt. Abbildung 12 zeigt die in unterschiedlichen Instituten entstandenen, zugehörigen, stark variierenden Wöhlerlinien. Dies zeigt, dass eine Analyse der Ergebnisse nicht zwingend zu einem einheitlichen Ergebnis führt (Haibach 2006, S. 24).

Anrisskennlinie / Dehnungs-Wöhler-Versuch

Beim dehnungsgeregelten Versuch wird die Dehnungsamplitude konstant gehalten. Er eignet sich besonders zur Prüfung im Zeitfestigkeitsbereich bei elastisch-plastischen Verformungen (ASTM E 606-80 2004; S. 2; Roos, Maile 2011, S. 103). Dieser Bereich wird aufgeteilt in den

Kurzzeitfestigkeitsbereich Low Cycle Fatigue (LCF) unterhalb und den High Cycle Fatigue Bereich (HCF) oberhalb von $5 \cdot 10^4$ Schwingspielen (Roos, Maile 2011, S. 103). Außerdem treten bei Verformungen unterhalb der Formdehngrenze bei duktilen Metallegierungen Stützwirkungen der elastischen Umgebung auf, so dass die Verformung auch bei ersten Anrissen auf elastische Verformung begrenzt ist. Dieser Einfluss lässt sich nur durch den dehnungsgeregelten Versuch zeigen. Als Versagenskriterium gilt im dehnungskontrollierten Versuch ein technisch erfassbarer Oberflächenanriss von 0,5 mm Tiefe und 2 mm Oberflächenlänge anstelle des Bruches im Wöhlerversuch. Im Diagramm wird die Dehnungsamplitude über der Anrisswechsellastspielzahl aufgetragen (Radaj, Vormwald 2007, S. 33; Roos, Maile 2011, S. 103).

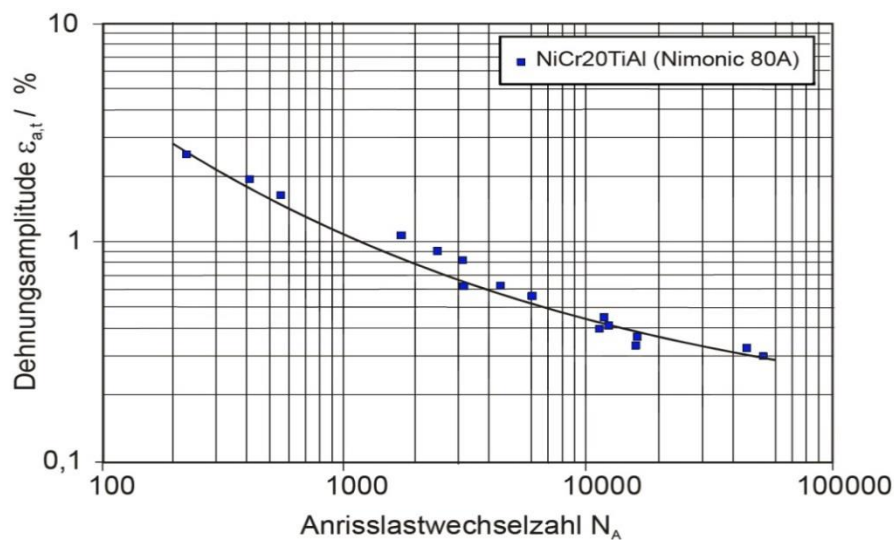


Abbildung 13: Anrisskennlinie für den Werkstoff NiCr20TiAl bei Raumtemperatur (Quelle: abgeändert nach Roos, Maile 2011, S. 105)

Die Dehnungs-Wöhler-Linie kann im Bereich der Langzeitfestigkeit unzureichend sein, da sich weder ein horizontaler Kurvenverlauf noch ein Knickpunkt ergibt (Radaj, Vormwald 2007, S. 38, S. 41). In Abbildung 13 ist beispielhaft eine Dehnungs-Wöhlerlinie dargestellt.

Einflüsse auf die Kerbwirkung bei Dauerfestigkeit

Für die Abschätzung der Langzeitfestigkeit gekerbter Bauteile ist es notwendig die signifikanten Einflussfaktoren auf die Bauteilschwingfestigkeit zu kennen. Ein wesentlicher Einfluss ist die Belastungsart. Für die in dieser Masterarbeit gewählte Belastung im Zugschwellbereich (siehe Kapitel 3.1.2) berechnet sich die Bauteilschwingfestigkeit gemäß DIN 743 (2000) sowie nach Roos, Maile (2011, S. 100) in Abhängigkeit der Zugfestigkeit R_m ,

dem technologischen Größeneinfluss K_1 abhängig vom größten Durchmesser, der Kerbwirkung β , welche die Formgebung des Bauteils berücksichtigt, dem Einflussfaktor der Oberflächenrauheit K_F und dem Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung K_V nach der nachfolgenden Formel (4). Der technologische Größeneinflussfaktor K_1 für den im Rahmen dieser Masterarbeit verwendeten Werkstoff 1.4542, sowie der Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung K_V hat gemäß DIN 743 (2000) für alle Proben und Bauteile dieser Arbeit keinen signifikanten Einfluss und geht daher mit dem Faktor 1 ein.

$$(4) \quad \sigma_{sch} = \sigma_{zdW} \cdot 1,25 = \frac{R_m \cdot 0,4 \cdot 1,25 \cdot K_1(d) \cdot K_V}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1} = \frac{R_m \cdot 0,5}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1}$$

Der Einfluss der Oberflächenrauheit K_F berechnet sich nach folgender Formel (DIN 743 2000):

$$(5) \quad K_F = 1 - 0,22 \cdot \lg\left(\frac{R_z}{\mu m}\right) \cdot \left(\lg\left(\frac{R_m}{20 \frac{N}{mm^2}}\right) - 1\right)$$

Die Kerbwirkung β ist abhängig von der Kerbformzahl α_K und der Mikrostützwirkung, die sowohl vom Werkstoff als auch von der Form der Kerbe beeinflusst wird. Bei duktilem Werkstoff bei scharfen Kerben mit hoher Formzahl α_K ist somit die Kerbwirkung β durch Mikrofließen und Mikrorisse im Kerbgrund wesentlich kleiner als die Formzahl α_K . Für die Aktormodulgehäuse, welche im Zugschwellbereich geprüft werden, kann die Formzahl α_K gemäß DIN 743-2 (2000, Bild 5) für Rundnuten ermittelt werden (siehe Anhang). Die Kerbwirkung der Aktormodulgehäuse kann anschließend nach der Formel von Neuber (1985) unter Berücksichtigung des Öffnungswinkels ω der Kerbflanken, des Radius im Kerbgrund ρ sowie der werkstoffabhängigen Ersatzstrukturlänge ρ^* , die nach Neuber (1968, S. 245-251) für den Werkstoff 1.4542 bei 0,05 liegt, entsprechend Formel (6) berechnet werden. Die Tiefe der Kerbe und damit die Spannungsüberhöhung im Kerbgrund ist im Formfaktor α_K berücksichtigt, während der Einfluss der Schärfe der Kerbe über den Öffnungswinkel eingeht. Die Kerbwirkung für Spitzkerben mit einem Öffnungswinkel ω der Kerbflanken von 60° kann alternativ der DIN 743-2 (2000, Bild 2) entnommen werden.

$$(6) \quad \beta = 1 + \frac{\alpha_K - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - \omega} \cdot \sqrt{2\rho^* \rho}}$$

Eine andere Möglichkeit den Einfluss der Oberflächenrauigkeit zu erfassen, ist die Einführung eines Abminderungsfaktor relativ zwischen polierter und unbehandelter Probe nach Grubisic, Sonsino (1992, S.105), der Abbildung 14 entnommen werden kann.

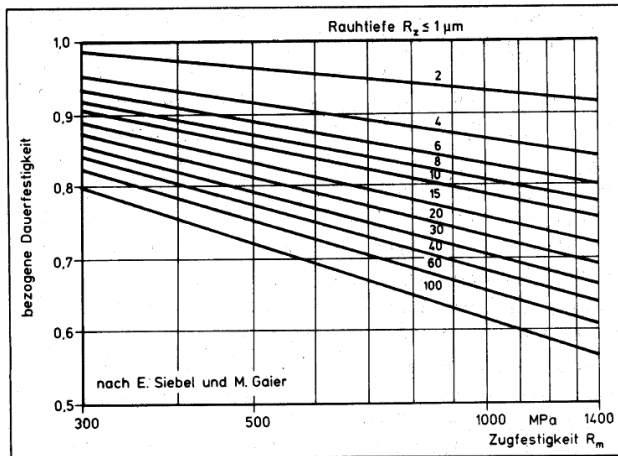


Abbildung 14: Minderung der Dauerfestigkeit in Abhängigkeit von Rautiefe und Zugfestigkeit
(Quelle: Grubisic, Sonsino 1992, S.105)

2.2.2 Umlaufbiegeversuch

Der Umlaufbiegeversuch nach DIN 50 113 (1982, S. 1) dient zur Ermittlung des Biegewechselfestigkeitsverhaltens von Rundproben bei umlaufender Beanspruchung, vorzugsweise zur Bestimmung des Kennwertes der Dauerbiegewechselfestigkeit. Die Mittelspannung liegt immer bei Null zwischen gleich großen positiven und negativen Beanspruchungswerten. Die Oberfläche der Proben sollte hier mit dem Anwendungsfall übereinstimmen, da beim Umlaufbiegeversuch die höchsten Spannungen am Rand der Probe auftreten und Kerben einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer haben (DIN 50 113 1982, S. 1-2; VDI 3405-2 2012, S. 13). Die Prüffrequenz liegt im Bereich von 50 Hz bis 200 Hz und ist so gewählt sein, dass sich die Probe gegenüber der Raumtemperatur nicht um mehr als 5 Grad erwärmt (DIN 50 113 1982, S. 2). Nach der VDI-Norm 3405-2 (2012, S. 13) wird der Umlaufbiegeversuch insbesondere aufgrund seiner kleinen Probenform und damit verkürzten Fertigungszeit für die Prüfung der Langzeitfestigkeit additiv hergestellter Proben empfohlen. Die Art der Regelung und Darstellung der Ergebnisse wird analog zum Dauerschwingversuch durchgeführt.

2.3 Prüftechniken und Analyse der Schwingfestigkeit

Die Durchführung der Schwingfestigkeitsversuche ist zum einen abhängig von der zu ermittelnden Anzahl der ertragbaren Schwingspielzahlen und zum anderen von der Anzahl zur Verfügung stehender Proben. Es existiert eine Reihe von Prüftechniken, die sich je nach Aufgabenstellung und Randbedingungen in variierendem Maß für die Ermittlung einer Wöhlerlinie eignen. In diesem Kapitel sind das Perlschnur- und das Treppenstufenverfahren zur Ermittlung der Wöhlerlinie im Bereich der Zeit- und Langzeitfestigkeit näher erläutert, welche am LBF häufig zum Einsatz kommen.

2.3.1 Treppenstufenverfahren

Um die mittlere Langzeitfestigkeit bei hohen, festgelegten Schwingspielzahlen zu ermitteln, wird das Treppenstufenverfahren, welches auch als „up-and-down“-Methode bezeichnet wird, angewendet. Zu Beginn des Versuches muss die zu untersuchende Grenzschnwingspielzahl festgelegt werden, die in der Regel zwischen 10^6 und 10^7 gewählt wird (Lin et al. 2001, S. 76; Radaj, Vormwald 2007, S. 49).

Der voraussichtlich kritische Spannungsbereich wird abgeschätzt und in mehrere Stufen unterteilt (Lin et al. 2001, S. 76). Dabei ist wichtig, dass die Stufenabstände äquidistant sind und die Beanspruchung so abgestuft ist, dass zunächst mindestens eine Probe bei hoher Schwingspielzahl bricht und eine weitere mindestens bis zur Grenzschnwingspielzahl durchläuft (DIN 50 100 1979, S. 5, Haibach 2006, S. 35). Der Versuch wird in der Mitte des gewählten Spannungsbereiches gestartet. Die Planung des jeweils anschließenden Versuches richtet sich nach dem Ergebnis des jeweils vergangenen Versuches. Ist die aktuelle Probe gebrochen, wird die nächste Probe mit der nächstniedrigeren Spannung geprüft. Handelt es sich um einen Durchläufer, erfolgt die nächste Prüfung eine Spannungsstufe höher (Dixon, Mood 1948, S. 109). Der Vorteil des Treppenstufenverfahrens ist, dass die Versuchsergebnisse um den gesuchten Mittelwert streuen und sich der Versuch am Mittelwert einpendelt, sofern der Stufenabstand fein genug gewählt worden ist. Ein Nachteil ist jedoch der erhebliche Zeitaufwand durch die sequentielle Durchführung der Versuche und die benötigte Probenzahl von 40-50 Proben (Radaj, Vormwald 2007, S. 49). Außerdem ist zu beachten, dass sich durch das Treppenstufenverfahren nur ein zuverlässiger Mittelwert, aber kein zuverlässiges Streumaß ergibt, da jedes Ereignis vom Vorgänger bestimmt wird und die Spannung durch

die Stufung nicht frei variierbar ist (Ostermann 1965, S. 33-40). In Abbildung 15 sind die Ergebnisse eines durchgeführten Treppenstufenversuches zur Veranschaulichung dargestellt.

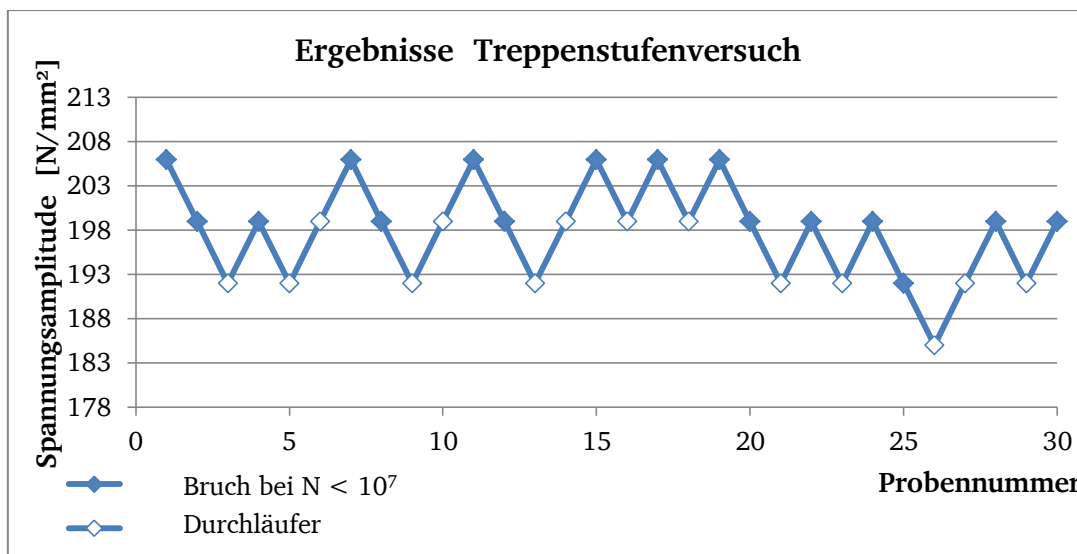


Abbildung 15: Ergebnisse eines Treppenstufenversuches (Quelle: abgeändert nach Lin 2001, S. 79)

2.3.2 Perlschnurverfahren

Ziel des Perlschnurverfahrens ist die Ermittlung einer mittleren Wöhlerlinie mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit (Grellmann, Altstädt 2005, S. 177). Die Vorgehensweise nach dem Perlschnurverfahren ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn aus Zeit- oder Kostengründen wenige Proben zur Verfügung stehen oder das Gebiet der Langzeitfestigkeit eingegrenzt werden soll. Für jedes Lastniveau liegen in der Regel weniger als drei Versuchswerte vor (Schäfer 2008, S. 4). Nach Herrn Wagener (2013) wird, ausgehend von der Zugfestigkeit des Werkstoffs, eine Spannungsamplitude abgeschätzt, bei der eine Schwingspielzahl von 50.000 erwartet wird. Aufgrund des erzielten Ergebnisses der vorherigen Versuchsprobe wird die Spannungsamplitude in den folgenden Versuchen so lange erniedrigt, bis ein Durchläufer bei einer in der Regel bei 10^7 festgelegten Grenzschaingspielzahl auftritt. Iterativ können anschließend im Bereich der Langzeitfestigkeit weitere Versuche folgen, um den Abknickpunkt zu ermitteln. Häufig wird im Bereich der Langzeitfestigkeit auch ein Vorgehen nach dem Treppenstufenverfahren (siehe Kapitel 2.3.1) genutzt (Schäfer 2008, S. 6). Generell erhöht sich die Genauigkeit des zu ermittelnden Wöhlerlinienverlaufs mit steigendem Stichprobenumfang. Gängige Probenanzahlen liegen zwischen 6-20 Proben (Grellmann 2005, S. 177).

2.3.3 Statistische Auswertung durch Streubänder

Durch die Prüfung von sechs bis zehn gleichartigen Proben auf mindestens fünf Beanspruchungshorizonten bis zum Bruch kann ein so genanntes Streuband ermittelt werden, das angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Schwingenspielzahl bei vorgegebener Spannung erreicht wird (Haibach 2006, S. 32; Radaj, Vormwald 2007, S. 44). Auf die mittlere Wöhlerlinie entfällt eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %. Wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, wird die untere Streubandgrenze mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % überschritten, während die obere Streubandgrenze mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 10 % erreicht wird (Haibach 2006, S. 32). Da selten eine Probenzahl oberhalb von 30 Proben zur Verfügung steht, ist es nach DIN 50 100 (1978, S. 6) zur Eingrenzung der Streuung und damit für einen ersten Eindruck der Streubreite ausreichend, eine Prüfung von drei gleichartigen Proben auf mindestens einem Spannungshorizont durchzuführen.

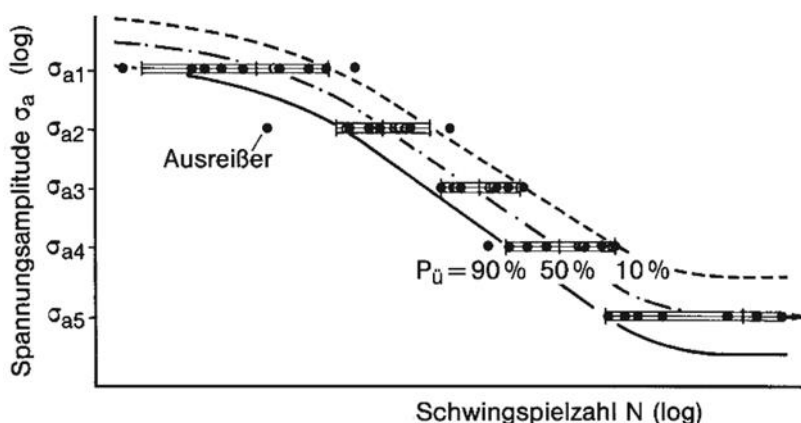


Abbildung 16: Statistische Auswertung der Schwingenspielzahlen bis zum Bruch durch Streubandermittlung (Quelle: nach Haibach 2006, S. 31)

Die Bestimmung der Überlebenswahrscheinlichkeiten lässt sich im Bereich der Zeitfestigkeit, wie von Haibach (2006, S. 30) beschrieben, nach Rossow (1964, S. 146, 147) mittels Gauß'schem Wahrscheinlichkeitsnetz durchführen. In einem Schema (siehe Abbildung 17) sind die Schwingenspielzahlen der vorliegenden n Versuche eines Spannungsniveaus nach Größe geordnet und, vom höchsten Wert beginnend, mit einem Index j versehen. Der wahrscheinlichste Überlebenswahrscheinlichkeitswert $P_{\bar{u}}$ des jeweiligen Versuchswertes zur Auftragung im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$(7) P_{\bar{u}} = \frac{3j-1}{3n+1} \quad (\text{Quelle: nach Rossow 1964, S. 146, 147})$$

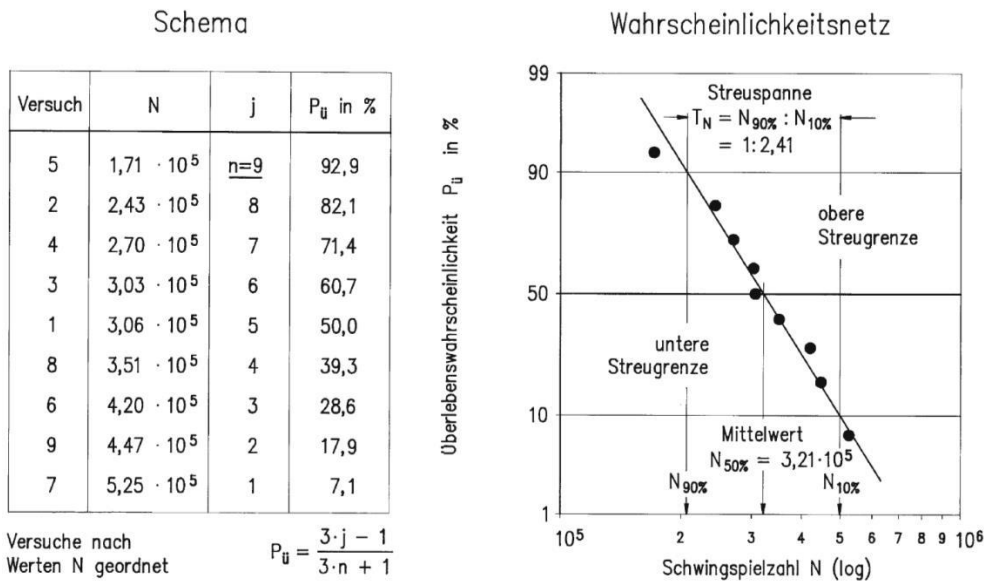


Abbildung 17: Auswertung mittels Schema und Auftrag der Überlebenswahrscheinlichkeit im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz (Quelle: Haibach 2006, S. 30; nach Rossow 1964, S. 146, 147)

Anschließend lassen sich die Schwingspielzahlen für die Streubänder auf dem jeweiligen Spannungsniveau interpolieren. Wenn sich im Gauß'schen-Wahrscheinlichkeitsnetz keine Gerade ergibt, darf nicht linear extrapoliert werden. In diesem Fall kann beispielsweise die zweiparametrische Weibull-Verteilung (siehe Formel (8)) genutzt werden, welche ebenfalls oft bei spröden Materialien Einsatz findet. Die Parameter a und m , müssen entsprechend der jeweiligen Versuchsergebnisse angepasst werden (Radaj, Vormwald 2007, S. 47; Schäfer 2008, S. 6).

$$(8) \quad \lg N = e^{a + \frac{1}{m} \ln(\ln \frac{1}{1-p})} \quad (\text{Quelle: Schäfer 2008, S. 6})$$

Im Bereich der Langzeitfestigkeit kann die Auswertung der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %, wie von Haibach (2006, S. 35, 36) beschrieben, nach Hück (1981, 147-176) angelehnt an die Auswertung zum Treppenstufenverfahren erfolgen. Die Langzeitfestigkeit berechnet sich aus den Parametern des Stufenabstandes (d), der Spannung der untersten, belegten Stufe ($\sigma_{i=0}$) und der Anzahl der Versuche pro Stufe (n) nach folgender Formel (9). Berücksichtigt werden sowohl gebrochene Proben als auch Durchläufer. Der Indexwert (i) nummeriert alle Stufen der gültigen Versuche, beginnend bei der niedrigsten Stufe mit dem Wert Null.

$$(9) \quad \sigma_{D P_{\bar{u}}=50} = \sigma_{i=0} + d \cdot \frac{\sum(i \cdot n)}{\sum(i)} \quad (\text{Quelle: nach Hück 1981, S. 147-176})$$

Als ungültige Versuche im Rahmen des Treppenstufenverfahrens sind anfängliche Versuche auf Treppenstufen gewertet, die nur einmal zu Beginn belegt sind. In Tabelle 3 ist der nach Formel (9) ausgewertete Treppenstufenversuch aus Abbildung 15 zur Veranschaulichung dargestellt.

Tabelle 3: Auswertungsschema zur Berechnung der Langzeitfestigkeit mit $P_{ü} = 50\%$ des Treppenstufenversuches aus Abbildung 15

Spannung [N/mm ²] (Stufenabstand $\Delta\sigma_0 = 7 \text{ N/mm}^2$)	Index i	n	i • n
205	3	6	18
199	2	14	28
192	1	9	9
185	0	1	0
Summe	6	30	55
$\sigma_{D P_{ü}=50} = 185 \text{ N/mm}^2 + 7 \text{ N/mm}^2 \cdot 55 / 30 = 197,8 \text{ N/mm}^2$			

Nach Hück (1981, S. 147-176) ist eine Berechnung der Standardabweichung bei einer Anzahl unterhalb von zehn Versuchen nicht statistisch abgesichert und nicht in seinen Tabellen zur Auswertung der Streubreite enthalten. Die Breite des Streubandes im Langzeitfestigkeitsbereich kann jedoch entsprechend der Aussage von Sonsino (2008, S. 86) nach dem Abknickpunkt als konstant übernommen werden.

2.4 Prüfmaschinen am LBF

Für die Erstellung von Wöhlerkurven durch kraftgeregelte Langzeitfestigkeitsversuche stehen am LBF sowohl servohydraulische Prüfmaschinen als auch Resonanzprüfmaschinen zur Verfügung, die in der Regel als Säulenprüfmaschine ausgeführt sind. Die Sollwertvorgabe bei Resonanzprüfmaschinen erfolgt durch deren Steuereinrichtung, bei servohydraulischen Prüfmaschinen durch einen Frequenzgenerator, dessen zyklisches Spannungssignal in der Regelelektronik nach Vorgabe der Amplituden gedämpft wird. Die genaue Wahl der Belastungseinrichtung ist zum einen abhängig von der benötigten Prüffrequenz und zum anderen von der erforderlichen Versuchskraft. Die maximale Prüfkraft sollte in der gleichen Größenordnung wie die der benötigten Prüfkraft liegen (Morgenstern et al. 2006, S. 8), das heißt es muss eine entsprechende Prüfmaschine ausgewählt werden. Die Einstellung zur

Prüfung im Zugschwellbereich erfolgt über die Steuerung der jeweiligen Prüfmaschine. Bei der Resonanzprüfmaschine erfolgt die Aufbringung der Schwingbelastung durch den Resonanzeffekt, das heißt, dass das Masse-Feder-System, in welches die Probe integriert ist, durch motorgetriebene umlaufende Unwucht zum Schwingen angeregt wird. Die Drehzahl wird automatisch auf einen eingestellten Sollwert geregelt, so dass die Eigenfrequenz des Masse-Feder-Systems durch Steigerung der Unwuchtdrehzahl erreicht werden kann. Der Abbruch des Versuches erfolgt entweder durch Erreichen der vorgegebenen Schwingspielzahl oder durch Grenzwertschalter, die bei Bruch oder definiertem Anriss auslösen. Bei den servohydraulischen Prüfmaschinen wird die Versuchskraft durch Öldruck von 280 bar aufgebracht. Die Steuerung erfolgt durch ein Servoventil mittels Kraftmessung. Der Versuch endet entweder durch Überschreitung so genannter Alarmgrenzen bezüglich Kraft- oder Wegüberschreitung oder Erreichen einer vorgegebenen Schwingspielzahl. Es ist bei allen Maschinen darauf zu achten, dass die Probe kraftschlüssig mit der Prüfmaschine verbunden ist und die Probenachse bei Axialbelastung in Verlängerung des Prüfmaschinenkraftvektors liegt (Morgenstern et al. 2006, S. 8, 13).

2.5 Schwingfestigkeitsprüfung von SLM-Proben

Der Einsatz additiv gefertigter Bauteile in der industriellen Fertigung nimmt zu. Für weitere Einsatzmöglichkeiten ist es wichtig, dass die mechanischen Eigenschaften der additiv gefertigten Bauteile mit denen, die konventionell gefertigt werden, vergleichbar sind (Brandl et al. 2011, S. 1-2). Neben der statischen Festigkeit ist besonders die Langzeitfestigkeit von hoher Relevanz. Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse bereits durchgeführte Versuche im Bereich der Langzeitfestigkeit von SLM-Werkstoffen und SLM-Bauteilen unterschiedlicher Forschungseinrichtungen zusammengefasst.

2.5.1 Bereits eingesetzte Prüfbedingungen und Versuchsaufbauten

Seit dem Jahr 2010 sind an diversen Standorten Versuche zum Thema Langzeitfestigkeit von SLM-Proben durchgeführt worden. Der Schwerpunkt liegt auf der Verarbeitung metallischer Werkstoffe, die überwiegend in der Maschine EOSINT M 270 verarbeitet werden. In Tabelle 4 ist eine Übersicht der Versuchsdaten in chronologischer Reihenfolge zusammengestellt. Zu den bereits untersuchten Materialien gehören die Edelstähle 1.4542 und 1.4404 (Herstellerbezeichnung 316L), der härtbare Edelstahl 1.4540 (Herstellerbezeichnung PH1,

15-5 PH, X4CrNiCuNb164), die Nickelbasislegierung Hastelloy X, die Aluminiumlegierung AlSi10Mg und die Titanlegierung Ti-6Al-4V (3.7165), die besonders im medizinischen Bereich zum Einsatz kommt. In den Versuchen sind unterschiedliche Probengeometrien genutzt worden. Die Gesamtlänge der Proben variiert zwischen 43 mm und 120 mm, während der Prüfdurchmesser im Bereich von 3 mm bis 6,24 mm liegt. Bei der Probenform gibt es zwei Konstruktionen. In Abbildung 18 ist die Probenform mit tangentialem Übergangsradius zwischen Testbereich und den Probenenden dargestellt, während Abbildung 19 eine Probenform mit kontinuierlichem Radius zwischen den Enden zeigt (ASTM E 466 1982, S. 2).

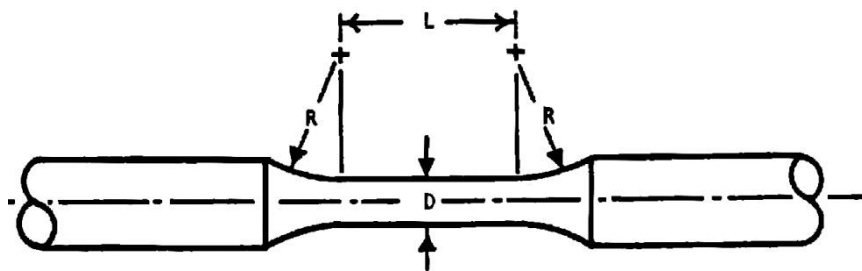


Abbildung 18: Probenform eins mit tangentialem Übergangsradius zwischen Testbereich und Probenenden (Quelle: nach ASTM E 466 1982, S. 2)

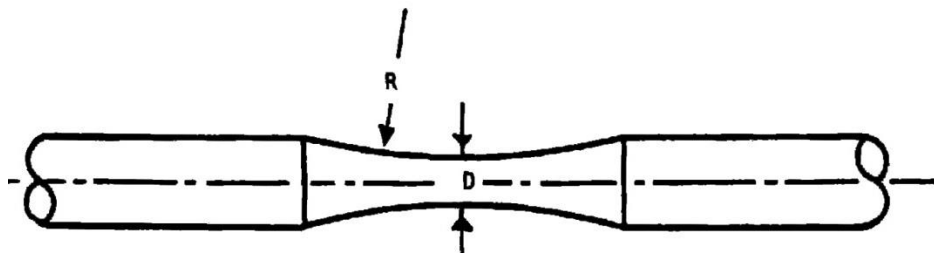


Abbildung 19: Probenform zwei mit kontinuierlichem Radius zwischen den Probenenden (Quelle: nach ASTM E 466 1982, S. 2)

Die Proben werden für die jeweiligen Versuchsaufbauten überwiegend mit Polarwinkel 0° zum Beschichter (siehe Abbildung 20), das heißt stehend vertikal gefertigt, da dort, wie in der VDI-Norm zur Prüfung additiv hergestellter Werkstoffe empfohlen, geringere Festigkeitswerte zu erwarten sind als bei horizontal hergestellten Proben (VDI 3405-2 2012, S. 9).

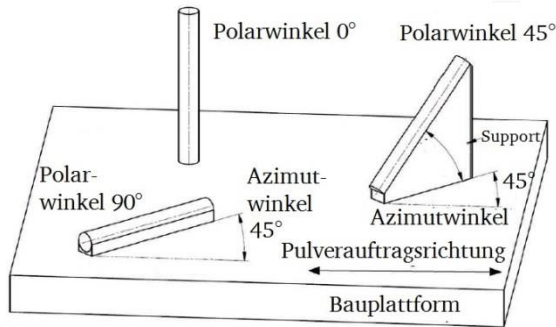


Abbildung 20: Orientierung der SLM-Bauteile im Bauraum
(Quelle: abgeändert nach VDI 3405-2 2012, S. 9)

Als gängige Prüfmethode kristallisiert sich neben der Umlaufbiegeprüfung zur Ermittlung der Biegegewecheigenschaften der uniaxiale, kraftgeregelte Dauerermüdungstest im Zugschwellbereich ($R = 0,1$) heraus, der mit einer Prüffrequenz im Bereich von 40 Hz bis 117 Hz mit einer servohydraulischen oder einer Resonanz-Prüfmaschine durchgeführt wird. Für die Erstellung der jeweiligen Wöhlerlinie kommen zur Prüfung bis zum Bruch oder zur Grenzschwingspielzahl 10^7 zwischen 6 und 40 Proben zum Einsatz. Bei der Probennachbehandlung gibt es unterschiedliche Schwerpunkte. So ist zum einen der Einfluss der Oberflächenbearbeitung untersucht worden, indem sowohl unbearbeitete als auch abgedrehte, sand- sowie kugelgestrahlte und polierte Proben geprüft worden sind. Zum anderen ist der Einfluss von Wärmebehandlung analysiert worden. Eine Nachbehandlung der Proben erfolgt durch Spannungsarm-Glühen zwischen 2 h und 4 h bei einer Temperatur von 482°C bis 1050°C, durch Spitzenhärtung bei 6 h bei 525°C oder durch heiß-isostatisches Pressen. Auch die Temperatur der vorgeheizten Bauplattform ist in einem Versuchsaufbau variiert worden. Außerdem ist der Einfluss der Orientierung der Baurichtung, der Scangeschwindigkeit und der Einfluss von Fehlstellen in der Probengeometrie untersucht worden. Für weitere studentische Arbeiten gibt es Ausschreibungen an der TU-Dortmund im Bereich der Verbesserung der Langzeitfestigkeit von SLM-Proben aus Aluminiumlegierung und an der ETH Zürich mit dem SLM-Werkstoff 1.4404. Dort werden insbesondere der Zusammenhang zwischen Prozessparametern, gemessener Schmelzbadform und Oberflächenqualität sowie statische und dynamische Eigenschaften untersucht (Siddique 2013, Spierings 2013). Neben den genannten Forschungseinrichtungen hat auch das Unternehmen EOS GmbH, welches neben SLM-Maschinen ebenfalls zugehörige Werkstoffe vertreibt, den Werkstoff AlSi10Mg mit Hilfe des Umlaufbiegeversuches bei einer Prüffrequenz von 50 Hz und einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ auf Langzeitfestigkeit bis zu einer Schwingspielzahl von 10^5 geprüft (EOS GmbH 2011b, S. 4).

Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuchsdaten zum Stand der Technik: „Schwingfestigkeit von SLM-Proben“

Quelle	Material	SLM-Maschine	Probengeometrie			Probenbearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Prüfmethode	Prüfmaschine	Prüffrequenz	Grenzschwingspielzahl / Spannungsverhältnis R
			Länge	Prüfdurchmesser	Form						
(Sehrt, Witt 2010)	1.4542 – (Edelstahl)	EOS M 270	86 mm SLM endgültig 80 mm	6,24 mm	Form 1	abgedreht poliert Polarwinkel 90°	40 Proben (4 je Spannungsniveau) im 10N/mm ² Schritt	Umlaufbiegeversuch			10 ⁷ R = -1
(Hooreweder et al. 2010)	Polyamid 12	CO2-laser powered EOS P730	116,7 mm	7,35 mm	Form 2 Iso 1352	12 h abgekühlt 48 h bei Raumtemperatur gelagert Polarwinkel 0°	5 Proben 23,6 MPA 3 Proben 18,9 MPA 3 Proben 17,7 MPA	spannungsge-regelt, uniaxial Zug-Druck	servo-hydraulisch	3 Hz	1,6•10 ⁶ R= -1
(Wang 2011)	Hastelloy® X Nickelbasislegierung	EOS M 270	43 mm	3,81 mm	Form 1	Polarwinkel 0° / 90° HIP (hot isostatic pressing) treatment	6 SLM Polarwinkel 0°	Zug-Zug Ermüdungstest	Amsler vibrophone 20 kN mit integrierter Kraftmessdose	117 Hz	10 ⁷ R = 0,1
							6 SLM + HIP Polarwinkel 0° je 6 SLM + HIP Polarwinkel 0° / 90° je 6 SLM as built Polarwinkel 0° / 90°				
(Starr et al. 2011)	1.4542 (Edelstahl)	EOS M 270	100 mm	3 mm	Form 2	Polarwinkel 0° abgedreht aus SLM-Stangen	10	Zugschwellversuch	Instron Electro-Pulse E10000	50 Hz	10 ⁷ R = 0,1

Quelle	Material	SLM-Maschine	Probengeometrie			Probenbearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Prüfmethode	Prüfmaschine	Prüffrequenz	Grenzschwingenspielzahl / Spannungsverhältnis R																																							
			Länge	Prüfdurchmesser	Form																																													
(Brandl et al. 2012) (Brandl et al. 2011)	AlSi10Mg	Truma-Form LF130	65 mm 1 mm SLM Aufmaß	5 mm 1 mm SLM Aufmaß	Form 2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amount of samples</th> <th>Platform temperature (°C)</th> <th>Building direction (°)</th> <th>Peak-hardened (T6)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>12</td><td>30</td><td>90</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>30</td><td>0</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>30</td><td>45</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>9</td><td>300</td><td>90</td><td>No (as-built)</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>90</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>0</td><td>No (as-built)</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>0</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>45</td><td>No (as-built)</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>45</td><td>Yes</td></tr> </tbody> </table> abgedreht Scangeschwindigkeit 50 mm/s und 500 mm/s	Amount of samples	Platform temperature (°C)	Building direction (°)	Peak-hardened (T6)	12	30	90	Yes	10	30	0	Yes	10	30	45	Yes	9	300	90	No (as-built)	10	300	90	Yes	10	300	0	No (as-built)	10	300	0	Yes	10	300	45	No (as-built)	10	300	45	Yes	EN 6072 Ermüdungstest konst. Amplitude Schwellbereich	Micro-toron 654 (Rumul) Resonanzprüfung	108 Hz	$3 \cdot 10^7$ R = 0,1
Amount of samples	Platform temperature (°C)	Building direction (°)	Peak-hardened (T6)																																															
12	30	90	Yes																																															
10	30	0	Yes																																															
10	30	45	Yes																																															
9	300	90	No (as-built)																																															
10	300	90	Yes																																															
10	300	0	No (as-built)																																															
10	300	0	Yes																																															
10	300	45	No (as-built)																																															
10	300	45	Yes																																															
(EOS GmbH 2011b)	AlSi10Mg	EOS M 270	50,8 mm (Braun 2013)	4 mm	Form 2	nach DIN 50113 poliert ($R_z = 1,6 \mu\text{m}$)	Umlaufbiegeversuch		50 Hz	10^5 R = -1																																								
(Gong et al. 2012)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	EOS M 270	65 mm	3 mm zylindrische Fehlstelle / konische Fehlstelle	Form 2	Polarwinkel 0° sandgestrahlt Wärmebehandlung 650°C für 4 h in Argon-Umgebung	8 ohne Fehlstelle 8 mit zylindrischer Fehlstelle (d= 0,5mm, h= 0,4 mm) 8 mit doppelt konischer Fehlstelle (d= 0,5 mm, h= 0,8 mm)	Wöhlerversuch	Instron Electropuls E10000 All-Electric test machine	50 Hz	10^7 R=0,1																																							
(Spierings et al. 2013)	1.4404 (Stahl austenitisch, rostfrei) 1.4540 Edelstahl	Concept Laser M1 EOS M 270	65 mm	3 mm	Form 2	hand-polier $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ abgedreht $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ as built $R_a = 10 \mu\text{m}$ Polarwinkel 0°	jeweils 8-12 Proben	Wöhlerversuch	Instron Electropuls E10000 All-Electric dynamic test machine	50 Hz	10^7 R=0,1																																							

Quelle	Material	SLM-Maschine	Probengeometrie			Probenbearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Prüfmethode	Prüfmaschine	Prüffrequenz	Grenzschwingungszahl / Spannungsverhältnis R
			Länge	Durchmesser	Form						
(Leuders et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	SLM 250 HL SLM Solution GmbH	< 120 mm SLM 120 mm	< 12,1 mm SLM 12,1 mm	Rundprobe ASTM E 466-07	Polarwinkel 0° abgedreht Wärmebehandlung (2h): -ohne -800° Argon -1050° Vakuum -HIP 1000 bar Argon	mindestens 3 Proben je Test 18 Proben für Treppenstufentest	uni-axialer Wöhler-versuch Zug-Druck Treppenstufen-versuch	Zwick/Roell Amsler HB 250	40 Hz	$2 \cdot 10^6$ R = -1
(Wycisk et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	EOS M 270	65 mm	3 mm	Form 2 ISO 12107: 2003	$R_a \approx 13 \mu\text{m}$ as built $R_a \approx 0.5 \mu\text{m}$ poliert $R_a \approx 2,9 \mu\text{m}$ kugelgestrahlt Polarw. 45°/ 90° Wärmebehandlung 3h 650°C Argon-Kühlung	15 as built Polarwinkel 90° 12 as built Polarwinkel 45° 12 poliert Polarwinkel 90° 12 poliert Polarwinkel 45° 15 kugel-gestrahlt Polarwinkel 90°	Wöhler-versuch uniaxial Zug-Schwellbereich	100 kN servo-hydraulisch MTS 31 mit integrierter Kraftmessdose	50 Hz	10^7 R=0,1
(Rafi et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	EOS M 270			ASTM 466	CNC-bearbeitet $R_a = 3 \mu\text{m}$ Polarwinkel 0°	9 Proben	Wöhler-versuch uniaxial Zug-Schwellbereich	Instron 10 kN (Electro-pulse E10000)	50 Hz	10^7 R=0,1
	1.4540 Edelstahl					Wärmebehandlung 4 h Ti-6Al-4V (650°C) 1.4540 (482°C)	15 Proben				

Quelle	Material	SLM-Maschine	Probengeometrie			Probenbearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Prüfmethode	Prüfmaschine	Prüffrequenz	Grenzschwingspielzahl / Spannungsverhältnis R
			Länge	Durchmesser	Form						
(Hooreweder et al. 2013)	Polyamid 12	CO2-laser powered EOS P730	117 mm	7,35 mm	Form 2 Iso 1352	12 h abgekühlt 48 h bei Raumtemperatur gelagert Polarwinkel 0° / 90°	min. 15 für jede Wöhlerkurve ungekerbt Polarwinkel 0° ungekerbt Polarwinkel 90°	spannungsgeregelt, uniaxial Zug-Druck	servo-hydraulisch	3 Hz	1,6•10 ⁶ R= -1
			84 mm	12 mm in der Kerbe: 7,35 mm	zylindrische Probe mit 60° Kerbe						
(Chan et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	EOS M 270	30 mm • 2,5 mm • 4 mm		rechteckig	erodiert $R_a \approx 7,67 \mu\text{m}$ as built $R_a \approx 38,5 \mu\text{m}$	10 Proben bei 600 MPa erodiert 10 Proben bei 600 MPa as built	Spannungsgeregelter Dreipunkt-Biegeversuch 20,67 mm Spannweite	10 Hz	10 ⁷ R= 0,1	
(Urban 2013)	Nickelbasis-Legierung	SLM 250HL			Form 1	Poliert $R_a \approx 5 \mu\text{m}$	31	Umlaufbiegeversuch			

2.5.2 Bekannte Ergebnisse von Schwingfestigkeitstests an SLM-Proben

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse bekannter Schwingfestigkeitstests von SLM-Proben zusammengestellt. Eine detaillierte Übersicht der jeweiligen Versuchsergebnisse ist in Tabelle 29 im Anhang zu finden. Bisher durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass die ermittelte Langzeitfestigkeit von SLM-Proben in der Größenordnung konventionell hergestellter Proben liegen (Sehrt, Witt 2010, S. 386; Spierings et al. 2013, S. 90-93). Gleichwertige Ermüdungsfestigkeitswerte werden dann erreicht, wenn Einflüsse aufgrund von Oberflächenbeschaffenheit und Inhomogenität im Gefüge, zum Beispiel durch Nachbehandlung mittels heiß-isostatischem Pressen, reduziert werden (Leuders et al. 2013, S. 303, 305-306). Bei der Verarbeitung der Titanlegierung Ti-6Al-4V konnten im Vergleich zu Standardgussproben höhere Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen aufgrund der herstellungsbedingt feinen, lamellaren und nadelförmigen Mikrostruktur erzielt werden (Rafi et al. 2013, S. 9-10). Außerdem gibt es einen signifikanten Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Langzeitfestigkeit (Brandl et al. 2012, S. 165). Temperaturmessungen während des Versuchsablaufs haben bei Hooreweder et al. (2010, S. 323) ergeben, dass der werkstoffabhängige Anstieg der Temperatur mit zunehmender Schwingspielzahl in den Proben einen Einfluss auf die Langzeitfestigkeit hat. Gekühlte Proben erzielen bessere Langzeitfestigkeitswerte. Die größten Einflüsse auf die Langzeitfestigkeit haben die Dichte sowie die Mikrostruktur des hergestellten SLM-Bauteils (Hooreweder et al. 2010, S. 323). Die Variation in der Mikrostrukturheterogenität durch Fehler wie Risse, Porosität und ungeschmolzene Pulverpartikel sind auch in den Proben zu finden, die mit optimalen Parametern aufgebaut worden sind (Sehrt, Witt 2010, S. 386; Wang 2011, S. 548-550). Eingebaute interne Fehler beeinflussen die Entstehung von Ermüdungsrissen und führen zu niedrigeren Werten bei der Langzeitfestigkeit von SLM Proben (Gong et al. 2012, S. 501-502, 505; Wang 2011, S. 548-550). In den Versuchsreihen von Wycisk et al. (2013, S. 136-138) haben Poren von $40\ \mu\text{m}$ oder größer zum frühen Ausfall geführt. Die Homogenität der Mikrostruktur wird mit zunehmender Zykluszahl relevanter, da dort der dominierenden Einfluss auf die Lebensdauer die innere Rissbildung ist (Wang 2011, S. 548-550). Eine Reduzierung der Porengröße und damit eine Erhöhung der Dichte verbessert die Langzeitfestigkeit (Brandl et al. 2012, S. 163-164, 168). Eine Behandlung durch heiß-isostatisches Pressen (HIP), bei dem die Proben unter einem Druck von 1000 bar gegläht werden, ist als Nachbearbeitungsprozess geeignet, da die Restspannung minimiert und die Porosität reduziert wird, so dass sich die Dichte erhöht und das Gefüge durch Beseitigung von Fehlstellen homogenisiert wird (Leuders et al. 2013, S. 303, 305-306; Wang 2011,

S. 548-550). In der Versuchsreihe von Wang (2011, S. 548-550) verbessert eine HIP-Behandlung die Festigkeitseigenschaften um wenigstens 50 N/mm² und vermindert außerdem Streuungen in Schwingfestigkeitstest. Proben, die gegläht oder spitzengehärtet sind, erreichen durch eine Teilhomogenisierung der Mikrostruktur ebenfalls bessere Langzeitfestigkeitswerte als unbehandelte Proben. Diese Werte liegen aber unter den Langzeitfestigkeitswerten von HIP-behandelten Proben (Brandl et al. 2012, S. 163-164, 168; Leuders et al. 2013, S. 303, 305-306). Für den Edelstahlwerkstoff 1.4542 sind zudem die Art des Schutzgases sowie das verwendete Gas zur Pulverherstellung von Bedeutung, da dieses die Ausprägung des Gefüges beeinflusst. Argon fördert die Bildung von Martensit, während Stickstoff die Austenitbildung begünstigt (Murr et al. 2012, S. 11). Der von der Firma EOS vertriebene SLM-Werkstoff 1.4542 wird unter der Verwendung von Stickstoffgas hergestellt (Gu et al. 2013, S. 475). Insgesamt fällt auf, dass Einflüsse, wie anisotrope Effekte, Materialart, SLM-Verarbeitungsparameter und Wärmebehandlung, die sich auf die Größe der inneren Poren und die Gefügestruktur auswirken, eine reproduzierbare Wirkung auf die Langzeitfestigkeit haben. Dies ist auf die durch die Gefügestruktur bedingte Möglichkeit zur Rissausbreitung und Bruchzähigkeit zurückzuführen (Spierings et al. 2013, S. 90-93). Somit konnten in den Versuchen von Brandl et al. (2011, S. 4-6; 2012, S. 168) bei der Scangeschwindigkeit von 50 mm/s höhere Langzeitfestigkeitswerte erzielt werden als bei einer Scangeschwindigkeit von 500 mm/s. Proben, die auf einer auf 300°C vorgeheizten Bauplattform hergestellt worden sind, haben höhere Langzeitfestigkeiten erzielt als Proben, deren Herstellung mit 30°C Plattformtemperatur erfolgt ist. Unter hohen Belastungen im Bereich der Zeitfestigkeit haben horizontal gebaute Proben eine höhere Lebensdauer. Im Bereich der Langzeitfestigkeit weisen vertikal und horizontal hergestellte Proben im Gegensatz zum Bereich der Zeitfestigkeit keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Langzeitfestigkeit auf (Wang 2011, S. 548-550). Neben der Analyse von statischer und dynamischer Festigkeit und der Analyse der Porosität ist das Wissen über die Bruchzähigkeit besonders wichtig. Mit Hilfe der Bruchzähigkeit können Angaben über die erforderliche Höhe der Belastung gemacht werden, die zur Rissinitiierung bereits vorhandener Fehlstellen führen (Sehrt, Witt 2010, S. 368; Wycisk et al. 2013, S. 136-138).

Ein weiterer Einfluss auf die Langzeitfestigkeit von SLM-Proben ist die Oberflächenbeschaffenheit, die bei unbearbeiteten Proben im Bereich von $R_a = 10-20 \mu\text{m}$ liegt. Unbehandelte Proben sind von Wycisk et al. (2013) und Spierings et al. (2013) geprüft worden. Die Ermüdungsfestigkeit der unbearbeiteten (as built) Proben aus der Titanlegierung Ti-6Al-4V liegt in den Versuchen von Wycisk et al. (2013, S. 136-138) bis zu 40 % unterhalb

des Wertes konventionell hergestellter Standardproben, während die Ermüdungsfestigkeit nach Kugelstrahlen bis zu 15 % niedriger ist und Risse dort insbesondere an inneren Poren entstehen. Festigkeitswerte polierter Proben sind in diesen Versuchsreihen vergleichbar mit Festigkeitswerten von gegossenem Werkstoff. Für die ausgeprägte Streuung bei der Ermüdungsfestigkeit der polierten Proben sind sowohl Oberflächen- als auch Untergrundrisse aufgrund variierender Dichte verantwortlich (Wycisk et al. 2013, S. 136-138). Die Oberflächenrauigkeit unbearbeiteter Edelstahlproben hingegen reduziert die Festigkeitswerte nach Spierings et al. (2013, S. 136-138) nur geringfügig beziehungsweise nach Rafi et al. (2013, S. 5, 9-10) um etwa 20 %. Abgedrehte und polierte Edelstahlproben weisen kaum Unterschiede im Bereich der Langzeitfestigkeit auf. Außerdem konnte in den Versuchsreihen von Spierings et al. (2013, S. 136-138) kein Zusammenhang zwischen kugelförmige Pulverteilchen, die an der Oberfläche angeschmolzen sind, und entstehenden scharfen Oberflächenrissen oder Belastungskonzentration nachgewiesen werden. In weiteren Versuchen von Chan et al. (2013, S. 1021) zeigen Oberflächenkerben unter dem Rasterelektronenmikroskop jedoch die Initiierung von Rissen. Die Lebensdauer von SLM-Proben mit erodierter Oberfläche ($R_a = 5 \mu\text{m}$) ist daher nach Chan et al. (2013, S. 2021) aufgrund unterschiedlicher Spannungskonzentrationen durch Kerbwirkung an der Oberfläche höher als die von SLM-Proben mit unbearbeiteter Oberfläche ($R_a = 38 \mu\text{m}$). Dennoch erreichen erodierte SLM-Proben im Bereich hoher Belastung geringere Lebensdauern als geschmiedete Proben (Chan et al. 2013, S. 2021). Analysen zum Einbau von Fehlstellen in den Probenquerschnitt zeigen eine Herabsetzung der Langzeitfestigkeit. Ein Unterschied zwischen einer zylindrischen und einer doppelt-konischen Fehlstelle im Probenquerschnitt konnte bei Gong et al. (2012, S. 501-502, 505) nicht festgestellt werden. Bei Schwingfestigkeitstests von Kunststoffproben fällt auf, dass der Ermüdungsbruch aller Proben durch Kombination von zyklischer, mechanischer Belastung mit Temperatur-Effekten hervorgerufen wird. Die auftretenden Phänomene durch Temperatureinfluss sind noch nicht abschließend analysiert. Die Baurichtung der Kunststoff-SLM-Proben hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Langzeitfestigkeit, welche mit spritzgegossenen Proben vergleichbar ist. Die ermittelten Poren ($10 \mu\text{m}$ - $200 \mu\text{m}$) in den Versuchen von Hooreweder et al. (2013, S. 978-980) haben außerdem keine stärkeren Auswirkungen auf die Lebensdauer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das poröse Kunststoffmaterial bei Belastung verformt wird und Verschmelzung in den Mikrohohlräumen auftritt, welche nicht zu schneller Rissbildung und Rissausbreitung führt. Des Weiteren ist auffällig, dass gekerbte Kunststoff-SLM-Proben ohne den Einsatz von künstlicher Kühlung gleichwertige

beziehungsweise leicht erhöhte Langzeitfestigkeitswerte im Vergleich zu den ungekerbten Kunststoff-SLM-Proben zeigen. Dies wird der Kerbverfestigung, die auch im Zugversuch beobachtet worden ist, zugeschrieben. Im Allgemeinen führen Schwingfestigkeitstests an ungekerbten Proben zum Zähbruch mit halbkugelförmiger Vertiefung, während die Belastung der gekerbten Proben aufgrund des dreiachsigen Spannungszustandes im Kerbgrund zum Sprödbruch führt (Hooreweder et al. 2013, S. 978-980).

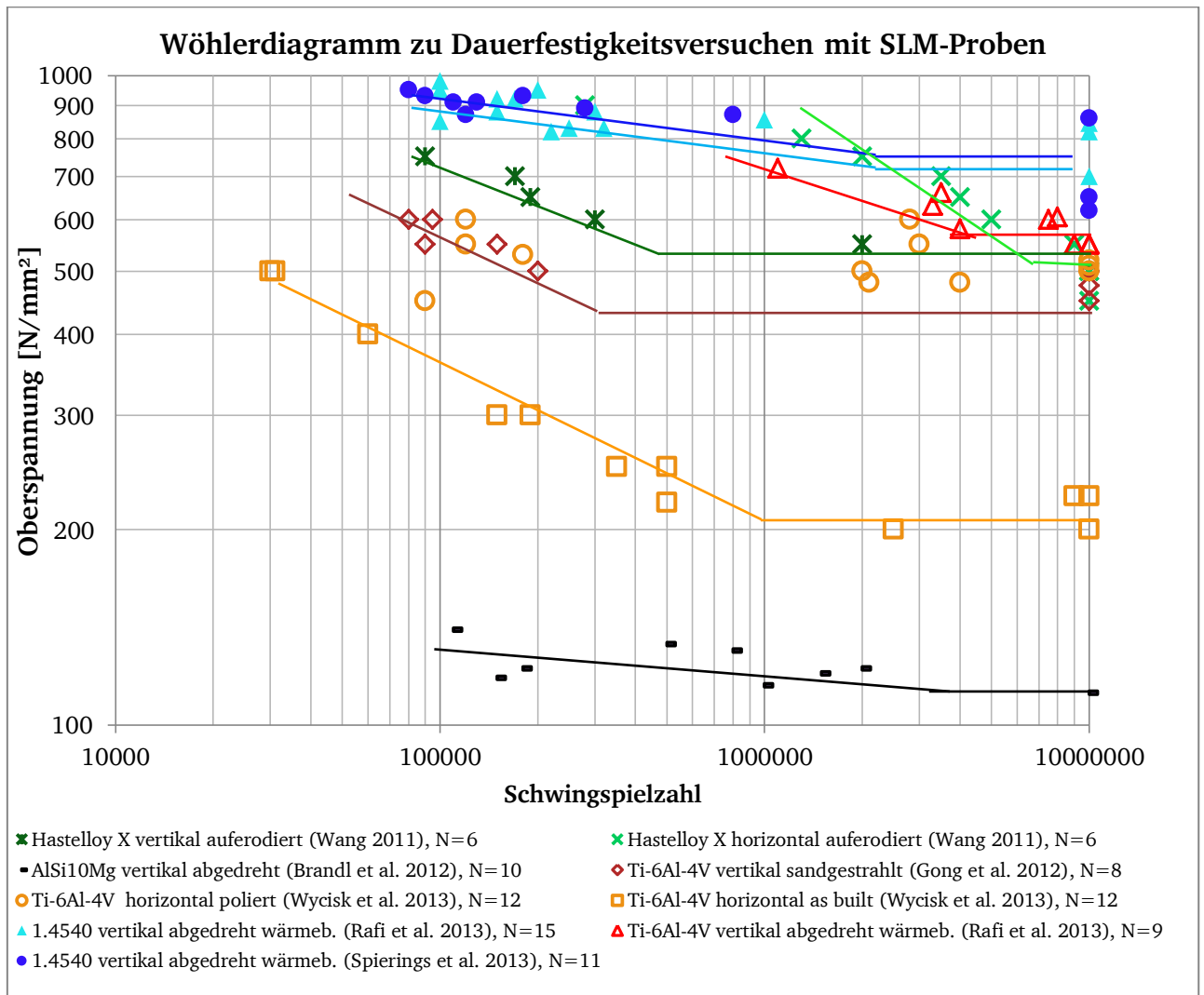


Abbildung 21: Wöhlerdiagramm (logarithmisch) mit beispielhaften Wöhlerlinien zu Schwingfestigkeitsversuchen mit SLM-Proben diverser Versuchsreihen
 -Edelstahl gehärtet (blau-ausgefüllt) -Ti-6Al-4V (Titanlegierung) (rot/orange-umrandet)
 -Hastelloy X (grün-Kreuze) -AlSi10Mg (schwarz-Strich)

In Abbildung 21 sind in einem Wöhlerdiagramm Versuchsergebnisse diverser Versuchsreihen sowie deren mögliche Wöhlerlinien zusammengestellt (siehe Legende). Die Versuchsreihen

von nicht gehärteten Edelstählen, welche mit dem in dieser Studienarbeit verwendeten Werkstoff 1.4542 vergleichbar sind, befinden sich in Abbildung 22.

Beim Werkstoff 1.4540 streuen die Ergebnisse im Bereich der Langzeitfestigkeit stark, liegen jedoch in der gleichen Größenordnung (Rafi et al. 2013; Spierings et al. 2013). Die Ergebnisse für die Titanlegierung Ti-6Al-4V zeigen, dass sowohl sandgestrahlte als auch polierte Proben höhere Langzeitfestigkeiten erreichen als unbearbeitete Proben. Eine anschließende Wärmebehandlung führt zur Verbesserung der Langzeitfestigkeit (Gong et al. 2012; Rafi et al. 2013; Spierings et al. 2013; Wycisk et al. 2013). Die jeweiligen Abknickpunkte variieren stark und liegen im Bereich von $3 \cdot 10^5$ bis $7 \cdot 10^6$ Schwingspielen. Da den Versuchen des Werkstoffs 1.4542 unterschiedliche Belastungsarten zu Grunde liegen, ergeben sich für die Umrechnung der einzelnen Schwingfestigkeiten nach Abbildung 7 in Kapitel 2.2 folgender überschlägige Umrechnungsfaktor für Stahl:

$$(10) \quad \sigma_{sch} = 1,15 \cdot \sigma_{bw}$$

In den folgenden Diagrammen sind die Werte von Sehr und Witt (2010) nach Formel (10) angepasst. Auffällig ist, wie in Abbildung 22 zu erkennen, dass die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen für den Werkstoff 1.4542 nur eine geringe Abweichung von maximal 50 N/mm^2 aufweist und die Wöhlerlinie sehr flach verläuft (Sehr, Witt 2010; Starr et al. 2011).

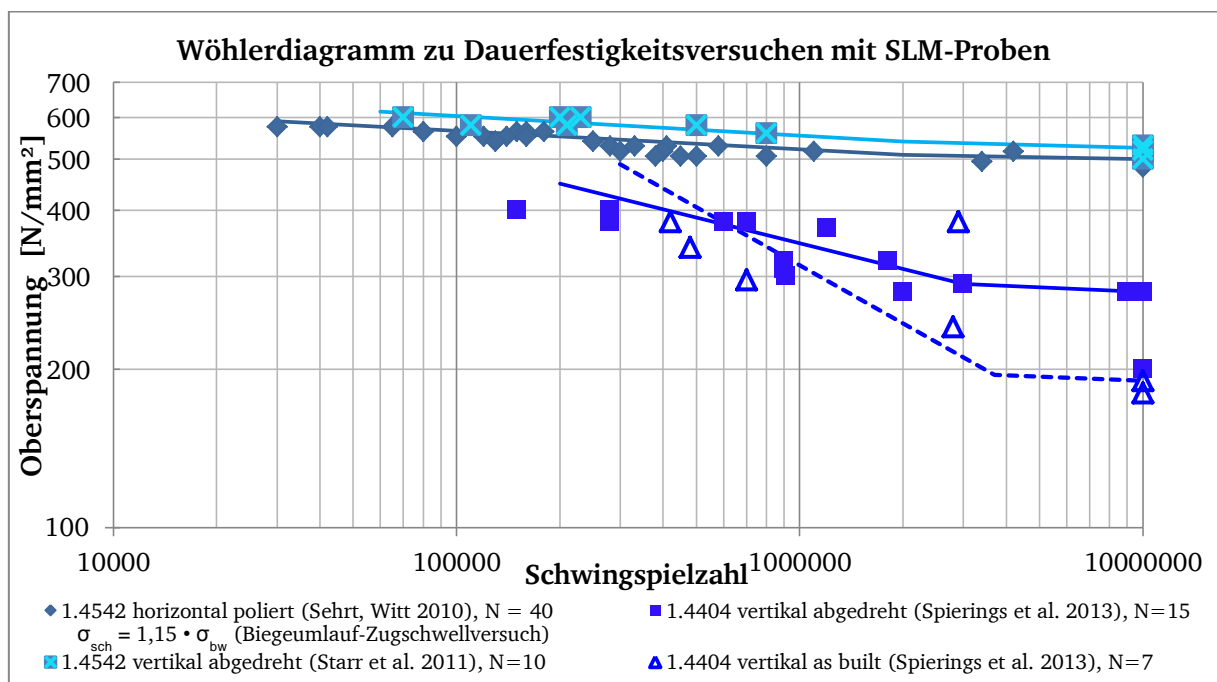


Abbildung 22: Wöhlerlinien von SLM-Proben aus nicht gehärtetem Edelstahl diverser Versuchsreihen

Der Abknickpunkt liegt für nachbearbeitete 1.4542 Proben bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen und einem Belastungshorizont σ_0 im Bereich von 495 bis 520 N/mm². Die Wöhlerlinie des Werkstoffs 1.4404 hingegen hat eine signifikant größere Neigung und einen Abknickpunkt bei $N_k = 3 \cdot 10^6$ Schwingspielen bei einer Belastung von $\sigma_{0,k} = 290$ N/mm². Unbehandelte Proben weisen bei Spierings et al. (2013) eine signifikante Streuung auf. Aufgrund der geringen Anzahl von sieben Proben ist die Ermittlung einer Wöhlerlinie nicht zielführend. Die Langzeitfestigkeit wird jedoch von Spierings et al. (2013) um 100 N/mm² niedriger als die der abgedrehten Proben auf $\sigma_0 = 190$ N/mm² eingeschätzt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung von Zugfestigkeit und Langzeitfestigkeit von SLM-Werkstoffen

Material	Zugfestigkeit [N/mm²] nach Hersteller- angaben	Langzeitfestigkeit [N/mm²] nach Abbildung 21 und Abbildung 22	Verhältnis von <u>Dauerfestigkeit</u> Zugfestigkeit
1.4542 (Sehrt, Witt 2010)	850-930	471,5 poliert ($1,15 \cdot \sigma_{bw}$)	0,52
1.4542 (Starr et al. 2011)	850-930	500 poliert	0,56
1.4540 (wärmebehandelt) (Spierings et al. 2013)	1050-1150	650	0,59
1.4540 (wärmebehandelt) (Rafi et al. 2013)	1310	750 abgedreht	0,57
Ti-6Al-4V (Wycisk et al. 2013)	930	200 unbearbeitet 500 abgedreht / poliert	0,22 0,54
Ti-6Al-4V (wärmebehandelt) (Rafi et al. 2013)	1200	550 abgedreht	0,46
AlSi10Mg (Brandl et al. 2012; EOS GmbH 20011b, S. 4)	405-445	105 112 ($1,15 \cdot \sigma_{bw}$) (Biegewechsel- festigkeit)	0,25 0,26

Die Gegenüberstellung der Zugfestigkeitswerte zu den Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen in Tabelle 5 zeigt, dass die Langzeitfestigkeit von Edelstahlproben mit nachbearbeiteter Oberfläche im Bereich der 0,6-fachen Zugfestigkeit liegt. Nach Roos und Maile (2011, S.100) liegt der Umrechnungsfaktor gemäß Abbildung 7 für Stahl im Zugschwellbereich signifikant oberhalb des ermittelten Wertes bei 0,8. Für die Titanlegierung Ti-6Al-4V ergibt sich ein Faktor im Bereich von 0,5. Ein Vergleichswert nach Roos und Maile (2011, S. 100) existiert nicht. Eine Ausnahme bildet die Aluminiumlegierung AlSi10Mg, die nur einen Langzeitfestigkeitswert von einem Viertel der Zugfestigkeit erreicht. Auffällig ist auch, dass unbearbeitete Proben der Titanlegierung bei Wycisk et al. (2013) nur eine Langzeitfestigkeit der 0,2-fachen Zugfestigkeit aufweisen.

2.6 Schwingfestigkeitsprüfung von SLM-Bauteilen

Für den Einsatz im industriellen Umfeld ist es unabdingbar die Langzeitfestigkeit von Bauteilen zu kennen. Der Einsatz von SLM-Bauteilen ist zurzeit streng limitiert, da Versuche im Rahmen der Langzeitfestigkeit an Bauteilen noch nicht in größerem Maße durchgeführt worden sind. Bekannt ist die Durchführung von Schwingfestigkeitstest an porösen Bauteilen mit variierender Porosität und variierender Stebengröße aus Ti-6Al-4V im Druckschwellbereich (Yavari et al. 2013, S. 4852). Zum Einsatz kommt dort ein hydraulischer Prüfstand mit einem 25 kN Kraftmesssensor. Die Belastungsfrequenz liegt bei 15 Hz, während das Spannungsverhältnis R bei -1 gewählt ist. Als Abbruchkriterium ist der Abfall der Steifigkeit unter 90 % festgesetzt (Yavari et al. 2013, S. 4851-4852). In Abbildung 23 ist beispielhaft ein solches poröses Bauteil mit einer Länge von 15 mm und einem Durchmesser von 10 mm dargestellt (Yavari et al. 2013, S. 4855).

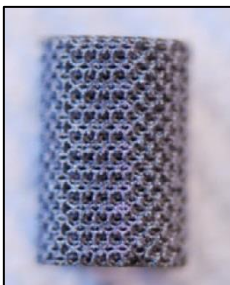


Abbildung 23: Poröses Bauteil zur Prüfung der Schwingfestigkeit im Druckschwellbereich
(Quelle: Yavari et al. 2013, S. 4855)

In Abbildung 24 sind die Wöhlerkurven der vier Versuchsreihen mit variierender Stegbreite und Porosität zu sehen. Proben mit höherer Porosität sowie dünneren Stegen erzielen geringere Festigkeitswerte als Proben mit niedriger Porosität oder breiteren Stegen. Außerdem ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Langzeitfestigkeit und Streckgrenze, die für die Bauteile der Versuchsreihen im Bereich von 16-92 MPa liegt, festzustellen (Yavari et al. 2013, S. 4852). Auffällig ist jedoch, dass die ermittelten Festigkeitswerte über 85 % unterhalb der Zugfestigkeit des SLM-verarbeiteten Grundwerkstoffs liegen, der im Bereich von 1000 MPa angegeben wird (EOS GmbH 2011a, S. 4).

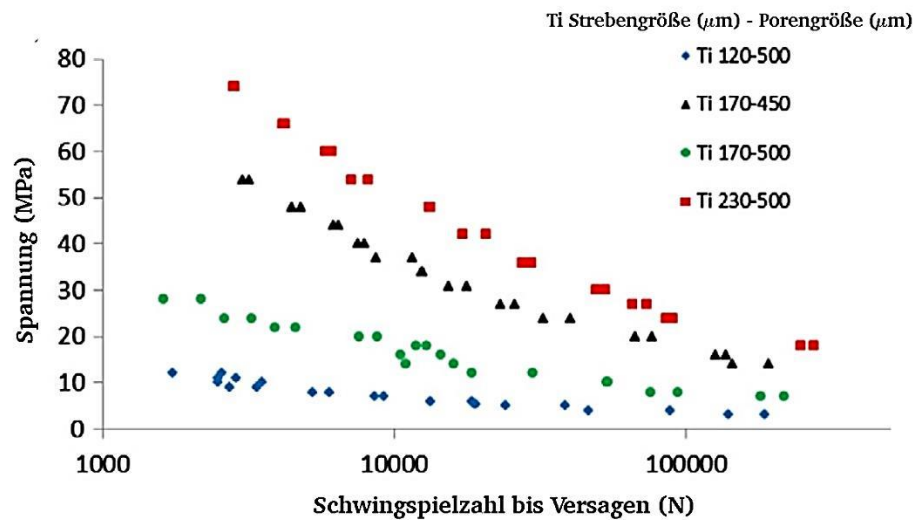


Abbildung 24: Wöhlerkurven von vier Versuchsreihen zur Schwingfestigkeit poröser Bauteile im Druckschwellbereich abgeändert nach (Quelle: Yavari et al. 2013, S. 4852)

Des Weiteren gibt es Versuchsreihen zur Schwingfestigkeit einer dünnwandigen Probengeometrie aus mittels SLM hergestelltem Titan, dessen Zugfestigkeit mit 620 MPa angegeben wird. Die Geometrie der Proben ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Prüfung der Proben ist im Zugschwellbereich mit einem Spannungsverhältnis R von 0,1 und einer Grenzschwingspielzahl von 10^7 bei einer Prüffrequenz von 2 bis 20 Hz durchgeführt worden. Die maximale Rauigkeit der Probenoberfläche R_z liegt bei $52 \mu\text{m}$ und die mittlere Rauigkeit R_a bei $11 \mu\text{m}$. Insgesamt sind 40 unbehandelte und 18 wärmebehandelte Proben, die bei 440°C im Vakuum 7 h gegläht und anschließend langsam abgekühlt worden sind, geprüft worden (Lipinski et al. 2013 S. 277-278, 281).

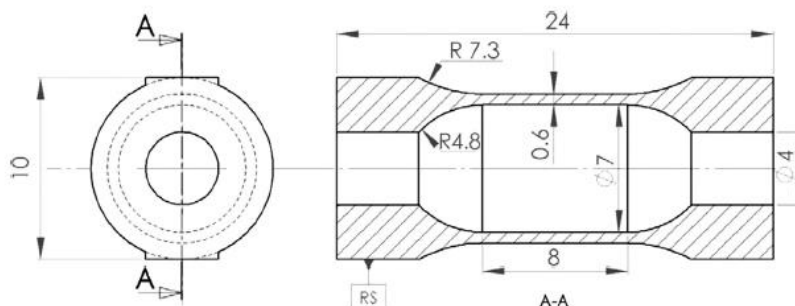


Abbildung 25: Technische Zeichnung der dünnwandigen Titan-Schwingfestigkeitsprobe (Quelle: Lipinski et al. 2013, S. 277)

Die in Abbildung 26 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass die Schwingfestigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich sowohl bei unbehandelten Proben als auch bei wärmebehandelten

Proben signifikant niedriger als die Zugfestigkeit unterhalb von 70 MPa liegt. Die Linien im Diagramm markieren den Bereich, in dem 95 % der Proben versagen.

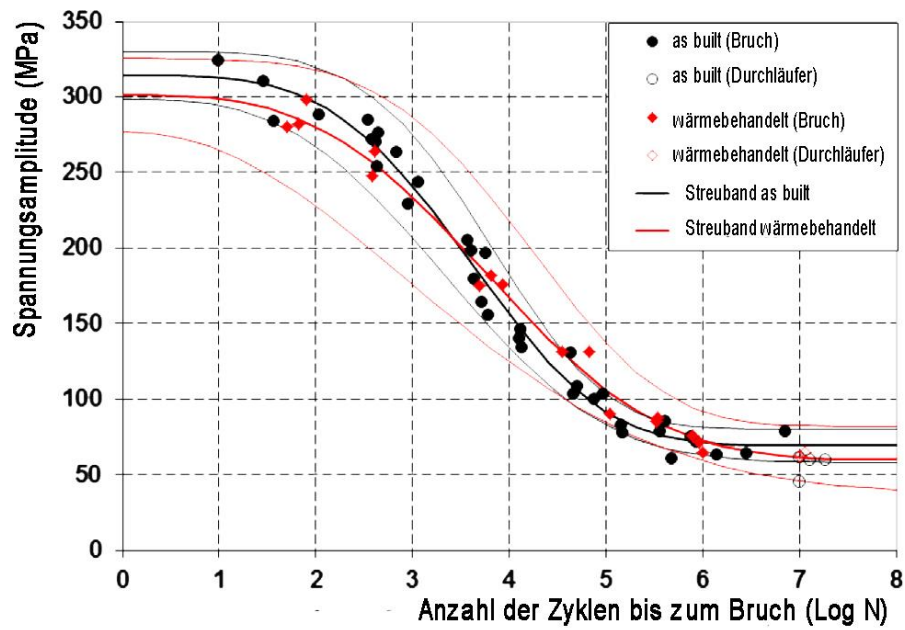


Abbildung 26: Versuchsergebnisse und resultierende Wöhlerlinien von unbehandelten und wärmebehandelten dünnwandigen SLM-Titan-Proben (Quelle: abgeändert nach Lipinski et al. 2013, S. 277)

3 Versuchsplanung und -durchführung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Ermittlung der Schwingfestigkeit von bereits entwickelten und in Stoffregen et al. (2011, 2013) dargestellten SLM-Gehäusen. Nachdem im vorherigen Kapitel der Stand der Technik zum SLM, zu Prüfmethode und -techniken für Schwingfestigkeitsuntersuchungen sowie zur Durchführung von Schwingfestigkeitsprüfungen an SLM-Werkstoffen und Bauteilen dargestellt ist, geht es im folgenden Kapitel um die Festlegung einer geeigneten Prüfmethode und Versuchsanordnung für Schwingfestigkeitsuntersuchungen von SLM-Proben und für SLM-Piezo-Aktorgehäuse aus 1.4542 sowie die experimentelle Durchführung der geplanten Versuche. Zunächst wird in diesem Kapitel daher die Ausarbeitung der Versuchspläne für die SLM-Proben dargestellt. Die Festlegung der jeweiligen Methode, Technik und Parameter erfolgt im Hinblick auf die Schwingfestigkeitsuntersuchungen von SLM-Aktorgehäusen, deren Versuchsplanung anschließend beschrieben ist. Ein Schwerpunkt liegt bei der Versuchsplanung der SLM-Proben auf der Untersuchung des Oberflächeneinflussfaktors auf die Schwingfestigkeit. Die Erarbeitung weiterer kritischer Einflussfaktoren auf mittels SLM hergestellte Piezo-Aktorgehäuse und die Versuchsplanung für die Prüfung der SLM-Gehäuse erfolgt unter Zuhilfenahme bereits am Institut vorhandener mechanischer ANSYS Simulationsmodell-Ergebnisse. Das Kapitel wird abgeschlossen mit der Darstellung der Herstellung und der experimentellen Durchführung der Schwingfestigkeitsuntersuchung von Proben und Aktormodulgehäusen.

3.1 Versuchsplanung

Im Rahmen dieses Kapitels werden Versuchspläne für die Untersuchung von mittels SLM hergestellten Proben und piezoelektrischen Aktormodulen erarbeitet. Diese umfassen sowohl die Auswahl der Prüfmethode, der Prüftechnik, der Probenform, der Probenanzahl und der Nachbearbeitung sowie der Art der Prüfmaschine und die kompatible Einspannung. Zunächst werden Anforderungen an Piezo-Aktorgehäuse erarbeitet, um die Versuchsbedingungen entsprechend auswählen zu können. Die Herstellung der Proben und Aktormodule erfolgt im Rahmen dieser Masterarbeit am PTW, während die experimentellen Untersuchungen zur Schwingfestigkeit am Fraunhofer LBF durchgeführt werden. In Abbildung 27 sind die wesentlichen Schritte zur Ermittlung der Schwingfestigkeit, die am Fraunhofer LBF Anwendung finden und die als Grundlage der folgenden Versuchsplanung dienen, dargestellt.

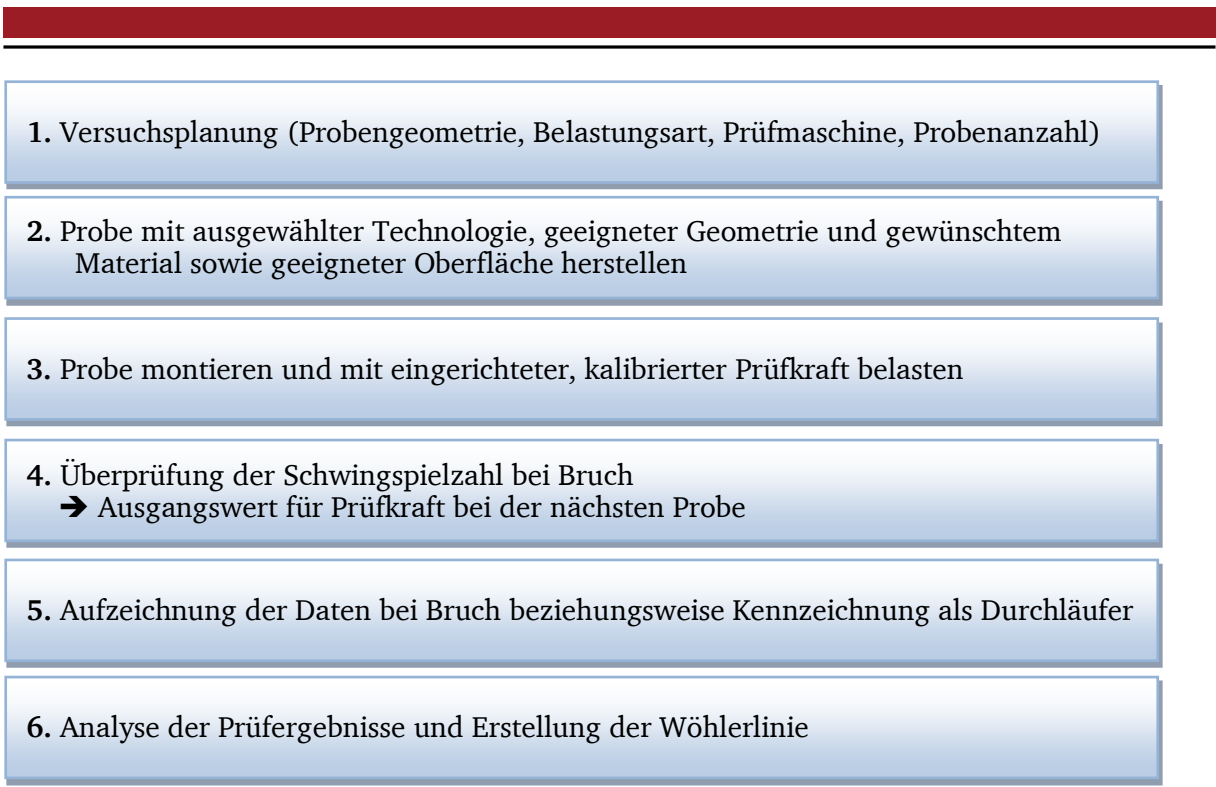


Abbildung 27: Übersicht zur Ermittlung der Schwingfestigkeit in sechs Schritten
(Quelle: abgeleitet aus Morgenstern et al. 2006, S. 7)

Beginnend mit der Versuchsplanung und der Herstellung der Proben oder Bauteile im zweiten Schritt, folgt die Einrichtung der Prüfmaschine, die Probenmontage und Prüfung an dritter Stelle. Das jeweilige Versuchsergebnis beeinflusst im vierten Schritt die Prüfkraft für den folgenden Versuch. Nach Abschluss der Versuche erfolgt die Aufzeichnung der Daten im vom LBF festgelegten Versuchsprotokoll. Die Ermittlung von Wöhlerlinien als Ergebnisdarstellung der Schwingfestigkeitsversuche im letzten Schritt ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Versuchsreihen.

3.1.1 Proben- und Bauteilherstellung

Die Herstellung der Proben und Aktormodule erfolgt mit der am PTW zur Verfügung stehenden SLM-Maschine EOS M 270. Als Werkstoff wird der Edelstahl 1.4542 verwendet, der eine Zugfestigkeit von mindestens 981 N/mm² aufweist (Abele et al. 2014, S. 4). Eine detailliertere Beschreibung des Systems und des Werkstoffs ist in Kapitel 2.1.2 zu finden. Der Auftrag der Pulverschicht erfolgt bei den Proben mittels Keramik Klinge, um eine gleichmäßige Schichtdicke zu erreichen. Bei den Aktormodulgehäusen kommt aufgrund der Überhänge und damit einer erhöhten Verklemmgefahr eine Bürste beim Pulverauftrag zum Einsatz. Die Übergabe der Bauteilinformationen erfolgt über CAD-Dateien im STL-Format, die mit der

Software NX des Unternehmens Siemens erstellt werden. Mit dem Add-In EOS PP-Tools im Programm Magics RP des Unternehmens Materialise werden die benötigte Supportstruktur und die Schichtinformationen erstellt. Bei der Supportstruktur ist aufgrund der hohen Probenlänge auf ausreichende Festigkeit zu achten, damit ein Abknicken der Proben verhindert wird. Als Belichtungsstrategie dient die Streifen-Belichtung (siehe Abbildung 28), bei der jeweils mäanderförmig in Streifen mit einer festgelegten Breite und einer Überlappung von $50\ \mu\text{m}$ belichtet wird. Die Belichtungsrichtung rotiert nach jeder Schicht um einen festgelegten Winkel (EOS GmbH 2009b).

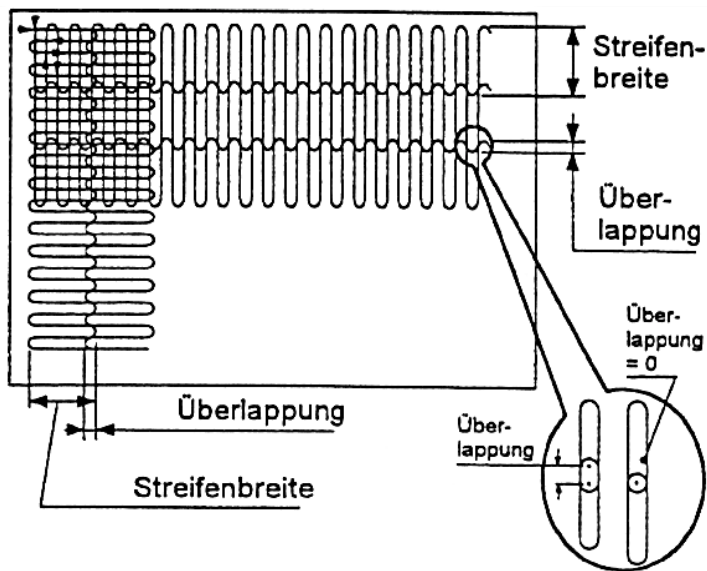


Abbildung 28: Streifen-Belichtungsstrategie beim SLM (Quelle: EOS GmbH 2009b)

Die Herstellung des Aktormodulgehäuses setzt sich aus vier Arbeitsschritten, wie in Abbildung 29 dargestellt, zusammen. In einem ersten Schritt wird das Gehäuse bis zur Integrationshöhe mittels SLM gebaut. Ist diese Höhe erreicht, wird der Prozess unterbrochen, das lose Pulver aus dem Inneren entfernt und das Gehäuse mit einem zuvor hergestellten Deckel verschlossen. Dieser bildet eine ebene Schicht, auf der der SLM-Prozess fortgesetzt werden kann. Damit ist das Gehäuse vollständig geschlossen (Stoffregen et al. 2013, S. 3). Zwischen Schritt drei und vier kann der Aktor in das Gehäuse eingesetzt werden. Dies ist für die Schwingfestigkeitsuntersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit nicht nötig, da ausschließlich die Festigkeit und Lebensdauer der Gehäuse untersucht werden soll. Das lose Pulver wird für den Bau der Gehäuse in dieser Masterarbeit aufgrund der Entlüftungsbohrung nur so weit entfernt, dass das Kämpchen eingesetzt werden kann. Andernfalls ist die lückenlose Aufbringung der nächsten Pulverschicht durch Pulververlust an der Bohrung nicht möglich.

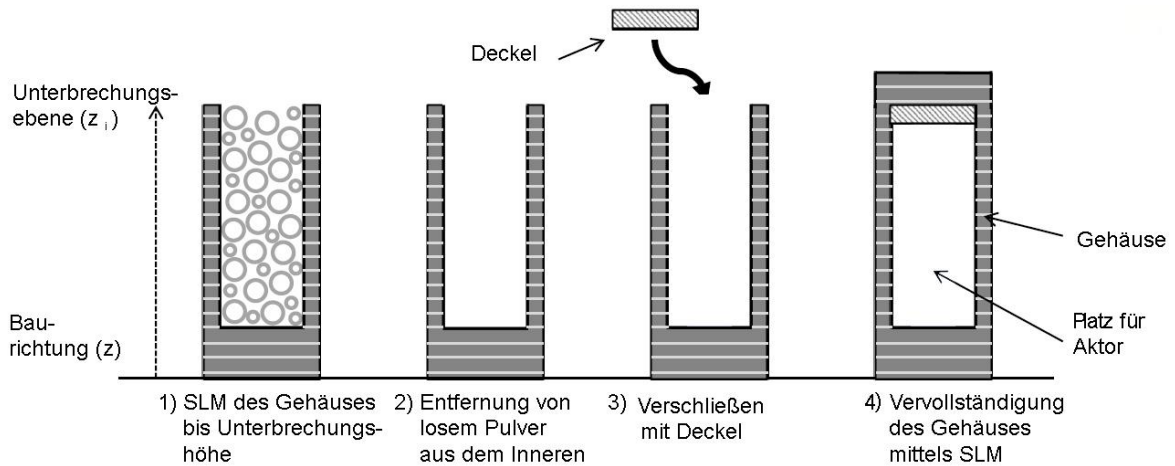


Abbildung 29: Herstellung des Aktorgehäuses mittels SLM
(Quelle: abgeändert nach Stoffregen et al. 2013, S. 3)

3.1.2 Prüfmethode und -technik

Die Ermittlung der Proben-Langzeitfestigkeit dient dazu, die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen der bereits entwickelten Aktormodule abzuschätzen. Wichtig ist es daher eine Prüfmethode zu wählen, welche die späteren Belastungen und Anforderungen an die Piezo-Aktorgehäuse möglichst ideal abbildet. Bei der Auswahl der geeigneten Prüftechnik ist außerdem die festgelegte Probenzahl von maximal 20 Proben jeder Versuchsreihe zu berücksichtigen.

Abschätzung der Anforderungen an Piezo-Aktorgehäuse

Die Aktorgehäuse dienen dazu den Piezo-Aktor vor Umwelteinflüssen zu schützen sowie die ausschließlich axiale Belastung des Aktors zu gewährleisten. Außerdem ermöglicht das Gehäuse mit dem integrierten Piezo-Aktor den Einbau anhand der durch SLM individuell angepassten Schnittstelle in eine passive Struktur. Der Einsatz des Piezo-Aktormoduls erfolgt beispielsweise in Leichtbaustrukturen wie Tragwerken zur Dämpfung von Schwingungen. Die maximale zulässige Belastung des Aktors liegt bei 2 kN. Die minimale Querschnittsfläche eines Aktorgehäuses mit Radius 8,5 mm und Wanddicke 0,4 mm berechnet sich wie folgt:

$$(11) \quad A_{\text{Aktorgehäuse}} = (d_a^2 - d_i^2) \frac{\pi}{4} = ((2 \cdot 8,5 \text{ mm})^2 - (2 \cdot 8,1 \text{ mm})^2) \cdot \frac{\pi}{4} = 20,86 \text{ mm}^2$$

$$(12) \quad \sigma_{\text{Aktorgehäuse}} = \frac{F_{\text{Belastung}}}{A_{\text{Aktor}}} = \frac{2 \text{ kN}}{20,86 \text{ mm}^2} = 95,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bei einer Querschnittsfläche des Aktors von $20,86 \text{ mm}^2$ (siehe (11)) wirkt nach der Berechnung in (12) eine Spannung von mindestens $95,88 \text{ N/mm}^2$ auf das Aktormodulgehäuse. Simulationsergebnisse zeigen, dass die maximalen Belastungen für das in den vorhergehenden Formeln berechnete Aktormodulgehäuse aufgrund der Dünnwandigkeit, der Balgstruktur und damit der Kerbgeometrie mit 346 N/mm^2 um den Faktor 3,6 größer sind. Abhängig von der Geometrie der Gehäuse und der Begrenzung auf eine maximale Dehnung von $50 \mu\text{m}$ sowie einer Belastung zwischen $0,5 \text{ kN} - 2 \text{ kN}$ ergeben sich aus der Simulation maximale Spannungen im Bereich von 49 bis 365 N/mm^2 . Die Lebensdauer der Aktoren liegt nach Stoffregen et al. (2011, S.11) bei 110 h bei einer Frequenz von 50 Hz . Dies entspricht einer Schwingspielzahl von $1,98 \cdot 10^7$. Das Aktormodulgehäuse muss folglich bei einer Belastung von mindestens 49 N/mm^2 bis 365 N/mm^2 langzeitfest sein. Da der Aktor lediglich axiale Kräfte aufnehmen kann und eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Biege- und Scherkräften aufweist, wird die Kraft über Keramikköpchen im Inneren übertragen, die durch ihre halbrunde Form, ausschließlich eine axiale Belastung des Aktors erlauben. Um eine effektive Dämpfung der Tragwerksstruktur zu ermöglichen, ist es von Vorteil das Aktormodul in der Strebe des Tragwerks einzubauen, an der hohe, uniaxiale Belastungen überwiegen. Aufgrund der thermischen Vorspannung und der Druckempfindlichkeit des Sensors soll das Aktormodulgehäuse hauptsächlich im Zugschwellbereich belastet werden.

Auswahl der Belastungsart und Prüfmethode

In diesem Kapitel erfolgt die Auswahl der geeigneten Prüfmethode für die Schwingfestigkeitstests von SLM-Proben und SLM-Aktormodulgehäusen. Wie in Kapitel 2.2 dargestellt ist, wird für die Ermittlung von SLM hergestellten Bauteilen die Prüfung mittels Dauerschwingversuch oder mittels Umlaufbiegeversuch im Rahmen der Norm VDI 3405-2 (2012 S. 12) empfohlen. In folgender Tabelle 6 sind die relevanten Eigenschaften der beiden Prüfmethode aufgeführt. Der größte Unterschied liegt in der Belastungsart, die uniaxial oder multiaxial sowohl im Wechsel- als auch im Schwellbereich vorliegen kann. Die Belastungen im uniaxialen Zugschwellversuch sind am geringsten. Wie in Kapitel 2.5.1 gezeigt ist, kommt in bekannten Versuchsreihen häufig der uniaxiale Zugschwellversuch mit einem Spannungsverhältnis R von $0,1$ zum Einsatz. Die Proben befinden sich dort dauerhaft unter Zug, so dass insbesondere bei Prüfmaschinen mit Spiel die gleichmäßige Belastung gewährleistet werden kann. Nach der Norm VDI 3405-2 (2012; S. 13) bietet der Umlaufbiegeversuch den Vorteil, dass die Probenlänge und damit die SLM-Bauzeit kürzer ist

als beim Dauerschwingversuch. Die genaue Probenform variiert jedoch beim Dauerschwingversuch, sodass der Unterschied je nach Auswahl der Geometrie im Bereich weniger Millimeter liegt.

Tabelle 6: Vergleichstabelle zum Dauerschwingversuch gegenüber dem Umlaufbiegeversuch

Versuchsart	Dauerschwingversuch	Umlaufbiegeversuch
Belastungsart	uniaxial	multiaxial
relevante Kennwerte	Zug-Druck-Wechselfestigkeit Zugschwellfestigkeit	Biege-Wechselfestigkeit
Einsatzhäufigkeit anderer Versuchsreihen	häufiger Einsatz mit R=0,1	geringer Einsatz
Verfügbarkeit am LBF	hohe Verfügbarkeit	geringe Verfügbarkeit
Höhe der Belastung	niedriger als Umlaufbiegeversuch $\sigma_{sch} = 1,25 * \sigma_{zdw}$ (Roos, Maile 2011, S. 100)	höher als Dauerschwingversuch $\sigma_{sch} = 1,15 * \sigma_{bw}$ (Roos, Maile 2011, S. 100)
Probenlänge	starke Variation je nach Auswahl der exakten Probengeometrie	nach VDI 3405-2 (2012; S. 13) kürzer als beim Dauerschwingversuch

Da grundsätzlich beide Prüfmethode geeignet sind, wird die Auswahl in Bezug auf die spätere Belastung der Aktormodulgehäuse in der Praxis getroffen. Der Einsatz des Aktormoduls erfolgt, um Schwingungen beispielsweise in Tragwerksstrukturen zu dämpfen. Aufgrund des Einbaus in ausgewählten Streben und der Einsatzbedingungen des Aktors überwiegen, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, die uniaxialen Belastungen im Zugschwellbereich. Für die experimentelle Versuchsdurchführung innerhalb dieser Studienarbeit wird aufgrund der Praxisnähe der Belastungen die Methode des Dauerschwingversuchs mit einer uniaxialen Belastung im Zugschwellbereich und einem Spannungsverhältnis R von 0 gewählt. Ein weiterer Vorteil dieser Prüfmethode ist, dass am LBF mehrere Prüfmaschinen für diese Versuchsmethode zur Verfügung stehen. Da die Ergebnisse für die Langzeitfestigkeit und zugehörige Wöhlerlinien ermittelt werden sollen, erfolgt die Prüfung der Proben durch Kraftregelung.

Prüftechnik

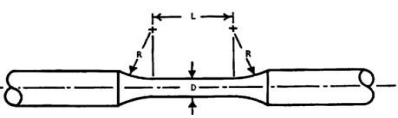
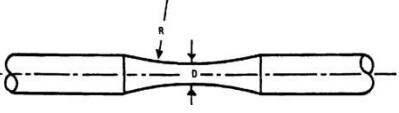
Nach dem Stand der Technik sind, wie in Tabelle 2 in Kapitel 2.2.1 dargestellt, zur Prüfung der Langzeitfestigkeit 10^7 Schwingspiele nötig. Beim Einsatz einer Resonanzprüfmaschine liegt die Prüffrequenz im Bereich von 70 bis 140 Hz, das heißt die Prüfung eines Durchläufers benötigt 19 bis 38 h. Oberhalb dieser Frequenz kommt es zur Abweichung zwischen vorgegebenem Soll- und tatsächlich erreichtem Ist-Wert. Hydraulische Prüfmaschinen arbeiten im Bereich von 10 Hz. Bei Spezialausführungen können jedoch Prüffrequenzen von bis zu 140 Hz erreicht werden. Aufgrund der relativ langen Prüfzeiten für Durchläufer im Bereich von einem Tag und der aufwendigen und kostspieligen Herstellung mittels SLM, steht nur eine Anzahl von maximal 20 Proben pro Versuchsreihe zur Verfügung. Statistisch abgesicherte Streubänder und Standardabweichungen der Wöhlerlinien können im Rahmen dieser Studienarbeit nicht erstellt werden, da dafür eine Probenanzahl oberhalb von 50 Proben benötigt wird (Radaj, Vormwald 2007, S.49). Ein erster Eindruck der zu erwartenden Streuung kann aber aufgrund von mehreren Versuchen auf einem Lastniveau ermittelt werden. Mit Hilfe des Treppenstufenverfahrens kann der Mittelwert bei einer definierten Schwingspielzahl bestimmt werden. Eine Aussage über die Streuung der Ergebnisse kann dort nicht getroffen werden. Außerdem ist der Bereich der Langzeitfestigkeit zu Beginn der Versuche noch nicht bekannt. Dies verlangt entweder großen Stufen, was zu Ungenauigkeiten in zugehöriger Größenordnung führt, oder eine erhöhte Probenanzahl. In dieser Masterarbeit findet daher das Perlschnurverfahren Anwendung, bei dem ab einer Anzahl von zehn Proben die 50 %-Wöhlerlinie abgeschätzt werden kann. Angestrebt wird zunächst das Erreichen einer Schwingspielzahl von 50.000 (siehe Kapitel 2.3.2). Sollte die Schwingspielzahl übertroffen werden, kann dieser Wert ebenfalls für die Ermittlung der Wöhlerlinie genutzt werden. Dies wäre nicht möglich, wenn von Beginn an die Schwingspielzahl 10^7 angestrebt wird, da ein Durchläufer keine weiteren relevanten Daten für die Wöhlerlinie liefert. Geringe Schwingspielzahlen, die im elastisch-plastischen und damit im Kurzzeitfestigkeitsbereich liegen, sind ebenfalls weniger geeignet als Schwingspielzahlen im Zeitfestigkeitsbereich, da diese mittels kraftgeregeltem Versuchsaufbau nur mit gesonderter Sollwertregelung zu prüfen sind. Die weiteren Proben werden dem Perlschnurverfahren entsprechend unter Erniedrigung der Spannung hin zu steigenden Schwingspielzahlen durchgeführt, so dass einzelne Durchläufer auftreten und eine Wöhlerkurve interpoliert werden kann. Die benötigten Proben sollen im gleichen Baujob hergestellt werden, um chargenbedingte Abweichungen zu vermeiden. In einer zweiten Charge werden gleichartige Proben hergestellt, die bei Spannungen im Bereich der ermittelten Langzeitfestigkeit orientiert

am Treppenstufenverfahren mit zu Beginn variablem Stufenabstand geprüft werden. Dies dient dazu einen Eindruck zu bekommen, in welchem Maße die Ergebnisse streuen. Eine signifikante Streuung kann, nach der Analyse der bereits in diesem Bereich durchgeführten Versuche (siehe Kapitel 2.5.2), insbesondere durch Inhomogenität im Gefüge und dadurch entstehende Risse bedingt sein. Die oben beschriebene Prüftechnik findet für alle in Kapitel 3.1.3 vorgestellten Probengeometrien Anwendung, so dass die jeweils ermittelten Wöhlerlinien untereinander vergleichbar sind.

3.1.3 Gestaltung der Schwingfestigkeitsproben

Für die Gestaltung der Proben zur Prüfung der Schwingfestigkeit gibt es keine einheitlich gültigen Richtlinien. Es existieren jedoch beispielsweise in der Norm ASTM E 466 (1982) Empfehlungen zur Gestaltung. Die exakte Probenform soll nach VDI-Norm 3045-2 (2012, S. 12) in engem Kontakt mit der Prüfstelle definiert werden. Grundsätzlich lassen sich, wie bereits in Kapitel 2.5.1 dargestellt, zwei Probenformen unterscheiden. Bei diesen Probenformen handelt es sich um Proben mit kontinuierlichem Radius zwischen den Probenenden und solchen mit tangentialem Übergangsradius zwischen Prüfbereich und den Probenenden.

Tabelle 7: Eigenschaften zweier Probenformen für den Schwingversuch
(Quelle: nach ASTM E 466 1982, S. 2)

Kurzbezeichnung	Form 1	Form 2
Probenform	tangentialem Übergangsradius zwischen Prüfbereich und Probenenden 	kontinuierlicher Radius zwischen Probenenden 
Probenlänge	länger als Form 2	kürzer als Form 1
Lage der Bruchstelle	im Bereich des kleinsten Prüfdurchmessers	im kleinsten Prüfdurchmesser
Eignung für kraftgeregelten Versuch	geeignet	geeignet
Eignung für dehnungsgeregelten Versuch	geeignet	ungeeignet, da keine DMS Anbringung möglich

In Tabelle 7 sind die Eigenschaften der jeweiligen Probenformen aufgeführt. Da die Probenform zwischen den bisher durchgeführten Versuchen im Bereich der Langzeitfestigkeit von SLM-Proben variiert, kann dieser Unterschied die Vergleichsmöglichkeiten der einzelnen Versuchsreihen einschränken. Andererseits zeigt der Vergleich der Ergebnisse bezüglich des Werkstoffs 1.4542, dass die Probenform kaum Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat (Sehrt, Witt 2010; Wycisk et al. 2013).

Die Probenform mit kontinuierlichem Radius hat den Vorteil einer kürzeren Bauzeit aufgrund der geringeren Probenlänge. Nachteilig ist jedoch, dass der Ort des Bruches im geringsten Probenquerschnitt vorgegeben ist und nicht durch die Stelle der größten Inhomogenität hervorgerufen wird. Probenform eins bietet hier einen Bereich von mehreren Millimetern für die Lage des Bruches. Da für die Versuche innerhalb dieser Masterarbeit eine kraftgeregelte Prüfungsmethode Anwendung findet, ist sowohl der Einsatz von Probenform eins als auch der Einsatz von Probenform zwei zulässig, da kein Bereich zur Anbringung von DMS benötigt wird. Dieser ist nur bei Probenform eins vorhanden. Der größte Vorteil von Probenform eins ist, dass am LBF eine Standardprobe dieser Geometrie mit verkürzter Länge zum Einsatz kommt und daher bereits Erfahrungswerte für Einspannung, benötigte Spannungshöhen für Guss- und andere Werkstoffe im Bereich der Langzeitfestigkeit und Probennachbearbeitung durch die Firma „Michael Pratzelt Zerspanung“ vorhanden sind. Außerdem bietet die Standardeinspannung eine Flexibilität in der Prüfmaschinenauswahl, da zugehörige Einspannmöglichkeiten an vielen Prüfmaschinen am LBF vorhanden sind. Aufgrund dieser Vorteile liegt den Versuchen dieser Masterarbeit die LBF-Standardprobe nach Probenform eins in Norm E 466 (1982, S. 2) zugrunde. Die Standardprobe ist gegenüber der Norm durch einen geringeren Übergangsradius leicht verkürzt. Dies hat den Vorteil, dass die SLM-Bauzeit reduziert werden kann. Die LBF-Standardprobe ist im Anhang in Abbildung 99 dargestellt und weist einen Prüfdurchmesser von 6 mm auf. Im Folgenden wird geprüft, ob dieser Durchmesser für den Einsatz innerhalb dieser Masterarbeit geeignet ist. Aufgrund der in Kapitel 2.5.2 zusammengefassten Ergebnisse zu bereits ermittelten Langzeitfestigkeiten von Proben, ist die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen für polierte Proben in Höhe der halben Zugfestigkeit zu erwarten. Aufgrund dieser Annahme lässt sich die benötigte Prüfkraft wie folgt nach oben abschätzen:

$$(13) \quad A_{Probe\ d=6\ mm} = d^2 \frac{\pi}{4} = (6\ mm)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 28,27\ mm^2$$

$$(14) \quad F_{Probe\ 0,5 \cdot R_m} \leq \frac{Zugfestigkeit}{2} \cdot A_{Probe\ d=6\ mm} = 490,5 \frac{N}{mm^2} \cdot 28,27\ mm^2 = 13,95\ kN$$

Die erwartete Prüfkraft bei Langzeitfestigkeit liegt für eine SLM-Probe mit 6 mm Prüfdurchmesser folglich im Bereich unterhalb von 14 kN. Für den Aktor ergibt sich folgende obere Abschätzung der Prüfkraft.

$$(15) \quad A_{\text{Aktorgehäuse}} = (d_a^2 - d_i^2) \frac{\pi}{4} = ((17 \text{ mm})^2 - (16,2 \text{ mm})^2) \cdot \frac{\pi}{4} = 20,86 \text{ mm}^2$$

$$(16) \quad F_{\text{Aktorgehäuse } 0,5 \cdot R_m} = \frac{\text{Zugfestigkeit}}{2} \cdot A_{\text{Aktor}} = 490,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 20,86 \text{ mm}^2 = 10,23 \text{ kN}$$

Aufgrund der Balgstruktur, der Kerbwirkung und der Oberflächenrauigkeit im Bereich von $R_a = 20 \mu\text{m}$ wird jedoch eine signifikant niedrigere Prüfkraft im Bereich der Langzeitfestigkeit erwartet. Die Belastung des Piezo-Aktors und damit indirekt auch für das Gehäuse ist auf maximal 2 kN begrenzt. Simulationsergebnisse zeigen, dass, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, abhängig von der Prüfgeometrie bei einer maximalen Dehnung von $50 \mu\text{m}$ mit einer Prüfkraft von 2 kN maximale Spannungen im Bereich von 49 bis 365 N/mm^2 auftreten können.

Die Probe mit einem Prüfdurchmesser von 6 mm ist aufgrund der Prüfkrafthöhe in der Größenordnung der benötigten Prüfkraft am Aktormodulgehäuse geeignet. Getestet werden zunächst Proben mit einer Oberflächenrauigkeit von R_a unterhalb von $5 \mu\text{m}$, um eine Aussage über die Eigenschaften des SLM-gefertigten Werkstoffs treffen zu können. Diese Rauigkeit entspricht der LBF-Standardprobe. Da das Aktormodulgehäuse nicht nachbearbeitet wird, werden anschließend unbearbeitete Proben geprüft, um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Langzeitfestigkeit zu ermitteln. Zielführend wäre auch die Untersuchung des Einflusses von Sandstrahlen auf die Langzeitfestigkeit. Da die Reproduzierbarkeit durch in der Praxis häufig von Hand sandgestrahlten Bauteile nicht gewährleistet werden kann, wird auf die Untersuchung einer sandgestrahlten Probe in dieser Masterarbeit verzichtet. Außerdem ist, da die Aktormodule durch die Balg-Geometrie eine Kerbwirkung und damit eine reduzierte Langzeitfestigkeit erwarten lassen, in Erwägung gezogen worden, zusätzlich eine Probengeometrie mit einer Kerbe ähnlich der am Aktormodulgehäuse zu prüfen, um die Vergleichbarkeit zwischen Probe und Bauteil zu verbessern. Auf gekerbte Proben kann verzichtet werden, da beim Aktormodulgehäuse neben der Kerbwirkung auch der Einfluss der Dünnwandigkeit hinzukommt und ein Simulationsmodell zur Ermittlung des Einflusses existiert. Stattdessen erfolgt eine detailliertere Prüfung der Aktormodulgehäuse. Da bei einem Baujob insbesondere die Auftragung des Pulvers aufwendig ist, werden möglichst viele Proben in einem Baujob hergestellt. Für die Prüfung beziehungsweise die Einspannung von unbearbeiteten SLM-Proben liegen keine Erfahrungswerte vor, so dass sowohl Proben mit unbearbeiteter Einspannung hergestellt werden als auch Proben, deren Einspannfläche spanend

nachbearbeitet wird. Die unbearbeiteten Proben weisen eine Oberflächenrauigkeit R_a von $15\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$ auf. Als Oberflächenrauigkeit für die nachbearbeiteten Proben ist wie oben beschrieben ein Wert R_z von $<5\ \mu\text{m}$ festgelegt. Das Unternehmen „Michael Pratzelt Zerspanung“ erreicht diese Genauigkeit durch Nachbearbeitung mit Abdrehen der Probe, so dass auf einen zusätzlichen Poliervorgang verzichtet werden kann. Der Ansatz Proben herzustellen, die nur im Prüfbereich nachbearbeitet werden, wird verworfen, da dies aufgrund von bereits bekannten CNC-Programmen für die LBF-Standardprobe bei der Firma „Michael Pratzelt Zerspanung“ nicht zur Kostenreduktion in der Nachbearbeitung führt. Die Proben für die Nachbearbeitung werden mit einem allseitigen Aufmaß von 1 mm hergestellt. Für die Einspannung der vollständig abgedrehten Proben in die CNC-Maschine wird außerdem ein Bereich von 20 mm Länge benötigt. Die Zeichnungen zur Herstellung der jeweiligen SLM-Proben sind im Anhang in Abbildung 96, Abbildung 97 und Abbildung 98 dargestellt. Aufgrund des unbekanntem Verhaltens von SLM-Proben sollen die Versuche zur Ermittlung der Wöhlerlinie, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, iterativ durchgeführt werden. Das heißt, es wird zunächst eine Charge mit 20 unbearbeiteten Proben, 20 Proben zur Nacharbeit an der Einspannfläche und 20 Proben zur vollständigen Nachbearbeitung hergestellt. In einer zweiten Charge werden dann nochmals 10 unbearbeitete Proben zur Ermittlung der Langzeitfestigkeit hergestellt. Die Bauzeit für die jeweiligen Chargen wird mit fünf Bautagen eingeplant, während die Nachbehandlung durch das Unternehmen „Michael Pratzelt Zerspanung“ nach Angebot maximal eine Woche in Anspruch nehmen wird. Unerlässlich ist des Weiteren auf eine eindeutige Kennzeichnung der Proben zu achten, die gemäß des Versuchsplanes in Kapitel 3.1.6 vorgenommen wird.

3.1.4 Prüfung der Probendichte

Die Dichte der SLM-Proben wird untersucht, um den Einfluss von Poren abschätzen zu können. Bereits am PTW durchgeführte optische Vermessungen von Proben aus 1.4542 zeigen, dass in Proben eine Dichte von 99,8 % gewährleistet werden kann. Die maximale Porengröße, die durch Schlibfbilder in unterschiedlichen Ebenen ermittelt worden ist, beträgt $10\ \mu\text{m}$ (Stoffregen). Eine Überprüfung der Dichte der hergestellten Proben erfolgt stellvertretend anhand der abgedrehten Probe B_00_20. Die Masse der Probe wird mithilfe einer Waage der Genauigkeit $\pm 10\ \text{mg}$ ermittelt. Da das Volumen der abgedrehten Proben aus den CAD-Daten bekannt ist, lässt sich die Probendichte, nach der im Anhang dargestellten Rechnung nach folgender Formel bestimmen:

$$(17) \quad \delta_{Probe} = \frac{F_{Probe}}{V_{Probe}} + \delta_{Luft} \quad (\text{nach Erbrecht et al. 2003, S. 97})$$

Eine Fehlerabschätzung (siehe Anhang) zeigt, dass die Genauigkeit der relativen Dichte in Bezug auf die Standarddichte von $0,0078 \text{ g/mm}^3$ im Bereich von $\pm 0,85 \%$ liegt und daher ausreichend für die Überprüfung der Probendichte im Rahmen dieser Masterarbeit ist.

3.1.5 Prüfmaschine und Versuchsaufbau für Probengeometrien

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird die in Abbildung 30 dargestellte servohydraulische Prüfmaschine Hydropuls MHF der Firma Instron Structural Testing Systems (kurz: IST) genutzt. Diese ermöglicht durch eine hohe Gerüststeifigkeit und den Einsatz zweier hydraulischer, im Vergleich zum Servoventil kleiner und leichter Positionierungszyylinder einen geringen Hub und damit eine Prüffrequenz von bis zu 200 Hz (Instron 2003, S. 2). Die Prüffrequenz hat nach Bagel und Schulze (2005, S. 112) im Frequenzbereich von 1 Hz bis 250 Hz keinen signifikanten Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Oberhalb von 250 Hz ist eine Erwärmung der Probe möglich. Bei der Durchführung der Versuche wird die Frequenz ab einer Oberspannung σ_0 von 300 N/mm^2 zunächst auf 70 Hz, unterhalb einer Oberspannung σ_0 von 300 N/mm^2 zunächst auf 140 Hz begrenzt, da dort eine Abweichung der Prüfkraft zwischen Ist- und Soll-Wert begrenzt auf eine maximale Abweichung einzelner Peaks von 150 N zu erwarten ist. Die Frequenz ist nach Prüfung der tatsächlichen Abweichung bis zu einer vereinzelt auftretenden Differenz von 150 N zwischen Ist- und Sollwert erhöht worden.



Abbildung 30: Prüfmaschine Hydropuls MHF des Unternehmens IST

Neben einer ausreichend hohen Prüffrequenz bietet die ausgewählte Prüfmaschine den Vorteil einer bereits vorhandenen Klemmeinrichtung zur Fixierung der Proben und den Vorteil, dass diese im gewünschten Prüfungszeitraum ausschließlich für die Versuche im Rahmen dieser

Masterarbeit zur Verfügung steht. Dadurch kann eine hohe Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsergebnisse gewährleistet werden. In Tabelle 8 sind die relevanten Spezifikationen der Prüfmaschine aufgeführt.

Tabelle 8: Spezifikationen der Prüfmaschine Hydropuls MHF der Firma IST (Quelle: Instron 2003, S. 1)

Eigenschaft	Wert
maximale statische Kraft	25 kN
maximale dynamische Kraft	20 kN
Arbeitsdruck	280 bar
maximale Prüffrequenz	400 Hz
maximaler Kolbenhub	50 mm

Die Datenerfassung erfolgt manuell durch Ablesen der digitalen Steuerungsanzeige. Zur Einspannung der Proben in der Prüfmaschine werden Spannbacken mit zugehörigem Klemmring und einem Durchmesser von 12 mm verwendet. Diese Einspannvorrichtung ist am LBF bereits vorhanden, da Sie für die Montage der LBF-Standardrundprobe in der Prüfmaschine genutzt wird. In Abbildung 31 ist eine eingespannte Probe zu sehen. Der Spannring wird über die beiden Schrauben, welche mit einem 70 kN Drehmomentschlüssel angezogen werden, zusammengepresst, sodass die Spannbacken die Probe kraftschlüssig festklemmen.



Abbildung 31: Eingespannte Probe C_00 in der Prüfmaschine Hydropuls MHF der Firma IST

3.1.6 Versuchsplan – Probengeometrien

In diesem Kapitel befindet sich der Versuchsplan für die Prüfung der Schwingfestigkeit der SLM-Proben im Rahmen dieser Masterarbeit. Wie in Tabelle 9 dargestellt, sind die jeweiligen Versuche mit einer Kurzbezeichnung versehen. Die einzelnen Versuchsreihen ergeben sich aus den in den vorherigen Kapiteln festgesetzten Rahmenbedingungen bezüglich Prüfmethode, Prüftechnik, Probenform und Probenanzahl sowie Nachbehandlung der Proben und Auswahl der Prüfmaschine. In Abbildung 32 ist der logische Ablauf der Versuche grafisch dargestellt.

Tabelle 9: Versuchsplan zur Prüfung der Schwingfestigkeit von SLM-Proben

Kurzbezeichnung	Art des Versuches	
A_00	Herstellung	Herstellung von je 20 SLM-Proben für Versuche B_00, C_00 und D_00.
A_01		Nachbearbeitung von SLM-Proben für Versuch B_00.
A_02		Nachbearbeitung von SLM-Proben für Versuch D_00.
A_10		Herstellung von je 10 SLM-Proben für Versuche C_10 und D_10.
A_12		Nachbearbeitung von SLM-Proben für Versuch D_10.
B_00	Prüfung der Proben und Bauteile	Prüfung von abgedrehten Proben -Ermittlung der Wöhlerlinie durch Perlschnurverfahren zur Eingrenzung der Langzeitfestigkeit -Treppenstufenverfahren im Langzeitfestigkeitsbereich
C_00		Prüfung von unbearbeiteten Proben -Ermittlung der Wöhlerlinie durch Perlschnurverfahren zur Eingrenzung der Langzeitfestigkeit -Abschätzung der Streuung durch mehrere Proben auf einem Spannungsniveau -Treppenstufenversuch im Langzeitfestigkeitsbereich
C_10		Prüfung von unbearbeiteten Proben im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich -Eindruck der Streuung im Zeitfestigkeitsbereich => Ergänzung auf Spannungsniveaus von C_00 -Treppenstufenverfahren im Langzeitfestigkeitsbereich
D_00		Prüfung von unbearbeiteten Proben (abgedrehte Einspannung) -Ermittlung der Wöhlerlinie durch Perlschnurverfahren zur Eingrenzung der Langzeitfestigkeit -Abschätzung der Streuung durch mehrere Proben auf einem Spannungsniveau -Treppenstufenversuch im Langzeitfestigkeitsbereich

D_10	Prüfung von unbearbeiteten Proben (abgedrehte Einspannung) im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich -Abschätzung der Streuung im Zeitfestigkeitsbereich => Ergänzung auf Spannungsniveaus von D_00 -Treppenstufenverfahren im Langzeitfestigkeitsbereich
-------------	--

Bei Versuch C_00 wird, wie in Abbildung 32 dargestellt, überprüft, ob eine Einspannung der Probe bei unbearbeiteter Einspannoberfläche möglich ist. Ist dies der Fall, kann die Nachbearbeitung der Proben D_00 sowie die weitere Herstellung der Proben mit Aufmaß an der Einspannung entfallen. Ist dies nicht möglich, müssen alle weiteren Proben mit Aufmaß zum Abdrehen der Einspannung gefertigt werden. Die vollständig nachbearbeiteten Proben sind von dieser Entscheidung nicht betroffen, da die Klemmstelle aufgrund des bereits vorhandenen CNC-Programmes immer nachbearbeitet wird.

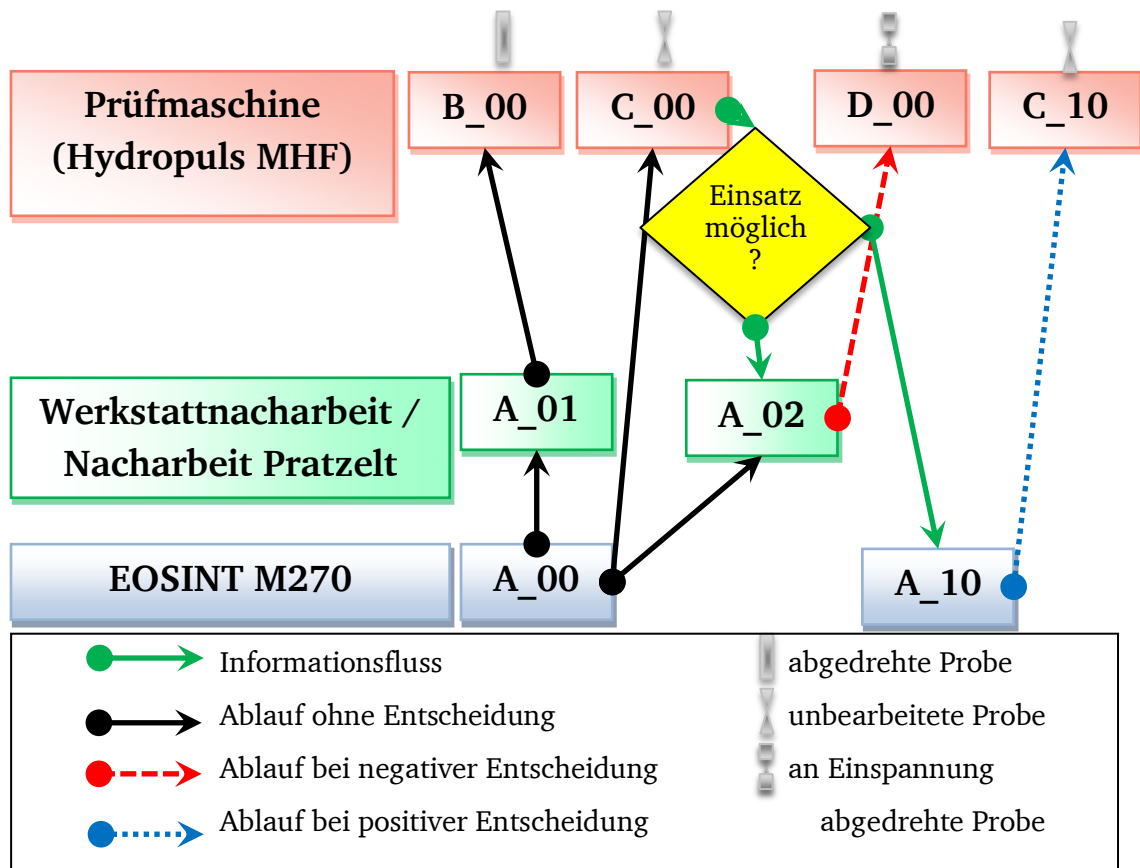


Abbildung 32: Darstellung des logischen Ablaufs der einzelnen Versuchsreihen zur Prüfung von SLM-Proben

3.1.7 Abschätzung kritischer Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse – Auswahl der Prüfgeometrie

Als kritische Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse ergeben sich zunächst die steifigkeitsbestimmenden Parameter der Geometrie. Zu diesen gehören, wie in Abbildung 33 zu erkennen ist, der Kerbwinkel α , die Wanddicke t , der Radius r und der Kerbradius r_K zwischen den einzelnen Balgabschnitten. Des Weiteren wird, da das Gehäuse nicht nachbearbeitet werden soll, von einem ausgeprägten Einfluss der Oberflächenrauigkeit ausgegangen, der in den vorangestellten Versuchen anhand der gewählten Probengeometrien ermittelt wird.

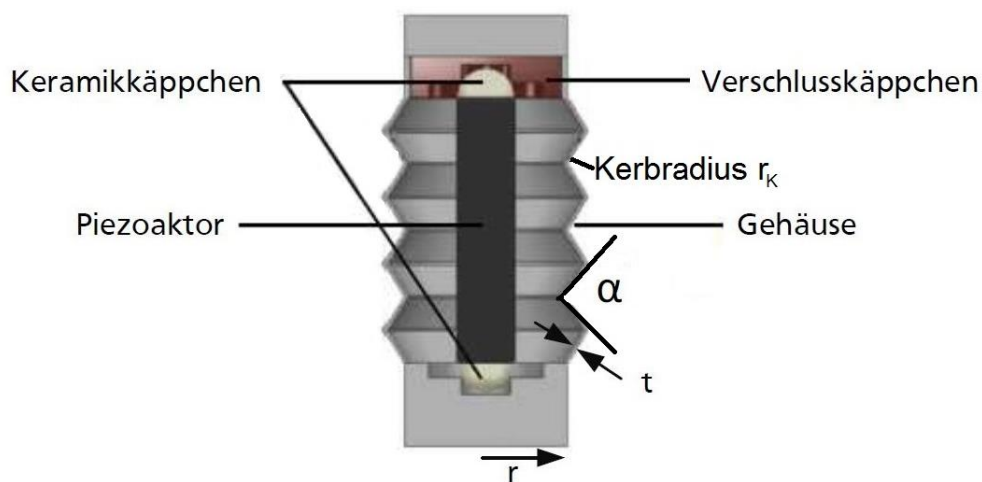


Abbildung 33: Aufbau des Aktorgehäuses (Quelle: abgeändert nach Stoffregen et al. 2011, S. 8)

Die größte Belastung tritt bei allen Aktorgehäusevarianten auf der Innenseite der äußeren Balgspitze auf. In Abbildung 34 ist die Verteilung der Spannungen und die Lage der maximalen Spannung am Balg beispielhaft am Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 dargestellt (Stoffregen).

Der Arbeitsbereich des Aktors weist eine maximale Dehnung von $50\ \mu\text{m}$ auf. Für die Schwingfestigkeitsprüfung im Rahmen dieser Masterarbeit sind daher Aktorgehäusevarianten und Lastfälle von Bedeutung, bei denen die Dehnung unterhalb von $50\ \mu\text{m}$ liegt.

Ziel ist es, die ermittelten Schwingfestigkeiten der Probengeometrien auf die Gehäuse zu übertragen, um die Schwingfestigkeit dieser Bauteile abzuschätzen, beziehungsweise die benötigte Lebensdauer der Bauteile nachweisen zu können. Die Übertragung erfolgt unter Zuhilfenahme bereits vorhandener mechanischer ANSYS-Modelle, aus denen die maximal erwarteten Spannungen am Aktormodul in Abhängigkeit unterschiedlicher Lastfälle und Geometriedaten abgeleitet und mit den Schwingfestigkeiten der Proben verglichen werden.

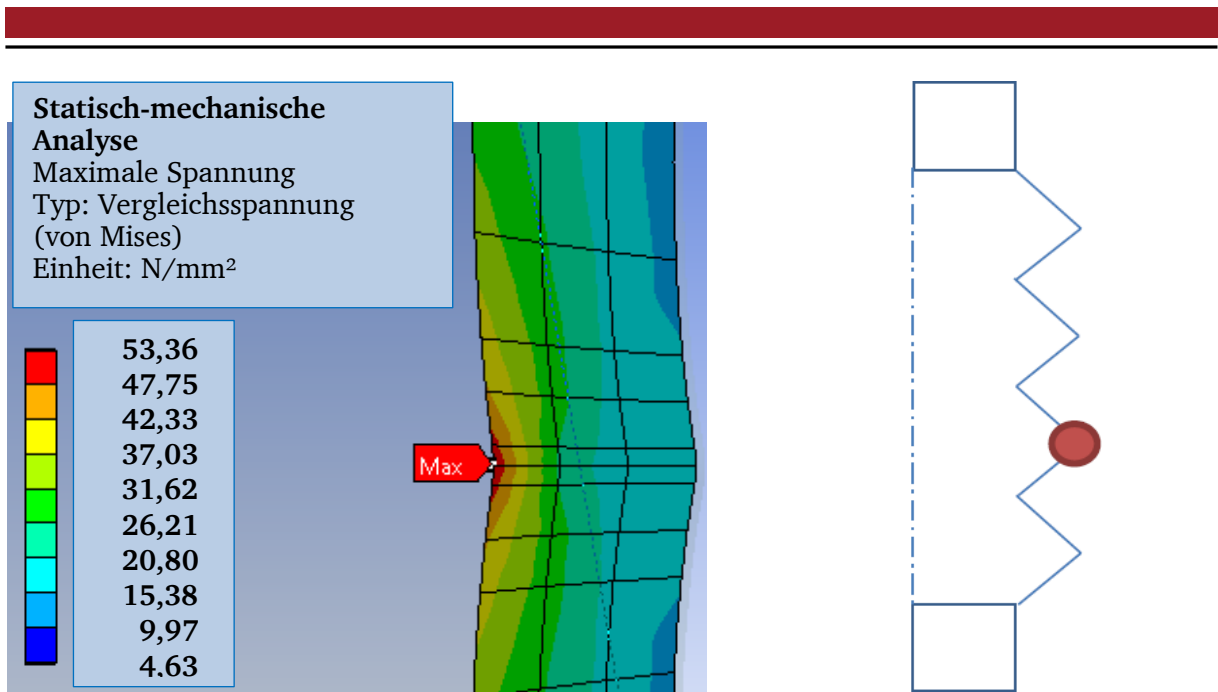


Abbildung 34: Nach mechanischem Simulationsmodell zu erwartende Spannungen am Gehäuse (links) – Lage der maximalen Spannung am Aktormodul (rechts)
 (V02T05, Belastung: 500 N, t = 0,6 mm, $\alpha = 160^\circ$, r = 8,5 mm, maximale Vergleichsspannung nach von Mises: 53 N/mm²)

Das Vorgehen zur Übertragung der SLM-Werkstoff-Schwingfestigkeit auf die Bauteile ist in Abbildung 35 grafisch dargestellt.

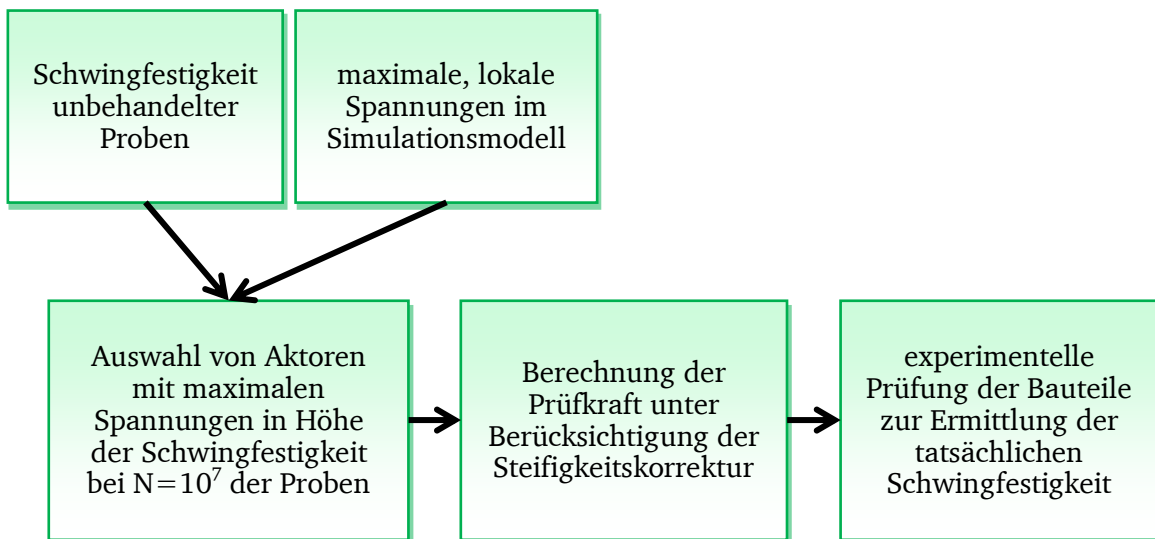


Abbildung 35: Ablauf der Übertragung der Werkstoff-Schwingfestigkeit auf Bauteile
 (Quelle: abgeändert nach Sonsino 1995)

Von besonderem Interesse sind Aktormodulgehäuse, deren maximale Spannungen im Bereich der Langzeitfestigkeit von unbehandelten Proben liegen. Im Anhang sind in Tabelle 30 alle

relevanten Aktormodule aufgeführt, bei denen aufgrund des Simulationsmodells maximale lokale Spannungen im Bereich von 100 N/mm² bis 270 N/mm² erwartet werden. In Tabelle 10 sind die möglichen Parameter für die Varianten im Simulationsmodell aufgeführt. Die bevorzugten Parameter sind Grün hinterlegt, während die kritischen Bereiche Orange schraffiert sind.

Tabelle 10: Mögliche Parameter für Aktormodulgehäuse

Belastung	0,5 kN	1 kN	1,5 kN	2 kN
Radius	8,5 mm	9,25 mm	10 mm	
Kerbwinkel	115°	137,5°	160°	
Wanddicke	0,4 mm	0,5 mm	0,6 mm	
Dehnung	< 50 μm			
maximale Spannung	100 N/mm ² - 270 N/mm ²			
neutrale Parameter		bevorzugte Parameter		kritische Parameter

Um die Vergleichbarkeit zwischen Probe und Gehäuse zu erleichtern, werden für die experimentelle Verifizierung Aktormodule mit einem Kerbwinkel von 160° und somit einer geringeren Kerbwirkung (siehe Kapitel 2.2.1.) bei der Auswahl bevorzugt. Außerdem empfehlen sich Aktormodulgehäuse mit einer Wanddicke von 0,6 mm, um den Einfluss der Dünnwandigkeit zu minimieren. Da, wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, die Einspannung der Standardrundprobe von 12 mm Durchmesser genutzt wird, weisen Aktormodulvarianten mit einem entsprechend der vorgegebenen Varianten minimal möglichen Radius von 8,5 mm die geringste Querschnittsänderung zur Einspannung auf. Einflüsse aufgrund von Steifigkeitsänderungen werden so minimiert.

Zu berücksichtigen ist bei den Kräften des Simulationsmodells, dass Versuche am PTW eine Abweichung zwischen simulierter und gemessener Steifigkeit zeigen (Stoffregen). Für die Ermittlung der benötigten Prüfkraft wird die gemessene Steifigkeit für die lineare Interpolation genutzt. Die Prüfkraft bei den Schwingfestigkeitstests der Probengeometrien liegen im Bereich von 4,5 kN bis 17 kN. Simulierte Belastungsfälle mit 1,5 kN bis 2 kN haben daher eine höhere Relevanz bei der Auswahl. Ein weiterer kritischer Einflussfaktor auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse ist der Kerbradius, der jedoch im Rahmen dieser Masterarbeit nicht näher untersucht wird und konstant 0,3 mm beträgt.

Im Anhang in Tabelle 30 sind alle nach obigen Kriterien gefilterten, zur Auswahl stehenden Aktormodulgehäuse tabellarisch aufgeführt. Für die Prüfung der Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse sind drei Geometrien ausgewählt worden, die aufgrund der zuvor aufgeführten Kriterien besonders geeignet sind. Die maximal erwartete lokale Spannung nach der Simulation betragen 213 N/mm² beziehungsweise 182 N/mm². Die erwarteten Spannungen liegen damit geringfügig unterhalb der in Kapitel 3.2.3 ermittelten Schwingfestigkeit bei 10⁷ Schwingspielen $\sigma_{O,N=10^7}$ der unbearbeiteten Proben von 219 N/mm². In Tabelle 11 sind die Parameter der ausgewählten Varianten und Belastungsfälle dargestellt. Beim Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 sind alle Parameter, wie oben beschriebenen, für eine hohe Vergleichbarkeit zwischen Gehäuse und unbehandelter Probengeometrie optimiert. Das Aktormodulgehäuse des Typs V02T18 zeichnet sich bei identischer, simulierter, maximaler Spannung durch eine geringere Wandstärke, einen geringeren Kerbwinkel, eine geringere Steifigkeit und einen größeren Radius aus. Ein Vergleich der experimentell ermittelten Schwingfestigkeiten bei 10⁷ Schwingspielen bietet die Möglichkeit die Genauigkeit der Übertragung der Ergebnisse des Simulationsmodells zu überprüfen. Des Weiteren ist die Geometrie des Typs V02T08 mit einer simulierten Vergleichsspannung von 182 N/mm² ausgewählt worden. Diese unterscheidet sich im Vergleich zum Gehäuse des Typs V02T05 durch einen geringeren Kerbwinkel von 137,5 ° und weist daher eine reproduzierbar geringere Steifigkeit auf. Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfung zeigen Einflüsse des Kerbwinkels auf.

Tabelle 11: Auflistung der mittels SLM hergestellten Aktormodulgehäuse

Exp. Nr. (Anzahl)	max. sim. Spannung	Prüf- kraft	Verschie- bung	Steifigkeit (Messung)	Wand- dicke	Winkel	Radius
V02T05	213 N/mm ²	1,85 kN	22 μm	84,09 N/ μm	0,6 mm	160 °	8,5 mm
V02T08	213 N/mm ²	0,82 kN	23 μm	35,48 N/ μm	0,6 mm	137,5 °	8,5 mm
V02T18	182 N/mm ²	0,76 kN	30 μm	25,18 N/ μm	0,5 mm	137,5 °	10 mm

Ausgewählt worden sind außerdem nur Geometrien, die keine optisch ohne Vergrößerung erkennbaren Defekte erwarten lassen. Für jede geometrische Variante ist dazu bereits ein jeweiliges Anschauungsmodell hergestellt worden. In Abbildung 36 sind die Aktormodulgehäuse der ausgewählten Typen zu sehen. Für die Versuche werden 30 Gehäuse des Typs V02T05, 10 Gehäuse des Typs V02T08 und 10 Gehäuse des Typs V02T18 hergestellt.



Abbildung 36: Anschauungsmodelle der Aktormodulgehäuse der Typen V02T18, V02T08 und V02T05 (von links nach rechts)

3.1.8 Prüftechnik - Aktormodulgehäuse

Aus der Simulation sind die maximal erwarteten Spannungen abhängig von der ausgewählten Geometrie des Aktormodulgehäuses bekannt. Außerdem ergibt sich aus Versuchsergebnissen für unbearbeitete Proben eine Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen des Werkstoffes. Die Auswahl der Aktormodulgehäusegeometrie erfolgt daher so, dass die aus der Simulation zu erwartende maximale Spannung im Streuband der Langzeitfestigkeit unbearbeiteter Proben liegt. Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Langzeitfestigkeit eines Aktormodulgehäuses experimentell zu verifizieren. Die Prüfung der Aktormodulgehäuse erfolgt zunächst auf einem Spannungshorizont zwischen maximal erwarteten Spannungen am Aktormodulgehäuse und mittlerer Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen der unbearbeiteten Proben. Die maximal mittels Simulation erwartete Spannung am Aktormodulgehäuse kann, wie in Abbildung 37 dargestellt, oberhalb ($\sigma_{\text{Sim a}}$) oder unterhalb ($\sigma_{\text{Sim b}}$) des Mittelwertes der Langzeitfestigkeit von unbearbeiteten Proben liegen. Bei den in Kapitel 3.1.7 ausgewählten Aktormodulen liegt die simulierte Spannung σ_{Sim} unterhalb der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen.

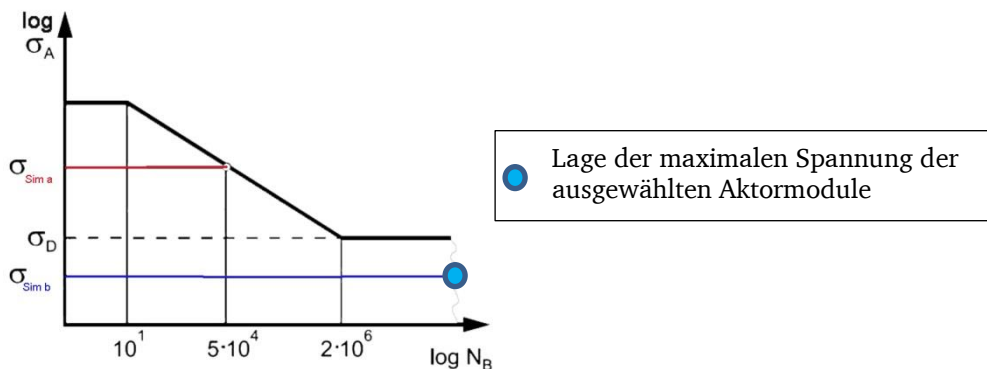


Abbildung 37: Mögliche Lage der durch die Simulation erwarteten Spannungen im Vergleich zur ermittelten Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen unbearbeiteter Proben

Die experimentelle Prüfung startet immer ausgehend vom jeweils höchsten Wert nach dem Perlschnurverfahren hin zu niedrigeren Spannungen. Für die ausgewählten Aktormodulgehäuse erfolgt die erste Belastung entsprechend in Höhe der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen unbehandelter Proben. Die Abstufung der Prüfspannung wird iterativ abhängig vom vorangegangenen Versuche festgelegt und die Prüfkraft wird so lange erniedrigt bis ein Durchläufer auftritt. Je nach Anzahl der anschließend noch zur Verfügung stehenden Gehäuse können weitere Versuche im Bereich Zeitfestigkeit zur Verifizierung der Wöhlerlinie und im Bereich der Langzeitfestigkeit nach dem Treppenstufenverfahren folgen. Diese Prüfmethode hat den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeit auf Durchläufer unterhalb der tatsächlichen Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen der Aktormodulgehäuse gering gehalten wird, während die Wahrscheinlichkeit für niedrigere Schwingspielzahlen, die eine Aussage über den Verlauf der Wöhlerkurve geben, steigt. Sollte dennoch ein Durchläufer auftreten, verifiziert dieser die berechnete minimale Lebensdauer. Außerdem kann überprüft werden, ob der Bruch an der nach dem Simulationsmodell ermittelten Position auftritt.

3.1.9 Versuchsaufbau - Aktormodulgehäuse

Die experimentelle Prüfung der Aktormodulgehäuse dient einerseits zur Verifizierung der Übertragung von Schwingfestigkeiten an Proben auf Bauteile, andererseits soll gezeigt werden, dass die Aktormodule eine Lebensdauer von 10^7 Schwingspielen unter festgelegter zyklischer Belastung erreichen und somit für den Einsatz zur Schwingungsdämpfung in Leichtbaustrukturen geeignet sind. Das Aktormodulgehäuse wird wie bereits die Probengeometrien und entsprechend der Belastung im späteren Einsatz mit der Maschine Hydropuls MHF der Firma IST im Zugschwellbereich geprüft. Bei der Durchführung der Versuche wird die Frequenz zunächst auf 50 Hz begrenzt, da dort eine maximale Abweichung einzelner Peaks zwischen Ist- und Soll-Wert begrenzt auf 100 N zu erwarten ist. Die Höhe der Belastung ergibt sich, wie in Kapitel 3.1.7 beschrieben, aus den mit Hilfe des Simulationsmodells ermittelten, maximal auftretenden Spannungen und der experimentell bestimmten Steifigkeit. Für die Einspannung soll die vorhandene Spannzanze mit 12 mm Durchmesser genutzt werden. Um diese Einspannung zu ermöglichen, wird der Deckel sowie das untere Ende des Gehäuses auf diesen Einspanndurchmesser, wie in Abbildung 38 dargestellt, reduziert. Dies ist möglich, da im Bereich des Vollmaterials kein Bruch beim Schwingfestigkeitstest erwartet wird und daher dieser Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Schwingfestigkeit hat. Im Boden und Deckel befindet sich zudem eine

Entlüftungsbohrung, damit die Luft bei der Schwingbelastung entweichen kann und keine Wärme durch Kompression entsteht. Die technischen Zeichnungen der Einspannungen und der Aktormodulgehäuse befindet sich im Anhang in Abbildung 100 bis Abbildung 105. Aufgrund der Balggeometrie mit Überhängen und damit einem erhöhten Risiko zur Verklemmung beim Pulverauftrag, erfolgt die SLM-Herstellung mit Hilfe einer Bürste. Zum Zeitpunkt der Herstellung der Modulgehäuse ist außerdem bekannt, dass keine Nachbearbeitung der Einspannflächen nötig ist.

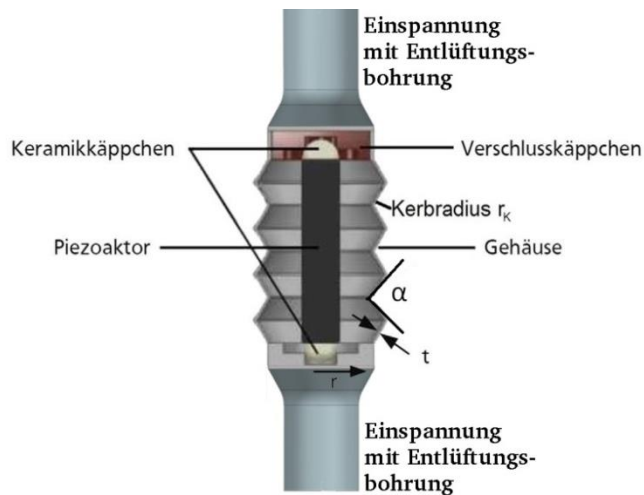


Abbildung 38: Aktormodulgehäuse mit Bereich zum Klemmen in Prüfmaschine

3.1.10 Versuchsplan - Aktormodulgehäuse

Im Anschluss an die Prüfung der Probengeometrien werden die in Tabelle 12 dargestellten Versuche zur Prüfung der Aktormodulgehäuse durchgeführt.

Tabelle 12: Versuche zur Ermittlung der Schwingfestigkeit von Aktormodulgehäusen

Kurzbezeichnung	Art des Versuches
A_20_1	Herstellung von Köppchen für alle Aktormodulgehäuse (siehe A_20_2)
A_20_2	Herstellung von <ul style="list-style-type: none"> - 30 SLM-Aktormodulgehäusen des Typs V02T05, - 10 SLM-Aktormodulgehäusen des Typs V02T08 und - 10 SLM-Aktormodulgehäusen des Typs V02T18 für die Versuchsreihe E_00, E_10 und E_20.
E_00	Prüfung der Aktormodulgehäuse V02T05 nach dem Perlschnurverfahren und dem Treppenstufenverfahren im Bereich der Langzeitfestigkeit.
E_10	Prüfung der Aktormodulgehäuse V02T08 nach dem Perlschnurverfahren.
E_20	Prüfung der Aktormodulgehäuse V02T18 nach dem Perlschnurverfahren.

Die zugehörigen Prüfbedingungen sind im vorherigen Kapitelabschnitt aufgeführt. Die benötigte Bauzeit wird für die Käppchen mit einem Tag, für die Gehäuse auf zwei bis drei Tage und für die Fertigstellung mit einem Tag geschätzt.

3.2 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel ist die experimentelle Versuchsdurchführung nach der Versuchsplanung Kapitel 3.1 dargestellt. Die Bezeichnung der Versuche erfolgt gemäß Tabelle 13 in der die tatsächlich durchgeführten Versuche dargestellt sind.

Tabelle 13: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Schwingfestigkeit

Kurzbezeichnung	Art des Versuches	
A_00_1	Herstellung	Herstellung von je 20 SLM-Proben für Versuche B_00, C_00 und D_00.
A_00_2		Herstellung von je 20 SLM-Proben für Versuche B_00, C_10 und D_00.
A_01		Nachbearbeitung von SLM-Proben für Versuch B_00.
A_20_1		Herstellung der Käppchen für A_20_2 und A_20_3.
A_20_2		Herstellung von - 30 SLM-Aktormodulgehäusen des Typs V02T05 und - 10 SLM-Aktormodulgehäusen des Typs V02T08 für die Versuchsreihe E_00 und E_10.
A_20_3		Herstellung von - 10 SLM-Aktormodulgehäusen des Typs V02T18 für E_20.
B_00	Prüfung der Proben	Prüfung von abgedrehten Proben -Ermittlung der Wöhlerlinie durch Perlschnurverfahren zur Eingrenzung der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen -Treppenstufenverfahren im Langzeitfestigkeitsbereich
C_00		Prüfung von unbearbeiteten Proben mit um 8 mm verkürzter Einspannlänge -Ermittlung der Wöhlerlinie durch Perlschnurverfahren zur Eingrenzung der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen -Abschätzung der Streuung durch mehrere Proben auf einem Spannungsniveau -Treppenstufenversuch im Langzeitfestigkeitsbereich
C_10		Prüfung von unbearbeiteten Proben im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich -Abschätzung der Streuung im Zeitfestigkeitsbereich => Ergänzung auf Spannungsniveaus von C_00 -Treppenstufenverfahren im Langzeitfestigkeitsbereich

E_00	Prüfung Bauteile	Prüfung der Aktormodulgehäuse V02T05 nach dem Perlschnurverfahren und dem Treppenstufenverfahren im Bereich der Langzeitfestigkeit.
E_10		Prüfung der Aktormodulgehäuse V02T08 nach dem Perlschnurverfahren.
E_20		Prüfung der Aktormodulgehäuse V02T18 nach dem Perlschnurverfahren.

Abweichend von der Versuchsplanung sind die Versuche um die Bauteilherstellung A_00_2 ergänzt worden, da der Baujob A_00 (jetzt A_00_1) aufgrund eines verklemmten Beschichters nicht vollständig fertiggestellt werden konnte. Die Proben der Reihe C_00 aus Baujob A_00_1 können trotz der verkürzten Einspannlänge genutzt werden, so dass die Proben aus Baujob A_00_2 bereits für Versuch C_10 zum Einsatz kommen und die Versuchsreihe der unbearbeiteten Proben vorgezogen werden konnte. Die Herstellung sowie die Versuchsdurchführung von Proben, die nur an der Einspannung nachbearbeitet werden sollen, entfallen, da erste Versuche der Proben C_00 eine kraftschlüssige Einspannung zeigen und folglich keine Nachbearbeitung nötig ist. In Abbildung 39 ist die logische Reihenfolge der Versuche graphisch dargestellt. Die Bauteile sind nach einer beschädigten Bürste im ersten Versuch in zwei Baujobs (A_20_2 und A_20_3) gefertigt worden. Dies hat den Vorteil, dass die Integration der Käppchen für alle Bauteile auf der gleichen Bauhöhe vorgenommen werden kann.

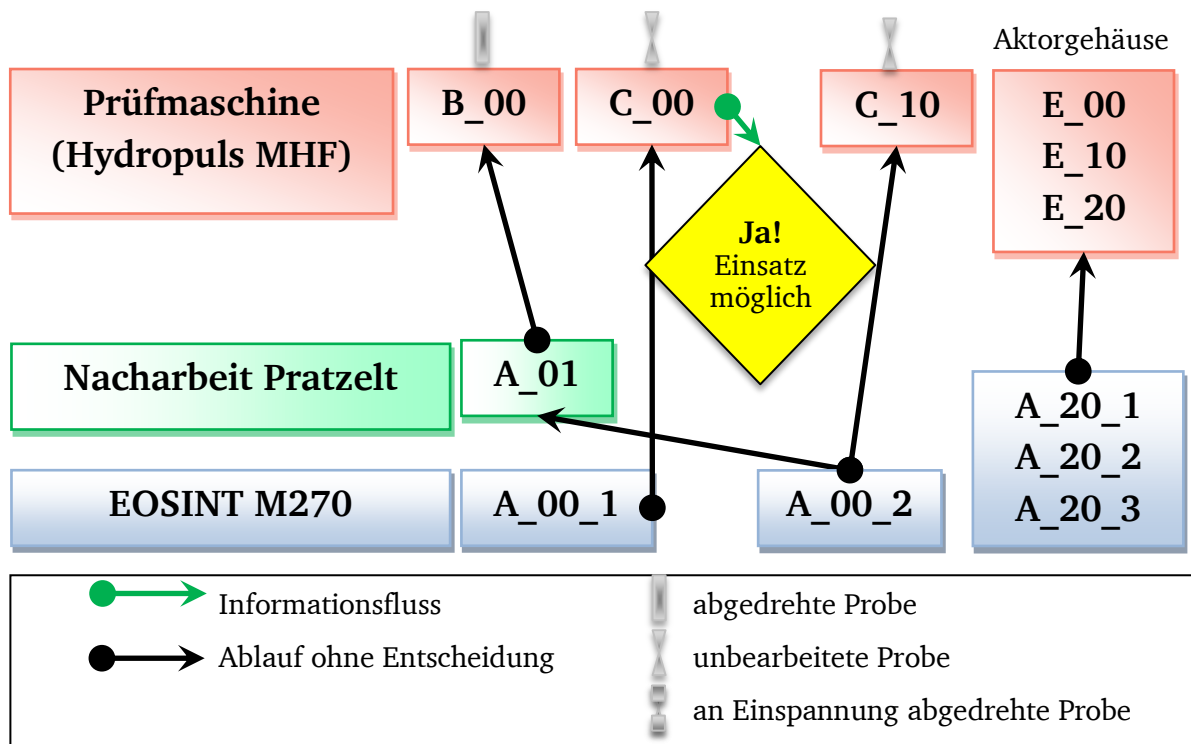


Abbildung 39: Logische Reihenfolge der durchgeführten Versuche dieser Masterarbeit

3.2.1 Herstellung der Proben mittels SLM

In diesem Kapitel ist die Durchführung der einzelnen Baujobs dargestellt, die zur Herstellung der SLM-Proben benötigt werden.

Baujob A_00_1

In Versuch A_00_1 werden innerhalb eines Baujobs jeweils 20 Proben für die Versuchsreihen B_00, C_00 und D_00 hergestellt, deren technische Zeichnungen im Anhang zu finden sind. Der Aufbau der Proben erfolgt vertikal auf einer gitterartigen Supportstruktur von 4 mm Höhe. Die Proben B_00 befinden sich gemäß Abbildung 40 auf der rechten und damit auf der Beschichterseite, während die Proben C_00 in der Mitte und die Proben D_00 in den beiden linken Reihen angeordnet sind. Die einzelnen Proben sind in X-Richtung um 1 mm versetzt, damit der Beschichter dauerhaft in Kontakt mit den Proben bleibt. Als Belichtungsstrategie findet die Streifen-Belichtung Anwendung.

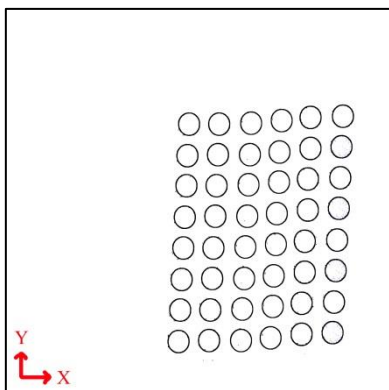


Abbildung 40: Anordnung der Proben für Baujob A_00_1 (D_00, C_00, B_00 von links nach rechts)

Die maximale Bauhöhe liegt aufgrund der Supportstruktur bei insgesamt 106 mm. Als kritisch in der Fertigung ist die 45°-Phase an der für die Versuche unbearbeiteten Probe C_00 zu sehen, die zur vereinfachten Einführung in die Spannzange dient. Die nach der in Abbildung 40 dargestellten Anordnung der Bauteilproben vorausberechnete Bauzeit beträgt 125 h. Die genutzten Fertigungsparameter sind in Tabelle 14 dargestellt. Aufgrund von zwei am Support abgebrochenen Proben der letzten Probenreihe ist der Baujob nach 76,220 mm abgebrochen worden. Die Herstellung der Proben ist nicht abgeschlossen worden und ist in Baujob A_00_2 wiederholt worden.

Tabelle 14: Fertigungsparameter für die Herstellung der SLM-Proben mit EOS M 270

Parameter	Wert
Laserleistung	195 Watt
Beschichter	Keramikklinge
Plattformtemperatur	80°C
Laserstrahldurchmesser	variabel 80-500 μm
Scangeschwindigkeit	1000 mm/s
Schutzgas	Argon

Die Proben mit der Bezeichnung C_00 weisen eine um 7,78 mm verkürzte Einspannlänge auf. Ein erster Versuchslauf dieser Proben ergibt, dass sowohl die verringerte Einspannlänge als auch die unbearbeitete Oberfläche eine kraftschlüssige Einspannung zulassen und daher für die Versuchsreihe C_00 genutzt werden können. In Abbildung 41 sind die unvollständig hergestellten Proben des Baujobs A_00_1 mit den beiden abgeknickten Proben auf der Bauplattform zu sehen.



Abbildung 41: SLM-Bauplattform mit Baujob A_00_1

Um ein erneutes Abknicken zu verhindern, wird für den folgenden Baujob A_00_2 die Supportstruktur solide gefertigt, sodass die Proben fest mit der Bauplattform verbunden sind. Eine Kerbe von 0,2 mm Tiefe und ein Übergangswinkel von 75° dienen zur Abgrenzung zwischen Support und Probe. Außerdem wird die Probe B_00 mit der verlängerten Einspannung nach oben zeigend gebaut, sodass die Querschnittsverjüngung bei allen Proben in gleichen Schichthöhen erfolgt. Des Weiteren werden die Bauplätze der Proben C_00 mit den Proben D_00 getauscht, da bei der Probe C_00 aufgrund des Überhanges an der Phase die Wahrscheinlichkeit für einen Baufehler höher liegt als bei Probe D_00 und näher am

Beschichter platzierte Proben von einem Baufehler nicht zwangsweise betroffen sind. Da die Probe C_00 bereits aus Baujob A_00_1 genutzt werden können, dienen die Proben C_00 aus Baujob A_00_2 bereits für die Versuchsreihe C_10.

Baujob A_00_2

Der Baujob A_00_2 dient aufgrund des unvollständigen Baujobs A_00_1 zur Herstellung von jeweils 20 Proben für die Versuchsreihen B_00, C_10 und D_00. Die Parameterwahl erfolgt daher entsprechend Baujob A_00_1 (siehe Tabelle 14). Die Proben sind weiterhin vertikal aufgebaut, besitzen jedoch eine solide Supportstruktur von 4 mm Höhe und damit eine feste Verbindung zur Bauplatzform, um ein erneutes Abknicken zu verhindern. Gemäß der Erkenntnisse aus Baujob A_00_1 sind die Proben B_00, wie in Abbildung 42 zu sehen, in den rechten beiden Reihen, die Proben C_10 in den linken beiden Reihen und die Proben D_00 in den mittleren beiden Reihen angeordnet. Die einzelnen Proben sind in X-Richtung wie bereits in Baujob A_00_1 um 1 mm versetzt angeordnet, damit der Beschichter dauerhaft in Kontakt mit den Proben bleibt.

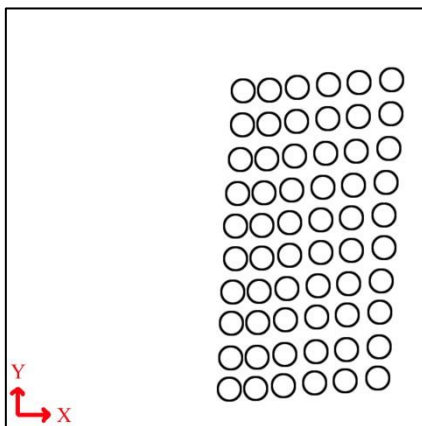


Abbildung 42: Anordnung der Proben für Baujob A_00_2 (C_10, D_00, B_00 von links nach rechts)

Nach einer Bauhöhe von 61,280 mm und einer Bauzeit von 74:47:50 (h:min:s) ist der Baujob aufgrund eines wie bereits in Baujob A_00_1 verklemmten Keramiklingen-Beschichters gestoppt. Da der Bau des zu prüfende Bereiches bereits erfolgreich abgeschlossen ist und vorherige Studien am PTW zeigen (Stoffregen), dass eine Unterbrechung des Baujobs nicht zu einer Schwachstelle führt, wird der Baujob durch erneutes Ankratzen sowie Wechsel auf eine Bürste als Beschichter fortgesetzt. Die vierte Probe von vorne in der dritten Reihe von rechts (siehe Abbildung 43), welche zur Verklemmung des Beschichters geführt hat, ist nicht fertig

gebaut worden, da diese aufgrund erster Versuchsergebnisse aus C_00 nicht mehr benötigt wird.

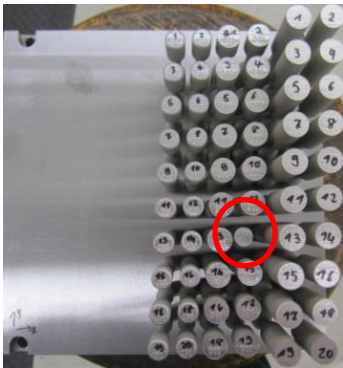


Abbildung 43: Draufsicht in Baujob A_00_2 hergestellten Proben auf der Bauplattform

In Abbildung 44 sind die fertig hergestellten Proben des Baujobs A_00_2 in der Seitenansicht zu sehen. Die Bauunterbrechung ist an der dunklen Linie unterhalb des oberen Einspannbereiches zu erkennen.

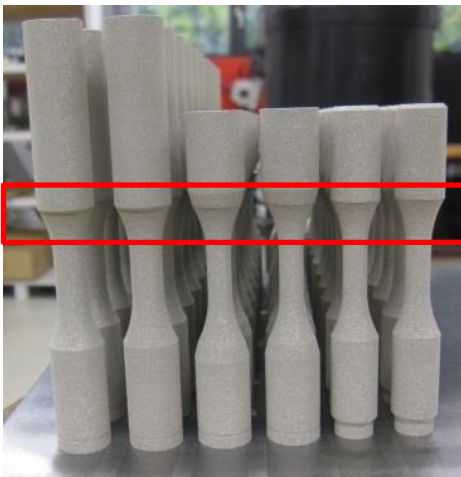


Abbildung 44: Fertig hergestellte Proben B_00, D_00 und C_10 (von links nach rechts) in Baujob A_00_2

3.2.2 Herstellung der Aktormodulgehäuse mittels SLM

Die Parameter für die Herstellung der SLM-Aktormodulgehäuse sind identisch mit den Parametern für die Herstellung der SLM-Proben und Tabelle 14 in Kapitel 3.2.1 zu entnehmen. Der Pulverauftrag erfolgt mittels Bürste, um ein Verklemmen zu vermeiden. Im ersten Bauschritt werden die Aktorgehäusekappchen gefertigt. Anschließend erfolgt der Bau der Gehäuse bis zur Ebene in der die Kappchen eingesetzt werden. Das Pulver aus dem Inneren wird an dieser Stelle aufgrund der Entlüftungsbohrung nur so weit entfernt, dass die

zuvor gefertigten Käppchen eingesetzt werden können. Anschließend wird der Bau des Aktormodulgehäuses fortgesetzt und die obere Einspannung hergestellt. Damit bei der Schwingfestigkeitsprüfung keine Wärme durch das Komprimieren der Luft im Inneren entsteht, befinden sich nach oben und unten Entlüftungsbohrungen im Boden und Deckel des Gehäuses. Die Anordnung der 50 Aktormodulgehäuse in den Baujobs A_20_2 und A_20_3 ist in Abbildung 45 zu sehen.

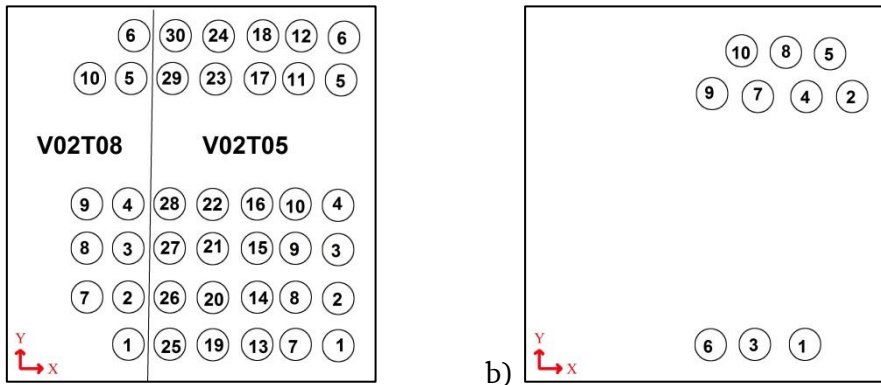


Abbildung 45: a) Anordnung der Aktormodulgehäuse der Typen V02T08 & V02T05 im Baujob A_20_2
b) Anordnung der Aktormodulgehäuse des Typs V02T18 im Baujob A_20_3

In Abbildung 46a sind die Käppchen der Gehäuse und Abbildung 46b die fertig hergestellten Aktormodulgehäuse zu sehen.



Abbildung 46: a) Hergestellte Käppchen für die Gehäuse V02T05, V02T08 und V02T18
b) Hergestellte Aktormodulgehäuse V02T05, V02T08 und V02T18 (von links nach rechts)

3.2.3 Ermittlung Schwingfestigkeit der SLM-Proben

In diesem Unterkapitel wird auf die experimentelle Durchführung der einzelnen Schwingfestigkeitsprüfungen eingegangen. Die Prüfung der unbearbeiteten Proben ist zu Beginn dargestellt. Anschließend folgen die Versuche mit nachbearbeiteten Proben und den Aktormodulgehäusen.

Experimentelle Prüfung Schwingfestigkeit unbearbeiteter SLM-Proben

Für die Erstellung der ersten Wöhlerlinie werden die im Bau unterbrochenen Proben C_00 aus Baujob A_00_1 eingesetzt. Diese verfügen aufgrund des Baujobabbruchs einseitig über eine um 7,78 mm verkürzte Einspannlänge (siehe Abbildung 47 rechte Seite). Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die verkürzte Einspannlänge in Kombination mit der unbearbeiteten Oberfläche für die Schwingfestigkeitsversuche ausreichend ist, das heißt eine kraftschlüssige Verbindung mit der Prüfmaschine zustande kommt.



Abbildung 47: Probe C_00 mit einer einseitig um 7,78 mm verkürzter Einspannlänge

Aufgrund des fehlgeschlagenen Baujobs A_00_1 steht für die Versuchsreihe C_00 beziehungsweise C_10 eine um zehn Proben größere Probenzahl zur Verfügung, als in Kapitel 3.1 geplant. Außerdem stehen dadurch alle unbearbeiteten Proben zeitnah zur Verfügung, so dass der Übergang zwischen der Versuchsreihe C_00 und C_10 fließend gestaltet werden kann.

Tabelle 15: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_00 unbearbeiteter Probengeometrie

Probenbezeichnung	Oberspannung [N/mm ²]	Schwingspielzahl bis zum Bruch	
C_00_2	500	102.402	■ Versuch des Treppenstufenverfahrens (Durchläufer)
C_00_3	400	188.803	
C_00_4	400	178.153	
C_00_5	399	262.706	
C_00_6	160	10.000.000	■ Versuch des Treppenstufenverfahrens (Bruch)
C_00_7	260	525.654	
C_00_8	200	916.984	
C_00_9	180	10.000.000	
C_00_10	220	882.176	
C_00_11	190	10.000.000	
C_00_12	200	10.000.000	

C_00_13	220	1.932.924
C_00_14	400	96.316
C_00_15	500	85.600
C_00_16	500	65.971
C_00_17	300	382.432
C_00_18	300	342.219
C_00_19	190	10.000.000
C_00_20	200	10.000.000

Die Probe mit der Bezeichnung C_00_1 ist in einem ersten Probelauf zur Überprüfung, ob die verkürzte Einspannung ausreichend ist, im Zug-Druck-Wechselbereich mit einem Spannungsverhältnis von $R=-1$ geprüft worden. Die angestrebte Schwingspielzahl von 50.000 ist mit einer Oberspannung σ_o von 300,63 N/mm² mit 82.264 Schwingspielen nur geringfügig übertroffen worden. Mit der zweiten Probe startet die Prüfung der unbearbeiteten Proben, wie in Versuch C_00 geplant, im Zugschwellbereich zunächst nach dem Perlschnurverfahren. Die Spannungsamplitude ist dort im Vergleich zur ersten Probe um 100 N/mm² reduziert worden, sodass die Schwingspielzahl bis zum Bruch auf 102.402 gesteigert werden konnte. Auf dem folgenden Spannungsniveau σ_o von 400 N/mm² sind zwei Proben getestet worden, um die Streuung abschätzen zu können. In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe C_00 tabellarisch dargestellt. Die Versuche des Treppenstufenverfahrens sind dort Gelb markiert.

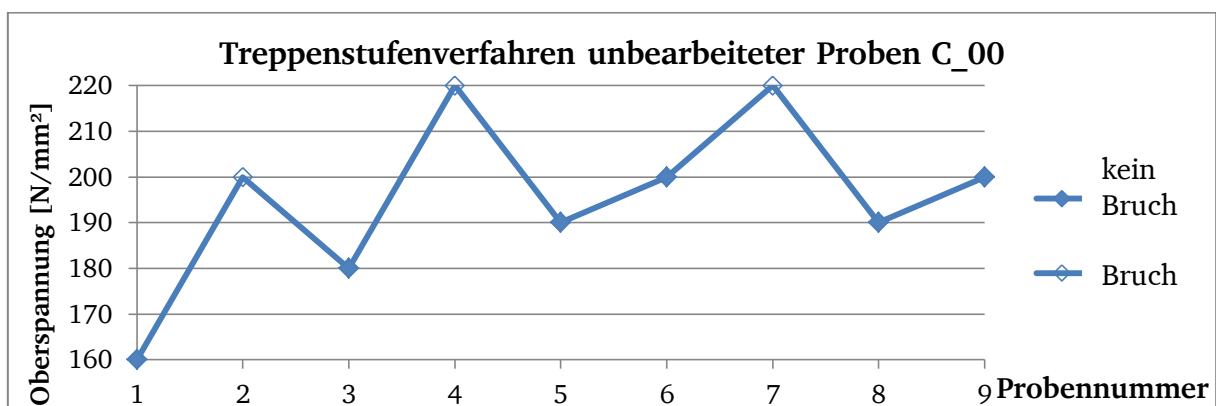


Abbildung 48: Belastungshorizonte der Proben C_00 nach dem Treppenstufenverfahren

Nach dem Auftritt des ersten Durchläufers erfolgt die Prüfung im Bereich der Langzeitfestigkeit, orientiert am Treppenstufenverfahren zunächst mit variablem Stufenabstand um den Bereich der Langzeitfestigkeit einzugrenzen. Eine Abfolge der Versuche auf den einzelnen Belastungshorizonten nach dem Treppenstufenverfahren ist Abbildung 48

dargestellt. Um die Auslastung der Prüfmaschine über Nacht durch Versuche im Langzeitfestigkeitsbereich und damit mögliche Durchläufer zu erhöhen, werden Versuche im Bereich der Zeitfestigkeit eingeschoben. Auf jedem Belastungshorizont werden drei Proben geprüft, so dass die Streuung abgeschätzt werden kann. In Abbildung 49 ist eine Probe der Versuchsreihe C_10 nach dem Bruch vor dem Ausspannen in der Prüfmaschine zu sehen.

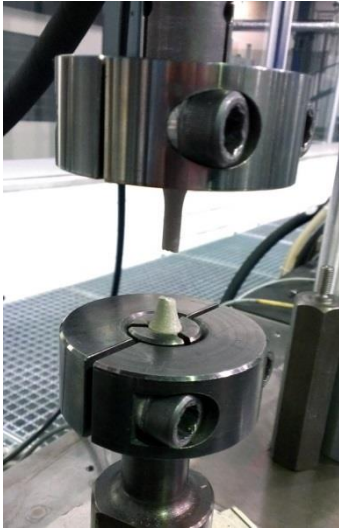


Abbildung 49: Probe der Versuchsreihe C_10 nach Bruch eingespannt in Prüfmaschine

Mit den im Baujob A_00_2 hergestellten unbearbeiteten Proben wird die Neigung der Wöhlerlinie zum einen durch Prüfung weiterer Proben im Zeitfestigkeitsbereich verifiziert und zum anderen der Bereich der Langzeitfestigkeit, wie in C_10 geplant, mit einer Anzahl von mehr als zehn Proben untersucht.

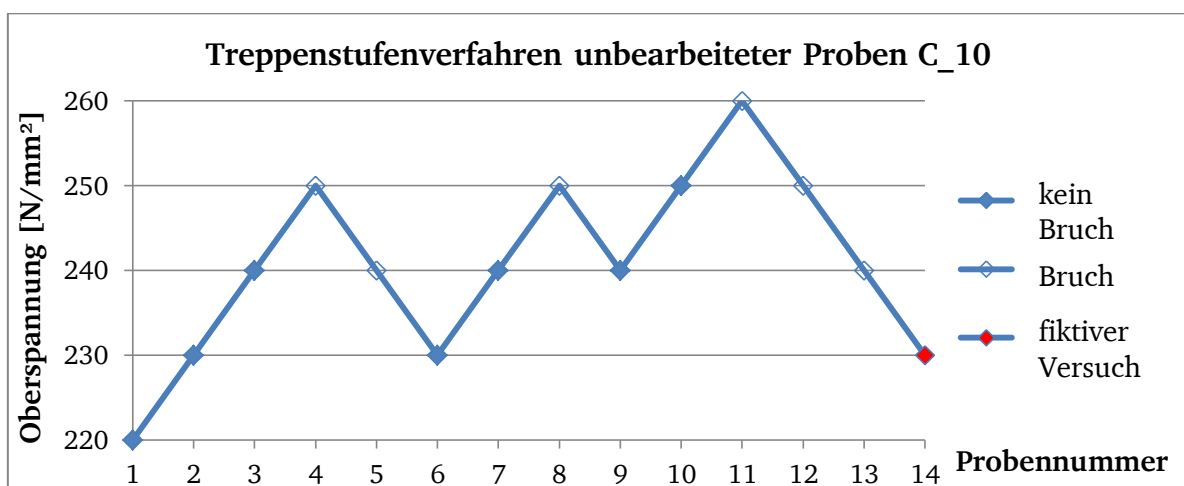


Abbildung 50: Belastungshorizonte der Proben C_10 nach dem Treppenstufenverfahren

Die aufeinanderfolgenden Belastungshorizonte der Proben sind in Abbildung 50 dargestellt. Außerdem ist der nach der Logik des Treppenstufenverfahrens folgende, fiktive und durch den festgelegten Stufenabstand bekannte Belastungshorizont für die statistische Auswertung ergänzt. Aufgrund des Bruches der letzten Probe, liegt dieser fiktive Versuch auf der nächstniedrigeren Stufe. In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe C_10 tabellarisch aufgeführt. Die Versuche des Treppenstufenverfahrens sind dort Gelb markiert.

Die maximale Prüffrequenz liegt für unbearbeitete Proben der Versuchsreihen C_00 und C_10 unterhalb einer Oberspannung σ_0 von 300 N/mm² bei 140 Hz. Versuche oberhalb dieser Spannung konnten mit 70 Hz bis 100 Hz abhängig von der jeweiligen Abweichung des Soll- und Ist-Wertes, wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, erfolgen.

Tabelle 16: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_10 unbearbeiteter Probengeometrie

Probenbezeichnung	Oberspannung [N/mm ²]	Schwingspielzahl bis zum Bruch	gemessener Durchmesser [mm]	
C_10_1	400	147.468	6,000	
C_10_2	220	10.000.000	6,000	Versuch des Treppenstufenverfahrens (Durchläufer)
C_10_3	300	521.754	6,025	
C_10_4	500	92.823	6,050	
C_10_5	400	173.644	6,050	
C_10_6	300	385.073	6,025	
C_10_7	500	79.460	6,000	
C_10_8	600	8.989	6,025	
C_10_9	230	10.000.000	6,025	Versuch des Treppenstufenverfahrens (Bruch)
C_10_10	240	10.000.000	6,050	
C_10_11	250	991.485	6,000	
C_10_12	240	727.005	6,050	
C_10_13	230	10.000.000	6,025	
C_10_14	240	10.000.000	6,000	
C_10_15	250	1.896.383	6,000	
C_10_16	240	10.000.000	6,050	
C_10_17	250	10.000.000	6,025	
C_10_18	260	503.887	6,000	
C_10_19	250	978.585	6,000	
C_10_20	240	943.036	6,025	

In Abbildung 51 ist die Oberfläche einer unbehandelten SLM-Probe schematisch dargestellt. Da es einerseits durch diese Oberflächenrauigkeit und andererseits aufgrund von Abweichungen in der Maßhaltigkeit beim SLM-Verfahren zu Abweichungen im Probenquerschnitt kommen kann, wird vor der Durchführung der Schwingfestigkeitstests der Versuchsreihe C_10 der minimale Probendurchmesser jeder Probe ermittelt. Die mittels Messschieber bestimmten minimalen Durchmesser sind in Tabelle 16 dargestellt. Der tatsächliche minimale Durchmesser ergibt sich aus dem gemessenen minimalen Durchmesser abzüglich des doppelten R_z -Wertes.

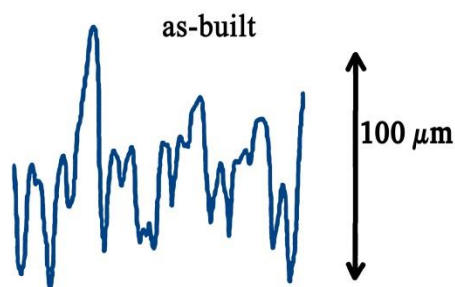


Abbildung 51: Schematische Darstellung der Probenoberfläche (Spierings et al. 2013, S. 91)

Die Probenoberfläche ist optisch mit einem Auflichtmikroskop der Firma Alicona vermessen worden und die Auswertung zeigt, dass die Oberfläche eine Rauigkeit von $R_z = 108 \mu\text{m}$ bei einer mittleren Rautiefe R_a von $16,2 \mu\text{m}$ aufweist. In Abbildung 52 ist die Mikroskopaufnahme eines $1,4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ großen Oberflächenausschnittes einer unbearbeiteten Probe zu sehen. Die Oberflächenrauigkeit ist über eine Länge von $3,6 \text{ mm}$ entlang der roten Markierungen ermittelt worden.

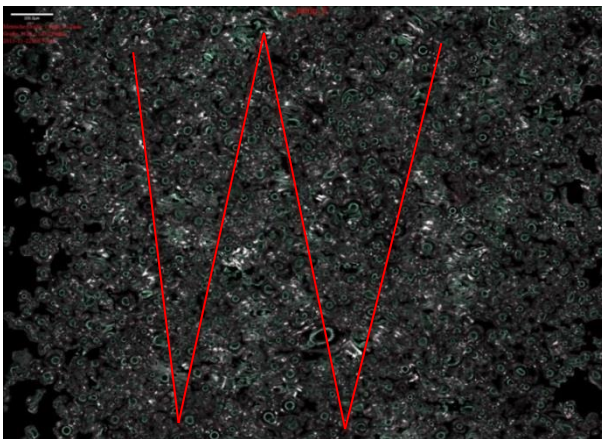


Abbildung 52: Oberflächenaufnahme der un bearbeiteten Probe C_10_20 ($1,4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$)

In Abbildung 53 sind die Ergebnisse der Versuchsreihen C_00 und C_10 grafisch im Wöhlernetz dargestellt. Die Belastungen sind logarithmisch über den ermittelten ebenfalls logarithmisch skalierten Schwingspielzahlen aufgetragen.

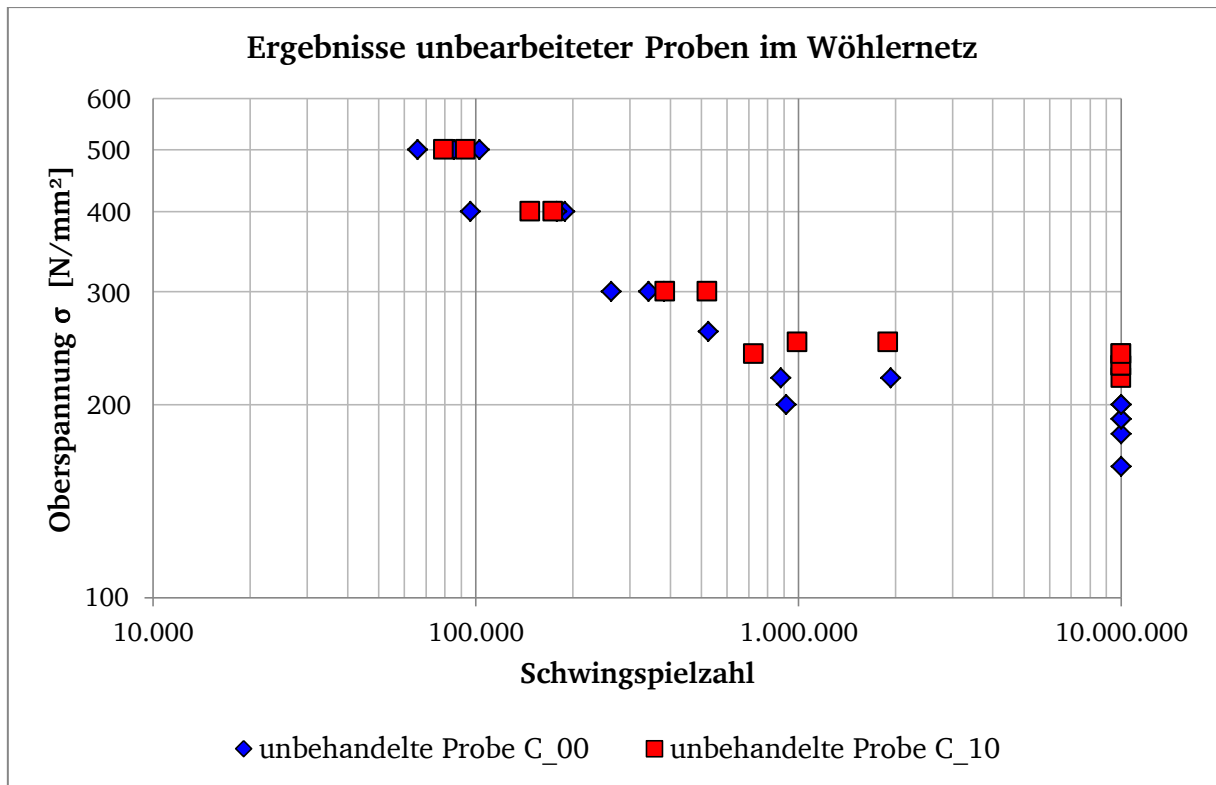


Abbildung 53: Versuchsergebnisse der Wöhlerversuche unbearbeiteter Proben

Experimentelle Prüfung der Schwingfestigkeit nachbearbeiteter SLM-Proben

Die Proben des Versuches B_00 (siehe Abbildung 54) sind nach Fertigstellung im Baujob A_00_2, wie in der Versuchsplanung festgelegt, durch das Unternehmen „Michel Pratzelt Zerspanung“ nachbearbeitet worden, so dass eine Oberflächenrauigkeit R_z von $5 \mu\text{m}$ erreicht wird.



Abbildung 54: Abgedrehte Probe B_00_20

Für die bearbeiteten Proben ist wie bereits bei den unbearbeiteten Proben die Oberfläche mittels Mikroskop untersucht worden. In Abbildung 55 ist ein $1,4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ großer

Ausschnitt der Oberfläche dargestellt. Das Oberflächenprofil entlang des rot markierten Pfades ist in Abbildung 56 zu sehen. Die mittlere Rauheit des Profils R_a liegt bei $0,7 \mu\text{m}$ während der maximale Abstand zwischen Profilspitze und Profiltal des Rauigkeitsprofils R_z bei $5 \mu\text{m}$ liegt.

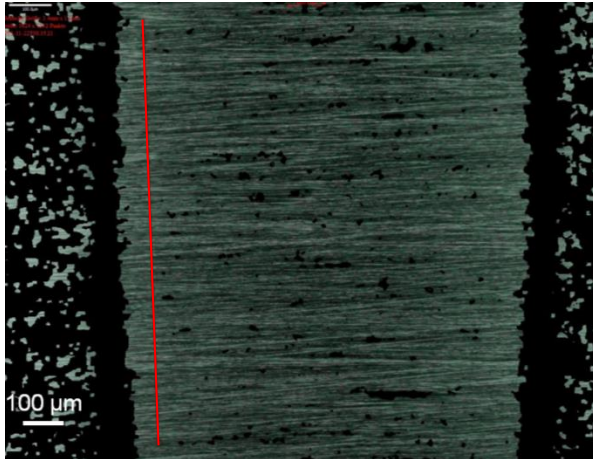


Abbildung 55: Oberflächenaufnahme der bearbeiteten Probe B_00_19

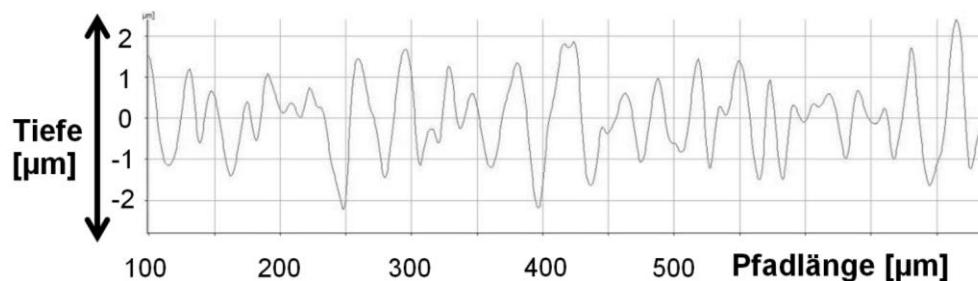


Abbildung 56: Rauigkeitsprofil der Probe B_00_19 entlang des roten Pfades in Abbildung 55

Die Prüfung erfolgt gemäß der Versuchsplanung nach dem Perlschnurverfahren hin zu geringeren Belastungen bis ein Durchläufer auftritt. Anschließend wird die Spannung iterativ angepasst, so dass die Steigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich ermittelt und der Bereich der Langzeitfestigkeit weiter eingegrenzt werden kann. Als Ausgangswert für die Prüfung der abgedrehten Proben dient die zuvor mit den unbearbeiteten Proben erzielte Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen und die Versuchsergebnisse von Sehrt, Witt (2010) sowie von Starr et al. (2011), welche in Kapitel 2.5.2 aufgeführt sind. In Abbildung 57 sind die Ergebnisse des Versuches grafisch im Wöhlernetz und in Tabelle 17 tabellarisch aufgeführt. Die Versuche des Treppenstufenverfahrens sind dort Gelb markiert.

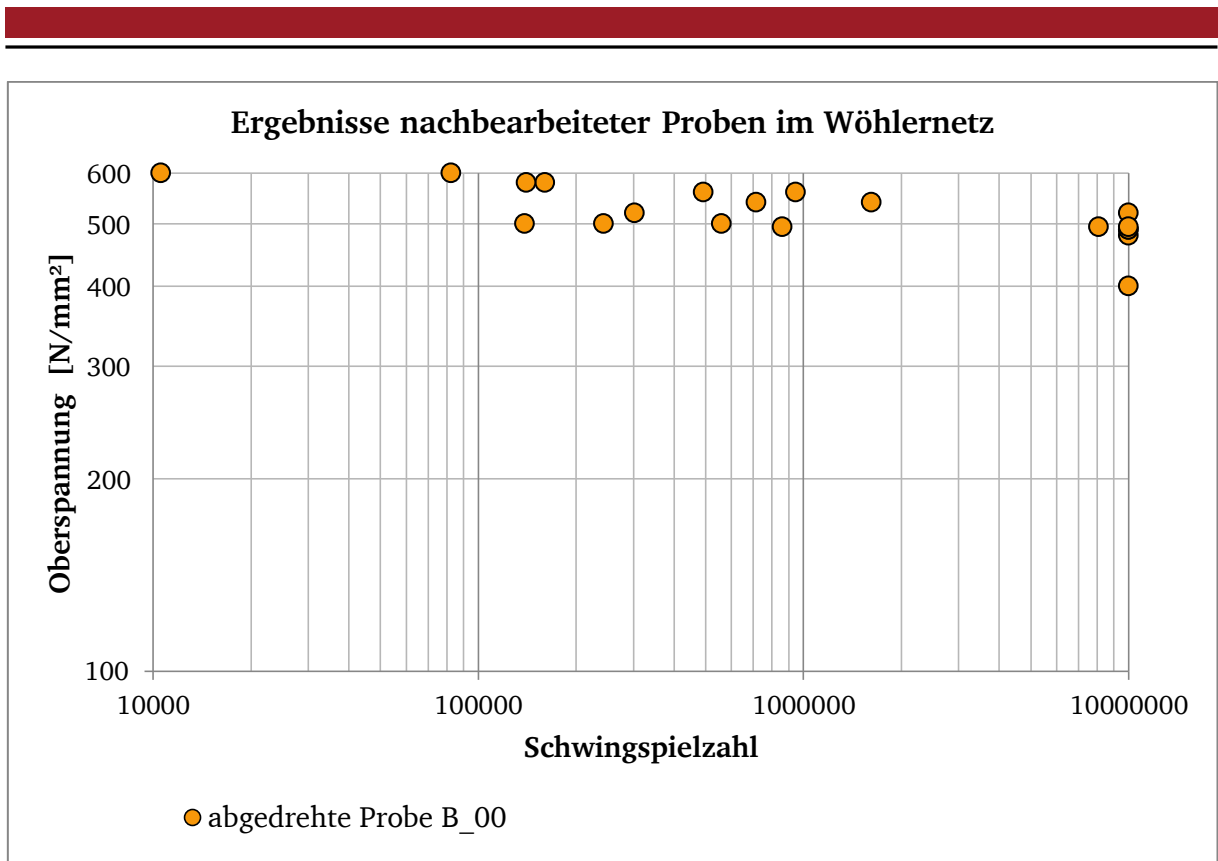

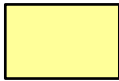


Abbildung 57: Versuchsergebnisse des Wöhlerversuches mit nachbearbeiteten Proben

Tabelle 17: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe B_00 nachbearbeiteter Probengeometrie

Probenbezeichnung	Oberspannung [N/mm²]	Schwingspielzahl bis zum Bruch
B_00_1	600	10.563
B_00_2	400	10.000.000
B_00_3	520	302.630
B_00_4	500	139.007
B_00_5	500	243.249
B_00_6	500	559.724
B_00_7	480	10.000.000
B_00_8	490	10.000.000
B_00_9	495	860.739
B_00_10	520	10.000.000
B_00_11	490	10.000.000
B_00_12	495	10.000.000
B_00_13	560	492.240
B_00_14	495	8.092.655

B_00_15	540	715.883
B_00_16	580	160.546
B_00_17	560	719.000
B_00_18	580	140.442
B_00_19	600	82.615
B_00_20	540	1.618.811

 Versuch des Treppenstufenverfahrens (Durchläufer)
 Versuch des Treppenstufenverfahrens (Bruch)

Die Prüffrequenz ist bei einer Oberspannung σ_o oberhalb von 520 N/mm² auf maximal 100 Hz begrenzt worden, um eine Abweichung zwischen Ist- und Sollwert auf 150 N einzuschränken. Unterhalb dieses Belastungshorizontes konnte mit bis zu 80 Hz geprüft werden. In Abbildung 58 sind die Belastungshorizonte der Proben, die nach dem Treppenstufenverfahren geprüft worden sind, im Diagramm dargestellt. Diese Versuche sind in Tabelle 17 gelb markiert. Zusätzlich ist der nach der Logik des Treppenstufenverfahrens folgende fiktive Spannungshorizont ergänzt.

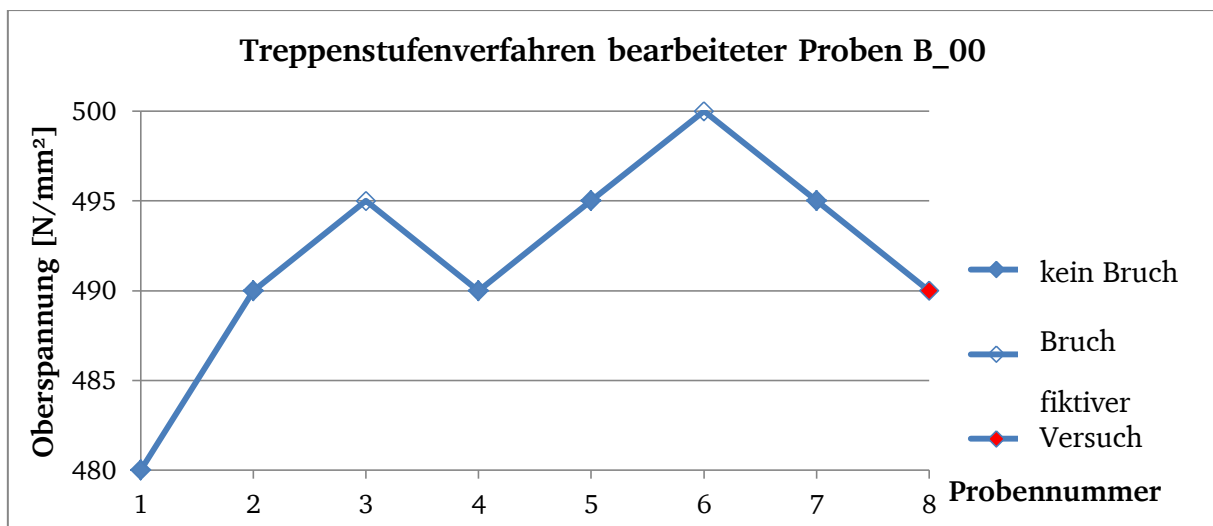


Abbildung 58: Belastungshorizonte der Proben B_00 nach dem Treppenstufenverfahren

3.2.4 Experimentelle Analyse der Probendichte

Die Überprüfung der Probendichte kann aufgrund des bei den abgedrehten Proben aus dem CAD-Modell bekannten Volumens durch Analyse der Probenmasse sowie der Vermessung der Probenlänge erfolgen. In dieser Masterarbeit erfolgt die Bestimmung der Dichte stellvertretend für alle Proben anhand der abgedrehten Probe B_00_20. Die Masse von 52,08 g ist mit einer Waage der Genauigkeit ± 10 mg am PTW ermittelt worden. Die Länge

der Probe beträgt 80,2 mm. Nach der in Kapitel 3.1.4 aufgeführten Formel (14) sowie der im Anhang aufgeführten Berechnung und der zugehörigen Fehlerabschätzung lässt sich das Volumen sowie die absolute und die relative Dichte der Probe wie nachfolgend dargestellt berechnen:

$$\begin{aligned}
 (18) \quad V_{Probe} &= V_{Probe\ CAD} + (Länge_{Probe} - Länge_{Probe\ CAD}) \cdot \frac{d_{max}^2}{4} \cdot \pi \\
 &= 6630,45 \text{ mm}^3 + (80,2 \text{ mm} - 80 \text{ mm}) \cdot \frac{(12 \text{ mm})^2}{4} \cdot \pi \\
 &= 6630,45 \text{ mm}^3 + 22,62 \text{ mm}^3 = 6653,07 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

$$(17) \quad \delta_{Probe} = \frac{m_{Probe\ mit\ Zentrierbohrung}}{V_{Probe} - V_{Zentrierbohrung}} = \frac{52,08 \text{ g}}{6653,07 \text{ mm}^3 - 19 \text{ mm}^3} = 0,00785 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}$$

$$(19) \quad \delta_{Probe\ relativ} = \frac{\delta_{Probe}}{\delta_{1,4542}} \cdot 100 = \frac{0,00785 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}}{0,0078 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}} \cdot 100 = 100,64 \%_{-0,83\%}^{+0,85\%}$$

Da die relative Probendichte kleiner 100 % sein muss, liegt die relative Dichte der Probe B_00_20 im Bereich größer 99,81 %. Dies entspricht den am Institut bereits durchgeführten Versuchen, die in Kapitel 3.1.4 aufgeführt sind. Poren sollten aufgrund der hohen Dichte nur geringfügigen Einfluss auf die Schwingfestigkeit haben.


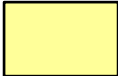
3.2.5 Ermittlung der Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse

Aus den Versuchsreihen C_00 und C_10 ergibt sich, dass die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen $\sigma_{0,N=10^7}$ unbearbeiteter Proben bei einer 50 %-igen Überlebenswahrscheinlichkeit bei 219 N/mm² liegt. Wie in Kapitel 3.1.7 beschrieben, sind für die Übertragung der Werkstoffdaten auf die Aktormodulgehäuse ein Kerbwinkel von 160 °, eine Wanddicke von 0,6 mm, ein Radius von 8,5 mm und eine maximale Dehnung von 50 μm als vorrangig geeignet festgelegt worden. Für die Prüfung der Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse sind zwei Geometrien ausgewählt worden, deren maximal erwartete lokale Spannung nach der Simulation 213 N/mm² betragen sowie eine weitere Geometrie mit einer erwarteten Vergleichsspannung von 182 N/mm². Nach dem Perlschnurverfahren werden die Aktormodule des Typs V02T05, beginnend mit einer Spannung σ_0 von 219 N/mm² hin zu niedrigeren Belastungshorizonten geprüft, bis ein Durchläufer auftritt. Die Prüfkraft für die jeweiligen Versuche basiert auf der Verschiebung und der maximalen Belastung im Simulationsmodell sowie der experimentell gemessenen Steifigkeit in vorangegangenen Versuchen in Abhängigkeit von der festgelegten Belastung beziehungsweise Oberspannung und ist entsprechend folgender Formel linear berechnet worden.

$$(20) \text{ Prüfkraft} = \frac{\text{Verschiebung}_{\text{Simulation}} * \text{Steifigkeit}_{\text{experimentell}} * \text{Oberspannung}}{\text{maximale Spannung}_{\text{Simulation}}}$$

In Abbildung 60 sind die Versuchsergebnisse im Wöhlernetz aufgetragen. Da bereits der erste Versuch die Grenzlastschwingenspielzahl erreicht hat, erfolgt die Prüfung der weiteren Aktormodulgehäuse zunächst bei höherer Belastung zur Ermittlung und Verifizierung der Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich mit drei Versuchen je Lasthorizont. Zudem wird iterativ im Bereich des Abknickpunktes geprüft, so dass die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen weiter eingegrenzt wird und eine Abschätzung der Streuung ermittelt werden kann. Eine tabellarische Darstellung der Versuchsergebnisse befindet sich in Tabelle 18. Die Versuche nach dem Treppenstufenverfahren sind gelb markiert. Aufgrund der geringen Prüfkräfte konnten alle Gehäuse mit einer Frequenz von 133 Hz geprüft werden.

Tabelle 18: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche des Aktormodulgehäuses V02T05

Versuchsnummer	Probenbezeichnung	Oberspannung [N/mm ²]	Schwingenspielzahl bis zum Bruch	Prüfkraft [kN]	
E_00_1	V02T05_29	219	10.000.000	1,90	
E_00_2	V02T05_23	400	520.216	3,47	Versuch des Treppenstufenverfahrens (Durchläufer)
E_00_3	V02T05_20	500	160.287	4,34	
E_00_4	V02T05_9	400	563.943	3,47	
E_00_5	V02T05_15	500	168.020	4,34	
E_00_6	V02T05_27	350	937.484	3,04	Versuch des Treppenstufenverfahrens (Bruch)
E_00_7	V02T05_24	320	10.000.000	2,78	
E_00_8	V02T05_30	350	939.489	3,04	
E_00_9	V02T05_4	350	1.023.718	3,04	
E_00_10	V02T05_13	340	10.000.000	2,95	
E_00_11	V02T05_12	500	162.539	4,34	
E_00_12	V02T05_7	550	99.088	4,78	
E_00_13	V02T05_10	600	80.413	5,21	
E_00_14	V02T05_2	400	426.352	3,47	
E_00_15	V02T05_1	620	60.986	5,38	
E_00_16	V02T05_25	450	192.320	3,91	
E_00_17	V02T05_3	345	10.000.000	3,00	
E_00_18	V02T05_18	450	187.690	3,91	
E_00_19	V02T05_22	345	1.513.367	3,00	
E_00_20	V02T05_28	345	2.437.474	3,00	

E_00_21	V02T05_21	550	104.823	4,78
E_00_22	V02T05_11	550	112.156	4,78
E_00_23	V02T05_5	600	77.937	5,21
E_00_24	V02T05_6	600	73.872	5,21
E_00_25	V02T05_19	650	54.973	5,65
E_00_26	V02T05_17	450	252.319	3,91
E_00_27	V02T05_14	340	1.088.176	2,95
E_00_28	V02T05_26	340	1.152.113	2,95
E_00_29	V02T05_16	335	10.000.000	2,91
E_00_30	V02T05_8	450	299.715	3,91

Eine Abfolge der Versuche des Gehäusetyps V02T05 auf den einzelnen Belastungshorizonten nach dem Treppenstufenverfahren ist in Abbildung 59 dargestellt.

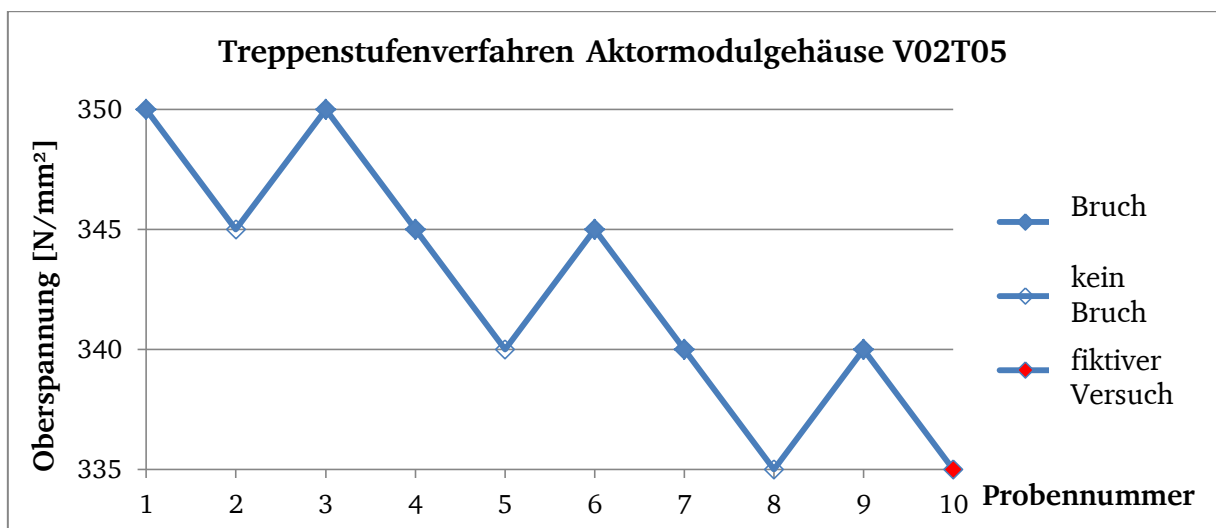


Abbildung 59: Belastungshorizonte der Aktormodulgehäuse V02T05 nach dem Treppenstufenverfahren

Im nächsten Schritt erfolgt die Prüfung der Gehäuse des Typs V02T08. Die Prüfbelastung orientiert sich an den Ergebnissen des Gehäuses V02T05. Da beide Gehäuse nach den Ergebnissen der Simulation maximale Spannungen in der gleichen Größenordnung aufweisen, wird die Schwingfestigkeit der V02T08-Gehäuse in der gleichen Größenordnung wie der V02T05-Gehäuse erwartet. Die Prüfbelastung liegt daher signifikant oberhalb der simulierten maximalen Belastung. Die weitere Prüfung dieser Versuchsreihe sowie die Prüfung der Aktormodulgehäuse des Typs V02T18 erfolgt nach dem Perlschnurverfahren. In Abbildung 60 sind die Versuchsergebnisse aller Aktormodulgehäuse im Wöhlernetz

aufgetragen. Die tabellarische Darstellung der Versuchsergebnisse für die Gehäusetypen V02T18 und V02T08 befindet sich in Tabelle 20 und Tabelle 19.

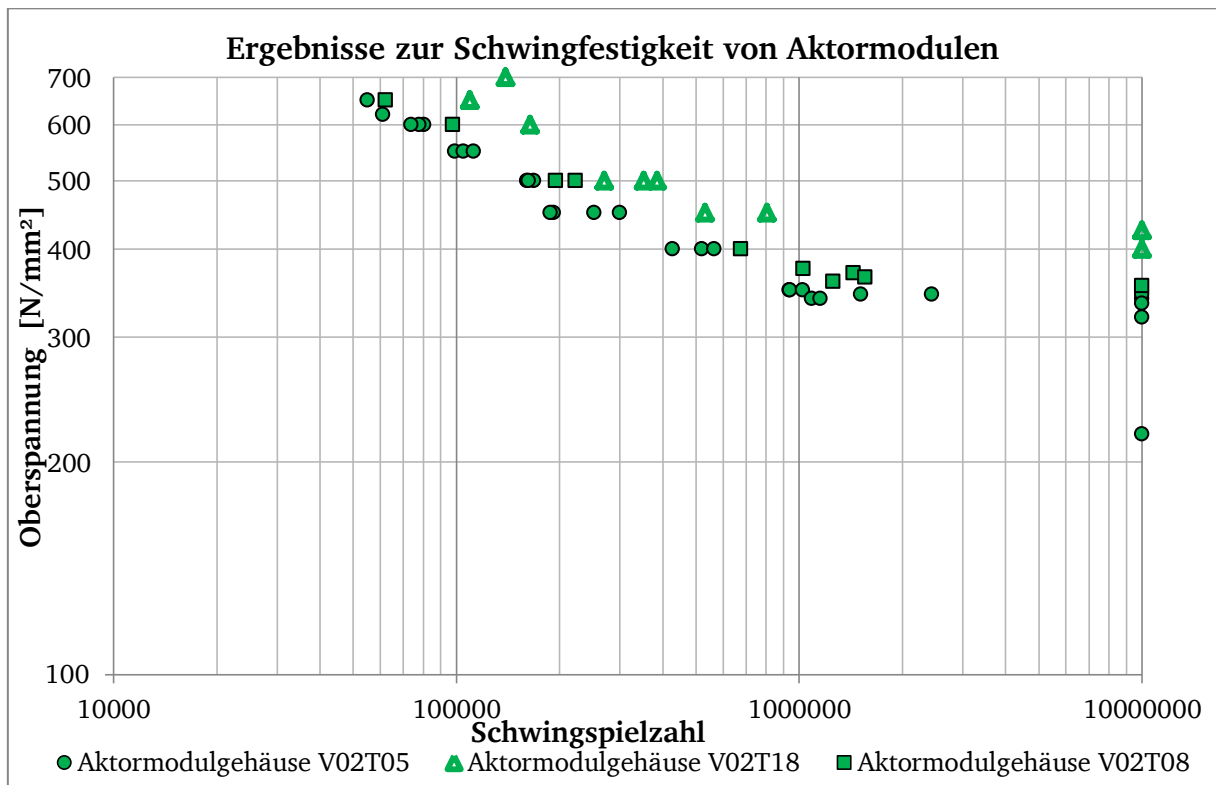


Abbildung 60: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfung der Aktormodulgehäuse V02T05, V02T08 und V02T18 unter konstanten Spannungsamplituden (Wöhlerversuch)

Tabelle 19: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche der Aktormodulgehäuse V02T08

Versuchsnummer	Probenbezeichnung	Oberspannung [N/mm ²]	Schwingspielzahl bis zum Bruch	Prüfkraft [kN]
E_10_1	V02T08_6	400	675.177	1,79
E_10_2	V02T08_1	500	195.124	2,24
E_10_3	V02T08_8	600	97.454	2,69
E_10_4	V02T08_9	375	1.028.255	1,68
E_10_5	V02T08_3	650	62.209	2,91
E_10_6	V02T08_2	370	1.439.735	1,66
E_10_7	V02T08_5	365	1.556.093	1,64
E_10_8	V02T08_10	360	1.256.865	1,61
E_10_9	V02T08_7	355	10.000.000	1,59
E_10_10	V02T08_4	500	222.318	2,24

Tabelle 20: Versuchsergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche der Aktormodulgehäuse V02T18

Versuchsnummer	Probenbezeichnung	Oberspannung [N/mm ²]	Schwingspielzahl bis zum Bruch	Prüfkraft [kN]
E_20_1	V02T18_10	500	270.026	1,77
E_20_2	V02T18_2	600	164.296	2,13
E_20_3	V02T18_7	400	10.000.000	1,42
E_20_4	V02T18_3	700	189.184	2,48
E_20_5	V02T18_5	650	109.554	2,31
E_20_6	V02T18_8	450	532.262	1,60
E_20_7	V02T18_4	425	10.000.000	1,51
E_20_8	V02T18_1	450	805.090	1,60
E_20_9	V02T18_6	500	384.521	1,77
E_20_10	V02T18_9	500	352.071	1,77

Die Kennzeichnung der Proben in Abhängigkeit von der Bauposition ist in Kapitel 3.2.2 dargestellt.

4 Versuchsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen dargestellt, in Beziehung gesetzt und ausgewertet. Dabei wird insbesondere auf den Einfluss einer Oberflächennachbearbeitung und die Übertragbarkeit der Werkstoffkennwerte auf das Bauteil eingegangen. In den Wöhlerdiagrammen ist jeweils die Oberspannung logarithmisch über der ebenfalls logarithmisch skalierten Schwingspielzahl aufgetragen.

4.1.1 Auswertung der Probengeometrien-Versuche in Form von Wöhlerlinien

Allgemein verbreitet ist die Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen in Form von Wöhlerlinien, welche durch ihre Neigung k , einen Abknickpunkt bei σ_k und N_k sowie eine Angabe zur Streuung der Versuchsergebnisse festgelegt wird. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, ist eine statistisch abgesicherte Ermittlung von Vertrauensgrenzen erst ab einer Anzahl von sechs Versuchen auf fünf Spannungshorizonten möglich (Haibach 2006, S. 31). Zur Abschätzung der Streuung und eines zu erwartenden Streubandes ist eine Prüfung von drei gleichartigen Proben auf mindestens einem Spannungshorizont nach DIN 50 100 (1978, S. 6) ausreichend. In der gemeinsamen Auswertung der Versuchsreihen C_00 und C_10 sind im Zeitfestigkeitsbereich jeweils fünf gleichartige Proben auf einem Beanspruchungshorizont geprüft worden. Daraus lässt sich bei Annahme der Verteilungsfunktion ein Streuband ermitteln, das angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Schwingspielzahl auf dem jeweiligen Beanspruchungshorizont erreicht wird. Im Rahmen dieser Masterarbeit sind die Wöhlerlinien bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %, von 10 % sowie für 90 % ermittelt worden. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten sind, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, mittels Gauß'schem Wahrscheinlichkeitsnetz bestimmt worden, in dem sich die statistische Verteilung der Versuchspunkte je Horizont graphisch darstellen lässt. Die Überlebenswahrscheinlichkeit für die einzutragenden Versuchspunkte lässt sich nach der Formel von Rossow (1964, S. 146, 147) berechnen. Im Bereich nach dem Abknickpunkt erfolgt die Auswertung bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, angelehnt an die Auswertung zum Treppenstufenverfahren nach Hück (1981, S. 147-176). Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung des Stufenabstandes sowie der Belastung aller getesteten, gültigen Proben im Langzeitfestigkeitsbereich. Sie erfolgt jedoch unabhängig davon, ob die Probe gebrochen ist oder ob es sich um einen Durchläufer handelt. Als ungültige Versuche im Rahmen des Treppenstufenverfahrens sind erste Versuche auf Treppenstufen gewertet, die nur zu Beginn einmal belegt sind. Die Breite des Streubandes im

Langzeitfestigkeitsbereich ist nach dem Abknickpunkt als konstant übernommen worden. In Abbildung 61, Abbildung 62 und Abbildung 63 sind die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_00 und C_10 getrennt und in gemeinsamer Auswertung mit den jeweils berechneten Wöhlerlinien und Streubändern mit Pü von 10 %, 50 % und 90 % dargestellt. Die Probe auf dem Spannungshorizont $\sigma_0 = 160 \text{ N/mm}^2$ wird in der Berechnung nicht berücksichtigt, da es sich bei diesem Versuch um den ersten unbestätigten Wert des Treppenstufenvorgehens und damit einen niedrig angesetzten Durchläufer handelt. Die Belastung liegt dort deutlich unterhalb der erwarteten Schwingfestigkeit. Ebenfalls unberücksichtigt bei der Berechnung sind Proben im Kurzzeitfestigkeitsbereich unterhalb von $2 \cdot 10^4$ Schwingspielen, da die Wöhlerlinie im Bereich der statischen Festigkeit ebenfalls einen Abknickpunkt aufweist, der in dieser Masterarbeit jedoch nicht detailliert untersucht worden ist. In Abbildung 64 ist die Wöhlerlinie mit Streubändern der Versuchsreihe B_00 mit unbehandelten Proben im doppeltlogarithmischen Wöhlerdiagramm aufgetragen. Auf dem Belastungshorizont σ_0 von 500 N/mm^2 ist die Probe mit der geringsten Schwingspielzahl gemäß der Vorgehensweise nach Radaj, Vormwald (2007 S. 47) als Ausreißer gewertet.

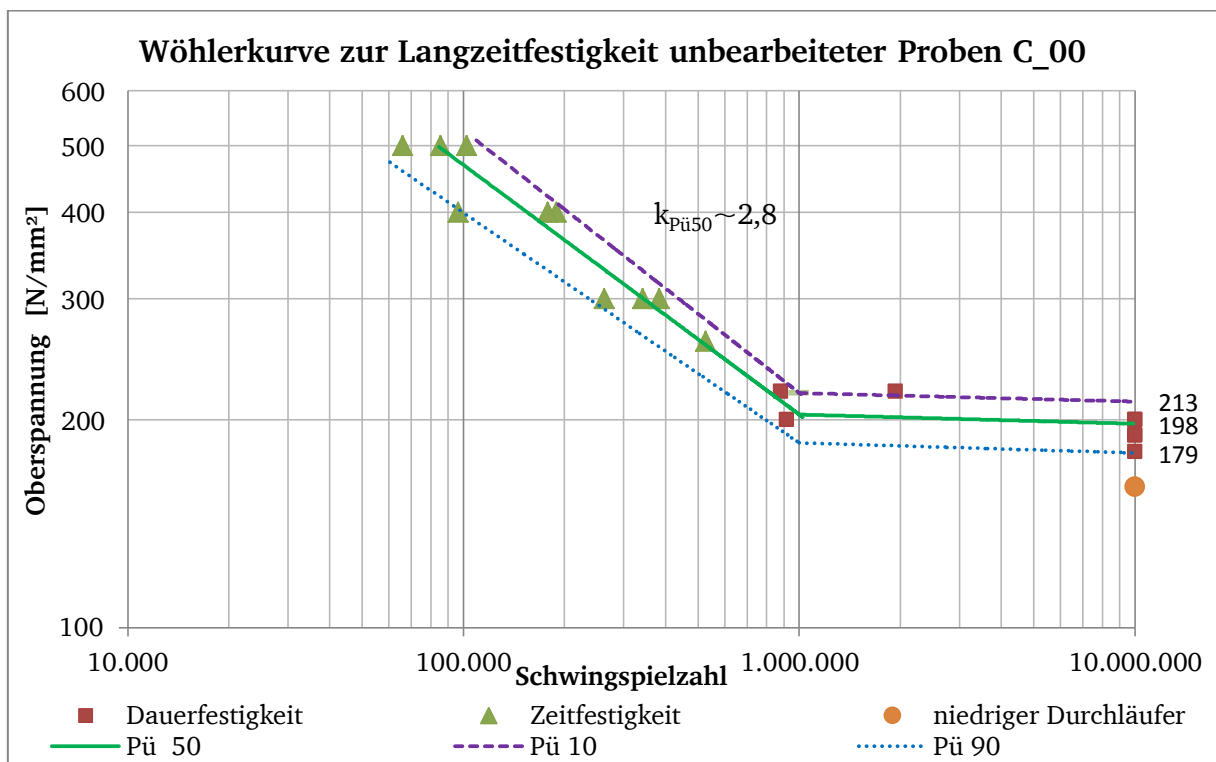


Abbildung 61: Darstellung der Wöhlerlinie für Versuchsreihe C_00 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

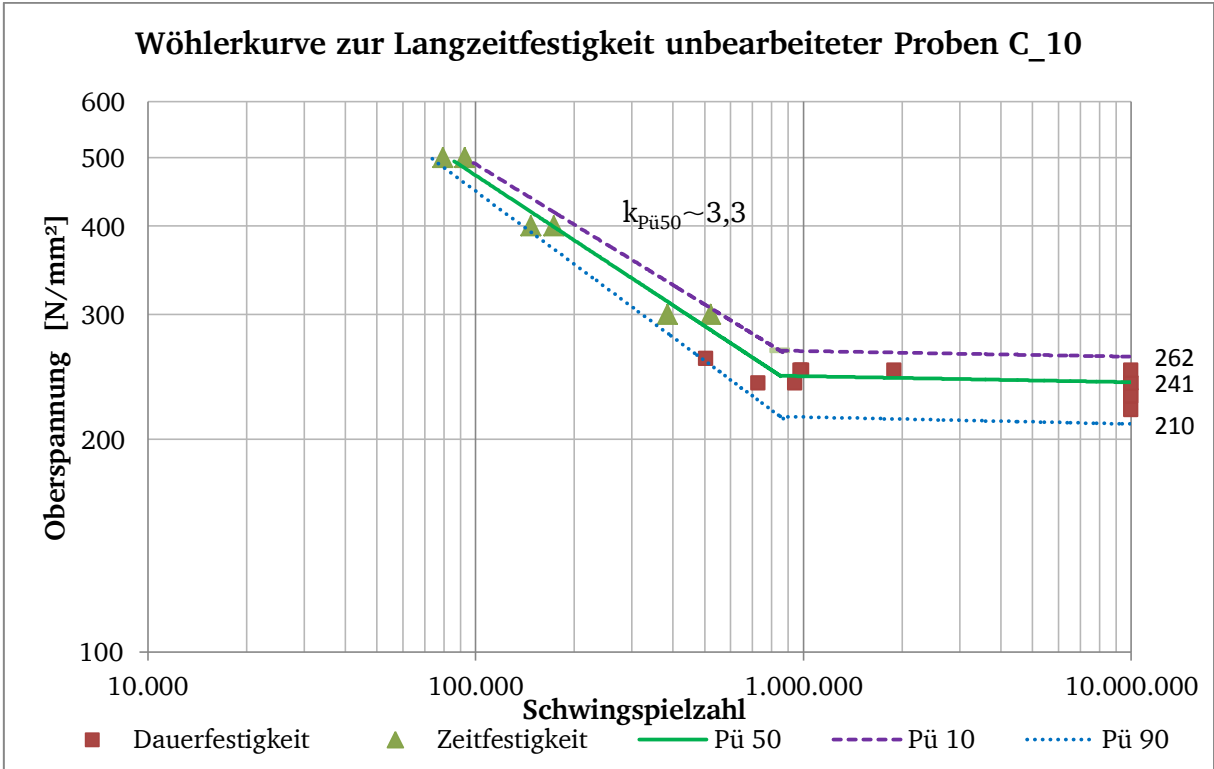


Abbildung 62: Darstellung der Wöhlerlinie der Versuchsreihe C_10 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

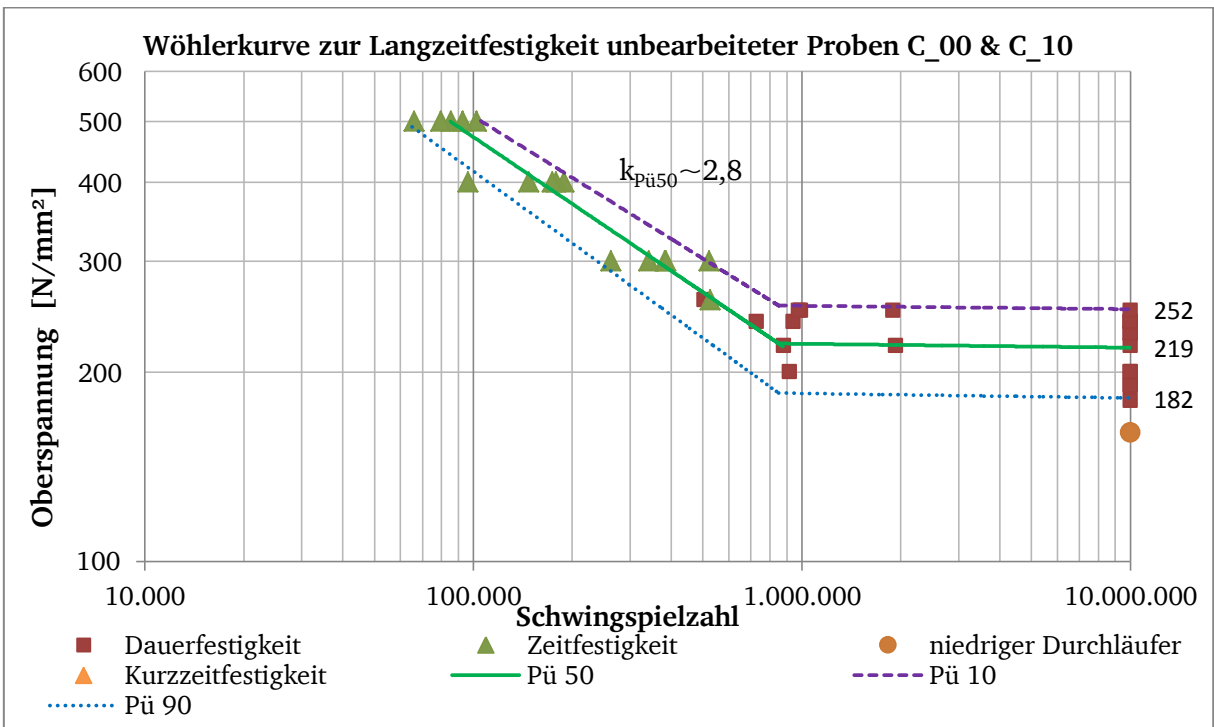


Abbildung 63: Darstellung der gemeinsamen Wöhlerlinie aus den Versuchsreihen C_00 und C_10 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

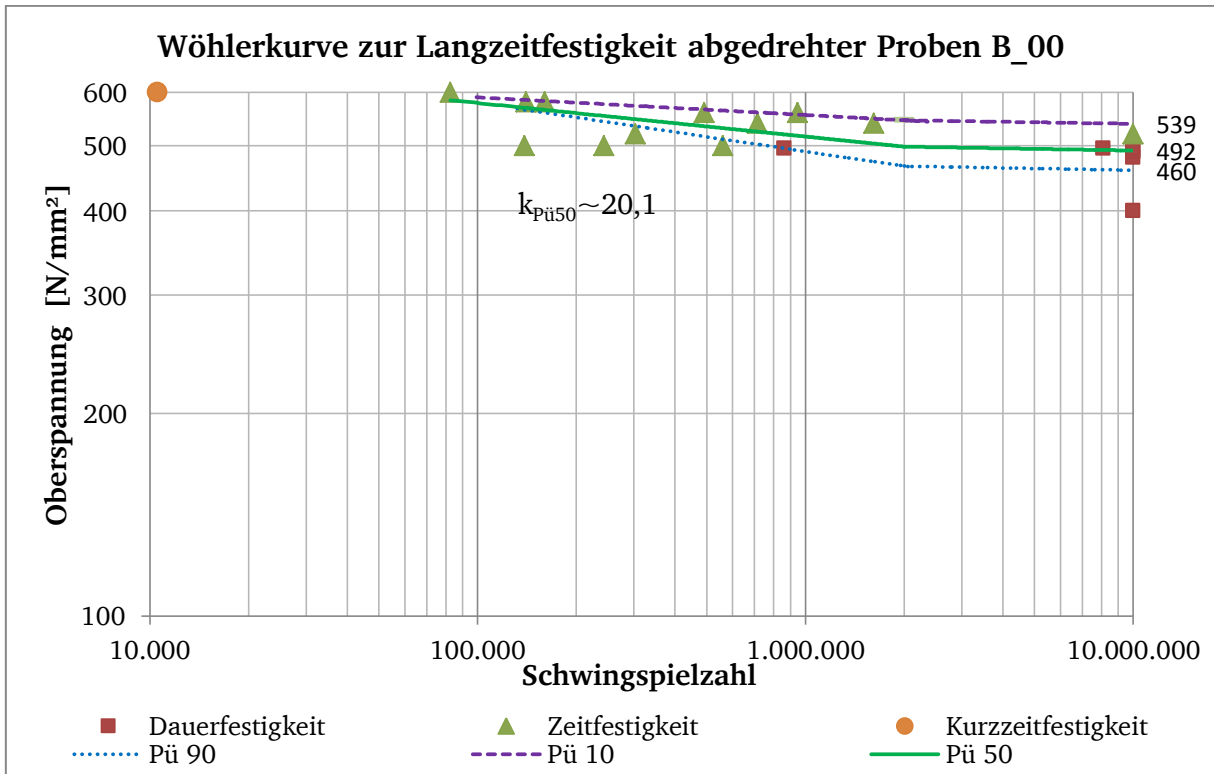


Abbildung 64: Darstellung der Wöhlerlinie unbearbeiteter Proben der Versuchsreihe B_00 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

Die Auswertung beider Versuchsreihen der unbearbeiteten Proben in einer gemeinsamen Wöhlerlinie mit einer einheitlichen Neigung und einem gemeinsamen Streuband lässt sich dadurch begründen, dass während der SLM-Herstellung zwischen den Chargen keine Änderung der Fertigungsparameter vorgenommen worden ist und die Proben, wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben, auch im Gefüge und der Härte keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die Streuspanne aller unbearbeiteten Proben in vertikale Richtung liegt im Bereich des Abknickpunktes beziehungsweise bei 10^7 Schwingspielen bei 1,2 und damit im Bereich von Gusswerkstoffen (Sonsino 1995, S. 3). In Tabelle 21 sind die Parameter der Wöhlerlinie mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % der unbearbeiteten und spanend nachbearbeiteten Proben gegenübergestellt. Die Neigung der Wöhlerlinie im Bereich der Zeitfestigkeit wird folgendermaßen ermittelt:

$$(21) \quad k = \frac{\log(N_{\text{Abknickpunkt}}) - \log(N_{10.000})}{\log(\sigma_{N=\text{Abknickpunkt}}) - \log(\sigma_{N=10.000})}$$

Die Streuspanne T ist nach folgender Formel (22) berechnet. Unter der in der Tabelle aufgeführten mittleren Streuspanne ist das arithmetische Mittel der Streuspannen aller Belastungshorizonte zu verstehen. Die vertikale Streuung im Bereich der Langzeitfestigkeit ist nach Formel (23) berechnet.

$$(22) T_{Streu} = \frac{N_{P\ddot{u}=90\%}}{N_{P\ddot{u}=10\%}}$$

$$(23) T_{vertikal} = \frac{\sigma_{P\ddot{u}=90\%,N=10^7}}{\sigma_{N_{P\ddot{u}=10\%,N=10^7}}}$$

Tabelle 21: Statistische Auswertung der ermittelten Wöhlerlinien der SLM-Proben

Kennwert der Wöhlerlinie	C_00 (unbehandelt)	C_10 (unbehandelt)	C_00 und C_10 (unbehandelt)	B_00 (nach- bearbeitet)
Neigung im Zeitfestigkeitsbereich	2,76	3,28	2,84	20,05
Lage des Abknickpunktes (Schwingspielzahl N_k und Belastung σ_0)	1.000.000 204 N/mm ²	850.000 246 N/mm ²	850.000 222 N/mm ²	2.000.000 498 N/mm ²
Schwingfestigkeit σ_0 bei 10^7 Schwing- spielen für Pü 50 %	198 N/mm ²	241 N/mm ²	219 N/mm ²	492 N/mm ²
Anzahl der Proben	19	20	39	20
Streuspanne $T_{Streu,mittel}$	2,1	1,49	1,93	2,61
vertikale Streu- spanne $T_{vertikal}$ bei 10^7 Schwingspielen	1,19	1,24	1,38	1,17
Anzahl der Durchläufer	6	7	13	6
Verhältnis Schwingfestigkeit $\sigma_{0,10^7} / \text{Zugfestigkeit}$ $R_m = 981 \text{ N/mm}^2$)	0,20	0,25	0,22	0,50

Die Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten aus dem quasistatischen Zugversuch zu den Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen in Tabelle 21 zeigt, dass die Langzeitfestigkeit

von Proben mit nachbearbeiteter Oberfläche bei 0,5-facher Zugfestigkeit liegt. Die Langzeitfestigkeit von SLM-Proben mit unbehauelter Oberfläche liegt hingegen nur im Bereich der 0,22-fachen Zugfestigkeit. Diese Ergebnisse stimmen mit den aus der Literatur bekannten und im Stand der Technik in Tabelle 5 angegebenen Verhältnissen überein.

4.1.2 Auswertung zur Ermittlung des Oberflächeneinflusses auf die Schwingfestigkeit von Probengeometrien

In diesem Unterkapitel erfolgt die Analyse der Versuchsergebnisse mittels der erstellten Wöhlerlinien der Probengeometrien. Insbesondere der Vergleich der Wöhlerlinien von unbehauelten und nachbearbeiteten Proben ist von Interesse. Wie in Tabelle 21 und in den Diagrammen in Kapitel 4.1.1 zu erkennen ist, verläuft die Wöhlerlinie der nachbearbeiteten Proben im Zeitfestigkeitsbereich wesentlich flacher als bei den unbehauelten Proben. Der Abknickpunkt der gemeinsamen Wöhlerlinie der unbehauelten Proben liegt bei einer Schwingspielzahl N_k von $8,5 \cdot 10^5$ und einer Belastung $\sigma_{0,k}$ von 222 N/mm^2 während der Abknickpunkt der nachbearbeiteten Proben bei einer Schwingspielzahl N_k von $2 \cdot 10^6$ und einer signifikant höheren Belastung $\sigma_{0,k}$ von 498 N/mm^2 liegt. In Abbildung 65 sind die Versuchsergebnisse und die Wöhlerlinien mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % aller Probengeometrien eingezeichnet.

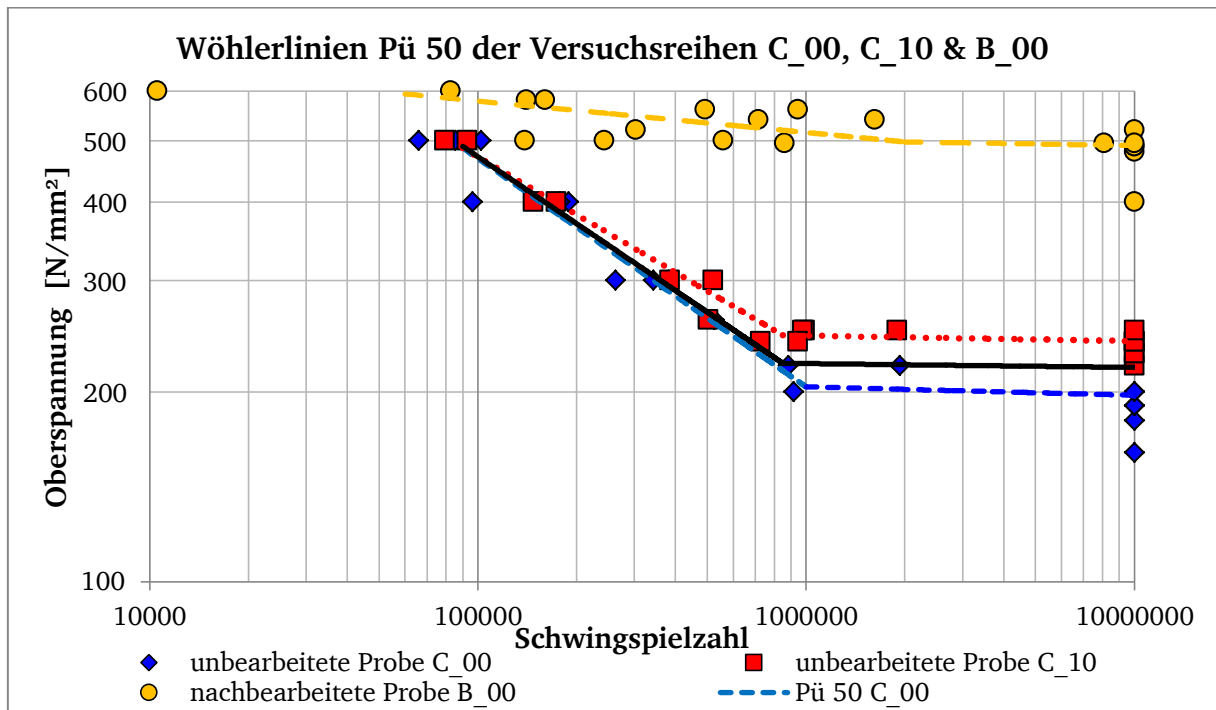


Abbildung 65: Wöhlerlinie unbearbeiteter und nachbearbeiteter Proben

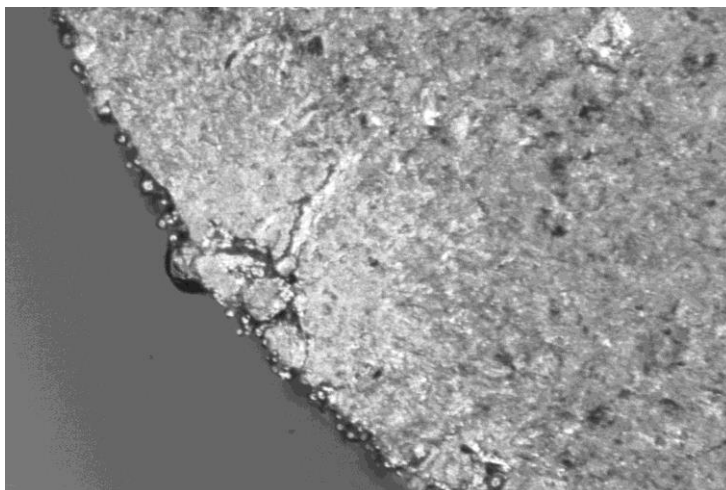
Wie in Abbildung 65 zu erkennen ist, weist die 50 %-Wöhlerlinie der ersten Charge C_00 bei 10^7 Schwingspielen im Vergleich zur 50 %-Wöhlerlinie der zweiten Charge C_10 eine um 43 N/mm^2 höhere Schwingfestigkeit auf. Eine signifikante Abweichung der Belastungen bei der Versuchsreihe C_10 oberhalb von C_00 tritt jedoch erst ab einer Schwingspielzahl N von $9 \cdot 10^5$ auf. Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse ist zu erkennen, dass es sich bei der ersten Charge bis auf einen Ausreißer bei $\sigma_0 = 200 \text{ N/mm}^2$ bei allen Proben unterhalb von $\sigma_0 = 220 \text{ N/mm}^2$ um Durchläufer, das heißt Prüfkörper ohne Bruch bei 10^7 Schwingspielen, handelt. Diese Durchläufer zeigen zwar, dass die Proben unterhalb diesem Spannungshorizont der Belastung standhalten, geben jedoch keinen weiteren Aufschluss über das Versagensverhalten, die Bruchursache oder sogar den Spannungsgrenzwert im Übergangsbereich von Zeitfestigkeit zu Langzeitfestigkeit. Auf dem Belastungshorizont von $\sigma_0 = 240 \text{ N/mm}^2$ und damit dem Wert der Schwingfestigkeit der zweiten Charge, die sowohl zum Bruch als auch zu Durchläufen führt, sind keine Proben der ersten Charge geprüft worden. Da bei der Probenherstellung keine Änderung der Herstellungsparameter vorgenommen worden ist, die Gefüge- und Härteanalyse keine signifikanten Unterschiede aufweist (siehe Kapitel 4.1.4) sowie die Streuung nach dem Abknickpunkt für beide Versuchsreihen un behandelter Proben bei 1,38 liegt, wird die gemeinsame Auswertung beider Chargen in den folgenden Analysen dieser Masterarbeit genutzt. Außerdem zeigt dieser Vergleich in Kombination mit den oben genannten Erkenntnissen, dass die Proben in unterschiedlichen Chargen reproduzierbar ohne signifikanten Einfluss auf die Langzeitfestigkeit hergestellt werden können. Die mittlere Streubreite im Zeitfestigkeitsbereich $T_{\text{Streu, mittel}}$ aller Versuchsreihen liegt zwischen 1,49 und 2,61. Die vertikale Streuung bei 10^7 Schwingspielen T_{vertikal} ist kleiner als 1,38 und liegt damit im Bereich von Gusswerkstoffen. Die ermittelten Schwingfestigkeiten bei einer Schwingspielzahl von 10^7 werden bei un behandelten Proben mit $\sigma_0 = 219 \text{ N/mm}^2$ angegeben. Für abgedrehte Proben liegt die ertragbare Belastung bei 10^7 Schwingspielen deutlich oberhalb des doppelten Wertes bei $\sigma_0 = 492 \text{ N/mm}^2$.

Bei der Versuchsreihe der abgedrehten Proben fällt auf, dass auf dem Spannungsniveau von $\sigma_0 = 500 \text{ N/mm}^2$ zwei Proben bei im Vergleich zur 50%-Wöhlerlinie signifikant niedrigeren Schwingspielzahlen gebrochen sind und die Streubreite nahezu eine Dekade beträgt. Die Streubreite der Versuchsergebnisse liegt auch auf den Spannungshorizonten von $\sigma_0 = 520 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_0 = 495 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_0 = 600 \text{ N/mm}^2$ in der Größenordnung einer Dekade. Bei einer geringen Probenzahl von drei Proben auf einem Spannungshorizont liegt die Streuung der Proben auf dem Spannungsniveau von $\sigma_0 = 500 \text{ N/mm}^2$ bei flacher

Wöhlerlinie im statistisch möglichen Bereich. Für die Auswertung der Streubänder wird die Probe mit der geringsten Schwingspielzahl auf dem Spannungshorizont von $\sigma_0 = 500 \text{ N/mm}^2$ gemäß der Vorgehensweise nach Radaj, Vormwald (2007 S. 47) als Ausreißer gewertet.

4.1.3 Auswertung der Bruchbeschaffenheit der Probengeometrien

Wie im Diagramm in Abbildung 65 zu erkennen ist, erreichen abgedrehte Proben mehr als doppelte Schwingfestigkeit bei 10^7 Zyklen im Vergleich zu unbehandelte Proben. Aufgrund der hohen Dichte (siehe Kapitel 3.2.4) und damit vernachlässigbaren Inhomogenität innerhalb der Probe wird der Bruchausgang an der Oberfläche der Probe erwartet und ist damit von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Optische Untersuchungen aller Bruchflächen bestätigen, dass der Bruchausgang bei den unbehandelten Proben von der Oberfläche ausgeht. In Abbildung 66 ist beispielsweise zu sehen, dass der Bruchausgang an der Stelle zu finden ist, wo an der Oberfläche ein größeres Partikel angeschmolzen ist.



200 μm |——|

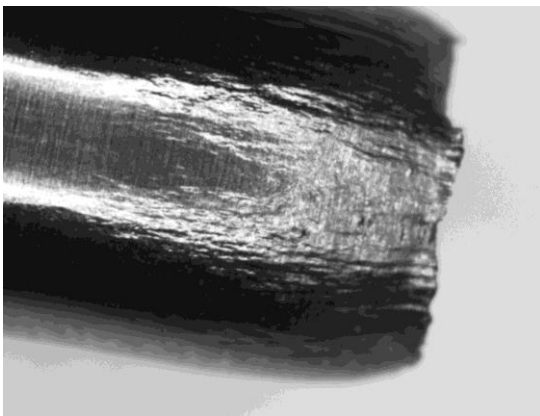
Abbildung 66: Bruchausgang der Probe C_00_13 (oben) ($N = 1.932.924$, $\sigma_0 = 220 \text{ N/mm}^2$)

Bei den nachbearbeiteten Proben und den unbehandelten Proben im Zeitfestigkeitsbereich tritt vor dem Bruch eine Längung der Probe auf. Dies ist bei den unbehandelten Proben im Langzeitfestigkeitsbereich, bei denen wesentlich niedrigere Belastungen aufgrund der Rissinitiierung durch die Oberflächenrauigkeit zum Bruch führen, nicht zu beobachten. Bei den unbehandelten Proben im Zeitfestigkeitsbereich bei einer Belastung oberhalb von $\sigma_0 = 300 \text{ N/mm}^2$ treten mit steigender Dehnung multiple Risse im Prüfbereich auf (siehe Abbildung 67). Diese treten bei den abgedrehten Proben nur vereinzelt auf dem Spannungshorizont von $\sigma_0 = 600 \text{ N/mm}^2$ auf. Unterhalb dieser Belastung erfolgt eine

gleichmäßig in Abbildung 68 dargestellte plastische Dehnung. Die multiplen Anrisse der unbehandelten Proben sind ebenfalls in den Aufnahmen der Bruchfläche, wie in Abbildung 69 dargestellt, zu erkennen.

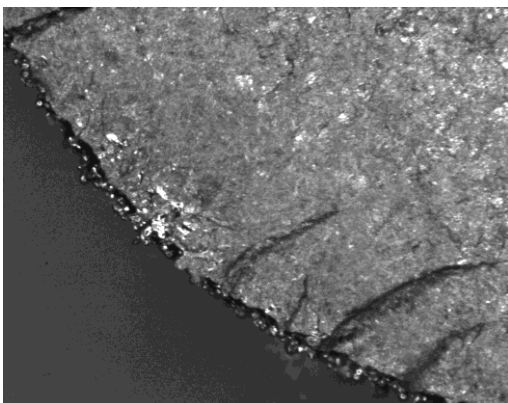


Abbildung 67: Probe C_10_5 gebrochen mit Oberflächenrissen ($N=173.644$, $\sigma_0 = 400 \text{ N/mm}^2$)



1 mm |—|

Abbildung 68: Obere Bruchkante der gedehnten Probe B_00_4 ($N = 139.007$, $\sigma_0 = 500 \text{ N/mm}^2$)



200 μm |—|

Abbildung 69: Untere Bruchfläche mit Bruchausgang der Probe C_10_4 ($N = 92.823$, $\sigma_0 = 500 \text{ N/mm}^2$)

Der Ausgang des Bruches liegt auch bei den abgedrehten Proben an der Oberfläche beziehungsweise in Oberflächennähe. Auf den Einfluss der Randzone durch das Abdrehen

wird in Kapitel 4.1.4 näher eingegangen. In Abbildung 70 ist die Bruchfläche der abgedrehten Probe sowie der zugehörige, vergrößerte Bruchausgang zu sehen.

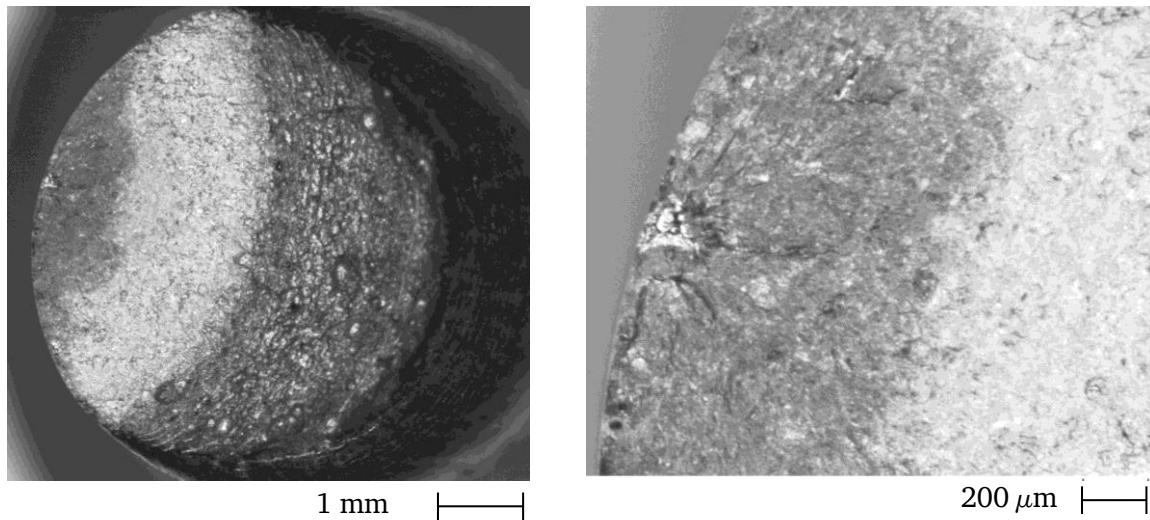


Abbildung 70: Untere Bruchfläche (links) und zugehöriger Bruchausgang (rechts) der Probe B_00_9 ($N = 860.739$, $\sigma_0 = 495 \text{ N/mm}^2$)

Nur die abgedrehten Probe B_00_14 ist im Bereich der Langzeitfestigkeit oberhalb von $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen bei einer Schwingspielzahl von 8.092.655 auf einem Belastungshorizont von $\sigma_0 = 495 \text{ N/mm}^2$ gebrochen. Der Bruchausgang ist bei dieser Probe im Gegensatz zu allen anderen Bruchausgängen im Inneren zu finden. Die Bruchfläche der Probe ist in Abbildung 71 dargestellt. Rissbildung durch innere Fehlstellen wird, wie bereits von Wang (2011, S. 548-550) beschrieben, erst bei Zykluszahlen im Bereich von 10^7 zum dominierenden Einfluss auf die Lebensdauer.

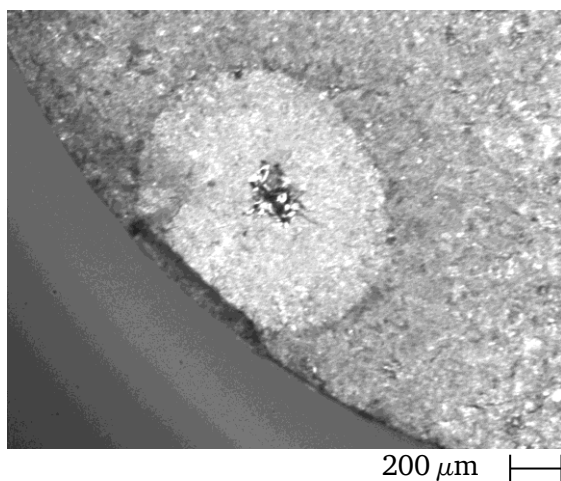
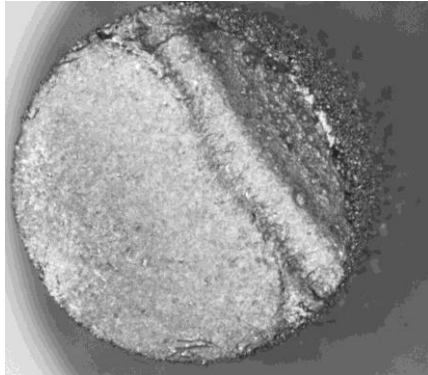


Abbildung 71: Bruchausgang der Probe B_00_14 (unten) ($N = 8.092.655$, $\sigma_0 = 495 \text{ N/mm}^2$)

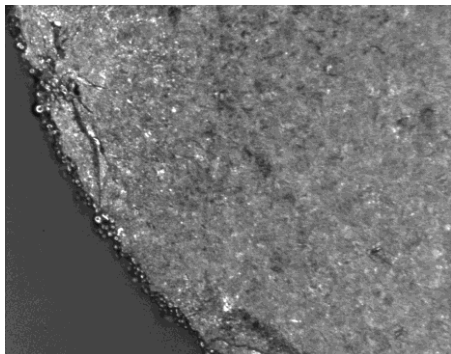
Die Gewaltbruchzone bei den unbehandelten Proben im Langzeitfestigkeitsbereich ist gerade (siehe Abbildung 72) und bei den nachbearbeiteten Proben halbkreisförmig geformt (siehe Abbildung 70). Dies ist auf die höhere Belastung im Bereich der Streckgrenze und der daraus resultierenden Längung der Probe zurückzuführen. Unbehandelte Proben bei Belastung im Bereich der Streckgrenze weisen ebenfalls halbkreisförmige Gewaltbruchzonen auf.



1 mm |—|

Abbildung 72: Obere Bruchfläche der Probe C_00_8 ($N = 916.984$, $\sigma_0 = 200 \text{ N/mm}^2$)

Die Sortierung aller Bruchflächenaufnahmen nach der Belastung befindet sich im Anhang in Tabelle 25 sowie Tabelle 26 und zeigt qualitativ, dass die Schwingbruchfläche mit abnehmender Belastung und zunehmender Schwingspielzahl zunimmt. Dieses Verhalten tritt auch bei konventionell gefertigten Proben auf. Bei den unbehandelten Proben treten bei Belastungshorizonten unterhalb von $\sigma_0 = 250 \text{ N/mm}^2$, wie in Abbildung 73 zu sehen, zusätzlich Querrisse am Bruchausgang auf. Ursache dafür ist eine langsame Einschnürung.



200 μm |—|

Abbildung 73: Obere Bruchfläche der Probe C_10_20 ($N = 943.036$, $\sigma_0 = 240 \text{ N/mm}^2$)

4.1.4 Auswertung des Nachbehandlungseinflusses auf Probengeometrien

Abgedrehte Proben erreichen im Vergleich zu unbehandelte Proben mehr als doppelte Schwingfestigkeit bei 10^7 Belastungszyklen. Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, befindet sich

der Bruchausgang im Zeitfestigkeitsbereich und im Übergangsbereich zur Langzeitfestigkeit bei allen Proben an der Oberfläche. Die Höhe der maximalen Belastung des Werkstoffes ist folglich abhängig von der Beschaffenheit der Probenrandzone. Eine Veränderung der Randzone durch Abdrehen würde daher auch die Schwingfestigkeit des SLM-Werkstoffes beeinflussen. Härtemessung (siehe Abbildung 74) zeigen, dass alle Proben eine Härte von 202 ± 16 HBW aufweisen und kein signifikanter Unterschied zwischen abgedrehten und unbelasteten Proben zu erkennen ist. Es sind jeweils fünf Messungen mit einer Prüfkraft von 187,5 kgf an den Proben jeder Versuchsreihe, sowie an einer unbelasteten, unbelasteten Probe der ersten Charge durchgeführt worden.

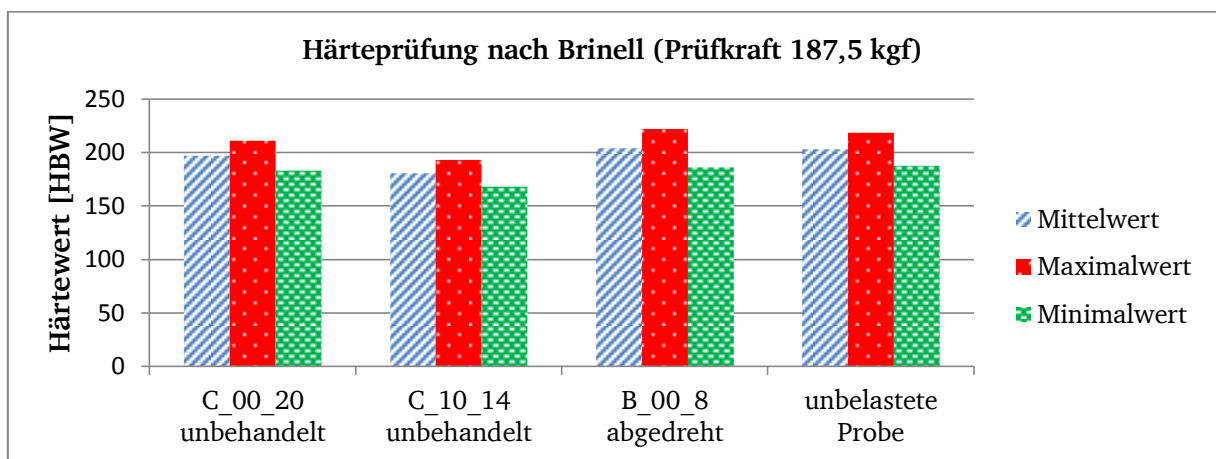


Abbildung 74: Härteprüfung der Probengeometrien

Des Weiteren ist eine Gefügeuntersuchung anhand von Proben-Schliffen, welche durch Farbmittelätzung nach Lichenegger-Bloech vorbereitet wurden, durchgeführt worden. Ein Vergleich der Querschliffbilder einer unbelasteten und einer abgedrehten Probe in Abbildung 75 zeigt, dass das Gefüge in der Randzone gleichartig ausgebildet ist.

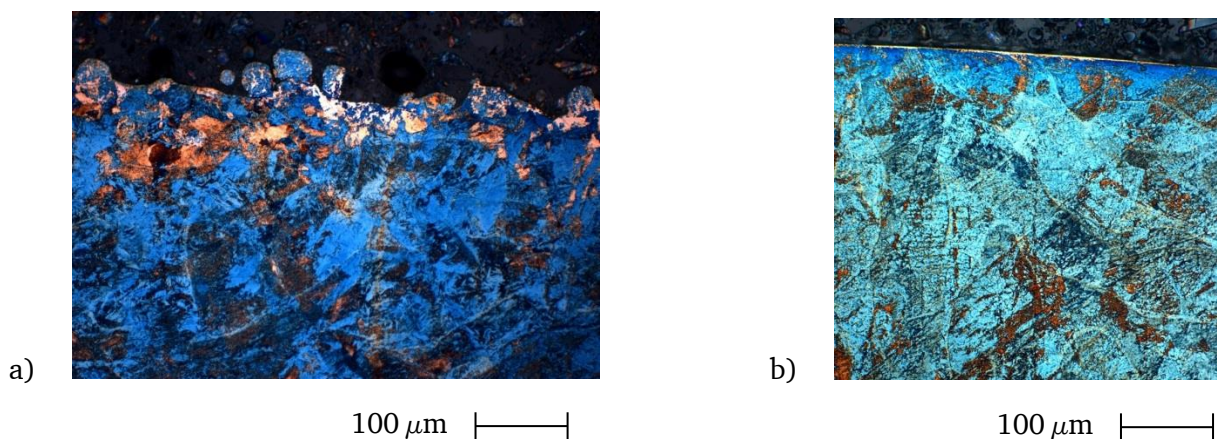


Abbildung 75: a) Querschliffbild unbelastete Probe C_10_14 ($N = 10^7$, $\sigma_0 = 240$ N/mm²)
 b) Querschliffbild abgedrehte Probe B_00_8 ($N = 10^7$, $\sigma_0 = 490$ N/mm²)

Die Nachbehandlung durch Abdrehen hat folglich keinen Einfluss auf das Gefüge und die Härte der Randzone. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben, zeigen die Schlibfbilder jedoch die Unterschiede in der Randzone bezüglich der Oberflächenrauigkeit.

Das Längsschliffbild in Abbildung 76 zeigt, dass die unbehandelte Probe nach 10^7 Schwingspielen keine inneren Risse aufweist. Außerdem sind in den Längsschliffbildern die einzelnen Schichten der SLM-Herstellung ohne Fehlstellen durch Poren zu erkennen.

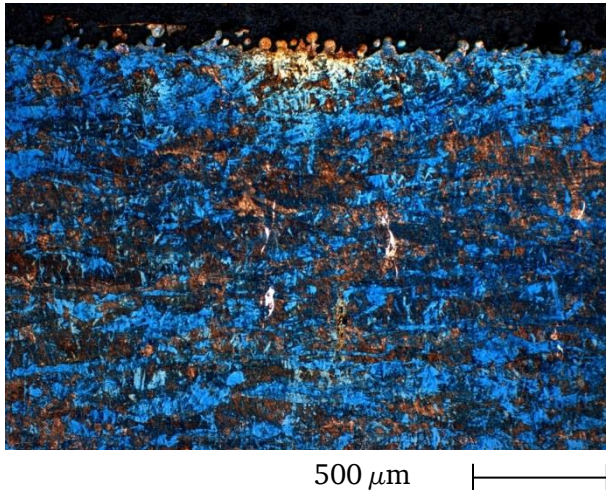


Abbildung 76: Längsschliffbild unbehandelte Probe C_10_14 ($N = 10^7$, $\sigma_o = 240 \text{ N/mm}^2$)

Die Gegenüberstellung der Längsschliffbilder einer unbehandelten Proben der ersten Charge, einer unbehandelten Probe der zweiten Charge und einer unbehandelten, unbelasteten Probe in Abbildung 77 zeigt ebenfalls, dass in der Randzone keine signifikanten Unterschiede zwischen den Proben zu erkennen sind und daher die Versuchsergebnisse der beiden Chargen gemeinsam ausgewertet werden können (siehe Kapitel 4.1.1).

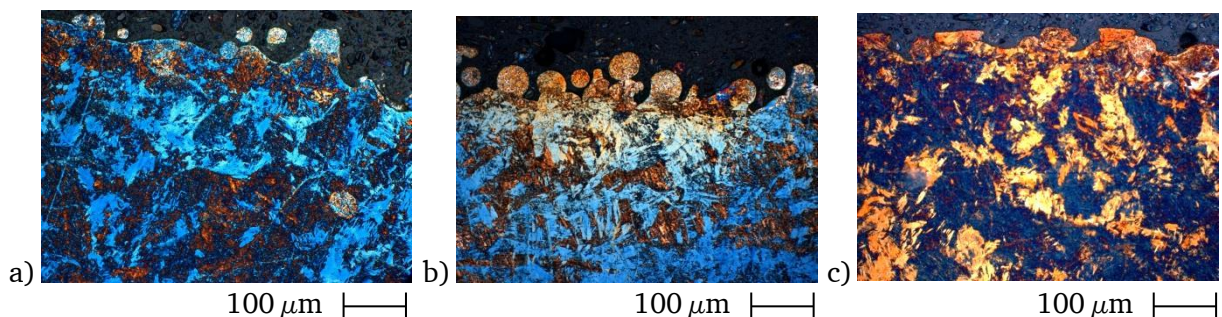


Abbildung 77: a) Längsschliffbild unbehandelte, unbelasteter Probe
b) Längsschliffbild unbehandelte Probe C_10_14 ($N = 10^7$, $\sigma_o = 240 \text{ N/mm}^2$)
c) Längsschliffbild unbehandelte Probe C_00_20 ($N = 10^7$, $\sigma_o = 200 \text{ N/mm}^2$)

4.1.5 Auswertung weiterer Einflüsse auf die Schwingfestigkeit der Probengeometrien

Im folgenden Kapitel sind weitere mögliche Einflüsse auf die Schwingfestigkeit untersucht worden. Für die Untersuchung des Einflusses der Herstellungsposition auf der Bauplattform ist der Bereich in dem Proben gefertigt worden sind in neun Teile, wie in nachfolgender Abbildung 78 dargestellt, aufgeteilt worden.

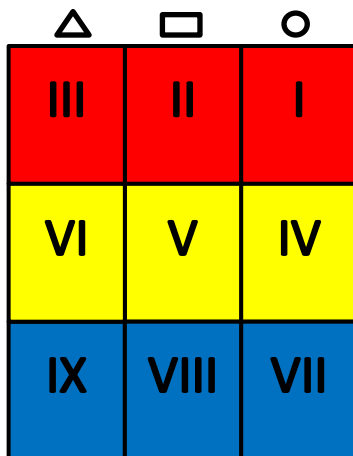


Abbildung 78: Aufteilung der Bauplattform in Herstellungskvadranten (Beschichtung beginnt bei Kvadranten I, IV, VII)

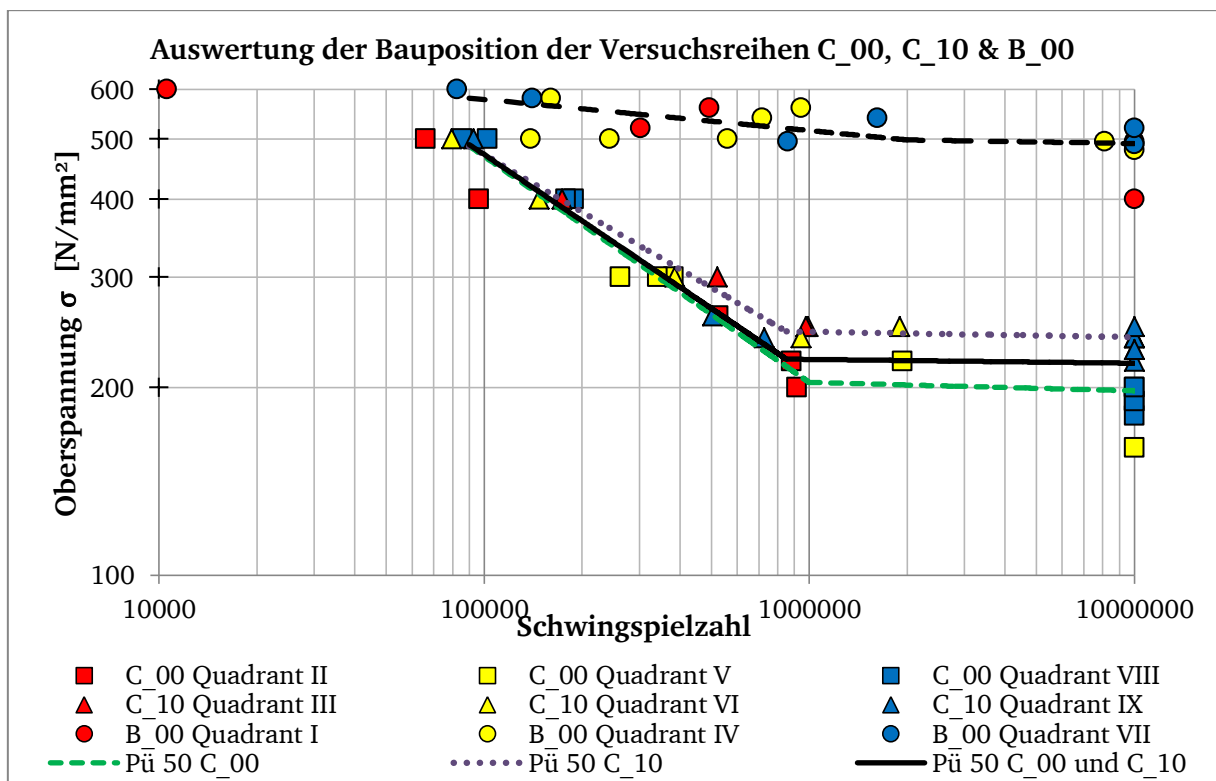


Abbildung 79: Wöhlerdiagramm zur Darstellung der Abhängigkeit von Herstellungsposition zur Schwingspielzahl bei Probengeometrien

Die Proben der Versuchsreihe C_00 sind in den Bereichen II, IV und VIII, die Proben der Versuchsreihe C_10 in den Bereichen III, VI, IX und die unbehandelten Proben B_00 in den Bereichen I, IV und VII gefertigt worden. Wie in Abbildung 79 zu sehen ist, zeigt die geringe Änderung der Herstellungsposition auf der Bauplattform keinen reproduzierbaren Einfluss auf die Schwingfestigkeit.

Neben der Bauposition ist die Bruchlage im Prüfbereich der einzelnen Proben untersucht worden. In Abbildung 80 ist die Benennung der einzelnen Bruchlagen dargestellt.

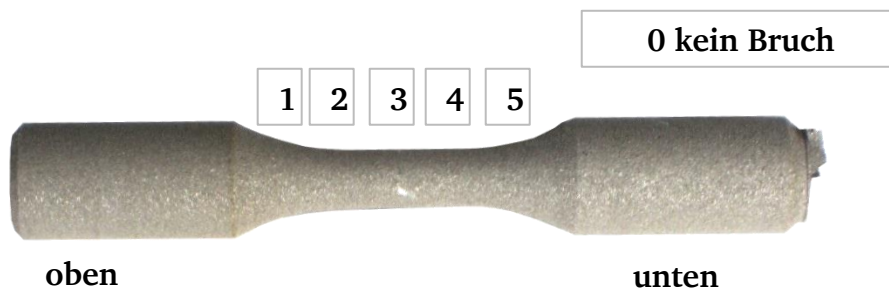


Abbildung 80: Benennung der einzelnen Bruchstellen anhand einer unbehandelten Probe

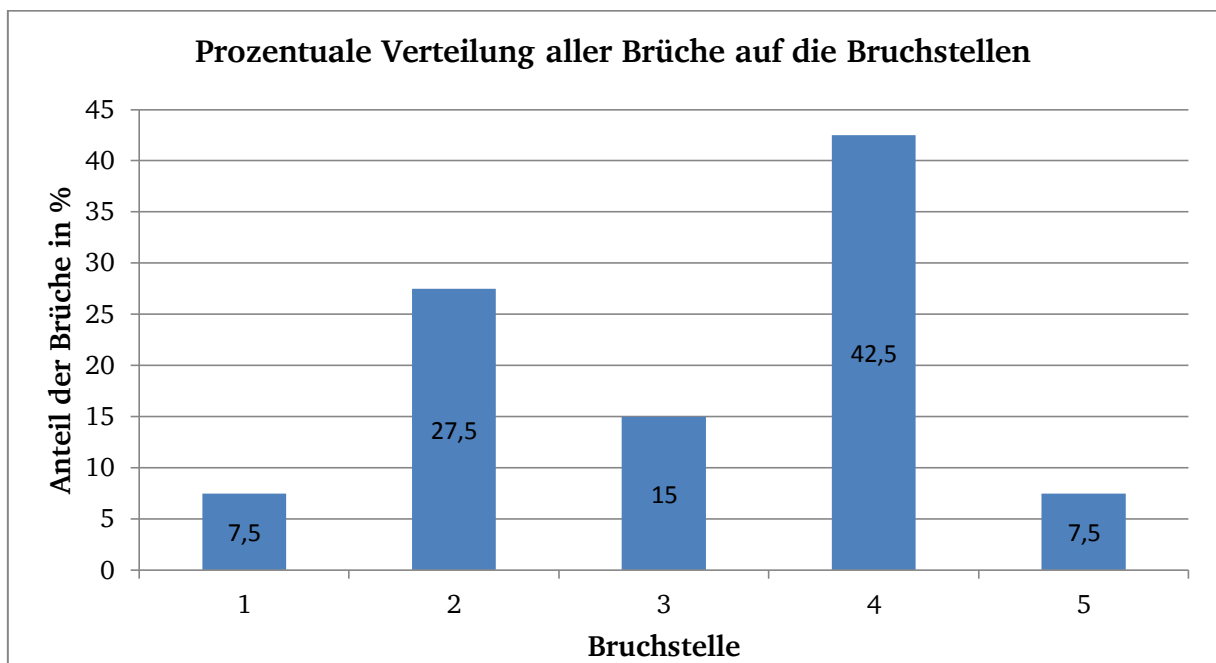


Abbildung 81: Verteilung der Bruchlagen über alle gebrochenen Proben

In Abbildung 81 ist zu erkennen, dass die Proben mit einer Wahrscheinlichkeit von 42,5 % unterhalb der Mitte des Prüfbereiches brechen. Brüche am oberen und am unteren Ende des

Prüfbereiches treten mit 7,5 % Bruchwahrscheinlichkeit in geringerer Anzahl auf. Die Bruchlage ist dabei zum einen abhängig von der Position der für den Bruch relevanten Inhomogenität und zum anderen von einer Verfestigung der Probe während des Schwingfestigkeitsversuches.

Die Auswertung der in der Versuchsreihe C_10 gemessenen minimalen Durchmesser, der sich aus dem gemessenen Durchmesser abzüglich des zweifachen R_z -Wertes berechnet, zeigt, dass bei der Darstellung im Wöhlernetz (siehe Abbildung 82) keine signifikanten Abweichungen auftreten. Die Abweichungen in der Belastung liegen bei maximal $8,2 \text{ N/mm}^2$. Aufgrund des Prüfbereiches von 11 mm Länge, liegt die maximale Differenz der minimalen Durchmesser bei $0,05 \text{ mm}$, so dass diese Abweichung für die weitere Diskussion der Ergebnisse vernachlässigt werden kann.

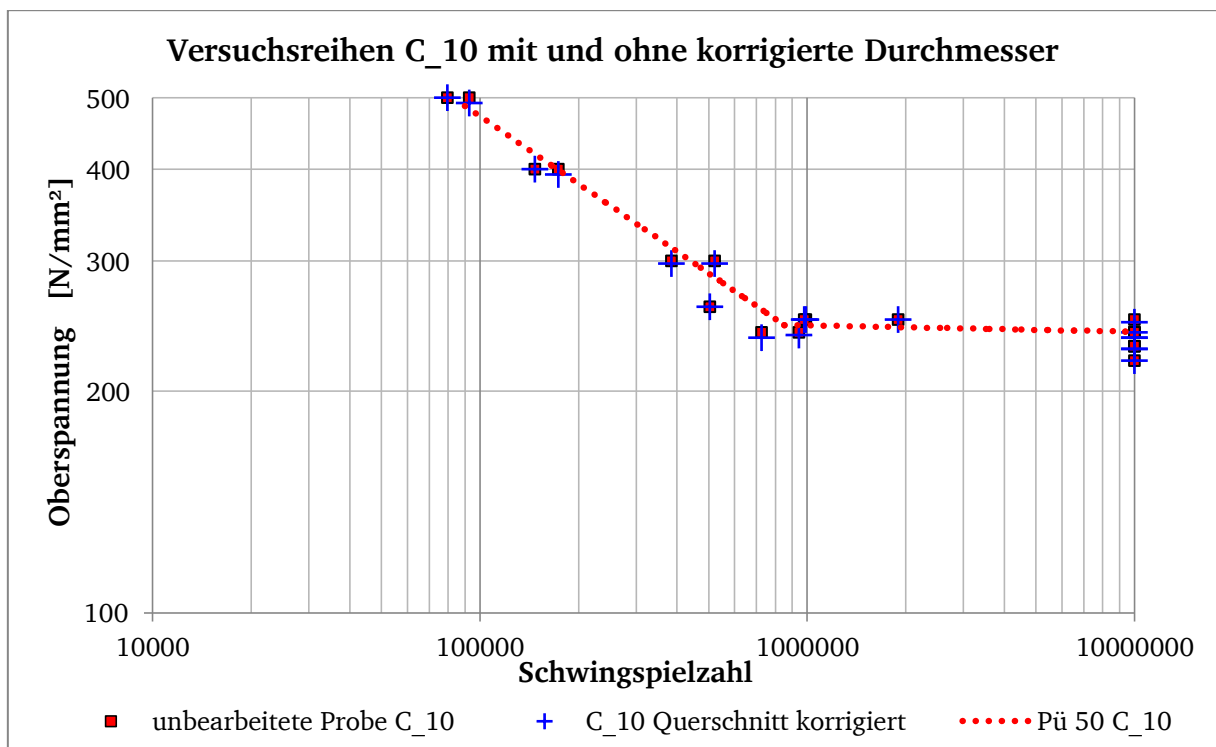


Abbildung 82: Versuchsergebnisse der Versuchsreihe C_10 mit und ohne korrigierte Durchmesser

4.1.6 Auswertung der Aktormodulgehäuse-Versuche in Form von Wöhlerlinien

Für die Prüfung der Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse sind zwei Geometrien ausgewählt worden, deren maximal erwartete lokale Spannung im Betrieb nach der Simulation 213 N/mm^2 betragen sowie eine weitere Geometrie mit einer erwarteten Vergleichsspannung von 182 N/mm^2 . Die in Abbildung 86 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass die experimentell ermittelte Schwingfestigkeiten bei 10^7 Belastungszyklen der Aktormodulgehäuse signifikant oberhalb der Schwingfestigkeit unbehandelter SLM-Proben von $\sigma_0 = 219 \text{ N/mm}^2$ liegen. Die Prüfkraft ist entsprechend Formel (20) in Kapitel 3.2.5 ausgehend von den Ergebnissen des Simulationsmodells berechnet worden, das heißt die dargestellte Oberspannung basiert auf dem Ergebnis des Simulationsmodells und der experimentell eingesetzten Prüfkraft.

In den folgenden Diagrammen in Abbildung 83, Abbildung 84 und Abbildung 85 sind die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche der drei Varianten der Aktormodulgehäuse, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, in Form von berechneten Wöhlerlinien und Streubändern mit P_u von 10 %, 50 % und 90 % ausgewertet worden. Eine statistisch abgesicherte Ermittlung von Vertrauensgrenzen ist jedoch erst ab einer Anzahl von sechs Versuchen auf fünf Spannungshorizonten möglich (Haibach 2006, S. 31). Die Gehäuse auf unbestätigten Spannungshorizonten des Treppenstufenverfahrens und damit zu niedrig angesetzte Durchläufer werden in der Berechnung nicht berücksichtigt. Die Belastung liegt dort deutlich unterhalb der erwarteten Schwingfestigkeit. Das Gehäuse mit der Kennzeichnung V02T05_25, welches auf dem Belastungshorizont σ_0 von 450 N/mm^2 geprüft worden ist, wurde aufgrund eines Risses an einer sichtbaren Defektstelle am Gehäuse nicht in der Berechnung berücksichtigt.

Alle Wöhlerlinien der Aktormodulgehäuse weisen einen Abknickpunkt im Bereich von $N_k = 7,5 \cdot 10^5$ bis 10^6 Schwingspielen auf, nach dem die Wöhlerlinie signifikant flacher verläuft. Die mittlere Streuspanne liegt bei allen Aktormodulgehäusen unterhalb von 1,63. Bei der vertikalen Streuung liegt der Maximalwert bei den Gehäusen des Typs V02T18 bei 1,19. Die Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 sind bei einer Oberspannung σ_0 von 343 N/mm^2 langzeitfest. Für die Gehäuse des Typs V02T08 liegt dieser Wert bei $\sigma_0 = 355 \text{ N/mm}^2$, während die Gehäuse des Typs V02T18 bei einer Oberspannung σ_0 von 425 N/mm^2 langzeitfest sind. Der Einfluss der Kerbwirkung durch die Balggeometrie ist hierbei bereits in der Simulation und somit in den angegebenen Oberspannungen berücksichtigt. In Tabelle 22 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Wöhlerlinien dargestellt.

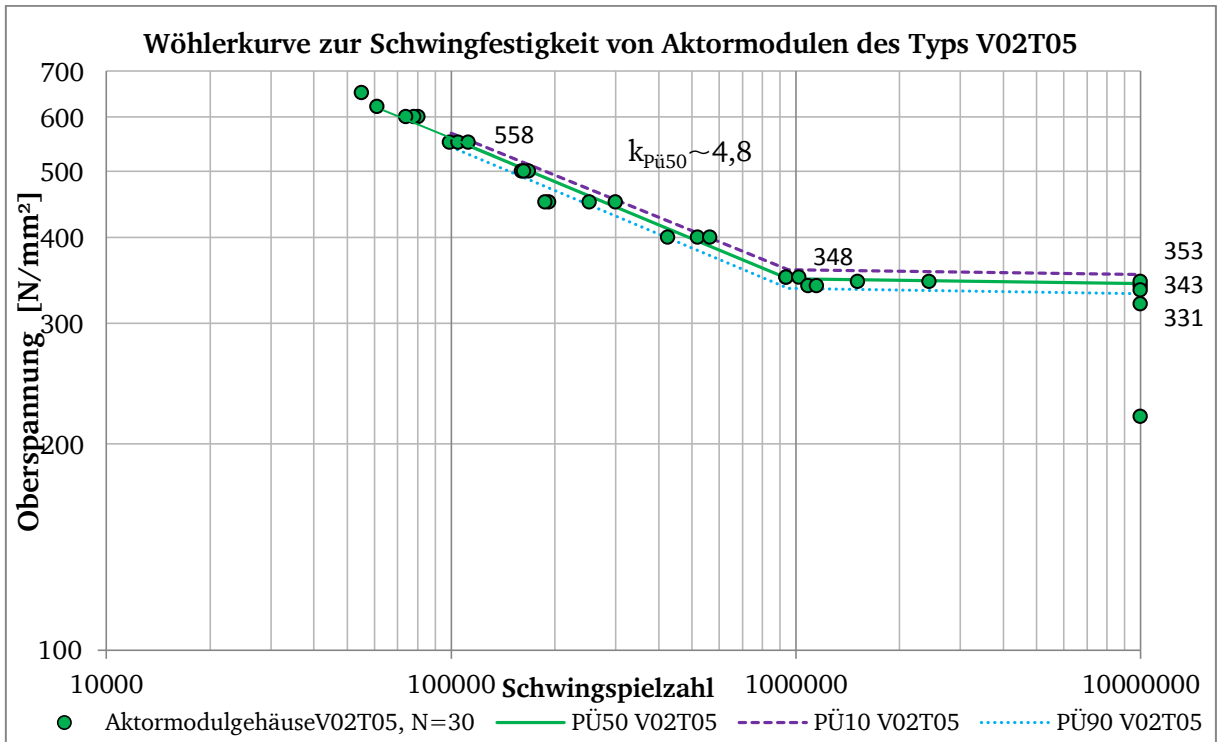


Abbildung 83: Darstellung der Wöhlerlinie für Aktormodule V02T05 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

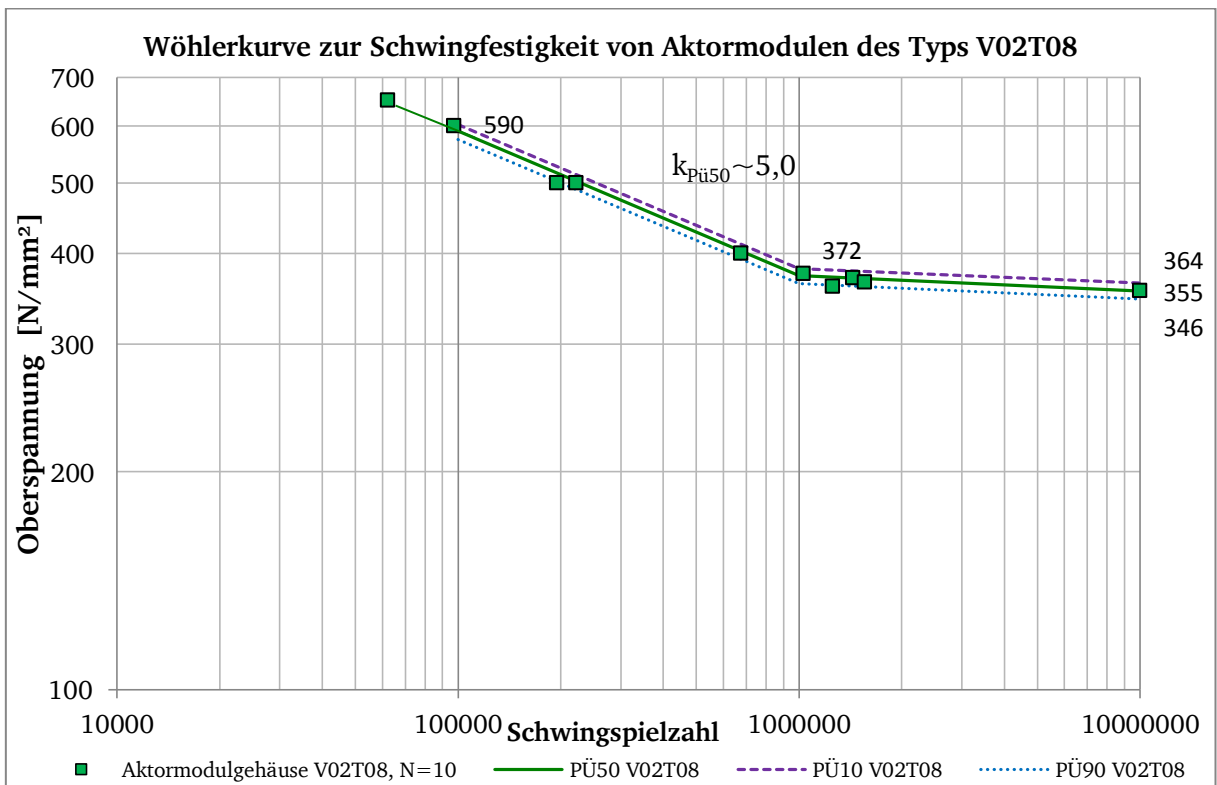


Abbildung 84: Darstellung der Wöhlerlinie für Aktormodule V02T08 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

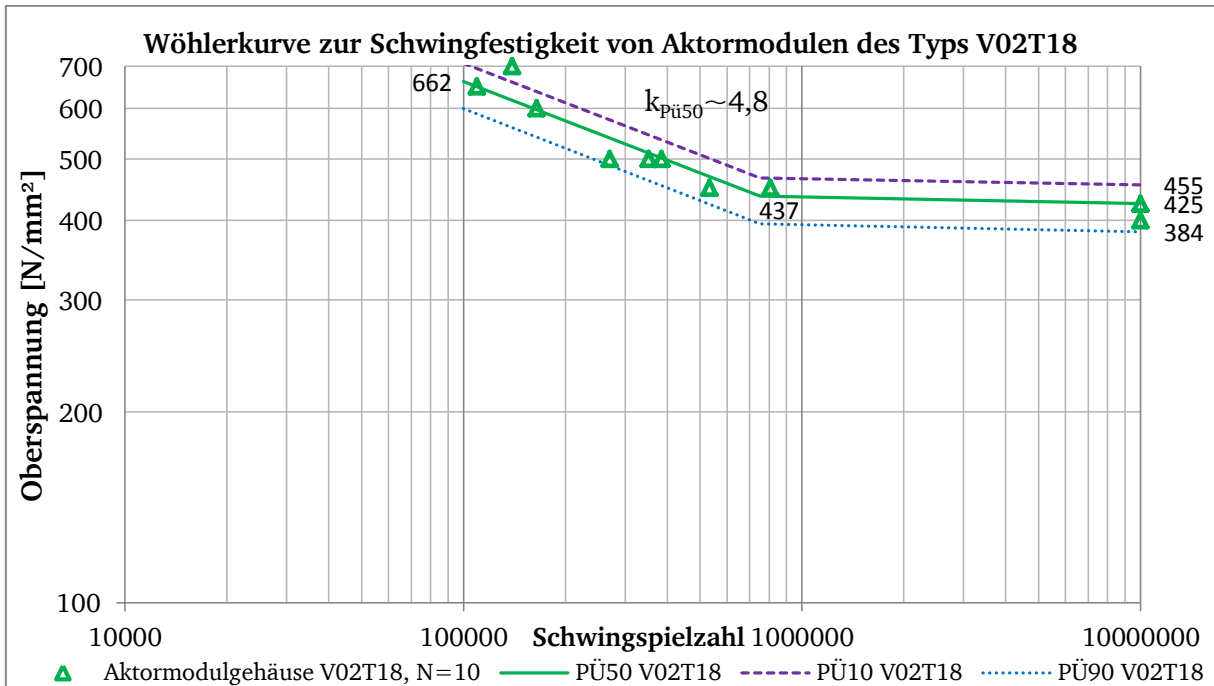


Abbildung 85: Darstellung der Wöhlerlinie für Aktormodule V02T18 mit ermittelten Streubändern und Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen

Tabelle 22: Statistische Auswertung der ermittelten Wöhlerlinien der SLM-Aktormodulgehäuse

Kennwert der Wöhlerlinie	Gehäuse des Typs V02T05	Gehäuse des Typs V02T18	Gehäuse des Typs V02T08
Neigung im Zeitfestigkeitsbereich	4,77	4,84	5,01
Lage des Abknickpunktes (Schwingenzahl und Belastung)	$9,5 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^5$	10^6
	348 N/mm ²	437 N/mm ²	372 N/mm ²
Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen für Pü 50 %	343 N/mm ²	425 N/mm ²	355 N/mm ²
Anzahl der Proben	30	10	10
Streuspanne $T_{\text{Streu,mittel}}$	1,31	1,63 max. 2,23	1,28
Vertikale Streuspanne T_{vertikal} bei 10^7 Schwingspielen	1,07	1,19	1,05

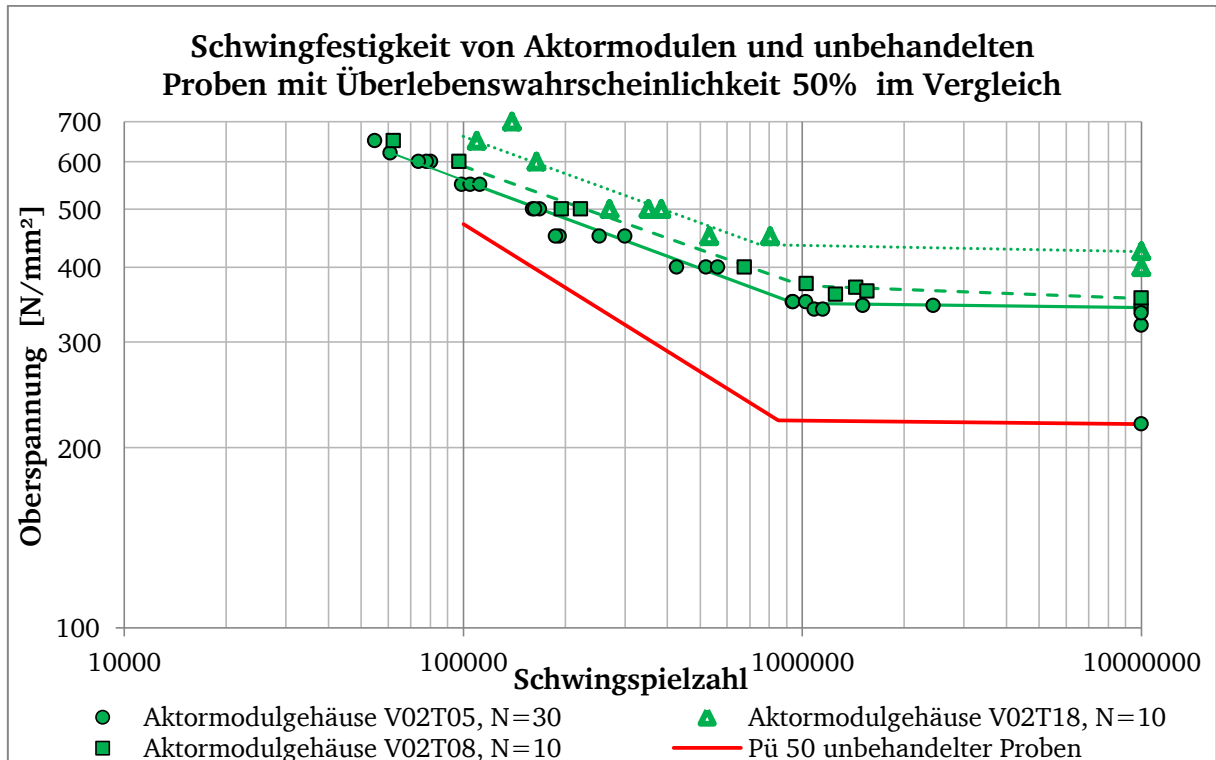


Abbildung 86: Ergebnisse zur Schwingfestigkeit von Aktormodulen im Vergleich mit der Wöhlerlinie unbehandelter Proben

Die Wöhlerlinien der Aktormodulgehäuse verlaufen mit einer Neigung von 4,77 bis 5,01 im Zeitfestigkeitsbereich deutlich flacher als die Wöhlerlinie der unbehandelten Proben, welche eine Neigung von 2,84 aufweist. Die Streuung ist bei den Aktormodulen der Typen V02T05 und V02T08 mit einer mittleren Streuspanne unterhalb von 1,31 geringer als die der unbehandelten Proben, die bei 1,93 liegt. Die Streuung der Aktormodule des Typs V02T18 liegt mit einer Streuung von maximal 2,23 im Bereich der maximalen Streuung der unbehandelten Proben.

Wie in Abbildung 86 zu erkennen ist, liegen die maximalen Belastungen der Aktormodulgehäuse im Bereich der Langzeitfestigkeit, die sich aus den experimentellen Prüfkräften und den Ergebnissen des Simulationsmodells ergeben, signifikant oberhalb der Schwingfestigkeit der unbehandelten Proben. Für die Gehäuse kann, wie in Tabelle 22 dargestellt, das Verhältnis zwischen der Langzeitfestigkeit des unbearbeiteten Werkstoffs und der Langzeitfestigkeit der Aktormodulgehäuse berechnet werden, der die konservative Abschätzung des Simulationsmodells aufzeigt. Die Gehäuse des Typs V02T05 halten einer 1,56-fachen Belastung im Langzeitfestigkeitsbereich stand, während die Gehäuse des Typs V02T08 einen Wert von 1,62 und die Gehäuse des Typs V02T18 mit dem größeren Querschnitt einen 1,94-fachen Wert erzielen.

Ein Grund für die höhere Schwingfestigkeit liegt in der vom Simulationsmodell abweichenden Verteilung der Spannung über den Querschnitt. Dies wird dadurch bestätigt, dass die Position des Anrisses bei den Versuchen ebenfalls vom Simulationsmodell abweicht (siehe Kapitel 4.1.7). Die Prüfkraft aller Aktormodulgehäuse im Bereich der Langzeitfestigkeit liegt jedoch oberhalb der im Einsatz geforderten 1,5 kN, das heißt alle getesteten Aktormodulgehäuse sind für den Einsatz in der Praxis geeignet.

Tabelle 23: Auswertung der Wöhlerlinien im Vergleich zu unbehandelten Proben

Kennwert der Wöhlerlinie	Gehäuse des Typs V02T05	Gehäuse des Typs V02T18	Gehäuse des Typs V02T08	unbehandelte Proben
Anzahl der Durchläufer	5	2	1	13
Schwingfestigkeit bei $N=10^7$ unbehandelte Probe / Schwingfestigkeit Aktormodulgehäuse bei $N=10^7$	1,56 (343 N/mm ² / 219 N/mm ²)	1,94 (425 N/mm ² / 219 N/mm ²)	1,62 (355 N/mm ² / 219 N/mm ²)	1 (219 N/mm ² / 219 N/mm ²)
Prüfkraft bei Langzeitfestigkeit	2,97 kN	1,51 kN	1,59 kN	6,19 kN
Verhältnis Schwingfestigkeit $\sigma_{0,10^7}$ / Zugfestigkeit $R_m = 981$ N/mm ²)	0,35	0,43	0,36	0,22

Die Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten aus dem quasistatischen Zugversuch zu den Schwingfestigkeiten bei 10^7 Schwingspielen in Tabelle 23 zeigt, dass die Langzeitfestigkeit der Aktormodule auf Grundlage der experimentellen Prüfkräfte und des Simulationsmodells bei 0,35 bis 0,43-facher Werkstoff-Zugfestigkeit liegt. Die Langzeitfestigkeit von SLM-Werkstoffproben mit unbehandelter Oberfläche liegt hingegen nur im Bereich der 0,22-fachen Zugfestigkeit. Hier ist zu beachten, dass der Einfluss der Kerbwirkung durch die Balggeometrie bereits in der simulierten und damit der dargestellten Oberspannung berücksichtigt ist.

4.1.7 Auswertung weiterer Einflüsse auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse hinsichtlich möglicher Einflüsse aus Herstellungs- und Anrissposition auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse. Für die Untersuchung des Einflusses der Herstellungsposition der Gehäuse des Typs V02T05 auf der Bauplattform ist der Bereich, in dem diese Aktormodulgehäuse gefertigt worden sind, in vier Quadranten, wie in nachfolgender Abbildung 87 dargestellt, aufgeteilt worden. Jeder Probe kann anhand der Probennummer einer exakten Position auf der Bauplattform zugeordnet werden, die wiederum einem der vier Quadranten zugeordnet wird.

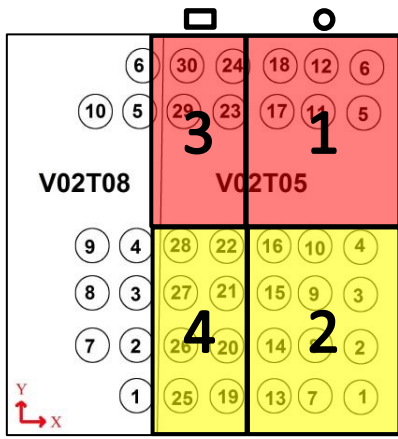


Abbildung 87: Aufteilung der Bauplattform in Herstellungsquadranten (Beschichtung beginnt bei Quadranten 1,2)

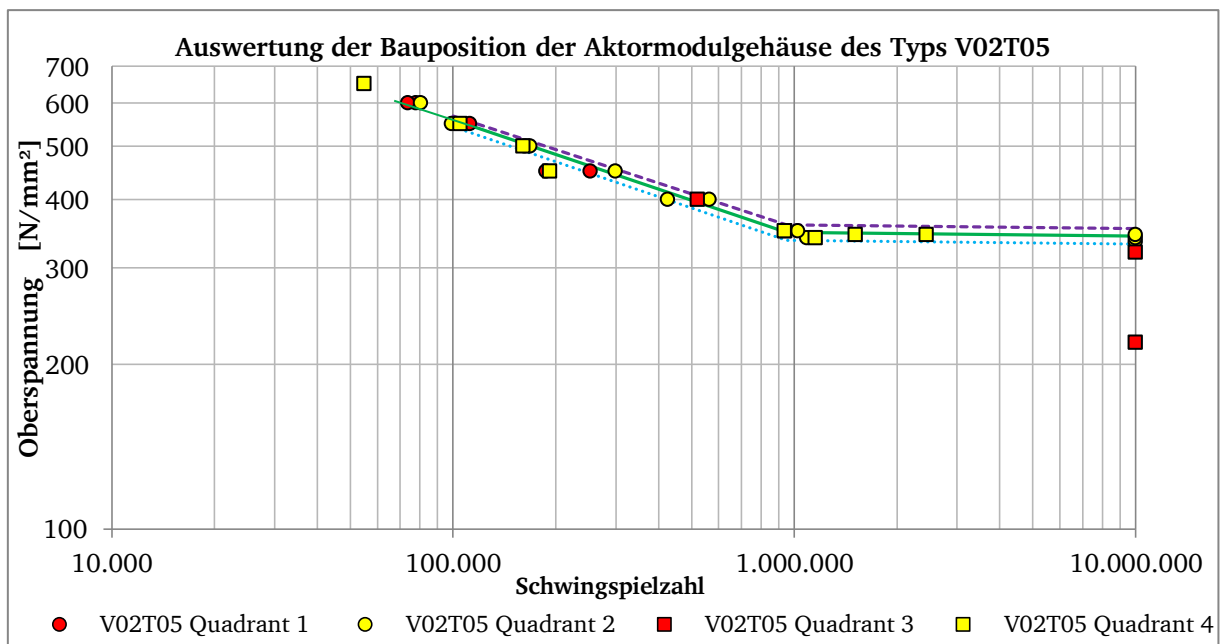


Abbildung 88: Wöhlerdiagramm zur Darstellung der Abhängigkeit von Herstellungsposition zur Schwingspielzahl für Aktormodulgehäuse V02T05

Wie in Abbildung 88 zu sehen ist, zeigt die Durchmischung der Versuchsergebnisse, dass die Änderung der Herstellungsposition auf der Bauplattform keinen Einfluss auf die Schwingfestigkeit hat.

Neben der Bauposition ist die Anrissposition im Prüfbereich der einzelnen Aktormodulgehäuse untersucht worden. In Abbildung 89 ist die Benennung der einzelnen Anrissstellen dargestellt. Die Position der höchsten Belastung im Simulationsmodell und damit der erwartete Ort des Anrisses (siehe Kapitel 3.1.7), stimmen nicht mit der experimentell ermittelten Lage überein. Nach den Erkenntnissen des Simulationsmodells hätte der Anriss an der äußeren Kante des Balges auftreten sollen. In den Versuchen sind jedoch alle ersten sichtbaren Anrisse im kleinsten Radius des Balges erfolgt. Die experimentell ermittelte Anrissstelle wird durch die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Spannungsüberhöhung im Kerbgrund und der damit gemäß DIN 743-2 (2000, S. 5) höchsten Belastung im Bereich des kleinsten Radius bestätigt.

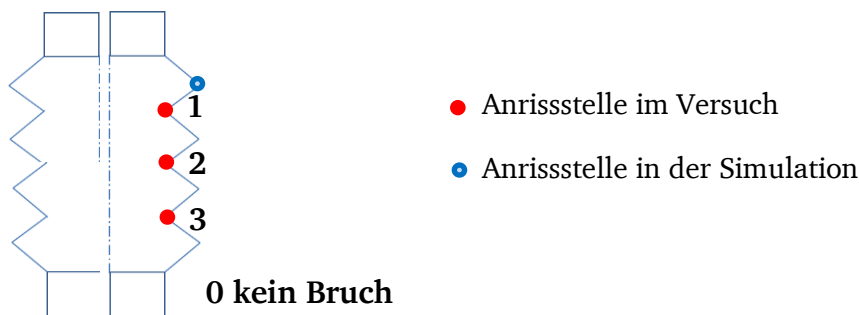


Abbildung 89: Benennung der einzelnen Anrisslagen eines Aktormodulgehäuses

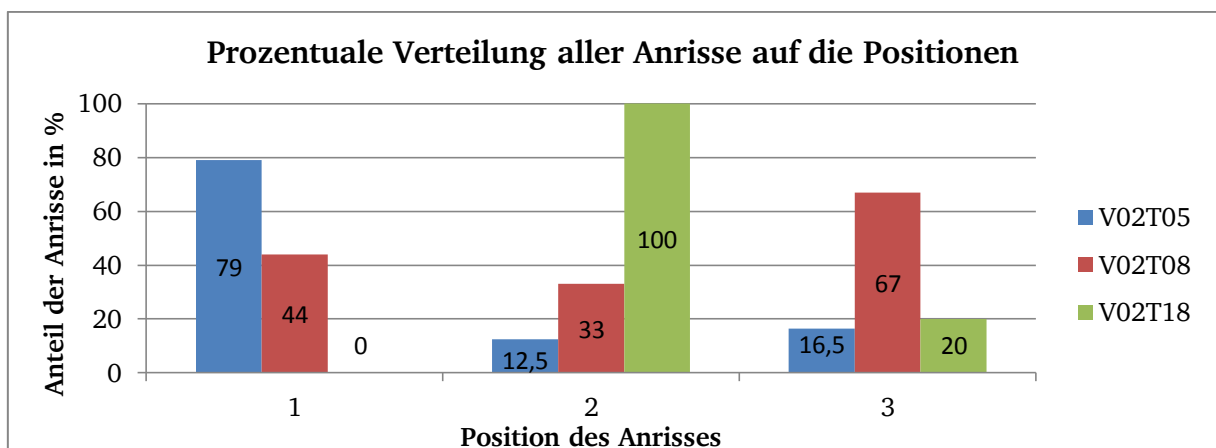


Abbildung 90: Verteilung der Anrisslagen über alle gebrochenen Aktormodulgehäuse

Die Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 sind mit einer Wahrscheinlichkeit von 79 % unterhalb der ersten Balgspitze an Position eins angerissen. Der Bruch erfolgte bei 84 % aller

Gehäuse des Typs V02T05 an der Anriss- sowie einer weiteren Stelle. Im Anhang befinden sich die Fotos aller geprüften Aktormodulgehäuse. Während bei allen Aktormodulgehäusen des Typs V02T18 der Anriss in der Mitte des Gehäuses an Position zwei erfolgt ist, variiert dieser bei den Aktormodulgehäusen des Typs V02T08. Wie in Abbildung 90 dargestellt ist, weisen 44 % aller Gehäuse des Typs V02T08 einen Anriss an Bruchstelle eins, 33 % der Gehäuse an Bruchstelle zwei und 67 % der Gehäuse an Bruchstelle drei auf. Anrisse an zwei Positionen sind bei 8 % der Gehäuse des Typs V02T05, 44 % der Gehäuse des Typs V02T08 und 20 % der Gehäuse des Typs V02T18 zu erkennen. Die Anrisslage ist dabei zum einen abhängig von der Position der für den Bruch relevanten Werkstoff-Inhomogenität und zum anderen von der Bauteilgeometrie. Außerdem wird die Zugkraft von oben auf das Gehäuse aufgebracht, so dass die Belastung im oberen Bereich des Bauteils aufgrund der Trägheit geringfügig höher ist als im unteren Bereich.

5 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse mit externen Quellen verglichen sowie eine Diskussion über die Bedeutung der erzielten Ergebnisse geführt.

5.1 Vergleich nachbearbeiteter Proben aus dem Werkstoff 1.4542

In Abbildung 91 sind die ermittelten Wöhlerlinien und Versuchsergebnisse der nachbearbeiteten Probengeometrien zusammen mit den Ergebnissen von Starr et al. (2011) und Sehr, Witt (2010) dargestellt, welche jeweils die Schwingfestigkeit nachbearbeiteter SLM-Probengeometrien aus dem Werkstoff 1.4542 untersucht haben. Die Ergebnisse von Sehr und Witt (2010) sind aufgrund der Methode des Biege-Umlauf-Verfahrens, wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, mit dem Faktor 1,15 multipliziert worden. Die Darstellung zeigt, dass die Schwingfestigkeit der nachbearbeiteten Proben dieser Masterarbeit auch im Langzeitfestigkeitsbereich in der gleichen Größenordnung mit diesen Untersuchungen liegt. Die Wöhlerlinien aller dargestellten Versuchsreihen weisen einen flachen Verlauf mit einer Neigung k größer 20 auf. Der Abknickpunkt liegt jeweils bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen. Dies zeigt, dass Proben mit reproduzierbaren Schwingfestigkeitseigenschaften hergestellt werden können.

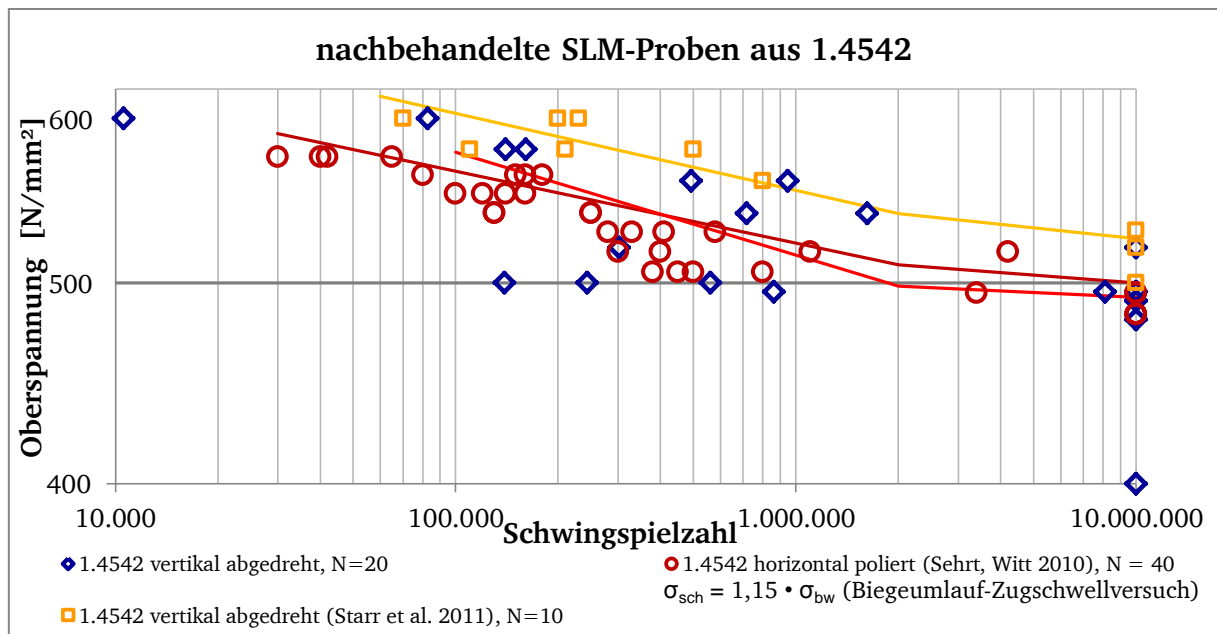


Abbildung 91: Vergleich der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Forschungseinrichtungen von nachbehandelten SLM-Edelstahl-Proben

In Abbildung 92 sind die Ergebnisse eines Wöhlerversuches von nachbehandeltem Stangenmaterial (Wu, Lin 2002) im Vergleich zu Versuchsergebnissen der abgedrehten Proben dieser Masterarbeit aufgetragen. Die Darstellung zeigt, dass die Festigkeiten des Stangenmaterials, welches für 0,5 Stunden bei 1038°C geglüht und an der Luft abgekühlt worden ist, auf den einzelnen Belastungshorizonten mit den Festigkeitswerten der abgedrehten Proben vergleichbar sind. Die konventionell hergestellten Proben sind im Zugschwellbereich bei einem Spannungsverhältnis R von 0,1 (R = 0 in dieser Masterarbeit) mit einer Prüffrequenz von 20 Hz bis zu einer Grenzschwingspielzahl von $2 \cdot 10^6$ geprüft worden. SLM-Proben erreichen folglich bei Oberflächenbehandlung mittels Abdrehen Schwingfestigkeit im Bereich konventionell gefertigter Proben.

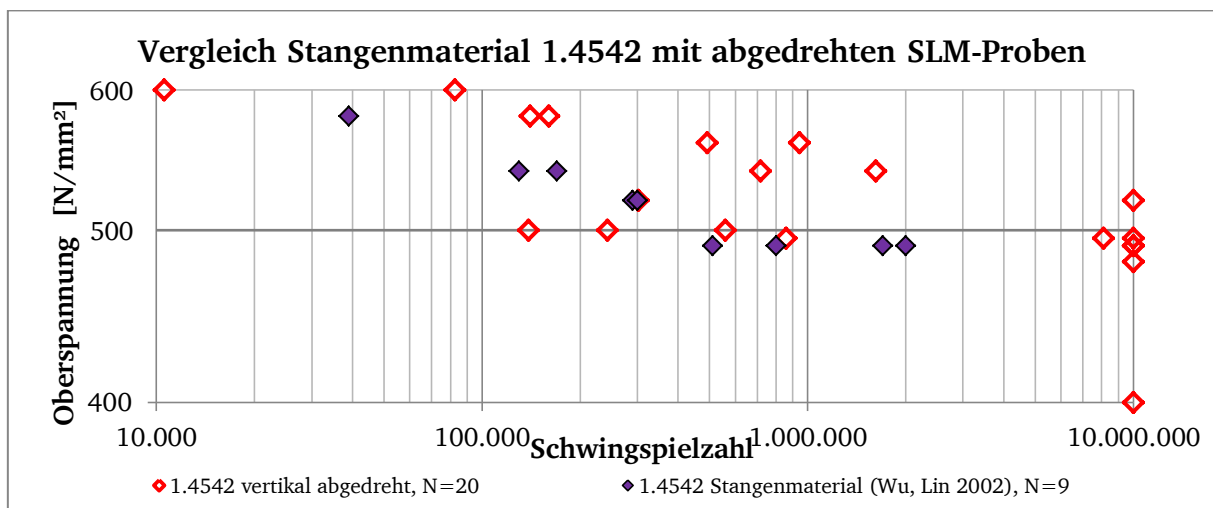


Abbildung 92: Wöhlerdiagramm mit abgedrehten Standardproben im Vergleich zu nachbearbeiteten SLM-Proben aus dem Werkstoff 1.4542

5.2 Vergleich abgedrehter und un behandelter SLM-Proben

Der Vergleich von abgedrehten und un behandelten SLM-Proben in Abbildung 93 zeigt den Einfluss der Oberflächennachbearbeitung. Dargestellt sind alle Versuchsergebnisse dieser Masterarbeit sowie SLM-Proben aus dem Werkstoff Ti-6Al-4V, die entweder mit polierter Oberfläche (offene Quadrate) oder un behandelt („as built“) (ausgefüllte Quadrate) geprüft worden sind. Der Vergleich zeigt, dass auch in den Versuchsreihen von Wycisk et al. (2013) die Oberflächennachbearbeitung einen reproduzierbaren, positiven Einfluss auf die Schwingfestigkeit hat. Die Wöhlerlinie beziehungsweise die Versuchspunkte der un behandelten Proben fallen jeweils signifikant steiler ab und die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen liegt bis zu 300 N/mm^2 unterhalb der Festigkeitswerte der nachbearbeiteten Proben. Die mittlere Streuung liegt bei allen Versuchsreihen un behandelter Proben unterhalb

von 2,61. Ausreißer treten bei nachbearbeiteten Proben häufiger auf, so dass für die polierten Proben von Wycisk bei einer Probenzahl von 12 eine Abschätzung der Wöhlerlinie nicht zielführend ist. Für unbehandelte Proben liegt der Abknickpunkt, nach welchem die Wöhlerlinie signifikant abflacht, bei 10^6 Schwingspielen.

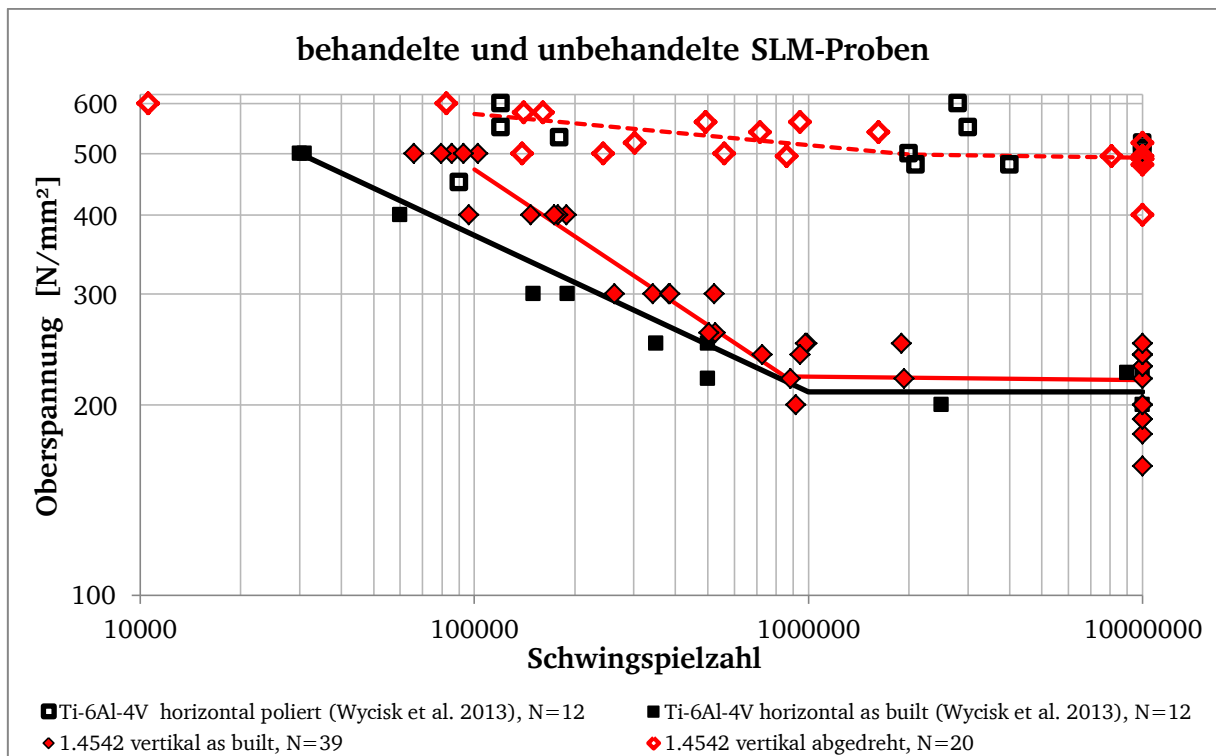


Abbildung 93: Vergleich der Versuchsergebnisse von behandelten und unbehandelten SLM-Proben unterschiedlicher Werkstoffe

In Abbildung 94 sind die Versuchsergebnisse von SLM-Edelstahl-Proben aus Spierings et al. (2013) mit den Ergebnissen der SLM-Proben dieser Masterarbeit vergleichend dargestellt. Geprüft worden sind jeweils abgedrehte und unbehandelte („as built“) Proben, so dass der Einfluss der Oberflächennachbearbeitung von SLM-Proben untersucht werden kann. Die Wöhlerlinien der unbehandelten Proben verlaufen, wie bereits bei den Versuchen des Werkstoffs Ti-6Al-4V aus Abbildung 93 zu sehen ist, signifikant steiler als die der nachbehandelten Proben und weisen im Bereich von 10^6 beziehungsweise $8,5 \cdot 10^5$ Schwingspielen einen ausgeprägten Abknickpunkt auf. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Murr (2012 S. 176) überein, die aufzeigen, dass bei der SLM-Herstellung von 1.4542 unter Argonschutzgas martensitisches Gefüge gebildet wird, bei dem die Wöhlerlinie, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, generell einen Abknickpunkt in den Langzeitfestigkeitsbereich aufweist. Die vertikale Streuung der Versuchsergebnisse von Spierings et al. (2013) liegt bei maximal 1,35 und ist damit vergleichbar mit der vertikalen Streuung der Versuchsergebnisse

innerhalb dieser Masterarbeit von maximal 1,38. Die Anzahl der geprüften, unbehandelten Proben von sieben ist hingegen relativ niedrig und die Auswertung einer Wöhlerlinie daher begrenzt möglich. Im Diagramm ist die Abschätzung von Spierings et al. (2013) eingetragen. Im Vergleich der beiden Versuchsreihen ist eindeutig zu erkennen, dass die Schwingfestigkeit von nachbehandelten Proben sowohl im Zeit- aber insbesondere auch im Langzeitfestigkeitsbereich signifikant oberhalb der von unbehandelten Proben liegt.

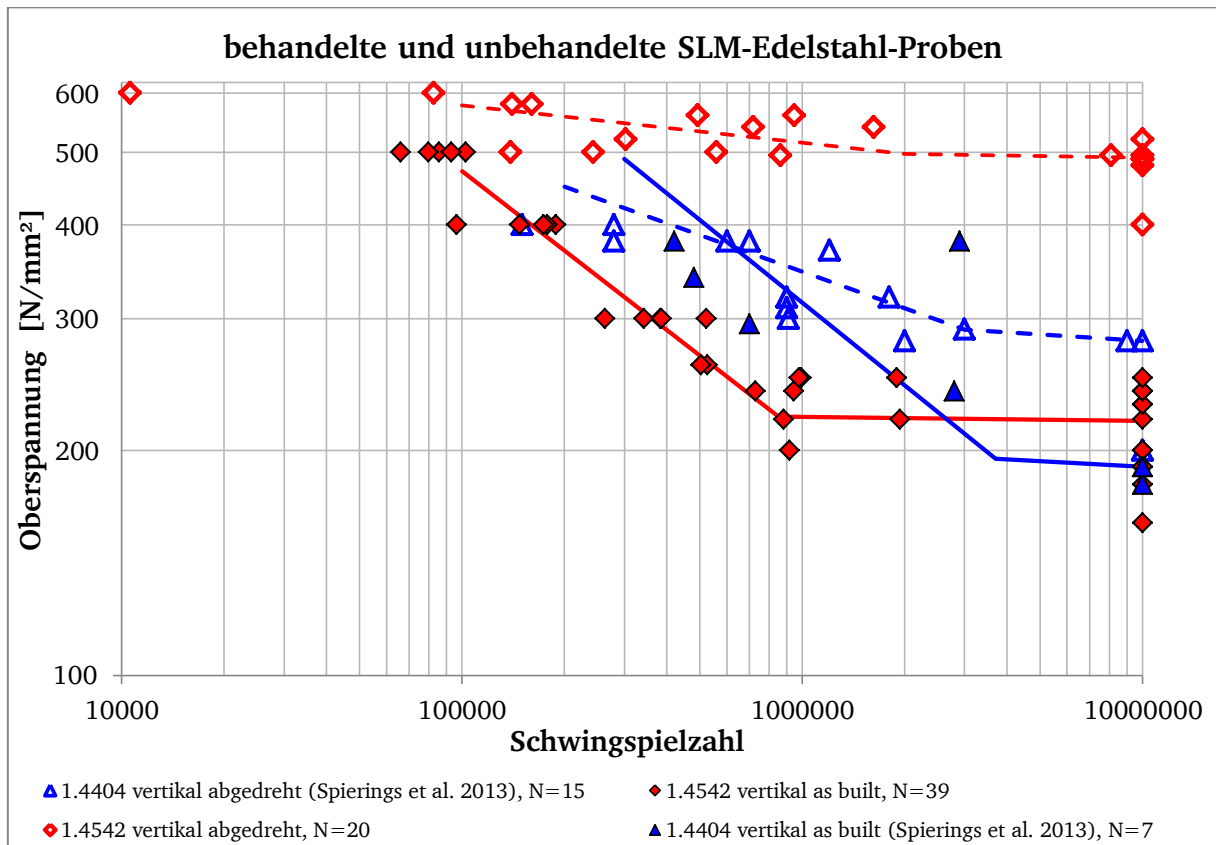


Abbildung 94: Vergleich unbehandelter mit nachbearbeiteten SLM-Proben aus Edelstahl

Ein flacherer Verlauf der Wöhlerlinie führt dazu, dass eine geringe Änderung der Oberspannung eine große Änderung der Schwingspielzahl bewirken kann. Die Steigung wird dabei mit steigender Kerbwirkung, mit zunehmender Probengröße, mit abnehmender Randverfestigung und zunehmender Rauhtiefe steiler. Die Wöhlerlinie von festgewalzten oder kugelgestrahlten Stählen verläuft daher flacher als von geschmiedeten Stählen (Grubisic, Sonsino 1992; S.105; Radaj, Vormwald 2007, S. 7; Sonsino 2007, S. 2251-2253).

Der Unterschied zwischen den unbehandelten und den nachbearbeiteten Proben ist insbesondere in der Variation der Oberflächenrauigkeit begründet. Einflüsse der Oberflächenrauigkeit auf die Schwingfestigkeit sind auch aus dem Bereich der Sinter- und Gusswerkstoffe bekannt. Bei einer Zugfestigkeit von 981 N/mm² und einer

Oberflächenrauigkeit R_z von $108\ \mu\text{m}$ ergibt sich nach Siebel und Gaier (1956) ein Abminderungsfaktor von 0,6 (siehe Kapitel 2.2.1) sowie nach DIN 743 (2000) ein Faktor von 0,7 (siehe Berechnung im Anhang). Für die geprüften unbehandelten Proben des SLM-Werkstoffs im Vergleich zu den abgedrehten Proben des SLM-Werkstoffs im Rahmen dieser Masterarbeit ergibt sich jedoch ein im Vergleich zur genannten Literatur niedriger Abminderungsfaktor von 0,45, das heißt der ermittelte Einfluss der Oberflächenrauigkeit ist bei den additiv hergestellten Proben höher und kann für zukünftige Auslegungen berücksichtigt werden.

Oberflächengehärtete und hochlegierte Stähle weisen im Zeitfestigkeitsbereich eine flache Wöhlerlinie mit einer Neigung oberhalb von 15 auf, welche mit der Neigung der Wöhlerlinie der abgedrehten Proben, die bei 20,05 liegt, vergleichbar ist. Die Neigung der Wöhlerlinie der unbehandelten SLM-Proben im Zeitfestigkeitsbereich, die durch den Einfluss der Oberflächenrauigkeit mit einem Wert von 2,84 signifikant steiler abfällt als die der nachbehandelten Proben, ist hingegen mit der Neigung der Wöhlerlinie von Gusseisen und Stahl vergleichbar, die in der Literatur bei 5 angegeben wird (Lee et al. 2011, S. 146-148; Pyttel et al. 2011, S. 52,53).

5.3 Vergleich der Schwingfestigkeitsergebnisse von Bauteilen

Der Vergleich zwischen der simulierten, maximalen Belastung und der tatsächlich möglichen Belastung der Aktormodulgehäuse im Bereich der Langzeitfestigkeit zeigt, dass die unmittelbare Übertragung der Werkstoffkennwerte auf die Bauteilgeometrie zu Abweichungen führt. Die erwarteten maximalen Spannungen des Simulationsmodells sind signifikant niedriger als die in der Praxis ertragbare Spannung, das heißt die Bauteile sind in der Praxis höher belastbar als im konservativen Simulationsmodell angenommen. Bei Annahme einer konstanten Spannungsverteilung über den Querschnitt und damit ohne Berücksichtigung eines Kerbfaktors, ergeben sich die im folgenden Diagramm (Abbildung 95) dargestellten Wöhlerlinien. Ein Vergleich der Aktormodulgehäuse zeigt, dass die Typen V02T08 und V02T18, welche mit einem Balgwinkel von $137,5^\circ$ hergestellt sind, bei angenommener konstanter Spannungsverteilung über den Querschnitt eine Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen σ_0 von $\sim 50\ \text{N/mm}^2$ erzielen. Die Aktormodulgehäuse des Typs V02T05, welche mit einem flacheren Balgwinkel von 160° gebaut worden sind, erreichen bei 10^7 Schwingspielen nahezu die doppelte Schwingfestigkeit mit $\sigma_0 = 96\ \text{N/mm}^2$. Der Kerbwinkel des Aktormodulgehäuses hat folglich einen signifikanten Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Ein Einfluss des Durchmessers beziehungsweise der Wandstärke kann bei

den ausgewählten Typen nicht festgestellt werden. Der lokale Kerbradius ist konstant gehalten und folglich nicht untersucht worden.

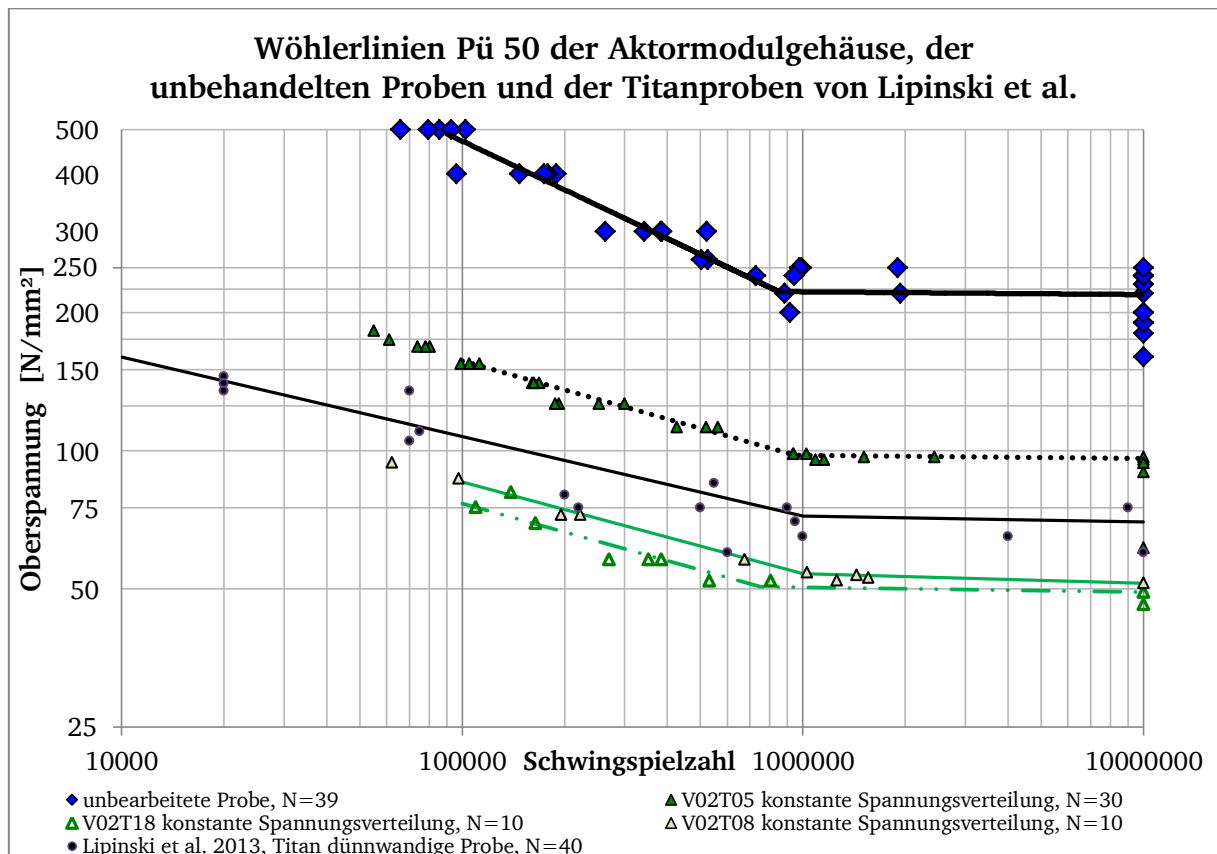


Abbildung 95: Vergleich der Versuchsergebnisse der Aktormodulgehäuse mit dünnwandigen Titanproben von Lipinski et al. (2013) und unbearbeiteten SLM-Proben

Wie in Kapitel 2.6 beschrieben ist, sind in einer Versuchsreihe von Lipinski et al. (2013) Bauteile einer ähnlichen, ebenfalls dünnwandigen Geometrie aus Titan getestet worden. Die Neigung aller dargestellten Versuchsreihen liegt im Bereich von 4,77 bis 5,21 und ist nahezu identisch (siehe Abbildung 95). Die Streuung der Versuchsergebnisse der Aktormodulgehäuse ist mit maximal 2,23 signifikant niedriger als die Streuung der dünnwandigen Proben von Lipinski et al. (2013) mit 12,17. Entsprechend Tabelle 24 liegt das Verhältnis der Zugfestigkeit zur Langzeitfestigkeit für die Proben ohne zusätzliche Kerbwirkung der Geometrie bei Lipinski et al. (2013) bei 0,11. Bei dem Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 mit dem größten Kerbwinkel der Balggeometrie und damit dem geringsten Kerbfaktor liegt dieses Verhältnis bei 0,10 und damit im gleichen Bereich wie bei Lipinski et al. (2013). Die Aktormodulgehäuse der Typen V02T08 und V02T18 hingegen erreichen aufgrund des geringeren Kerbwinkels bei konstant angenommener Spannungsverteilung nur einen Faktor von 0,05 zwischen Langzeit- und Zugfestigkeit.

Tabelle 24: Vergleich der Schwingfestigkeiten von Bauteilen

Kennwert	Aktormodul- gehäuse V02T05	Aktormodul- gehäuse V02T08	Aktormodul- gehäuse V02T18	Dünnwandige Titanprobe (Lipinski et al. 2013)
Zugfestigkeit Werkstoff	981 N/mm ²	981 N/mm ²	981 N/mm ²	620 N/mm ²
Werkstoffschwing- festigkeit bei N=10 ⁷ (unbehandelt)	219 N/mm ²	219 N/mm ²	219 N/mm ²	
Schwingfestigkeit bei N=10 ⁷	343 N/mm ²	425 N/mm ²	355 N/mm ²	
Dauerschwingfestigkeit berechnet nach DIN 743 (siehe Anhang)	200 N/mm ²	143 N/mm ²	145 N/mm ²	
Schwingfestigkeit bei N=10 ⁷ bei konstanter Spannungsverteilung	96 N/mm ²	49 N/mm ²	51 N/mm ²	70 N/mm ²
Verhältnis Schwing- festigkeit bei N=10 ⁷ und konstanter Spannungsverteilung zur Zugfestigkeit	0,10	0,05	0,05	0,11
Verhältnis Schwing- festigkeit bei N=10 ⁷ unbehandelte Probe / Schwingfestigkeit bei N=10 ⁷ und konstanter Spannungsverteilung Bauteil	0,4	0,2	0,2	

In Abbildung 95 ist außerdem zu erkennen, dass die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse bei Annahme einer konstanten Spannungsverteilung unterhalb der Schwingfestigkeit von unbehandelten Proben liegt. Diese Erkenntnis zeigt, dass, wie im Simulationsmodell berücksichtigt und entsprechend der Berechnung im Anhang, bei den Aktormodulgehäusen neben dem Einfluss der Oberflächenrauigkeit zusätzliche Einflüsse wie

zum Beispiel der Kerbwinkel der Balgstruktur eine Rolle spielen und zur Absenkung der Langzeitfestigkeit gegenüber der Probengeometrie führen. Die in der Berechnung berücksichtigten Einflüsse sind dabei zu niedrig gewählt worden, so dass die Langzeitfestigkeit bei Annahme einer konstanten Spannungsverteilung unterhalb der zuvor berechneten Schwingfestigkeit liegt. Der Korrekturfaktor zwischen Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen der unbehandelten Probe und der Schwingfestigkeit bei konstanter Spannungsverteilung der Aktormodulgehäuse liegt, wie in Tabelle 24 dargestellt, für die Gehäuse des Typs V02T05 bei 0,4 und bei den Gehäusen des Typs V02T08 sowie V02T18 in 0,5-facher Höhe bei 0,2. Der vorab berechnete Einfluss der Balggeometrie auf die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse (siehe Berechnung im Anhang, Kapitel 2.2.1, Tabelle 24) wird somit bestätigt, ist jedoch in den Versuchen größer. Die Gehäuse V02T08 und V02T18 mit dem kleineren Kerbwinkel von $137,5^\circ$ erreichen entsprechend der Berechnung eine Schwingfestigkeit in 0,7-facher Höhe im Vergleich zum Gehäuse V02T05 mit dem größeren Kerbwinkel von 160° .

6 Zusammenfassung

Die Adaptronik erhält durch den Einsatz autonomer Struktursysteme einen ständig größer werdenden Einfluss im Bereich des Leichtbaus. Das im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA entwickelte SLM-Aktormodulgehäuse erfüllt die Kriterien der Strukturintegration, der schnellen, kosteneffizienten, individualisierten Herstellung und des Schutzes des Piezo-Aktormoduls vor Umwelteinflüssen. Um die Lebensdauer der Aktormodule zu bestimmen und damit den Einsatz in der Praxis zu fördern, ist im Rahmen dieser Masterarbeit die Schwingfestigkeit des SLM-Werkstoffes an Probengeometrien und der bereits entwickelten SLM-Gehäuse unter zyklischer Belastung durch geeignete experimentelle Untersuchungen beispielhaft an drei ausgewählten Varianten bestimmt worden. Als Prüfmethode für Proben und Bauteile ist ein zyklischer einachsiger Zugversuch im Schwellbereich mit einer Prüffrequenz von 70 bis 140 Hz an einer hydraulischen Prüfmaschine gewählt worden. Die Einspannung ist durch eine kraftschlüssige Spannzange realisiert worden. Die Versuche zur Ermittlung der Schwingfestigkeit sind im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) durchgeführt worden. Zunächst folgte die Ermittlung der Schwingfestigkeitskennwerte von mittels SLM hergestellter Proben. Insbesondere wurden die Einflüsse der Oberflächenrauigkeit untersucht, das heißt es sind sowohl unbearbeitete als auch nachbearbeitete Proben geprüft worden. Die Herstellung der SLM Proben erfolgte am PTW, während die spanende Nachbearbeitung durch das Unternehmen „Michael Pratzelt Zerspanung“ ausgeführt worden ist. Zur Erstellung der Wöhlerlinie mittels 39 unbearbeiteter Proben sind die Versuche nach dem Perlschnurverfahren beginnend im Zeitfestigkeitsbereich sowie nach dem Treppenstufenverfahren im Langzeitfestigkeitsbereich durchgeführt worden. Die Prüfung der abgedrehten Proben erfolgte mit gleicher Prüfmethode und -technik mit einer Anzahl von 20 Proben. Untersuchungen der Probenoberfläche zeigen für die unbehandelten Proben eine Oberflächenrauigkeit $R_z = 108 \mu\text{m}$ und für nachbearbeitete Proben von $R_z = 5 \mu\text{m}$. Die sich ergebenden Wöhlerlinien zeigen, dass die Schwingfestigkeit mit einem Anstieg der Oberflächenrauigkeit stark abfällt und der Langzeitfestigkeitsbereich beim SLM-Werkstoff ab einer Schwingspielzahl von maximal 10^6 Schwingspielen erreicht wird. Die Wöhlerlinie abgedrehter Proben weist dabei im Zeitfestigkeitsbereich einen signifikant flacheren Verlauf auf. Im Langzeitfestigkeitsbereich ertragen die spanend bearbeiteten Proben eine Spannung von $\sigma_0 = 492 \text{ N/mm}^2$ und die unbearbeiteten Proben eine Spannung von $\sigma_0 = 219 \text{ N/mm}^2$. Die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen liegt in Höhe der 0,5-fachen Zugfestigkeit bei abgedrehten und in Höhe der 0,22-fachen Zugfestigkeit bei

unbehandelten Proben. Die vertikale Streuung der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen liegt unterhalb von 1,38 und damit im Bereich von Gusswerkstoffen. Eine Abschätzung der Dichte und Aufnahmen der Bruchflächen zeigen, dass die Rissinitiierung im Bereich der Probenoberfläche an Inhomogenitäten auftritt. Bei unbehandelten Proben oberhalb eines Spannungshorizontes σ_0 von 300 N/mm^2 treten entlang des Prüfbereichs und der Bruchfläche multiple Anrisse auf. Nur bei einer Probe mit Bruch oberhalb von $8 \cdot 10^6$ Schwingspielen liegt der Bruchausgang im Inneren der Probe. Außerdem nimmt die Schwingbruchfläche mit abnehmender Belastung und steigender Schwingspielzahl zu. Schliffbilder von abgedrehten und unbehandelten Proben zeigen keine signifikanten Unterschiede im Gefüge auf. Härtemessungen an der Randschicht der unterschiedlichen Proben ergeben Werte in gleicher Größenordnung. SLM bedingte Abweichungen im Durchmesser sowie die Position im Bauraum haben keinen signifikanten Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Ein Vergleich mit Ergebnissen anderer Forschungsinstitute zeigt, dass die ermittelte Schwingfestigkeit nachbehandelter SLM-Proben aus 1.4542 in der gleichen Größenordnung liegt. Außerdem erreichen abgedrehte Proben Schwingfestigkeitswerte in Höhe von konventionell gefertigten Proben. Der bereits in Versuchsreihen anderer Forschungsinstitute mit geringer Probenzahl untersuchte Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf SLM-Proben ist mit einer deutlich höheren Probenzahl von insgesamt 59 Proben für den Werkstoff 1.4542 bestätigt worden.

Als kritische Einflussfaktoren für die Aktormodulgehäuse sind der Oberflächeneinfluss und der minimale Kerbradius neben den steifigkeitsbestimmenden Parametern bestehend aus Kerbwinkel, Wanddicke und Aktormoduldurchmesser ermittelt worden. Die aus der Prüfgeometrie gewonnenen Erkenntnisse sind unter Zuhilfenahme der aus der Simulation im Betrieb erwarteten lokalen maximalen Spannungen übertragen und experimentell verifiziert worden. Dazu sind drei Aktormodulgehäusevarianten gewählt worden, deren maximale lokale Spannungen σ_0 mit 213 N/mm^2 und 182 N/mm^2 geringfügig unterhalb der Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen unbehandelter SLM-Proben σ_0 von 219 N/mm^2 liegen. Getestet worden sind 30 Gehäuse des Typs V02T05, 10 Gehäuse des Typs V02T08 und 10 Gehäuse des Typs V02T18. Die Prüfkräfte aus der Simulation sind aufgrund von experimentell ermittelten niedrigeren Steifigkeiten angepasst worden. Für die Einspannung der Aktormodulgehäuse in die Prüfmaschine sind der Boden und Deckel verlängert und im Durchmesser reduziert worden. Außerdem befindet sich in Deckel und Boden eine Entlüftungsbohrung, damit die Luft im Inneren bei Schwingbelastung entweichen kann. Die experimentellen Versuche, welche zunächst nach dem Perlschnur- und für das Gehäuse des Typs V02T05 anschließend im Langzeitfestigkeitsbereich nach dem Treppenstufenverfahren durchgeführt worden sind,

haben gezeigt, dass die ermittelten Schwingfestigkeiten der dünnwandigen Aktormodulgehäuse signifikant oberhalb der simulierten Werte und damit oberhalb der Schwingfestigkeit von unbehandelten Proben liegen. Dies ist auf eine von der Simulation abweichende Spannungsverteilung über den Querschnitt des Aktormodulgehäuses zurückzuführen. Anrisse treten entgegen den Ergebnissen der Simulation, jedoch entsprechend der berechneten Spannungsüberhöhung im Kerbgrund immer am Ort des kleinsten Querschnittes auf. Die Schwingfestigkeit bei 10^7 Schwingspielen liegt beim Gehäuse des Typs V02T05 bei $\sigma_0 = 343 \text{ N/mm}^2$, beim Typ V02T08 bei $\sigma_0 = 355 \text{ N/mm}^2$ und beim Typ V02T18 bei $\sigma_0 = 425 \text{ N/mm}^2$. Alle Gehäuse sind bei einer in der Praxis auftretenden Prüfkraft von 1,5 kN langzeitfest und weisen eine geringe mittlere Streubreite unterhalb von 1,63 auf.

7 Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit sind die Schwingfestigkeiten von drei bereits entwickelten mittels SLM hergestellten Piezo-Aktormodulgehäusen ermittelt und ein eindeutiger Einfluss des Kerbwinkels festgestellt worden. Für die Analyse der Geometrieinflüsse auf die Schwingfestigkeit durch die Änderung der Wanddicke oder des Durchmessers sind weitere Untersuchungen erforderlich. Das Simulationsmodell kann daraufhin für Schwingfestigkeitssimulationen unter Berücksichtigung der Dünnwandigkeit, des Durchmessers und des Kerbwinkels optimiert werden. Zudem sind für die statistisch abgesicherte Zuverlässigkeit eines SLM-Gehäuses weitere Nachweisversuche nötig. Der Trend in der Industrie geht hin zur immer schnelleren Fertigung geringerer Losgrößen. Eine Reduzierung der Maschinenfehler beispielsweise durch Verklemmung des Beschichters insbesondere bei hohen Bauteilen stellt daher für die Zukunft weiterhin eine Herausforderung dar.

Für eine weitere Werkstoffuntersuchung ist es wichtig den Zusammenhang zwischen Probendurchmesser und Schwingfestigkeit zu ermitteln, um Rückschlüsse auf den Einfluss der Korngröße des Pulvers beziehungsweise auf den Einfluss der Dünnwandigkeit zu ermöglichen. Auch Versuche mit dünnwandig gefertigten Proben mit variabler Wanddicke ohne zusätzlichen Kerbgrund der Balgstruktur würden weitere Zusammenhänge aufzeigen. Der Kerbe zwischen den einzelnen Balgabschnitten wird eine hohe Bedeutung in Bezug auf die Schwingfestigkeit zugeschrieben. Deshalb sollte in weiteren Versuchsreihen der Radius an der Stelle der maximalen Spannung bei der SLM-Fertigung vergrößert und die Kerbe somit verrundet werden. Da die Schwingfestigkeit unbehauelter Proben reproduzierbar unterhalb von nachbearbeiteten Proben liegt, wäre es für niedriger belastbare Gehäuse eine weiterführende Aufgabe, die Schwingfestigkeit der Aktormodulgehäuse zu verbessern. Von hoher Bedeutung wäre daher die Ermittlung der Schwingfestigkeit bei 10^7 Belastungszyklen eines nachbearbeiteten SLM-Gehäuses beziehungsweise eines wärmebehandelten SLM-Gehäuses. Interessant ist zudem eine Aufstellung, welche Nachbehandlungsmethoden geeignet wären. Auch eine Analyse der Spannungen in der Randzone von abgedrehten im Vergleich zu unbehauelten Proben kann Aufschluss über Möglichkeiten zur Optimierung der Schwingfestigkeit geben. Zusätzlicher Forschungsbedarf ergibt sich zudem bei den Aktormodulgehäusen. Dort wäre es interessant zu untersuchen, ob eine Vorbelastung auf niedrigerem Spannungsniveau die Schwingfestigkeit unter anschließender höherer Belastung verbessert.

Anhang

Technische Zeichnungen der Probengeometrien

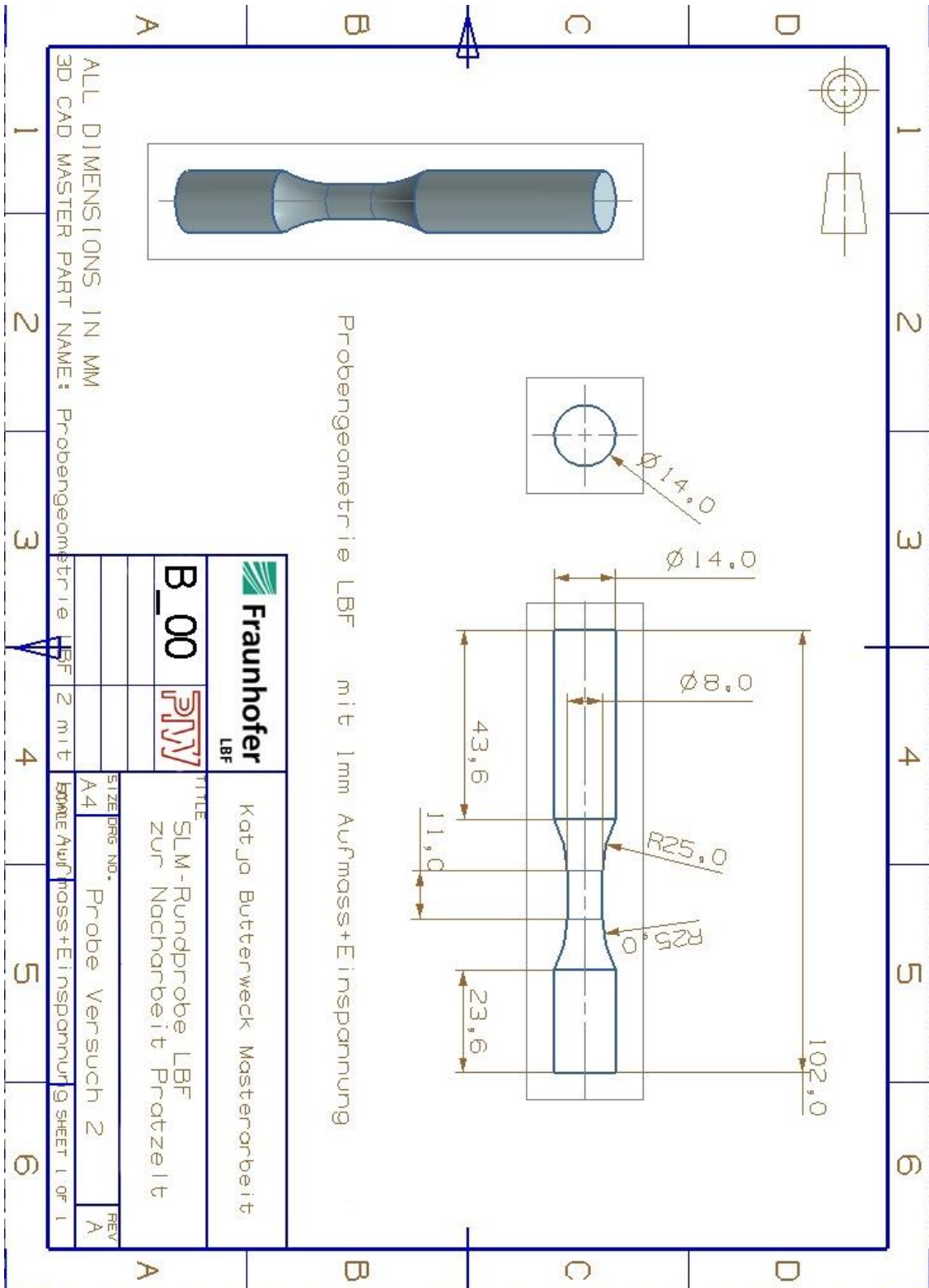


Abbildung 96: Technische Zeichnung Probengeometrie B_00

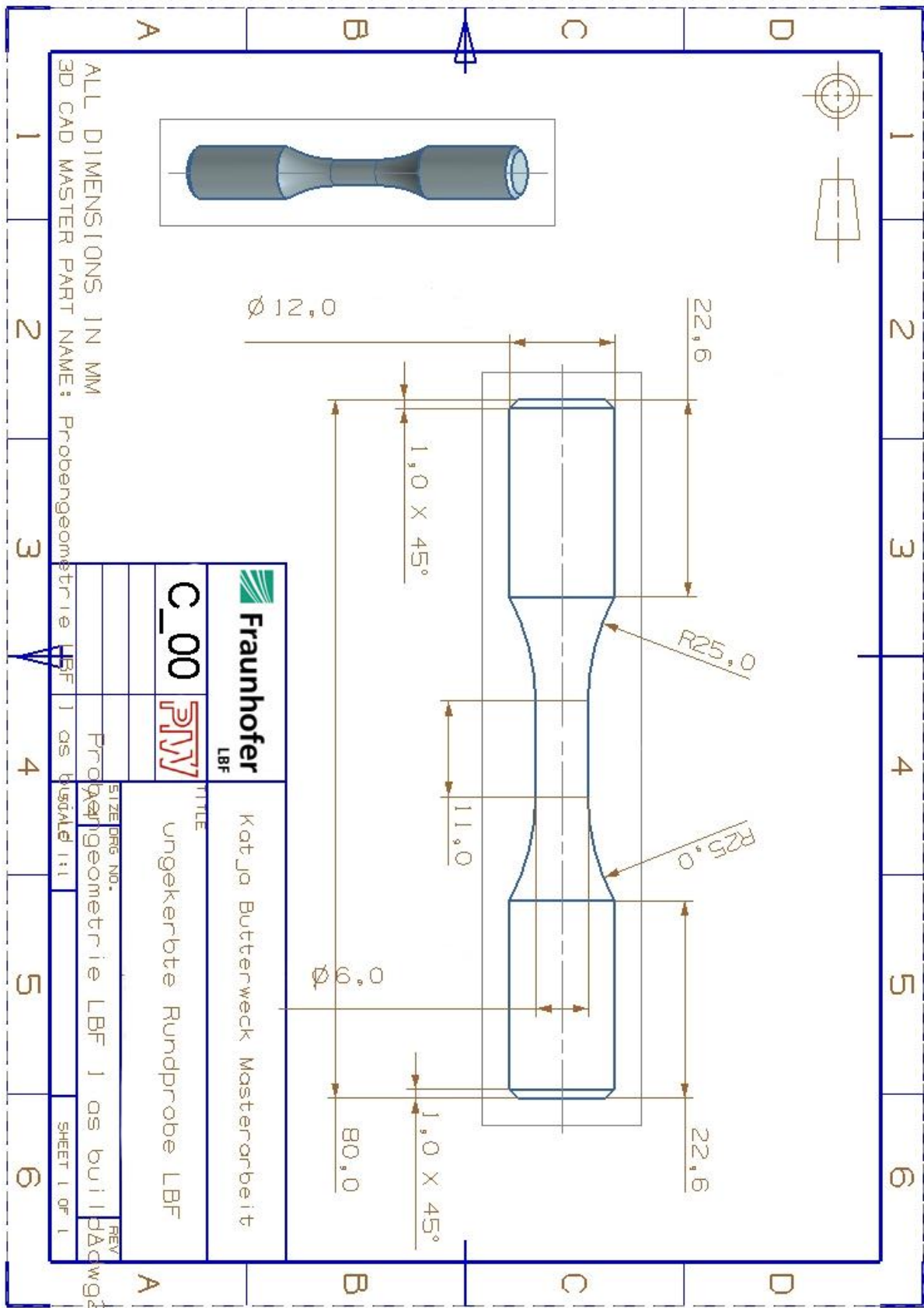


Abbildung 97: Technische Zeichnung Probengeometrie C_00

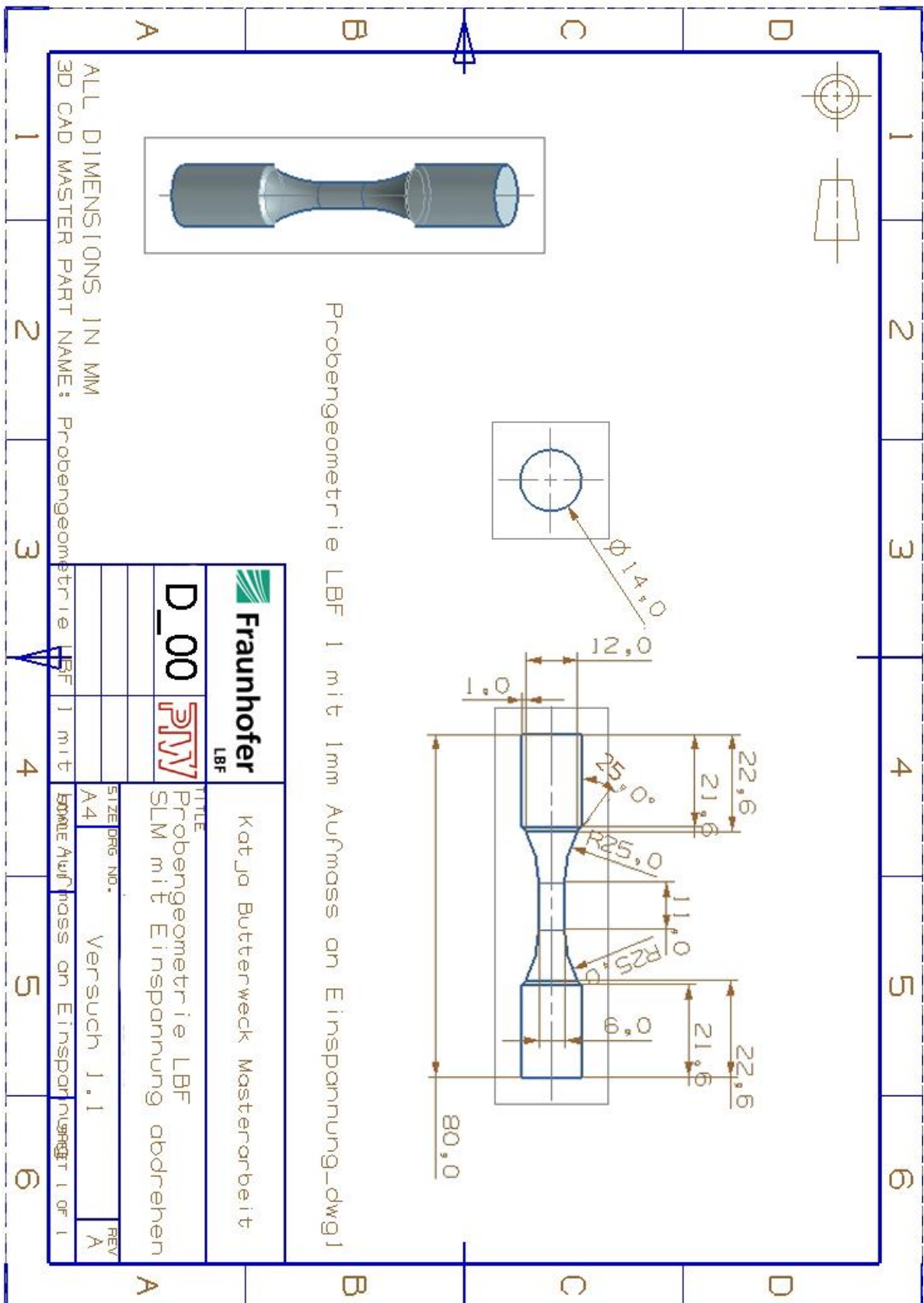


Abbildung 98: Technische Zeichnung Probengeometrie D_00

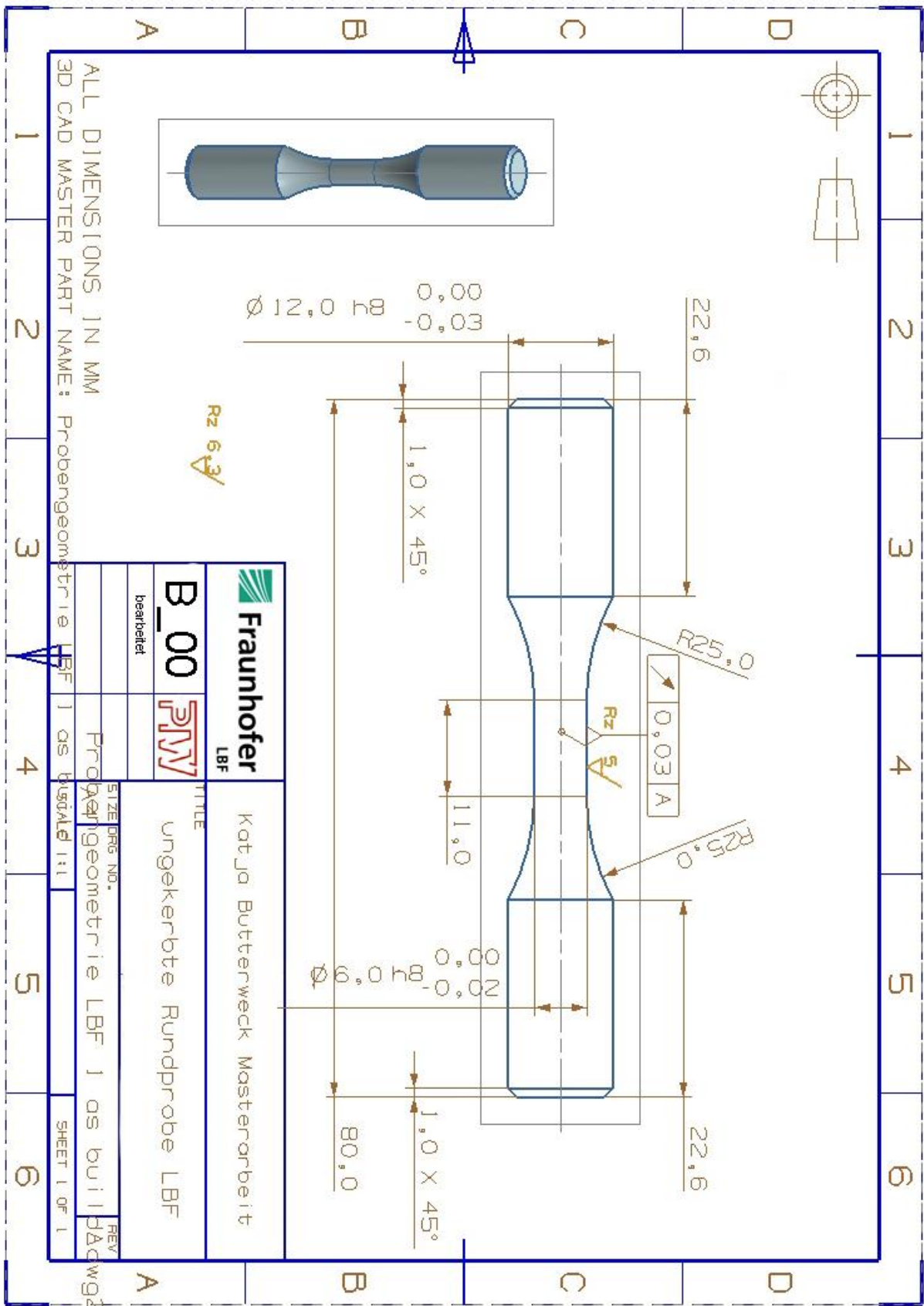


Abbildung 99: Technische Zeichnung Probengeometrie D_00 bearbeitet

Technische Zeichnungen der Aktormodulgehäuse

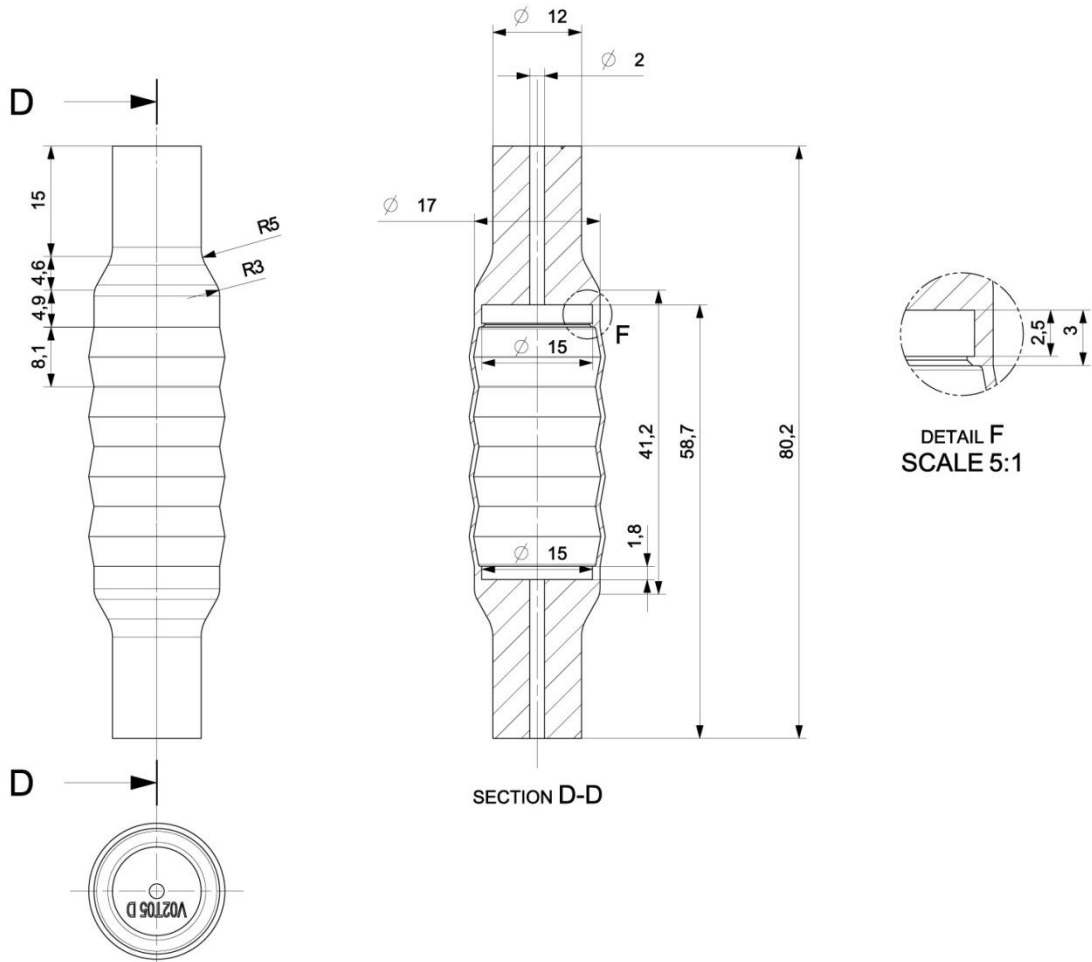


Abbildung 100: Technische Zeichnung Aktormodulgehäuse V02T05

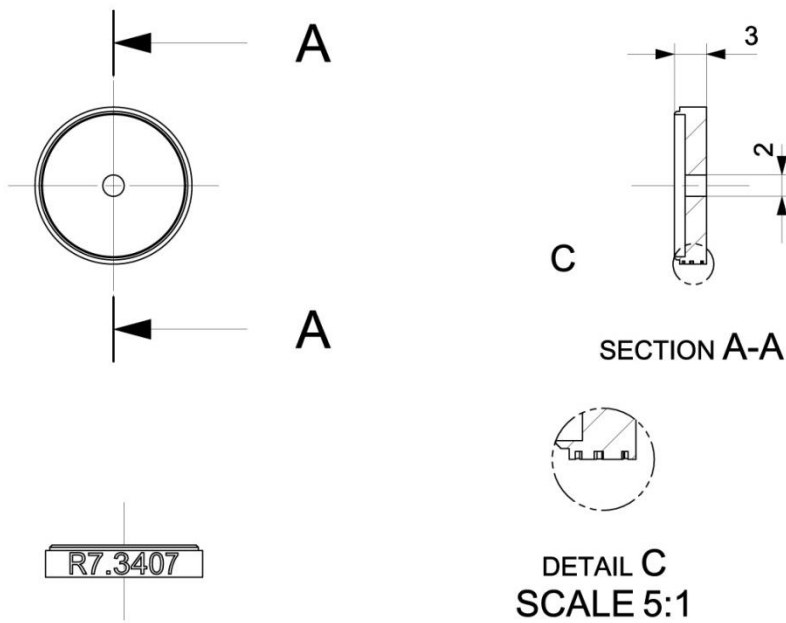


Abbildung 101: Technische Zeichnung Kappchen für Aktormodulgehäuse V02T05

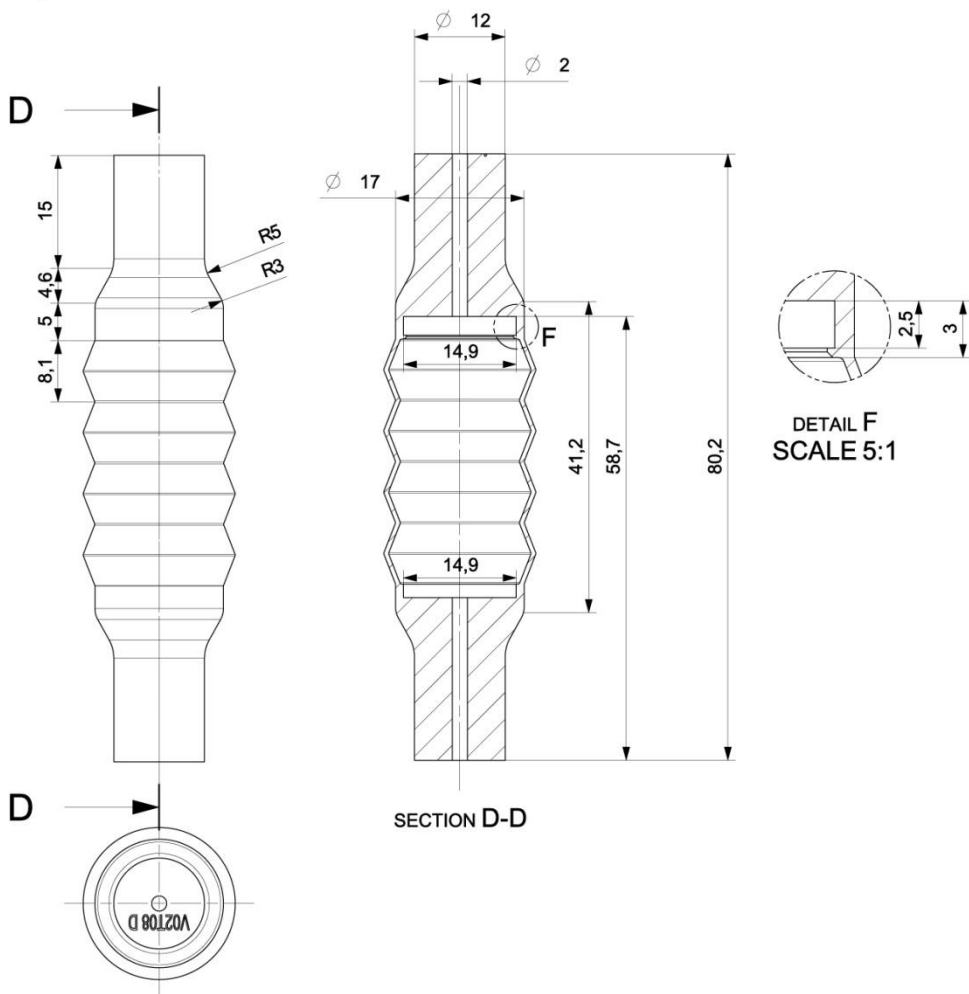


Abbildung 102: Technische Zeichnung Aktormodulgehäuse V02T08

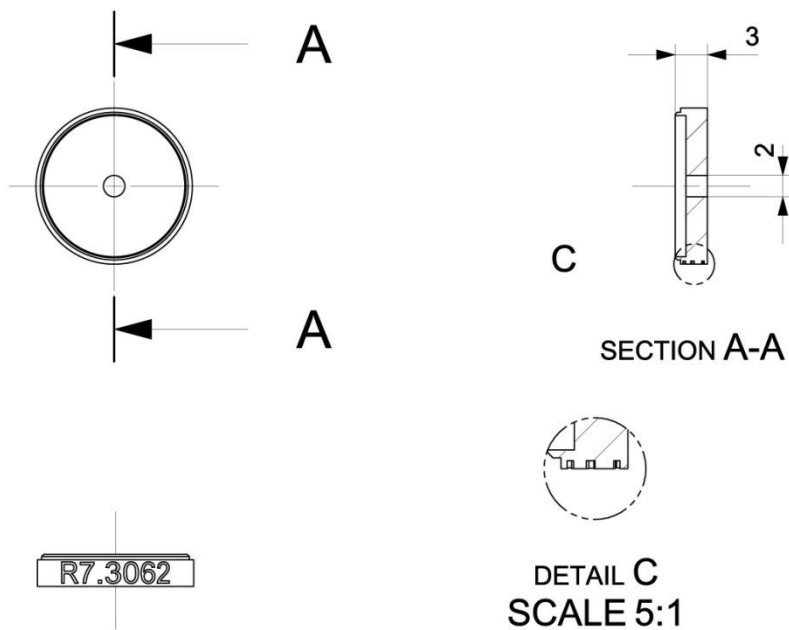


Abbildung 103: Technische Zeichnung Kappchen für Aktormodulgehäuse V02T08

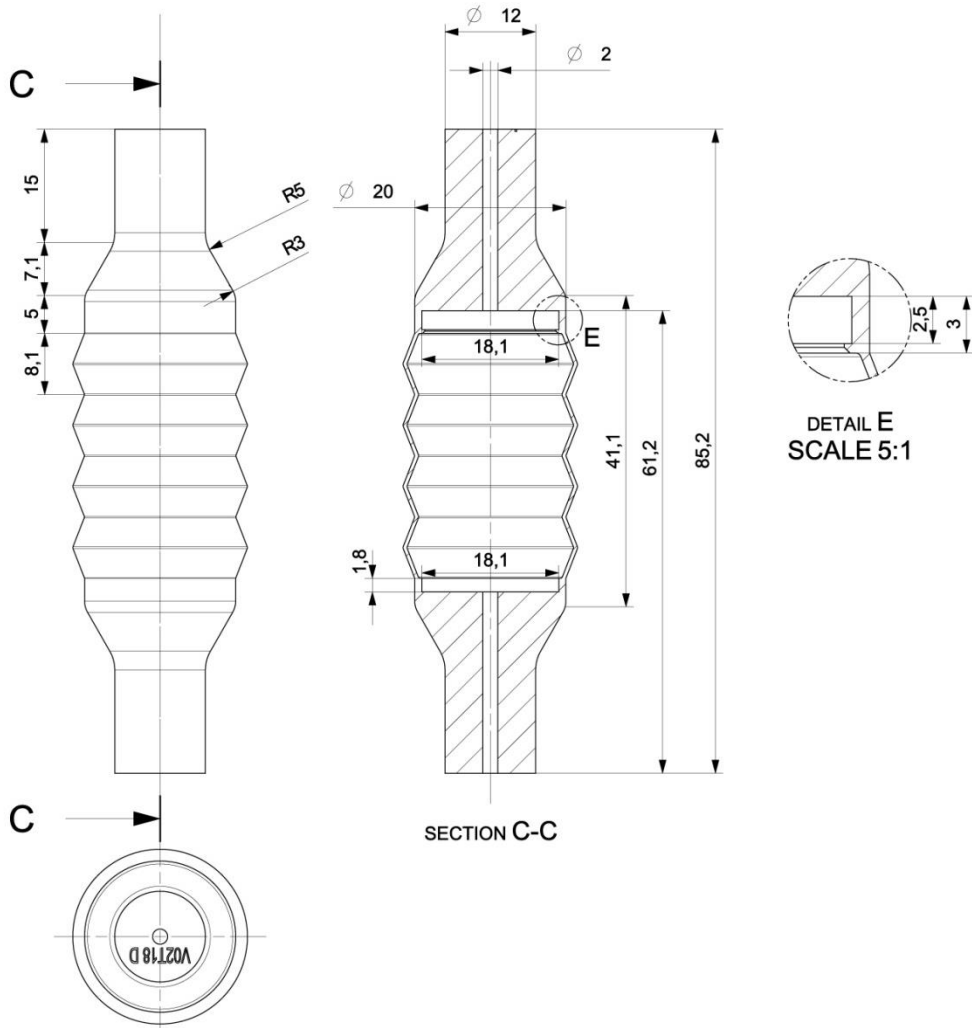


Abbildung 104: Technische Zeichnung Aktormodulgehäuse V02T18

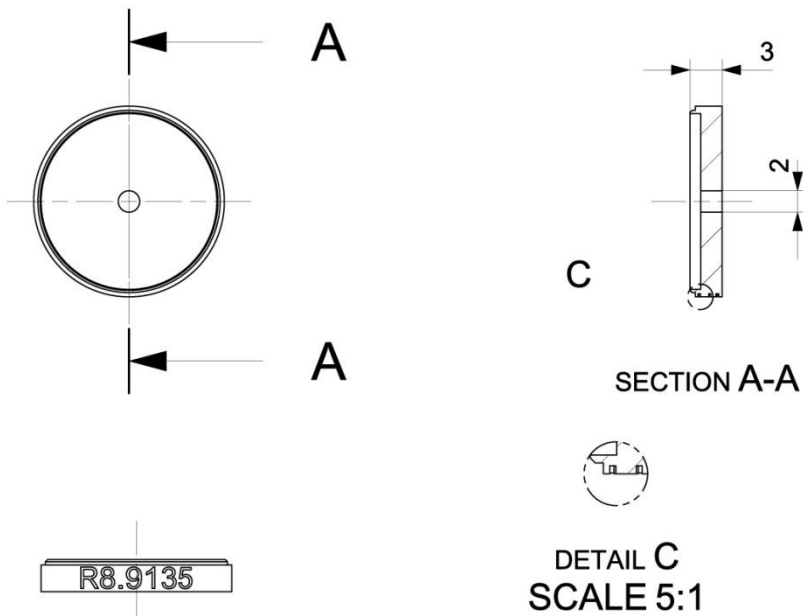


Abbildung 105: Technische Zeichnung Kappchen für Aktormodulgehäuse V02T18

Fotos der gebrochenen Probengeometrien

Tabelle 25: Aufnahmen der gebrochenen abgedrehten Proben sortiert nach Belastungshorizont

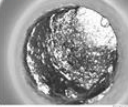
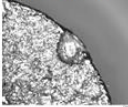
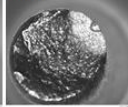
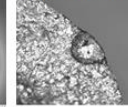

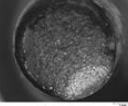
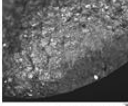
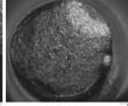
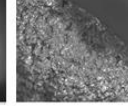

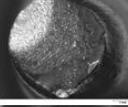
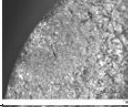
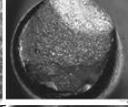
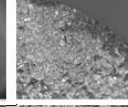

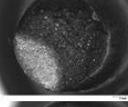
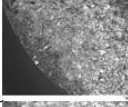
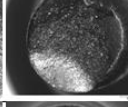
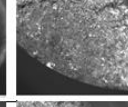

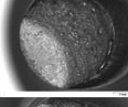
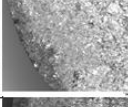
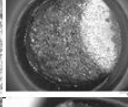


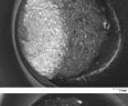

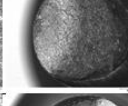
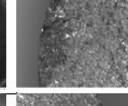

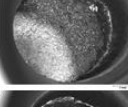
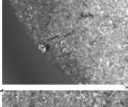
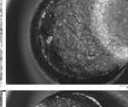
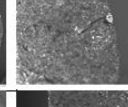

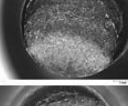
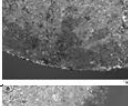
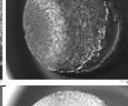
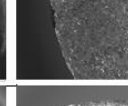

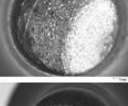

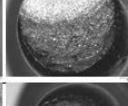
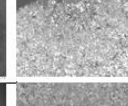

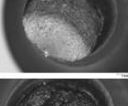
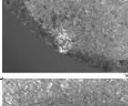
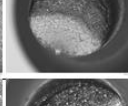
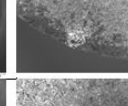

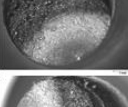
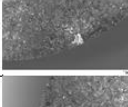
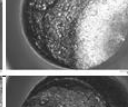
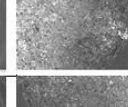

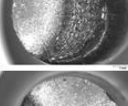
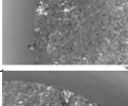
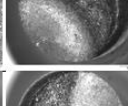
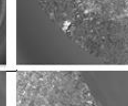

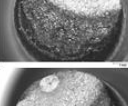
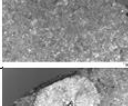
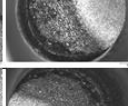
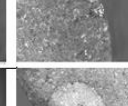

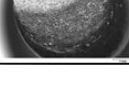




Bezeichnung	Spannung	Schwingungszahl	Foto oben		Foto unten		Foto seitlich
			ganz	Bruchausgang	ganz	Bruchausgang	
B_00_1	600	10.563					 oben unten
B_00_19	600	82.615					 oben unten
B_00_18	580	140.442					 oben unten
B_00_16	580	160.546					 oben unten
B_00_13	560	492.240					 oben unten
B_00_17	560	945.884					 oben unten
B_00_15	540	715.883					 oben unten
B_00_20	540	1.618.811					 oben unten
B_00_3	520	302.630					 oben unten
B_00_4	500	139.007					 oben unten
B_00_5	500	243.249					 oben unten
B_00_6	500	559.724					 oben unten
B_00_9	495	860.739					 oben unten
B_00_14	495	8.092.655					 oben unten

Tabelle 26: Aufnahmen der gebrochenen unbehandelten Proben sortiert nach Belastungshorizont

Bezeichnung	Spannung	Schwingungszahl	Foto oben		Foto unten		Foto seitlich
			ganz	Bruchausgang	ganz	Bruchausgang	
C_10_8	600	8.989					
C_00_16	500	65.971					
C_10_7	500	79.460					
C_00_15	500	85.600					
C_10_4	500	92.823					
C_00_2	500	102.402					
C_00_14	400	96.316					
C_10_1	400	147.468					
C_10_5	400	173.644					
C_00_4	400	178.153					
C_00_3	400	188.803					
C_00_1	376	82.264					
C_00_5	300	262.706					
C_00_18	300	342.219					

Bezeichnung	Spannung	Schwing- spielzahl	Foto oben		Foto unten		Foto seitlich
			ganz	Bruchausgang	ganz	Bruchausgang	
C_00_17	300	382.432					
C_10_6	300	385.073					
C_10_3	300	521.754					
C_10_18	260	503.887					
C_00_7	260	525.654					
C_10_19	250	978.585					
C_10_11	250	991.485					
C_10_15	250	1.896.383					
C_10_12	240	727.005					
C_10_20	240	943.036					
C_00_10	220	882.176					
C_00_13	220	1.932.924					
C_00_8	200	916.984					

Fotos der geprüften Aktormodulgehäuse

Tabelle 27: Aufnahmen der Aktormodulgehäuse des Typs V02T05 sortiert nach Belastungshorizonten


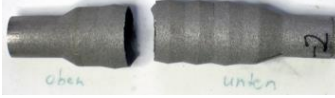



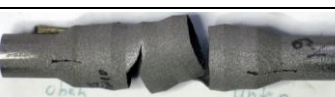
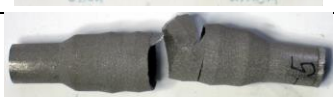





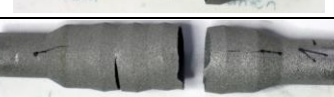






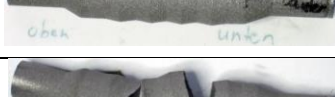
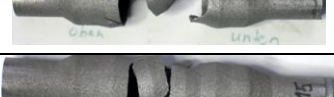





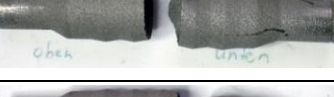
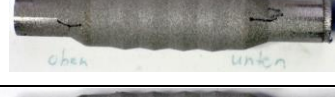
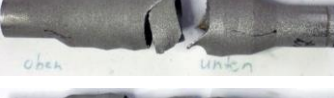











Bezeichnung	Spannung	Schwing-spielzahl	Foto seitlich	Bezeichnung	Spannung	Schwing-spielzahl	Foto seitlich
V02T05_19	650	54.973		V02T05_2	400	426.352	
V02T05_1	620	60.986		V02T05_23	400	520.216	
V02T05_6	600	73.872		V02T05_9	400	563.943	
V02T05_5	600	77.937		V02T05_27	350	937.484	
V02T05_10	600	80.413		V02T05_30	350	939.489	
V02T05_7	550	99.088		V02T05_4	350	1.023.718	
V02T05_21	550	104.823		V02T05_22	345	1.513.367	
V02T05_11	550	112.156		V02T05_28	345	2.437.474	
V02T05_20	500	160.287		V02T05_3	345	10.000.000	
V02T05_12	500	162.539		V02T05_14	340	1.088.176	
V02T05_15	500	168.020		V02T05_26	340	1.152.113	
V02T05_18	450	187.690		V02T05_13	340	10.000.000	
V02T05_25	450	192.320		V02T05_16	335	10.000.000	
V02T05_17	450	252.319		V02T05_24	320	10.000.000	
V02T05_8	450	299.715		V02T05_29	219	10.000.000	

Tabelle 28: Aufnahmen der Aktormodulgehäuse des Typs V02T08 und V02T18 sortiert nach Belastungshorizonten

Bezeichnung	Spannung	Schwing-spielzahl	Foto seitlich
V02T18_3	700	139.184	
V02T18_5	650	109.554	
V02T18_2	600	164.296	
V02T18_10	500	270.026	
V02T18_9	500	352.071	
V02T18_6	500	384.521	
V02T18_8	450	532.262	
V02T18_1	450	805.090	
V02T18_4	425	10.000.000	
V02T18_7	400	10.000.000	

Bezeichnung	Spannung	Schwing-spielzahl	Foto seitlich
V02T08_3	650	62.209	
V02T08_8	600	97.454	
V02T08_1	500	195.124	
V02T08_4	500	222.318	
V02T08_6	400	675.177	
V02T08_9	375	1.028.255	
V02T08_2	370	1.439.735	
V02T08_5	365	1.556.093	
V02T08_10	360	1.256.865	
V02T08_7	355	10.000.000	

Berechnung zur Genauigkeit der ermittelten Dichte von abgedrehten SLM Proben:

Das Volumen der Standardrundprobe kann aus den CAD-Daten mit einer Genauigkeit von $0,1 \text{ mm}^3$ ermittelt werden und beträgt $6630,45 \text{ mm}^3$. Die durch das Unternehmen „Michael Pratzelt Zerspanung“ hergestellten Proben erreichen im Durchmesser eine Genauigkeit von mindestens $0,025 \text{ mm}$. Im Bereich der Einspannung variiert die Länge um bis zu $+0,3 \text{ mm}$, sodass das Volumen gegenüber den CAD-Daten angepasst werden muss.

$$\begin{aligned} V_{\text{Probe}} &= V_{\text{Probe CAD}} + (\text{Länge}_{\text{Probe}} - \text{Länge}_{\text{Probe CAD}}) \cdot \frac{d_{\text{max}}^2}{4} \cdot \pi \\ &= 6630,45 \text{ mm}^3 + (\text{Länge}_{\text{Probe}} - 80 \text{ mm}) \cdot \frac{(12 \text{ mm})^2}{4} \cdot \pi \end{aligned}$$

Bei einer Messgenauigkeit von $0,1 \text{ mm}$ in der Länge und einer Abweichung von $0,025 \text{ mm}$ im Durchmesser lässt sich die Volumenabweichungen bei der Standardrundprobe folgendermaßen abschätzen:

$$\begin{aligned} \Delta V &= (d_{\text{max}} + 0,025 \text{ mm})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \text{Länge}_{\text{Probe}} - d_{\text{max}}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \text{Länge}_{\text{Probe CAD}} \\ &= (12,025 \text{ mm})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 80,1 \text{ mm} - (12 \text{ mm})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 80 \text{ mm} = 49,1 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Das Volumen der Zentrierbohrung wird abgeschätzt mit $19 \text{ mm}^3 \pm 5 \text{ mm}^3$.

Das maximale Volumen einer Standardrundprobe liegt daher bei:

$$\begin{aligned} V_{\text{Probe max}} &= V_{\text{Probe CAD}} + \Delta V - V_{\text{Zentrierbohrung}} + \Delta V_{\text{Zentrierbohrung}} \\ &= 6630,45 \text{ mm}^3 + 49,1 \text{ mm}^3 - 19 \text{ mm}^3 + 5 \text{ mm}^3 = 6665,55 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Das minimale Volumen der Standardrundprobe beträgt:

$$\begin{aligned} V_{\text{Probe min}} &= V_{\text{Probe CAD}} - \Delta V - V_{\text{Zentrierbohrung}} - \Delta V_{\text{Zentrierbohrung}} \\ &= 6630,45 \text{ mm}^3 - 49,1 \text{ mm}^3 - 19 \text{ mm}^3 - 5 \text{ mm}^3 = 6557,35 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Eine Standardrundprobe mit einer Dichte von $7,8 \text{ g/cm}^3$ hat bei 100 %-iger Dichte folgende Masse:

$$\begin{aligned} m_{\text{Probe}} &= (V_{\text{Probe CAD}} - V_{\text{Zentrierbohrung}}) \cdot \delta_{\text{Edelstahl}} \\ &= (6630,45 \text{ mm}^3 - 19 \text{ mm}^3) \cdot 0,0078 \text{ g/mm}^3 = 51,569 \text{ g} \end{aligned}$$

Die Masse der Probe kann mit Hilfe einer Waage auf eine Genauigkeit von $\pm 10 \text{ mg}$ bestimmt werden. Damit ergibt sich für eine Standardrundprobe eine maximale Masse

von 51,579 g und eine minimale Masse von 51,559 g. Die Dichte der jeweiligen Probe lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\delta_{Probe} = \frac{m_{Probe}}{V_{Probe}} + \delta_{Luft}$$

Die Dichte von Luft bei 20 °C beträgt 0,000001204 g/mm³ und ist für diese Berechnung vernachlässigbar. Für die Standardrundprobe ergibt sich daher eine maximale Dichte von

$$\delta_{Probe\ max} = \frac{m_{Probe\ max}}{V_{Probe\ min}} = \frac{51,57931\ g}{6557,35\ mm^3} = 0,007866\ \frac{g}{mm^3}$$

und eine minimale Dichte von

$$\delta_{Probe\ min} = \frac{m_{Probe\ min}}{V_{Probe\ max}} = \frac{51,55931\ g}{6665,55\ mm^3} = 0,007735\ \frac{g}{mm^3}.$$

Bei einer Edelstahl-Dichte von 0,0078 g/mm³ ergibt sich eine obere und untere Abweichung der relativen Dichte von:

$$\Delta\delta_{Probe\ max} = \frac{\delta_{Probe\ max}}{\delta_{Probe}} \cdot 100 - 100\ \% = \frac{0,007866\ \frac{g}{mm^3}}{0,00780\ \frac{g}{mm^3}} \cdot 100 - 100\ \% = 0,85\ \%$$

$$\Delta\delta_{Probe\ min} = 100\ \% - \frac{\delta_{Probe\ min}}{\delta_{Probe}} \cdot 100 = 100\ \% - \frac{0,007735\ \frac{g}{mm^3}}{0,0078\ \frac{g}{mm^3}} \cdot 100 = 0,83\ \%$$

Die relative Dichte kann folglich mit einer Genauigkeit von +0,85 % und -0,83 % angegeben werden.

Berechnung der Kerbwirkung bei Proben und Aktormodulgehäusen:

Berechnungen entsprechend Kapitel 2.2.1:

Berechnung des Einflussfaktors der Oberflächenrauheit K_F :

$$K_F = 1 - 0,22 * \lg\left(\frac{R_z}{\mu m}\right) * \left(\lg\left(\frac{R_m}{20 \frac{N}{mm^2}}\right) - 1\right)$$

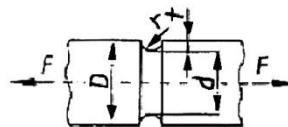
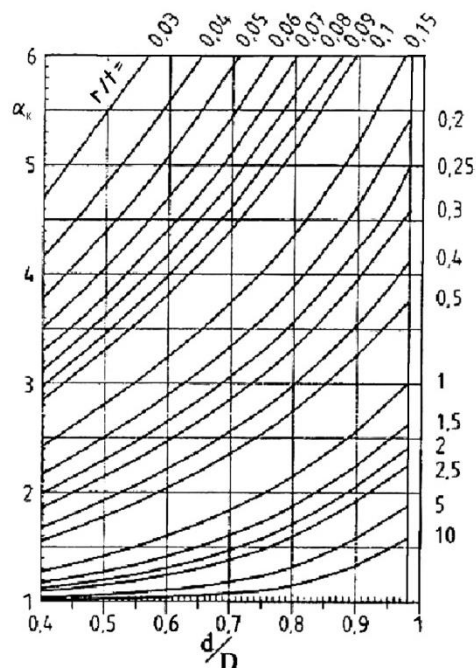
$$= 1 - 0,22 * \lg\left(\frac{108}{\mu m}\right) * \left(\lg\left(\frac{981 \frac{N}{mm^2}}{20 \frac{N}{mm^2}}\right) - 1\right) = 0,691$$

Daten der Gehäuse:

$$D = d + 2 * \frac{0,5 * 8,1}{\tan\left(\frac{\omega}{2}\right)}$$

Gehäusetyp	r bzw. ρ	t	D	d	r/t	d/D	ω	α_K	β
V02T05	0,3	0,72	18,43	17	0,41	0,92	160	3,6	2,01
V02T08	0,3	1,58	20,15	17	0,19	0,84	137,5	4,25	2,98
V02T18	0,3	1,58	23,15	20	0,19	0,86	137,5	4,3	2,92

Diagramm zum Ablesen der Formzahl α_K aus DIN 743 (2000, Bild 5):



Berechnung der Kerbwirkung:

$$\beta_{V02T05} = 1 + \frac{\alpha_K - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - \omega} \cdot \sqrt{2\rho^* \rho}} = 1 + \frac{3,6 - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - 0,89\pi} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot 0,05}} = 2,01$$

$$\beta_{V02T08} = 1 + \frac{\alpha_K - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - \omega} \cdot \sqrt{2\rho^* \rho}} = 1 + \frac{4,25 - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - 0,76\pi} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot 0,05}} = 2,98$$

$$\beta_{V02T18} = 1 + \frac{\alpha_K - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - \omega} \cdot \sqrt{2\rho^* \rho}} = 1 + \frac{4 - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - 0,76\pi} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot 0,05}} = 2,92$$

Berechnung der Dauer-Schwingfestigkeit im Zugschwellbereich für Aktormodulgehäuse:

$$\sigma_{Sch V02T05} = \frac{R_m \cdot 0,5}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1} = \frac{981 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,5}{2,01 + \frac{1}{0,691} - 1} = 199,62 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Sch V02T08} = \frac{R_m \cdot 0,5}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1} = \frac{981 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,5}{2,98 + \frac{1}{0,691} - 1} = 143,12 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Sch V02T18} = \frac{R_m \cdot 0,5}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1} = \frac{981 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,5}{2,92 + \frac{1}{0,691} - 1} = 145,67 \text{ N/mm}^2$$

Berechnung der Dauer-Schwingfestigkeit im Zug-Schwellbereich für Proben:

$$\sigma_{Sch Probe} = \frac{R_m \cdot 0,5}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1} = \frac{981 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,5}{1 + \frac{1}{0,691} - 1} = 338,94 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Sch Probe abgedreht} = \frac{R_m \cdot 0,5}{\beta + \frac{1}{K_F} - 1} = \frac{981 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,5}{1 + 1 - 1} = 490,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Sch Probe} / \sigma_{Sch Probe abgedreht} = 338,94 \text{ N/mm}^2 / 490,5 \text{ N/mm}^2 = 0,7$$

Ergebnisse zum Stand der Technik von SLM-Proben

Tabelle 29: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse zum Stand der Technik: „Schwingfestigkeit von SLM-Proben“

Quelle	Material	Bearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Ergebnisse
(Sehrt, Witt 2010)	1.4542 (Edelstahl)	abgedreht poliert Polarwinkel 90°	40 Proben (4 je Spannungsniveau) im 10N/mm ² Schritt	Die ermittelten Schwingfestigkeiten bei 10 ⁷ Schwingspielen liegen im Bereich konventionell hergestellter Proben. Neben der Analyse von statischer und dynamischer Festigkeit ist die Bruchzähigkeit besonders wichtig. Damit können Angaben über die erforderliche Höhe der Belastung gemacht werden, die zur Rissinitiierung bereits vorhandener Fehlstelle führen, da das Auftreten von Fehlern bei der Verarbeitung nicht völlig vermeidbar ist.
(Hooreweder et al. 2010)	SLS-PA12 Polyamid 12	12 h abgekühlt 48 h bei Raumtemperatur gelagert Polarwinkel 0°	5 Proben 23,6 MPA 3 Proben 18,9 MPA 3 Proben 17,7 MPA	Der Temperaturanstieg in Proben mit zunehmender Schwingspielzahl hat einen Einfluss auf die Langzeitfestigkeit. Außerdem sinkt die Langzeitfestigkeit signifikant mit abnehmender Dichte.
(Wang 2011)	Hastelloy ® X Nickelbasislegierung	Polarwinkel 0° / 90° HIP (hot isostatic pressing) treatment	6 SLM Polarwinkel 0°	HIP-Behandlung verbessert die Festigkeitseigenschaften um ca. 50 N/mm ² . Ungeschmolzene Partikel in der Probe, sind für Rissinitiierung verantwortlich. Die Variation in der Mikrostrukturheterogenität, verursacht durch ungeschmolzene Partikel, beeinflusst die Entstehung von Ermüdungsrissen und damit die Langzeitfestigkeit. Dies wird umso wichtiger mit zunehmender Zykluszahl, wenn Rissbildung zum dominierenden Teil der gesamten Lebensdauer wird. HIP-Behandlung ist hervorragend als Nachbearbeitungsprozess geeignet, um Fehlstellen in SLM Teilen zu beseitigen. Fehler, wie Risse, Porosität und ungeschmolzenes Pulver sind auch in Proben zu finden, die mit optimalen Parametern aufgebaut worden sind.
			je 6 SLM + HIP Polarw. 0° / 90° je 6 SLM as built Polarw. 0° / 90°	
(Starr et al. 2011)	1.4542 – (Edelstahl)	stehend abgedreht aus SLM-Stangen	10	Die Ergebnisse zeigen eine Wöhlerlinie mit einem eindeutigen Abknickpunkt, so dass ein Wert für die Dauerfestigkeit oberhalb von 500 N/mm ² gefunden werden kann. Oberflächenrauigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Wöhlerlinie.

Quelle	Material	Probenbearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Ergebnisse																																								
(Brandl et al. 2011, 2012)	AlSi10Mg	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amount of samples</th> <th>Platform temperature (°C)</th> <th>Building direction (°)</th> <th>Peak-hardened (T6)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>12</td><td>30</td><td>90</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>30</td><td>0</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>30</td><td>45</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>9</td><td>300</td><td>90</td><td>No (as-built)</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>90</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>0</td><td>No (as-built)</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>0</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>45</td><td>No (as-built)</td></tr> <tr><td>10</td><td>300</td><td>45</td><td>Yes</td></tr> </tbody> </table> <p>abgedreht Scangeschwindigkeit 50 mm/s und 500 mm/s</p>	Amount of samples	Platform temperature (°C)	Building direction (°)	Peak-hardened (T6)	12	30	90	Yes	10	30	0	Yes	10	30	45	Yes	9	300	90	No (as-built)	10	300	90	Yes	10	300	0	No (as-built)	10	300	0	Yes	10	300	45	No (as-built)	10	300	45	Yes		<p>Es gibt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Langzeitfestigkeit.</p> <p>Im Gegensatz zu Proben, die bei einer vorgeheizten Bauplattform von 300°C hergestellt worden sind, zeigen Proben, die bei 30°C Plattformtemperatur gebaut worden sind eine höhere Langzeitfestigkeit bei 0° Baurichtung als in 45° und 90° Richtung. Bei Scangeschwindigkeiten von 50 mm/s werden höhere Festigkeitswerte erzielt als bei einer Scangeschwindigkeit von 500 mm/s.</p> <p>Eine Reduzierung der Porengröße beziehungsweise Erhöhung der Dichte wirkt sich positiv auf die Langzeitfestigkeit aus. Spitzen-Härtung (6h bei 525°C und 7h bei 165°C) hat einen positiven Effekt auf die Langzeitfestigkeit, da die Mikrostruktur gegenüber der unbehandelten Probe homogenisiert wird.</p>
Amount of samples	Platform temperature (°C)	Building direction (°)	Peak-hardened (T6)																																									
12	30	90	Yes																																									
10	30	0	Yes																																									
10	30	45	Yes																																									
9	300	90	No (as-built)																																									
10	300	90	Yes																																									
10	300	0	No (as-built)																																									
10	300	0	Yes																																									
10	300	45	No (as-built)																																									
10	300	45	Yes																																									
(Gong et al. 2012)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	<p>Polarwinkel 0° sandgestrahlt</p> <p>Wärmebehandlung 650°C für 4 h in Argon-Umgebung</p>	<p>8 ohne Fehlstelle</p> <p>8 mit zylindrischer Fehlstelle (d=0,5mm, h= 0,4 mm)</p> <p>8 mit doppelt konischer Fehlstelle (d= 0,5 mm, h= 0,8 mm)</p>	<p>Fehlstellen von 5 mm Durchmesser im Probenquerschnitt beeinflussen die Langzeitfestigkeit von SLM-Proben hin zu niedrigeren Werten. Ein Unterschied zwischen zylindrischer und doppelt-konischer Fehlstelle konnte nicht festgestellt werden.</p>																																								
(Spierings et al. 2013)	<p>1.4404 (Stahl austenitisch, rostfrei)</p> <p>1.4540 Edelstahl</p>	<p>hand-poliert $R_a = 0,1 \mu\text{m}$</p> <p>abgedreht $R_a = 0,4 \mu\text{m}$</p> <p>as built $R_a = 10 \mu\text{m}$</p> <p>Polarwinkel 0°</p>	<p>jeweils 8-12 Proben</p>	<p>Das dynamische Verhalten von SLM-Proben liegt in der gleichen Größenordnung wie das von konventionell hergestellten Proben.</p> <p>Die Oberflächenrauigkeit unbearbeiteter Proben reduziert die Festigkeitswerte nur geringfügig, während abgedrehte und polierte Proben kaum Unterschiede im Bereich der Langzeitfestigkeit aufweisen.</p> <p>Kugelförmige Pulverteilchen, die an der Oberfläche angeschmolzen sind, führen nicht zu scharfen Oberflächenrissen oder Belastungskonzentration.</p> <p>Bekannte Einflüsse, wie anisotrope Effekte, Materialart, Verarbeitungsparameter und Wärmebehandlung haben einen Einfluss auf die Größe der inneren Poren. Diese beeinflussen die Rissausbreitung und die Bruchzähigkeit und somit das dynamische Verhalten.</p>																																								

Quelle	Material	Probenbearbeitung / Polarwinkel der Fertigung	Probenanzahl	Ergebnisse
(Leuders et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	Polarwinkel 0° abgedreht Wärmebehandlung (2h): -ohne -800° Argon -1050° Vakuum -HIP 1000 bar Argon	mindestens 3 Proben je Test 18 Proben für Treppenstufentest	SLM-Proben erreichen Ermüdungsfestigkeitswerte von konventionell verarbeitetem Werkstoff, sofern diese mittels heiß-isostatischem Pressen nachbehandelt worden sind. Heiß-isostatisches Pressen reduziert die Porosität und minimiert Restspannungen. Proben, die wärmebehandelt worden sind, erreichen zwar bessere Schwingfestigkeit bei 10 ⁷ Schwingspielen als unbehandelte Proben. Diese liegen jedoch unter der Langzeitfestigkeit von HIP-behandelten.
(Wycisk et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	$R_a \approx 13 \mu\text{m}$ as built $R_a \approx 0,5 \mu\text{m}$ poliert $R_a \approx 2,9 \mu\text{m}$ kugelgestrahlt Polarw. 45° /90° Wärmebehandlung 3h 650°C Argon-Kühlung	15 as built Polarwinkel 90° 12 as built Polarwinkel 45° 12 poliert Polarwinkel 90° 12 poliert Polarwinkel 45° 15 kugel-gestrahlt Polarwinkel 90°	Die Ermüdungsfestigkeit der unbearbeiteten (as built) Proben liegt bei ca. 40 % des Standardwertes (Ursache: minderwertige Oberflächenqualität). Die Ermüdungsfestigkeit der polierten Proben ist vergleichbar mit gegossenem Werkstoff. Für die signifikante Streuung bei der Ermüdungsfestigkeit der polierten Proben sind Oberflächen- und Untergrundrisse aufgrund variierender Dichte verantwortlich. Die Ermüdungsfestigkeit nach Kugelstrahlen liegt 15% unterhalb des Werts der polierten Proben. Risse entstehen hier insbesondere an inneren Poren. Poren oberhalb von 40 Mikrometer führten zum frühen Ausfall. Um zuverlässige Aussagen zur Langzeitfestigkeit für das SLM-Fertigungsverfahren zu machen, muss insbesondere die Porosität kontrolliert werden.
(Rafi et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	CNC-bearbeitet $R_a = 3 \mu\text{m}$ Polarwinkel 0°	9 Proben	Die Ermüdungsfestigkeit der SLM-Proben ist besser als bei Standardgussproben aufgrund der feinen, lamellaren und nadelförmige Mikrostruktur. Spaltbrüche entstehen im Inneren.
	1.4540 Edelstahl	Wärmebehandlung 4 h Ti-6Al-4V (650°C) 1.4540 (482°C)	15 Proben	Die Ermüdungsfestigkeit der SLM-Proben liegt etwa 20 % unterhalb der Standardgussproben. Dies ist vermutlich auf den Unterschied in der Oberflächenrauigkeit zurückzuführen (0,2 μm Standardprobe / 3 μm SLM-Probe). Spaltbrüche entstehen an der Oberfläche.

Quelle	Material	Probenbearbeitung	Probenanzahl	Ergebnisse
(Hooreweder et al. 2013)	Polyamid 12	12 h abgekühlt 48 h bei Raumtemperatur gelagert Fertigungsrichtung: Polarwinkel 0° / 90°	min. 15 für jede Wöhlerkurve ungekerbt Polarwinkel 0° ungekerbt Polarwinkel 90°	Der Ermüdungsbruch aller Proben wird durch zyklische mechanische Belastung kombiniert mit Temperatur-Effekten hervorgerufen. Durch die molekulare Bewegung, hervorgerufen durch hohe lokale zyklische Beanspruchung der Poren oder Initialrisse, erhöht sich die innere Temperatur, welches zu unterschiedlichen Phänomenen führen könnte (lokale Schmelzzone, Gleiten oberhalb der Glasübergangstemperatur, Umwandlung der Kristallstruktur von Gamma- zu Alpha-Form), die den Ermüdungsbruch verzögern. Die Bauart der SLM-Proben hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Schwingfestigkeit, die Dichte, den Grad der Kristallinität und die Kristallstruktur der Bauteile. Vollständiges Schmelzen führt zu gleicher Langzeitfestigkeit innerhalb und zwischen den Schichten. Trotz der Unterschiede in Bruchfestigkeit, Materialdichte, Kristallinität und Oberflächenrauigkeit, haben die spritzgegossenen und SLM-hergestellten Proben ähnliche Langzeitfestigkeitseigenschaften. Außerdem konvergieren alle Wöhlerkurven auf eine Langzeitfestigkeit > 18 MPa. Auffällig ist, dass die ermittelten Poren (10 µm-200 µm) keine stärkeren Auswirkungen auf die Lebensdauer haben, da das poröse Material bei Belastung verformt wird und Verschmelzung in den Mikrohohlräumen auftritt, welche nicht wie erwartet zur schnellen Rissbildung und Rissausbreitung führt. Gekerbt SLM-Proben zeigen ohne künstliche Kühlung gleichwertige beziehungsweise leicht erhöhte Langzeitfestigkeit im Vergleich zu den ungekerbten SLM-Proben. Dies wird der Kerbverfestigung, die auch im Zugversuch beobachtet worden sind zugeschrieben. Schwingfestigkeitstests an ungekerbten Proben führen zum Zähbruch mit halbkugelförmiger Vertiefung, während die Belastung der gekerbten Proben zum Sprödbruch führt (dreiachsiger Spannungszustand im Kerbgrund).
			min. 15 für jede Wöhlerkurve gekerbt Polarwinkel 0° gekerbt Polarwinkel 90°	
(Chan et al. 2013)	Ti-6Al-4V Titan-Legierung	erodiert $R_a \approx 7,67 \mu\text{m}$ as built $R_a \approx 38,5 \mu\text{m}$	10 Proben bei 600 MPa erodiert 10 Proben bei 600 MPa as built	SLM-Proben haben eine geringere Oberflächenrauigkeit als Elektronenstrahl-geschmolzenen (EBM) Proben. Die Einwirkung der Kerbwirkung auf die Langzeitfestigkeit ist daher bei SLM-Proben geringer. Außerdem wird mittels SLM eine höhere Dichte erzielt als bei EBM hergestellten Proben. In den SLM-Proben wurden keine inneren Poren festgestellt. Die Lebensdauer von SLM-Proben mit erodierter Oberfläche ($R_a = 5 \mu\text{m}$) ist aufgrund unterschiedlicher Spannungskonzentrationen durch Kerbwirkung an der Oberfläche höher als die mit unbearbeiteter Oberfläche ($R_a = 38 \mu\text{m}$). Geschmiedete Proben erzielten signifikant höhere Langzeitfestigkeiten, auch im Vergleich zu gegossenen Proben. Oberflächenkerben zeigen unterm Rasterelektronenmikroskop die Initiierung von Rissen.

Auswahl von Aktormodulgehäusen

Tabelle 30: Auswahl zur Verfügung stehender Aktormodulgehäuse und Belastungsfälle für die experimentellen Schwingfestigkeitsuntersuchungen


DP	Nr.	Probe	Kraft [N]	Wand- dicke [mm]	Kerb- winkel [°]	Radius [mm]	Vergleichsspannung von Mises[N/mm ²]	Dehnung [μm]	Steifigkeit [N/μm]
1424	53	V02T23	1000	0,6	160	9,25	102	10	98,22
1406	35	V02T05	1000	0,6	160	8,50	107	11	92,95
1401	30	V02T27	500	0,5	137,5	9,25	110	15	33,41
1383	12	V02T09	500	0,5	137,5	8,50	113	15	33,01
1416	45	V02T15	1000	0,5	160	10,00	122	12	82,17
1425	54	V02T24	1000	0,5	160	9,25	127	13	78,75
1407	36	V02T06	1000	0,5	160	8,50	133	13	75,11
1442	71	V02T14	1500	0,6	160	10,00	146	15	103,23
1451	80	V02T23	1500	0,6	160	9,25	153	15	98,22
1433	62	V02T05	1500	0,6	160	8,50	160	16	92,95
1414	43	V02T13	1000	0,4	160	10,00	160	16	62,15
1423	52	V02T22	1000	0,4	160	9,25	166	17	60,11
1418	47	V02T17	1000	0,6	137,5	10,00	169	22	45,79
1405	34	V02T04	1000	0,4	160	8,50	173	17	57,86
1427	56	V02T26	1000	0,6	137,5	9,25	175	22	44,79
1409	38	V02T08	1000	0,6	137,5	8,50	182	23	43,78
1443	72	V02T15	1500	0,5	160	10,00	184	18	82,17
1452	81	V02T24	1500	0,5	160	9,25	191	19	78,75
1469	98	V02T14	2000	0,6	160	10,00	194	19	103,23
1434	63	V02T06	1500	0,5	160	8,50	200	20	75,11
1478	107	V02T23	2000	0,6	160	9,25	203	20	98,22
1419	48	V02T18	1000	0,5	137,5	10,00	213	30	33,78
1460	89	V02T05	2000	0,6	160	8,50	213	22	92,95
1428	57	V02T27	1000	0,5	137,5	9,25	219	30	33,41
1412	41	V02T11	1000	0,6	115	10,00	220	46	21,69
1410	39	V02T09	1000	0,5	137,5	8,50	226	30	33,01
1421	50	V02T20	1000	0,6	115	9,25	227	47	21,48
1403	32	V02T02	1000	0,6	115	8,50	233	47	21,26
1441	70	V02T13	1500	0,4	160	10,00	241	24	62,15
1470	99	V02T15	2000	0,5	160	10,00	245	24	82,17
1450	79	V02T22	1500	0,4	160	9,25	249	25	60,11
1445	74	V02T17	1500	0,6	137,5	10,00	254	33	45,79
1479	108	V02T24	2000	0,5	160	9,25	255	25	78,75
1432	61	V02T04	1500	0,4	160	8,50	259	26	57,86
1454	83	V02T26	1500	0,6	137,5	9,25	263	33	44,79
1461	90	V02T06	2000	0,5	160	8,50	266	27	75,11

Auswahlkriterien:

1. Vergleichsspannung von Mises > 100 N/mm²

2. Vergleichsspannung von Mises < 270 N/mm²

3. Gehäuse, die in > 3 Kriterien ungeeignet sind

4. ungeeignet 

simulierte Kraft < 1 kN

Wanddicke 0,4 mm

Kerbwinkel 115 °

Radius 10 mm

Dehnung > 40 μm

Vergleichsspannung < 150 N/mm²

5. geeignet 

simulierte Kraft > 1 kN

Wanddicke 0,6 mm

Kerbwinkel 160 °

Radius 8,5 mm

Vergleichsspannung > 180 N/mm²
< 256 N/mm²

Literaturverzeichnis

- Abe, Satoshi; Higashi, Yoshikazu; Fuwa, Isao; Yoshida, Norio; Yoneyama, Takeshi (2007a):** Milling-Combined Laser Metal Sintering System and Production of Injection Molds with Sophisticated Functions. In: The 11th International Conference on Precision Engineering (ICPE) August 16-18, 2006, Tokyo, Japan, S. 285-290. London: Springer-Verlag.
- Abe, Satoshi; Higashi, Yoshikazu; TogeYama, Hiroshika; Fuwa, Isao; Yoshida, Norio (2007b):** Development of milling-combined laser metal sintering method. Combination of laser-assisted metal sintering method and the milling in one machine. In: Journal of the Japan Society for Precision Engineering Vol. 73 (Nr.8 - August 2007).
- Abele, Eberhard; Dejkun, Vitali; Dietz, Sören; Fischer, Jakob; Kniepkamp, Michael; Stoffregen, Hanns (2014):** Hybrid Manufacturing in Medical Applications by Combining Selective Laser Melting and Milling. Manuscript Number: 2014-C-23R1. In: CIRP Annals Manufacturing Technology (Vol. 1).
- Assmann, Björn Olaf (2003):** Herstellung hochgenauer Prototypen mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid-Prototyping-Verfahren. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
- ASTM E 466 (1982):** Standard Practise for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia.
- ASTM E 606-80 (2004):** Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia.
- Bagel, Hans-Jürgen; Schulze Günter (Hg.) (2005):** Werkstoffkunde. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brandl, Erhard; Buchbinder, Damien; Meiners, Wilhelm; Müller-Lohmeier, Klaus; Wissenbach Konrad (2011):** Rapid Manufacturing von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion durch Selective Laser Melting (SLM). In: The European collaboration on Additive Manufacturing, S. 1–12, zuletzt geprüft am am 21.10.2013.
- Brandl, Erhard; Heckenberger, Ulrike; Holzinger, Vitus; Buchbinder, Damien (2012):** Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. In: Materials & Design 34, S. 159–169. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005590>, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Braun, Harald (2013):** Internal Sales. Kontaktperson des Unternehmens EOS GmbH auf der Messe Euromold am 5.12.2013 in Frankfurt am Main. EOS: Langzeitfestigkeit von AlSi10Mg. Krailling/München. Deutschland. 09.12.2013. Mail an Katja Butterweck.
- Breitbach, Elmar; Monner, Hans Peter; Algermissen, Stephan (2004):** Adaptronische Komponenten für den Maschinenbau. Institut für Strukturmechanik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Braunschweig. Online verfügbar unter http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/publikationen/2004/02_breitbach.pdf, zuletzt geprüft am 9.12.2013.

-
- Bremen, Sebastian; Meiners, Wilhelm; Diatlov, Andrei (2012):** Selective Laser Melting: A manufacturing technology for the future? In: Laser Technik Journal. Rapid Manufacturing 2012, S. 33–38. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.201290018/abstract>, zuletzt geprüft am 07.12.2013.
- Chan, Kwai S.; Koike, Marie; Mason, Robert L.; Okabe, Toru (2013):** Fatigue Life of Titanium Alloys Fabricated by Additive Layer Manufacturing Techniques for Dental Implants. In: Metall and Mat Trans A 44 (2), S. 1010–1022. Online verfügbar unter DOI: 10.1007/s11661-012-1470-4, zuletzt geprüft am 23.10.2013.
- Danjou, S.; Koehler, P. (2010):** Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-Kette. In: RTejournal - Forum für Rapid Technologie (6). Online verfügbar unter <http://www.rtejournal.de/ausgabe6/2210/ArtikelPDF.pdf>, zuletzt geprüft am 18.11.2012.
- Delgado, Jordi; Ciurana, Joaquim; Rodríguez, Ciro A. (2011):** Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. In: Int J Adv Manuf Technol 60 (5-8), S. 601–610. London:Springer-Verlag.
- DIN 743 (2000):** Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- DIN 8580 (2003):** Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung.
- DIN 50 100 (1979):** Werkstoffprüfung – Dauerschwingversuch – Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung.
- DIN 50 113 (1982):** Prüfung metallischer Werkstoffe – Umlaufbiegeversuch.
- DIN EN ISO 7438 (2005):** Metallische Werkstoffe – Biegeversuch.
- Dixon, J. W.; Mood, A. M. (1948):** A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. In: Journal of the American Statistical Association (43), S. 109-126. Online verfügbar unter http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1948.10483254#.Umjy_lNfs8Q, zuletzt geprüft am 23.10.2013.
- Dreher, Stefan (2004):** Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentstehung. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- EOS GmbH (2008):** EOSINT M 270. Technische Beschreibung. EOS GmbH – Electro Optical System. München.
- EOS GmbH (2009a):** EOS StainlessSteel GP1 für EOSINT M 270. Materialdatenblatt. EOS GmbH – Electro Optical System. München. Online verfügbar unter http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4714f5b687ee8a99/1794a3e9b9d03ea4aaf3ecf4eb9e7ce3/SS-GP1-M270_04-09_de.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2013.
- EOS GmbH (2009b):** Maschinenhandbuch EOSINT M270. EOS GmbH – Electro Optical System. München.
- EOS GmbH (2011a):** EOS Ti64 für EOSINT M 270. Materialdatenblatt. EOS GmbH – Electro Optical System. München. Online verfügbar unter http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/30716002f4859905/a21dcd2a70c26d8afe3ffad17d2da2fd/Ti-Ti64-M270-M280_Material_data_sheet_10-11_de.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2013.
- EOS GmbH (2011b):** EOS AlSi10Mg für EOSINT M 270. Materialdatenblatt. EOS GmbH – Electro Optical System. München.. Online verfügbar unter http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/2bbfdf00b45afe95/a35ce45fe1496ff15f5d1eb78bb7721a/AlSi10Mg-M270_11-11_de.pdf, zuletzt geprüft am 28.10.2013.

-
- Eul, Ursula (2011):** Know how für die Zukunft. In: Fraunhofer LBF annual Report 2011. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt. Online verfügbar unter <http://www.lbf.fraunhofer.de/de/presse/jahresberichte.html>, zuletzt geprüft am 7.12.2013.
- Erbrecht, Rüdiger; Felsch, Mathias; Köng, Hubert; Kricke, Wolfgang; Martin, Karlheinz; Pfeil, Wolfgang; Winter, Ralf; Wörstenfeld, Willi : (2003):** Das große Tafelwerk interaktiv – Formelsammlung für die Sekundarstufen I und II. 1. Aufl. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Fockele, Matthias (2005):** Vorrichtung zur Herstellung von Formkörpern. Europäische Patentschrift. Angemeldet durch Realizer GmbH, SLM Solutions GmbH am 2005. Veröffentlichungsnr: 2 052 845 B1.
- Gebhardt, Andreas (2007):** Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping - Rapid Tooling -Rapid Manufacturing. 3. Aufl. München: Hanser-Verlag.
- Gebhardt, Andreas (2012):** Understanding additive Manufacturing. Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufakturung.3. Aufl. München: Hanser-Verlag.
- Gong, Jaijun; Rafi, Khalid; Starr, Thomas; Stucker, Brent (2012):** Effect of defects on fatigue tests of as-built TI-6AL-4V parts, S. 499–506. Online verfügbar unter <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2012/2012-39-Gong.pdf>, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Grellmann, Wolfgang; Altstädt, Volker (2005):** Kunststoffprüfung. München: Hanser Verlag.
- Grubisic, Vatroslav; Sonsino, Cetin Morris (1992):** Einflussgrößen der Betriebsfestigkeit geschmiedeter Bauteile. Schmiedeteile. Bericht aus dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF). Darmstadt. In: Sonderdruck aus VDI-Z, Bd. 134, S. 105/12.
- Gu, Hengfeng; Gong, Haijun; Pal, Deepankar; Rafi, Khalid; Starr, Thomas; Stucker, Brent (2013):** Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel. In: SFF Symposium: Twenty Forth Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, S. 474-489. University Of Texas at Austin. Online verfügbar unter <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2013/2013-37-Gu.pdf>, zuletzt geprüft am 31.10.2013.
- Guido (2012):** Laserschweißen von Titan am DLR. Schweizer Maschinenmarkt 08/ 2012. Werkstofftechnik, S. 76-78.
- Haibach, Erwin (2006):** Betriebsfestigkeit. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hooreweder, Brecht Van; Coninck, Filip De; Moens, David; Boonen, Rene; Sas, Paul (2010):** Microstructural characterization of SLS-PA12 specimens under dynamic tension compression excitation. In: Elsevir Polymer Testing 29 (3), S. 319–326. Online verfügbar unter doi:10.1016/j.polymertesting.2009.12.006, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Hooreweder, Brecht Van; Moens, David; Boonen, Rene; Kruth, Jean-Pierre; Sas, Paul (2013):** On the difference in material structure and fatigue properties of nylon specimens produced by injection molding and selective laser sintering. In: Elsevir Polymer Testing 32 (5), S. 972–981. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.04.014>, zuletzt geprüft am 22.10.2013.

-
- Hötter, Jan-St.; Fateri, Miranda; Gebhardt, Andreas (2012):** Prozessoptimierung des SLM-Prozesses mit hochreflektiven und thermisch sehr gut leitenden Materialien durch systematische Parameterfindung und begleitende Simulation am Beispiel von Silber. In: RTejournal. Fachhochschule Aachen.
- Hück, M. (1981):** Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. In: Berichtsbände zu Sitzungen des DVM Arbeitskreises Betriebsfestigkeit. Herausgegeben vom Deutschen Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin. Berichtsband der 6. Sitzung, S. 147-176.
- Instron Structural Testing Systems (2003):** Elastomeric-Testing System MHF. Testing of Elastomeric Components and Frequencies up to 400 Hz. Maschinendatenblatt. Instron Structural Testing Systems GmbH. Darmstadt. Online verfügbar unter <http://www.instron.de/wa/library/streamfile.aspx?doc=425>, zuletzt geprüft am 1.11.2013.
- Karunakaran, K.P.; Suryakumar, S.; Bernard, Alain (2009):** Hybrid Rapid Manufacturing of Metallic Objects. 14èmes Assises Européennes du Prototypage & Fabrication Rapide. Indian Institute of technology Bombay, India. Ecole Centrale de Nantes, France. Paris, 24.06.2009.
- Kruth et al. (2010):** Part and material properties in selective laser melting of metals. Department of Mechanical Engineering. Catholic University, Belgium. Online verfügbar unter https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/265815/1/Kruth_ISEM-XVI_key_note_paper.pdf&gathStatIcon=true, zuletzt geprüft am 20.12.2013.
- Lee, Yung-Li; Barkey, Marc; Kang, Hong-Tae (2011):** Metal Fatigue Analysis Handbook: Practical problem solving techniques for Computer aided engineering. Michigan, USA: Elsevier Science & Technology.
- Leuders, S.; Thöne, M.; Riemer, A.; Niendorf, T.; Tröster, T.; Richard, H.A; Maier, H.J (2013):** On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. In: International Journal of Fatigue 48, S. 300–307. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011>, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Lin, Sheng-Kuei; Lee, Yung-Li; Lu, Ming-Wei (2001):** Evaluation of the staircase and the accelerated test methods for fatigue limit distributions. In: International Journal of Fatigue 23 (1), S. 75–83. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00039-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00039-6), zuletzt geprüft am 23.10.2013.
- Lipinski, P.; Barbas, A.; Bonnet, A.-S (2013):** Fatigue behavior of thin-walled grade 2 titanium samples processed by selective laser melting. Application to life prediction of porous titanium implants. In: Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 28, S. 274–290. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616113002683#>, zuletzt geprüft am 10.12.2013.
- Meindl, Matthias (2004):** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. Dissertation. Technische Universität München. Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik.
- Morgenstern, Christian; Lipp, Klaus; Gäth, N. (2006):** Wöhler- und Zufallslastenversuche an Proben. Darmstadt: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (Verfahrensbeschreibung VB 101 Version 2-4.5.2006).

-
- Murr, Lawrence E.; Martinez, Edwin; Hernandez, Jennifer; Collins, Shane; Amato, Krista N.; Gaytan, Sara M.; Shindo, Patrick W. (2012):** Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. In: Journal of Materials Research and Technology 1 (3), S. 167–177.
- Neuber, H. (1985):** Kerbspannungslehre. 3. Aufl. Berlin. Springer-Verlag.
- Neuber, H. (1968):** Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen. Konstruktion 20-7, S. 245–251.
- Ostermann, H. (1965):** Kennzeichnung der Dauerfestigkeit durch Mittelwert und Streuung. In: Beispiele angewandter Forschung, S. 33-40. Fraunhofer-Gesellschaft. München.
- Ott, Michael (2012):** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung. München: Utz (Forschungsberichte IWB, 264).
- Pohl, Ernst Joseph (1956):** Das Gesicht des Bruches metallischer Werkstoffe, Band I–III, Band I mit einem Vorwort von M. Pfender. Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin.
- Propawe, Reinhart (2005):** Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur; mit 26 Tabellen. Berlin.
- Pyttel, B.; Schwerdt, D.; Berger, C. (2011):** Very high cycle fatigue - Is there a fatigue limit? In: International Journal of Fatigue (33), S. 49–58. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.05.009>, zuletzt geprüft am 13.02.2014.
- Radaj, Dieter; Vormwald, Michael (2007):** Ermüdungsfestigkeit. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Rafi, H. Khalid; Starr, Thomas L.; Stucker, Brent E. (2013):** A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting. In: Int J Adv Manuf Technol 69 (5-8), S. 1299–1309. Online verfügbar unter doi:10.1007/s00170-013-5106-7, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Roos, Eberhard; Maile, Karl (2011):** Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 4. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Rossow, E. (1964):** Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den normal scores entsprechenden Prozentpunkte. Qualitätskontrolle 9 Nr. 12, S. 146, 147.
- Schäfer, Hans Joachim (2008):** Auswertalgorithmus auf der Basis einer Modifikation des Goniometrischen Modells zur stetigen Beschreibung der Wöhlerkurve vom Low-Cycle-Fatigue- bis in den Ultra-High-Cycle-Fatigue-Bereich. 1. Aufl. Aachen: Verlagshaus Mainz GmbH.
- Schröder, Susanne (2012):** Schneller Prototypenbau für schnelle Autos. In: rapidx 01/ 2012 Produktentwicklung und additive Fertigung. Dynamischer zur Mobilität von Morgen, S. 20–24. München: Carl Hanser Verlag.
- Schwab, Rainer (2013):** Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für Dummies – Fachkorrektur von Dr. Marianne Hammer-Altman. 2. Nachdruck. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sehrt, Jan Torsten (2010):** Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Dissertation. Universität Duisburg-Essen. Aachen: Shaker Verlag.

-
- Sehrt, Jan Torsten; Witt, Gerd (2010):** Dynamic strength and fracture toughness analysis of beam melted parts. In: Proceedings of the 36th International MATADOR Conference 2010, S. 385-388. Online verfügbar unter http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-84996-432-6_87, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Siddique, Shafagat (2013):** HCF Performance of Ti-6Al-4V Alloy. TU Dortmund - Fachgebiet Werkstoffprüftechnik - Doktorand. Dortmund, Deutschland, 17.10.2013. Mail an Katja Butterweck.
- Siebel, E.; Gaier, M. (1956):** Untersuchungen über den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile. VDI-Z. 98 (1956), 1715–1724
- Sonsino, Cetin Morris (1995):** Kriterien für eine schwingfeste Bemessung von gesinterten Hochleistungsbauteilen S. 1-2, 13. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit. Darmstadt.
- Sonsino, Cetin Morris (2007):** Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. In: International Journal of Fatigue (29), S. 2246–2258. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.11.015>, zuletzt geprüft am 13.02.2014.
- Sonsino, Cetin Morris (2008):** Betriebsfestigkeit – Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. In: MP Materials Testing (50), S. 77 – 90. München: Carl Hanser Verlag. Online verfügbar unter <http://www.materialstesting.de/MP100862>, zuletzt geprüft am 17.10.2013.
- Spierings, Adriaan (2013):** Fatigue performance of additive manufactured metall parts. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich - Leitung Forschung & Entwicklung SLM. Zürich, Schweiz, 17.10.2013. Mail an Katja Butterweck.
- Spierings, Adriaan B.; Starr, Thomas L.; Wegener Konrad (2013):** Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. In: Rapid Prototyping Journal 19/2 2013 2013 (19/2), S. 88–94. Online verfügbar unter www.emeraldinsight.com/1355-2546.htm, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Stamp, R.; Fox, P.; O'Neill, W.; Jones, E.; Sutcliffe, C. (2009):** The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. In: J Mater Sci: Mater Med 20 (9), S. 1839–1848.
- Starr, Thomas L.; Scherzer, Chris; Smith, Alex (2011):** Tensile and Fatigue Performance of Laser Sintered Stainless Steels. In: SAMPE Direct Part Manufacturing Workshop. 29.-30. März 2011. Online verfügbar unter <http://www.midwestsampe.org/content/files/events/dpmworkshop/metals/Metals%20Starr.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2013.
- Stoffregen, Hanns; Fischer, Jakob; Flaschenträger, David; Rauschenbach, Matthias; Nuffer, Jürgen; Melz, Tobias; Abele, Eberhard (2011):** Additive Manufacturing of Adaptive Components by Selective Laser Melting. In: 14th Intl. Adaptronic Congress, Darmstadt, 7.-8. Sept. 2011, S. 82-89.
- Stoffregen, Hanns; Flaschenträger, David; Abele, Eberhard; Bein, Thilo (2013):** Selective Laser Melting of Application Tailored Housings for Piezoceramic Actuators. ISPA 2013 - International Symposium on Piezocomposite Applications. Dresden, 19.09.2013.
- Stoffregen, Hanns:** Unveröffentlichtes Manuskript zur Analyse von SLM-Proben. Dichte, Zugfestigkeit, Streckgrenze. Ergebnisse des Simulationsmodells für Aktormodulgehäuse. 17.12.2013.

-
- Urban, Kamilla (2013):** Doktorandin Fraunhofer-IPK – Additive Fertigung. Berlin. Dissertation im Bereich der Dauerfestigkeit von Nickelbasis-Legierung. 5.10.2013. Gespräch auf der Messe Euromold in Frankfurt am Main mit Katja Butterweck.
- VDI 3404 (2009):** Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen.
- VDI 3405-2 (2012):** additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing Strahlschmelzen metallischer Bauteile Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung.
- Wagener, Rainer (2013):** Werkstoffspezialist, Kontaktperson zum Unternehmen „Michael Patzelt Zerspanung“. LBF. Darmstadt-Kranichstein. 14.10.2013. Gespräch zur Probenherstellung im Rahmen dieser Masterarbeit mit Katja Butterweck, Benjamin Möller, Hanns Stoffregen und Rainer Wagener.
- Wang, Fude (2011):** Mechanical property study on rapid additive layer manufacture Hastelloy® X alloy by selective laser melting technology. In: Int J Adv Manuf Technol 58 (5-8), S. 545–551. Online verfügbar unter doi:10.1007/s00170-011-3423-2, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Wiesner, Andreas (2008):** Selective Laser Melting. In: Laser Technik Journal. Generative Verfahren(4.), S. 5. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wu, Jui-Hung; Lin, Chin-Kuang (2002):** Tensile and Fatigue Properties of 17-4 PH Stainless Steel at High Temperatures. In: Metallurgical and materials transactions A Juni 2002 (2002 (33A), S. 1715–1724. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/article/10.1007/s11661-002-0180-8#page-1>, zuletzt geprüft am 14.12.2013.
- Wycisk, Eric; Emmelmann, Claus; Siddique, Shafaqat; Walther, Frank (2013):** High Cycle Fatigue (HCF) Performance of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting. In: AMR 816-817, S. 134–139. Online verfügbar unter doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.816-817.134, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- Yavari, S.; Wauthle, R.; van der Stok, J.; Riemsdag, A.C; Janssen, M.; Mulier, M. et al. (2013):** Fatigue behavior of porous biomaterials manufactured using selective laser melting. In: Materials Science and Engineering: C 33 (8), S. 4849–4858. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2013.08.006>, zuletzt geprüft am 27.10.2013.