

# Designfindung und schwingfeste Auslegung einer im SLM-Verfahren gefertigten Fahrradkurbel sowie Abgleich mit dem Bauteilversuch

Benjamin Kass, Robert Maaßen, Dr. Markus Schneider  
GKN Sinter Metals Engineering GmbH, Radevormwald, Deutschland

## Summary

GKN Powder Metallurgy is a global manufacturer of powder metallurgical components and metal powders. The GKN Additive division focuses on the additive manufacturing processes of binder jetting and selective laser melting and offers the entire spectrum from powder production, process development and contract manufacturing right up to component development to fulfill fatigue requirements. The manufactured components are prototypes, small series and components for the aftermarket.

Here, a bicycle crank serves as an example for a cyclically loaded component. The design and dimensioning of this bicycle crank is described below with regard to production using the selective laser melting process. The material data required for the design and dimensioning of cyclically stressed components, for example according to the FKM guideline [1], are determined. Finally, validation is carried out with a component test on a servo-hydraulic test bench.

## Keywords

topology optimization, parameter study, material data, fatigue analysis, AM process simulation, SLM process, validation

# 1. Einleitung und Überblick

GKN Powder Metallurgy ist ein weltweit tätiges Unternehmen und der mit Abstand größte Hersteller von pulvermetallurgischen Bauteilen. Der Geschäftsbereich GKN Additive hat sich auf die additiven Herstellungsverfahren Binder Jetting sowie das selektive Laserschmelzen fokussiert und bietet das gesamte Spektrum von der Pulverherstellung, der Prozessentwicklung, über die Auftragsfertigung, bis hin zur anforderungs- und belastungsgerechten Bauteilentwicklung. Bei den gefertigten Bauteilen handelt es sich um Prototypen, Kleinserien und Bauteile für den Aftermarket.

Exemplarisch dient hier eine Fahrradkurbel als zyklisch belastetes Bauteil, dessen Auslegung und Gestaltung hinsichtlich der Fertigung im Selektiven-Laserschmelz-Verfahren beschrieben wird. Die für eine anforderungs- und belastungsgerechte Auslegung zyklisch beanspruchter Bauteile, beispielsweise nach der FKM-Richtlinie [1], erforderlichen Werkstoffkennwerte werden ermittelt. Abschließend erfolgt die Validierung mit einem Bauteilversuch auf einem servohydraulischen Prüfstand.

## 2. Selektives-Laserschmelz-Verfahren

Das Selektive-Laserschmelz-Verfahren, kurz SLM-Verfahren, ist ein additives Fertigungsverfahren. Beim SLM-Verfahren entsteht der Werkstoff durch das Aufschmelzen von in einer Schicht aufgetragenem Pulver entlang definierter Bahnen mittels eines Lasers und der anschließenden Erstarrung. Viele benachbarte aufgeschmolzene und erstarrte Bahnen ergeben eine Fläche, viele aufgeschmolzene und erstarrte Flächen übereinander das Bauteil. Den Vorgang des Aufschmelzens mit einem Laser nennt man auch Belichtung. Nur dort, wo ein Bauteil entstehen soll, erfolgt die Belichtung. Nach dem Belichtungsvorgang wird die Bauplatte um den Betrag der Schichtdicke abgesenkt und der Beschichter, bzw. Recoater trägt eine neue Pulverschicht auf. Der Zyklus aus Auftragen einer neuen Pulverschicht, Absenken der Bauplatteform und der Schichtbelichtung wird so lange wiederholt, bis die letzte Schicht des Bauteils umgeschmolzen ist. Somit besteht das Bauteil am Ende aus einer Vielzahl von Schweißnähten, deren Einzellänge von der Belichtungsstrategie abhängt. Wie bei herkömmlichen Schweißprozessen auch, verhindert eine Schutzgasatmosphäre die ungewollte Oxidation. Die von Schweißprozessen bekannten Verzüge, aufgrund der verhinderten Kontraktion beim Abkühlen von der Schmelztemperatur und die damit verbundene Ausbildung von Eigenspannungen, treten im SLM-Prozess ebenfalls auf. Hierbei bilden sich nach dem Belichten und beim Abkühlen jeder neuen Schicht Eigenspannungen aus, die sich überlagern.

Die Verzüge in Aufbaurichtung müssen möglichst klein sein, um Kollisionen zwischen Bauteil und dem Beschichter zu vermeiden, da es sonst zu Recoater-Crashes kommen kann. Hierauf kann man durch ein geschicktes Design und die Orientierung der Bauteile im Bauraum Einfluss nehmen. In Bereichen, die sich dennoch stark verziehen, ist eine Stützstruktur notwendig, welche den Verzug während des Aufbaus begrenzt. Diese Stützstruktur begrenzt nicht nur Verzug, sondern auch die Gestaltungsfreiheit für im SLM-Verfahren gefertigte Bauteile. Darauf wird in den folgenden Abschnitten anhand der Fahrradkurbel näher eingegangen.

## 3. Werkstoffkennwerte

Die Fahrradkurbel wird aus der Aluminiumlegierung AlSi10Mg gefertigt und anschließend zur Verbesserung der zyklischen Werkstoffeigenschaften T6 wärmebehandelt und sandgestrahlt.

Der im zweiten Abschnitt kurz beschriebene Prozessverlauf lässt erahnen, dass die mit diesem Prozess erzielten Werkstoffkennwerte abhängig von den Prozessparametern, der verwendeten Maschine und den Eigenschaften des Ausgangspulvers selbst sind, [2] und [3] bestätigen dies. Bei den Prozessparametern beeinflussen besonders die benutzte Laserleistung, die Geschwindigkeit, mit welcher der Laser die einzelnen Bahnen abfährt, die Schichtdicke sowie die Abstände der einzelnen Bahnen die Abmessungen des Schmelzbades und damit die mechanischen Werkstoffeigenschaften.

Die mit dem SLM-Verfahren und nach T6-Wärmebehandlung sowie anschließendem Strahlen erreichten Werte für die

Zugfestigkeit Rm	[MPa]	279
Streckgrenze Rp0,2	[MPa]	203
Elastizitätsmodul	[GPa]	85
Bruchdehnung	[%]	8
Oberflächenhärte [HB2,5/62,5]		86,3
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,6

Zugfestigkeit, die Streckgrenze und die Oberflächenhärte sind mit denen, in verschiedenen Gussverfahren mit nachfolgender T6-Wärmebehandlung erzielten, vergleichbar [1] und sind in obenstehender Tabelle zu finden.

Für die Auslegung und Lebensdauerabschätzung zyklisch belasteter Bauteile in Anlehnung an die FKM-Richtlinie [1] ist der Aufwand, die Werkstoffeigenschaften zu messen, erheblich größer, als der Aufwand zur Ermittlung der statischen Eigenschaften. Dazu benötigt man die Schwingfestigkeiten bei verschiedenen Lastverhältnissen für den Mittelspannungseinfluss, die Kerbempfindlichkeit sowie die Festigkeitsstreuung. Für diese Prüfungen stehen im Hause eine Zugprüfmaschine und fünf Kleinprüfmaschinen für die Schwingfestigkeit zur Verfügung. In spannungsgeregelten Biege-Schwing-Versuchen werden bei den Lastverhältnissen  $R = -1$ ,  $R = 0$  sowie  $R = 0,5$  an der ungekerbten Probe Wöhlerlinien aufgenommen. Beim Lastverhältnis von  $R = -1$  erfolgte zur Ermittlung der Kerbempfindlichkeit außerdem die Aufnahme einer Wöhlerlinie mit einer gekerbten Probe. Zur Ermittlung einer Wöhlerlinie wurden jeweils 60 Proben geprüft. Dieser Probenumfang liegt über der „üblichen“ Stichprobengröße nach [4]. Beide verwendeten Werkstoffproben sind in Abbildung 1 gezeigt, und entsprechen der DIN 3928 für PM-Werkstoffproben. Die Aufbauparameter von Proben und Bauteilen sind abgesehen von der Orientierung identisch.



Abbildung 1 links: Werkstoffproben nach DIN 3928, rechts: Probe auf Resonanzprüfmaschine

Abbildung 1 zeigt rechts die Prüfmaschine mit eingespannter Werkstoffprobe. Diese Spannfutter sind wegen der umfassenden Werkstoffprüfung an konventionell gepressten und gesinterten Proben vorhanden, deshalb wird hier die gleiche Probengeometrie benutzt. Der Aufbau der geprüften Proben erfolgte nur in senkrechter Orientierung. Eine mögliche Festigkeitsanisotropie aufgrund des schichtweisen Aufbaus bleibt somit unberücksichtigt.

Aus diesen Schwingfestigkeiten kann das Haigh-Diagramm aus Abbildung 2 erstellt werden. Die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_2$  liegt bei 0,227. Die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_3$  liegt bei 0,327. Dieser Verlauf ist nach Stüssi [5] typisch für Aluminiumlegierungen.

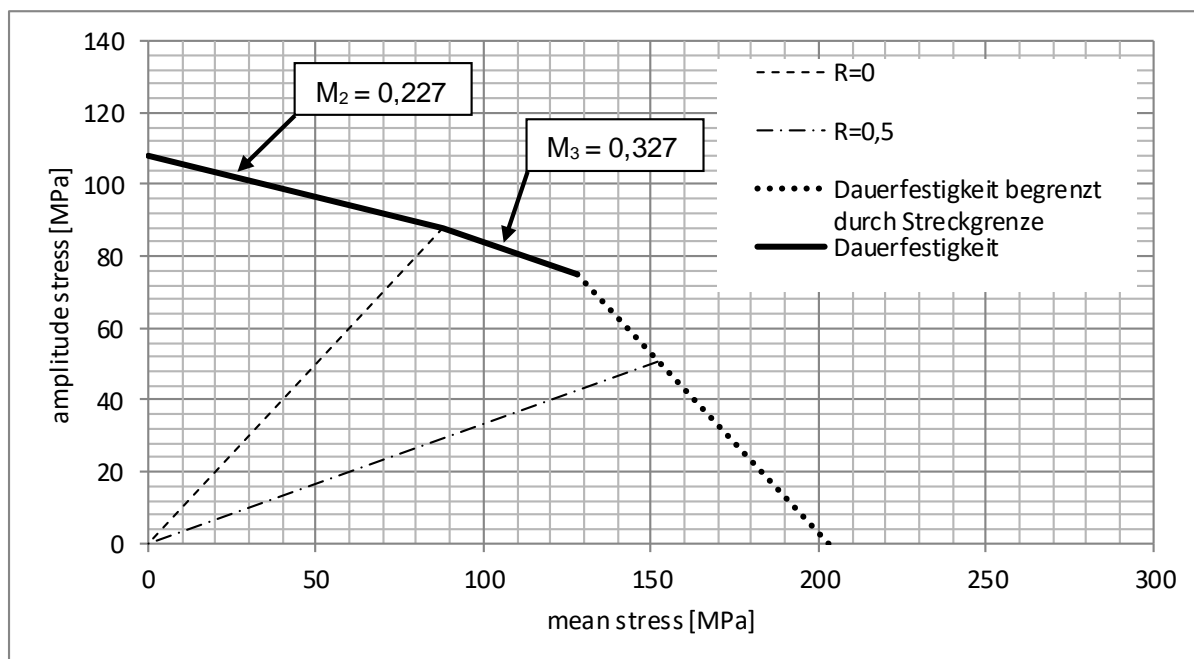


Abbildung 2: Haigh-Diagramm für den Zugbereich für AISi10Mg prozessiert im SLM-Prozess

Durch eine T6-Wärmebehandlung und anschließendes Strahlen kann die Bruchdehnung des im SLM-Verfahren hergestellten Werkstoffs ungefähr verdoppelt werden [6], wobei eine Quantifizierung des Strahlens nicht möglich ist.

Mit den ermittelten Werkstoffdaten wird ein Material für die Lebensdauerabschätzung in nCode DesignLife erstellt. Die Stützwirkung  $n_\chi$  des Materials wird über die Wahl der zugrunde liegenden Materialgruppe berücksichtigt und lässt sich nach [7] wie folgt berechnen

$$n_\chi = 1 + \left(\frac{C_1}{K}\right)^m * \sqrt{\chi^*}.$$

Darin ist  $\chi^*$  der bezogene Gradient,  $K$  steht für die Streckgrenze und  $m$  sowie  $C_1$  sind werkstoffspezifische Kennwerte. Für die gekerbte Biegewechselprobe ergibt sich ein bezogener Gradient von 2,227 1/mm. Mit  $C_1 = 14,5$  und  $m = 0,45$  ergibt sich eine Stützziffer von 1,455. Der Vergleich mit der Stützziffer berechnet nach der Methode in der FKM [1] ergibt, dass sich die mit dem SLM-Verfahren gefertigten Werkstoffproben und der anschließenden T6-Wärmebehandlung und dem Strahlen verhalten, wie eine Aluminiumknetlegierung. Deshalb wird in nCode DesignLife die Werkstoffgruppe 100 gewählt.

## 4. Designfindung

Mit der Topologieoptimierung lassen sich innerhalb eines definierten Designraums die durch äußere Belastungen im Bauteil auftretenden Lastpfade aufzeigen. Die Topologieoptimierung ist ein Berechnungsverfahren und liefert als solches immer ein Ergebnis, welches die gewählten Randbedingungen erfüllt. Trifft man bei der Erstellung des Berechnungsmodells also Annahmen, welche die Realität unzureichend abbilden, kann das Ergebnis für die direkte technische Umsetzung unbrauchbar sein und bedarf auf jeden Fall einer gründlichen Plausibilitätsprüfung. Die Faktoren, welche die Ergebnisse von Topologieoptimierungen maßgeblich beeinflussen, sind die folgenden:

1. Definition des Belastungsfalls und der Lagerung
2. Definition des Designraums
3. Verwendetes Optimierungsziel
4. Verwendete Zielbeschränkungen
5. Verwendete Fertigungsbeschränkungen
6. Verwendeter Elementtyp und Elementgröße

Berücksichtigt man bei der Plausibilitätsprüfung erprobte Gestaltungsprinzipien, bei der Fahrradkurbel speziell für den Leichtbau, so kann die Topologieoptimierung zum Bauteilverständnis beitragen und liefert Ideen für die Bauteilgestaltung. Zu den Gestaltungsprinzipien gehören nach [8] und [9] beispielsweise der Versuch eine symmetrische Krafteinleitung zu erzielen, die Konstruktion symmetrisch zu gestalten, möglichst geschlossene statt offene Profile zu benutzen, die ein möglichst großes Flächenträgheits- und Widerstandsmomente gegen Biege- und Torsionsbelastung aufweisen, Blechdicken gezielt zu verändern und die Anzahl von Einzelteilen zu minimieren.

Um bei einer Topologieoptimierung die Berechnungszeiten in einem akzeptablen Rahmen zu halten, ist das Berechnungsmodell möglichst klein zu halten. Damit einhergehend sind Vereinfachungen zu treffen, welche die Ergebnisse der Topologieoptimierung beeinflussen. Das DIN-Taschenbuch 345 „Fahrräder und Fahrradzubehör“ [10] beinhaltet „Prüfverfahren für Pedale und Antriebssysteme“ und liefert Pedalkräfte, die für diese Auslegung herangezogen werden. Die Kraft auf das rechte Pedal wird als externe Kraft auf das Pedalgewinde eingeleitet. Diese Vereinfachung führt im Bereich der Lasteinleitung zu falschen Spannungsergebnissen. Die Kraft auf das linke Pedal erzeugt ein Moment auf die Tretlagerwelle. Im Berechnungsmodell sind die Tretlagerwelle und der linke Kurbelarm nicht berücksichtigt. Das Moment wird direkt in den Kurbelstern, welcher mit dem rechten Kurbelarm fest verbunden ist, eingeleitet. Mit einem zylindrischen Koordinatensystem lässt sich eine Rotation der rechten Fahrradkurbel um die Tretlagerachse realisieren. Gleichzeitig lassen sich Verschiebungen in radiale und axiale Richtung unterdrücken. Die Unterdrückung der axialen Verschiebung entspricht in der Realität der Verhinderung des Rutschens der Fahrradkurbel von der Tretlagerwelle. Die tatsächliche Belastung der Fahrradkurbel im Bereich der Aufnahme für die Tretlagerwelle kann so nicht abgebildet werden. Die Kraftübertragung vom Kurbelstern auf die Fahrradkette wird im Berechnungsmodell mit einer weiteren Verschiebungsrandbedingung und dem zylindrischen Koordinatensystem realisiert. Die Verschiebungsrandbedingung wirkt auf die Kettenblattschrauben, unterbindet die rotatorische Bewegung und lässt axiale sowie radiale Verschiebungen ungehindert zu. Das Simulationsmodell ist in

Abbildung 3 dargestellt. Eine axiale Belastung des Kurbelsterns durch eine schräglauflaufende Kette kann so nicht wiedergegeben werden.

Der zur Topologieoptimierung der Fahrradkurbel erstellte Designraum ist einerseits beschränkt durch die angrenzenden Kettenstreben des Fahrradrahmens, andererseits darf eine Erweiterung des Designraums nicht zu einem Design führen, das den Fahrradfahrer beim Pedalieren stört. Von der Optimierung ausgeschlossen bleiben Bereiche um das Gewinde für die Pedalachse, um die Aufnahme der Tretlagerachse und die Gewinde zur Befestigung der Kettenblätter. Diese Bereiche heißen in ANSYS Exclusion Regions, verdeutlicht ist das ebenfalls in Abbildung 3. Da die Exclusion Regions erhalten bleiben ermöglicht der Ausschluss der Kettenblattgewinde die Montage von Standard-Kettenblättern.

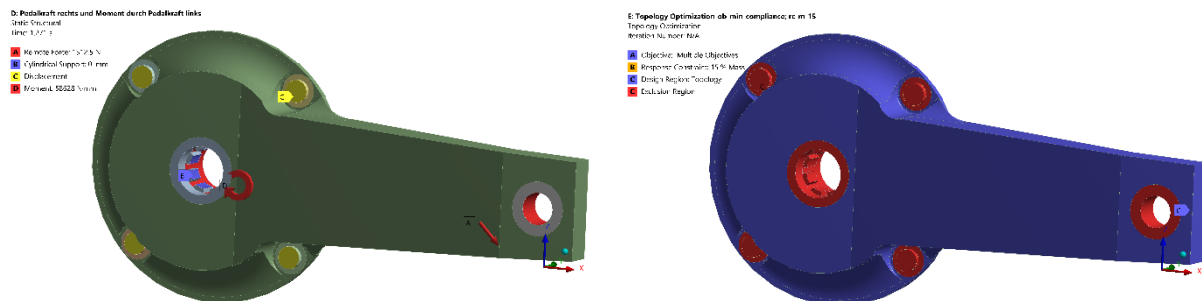


Abbildung 3: Last und Randbedingungen; Design Region & Exclusion Regions

Mehrere Optimierungsziele sind möglich. Die Fahrradkurbel soll möglichst leicht sein und dennoch die Festigkeitsanforderungen erfüllen. Als Optimierungsziel lässt sich hierzu die Minimierung der Masse wählen. Ohne Einschränkung dieses Ziels würde der Topologieoptimierungsalgorithmus sämtliche Masse im Design Raum entfernen. Eine globale Vergleichsspannung nach von Mises darf im Designraum nicht überschritten werden. In der Fahrradkurbel herrschen unterschiedliche Mittelspannungsverhältnisse, womit ein einziger Spannungswert zur Auslegung einer möglichst leichten Fahrradkurbel nicht genügt. Die Fahrradkurbel wäre ungleichmäßig ausgelastet und weiteres Potential zur Materialeinsparung bliebe ungenutzt. Deshalb wird hier ein anderer Ansatz verfolgt.

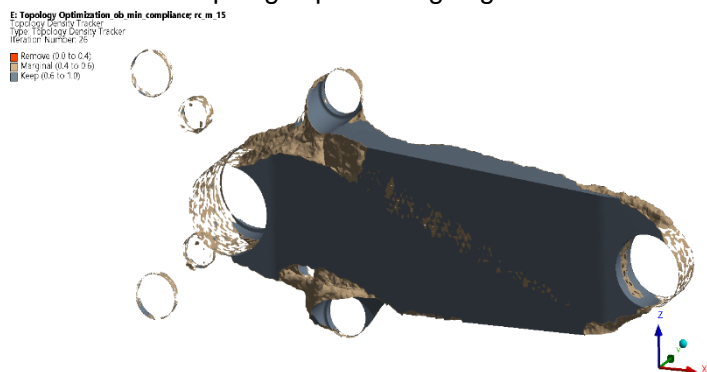


Abbildung 4: Ergebnis Topologieoptimierung Minimierung Nachgiebigkeit bei Massenreduktion auf 15% des Ausgangswertes

Die Masse von leichten am Markt befindlichen Fahrradkurbelarmen liegt bei rund 160g. Diesen Wert kann man als Massengrenze für eine Topologieoptimierung nutzen. Dazu muss die Masse des Designraums auf 15 % des Ausgangswertes reduziert werden. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, mit dem zur Verfügung gestellten Material innerhalb des Designraums die Bauteilform mit minimaler Nachgiebigkeit zu finden. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, erfolgt hier über die zwei dem Kurbelarm gegenüberliegenden Kettenblattschrauben keine Ableitung der Last. Dies ist ein Resultat des Designraums, der eine

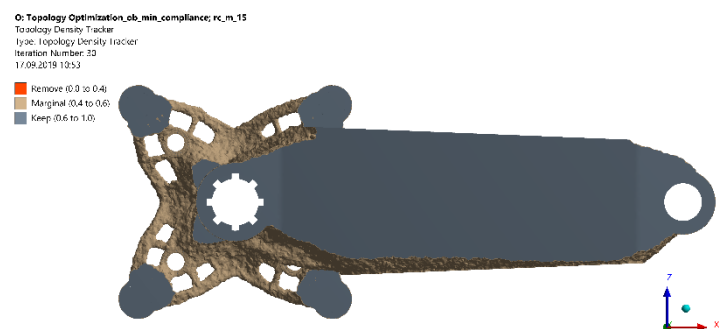


Abbildung 5: Ergebnis Topologieoptimierung Minimierung Nachgiebigkeit bei Massenreduktion auf 15% des Ausgangswertes und Trennung von Kurbelarm und Kurbelstern

asymmetrische Kräfteinleitung in den Kurbelstern ermöglicht. Damit bilden sich bevorzugt die kürzesten Lastpfade zwischen dem Kurbelarm und der Kraftweiterleitung über die Verschiebungsrandbedingung an den Kettenblattschrauben aus. Mit einer geometrischen Trennung von Kurbelarm und Kurbelstern ist eine symmetrische Einleitung der Pedalkräfte in den Kurbelstern möglich. Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist in Abbildung 5 zu sehen. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass sich für den Kurbelstern eine rotationssymmetrische Gestaltung empfiehlt. Mit den hier getroffenen Annahmen ergibt sich für den Kurbelstern allerdings eine Struktur, die in axialer Richtung eine geringe Steifigkeit besitzt. Im realen Betrieb führt eine schräg laufende Kette zu einer axialen Belastung. Zudem ist eine filigrane Struktur mit dünnen Streben anfälliger gegenüber Schmutz und Schlägen durch Steine oder Äste.

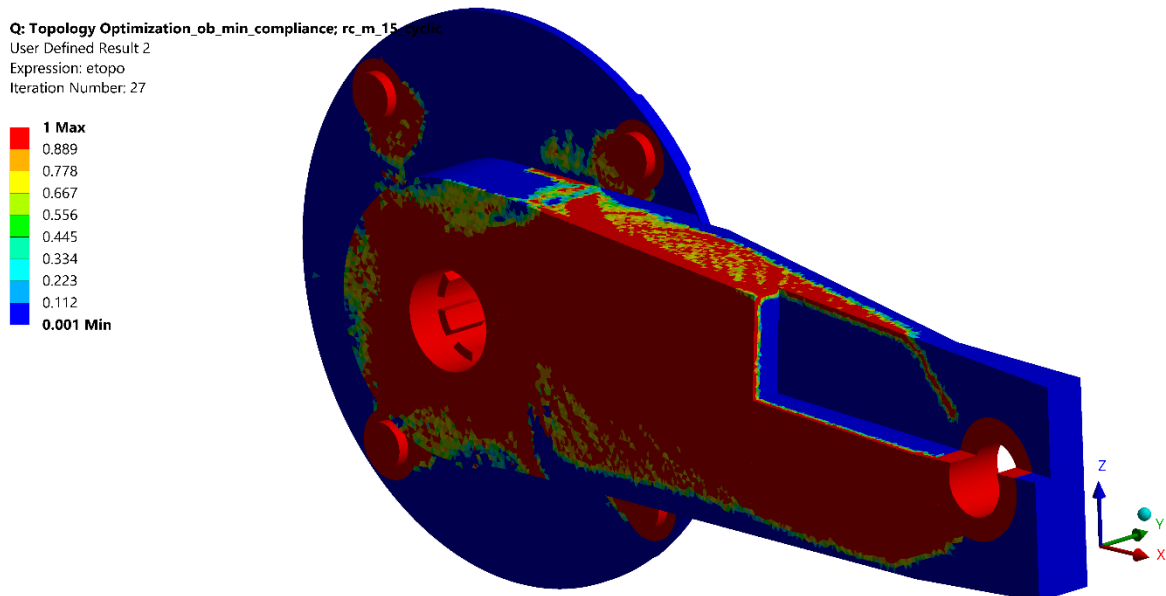


Abbildung 6: Verteilung der Pseudodichte im Designraum der Topologieoptimierung mit Minimierung der Nachgiebigkeit bei Massenreduktion auf 15% des Ausgangswertes und Trennung von Kurbelarm und Kurbelstern

Deshalb findet sich für den Kurbelstern im weiteren Verlauf eine andere Gestaltung, die in axialer Richtung steifer ist. Das zur Verfügung stehende Material schmiegt sich bei der Topologieoptimierung im Bereich des Fahrradkurbelarms an die Außenkontur des Designraums an und bildet einer dünnwandigen Hohlstruktur. Verdeutlicht ist das in Abbildung 6, wo die Pseudodichte-Verteilung im Designraum bei der Topologieoptimierung mit dem Ziel minimierter Nachgiebigkeit bei einer Massenreduktion auf 15% des Ausgangswertes und Trennung von Kurbelarm und Kurbelstern dargestellt ist. Um die Pseudodichteverteilung im Kurbelarm zu zeigen, ist ein Stück des Designraums ausgeschnitten. Rot eingefärbte Pseudodichtebereiche bedeuten, dass hier Material zur Lastübertragung notwendig ist. In blauen Bereichen liegt die Pseudodichte bei 0,001, was bedeutet, dass Material zur Lastübertragung hier nicht benötigt wird. Es ist davon auszugehen, dass eine Vergrößerung des Designraums zur Anlagerung des Materials noch weiter nach außen führen würde. Da nur eine bestimmte Masse zum Verteilen zur Verfügung steht, würde mit größer werdendem Designraum die Wandstärke immer weiter abnehmen. So würden Wandstärken erreicht werden, welche sich nicht mehr fertigen lassen und nicht mehr alltagstauglich wären. Dies stellt eine weitere Beschränkung für die Größe des Designraums dar. Da die Pedalkraft nicht nur zu einer Biegung, sondern wegen des exzentrischen Kraftangriffspunkts, siehe Abbildung 3, gleichzeitig zu einer Torsion des Kurbelarms führt, ist die geschlossene Hohlstruktur die steifste mögliche. Um das Gestaltungsprinzip, ein geschlossenes Profil mit gleichzeitig möglichst großem Widerstandsmoment gegenüber Biegung und Torsion optimal umsetzen zu können, ist eine weitere Optimierung nötig. Ohne die minimale Strukturgröße manuell zu ändern, liegt die kleinste erreichbare Strukturgröße in Ansys bei ungefähr dem 2,5-Fachen der benutzten Elementgröße. Bei manueller Einstellung der minimalen Strukturgröße soll dieses Verhältnis möglichst eingehalten werden. Möchte man also Wandstärken von 1 mm in der Topologieoptimierung erreichen, müsste man die Elementgröße auf 0,4 mm einstellen. Da im Designraum ein gleichförmiges Netz mit einheitlicher Elementgröße benutzt werden soll, würde dies im Fall der Fahrradkurbel zu FE-Modellen mit mehreren Millionen Knoten und damit zu langen Rechenzeiten führen.

Deshalb wird für die weitere Designfindung ein rechteckiges Rohr als Grundgestalt für den Kurbelarm angenommen. Um die Grundgestalt ausreichend zu dimensionieren, wird die Geometrie parametrisiert und hinsichtlich des Gewichts, sowie der maximalen Hauptspannung auf der Oberseite des Arms basierend auf Antwortflächen optimiert. Hierbei kommt die Design Exploration Toolbox in der Ansys Workbench zum Einsatz. Über ein während der Konstruktion in SpaceClaim aufgezeichnetes Skript lassen sich die Eingangsparameter einstellen. Diese sind in Abbildung 7 zu sehen. Durch die Parametrisierung aller vier Wandstärken, findet das zuvor genannte Gestaltungsprinzip, gezielt Wandstärken zu variieren, Verwendung. Da zur Fertigung der Fahrradkurbel das SLM-Verfahren zum Einsatz kommt, ist der Aufwand den Kurbelarm und Kurbelstern hohl zu fertigen relativ gering und unterschiedliche Wandstärken stellen kein Problem dar. Im Gegensatz zu konventionell gefertigten Fahrradkurbeln macht es das SLM-Verfahren auch möglich, den Kurbelstern und den Kurbelarm in einem Teil zu fertigen. Die Integralbauweise als weiteres Gestaltungsprinzip für den Leichtbau wird also auch angewendet.

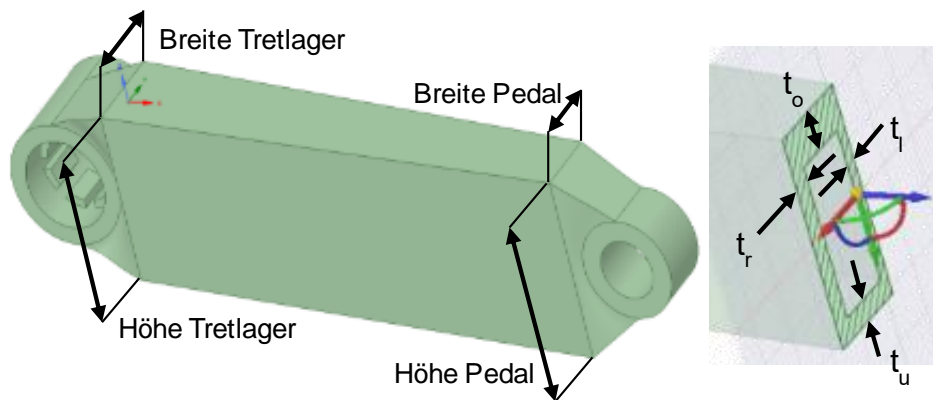


Abbildung 7: parametrisierte Geometrie

Die weitere jetzt manuelle Optimierung der Geometrie erfolgt in Ansys SpaceClaim. Hierzu zählt die Einbringung von Verrundungen zur Reduzierung von Kerbspannungen. In Abbildung 8 sieht man, dass die Spannungen auf der Innenseite des Kurbelarms durch die Kraft auf das rechte Pedal in der Verrundung zur Aufnahme der Tretlagerwelle am größten sind. Wie aus der Abbildung 8 hervorgeht, ist in diesem Bereich keine Verrundung mit einem festen Radius, sondern eine Verrundung nach der

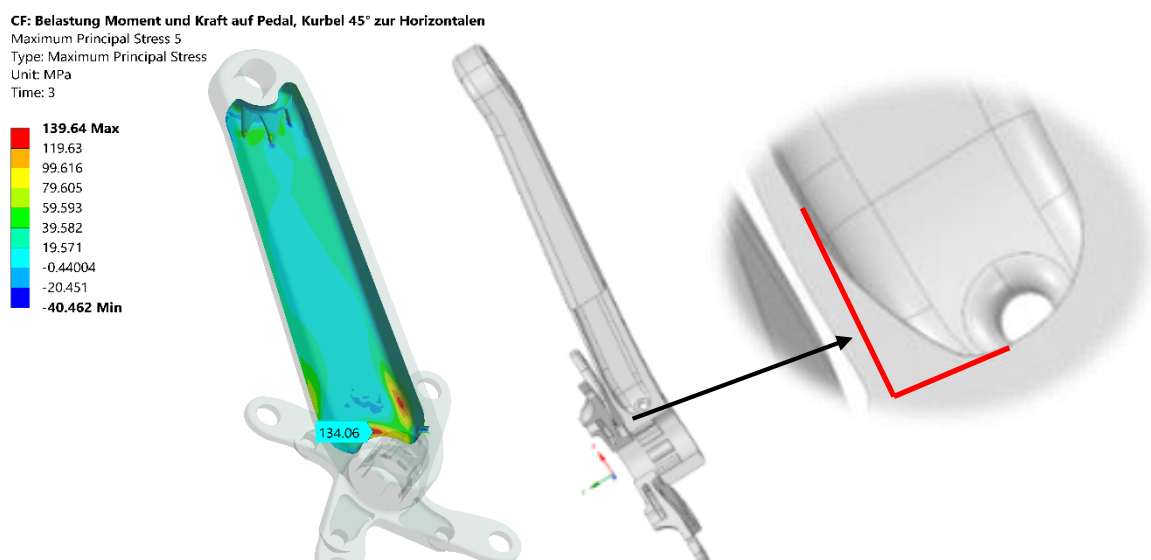


Abbildung 8: Belastung und Verrundung nach Mattheck im Hohlraum des Kurbelarms sowie Öffnung zum Pulverabfluss

Methode der Zugdreiecke von Mattheck [11] eingebracht. Diese Art der Verrundung bringt in diesem Bereich eine Spannungsreduzierung von rund 30%.

Wenn man eine für das SLM-Verfahren günstige Geometrie generieren möchte, muss die Fertigungsorientierung des Bauteils bei dessen Gestaltung bekannt sein. Zum Abfließen von nichtaufgeschmolzenem Pulver aus den Hohlräumen im Kurbelarm und den Armen des Kurbelsterns müssen Öffnungen vorhanden sein. Beim Einbringen der Öffnungen ist darauf zu achten, dass diese einerseits ein einfaches Abfließen des Pulvers, am besten noch auf der Bauplatte, ermöglichen und andererseits das Bauteil möglichst wenig schwächen. Für den Hohlraum des Kurbelarms wäre zum guten Pulverabfluss eine Öffnung auf der Fahrradkurbelinnenseite geeignet. Wie ebenfalls aus Abbildung 8 hervorgeht, ist diese Position aus Festigkeitsgründen allerdings ungünstig und die Öffnung wird auf die druckbelastete Seitenfläche des Kurbelarms verlegt. Da man aus Hohlräumen die genannten Stützstruktur nicht entfernen kann, muss das Bauteil so gestaltet sein, dass in Hohlräumen keine Stützstruktur benötigt wird.

Die Bauteilorientierung ist bei der Fertigung im SLM-Verfahren maßgeblich für das Verformungsverhalten des Bauteils während des Aufbaus verantwortlich. Außerdem gilt, je kleiner der Winkel zwischen Bauplatte und zur Bauplatte gerichteter Bauteiloberfläche, desto schwieriger ist die Fertigung dieser Oberfläche. Dieser Winkel heißt Überhangwinkel. Der Verzug in Aufbauichtung ist während des Aufbaus so gering zu halten, dass der Auftrag einer neuen Pulverschicht nicht gestört wird. Zum Begrenzen dieses Verzugs dient angesprochene Stützstruktur. Die Konstruktion der Stützstruktur ist zeitaufwändig, die Stützen verursachen zusätzliche Belichtungszeit, verbrauchen Material und müssen im Anschluss wieder entfernt werden, wobei sie mitunter Bauteiloberflächen hinterlassen, die weitere Nacharbeit erfordern. Deshalb ist eine Orientierung zu finden, welche zu geringen Verzügen und gleichzeitig zu möglichst wenigen zu stützenden Oberflächen führt. Hierzu stellt SpaceClaim einige Möglichkeiten bereit. Es lassen sich die Bereiche der Bauteiloberfläche hervorheben, die in einem Winkel unterhalb des eingestellten Überhangwinkels zur Bauplatte stehen. Im zweiten Schritt lässt sich das Bauteil so orientieren, dass möglichst wenig Oberfläche des Bauteils unterhalb des eingestellten Überhangwinkels zur Bauplatte steht. Diese Orientierung für die Fahrradkurbel ist in Abbildung 9 oben zu sehen.

Eine Orientierungsfindung ist auch auf Basis der Abschätzung des Volumens der Stützstruktur, der Aufbauzeit und einer Abschätzung der Verformung während des Aufbaus möglich. Mit Hilfe einer so genannten Orientation Map kann man die Bauteilorientierung selbst einstellen. Für jedes der drei Kriterien gibt es eine eingefärbte Karte. In dieser Karte ist über die möglichen Orientierungen des Bauteils im Bauraum der zugehörige Erfüllungsgrad des Kriteriums farblich aufgetragen. Dunkelgrün bedeutet, Kriterium gut erfüllt. Dunkelrot bedeutet, Kriterium schlecht erfüllt. In einer weiteren Karte sind die Karten der drei einzelnen Kriterien überlagert, wobei man die einzelnen Kriterien gewichten kann. Abbildung 9 zeigt unten die Orientation Map mit den einzelnen Karten für die Fahrradkurbel. Vergleicht man die Karten für die Kriterien untereinander, sieht man, dass die Kriterien Volumen der Stützstruktur und Tendenz der Verformung bei gleicher Orientierung ähnlich gut erfüllt sind. Dies liegt daran, dass sich das geringste Stützvolumen ergibt, wenn möglichst viel Bauteiloberfläche mit einem Überhangwinkel oberhalb des eingestellten Grenzwertes zur Bauplatte geneigt ist. Diese Orientierung führt bei der Fahrradkurbel gleichzeitig zu kleinen Belichtungsflächen pro Schicht und zu geringeren

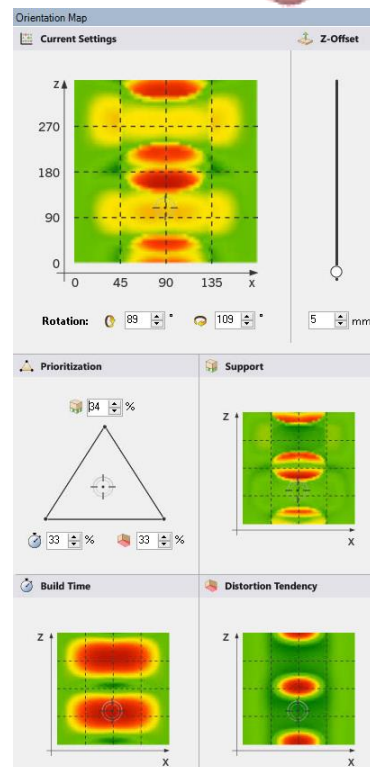
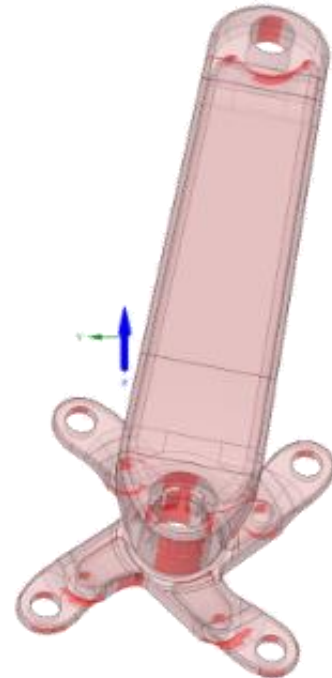


Abbildung 9: Fahrradkurbel in Aufbauorientierung für möglichst wenig Stützstruktur; unten: Orientation Map für Fahrradkurbel



Belichtungsflächenänderungen zwischen den Schichten, was zu geringerem Verzug führt. In dieser Orientierung ist der Kurbelarm ungefähr um 45° zur Bauplatte geneigt und führt somit zu einer erhöhten Aufbauzeit. Die Bauteil-Orientierung für den SLM-Prozess ist also immer ein Kompromiss aus mehreren Kriterien.

## 5. Prozesssimulation

Die im vorhergehenden Abschnitt genannte Abschätzung zur Verformung während des Aufbaus basiert nicht auf einer Simulation. Eine Simulation des Aufbaus im SLM-Prozess ist mit Ansys Additive Print möglich. Damit erhält man ein genaueres Bild der Bauteilverformungen während des SLM-Prozesses und nach dem Abtrennen von der Bauplatte. Wie Abbildung 10 links zeigt, liegen die Verformungen in der Aufbaurichtung auf der Bauplatte bei unter 0,6 mm. Dies ist ein akzeptierbarer Wert. Nach dem Abtrennen von der Bauplatte zeigt die Simulation, dass sich die Arme des Kurbelsterns im Bereich der Auflagefläche der Kettenblätter nach oben biegen. Die mit dem SLM-Verfahren erzielbaren Oberflächenrauheiten genügen nicht zur Montage der Kettenblätter. Somit erfordern diese Bereiche eine spanende Nacharbeit und hierzu ein Aufmaß. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse kann das Aufmaß direkt so bemessen werden, dass die Formabweichung durch den Verzug mit abgetragen werden kann. Somit kann eine ebene Auflage der Kettenblätter hergestellt werden. Weil auch die Bohrungen für die Kettenblattschrauben nicht direkt mit der benötigten Maßhaltigkeit im SLM-Verfahren herstellbar sind und zusätzlich eine Stützstruktur benötigen würden, sind die Bohrungen komplett geschlossen.

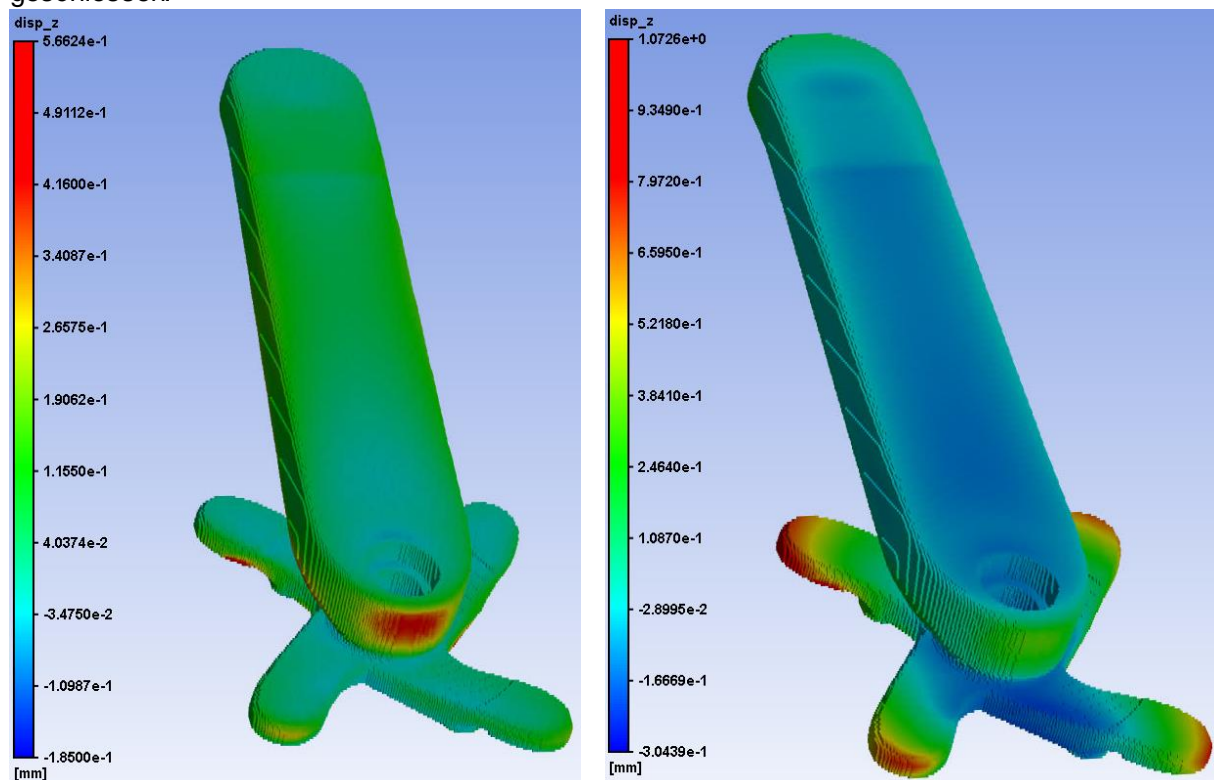


Abbildung 10: Verformung in Aufbaurichtung auf der Bauplatte und nach dem Abtrennen von der Bauplatte

## 6. Bauteilversuch

Zur Validierung der nach beschriebem Vorgehen ausgelegten Bauteile steht im Haus eine servohydraulische Prüfmaschine mit Linearzylinder von MTS bereit. Geplant war eine Bauteilprüfung in Anlehnung an „Prüfverfahren für Pedale und Antriebssysteme“ im DIN- Taschenbuch 345 [10]. Kurzfristig musste aus technischen Gründen eine alternative Prüfvorrichtung verwendet werden. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 11 oben dargestellt. Mit einem geänderten FE-Modell ist die Validierung allerdings trotzdem möglich.

Zur Prüfung ist die Fahrradkurbel mit vier M5 Zylinderkopfschrauben über die Gewindebohrungen für das kleine Kettenblatt an einen massiven Stahlblock geschraubt. Dieser ist in einen auf dem Spannfeld der Prüfmaschine befestigten Maschinenschraubstock so eingespannt, dass die Fahrradkurbel waagrecht steht. Zur Realisierung der Krafteinleitung dient eine M12 Zylinderkopfschraube, die in das hierzu angepasste Pedalgewinde eingeschraubt und beidseitig gekontert ist. Die Krafteinleitung erfolgt über den kraftgesteuerten Linearzylinder, der auf den Schraubenkopf drückt. Durch diese Krafteinleitung wird der Kurbelarm auf Biegung und Torsion belastet, so wie es auch im realen Betrieb der Fall wäre. Es wurden sechs Fahrradkurbeln mit variiert Prüfkraft annähernd schwellend bis zum Versagen belastet. Die Variation der Prüfkraft erfolgte so, dass mit den ermittelten Wöhlerlinien Zyklenzahlen zwischen 10.000 und 300.000 zu erwarten waren. Als Bauteilversagen wird eine Zunahme der Wegamplitude des Linearzylinders von 0,5 mm angenommen.

Im zugehörigen Simulationsmodell, das in Abbildung 11 unten dargestellt ist, ist die Einspannung im Maschinenschraubstock durch zwei fixierte Lagerungen abgebildet. Die Geometrie der vier Schrauben zur Montage der Fahrradkurbel an den Stahlblock ist vereinfacht, ermöglicht jedoch die Benutzung einer Schraubenvorspannkraft. Diese resultiert aus einem angenommenen Anzugsmoment von 4 Nm, wird im ersten Lastschritt aufgebracht und im weiteren Lastschritt gesperrt. Mit der vereinfachten Schraubenmodellierung lassen sich reibungsbehaftete Kontakte zwischen den Schraubenkopfauflagen und dem Stahlblock realisieren. Auch zwischen Stahlblock und Fahrradkurbel besteht ein reibungsbehafteter Kontakt. Die im zweiten Lastschritt aufgebrachte Pedalkraft wird über einen Remote Point, der mit der Fläche des Pedalgewindes verbunden ist, eingeleitet. Damit wird in der Simulation die Torsion und Verbiegung der Fahrradkurbel durch die Pedalkraft wiedergegeben.

Der aus der Simulation hervorgehende Ort maximaler Belastung ist in Abbildung 12 oben dargestellt. Abbildung 12 zeigt unten eine versagte Fahrradkurbel. Der Startort des Bauteilversagens lässt sich nicht genau erkennen, hierzu wird die Bruchfläche im

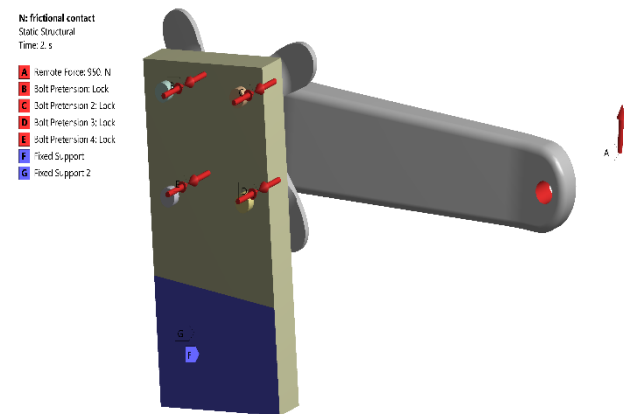


Abbildung 11: Prüfaufbau und zugehöriges Simulationsmodell

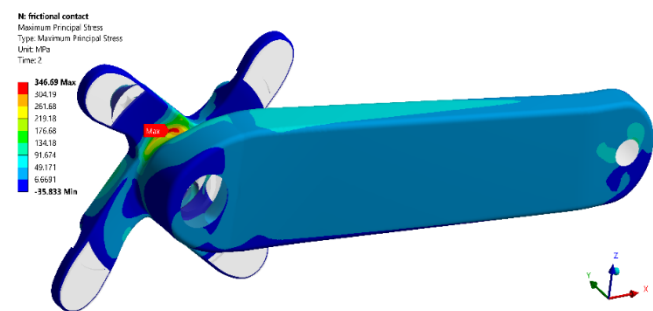


Abbildung 12: Maximale Spannung in der Simulation und Bruch im Bauteilversuch

Labor untersucht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Startort des Bauteilversagens im Bauteilversuch und der Ort maximaler Belastung in der Simulation sehr gut übereinstimmen. Die Lebensdauerabschätzung mit Hilfe der an Proben ermittelten Wöhlerlinie ist im Vergleich zu den tatsächlich erreichten Zyklenzahlen bis zum Bruch zu konservativ. Eine Erklärung hierfür ist die Stützwirkung des Materials. Das folgende Diagramm zeigt die Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit von der Schwellfestigkeit und diese Wöhlerlinie korrigiert um die Stützwirkung. Die um die Stützwirkung korrigierte Wöhlerlinie ist in nCode DesignLife hinterlegt. Außerdem sind die tatsächlich erreichten Zyklenzahlen der sechs im Bauteilversuch versagten Fahrradkurbeln eingetragen sowie die mit nCode DesignLife vorhergesagten Zyklenzahlen.

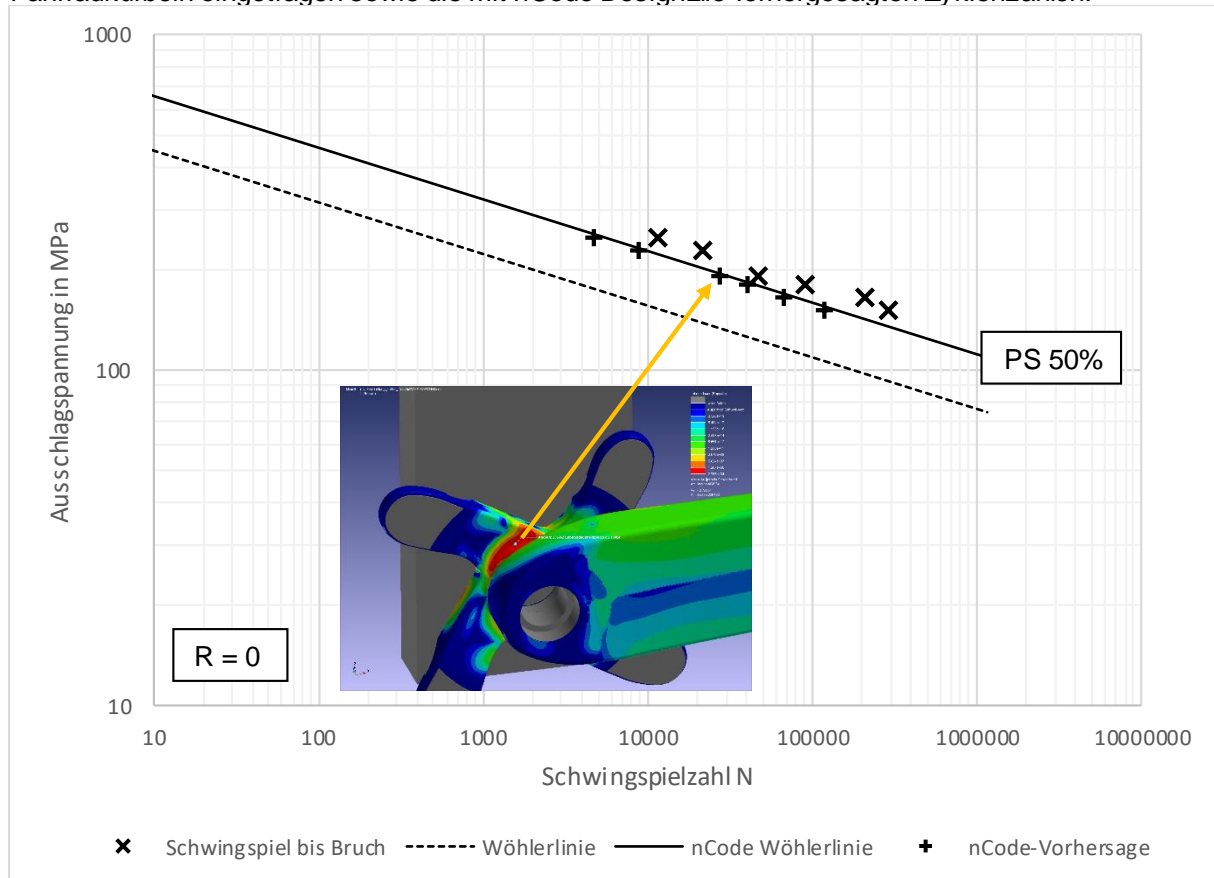


Abbildung 13: Wöhlerdiagramm

Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die Lebensdauervorhersage mit nCode DesignLife sehr gut mit den tatsächlich erreichten Zyklenzahlen korreliert. Die für die Lebensdauerabschätzung mit nCode DesignLife gewählte Materialgruppe ist also passend. Mit den experimentell ermittelten Werkstoffdaten ist eine Bauteilauslegung nach FKM [1] möglich.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Topologieoptimierung eignet sich zur Unterstützung bei der Designfindung. Sie liefert nicht direkt ein hinsichtlich zyklischer Beanspruchungs- und belastungsgerechtes Bauteil.

Die Werkstoffkennwerte der Aluminiumlegierung AlSi10Mg zur Auslegung von zyklisch belasteten Bauteilen nach der FKM [1] wurden experimentell ermittelt. Die Proben hierzu wurden mit den bei GKN benutzten Standardparametern im SLM-Verfahren gefertigt.

Wie die Validierung am Bauteilversuch zeigt, ist mit den ermittelten Werkstoffkennwerten eine Bauteilauslegung und Lebensdauerabschätzung für die Fertigung von Bauteilen im SLM-Verfahren nach FKM [1] möglich.

Eine Prüfung in Anlehnung an die „Prüfverfahren für Pedale und Antriebssysteme“ im DIN-Taschenbuch 345 [10] ist in Arbeit.

Wie sich unterschiedliche Prozessparameter auf die zyklischen Werkstoffeigenschaften auswirken, kann Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Genauso ob der schichtweise Aufbau zu anisotropen zyklischen Materialeigenschaften führt. Gegebenenfalls wäre dies ebenfalls bei der Bauteilorientierung zu berücksichtigen.

## 8. Referenzen

- [1] Forschungskuratorium Maschinenbau, „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“, VDMA Verlag, Frankfurt Main, 2012
- [2] Rehme, O., „Cellular Design for Laser Freeform Fabrication“, Dissertation Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2008
- [3] Meiners, W., „Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe“, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 1999 [1] Deutsches Institut für Normung e.V., „Bionik – Bionische Strukturoptimierung (ISO 18459:2015)“, Beuth Verlag, Berlin, 2016
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V., „Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile, DIN 50100“, Beuth Verlag, 2016
- [5] Stüssi, F., „Die Theorie der Dauerfestigkeit und die Versuche von August Wöhler“, VSB-Verlag, Zürich, 1955
- [6] <https://www.gknpm.com/globalassets/downloads/additive-manufacturing/datasheets-am-components/gkn-material-datasheet--material-datasheet--alsi10mg.pdf/>, abgerufen am 03.09.2019, 11:23 Uhr
- [7] Dietmann, H., „Zur Berechnung der Kerbwirkungszahl“, Konstruktion 37, 1985 2,67-71
- [8] Klein, B., „Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung“, Vieweg-Teubner, Wiesbaden, 2009
- [9] Kranz, J., „Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen“, Springer-Vieweg, Berlin, 2017
- [10] Deutsches Institut für Normung e.V., „Fahrräder und Fahrradzubehör – Normen 4. Auflage“, Beuth Verlag, 2015
- [11] Mattheck, C., „Thinking Tools after Nature“, Karlsruher Institut für Technologie, 2011