

Anlage zum Verwendungsnachweis

Forschungsvorhaben:

**Automotive Leichtbau-Strukturen aus Additiver Fertigung
mit lokal angepassten Eigenschaften (kurz „Addi-grad“),**

Förderkennzeichen:13FH735IX6

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 1: Kurzbericht

Zusammensetzung der Arbeitsgruppe im Forschungsvorhaben:

Technische Hochschule Mittelhessen, Kompetenzzentrum für Automotive, Mobilität und Materialforschung

Prof. Dr.-Ing. Udo Jung (udo.jung@autom.thm.de)

Andreas Kern (andreas.kern@autom.thm.de)

Continental Engineering Services & Products GmbH

Stefan Kammann (stefan.kammann@conti-engineering.com)

Markus Schnell (markus.schnell@conti-engineering.com)

Sascha Wörner (Sascha.Woerner@conti-engineering.com)

Nils Schreiter (nils.2.schreiter@conti-engineering.com)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Werkstoffmechanik:

Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (vormwald@wm.tu-darmstadt.de)

Prof. Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (beier@wm.tu-darmstadt.de)

Aufgabenstellung des Vorhabens „Addi-grad“

Das Forschungsvorhaben Automotive-Leichtbau-Strukturen aus Additiver Fertigung mit lokal angepassten Eigenschaften (kurz „Addi-grad“) ist Teil der BMBF-Förderlinie „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“ des Programms „Forschung an Fachhochschulen“ mit der übergeordneten Zielsetzung das additive Fertigungsverfahren Metall-Laserstrahlschmelzen (kurz SLM) zur Herstellung von tragenden Leichtbau-Strukturen im Automobil einzusetzen. Daraus ergeben sich die folgenden Teilziele:

- Nachweis, dass sich mit der Additiven Fertigung (SLM) bauteilähnliche Proben mit lokal angepassten Werkstoffeigenschaften herstellen lassen.
- Klärung und Dokumentation der in solchen gradierten Komponenten ablaufenden Schädigungsmechanismen.
- Auslegungskonzept zur rechnerischen Prognose der Bauteil-Lebensdauer bzw. zur Ermittlung einer zulässigen Fehlergröße.
- Additive Fertigung von Fahrzeugkomponenten mit gradierten und auf den jeweiligen Anwendungsfall optimal abgestimmten mechanischen Eigenschaften.

Ablauf des Vorhabens „Addi-grad“

Zum Start des Forschungsvorhabens im Januar 2020 wurden beim Wissenschafts-Praxis-Kooperations-Partner (kurz: WPK-Partner), der Continental Engineering Services & Products GmbH Werkstoffproben aus AlSi10Mg additiv gefertigt. Im Anschluss erfolgt eine Charakterisierung des Werkstoffs und der Proben durch die Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung, die Bestimmung der Dichte und Fehlstellen sowie die Ermittlung der quasi-statischen Eigenschaften.

Weiterhin werden im Anschluss Rissfortschrittsversuche an CT-Proben nach ASTM E647 zur Ermittlung von Rissfortschrittsraten für die Lebensdauer-Prognose und Schwingversuche an Rund- und Umlaufbiegeproben nach DIN 50100 für die Bestimmung Versagensschwingspielzahlen im Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt. Die Auswertung der Schwingversuche umfasst dabei die Untersuchung der Bruchflächen und Klärung der Schädigungsmechanismen mittels Fraktographie und metallographischer Analysen.

Basierend auf den Ergebnissen der im Vorhaben durchgeführten Versuche wird in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt ein Konzept für die Lebensdauer-Prognose erarbeitet und validiert.

Abschließend erfolgte in Abstimmung mit dem WPK-Partner die Konstruktion und additive Fertigung eines Musterbauteiles, bei welchen gradierte Eigenschaften vorteilhaft sind. Letztlich erfolgt die Anwendung des erarbeiteten Modells für die Lebensdauer-Prognose an den additiv gefertigten Musterbauteile und der experimentelle Nachweis in Schwingversuchen.

Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens „Addi-grad“

Für die Erbringung des Nachweises, dass sich mit der Additiven Fertigung (SLM) bauteilähnliche

Proben mit lokal angepassten Werkstoffeigenschaften herstellen lassen wurden im ersten Schritt verschiedene Werkstoffqualitäten definiert und beim WPK-Partner Continental Engineering Services & Products GmbH mit dem SLM-Verfahren hergestellt. Im Anschluss erfolgte die Charakterisierung der additiv gefertigten Proben. Damit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist beim SLM-Verfahren durch die Belichtungs- und Fertigungsstrategie die Porosität der Bauteile und damit auch die Materialeigenschaften gezielt zu beeinflussen.

Weiterhin konnten im Rahmen der durchgeführten Rissfortschritt- und Schwingversuche die Schädigungsmechanismen in gradierten Komponenten geklärt werden. Durch die im Material enthaltenen Fehlstellen können Kurzrisse initiieren, welche unter der aufgetragenen zyklischen Belastung wachstumsfähig sind. Im Folgenden bildet sich ein Langriss, welcher bei fortlaufender Belastung zum Versagen der Komponenten führt. Abhängig von der Porosität kann eine Rissinitiierung an mehreren Rissen beobachtet werden. In der Folge kann es zur Vereinigung von Rissen kommen und die Lebensdauer der Komponenten nimmt deutlicher ab.

Ein wichtiger Schritt beim Einsatz des SLM-Verfahrens zur Herstellung von tragenden Leichtbaustrukturen im Automobil ist die Bereitstellung eines Verfahrens für die Bewertung der Lebensdauer additiv gefertigter Komponenten. Dafür wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein entsprechendes neues Konzept erarbeitet, welches eine rechnerische Abschätzung der Lebensdauer additiv gefertigter Komponenten ermöglicht und die Möglichkeit bietet gradierte Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Der zentrale Baustein ist dabei die stochastische Modellierung der im Material enthaltenen Fehlstellen und die Berücksichtigung der Oberflächenrauheit. Für die Validierung wurde das neu entwickelte Verfahren in Python implementiert und an den im Vorhaben durchgeführten Versuchen validiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Modell für alle Fälle eine leicht konservative Abschätzung der Lebensdauer bietet und sowohl den Einfluss der Porosität als auch den Einfluss der Oberflächenrauheit abbilden kann.

In Abstimmung mit dem WPK-Partner der Continental Engineering Service & Products GmbH ein Musterbauteil aus dem Automobilbau für die Anwendung des modifizierte additive Fertigungsverfahrens gewählt. Für einen optimalen Einsatz, der im Forschungsvorhaben gewählten Qualitäten wurde zunächst eine numerische Strukturoptimierung des Musterbauteils in dem Programm Hypermesh/Optistruct durchgeführt. Der daraus gewonnen Designvorschlag wurde als Grundlage für die Konstruktion des Musterbauteils mit gradierten Werkstoffeigenschaften verwendet, welches im Anschluss beim WPK-Partner Continental mit dem SLM-Verfahren hergestellt und im Labor der THM getestet wurde.

Anlage zum Verwendungsnachweis

Forschungsvorhaben:

**Automotive Leichtbau-Strukturen aus Additiver Fertigung
mit lokal angepassten Eigenschaften (kurz „Addi-grad“),**

Förderkennzeichen:13FH735IX6

Sachbericht zum Verwendungs- nachweis

Teil 2: Sachbericht

Zusammensetzung der Arbeitsgruppe im Forschungsvorhaben:

Technische Hochschule Mittelhessen, Kompetenzzentrum für Automotive, Mobilität und Materialforschung

Prof. Dr.-Ing. Udo Jung (udo.jung@autom.thm.de)

Andreas Kern (andreas.kern@autom.thm.de)

Continental Engineering Services & Products GmbH

Stefan Kammann (stefan.kammann@conti-engineering.com)

Markus Schnell (markus.schnell@conti-engineering.com)

Sascha Wörner (Sascha.Woerner@conti-engineering.com)

Nils Schreiter (nils.2.schreiter@conti-engineering.com)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Werkstoffmechanik:

Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald (vormwald@wm.tu-darmstadt.de)

Prof. Dr.-Ing. Heinz Thomas Beier (beier@wm.tu-darmstadt.de)

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend sind die in den Jahren 2019 bis 2024 im Vorhaben angefallenen Zahlungen gemäß der Positionen 812 „BAT-Angestellte“ bis Position 850 „Investitionen“ aufgelistet:

Tabelle 1: Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für das Vorhaben Addi-grad gemäß dem Verwendungsnachweis für Zuwendungen auf Ausgabenbasis mit PP

Position Gesamtfinanzierungsplan	Entstandene Ausgaben insgesamt bis einschl. 2024	Gesamtfinanzierungsplan
0812	278.303,65 €	277.713,60 €
0817	0,00 €	0,00 €
0820	0,00 €	0,00 €
0822	23.082,51 €	24.424,00 €
0831	2.792,33 €	2.832,66 €
0834	2.439,50 €	2.448,88 €
0835	76.357,15 €	75.652,56 €
0843	46.463,35 €	46.397,68 €
0846	6.178,69 €	6.487,44 €
0850	58.111,58 €	58.111,58 €
Summe:	493.728,76 €	493.068,40 €

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet des Forschungsvorhabens gibt es keine nennenswerten Erkenntnisse von anderen Stellen. Das hier vorliegende Ergebnis lässt sich auf dem Gebiet der funktional gradierten bzw. abgestuften Materialien (engl. functionally graded materials) einordnen.

Durch die im Vorhaben entwickelten Fertigungsparameter und Belichtungsstrategien ergibt sich eine neue Möglichkeit, die Porosität innerhalb eines Bauteils gezielt zu variieren (engl. functionally graded porous structures). Eine andere Möglichkeit die Porosität innerhalb eines Bauteils zu variieren, bieten Gitterstrukturen. Hierbei wird die Porosität des Bauteils durch das Hohlvolumen der Gitterstrukturen bestimmt (siehe Saleh et al. [13]). Der hier vorgestellte Ansatz die Porosität von additiven gefertigten Bauteilen im SLM-Verfahren über Fertigungsparameter und Belichtungsstrategie zu variieren, bietet eine Alternative zur Verwendung von Gitterstrukturen.

Erzieltes Forschungsergebnis 1

„Nachweis, dass sich mit der Additiven Fertigung (SLM) bauteilähnliche Proben mit lokal angepassten Werkstoffeigenschaften herstellen lassen“ (siehe Projektantrag, Seite 7)

Um das angestrebte Forschungsergebnis zu erreichen, wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Additive Fertigung von AlSi10Mg Werkstoffproben mit gradierten Eigenschaften inklusive der Festlegung und Variation geeigneter Belichtungsstrategien und spezieller Fertigungsparameter Die genaue Anzahl der einzelnen Proben kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. **(AP 1, Finanzposition 0843).**

Tabelle 2: Im Forschungsvorhaben, beim WPK-Partner Continental Engineering Services & Products GmbH additiv gefertigte Werkstoffproben

Werkstoffproben separat additiv gefertigt		
Für Werkstoff-Charakterisierung	9 Stück (3 je Qualität)	Charge 1
Für Zugversuche	9 Stück (3 je Qualität)	Charge 1
Für Schwingversuche	90 Stück (30 je Qualität)	Charge 2 + 3
Für Rissfortschritts-Untersuchung	60 Stück (20 je Qualität)	Charge 3 + 4
Werkstoffproben aus bauteilähnlichen Proben entnommen		
Für Werkstoff-Charakterisierung	15 Stück (5 je Qualität)	Charge 5
Für Schwingversuche	15 Stück (5 je Qualität)	Charge 5
bauteilähnliche Proben additiv gefertigt mit gradierten Eigenschaften		
Für Werkstoff-Charakterisierung	20 Stück	Charge 6
Für Schwingversuche	20 Stück	Charge 6

- Bestimmung und Dokumentation der chemischen Zusammensetzung des Werkstoff nach DIN EN 10351 durch Funkenspektralanalyse **(AP 3)**
- Untersuchung der relativen Dichte und der Porosität durch das Archimedische Verfahren nach DIN EN ISO 3369 **(AP 3)**
- Anfertigen von Metallografischen Schliffbildern zur Gefüge-Charakterisierung des additiv gefertigten Werkstoffs nach DIN EN ISO 643 **(AP 3)**
- Messung der mechanischen Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität durch Zugversuche an additiv gefertigten Werkstoffproben nach DIN EN ISO 6892-1 **(AP 3)**
- Anfertigung von Computertomographieaufnahmen für die Bestimmung von Anzahl, Größe und Verteilung von Defektstellen **(AP 3, Finanzposition 0835)**

Die Computertomographieaufnahmen waren im Projektantrag ursprünglich nicht vorgesehen, stellen aber zum aktuellen Zeitpunkt den Stand der Forschung für die Untersuchung der Defektstellen in additiv gefertigten Werkstoffen dar. Der WPK-Partner Continental Engineering Services & Products GmbH verfügt über eine entsprechende Einrichtung und das für die Analyse nötige Know-How. Finanziert wurden diese Aufnahmen mittels Umwidmung.

Alle durchgeführten Arbeiten waren für die Werkstoff- und Probencharakterisierung essenziell und wurden dem aktuellen Stand der Forschung entsprechend ausgewählt. Damit wurden im Einzelnen die folgenden Ergebnisse erzielt:

Werkstoffproben und Musterbauteile mit gradierten Eigenschaften

Die additive Fertigung aller Werkstoffproben und Musterbauteile wurde beim WPK-Partner Continental auf einer SLM-Anlage des Herstellers Trumpf durchgeführt. Hierfür gaszerstäubtes Al-Si-Mg Pulver verwendet. Der mittlere Pulverpartikeldurchmesser d_{50} liegt bei 36 μm , und die mittleren 80 % der Pulverpartikeldurchmesser liegen zwischen 21 μm und 53 μm liegt. Für die additive Fertigung wird eine Schichtdicke t von 60 μm verwendet. Als Belichtungsstrategie kam bei allen Qualitäten eine Schachbrettbelichtung ohne zusätzlichen Konturparameter zum Einsatz.

Für die additive Fertigung von Werkstoffproben mit gradierten Eigenschaften werden drei verschiedene Werkstoffqualitäten (Qualität a bis c) definiert. Qualität a stellt dabei den Prozessparameter mit der niedrigsten Porosität Φ ($< 1\%$) dar. Die für die Fertigung verwendete Volumenenergiedichte E_V beträgt 36,5 J/mm³. Die Porosität der mit Qualität b und c hergestellten Werkstoffproben liegt bei ca. 5 % (Qualität b) und bei 15 % (Qualität c). Gleichzeitig ist die Volumenrate V_R bei Qualität b und c höher als bei Qualität a. Für Qualität b liegt die Volumenrate V_R bei 21,0 mm³/s, für Qualität c beträgt diese das 1,5-fache der Volumenrate von Qualität b, also $V_R = 31,5$ mm³/s. Zur Übersicht sind in Tabelle 3 die für die additive Fertigung verwendete Laserleistung P_L , die verwendete Lasergeschwindigkeit V_L , sowie der Spurbabstand h_s aufgelistet.

Tabelle 3: Verwendete Prozessparameter für die additive Fertigung der Werkstoffproben mit Qualität a bis c

	P_L (W)	V_L (mm/s)	h_s (mm)	V_R (mm ³ /s)	E_v (J/mm ³)
a	420	1200	0,16	11,5	36,5
b	420	1400	0,25	21,0	20,0
c	420	1500	0,35	31,5	13,3

Für die Bestimmung der Mechanischen Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität (AP 3), zur Ermittlung der Rissfortschrittsrate sowie der Schwellenwerte (AP 4) und für die experimentelle Ermittlung der Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich (AP 4) sowie für die Klärung und Dokumentation und der Schädigungsmechanismen (AP 5) sind die verwendeten Werkstoffproben in Abbildung 1 dargestellt. Zug- und Schwingproben, wie in Abbildung 1, bei denen die Längsachse der Aufbau-richtung entspricht werden im Folgenden als „vertikal“ bezeichnet.

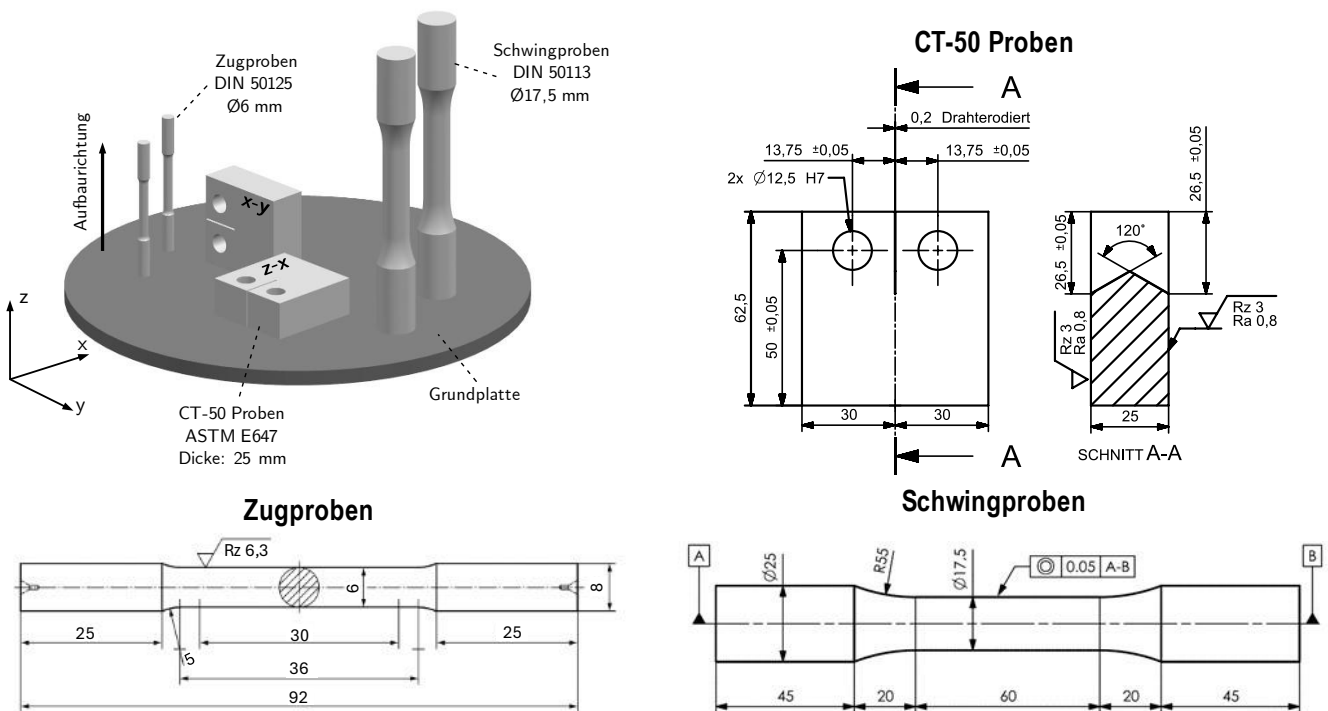


Abbildung 1: Übersicht der verwendeten Werkstoffproben für die Klärung der Schädigungsmechanismen und die Messung der mechanischen Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität

Relative Dichte und Porosität für drei verschiedene Qualitäten

Die Untersuchung der relativen Dichte und der Porosität wird durch das Archimedische Verfahren nach DIN EN ISO 3369 [11] sowie durch metallographische Schlitte nach DIN EN ISO 643 [10] durchgeführt. In Abbildung 2 sind metallographische Schlitte parallel zu den Pulverschichten in 16-facher Vergrößerung dargestellt.

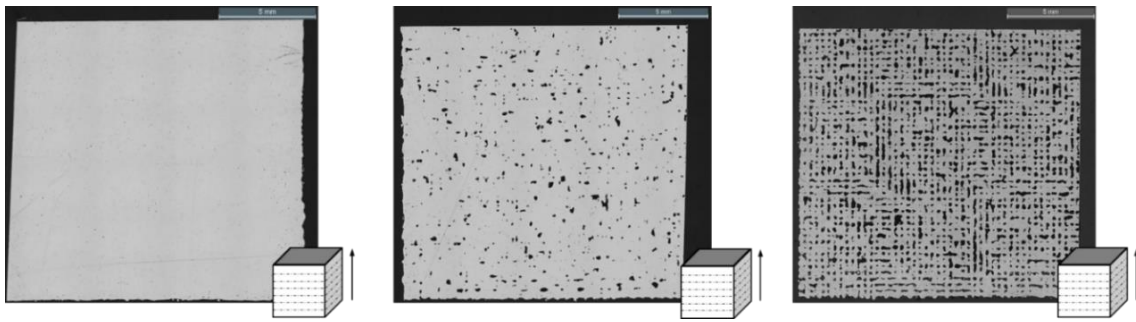


Abbildung 2: Metallographische Schlibfbildaufnahmen parallel zu den Pulversichten für die Werkstoffqualitäten a bis c

Im Vergleich der drei metallographischen Schlibfbildaufnahmen zeigt sich ein deutlicher Unterschied der verschiedenen Werkstoffqualitäten. Während für Qualität a nur wenige, kleine Defekte in den Aufnahmen zu beobachten sind, zeigen sich für Qualität b und c deutlich mehr und größere Fehlstellen. Dieser Trend lässt sich durch die Porosität unterstützen. Für Qualität a beträgt diese $\Phi = 0,2 \% \pm 0,1 \%$. Für Qualität b und c ist eine deutlich höhere Porosität zu messbar. Für Qualität b beträgt die Porosität $\Phi = 4,3 \% \pm 0,4 \%$ in den Schliffen parallel zu den Pulverschichten, während für Qualität c die Porosität $\Phi = 23,6 \% \pm 0,6 \%$ beträgt. Zwischen den Schliffen parallel zu den Pulversichten und den Aufnahmen senkrecht zu den Pulversichten ist lediglich für Qualität c ein Unterschied zu beobachten. In den Aufnahmen senkrecht zu den Pulverschichten sind längliche, streifenartige Fehlstellen sichtbar. Bauereiß et al. [4] fanden, dass sich bei niedriger Energiedichte, kleine Fehler in der aufgeschmolzenen Schicht zu großen streifenartigen Fehlstellen entwickeln können, welche sich als Folge über mehrere Schichten erstrecken.

Oberflächenqualität im as-built Zustand

Für die Untersuchung der Oberflächenqualität werden Messungen nach DIN EN ISO 3274 [2] mit dem Tastschnittverfahren durchgeführt. In Abbildung 3 sind Aufnahmen unter dem Lichtmikroskop bei 25-facher Vergrößerung der Oberflächen im as-built Zustand für Qualität a bis c dargestellt. Alle Messungen wurden in Längsrichtung an den Proben durchgeführt.

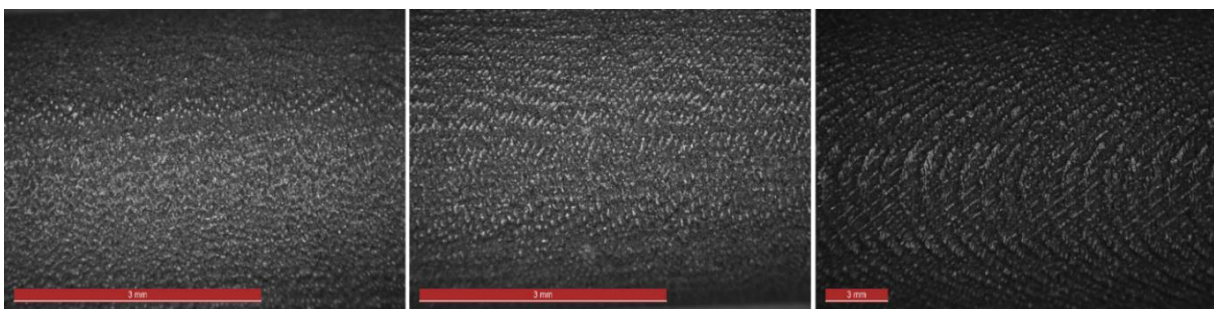


Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenqualität anhand von Lichtbildaufnahmen mit 16x Vergrößerung für die Werkstoffqualitäten a bis c

Für Qualität a beträgt die mittlere Rautiefe $R_z = 127,7 \pm 13,5 \mu\text{m}$. Für Qualität b ist eine, um ca. 16 % höhere Rautiefe R_z zu beobachten ($R_z = 148,4 \mu\text{m}$). Bei Qualität c ist die gemessene gemittelte Rautiefe R_z gegenüber Qualität a um 41 % höher ($R_z = 180,9 \mu\text{m}$).

Mechanische Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität durch Zugversuche an additiv gefertigten Werkstoffproben mit as-built Oberfläche nach DIN EN ISO 6892 - 1 [3]. In Abbildung 4 ist die experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kurve für Qualität a bis c dargestellt.

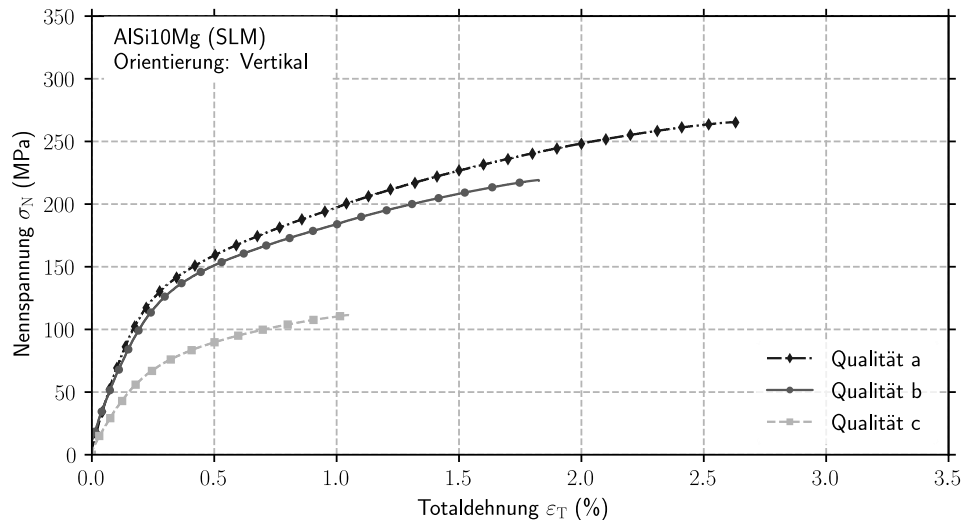


Abbildung 4: Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Zugversuchen für die Werkstoffqualitäten a bis c

Für Werkstoffqualität a beträgt die Zugfestigkeit im Mittel $R_m = 267,9 \text{ N/mm}^2$ bei einer Bruchdehnung $A_5 = 2,36 \%$. Bei den anderen Werkstoffqualitäten b und c ist die Zugfestigkeit geringer. Qualität b zeigt eine 15 % geringere Zugfestigkeit $R_m = 226,6 \text{ N/mm}^2$ als Qualität a. Für Qualität c ist die Zugfestigkeit ($R_m = 124,1 \text{ N/mm}^2$) um den Faktor 2 geringer als für Qualität a. Der Einfluss der Porosität ist am deutlichsten bei der Bruchdehnung. Qualität b weist eine um 24 % und Qualität c eine um 68 % niedrigere Bruchdehnung auf.

Einfluss der Porosität auf die mechanischen Eigenschaften

Einer Literaturstudie von Kan et al. [5] zufolge reagiert die Bruchdehnung deutlich empfindlicher auf eine höhere Porosität als die Zugfestigkeit. Als Hauptgrund für den großen Einfluss der Porosität auf das quasi-statische Verformungsverhalten werden von Kan et al. [5] fünf Faktoren genannt: (i) Die Reduktion des tragenden Querschnitts, (ii) erleichtern die Koaleszenz von Fehlstellen, was zu vorzeitigem Versagen führt, (iii) zeigen eine erhöhte Spannungskonzentration, (iv) dienen als Auslöser für Mikrorisse und (v) können einen Pfad für das Risswachstum zeigen.

Dies lässt sich auch im Vergleich der drei Werkstoffqualitäten beobachten. Qualität a zeigt hier die niedrigste Porosität und die besten mechanischen Eigenschaften. Für Qualität b und c sind deutlich schlechtere quasi-statische Eigenschaften zu beobachten. Zugfestigkeit R_m und Dehngrenze $R_{p0,2}$ weisen geringere Werte als bei Qualität a auf. Am deutlichsten fällt der Unterschied zu Qualität a bei der Bruchdehnung A_5 aus. Hier sinken die Werte bei Qualität b um 24 % und bei Qualität c sogar um 68 %. Ebenso ist eine deutliche Reduktion des Elastizitätsmoduls für Qualität b und c zu beobachten.

Bauteilähnliche Werkstoffproben mit gradierten Werkstoffeigenschaften

Um eine optimale Ausnutzung eines Bauteils gewährleisten zu können, wird die Idee der lokal angepassten Werkstoffeigenschaften zunächst an einer zylindrischen Rundprobe mit Kerbe unter Umlaufbiegung diskutiert, siehe Abbildung 5.

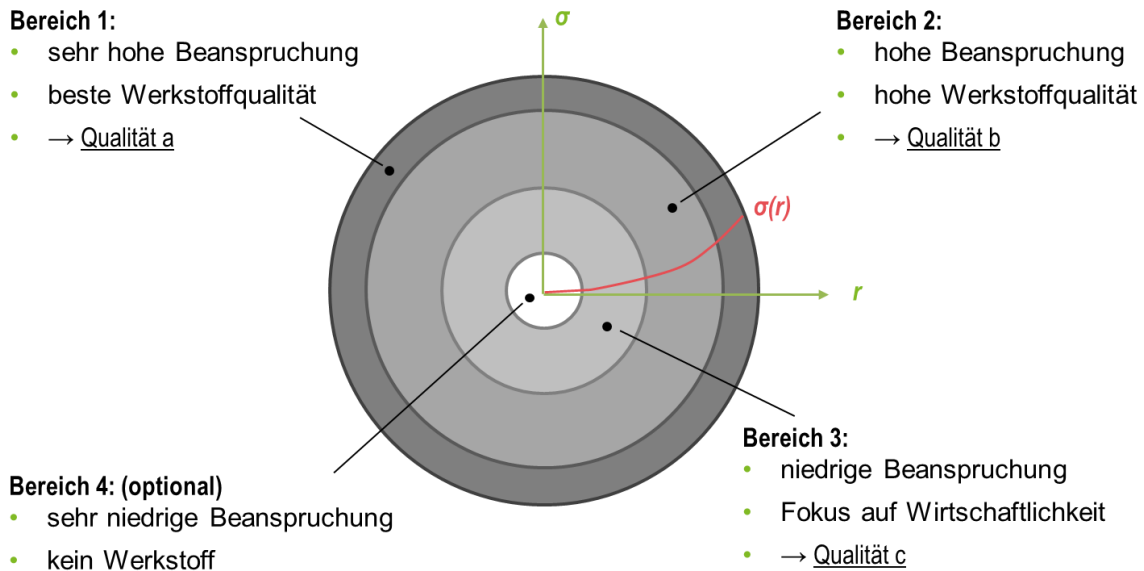


Abbildung 5: Veranschaulichung von Werkstoffproben mit gradierten Werkstoffeigenschaften

Der gewählte Anwendungsfall ist durch einen nichtlinearen Spannungsverlauf über dem Radius der zylindrischen Rundprobe sowie einen hohen Spannungsgradienten gekennzeichnet. An der neutralen Faser, in der Mitte der Rundprobe, ist die Beanspruchung gleich null. Mit zunehmender Entfernung von der neutralen Faser steigt die Beanspruchung der Rundprobe weiter an. Durch diese Charakteristik eignet sich das Beispiel ideal für die Verwendung der lokal angepassten Eigenschaften. Wie in Abbildung 5 dargestellt lässt sich die Rundprobe in drei verschiedene Bereiche einteilen: (i) Bereich 1 am äußeren Rand der Rundprobe mit der höchsten Beanspruchung, (ii) Bereich 2 im Mittelteil der Rundprobe mit mittlerer bis hoher Beanspruchung und (iii) Bereich 3 mit niedriger Beanspruchung an der neutralen Faser. Bereich 4 an der neutralen Faser kann optional entfallen.

Eine entsprechende Charakteristik wird von den drei gewählten Werkstoffqualitäten a bis c wiedergegeben. Qualität a, mit der höchsten Zugfestigkeit wird für ein Einsatz in Bereich 1 am äußeren Rand der Schwingprobe gewählt. Entsprechend wird Qualität b im Bereich 2 und Qualität c im Bereich 3 verwendet. Eine Empfehlung für eine optimale Wahl der Bereiche kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen:

- nach dem höchstbeanspruchten Volumen der Rundprobe: Bereich 1, als $V_{90\%}$; Bereich 2 als das Volumen zwischen $V_{90\%}$ und $V_{30\%}$, Bereich 3 als $V_{30\%}$
- nach einer Beanspruchungsgröße in dem entsprechenden Bereich des Musterbauteils, hier wäre z. B. die Schwingweite des zyklischen Spannungsintensitätsfaktors ΔK oder die Dehnungsschwingweite $\Delta \epsilon$ denkbar
- basierend auf einer Lebensdaueranalyse: Bereiche mit einer höheren Lebensdauer können durch Qualität b und c ersetzt werden. Hierbei ist jedoch eine weitere Analyse nach der Festlegung der einzelnen Bereiche nötig.

Entsprechende bauteilähnliche Werkstoffproben mit gradierten Werkstoffeigenschaften wurde beim WPK-Partner Continental erfolgreich hergestellt und an der THM geprüft. Abbildung 6 zeigt eine bauteilähnliche Werkstoffprobe nach der Schwingprüfung unter Umlaufbiegung. Wie erwartet ist der Riss in der Kerbe eingetreten.



Abbildung 6: bauteilähnliche Werkstoffprobe mit gradierten Werkstoffeigenschaften nach der Schwingprüfung

Erzieltes Forschungsergebnis 2

*„Additive Fertigung von Fahrzeugkomponenten mit gradierten und auf den jeweiligen Anwendungsfall optimal abgestimmten mechanischen Eigenschaften“
(siehe Projektantrag, Seite 7)*

Um das angestrebte Forschungsergebnis zu erzielen, wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Auswahl eines geeigneten Musterbauteils, bei welchem gradierte (lokal angepasste) Werkstoffeigenschaften von vorteilhaft sind. **(AP 2)**
- Optimierung der Referenzgeometrie durch eine numerische Strukturoptimierung des Musterbauteils. **(AP 2)**
- Bauteilkonstruktion und Identifikation der Bauteilbereiche mit Optimierungspotential für den Einsatz von lokal angepassten Werkstoffeigenschaften **(AP 2)**
- Finite-Element Analyse des neu konstruierten Bremssattels (Musterbauteil) unter Berücksichtigung der lokal angepassten Werkstoffeigenschaften. **(AP 2)**
- Additive Fertigung von acht Musterbauteilen beim WPK-Partner Continental Engineering Services & Products GmbH **(AP 7, Finanzposition 0843)**

Diese Arbeiten waren notwendig um ein Musterbauteil (Bremssattel) mit gradierten und optimal abgestimmten mechanischen Eigenschaften zu entwickeln und im Anschluss beim WPK-Partner Continental Engineering Services & Products GmbH herzustellen.

Bauteile mit lokal angepassten Werkstoffeigenschaften

Für die Anwendung der lokal angepassten Werkstoffeigenschaften auf ein reales, tragendes und hochbeanspruchtes Musterbauteil wurde mit dem WPK-Partner der Continental Engineering Services GmbH ein käuflich zu erwerbender Sportbremssattel aus dem Ersatzteilmarkt gewählt. In Abbildung 7 ist eine Explosionszeichnung des Bremssattels zu sehen.

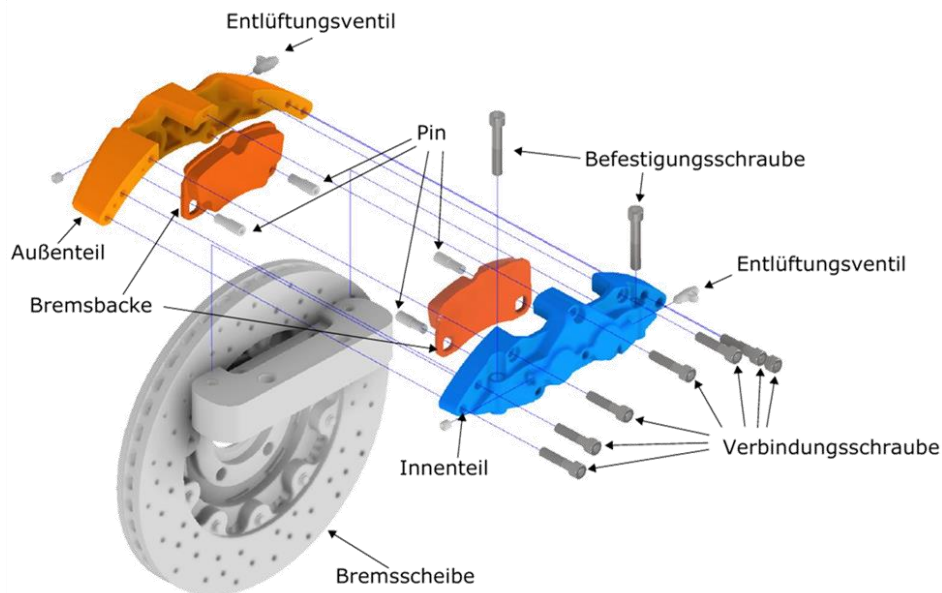


Abbildung 7: Typische Komponenten eines Serienbremssattels nach Stumpfl [14]

Bei dem Musterbauteil handelt es sich um einen Bremssattel, welcher für den Einsatz an der Vorder- und Hinterachse von leichten Sportfahrzeugen gedacht ist. Als Material für den Bremssattel wird eine Aluminiumlegierung verwendet, wodurch der Sattel auf ein Gewicht von 1,98 kg (ohne Bremsbeläge) kommt.

Designvorschlag für ein Musterbauteil mit gradierten Werkstoffeigenschaften

Als Software für die Finite-Element Analyse wird das Paket *Hypermesh/Optistruct* der Firma *Altair* verwendet. In Abbildung 8 ist das verwendete Modell für die numerische Strukturoptimierung inklusiver aller Lasten und Lagerungen dargestellt. Details der Arbeit können der Arbeit von Ercan [12] entnommen werden.

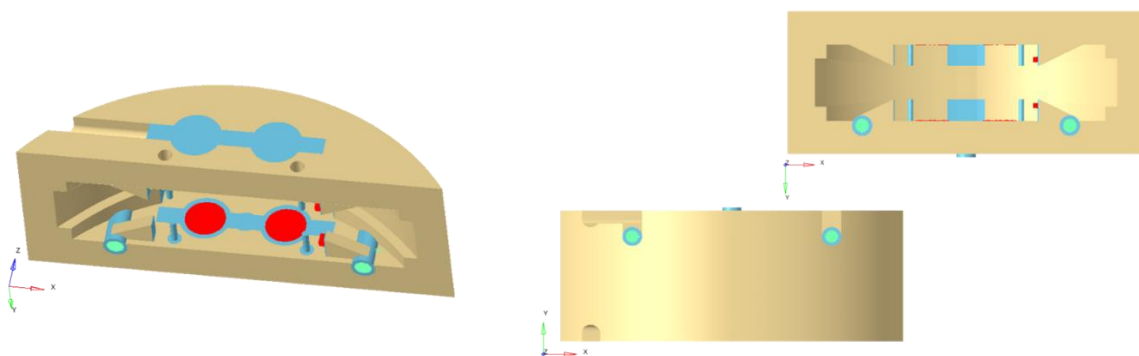


Abbildung 8: Modell für die numerische Strukturoptimierung des Musterbauteils (Bremssattel)

Für die numerische Strukturoptimierung werden Tetraeder mit einem linearer Verschiebungsansatz verwendet. Für das Modell werden Elemente mit einer Größe von 2 mm bis 5 mm verwendet, wodurch 120.968 Knoten und 651.450 Elemente ergeben. Als Optimierungsziel (*objective*) wird die Minimierung der Nachgiebigkeit (*compliance*) bei Einhaltung der folgenden Restriktionen (*constraints*) gewählt:

- Masse des Bremssattels: $m_{\text{Sattel}} \leq 1,4 \text{ kg}$
- von Mises Vergleichsspannung: $\sigma_v \leq 180 \text{ N/mm}^2$
- maximale Verschiebung $|\mathbf{u}| \leq 0,5 \text{ mm}$

Das Ergebnis der numerischen Strukturoptimierung mit einem Füllgrad von 0,5 ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Masse des Sattels in dem abgebildeten Zustand beträgt 1,408 kg. Den größten zusammenhängenden Bereich stellen die Aufnahmen für die Bremskolben sowie die Befestigung des Bremssattels dar.

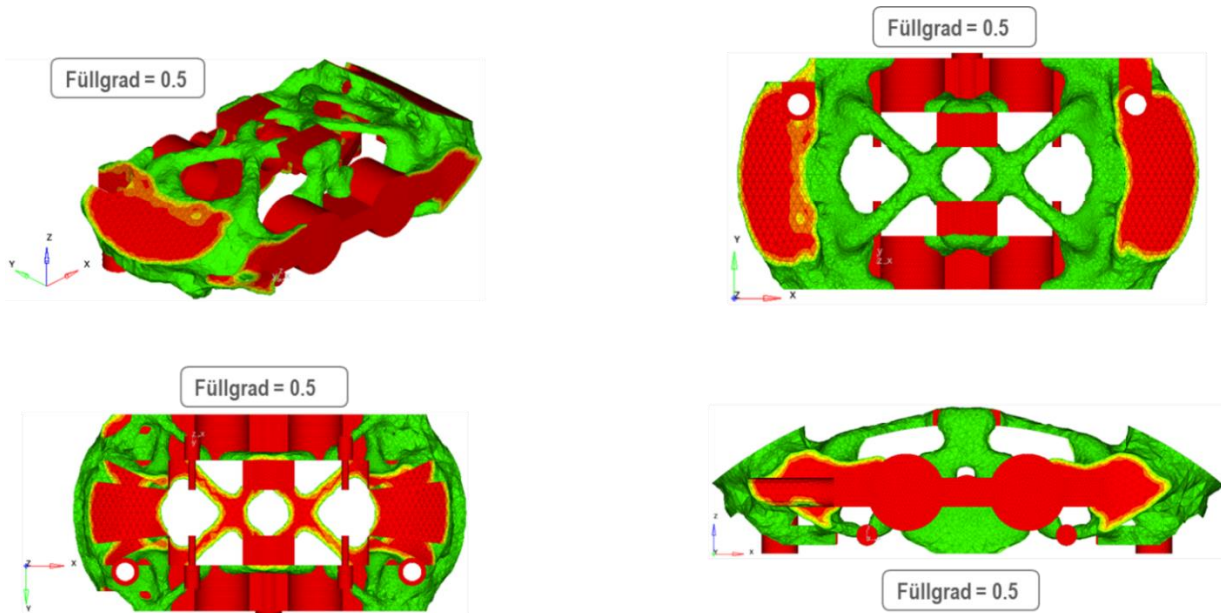


Abbildung 9: Ergebnis der numerischen Strukturoptimierung des Musterbauteils (Bremssattel) in Hypermesh/Optitruact mit einem Füllgrad von 0.5

Musterbauteil mit gradierten Werkstoffeigenschaften

Entsprechend den Ergebnissen der numerischen Strukturoptimierung wurde der in Abbildung 10 dargestellte Bremssattel unter Berücksichtigung der drei unterschiedlichen Werkstoffqualitäten entwickelt.

Die orangen Bereiche des in Abbildung 10 dargestellten Sattels entsprechen der Werkstoffqualität b, während die blauen Bereiche der Werkstoffqualität c entsprechen. An der Oberfläche sowie den hoch beanspruchten Bereichen des Bremssattels wurden Qualität a verwendet. Dadurch soll ein möglichst guter Oberflächenzustand sowie eine gute Festigkeit gewährleistet werden. Somit ergibt sich die folgende Aufteilung:

- Bereich 1: (grau dargestellt) sehr hohe Beanspruchung, Qualität a (72,6 %)
- Bereich 2: (orange dargestellt) hohe Beanspruchung, Qualität b (16,8 %)
- Bereich 3: (blau dargestellt) niedrige Beanspruchung, Qualität c (10,6 %)

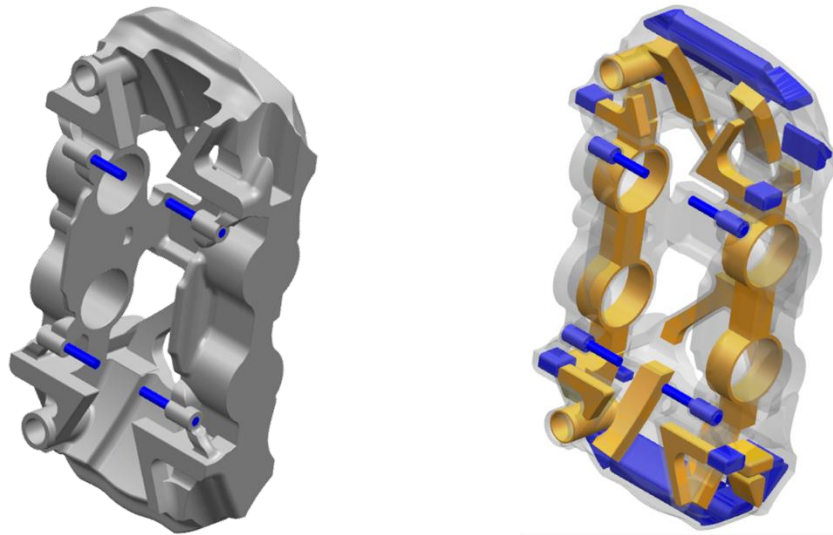


Abbildung 10: Umsetzung des additiven gefertigten Bremssattels mit graduierten Werkstoffeigenschaften

Durch die Strukturoptimierung in Kombination mit den lokal angepassten Eigenschaften ergibt sich für den optimierten Bremssattel ein Gewicht von 1,47 kg, was eine Gewichtsersparnis von 26 % gegenüber dem käuflich zu erwerbenden Sportbremssattel (1,98 kg) darstellt.

Im Anschluss wurde der Bremssattel beim WPK-Partner Continental auf der SLM-Anlage des Herstellers Trumpf unter Verwendung der in Tabelle 3 aufgelisteten Parameter. In Abbildung 11 ist einer der acht additiv gefertigten Bremssättel in dem Zustand nach der additiven Fertigung dargestellt. Die in darstellte Stützstruktur ist für die Herstellung der Bremssättel notwendig und wird im anschließenden händisch an der THM entfernt.



Abbildung 11: Bremssattel (Musterbauteil) mit lokal angepassten nach der additiven Fertigung; die verwendete Stützstruktur wurde noch nicht entfernt

In Abbildung 12 ist der gleiche Bremssattel nach dem Entfernen der Stützstruktur dargestellt. Anzu merken ist, dass durch das manuelle Entfernen der Stützstruktur an der THM kleinere Kratzer an der Oberfläche des Bremssattels zu sehen sind. Durch maschinelles Entfernen der Stützstrukturen z. B. beim WPK-Partner, der Continental Engineering Services & Products GmbH ließen sich solche Kratzer deutlich reduzieren. Das Gewicht des Bremssattels nach dem Entfernen der Stützstruktur beträgt $1,49 \pm 0,12$ kg.

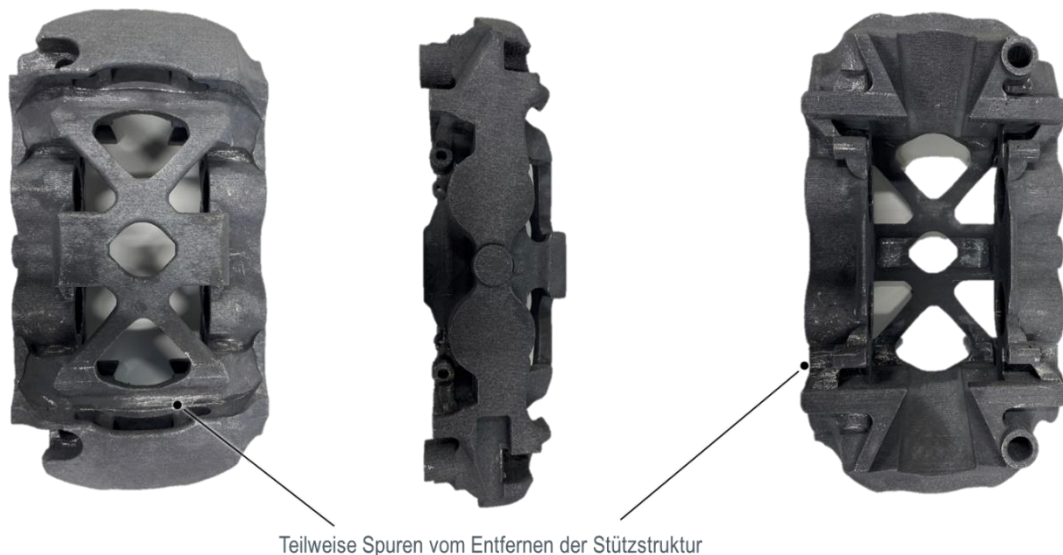


Abbildung 12: Additiv gefertigter Bremssattel mit lokal angepassten Eigenschaften nach dem Entfernen der Stützstruktur

Erzieltes Forschungsergebnis 3

„Klärung und Dokumentation der in solchen gradierten Komponenten ablaufenden Schädigungsmechanismen“ (siehe Projektantrag, Seite 7)

Um das angestrebte Forschungsergebnis zu erzielen, wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Bestimmung der Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich sowie der Schädigungsmechanismen durch Schwingversuche nach DIN 50100 unter Umlaufbiegung (**AP 4**)
- Ermittlung von Rissfortschrittsraten und Bestimmung des effektiven Schwellenwerts an additiv gefertigten Compact-Tension Proben nach ASTM E 647 (**AP 4, Finanzposition 0835**)
- Bestimmung von Rissausgang (Ermüdungsrissinitiierung) und Schädigungsmechanismen durch Fraktographie unter dem Lichtmikroskop (**AP 5**)

Die zur Klärung und Dokumentation der ablaufenden Schädigungsmechanismen notwendigen Schwingversuche unter Umlaufbiegung, Rissfortschrittsuntersuchungen und die Fraktographie unter dem Lichtmikroskop wurden den entsprechenden Normen und gängigen wissenschaftlichen Praxis durchgeführt.

Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich für AlSi10Mg in verschiedenen Qualitäten

Für die experimentelle Bestimmung der Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich werden Versuche unter Umlaufbiegung durchgeführt. Die anschließende Berechnung der Wöhlerlinienparameter σ_a ($N_f = 2 \cdot 10^6$) und k , sowie die Bestimmung der Streuspanne T_N erfolgte nach DIN 50100 [1]. Die Ergebnisse für Qualität a und b im polierten sowie dem as-built Zustand sind in den Abbildung 13 bis Abbildung 16 dargestellt.

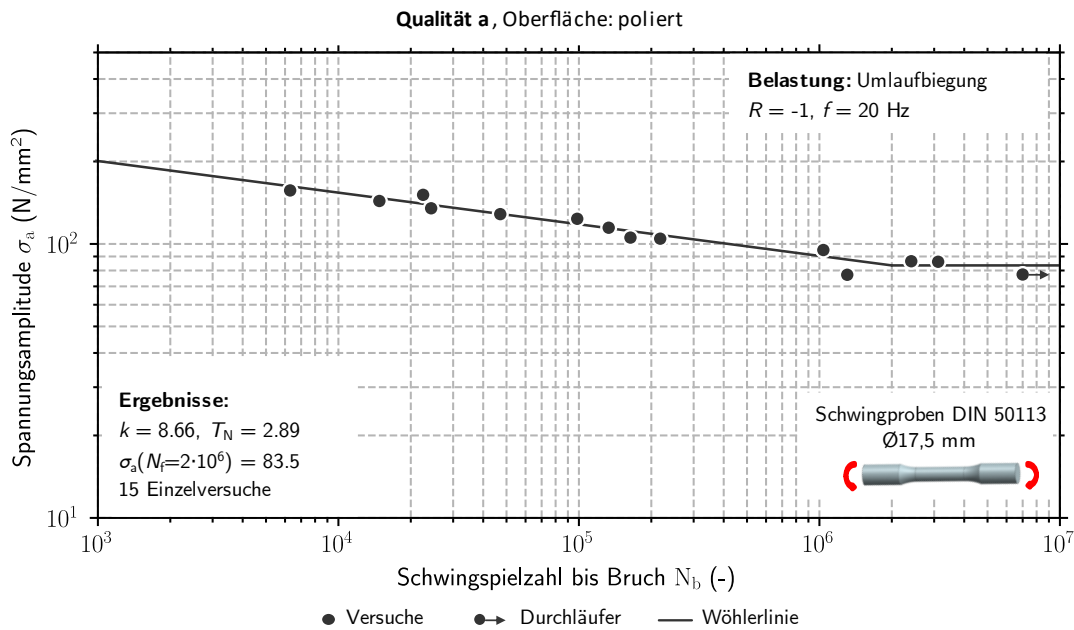


Abbildung 13: Nennspannungs-Wöhlerlinie unter Umlaufbiegung für AISi10Mg (Qualität a) mit polierter Oberfläche

Die ertragbare Spannungsamplitude bei $N_f = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen beträgt bei Qualität a m Zustand mit polierter Oberfläche $\sigma_a = 83,5 \text{ N/mm}^2$. Mit einer Neigung von $k = 8,66$ verläuft die Wöhlerlinie für den Zustand mit polierter Oberfläche sehr flach.

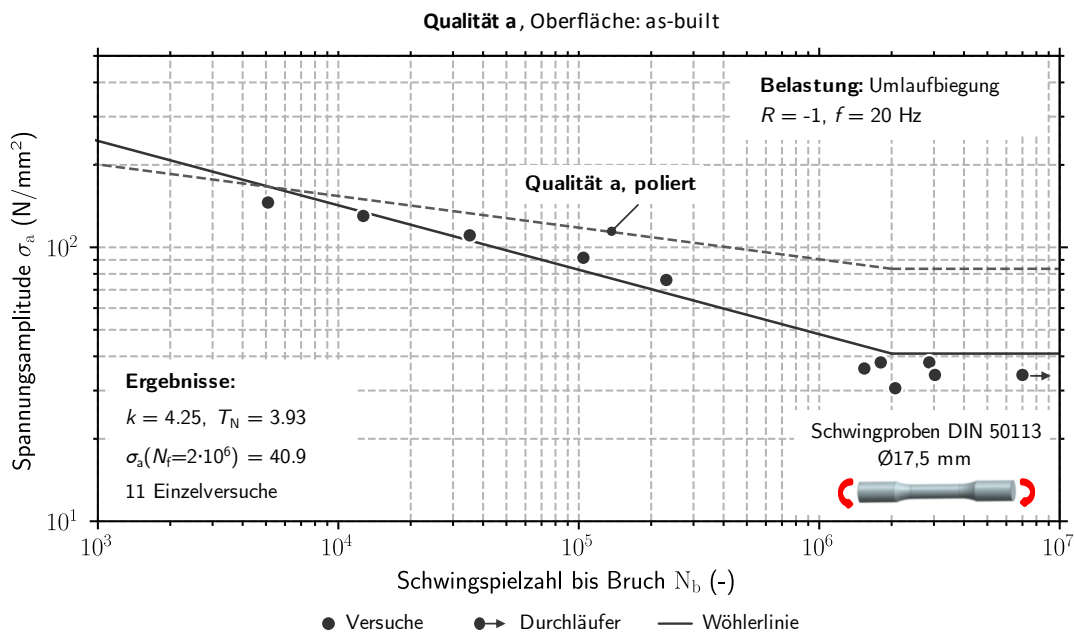


Abbildung 14: Nennspannungs-Wöhlerlinie unter Umlaufbiegung für AISi10Mg (Qualität a) mit as-built Oberfläche

Der Zustand nach der additiven Fertigung (as-built) zeigt eine deutlich geringere Festigkeit, hier beträgt die ertragbare Spannungsamplitude $\sigma_a = 40,9 \text{ N/mm}^2$ und ist um ca. 46 % geringer. Ebenso ist die Neigung der Wöhlerlinie im as-built Zustand mit $k = 4.25$ deutlich steiler als im Zustand mit polierter Oberfläche. Die beiden Wöhlerlinien zeigen aber bei ca. 10^3 Schwingspielen einen gemeinsamen Schnittpunkt.

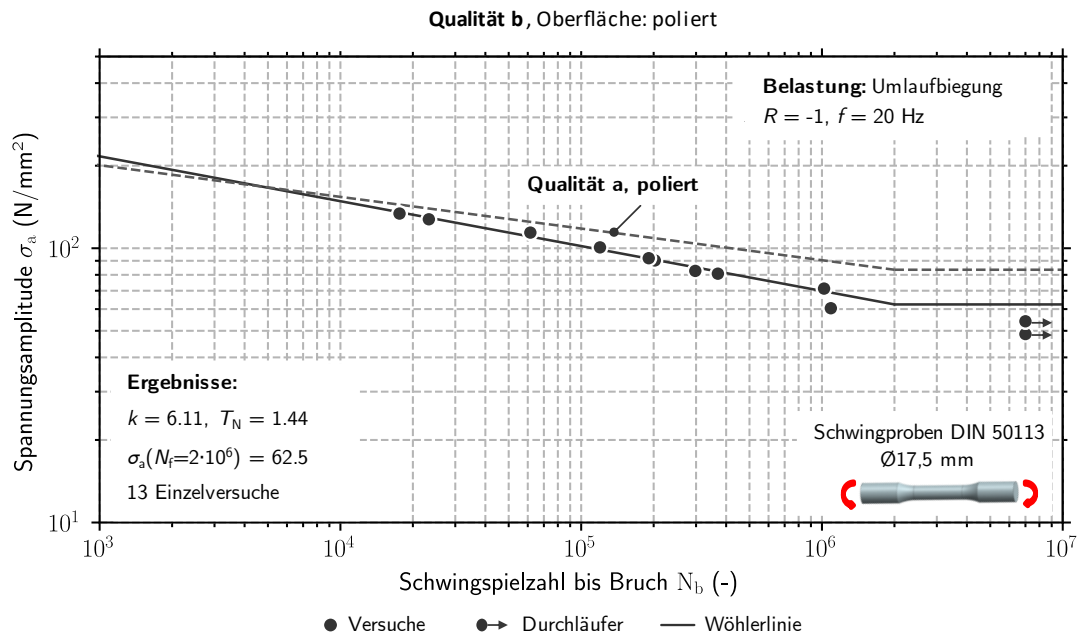


Abbildung 15: Nennspannungs-Wöhlerlinie unter Umlaufbiegung für AISi10Mg (Qualität b) mit polierter Oberfläche

Die Ergebnisse der Versuche unter Umlaufbiegung für Qualität b mit polierter und as-built Oberfläche sind in den Abbildung 14 und Abbildung 16 dargestellt. Für den polierten Zustand ist die ertragbare Spannungsamplitude $\sigma_a = 62,4 \text{ N/mm}^2$ bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen um ca. 25 % geringer als für Qualität a. Die Neigung der Wöhlerlinie ist mit $k = 6,11$ auch steiler als bei Qualität a, was auf einen Einfluss der Porosität auf die Ermüdungsfestigkeit hindeutet.

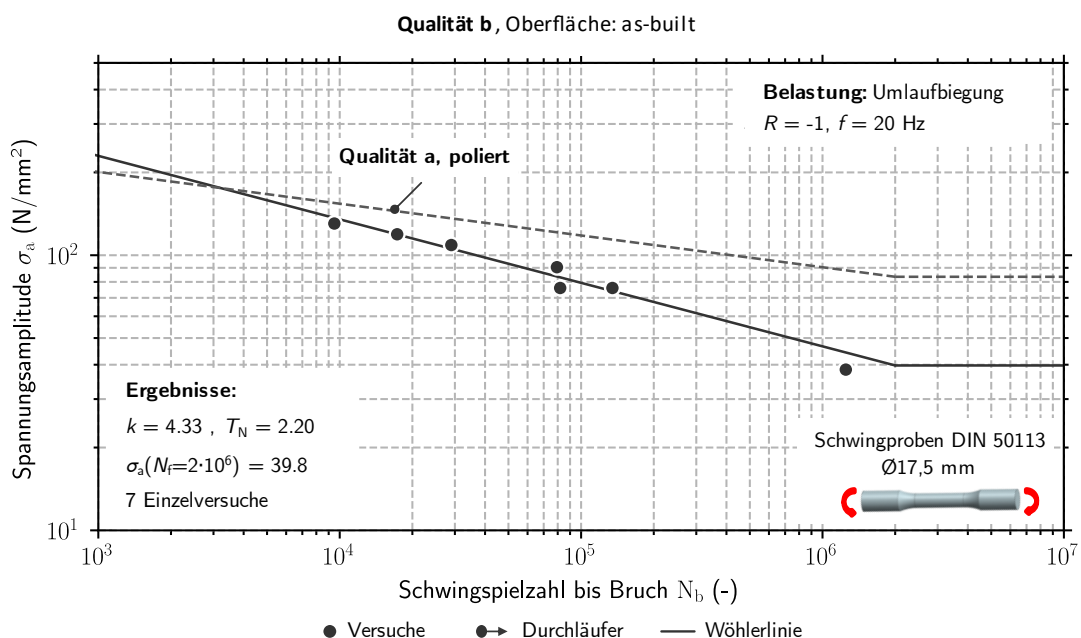


Abbildung 16: Nennspannungs-Wöhlerlinie unter Umlaufbiegung für AISi10Mg (Qualität b) mit as-built Oberfläche

Für den as-built Zustand ist die ertragbare Spannungsamplitude $\sigma_a = 39,8 \text{ N/mm}^2$ um knapp 36 % geringer als im Zustand mit polierter Oberfläche für Qualität b und mit Qualität a im as-built Zustand vergleichbar. Die Neigung im as-built Zustand liegt bei $k = 4,33$ und im polierten Zustand bei $k = 6,11$. Ähnlich wie bei Qualität a ist bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen ein deutlicher Einfluss des Oberflächenzustands auf die Versuchsergebnisse zu erkennen. Bei ca. 10^3 Schwingspielen ist ein Schnittpunkt der beiden Wöhlerlinien zu beobachten.

Rissfortschrittsraten und Schwellenwerte für AISi10Mg

Für die Bestimmung der Rissfortschrittsraten werden Schwingversuche an Compact-Tension Proben nach ASTM E647 [6] durchgeführt. Die Risslänge wird über Schwarz-Weiß Kameras gemessen und die Risslänge durch 7-Punkt Polynominterpolation bestimmt. Die Berechnung der effektiven Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors wird analog zur Arbeit von Roveda [15] durchgeführt. In den Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Untersuchung für Qualität a und b dargestellt.

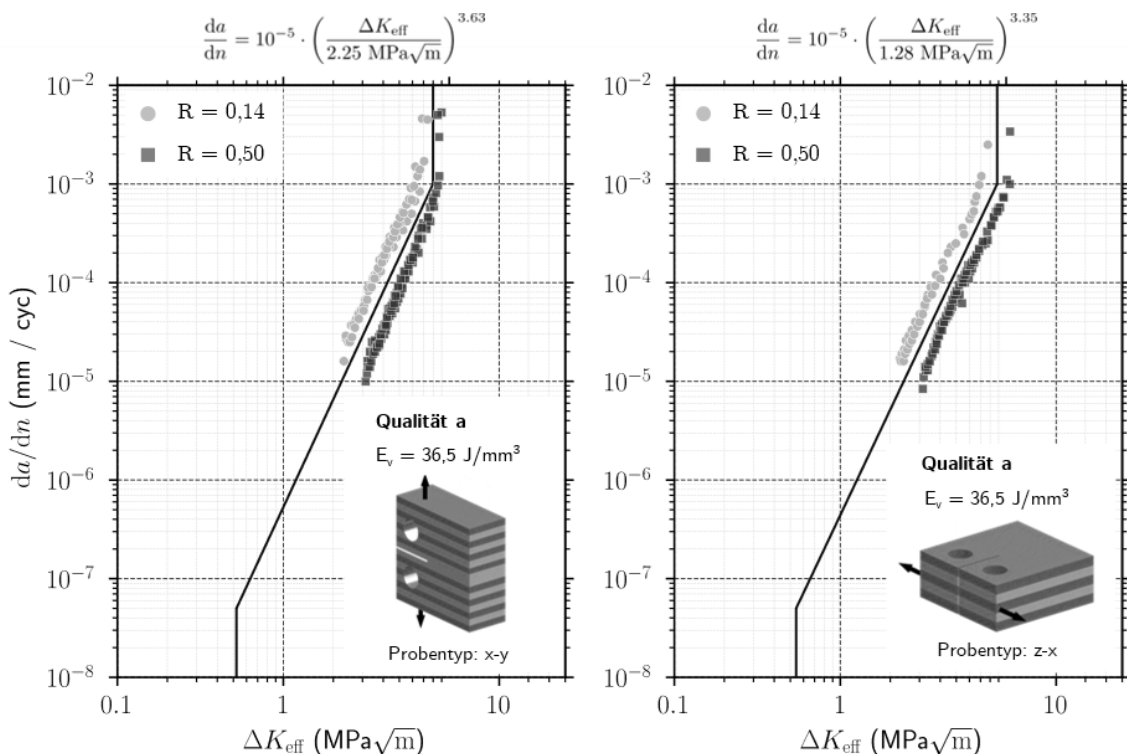


Abbildung 17: Rissfortschrittsrate für Werkstoffproben mit Qualität a in zwei unterschiedlichen Orientierungen

Im Hinblick auf den Paris-Exponenten m ist ein Unterschied von ca. 7 % zwischen den x-y Proben und z-x Proben zu beobachten. In den x-y Proben liegt der Paris-Exponent bei $m = 3,65$, während er bei den z-x Proben $m = 3,35$ beträgt. Ebenso ist ein geringer Unterschied im Lageparameter des Rissfortschrittsgesetzes zu beobachten. In den x-y Proben beträgt die effektive Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK_{eff} bei einer Rissfortschrittsrate von 10^{-5} mm/SSP $2,25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, während ΔK_{eff} bei $2,54 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ in den z-x Proben liegt. Zwischen den Versuchen mit einem R - Verhältnis von $R = 0,14$ und $R_p = 0,50$ ist ein systematischer Unterschied sichtbar. Unabhängig von Qualität und der Probenorientierung zeigen die Versuche mit dem niedrigeren R - Verhältnis, also die Versuche mit $R = 0,14$ nach Berücksichtigung des plastizitäts-induzierten Riss-schließeffekts eine

höhere Rissfortschrittsrate als die Versuche mit dem höheren R-Verhältnis ($R = 0,50$). Die Ursache für diesen systematischen Unterschied konnte zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bestimmt werden. Zusätzlich konnten für Qualität a die effektive Schwingweite des Schwellenwerts gegen Rissausbreitung ermittelt werden. Für die x-y Proben ergaben die Versuche $0,637 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < \Delta K_{\text{th,eff}} < 0,666 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ während die effektive Schwingweite des Schwellenwerts für die z-x Proben bei $0,687 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < \Delta K_{\text{th,eff}} < 0,710 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ liegt.

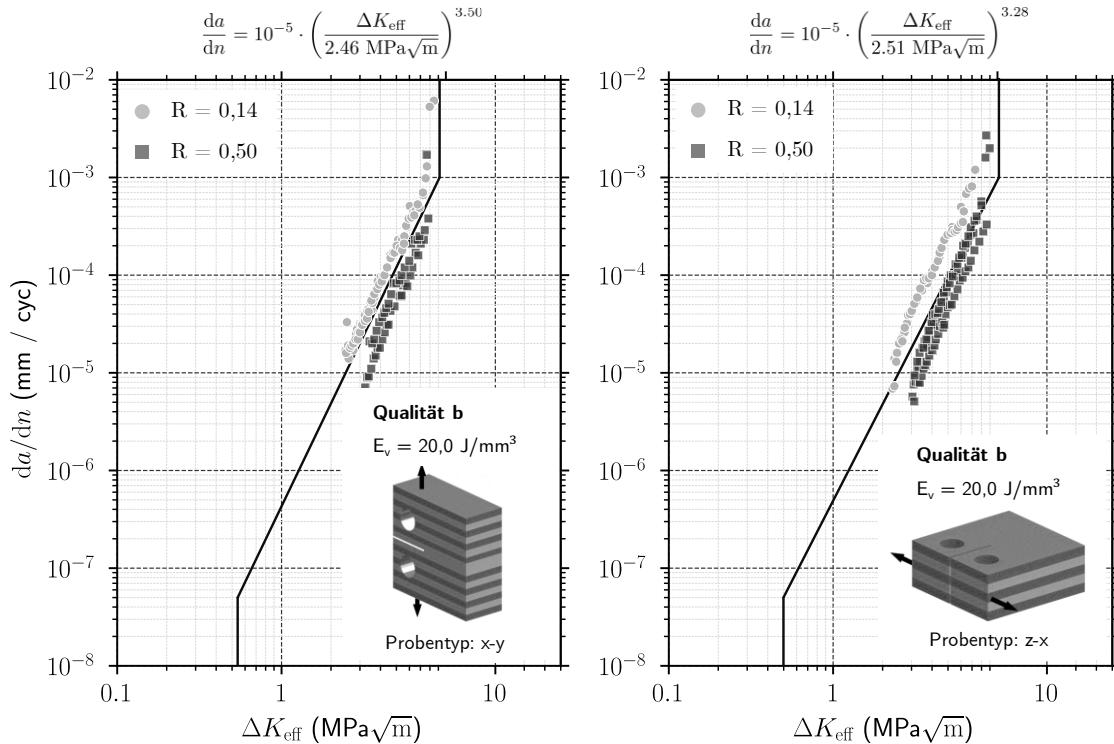


Abbildung 18: Rissfortschrittsrate für Werkstoffproben mit Qualität b in zwei unterschiedlichen Orientierungen

Im Hinblick auf den Paris-Exponenten m ist für Qualität b kein nennenswerter Unterschied zu beobachten. Für die Versuche an x-y Proben beträgt der Paris-Exponent $m = 3,82$, und für die Versuche an z-x Proben $m = 3,77$. Die effektive Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK_{eff} bei einer Rissfortschrittsrate von 10^{-5} mm/SSP ist zwischen den Versuchen an x-y Proben und z-x Proben vergleichbar, dennoch sind kleinere Unterschiede zu beobachten. Für die x-y Proben beträgt die effektive Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK_{eff} $3,96 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, während diese für die Versuche an z-x Proben ca. 15 % geringer ist und $\Delta K_{\text{eff}} = 3,39 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ beträgt. Die systematischen Unterschiede zwischen den Versuchen $R = 0,14$ und $R = 0,50$ sind in den x-y Proben und den z-x Proben ebenfalls zu beobachten. Die Versuche mit dem geringeren R - Verhältnis, also die Versuche mit $R = 0,14$ zeigen ebenfalls nach Berücksichtigung des plastizitäts-induzierten Riss-schließeffekts eine höhere Rissfortschrittsrate im Vergleich mit den Versuchen bei einem R-Verhältnis $R = 0,50$.

Schwingversuche am Musterbauteil

Für die in Arbeitspaket 1.3 hergestellten Musterbauteile mit gradierten Werkstoffeigenschaften werden zur Validierung Versuche unter zyklischer Beanspruchung durchgeführt. Dazu wurde ein geeigneter Ersatzlastfall definiert, welcher der Aufbiegung des Brems sattels entspricht. Der gesamte Aufbau für die Prüfung ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Prüfung des Brems sattels erfolgt unter schwellender Beanspruchung im Zugbereich mit einer minimalen Prüfkraft $F_{\min} = 500 \text{ N}$ und einer maximalen Prüfkraft $F_{\max} = 12 \text{ kN}$, womit sich ein Kraftverhältnis von $R = F_{\min} / F_{\max} \approx 0.05$ ergibt.

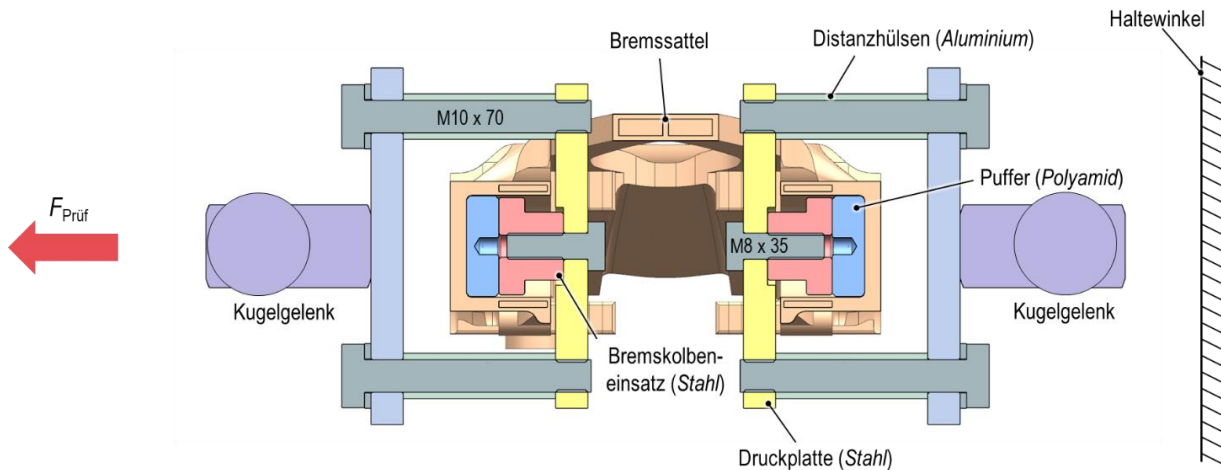


Abbildung 19: Prüfstands Aufbau für die Prüfung der additiv gefertigten Bremsättel

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse für drei verschiedene Varianten dargestellt. Das käuflich erworbene Bauteil dient als Referenz für den Vergleich. Die beiden Varianten mit 0,2 mm und 0,5 mm Überlappung zwischen den verschiedenen Qualitätsbereichen (gradiert) bei der additiven Fertigung zeigen unterschiedliche Ergebnisse.

Während bei den Musterbauteilen mit 0,2 mm Überlappung das Versagen nach ca. 115.000 Schwingspielen verursacht wird – bedingt durch diese unzureichende Überlappung der Qualitätsbereiche, geht das Versagen beim Musterbauteil mit 0,5 mm Überlappung nach ca. 210.000 Schwingspielen von einem Hotspot im Qualitätsbereich a aus. Dort führen (i) eine raue, zerklüftete Oberfläche und (ii) insbesondere eine scharfe geometrische Kante zur Bildung eines Ermüdungsrisse.

Beide Aspekte können durch eine entsprechende Optimierung des Sattels verbessert werden. Durch ein in der Praxis übliches Reinigungsstrahlen (z. B. Glasperlenstrahlen) kann die Oberflächenrauheit des Bauteils deutlich reduziert werden, während die scharfe, geometrische Kante durch einen entsprechenden Radius sanfter gestaltet werden kann. Entsprechend der Wöhlerlinie für Qualität a ergäbe dabei eine Verringerung der Spannungsamplitude um 15 % eine Steigerung der Lebensdauer um mehr als Faktor zwei. Dadurch ist die Ermüdungsfestigkeit des additiv gefertigten Bremsattels auf dem Niveau des Referenz-Bremsattels, und dies bei einer Gewichtsersparnis von einem Viertel.

Damit konnte gezeigt werden, dass die Gradierung der Werkstoffeigenschaften bei diesem Musterbauteil mit Blick auf den Leichtbau und die Materialermüdung gelungen ist. Gleichzeitig ergibt sich durch Verwendung der Qualitäten a bis c eine reduzierte Bauzeit des Musterbauteils und damit eine gesteigerte Wirtschaftlichkeit.

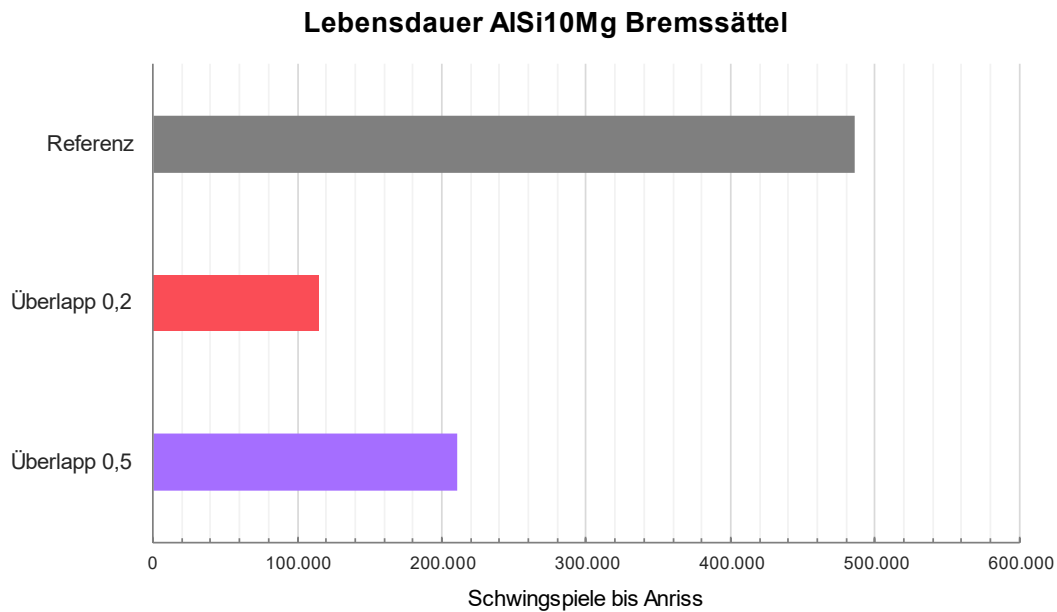


Abbildung 20: Lebensdauer der verschiedenen additiv gefertigten Bremssättel

Erzieltes Forschungsergebnis 4

„Auslegungskonzept zur rechnerischen Prognose der Bauteil-Lebensdauer bzw. zur Ermittlung einer zulässigen Fehlergröße“ (siehe Projektantrag, Seite 7)

Das Auslegungskonzept zur rechnerischen Prognose der Bauteil-Lebensdauer wird in enger Abstimmung mit dem Fachgebiet Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt erarbeitet, welches durch die folgenden Merkmale charakterisiert ist (**AP6**):

- Die räumliche Verteilung der Fehlstellen innerhalb beliebiger Geometrien wird durch einen markierten, homogenen Poisson-Prozess simuliert. Die Größe der Fehlstellen wird durch den $\sqrt{\text{area}}$ -Parameter von Murakami [8] dargestellt und entsprechend einer Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert. Die Zuordnung von Position und Größe der Fehlstellen erfolgt zufällig.
- Die Berücksichtigung der Oberflächenrauheit (durch den Parameter R_z) erfolgt nach dem Vorschlag von Vormwald [7] und wird zu der Risstiefe im polierten Zustand addiert.
- Alle nötigen Kennwerte für die Beschreibung des Modells, die Dichte der Fehlstellen λ und die Größenverteilung der Fehlstellen $f(\sqrt{\text{area}})$, können durch Computertomografieaufnahmen bestimmt werden.
- Das Risswachstum unter zyklischer Beanspruchung wird sowohl im Bereich physikalisch kurzer Risse als auch für lange Risse simuliert.
- Der graduelle Aufbau des Rissschließeffekts wird analog zum IBESS-Modell [9], durch die Verknüpfung der zyklischen R-Kurve mit der Rissschließfunktion $U(a) = \Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ abgebildet.

- Um die Ausbreitung von Mehrfachrissen in der Simulation abbilden zu können, wird angenommen, dass alle Fehlstellen, bei denen die Schwingweite des Spannungsintensitätsfaktors oberhalb des Schwellenwerts $\Delta K_{th}(a)$ liegt, wachstumsfähig sind.
- Das Versagenskriterium für die Simulation ist frei wählbar. Für die Validierung wird ein Bruch der Schwingproben angenommen, also wenn $K_{max} \geq K_{Ic}$ gilt. Denkbar ist auch, eine kritische Rissgröße zu definieren, z. B. wenn die Rissbreite $2c = 1$ mm erreicht.

Alle für das Auslegungskonzept zur rechnerischen Prognose der Bauteil-Lebensdauer nötigen Untersuchungen wurden dem aktuellen Stand der Forschung durchgeführt. Damit wurden im Einzelnen die folgenden Ergebnisse erzielt:

Auslegungskonzept zur rechnerischen Prognose der Bauteil-Lebensdauer

Nachfolgend sind die einzelnen Schritte des Berechnungsablaufs des vorgestellten Modells dargestellt. Dieses ist hierbei in zwei Hauptschritte aufgeteilt. Schritt eins ist die Simulation der Fehlstellenverteilung und der Anfangsrissgeometrie, während im zweiten Schritt die Lebensdauer, basierend auf einem Kurzrissmodell, berechnet wird. Eine grafische Veranschaulichung des Berechnungsablaufs ist in Abbildung 21 zu finden.

Fehlstellenverteilung und Anfangsrissgeometrie

1. Simulation einer Fehlstellenverteilung, hier durch einen markierten Poisson Prozess
2. Berechnung der Geometrie der Anfangsrisse und ggf. Berücksichtigung der Oberflächenrauheit nach Vormwald [7]

Rissfortschritt mit Kurz- und Langrissmodell

3. Schrittweise Berechnung der Lebensdauer durch Lösung des AWP mittels Runge-Kutta Verfahren; zur Berechnung werden die folgenden Teilschritte (3.1 – 3.4) ausgeführt bis in einem Schritt Versagen auftritt
 - 3.1. Berechnung des Risswachstums Δa durch Lösen des AWP
 - 3.2. Berechnung der Rissgrößen nach dem Inkrementellen Wachstum Δa
 - 3.3. Interaktion und Verschmelzen von Rissen, hier in Anlehnung an das IBESS-Modell nur bei Kontakt zweier Risse
 - 3.4. Abprüfen des Versagenskriterium, hier wird $K_{max} > K_{Ic}$ gewählt, da alle Versuche, bis Bruch geprüft wurden

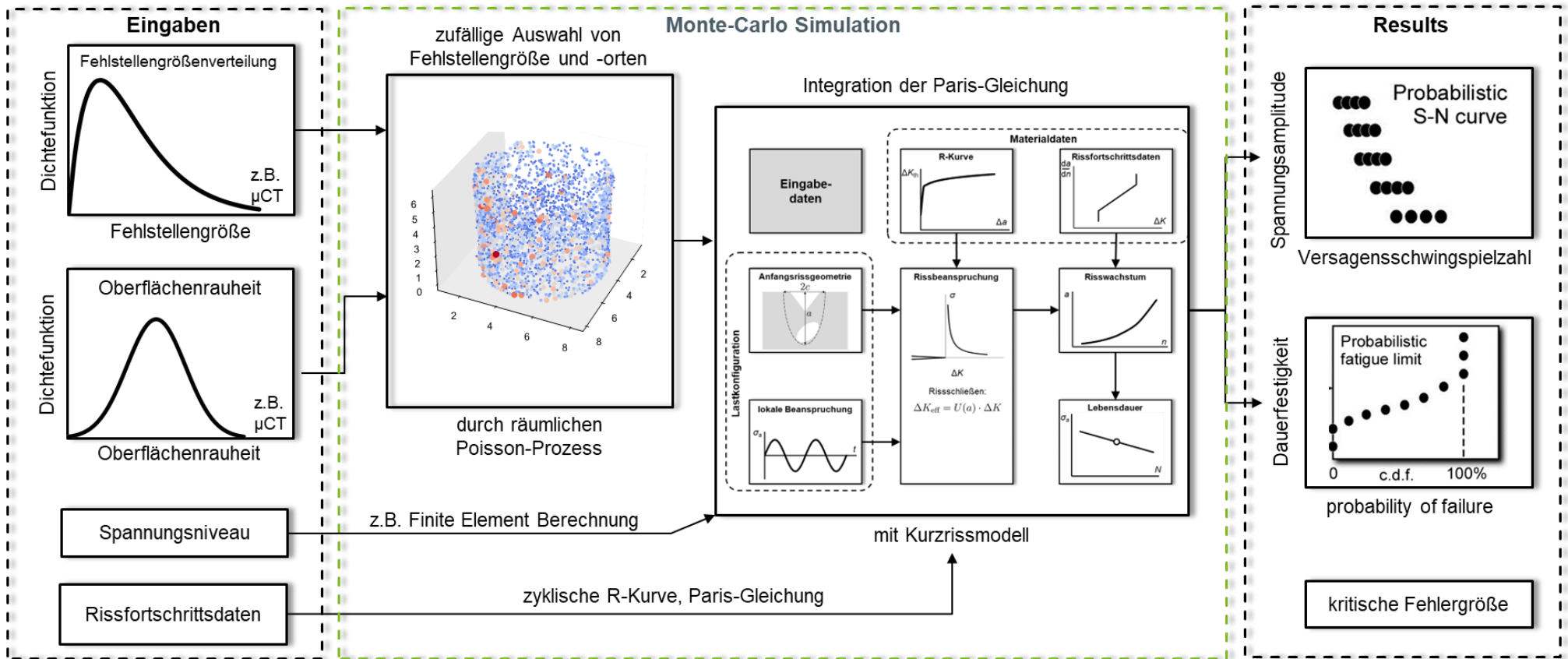


Abbildung 21: Berechnungskonzept für die Prognose der Lebensdauer

Treffsicherheit der Lebensdauer-Prognose für AlSi10Mg Werkstoffproben

Zur Validierung des Modells werden die im Vorhaben durchgeführten Versuche unter Umlaufbiegung, sowie Versuche aus dem LOEWE-3 Vorhaben BionikAdditiv verwendet. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Validierung dargestellt.

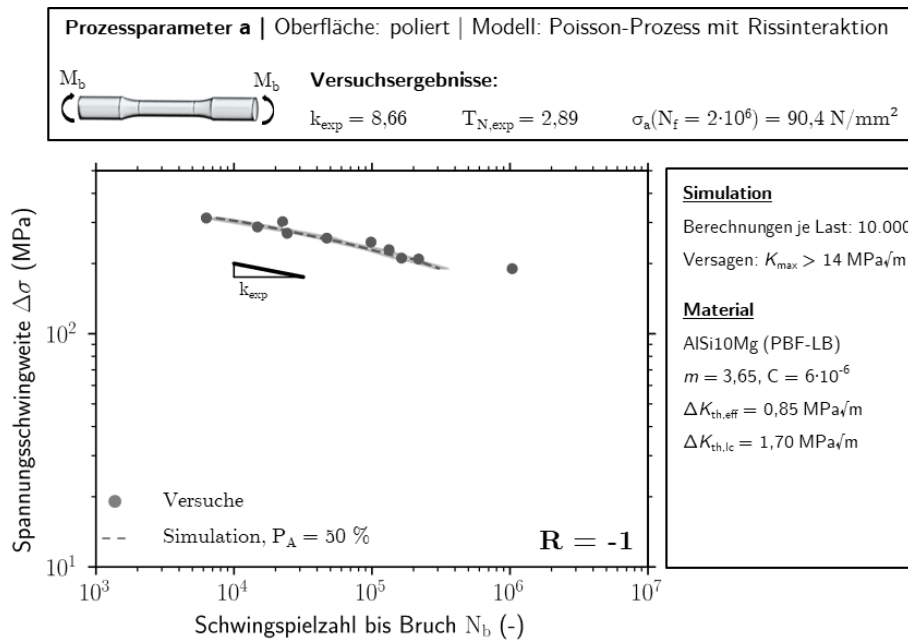


Abbildung 22: Ergebnis der Lebensdauerprognose für die Werkstoffproben aus Qualität a mit polierter Oberfläche

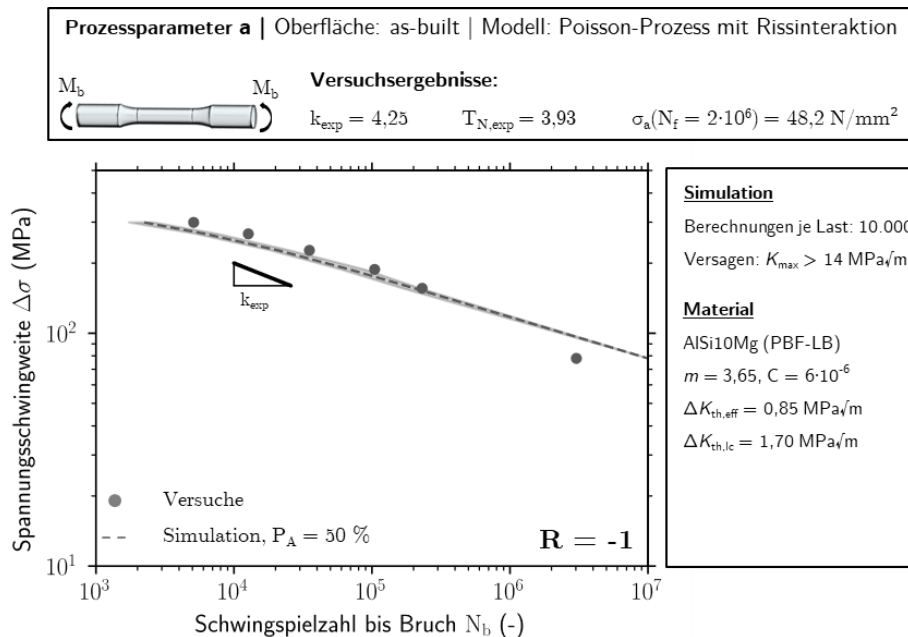


Abbildung 23: Ergebnis der Lebensdauerprognose für die Werkstoffproben aus Qualität a mit as-built Oberfläche

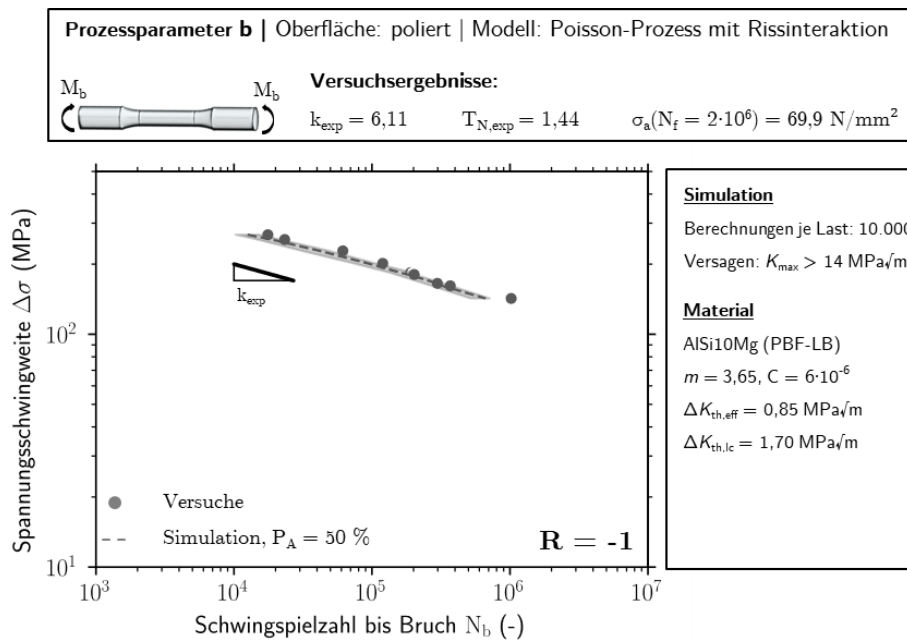


Abbildung 24: Ergebnis der Lebensdauerprognose für die Werkstoffproben aus Qualität b mit polierter Oberfläche

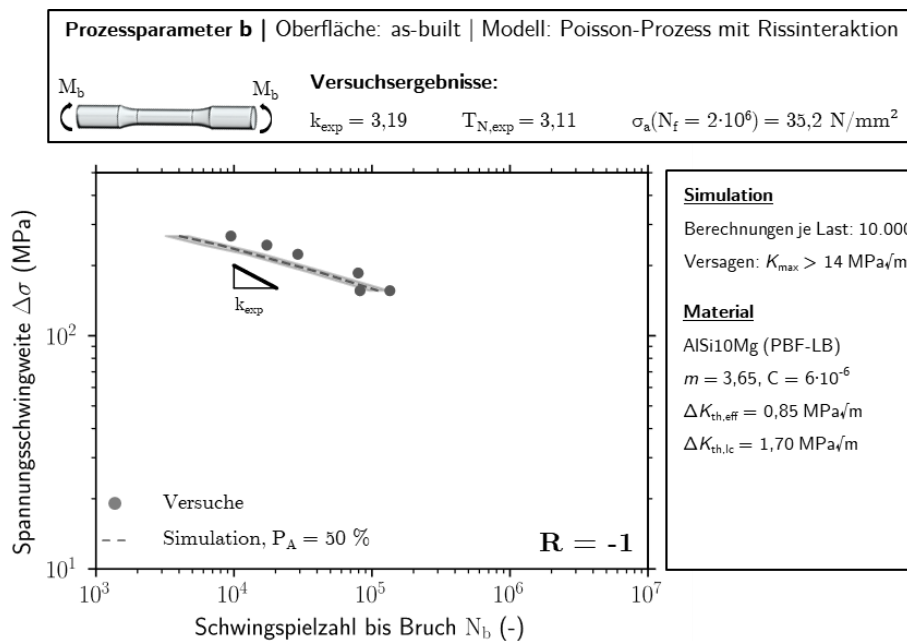


Abbildung 25: Ergebnis der Lebensdauerprognose für die Werkstoffproben aus Qualität b mit as-built Oberfläche

Ergebnisse an Werkstoffproben mit polierter Oberfläche (Abbildung 13 und Abbildung 15)

- In vielen additiv gefertigten Komponenten geht das Versagen von fertigungsbedingten Fehlstellen aus. Dies ist ebenso in den Versuchen für Qualität a und Qualität b zu beobachten. Durch die Berücksichtigung dieser Fehlstellen lassen sich die Wöhlerlinien der beiden Qualität mit guter Übereinstimmung vorhersagen.
- Die Unterschiede im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit für Qualität a und Qualität b lassen sich durch den verwendeten markierten Poisson-Prozess in Kombination mit einem Kurzrissmodell, sowie die Berücksichtigung von Risskoaleszenz abbilden. Der Vergleich zwischen

den Bruchflächen und dem Modell zeigt, dass die Anzahl der wachsenden Risse sowie die Schwingbruchfläche vom Modell tendenziell korrekt abgebildet werden. Im Detail sind dennoch Unterschiede zu erwarten, da das Modell eine statistische Modellierung der Fehlstellen voraussetzt, und hierbei einige Vereinfachungen getroffen werden müssen.

Ergebnisse an Werkstoffproben mit as-built Oberfläche (Abbildung 14 und Abbildung 16)

- Im Hinblick auf die Modellierung des Oberflächeneinflusses liefert die von Vormwald [7] vorgeschlagene Addition der Risstiefe a_0 und der mittleren Rautiefe R_z in Verbindung mit dem verwendeten Poisson-Prozess eine konservative Prognose der Lebensdauer für die Versuche an as-built Proben.
- Die Unterschiede in der Prognose zwischen Qualität a und Qualität b lassen sich auf den verwendeten Poisson-Prozess zurückführen. Als Folge der höheren Anzahl von Fehlstellen nimmt auch die Anzahl der oberflächennahen Fehlstellen zu. Damit wird der Effekt der Oberflächenrauheit ebenfalls bei mehreren Rissen berücksichtigt. Durch die größeren Risse treten in der Berechnung mehr Rissvereinigungen auf, was für Qualität b zu konservativeren Ergebnissen als bei Qualität a führt.

Im Forschungsvorhaben Automotive-Leichtbau-Strukturen aus Additiver Fertigung mit lokal angepassten Eigenschaften (kurz „Addi-grad“) konnten somit alle wesentlichen Forschungsziele vollumfänglich erreicht werden, konkret umfassen diese:

- Modifizierung des SLM-Verfahrens bzgl. Belichtungsstrategie und Fertigungsparameter zum gezielten Einbringen von gradierten Werkstoffeigenschaften
- Klärung und Dokumentation der in solchen gradierten Komponenten ablaufenden Schädigungsmechanismen
- Bereitstellung Auslegungskonzept zur rechnerischen Prognose der Bauteil-Lebensdauer bzw. Ermittlung einer zulässigen Fehlergröße
- Anwendungsorientierter Einsatz des SLM-Verfahrens zur Herstellung von tragenden Leichtbau-Strukturen im Automobil durch Entwicklung eines additiv gefertigten Bremsattel mit gradierten Werkstoffeigenschaften

Erfolgte Veröffentlichungen

- U. Jung, O. Hemmelmann, A. Kern: Charakterisierung und Bewertung von Defekten in additiv gefertigtem AlSi10Mg hinsichtlich Werkstoffermüdung. Berichtsband zur DVM-Tagung „Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen“, Berlin, 2021
- A. Kern, S. Wörner, H. T. Beier, U. Jung: Additiv gefertigtes AlSi10Mg mit gradierten Werkstoffeigenschaften – Fertigung Prüfung und Simulation der Defektverteilung. Berichtsband zur DVM-Tagung „Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen“, Berlin, 2022
- A. Kern, S. Wörner, H. T. Beier, U. Jung: Bruchmechanische Lebensdauer-Prognose für additiv gefertigte Aluminium-Komponenten. Berichtsband zur DVM-Tagung „Bruchmechanik und Bauteilsicherheit“, Berlin, 2022
- A. Kern, O. Hemmelmann, U. Jung: Additive Fertigung vs. Guss: Ein Vergleich am Beispiel für Aluminium. Berichtsband zur DVM-Tagung „Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen“, Berlin, 2023

Geplante Veröffentlichungen

- A. Kern, O. Hemmelmann, U. Jung, S. Wörner, H. T. Beier: Effect of surface roughness and porosity on mechanical properties PBF-LB AlSi10Mg, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*
- A. Kern, U. Jung, S. Wörner, H. T. Beier, M. Vormwald: Probabilistic fatigue life assessment for AlSi10Mg components produced by L-PBF, *International Journal of Fatigue*

Quellen

- [1] DIN 50100:2022-12. Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile. Beuth Verlag, Berlin, 2022. doi: <https://dx.doi.org/10.31030/3337109>.
- [2] DIN EN ISO 3274:1998-04. Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996). Beuth Verlag, Berlin, 1998. doi: <https://dx.doi.org/10.31030/7433972>.
- [3] DIN EN ISO 6892-1:2020-06. Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019). Beuth Verlag, Berlin, 2020. doi: <https://dx.doi.org/10.31030/3132591>.
- [4] A. Bauereiß, T. Scharowsky und C. Körner. „Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 214.11 (2014), S. 2522–2528. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.002>.
- [5] Wen Hao Kan u. a. “Factors that affect the properties of additively-manufactured AlSi10Mg: Porosity versus microstructure“. In: *Additive Manufacturing* 29 (2019), S. 100805. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100805>.
- [6] ASTM E647-23a. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, 2024. doi: <https://dx.doi.org/10.1520/E0647-23A>.
- [7] Michael Vormwald. „Anrißlebensdauervorhersage auf Basis der Schwingbruchmechanik für kurze Risse“. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 1989.
- [8] Yukitaka Murakami. “2 - Stress concentration“. In: *Metal Fatigue (Second Edition)*. Hrsg. von Yukitaka Murakami. Second Edition. Academic Press, 2019, S. 13–27. isbn: 978-0-12-813876-2. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813876-2.00002-9>.
- [9] M. Madia u. a. “The IBESS model – Elements, realisation and validation“. In: *Engineering Fracture Mechanics* 198 (2018), S. 171–208. issn: 0013-7944. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.08.033>.
- [10] DIN EN ISO 643:2020-06. Stahl - Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße. Beuth Verlag, Berlin, 2020. <https://dx.doi.org/10.31030/3141695>
- [11] DIN EN ISO 3369:2010-08. Undurchlässige Sintermetallwerkstoffe und Hartmetalle - Ermittlung der Dichte. Beuth Verlag, Berlin, 2010. <https://dx.doi.org/10.31030/1634435>
- [12] Sezgin Ercan. „FEM-basierte Strukturoptimierung eines additiv gefertigten Bremssattels aus AlSi10Mg“, Technische Hochschule Mittelhessen, 2023
- [13] Saleh Bassiouny u. a. “30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges” *Composites Part B: Engineering* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108376>
- [14] Hannah-Sophie Stumpfl. „Auslegung eines Monobremssgehäuses für die laseradditive Fertigung“, Technische Universität Darmstadt, 2021
- [15] Ilaria Roveda. „Investigation of Residual Stress and Microstructure Effects on the Fatigue Behaviour of an Aluminium-Silicon Eutectic Alloy Produced by Laser Powder Bed Fusion“, Technische Universität Darmstadt, 2023