# Abschlussbericht

| Zuwendungsempfänger: | Förderkennzeichen: |
|---|---|
| TECOSIM GmbH | 03LB1010A |
| Vorhabensbezeichnung:<br>CAEaddFert - Entwicklung eines virtuellen Prüfstands für Bauteile zur additiven Fertigung<br>Teilvorhaben: Entwicklung eines virtuellen Prüfstands für additiv gefertigte Bauteile zur Vorhersage von statischen und zyklischen Festigkeiten | |
| Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2022 bis 31.10.2025 | |


| Gefördert durch:<br>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie<br>aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages | Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03LB1010A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. |
|---|---|

# Inhalt


I. Kurzdarstellung ..... 4
I.1 Aufgabenstellung ..... 4
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ..... 4
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ..... 5
I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde ..... 5
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 6
II Eingehende Darstellung ..... 7
II.1 Verwendung der Zuwendung, erzieltes Ergebnis, Abgleich mit der Zielsetzung ..... 7
II.1.1 Technische Recherche ..... 10
II.1.2 Ausarbeitung Pflichtenheft, Simulation ..... 12
II.1.3 Demonstratorentwurf ..... 13
II.1.4 Modellierung und FE-Analyse im Verbund ..... 15
II.1.5 Festigkeitsanalyse bei anisotropem Material ohne Eigenspannungen ..... 18
II.1.6 Statische FE-Analyse mit Eigenspannungen ..... 24
II.1.7 Analyse der Zeit- und Dauerfestigkeit des Bauteils mit Eigenspannungen ..... 35
II.1.8 Numerische Analyse der Eigenspannungsrelaxation ..... 40
II.1.9 Virtuelle Validierung durch Vergleich der erhaltenen satischen Ergebnisse ..... 46
II.1.10 Virtuelle Validierung durch Vergleich der Ergebnisse der Festigkeitsanalyse 50
II.1.11 Integration von Eigenspannungen in eine Topologieoptimierung ..... 51
II.1.12 Kosten/Nutzen-Betrachtung hinsichtlich Nachbehandlung ..... 52
II.1.13 Fazit ..... 53
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ..... 55
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ..... 55
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse ..... 55
II.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen ..... 55
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen ..... 55

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| AP | Arbeitspaket |
| BMWE | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAE | Computer Aided Engineering |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| FEM | Finite-Element-Methode |
| HIP | Heiß-isostatisches Pressen |
| IAM-WK | Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde |
| IPEK | Institut für Produktentwicklung |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| LPBF | Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (engl. Laser Powder Bed Fusion) (additives Fertigungsverfahren für Metalle) |
| SLM | Selektives Laserschmelzen (engl. Selective Laser Melting) (additives Fertigungsverfahren für Metalle) |
| TRL | Technology Readiness Level |
| TTP LB | Technologietransfer-Programm Leichtbau |

# I. Kurzdarstellung

## I.1 Aufgabenstellung

Die Additive Fertigung kann ein enormes Leichtbaupotential erschließen. Allerdings zeigen additiv gefertigte Bauteile Eigenspannungen (Aufbaurichtung, Druckstrategie) bei veränderter Materialgüte (anisotrop, evtl. porenbehaftet) und sind daher im CAE-gestützten Produktentwicklungsprozess nicht integriert. Das verhindert bisher den Einsatz solcher Bauteile insbesondere in festigkeitsrelevanten Baugruppen.

Als Projektziel sollte TECOSIM einen virtuellen Prüfstand für additiv zu fertigende Bauteile entwickeln, um diese in den CAE-gestützten Produktentwicklungsprozess einbeziehen zu können. Als Geschäftsgegenstand erarbeitet TECOSIM überwiegend struktur- und strömungsmechanische Problemlösungen in den Bereichen Crash- und Insassensimulation, Statik und Dynamik sowie Computational Fluid Dynamics (CFD). Der neue virtuelle Prüfstand baut auf Modulen zu Materialdaten und Eigenspannungswerten auf, welche von den Forschungspartnern (IPEK und IAM-WK des Karlsruher Instituts für Technologie, KIT) ermittelt werden sollten, und bewertet die Betriebsfestigkeit bzw. Dauerfestigkeit. Die Firma PMT übernahm im Projekt als Hersteller 3D-gedruckter Bauteile die Anpassungskonstruktion und Fertigung eines Funktionsdemonstrators.

Die Werkstoffzustände für additiv gefertigte typische Geometrieelemente wurden ermittelt und validiert. Eigenspannungen sollten über Ansätze der Ähnlichkeitsmechanik (topologische Ähnlichkeitsabbildung) auf FE-Modelle aufgeprägt und mit den Lastspannungen überlagert werden. Allerdings wurde der Ansatz der Ähnlichkeitserkennung zugunsten einer Auswertung von Eigenspannungstiefenprofilen im Projektverlauf verworfen. Ferner sollten anisotrope Materialkarten und Ersatzmaterialkurven (Wöhler, Haigh) für monolithisches und porenbehaftetes Material messwertgestützt erstellt werden. Die technische Bewertung sollte in eine Kosten-Nutzen-Analyse bzgl. einer eventuellen Nachbehandlung einfließen. Es sollte ein Demonstrator des virtuellen Prüfstands entstehen, der auf Basis einer gegebenen Geometrie und zugehöriger Materialeigenschaften Vorhersagen lokaler Eigenspannungen 3D-gedruckter Bauteile zulässt.

Herkömmliche experimentelle Verfahren zur Werkstoffprüfung sollten mit neuen numerischen Verfahren, wie z.B. topologische Ähnlichkeitsabbildung, kombiniert und komplexe Materialeigenschaften für die Modellierung abgeleitet werden. Wesentlich war die Erkundung eines methodischen Vorgehens, das im Projekt mit TRL 6 (Technology Readiness Level) abschließen sollte und später standardisiert werden könnte. Allein für den Sektor Automotive besteht durch den 3D-Druck ein $CO_2$-Minderungspotential von 13,5 Mt/Jahr für Stahl (bzw. 28,5 Mt/J für Aluminium).

## I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB) gefördert und vom Projektträger Jülich betreut. Projektpartner waren:

- TECOSIM GmbH
- PMT GmbH
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit seinen beiden Instituten 1) IPEK – Institut für Produktentwicklung und 2) IAM-WK – Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde

## I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Vorhabenspartner bestand ein gemeinsamer Arbeitsplan, in dem die Firma TECOSIM GmbH bei den folgenden Arbeitspaketen mitwirkte (Kurzfassung):

| Arbeitspakete TECOSIM | | 30 Monate Projektlaufzeit | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| AP 1 | Entwicklungsvorbereitung<br>1.1 Technische Recherche<br>1.5 Ausarbeitung Pflichtenheft, Simulation<br>1.6 Demonstratorentwurf | | | | | | | | | | |
| AP 2 | Vorbereitung zur Simulation sowie Optimierung und FE-Voruntersuchung<br>2.1 Modellierung und FE-Analyse Einzelbauteil<br>2.2 Modellierung und FE-Analyse im Verbund | | | | | | | | | | |
| AP 3 | Virtueller Prüfstand<br>3.1 Festigkeitsanalyse bei anisotropem Material ohne Eigenspannungen<br>3.2 Statische FE-Analyse mit Eigenspannungen<br>3.3 Festigkeitsanalyse mit Eigenspannungen | | | | | | | | | | |
| AP 4 | Virtuelle und experimentelle Validierung<br>4.1 Virtuelle Validierung anhand Eigenspannungen<br>4.2 Virtuelle Validierung anhand Festigkeitsanalyse | | | | | | | | | | |
| AP 5 | Bewertung des Auslegungsverfahrens<br>5.1 Erstellen Vorlage zur Kosten-/Nutzen-Betrachtung hinsichtl. Nachbehandlung in Abstimmung | | | | | | | | | | |
| AP 6 | Projektabschluss, Vorbereitung der Verwertung, Zusammenstellung der Entwicklungsergebnisse | | | | | | | | | | |

*Tabelle 1: Zeitplan, Arbeitspakete und -teilpakete mit Beteiligung von TECOSIM*

Der Ablauf des Vorhabens folgte im Wesentlichen dieser Planung. Aufgrund von Verzögerungen im Projektverlauf, u.a. durch aufwendige Messungen von Eigenspannungstiefenprofilen, wurde eine kostenneutrale Verlängerung von einem halben Jahr wahrgenommen.

## I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Software-Werkzeuge zur Prozess-Simulation der additiven Fertigung und des Materialverhaltens bei additiver Fertigung befinden sich z. T. bereits kommerziell auf dem Markt (TRL 9), obwohl dieses Themengebiet aufgrund seiner Komplexität immer noch Gegenstand der Forschung ist. Detaillierte Simulationen des Fertigungsprozesses haben zum Ziel, lokale Temperaturen und Eigenspannungen vorherzusagen und lassen so auf möglichen

Verzug und die Güte des Bauteils rückschließen[1] [2]. Entsprechend werden Parameter für den Fertigungsprozess abgeleitet. Je nach Verfahren können diese Simulationen sehr aufwendig sein. Am Markt vorhandene kommerzielle „verfahrenstechnische“ Programme haben zum Ziel, mittels Simulation (zumeist metallbasierter) additiver Fertigungsverfahren den Herstellungsprozess und die Güte des Bauteils zu optimieren (z. B. NETFABB, ANSYS). Für die Simulation metallbasierter additiver Fertigungsprozesse bietet z. B. die Firma Simufact eine Software zur Verringerung von Verzug und von Eigenspannungen, um den Ausschuss des Fertigungsprozesses zu vermeiden. Ein Nachteil der heute eingesetzten Softwarepakete ist jedoch vor allem die Berechnung von Eigenspannungen und Verzügen einzig auf thermo-mechanischen Dehnungen, wobei die Phasenumwandlungen, die insbesondere in metallischen Werkstoffen den Großteil der Eigenspannungserzeugung tragen, vernachlässigt werden. Der Grund ist vor allem, dass eine skalenübergreifende Simulation, die die lokalen Phasenumwandlungen im Schmelzprozess einbezieht, mit heutigen Simulationswerkzeugen nicht rechenbar ist. Im Jahr 2017 führte eX-stream die erste Prozesssimulation für die additive Fertigung mit Polymeren ein, um Verzug und Eigenspannungen des Bauteils bei Optimierung des Fertigungsprozesses zu minimieren. Im Projekt CAEaddFert sollte dagegen keine verfahrenstechnische Simulation, sondern ein Werkzeug für die CAE-gestützte Produktentwicklung additiv gefertigter Bauteile entstehen.

Die bisher entwickelten und erforschten Methoden zur Topologieoptimierung ermöglichen keine Berücksichtigung der lokalen Eigenspannungen, wie sie im LPBF-Prozess entstehen. Da jedoch eine starke Abhängigkeit der optimalen Gestalt von den Werkstoffeigenschaften vorliegt, gilt es diese bereits in der Optimierung zu berücksichtigen, um die Gestaltsynthese in der Konstruktion gezielt zu unterstützen. Hierzu sollten die zwei Methoden, die den Projektpartnern in Form einer Topologieoptimierung (TRL 9) sowie einem topologischen Ähnlichkeitsalgorithmus (TRL 4) vorliegen, miteinander verknüpft werden. Letzterer wurde dazu benötigt, um lokale Eigenspannungen, die aus dem Experiment gemessen werden, in die Topologieoptimierung zu übertragen. Die Verknüpfung dieser beiden Methoden sollte durch eine Studie im Vorhaben untersucht werden.

Schutzrechte, die dem Vorhaben entgegenstanden, waren nicht bekannt.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Landesagentur Leichtbau BW GmbH hat die Projektpartner zur Abschätzung des $CO_2$-Einsparpotentials in der Antragsphase beraten.

Die Eigenspannungsrelaxation wurde an einem FE-Modell eines akademischen Zugversuchs systematisch untersucht, welches im Verbundforschungsprojekt Solid4E (Förderkennzeichen 03LB3069J) verwendet wird. Der Entwurf des Prüfteils stammt von der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart.

Die Abwicklung des Teilvorhabens (Antragstellung, Berichtswesen, Kostenermittlungen und Zahlungsanforderungen bis hin zum Verwendungsnachweis) wurde vom Ingenieurbüro Mager, Innovations- und Förderberatung, Dr.-Ing. Klaus Mager (klaus.mager@t-online.de), VS-Schwenningen, unterstützt.

[1] Cloots M. et al.; Thermomechanisches Multilayer-Modell zur Simulation von Eigenspannungen in SLM-Proben; SysWeld user forum ETH Zürich, 2013

[2] Seidel C. et al.; Prozessnahe Modellierung des Materialverhaltens beim Laserstrahlschmelzen als Grundlage für die Ergebnisgenauigkeit hinsichtlich der Bauteilmaßhaltigkeit und des Eigenspannungszustands; 31. ANSYS CADFEM user meeting, Mannheim, 2013

# II Eingehende Darstellung

## II.1 Verwendung der Zuwendung, erzieltes Ergebnis, Abgleich mit der Zielsetzung

Der Einsatz der additiven Fertigung bietet in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau und im Transportwesen ein großes Potential für Effizienzsteigerungen durch Leichtbau, indem ressourcenschonende und energieeffiziente Produkte entwickelt werden. Additiven Fertigungsverfahren ist gemeinsam, dass das bei der Fertigung hergestellte Material andere (auch anisotrope) Materialeigenschaften aufweist als bei der herkömmlichen abtragenden Fertigung oder beim Guss. Die Materialeigenschaften können von Fertigungsparametern und/oder lokalen Geometrien abhängen. Bei einigen industriellen Verfahren der additiven Fertigung werden Bauteile auf der Basis von 3D-CAD-Daten zumeist schichtartig mit aufgebrachtem Material aufgebaut. Dazu werden Metalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe u. a. als Pulver oder Flüssigkeit eingesetzt. Neben dem lokalen Verkleben wird das punktgenaue Auftragen bei manchen Verfahren durch Strahlen (Licht, Laser, Elektronen) bewirkt, die den Ort des Auftrags sehr stark erwärmen und damit das Metallpulver schmelzen oder bei photosensiblen Polymeren die Polymerisation auslösen. Diese Herstellungsverfahren begünstigen das Auftreten von Eigenspannungen und Verzug.

Die eingestellten Fertigungsparameter beeinflussen die Güte des Produkts. Beispielsweise ist beim selektiven Laserschmelzverfahren (LPBF) von metallischen Bauteilen der Fertigungsparameter „Energiedichte“ (einfallende Strahlungsenergie auf aufgetragenes Pulversegment) eine wichtige Größe für mögliche Eigenspannungen, Verzug und Materialgüte. Es ist kaum möglich, alle Fertigungsparameter während des Herstellungsprozesses auf die lokale Geometrie optimal abzustimmen, d. h. die lokale Geometrie selbst ist ein Prozessparameter und beeinflusst die lokalen Eigenspannungen, den Verzug und die Materialgüte.

Derzeit leistet das Computer-Aided-Engineering (CAE) einen wesentlichen Beitrag als Pre-Prozess zur additiven Fertigung. Es dient zur Form- und Lageoptimierung hinsichtlich verschiedener Faktoren, wie z. B. Materialeinsparung und Gewicht oder der Reduktion von Spannungen. Hierbei werden der Optimierungsberechnung oft Materialien zugrunde gelegt, aus denen das Bauteil bisher gefertigt wurde, wie z. B. ein Gussmaterial oder ein polymerer Werkstoff. Nach Rückführung der durch CAE optimierten Form und Position in CAD-Daten und anschließendem Slicing (schichtweise Datenaufbereitung für den Laserpfad) wird das Modell der Steuerungssoftware der Maschine übergeben.

Allerdings sind bestehende CAE-Tools nicht als Werkzeug zur Beurteilung eines Bauteils und seines Verhaltens innerhalb seiner Baugruppe unter bestimmten Lastfällen geeignet. Die bisherige verfahrenstechnische Simulation additiver Fertigung ist nicht in der aktuellen CAE-gestützten Prozesskette der Produktentwicklung integriert. Auch die Aspekte von Aufwand, Kosten, Geschwindigkeit und Standardisierung werden nicht abgedeckt. Da die additive Fertigung ihre Vorteile bezüglich Bauteilkomplexität und Kostenersparnis insbesondere bei kleinen Losgrößen ausspielt, müsste eine Prozesssimulation schnell und anwenderfreundlich umsetzbar sein, was bisher nicht gegeben ist.

Ziel des Projektes war daher die Entwicklung eines virtuellen Prüfstands zur Beurteilung additiv gefertigter Bauteile hinsichtlich deren mechanischer Eigenschaften als Einzelteil sowie im Verbund mit einer Baugruppe. Hierdurch wird die einzigartige Möglichkeit geboten, bereits vor der Fertigung erster Prototypen und physischer Tests die additiv gefertigten Bauteile innerhalb eines virtuellen Systems auf ihr mechanisches Verhalten sowie Wechselwirkungen in der Baugruppe zu bewerten und daraus Empfehlungen hinsichtlich einer Verbesserung des mechanischen Verhaltens durch beispielsweise eine Nachbehandlung abzuleiten. Dies reduziert den Zeit- und Kostenaufwand, gerade auch für sicherheitsrelevante Bauteile, die

bisher für jedes Einzelstück eine separate Nachbehandlung (z. B. spannungsarm glühen, HIP, polieren etc.) erfordern, was den für die Herstellung eigentlich prädestinierten 3D-Druck oft unrentabel macht. Zur Erreichung des Ziels lag der Fokus nicht auf der Prozesssimulation der additiven Fertigung, sondern im Bereich der Entwicklung einer Methode des virtuellen Testens zur effizienten Einbeziehung experimenteller Daten zu Material und Eigenspannungen von additiv gefertigten Bauteilen.

Die Topologieoptimierung und Simulation im Leichtbau verinnerlichen die Konstruktionsprinzipien des Leichtbaus, so dass die Einsparung von Treibhausgasen bereits beim Produktdesign mitgedacht wird. Mit dem virtuellen Prüfstand sollen Produktentwickler oder Berechnungsingenieure befähigt werden, unter Berücksichtigung der komplexen Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in Verfahren der additiven Fertigung, Leichtbaustrukturen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu simulieren, zu optimieren und auszulegen. Die Arbeitsziele gliederten sich in zwei Teile. Der erste Teil stellte den virtuellen Prüfstand selbst dar, der auf Basis einer gegebenen Geometrie und zugehöriger Materialeigenschaften Vorhersagen lokaler Bauteilzustände (Eigenspannungsverteilung) in Bezug auf die Fertigungsrandbedingungen zulässt. Der zweite Teil zielte auf eine Studie hinsichtlich der Berücksichtigung von eigenspannungsbehafteten Bauteileigenschaften mithilfe eines topologischen Ähnlichkeitsalgorithmus innerhalb einer Topologieoptimierung für 3D-gedruckte Bauteile ab.

Als additives Fertigungsverfahren wurde in diesem Projekt das pulverbettbasierte Laserschmelzen (LPBF) verwendet, um Proben zu fertigen und entsprechende Testgeometrien abzubilden. Dieses Verfahren (siehe Abbildung 1) hat unter den additiven Fertigungsverfahren aktuell die höchste Verbreitung. Außerdem stellt es eine optimale Grundlage zur Fertigung von Leichtbaustrukturen dar, die sich z. B. aus einer Topologieoptimierung ergeben und typischerweise komplexe Bauteilstrukturen aufweisen.

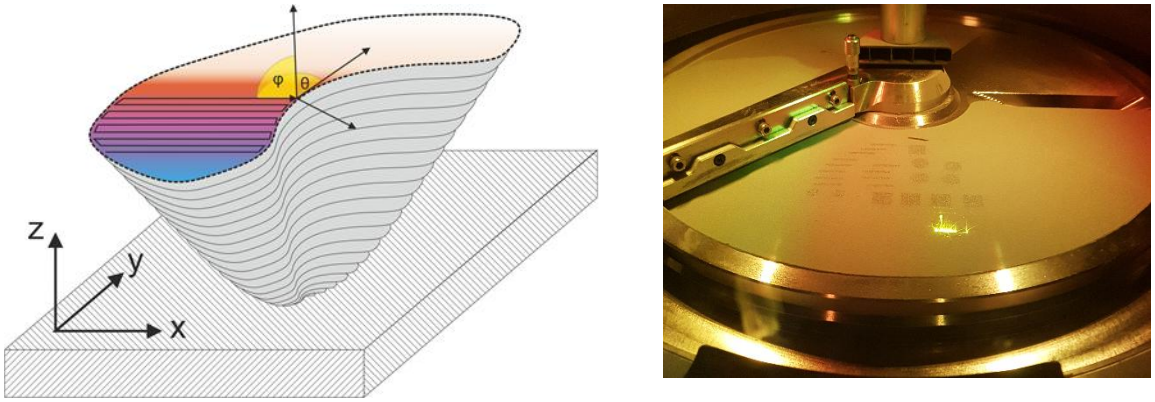



*Abbildung 1: Darstellung der Oberflächen und Laserorientierungen im Prozess an einem 3D-Bauteil mit schematischer Temperaturverteilung, aus der entsprechende Eigenspannungen beim Abkühlen entstehen (links). Druckkammer des LPBF-Verfahrens während eines aktiven Herstellungsprozesses (rechts).*

Darüber hinaus sollte der virtuelle Prüfstand die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Nachbehandlungsprozessen (z. B. spannungsarm glühen) aufweisen, um sie in die Berechnung von Eigenspannungen und Verzügen mit einbeziehen zu können. Um dies zu erreichen, muss eine Abbildung der Eigenspannungsrelaxation durch Wärmebehandlungstechniken als Parameter mit in den Prüfstand aufgenommen werden. Dies ist durch den Transfer und die stichpunktartige Überprüfung von Relaxationsdaten aus der Literatur in das Werkstoff- und Bauteilmodell für additive Werkstoffe möglich. Als Modellierungsansatz sollte der analytische Zehner-Wert-Avrami-Ansatz implementiert werden,

welcher somit eine schnelle Vergleichsberechnung im FEM-Modell erlaubt. Da für diesen Ansatz nur Parameter für eine bestimmte Aluminiumlegierung gefunden werden konnten, hat TECOSIM das Norton Law für den Stahl S316L implementiert.

Die Zusammenarbeit der Partner war so geplant, dass TECOSIM den virtuellen Prüfstand für Bauteile zur additiven Fertigung mit den beiden wichtigen Modulen der Materialdaten und der Eigenspannungswerte entwickelte, welche von den Forschungspartnern ermittelt werden sollten. Das KIT (IPEK und IAM-WK) übernahm die Aufgaben der experimentellen Werkstoffprüfung und -charakterisierung sowie die Probenherstellung. Darüber hinaus war geplant, die Methoden der Ähnlichkeitsmechanik sowie die Schnittstellen zur Anbindung an die von TECOSIM durchgeführten FEM-Simulationen zu entwickeln. Zur Verwaltung der charakterisierten Eigenspannungen, die mit geometrischen Kriterien assoziiert werden sollten, war geplant, dass das KIT–IPEK in Abstimmung mit dem KIT–IAM-WK eine Datenbank entwirft, um die Eigenspannungen innerhalb der Simulation sowie der Optimierung korrekt zuweisen zu können. PMT sollte ein bereits gefertigtes Bauteil für einen Freischneider (Novatec) gemäß dem Leichtbau als Funktionsdemonstrator umkonstruieren. Dieses in Abbildung 2 gezeigte Bauteil ist das Führungsbauteil bzw. der Messerschutz für das Schneidmesser und befindet sich über dem Schneidmesser. Als Ziel sollte ein Bauteil erhalten werden, welches unter Beibehaltung der technischen Anforderungen und Funktionalität leichter, materialsparender und stabiler ist.

*Abbildung 2: Führungsbauteil des Freischneiders, das als Basis für einen Funktionsdemonstrator dienen kann (Quelle: https://www.motoruf.de/n/ersatzteillisten.html?id=701483&art=17040453). Das Bild zeigt ein ähnliches Bauteil.*

Für das Teilvorhaben der TECOSIM GmbH bestanden die folgenden Ziele:

- Demonstrator des virtuellen Prüfstands, der auf Basis einer gegebenen Geometrie und zugehöriger Materialeigenschaften Vorhersagen lokaler Eigenspannungen 3D-gedruckter Bauteile zulässt
- Dienstleistung zur Auslegung und Optimierung 3D-gedruckter Bauteile
- Ableitung von Materialkarten für die FE-Struktursimulation (anisotropisch monolithisch bzw. porenbehaftete Steifigkeitsmatrix) und die Konstruktion der hierzu korrespondierenden Materialcharakteristiken (Wöhler-Kurve und Haigh Diagramme) für die Zeit- und Dauerfestigkeitsbewertung
- Technisch-wirtschaftliche Handlungsempfehlungen hinsichtlich einer Nachbearbeitung 3D-gedruckter Bauteile (partnerübergreifend)

### II.1.1 Technische Recherche

TECOSIM hat die Randbedingungen für den virtuellen Prüfstand aus Sicht der Simulation bestimmt. Die Randbedingungen wurden für die statische Rechnung mit ABAQUS sowie für die zyklische Rechnung zur Dauerfestigkeit mit FEMFAT ermittelt.

Statische Rechnung mit ABAQUS:

Für die statische Rechnung war zunächst eine Übertragung von Eigenspannungen, die im 3D-Druck mit schichtartig aufgebrachtem Material entstehen und die in ABAQUS ermittelt werden sollen, auf ein Bauteil von Interesse. Im virtuellen Prüfstand werden in Strukturanalysen die auftretenden Eigenspannungen mit den Lastspannungen überlagert, um die prozessspezifischen Besonderheiten der additiven Fertigung zu berücksichtigen.

Die Eigenspannungen für Zug-, Druck- und Schubspannungen werden in der FE-Simulation immer durch die Annahme eines symmetrischen Tensors bestimmt, der durch eine obere Dreiecksmatrix gegeben ist (Abbildung 3). Die Eigenspannung ist ein Zustand in jedem einzelnen finiten Element. Sie kann sich von Element zu Element unterscheiden, aber in jedem einzelnen Element ist sie symmetrisch. Das gesamte Bauteil hingegen besitzt keinen global symmetrischen Eigenspannungszustand. Darüber hinaus ist das Bauteil in Realität kontinuierlich und nicht diskretisiert. Dass sich die Eigenspannungen Element für Element unterscheiden, ist eine Annäherung an die kontinuierliche Änderung der Eigenspannungen im Bauteil.

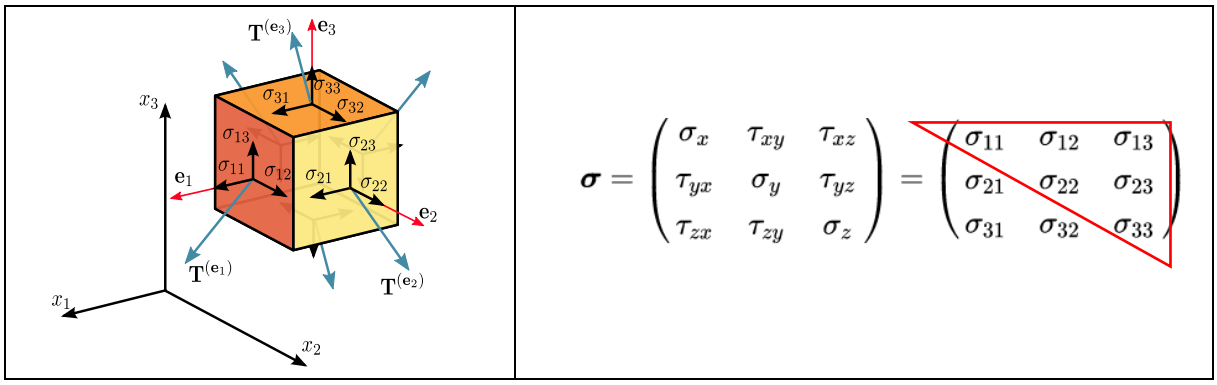



*Abbildung 3: Symmetrischer Tensor der Eigenspannungen (Quelle: Wikipedia)*
*($\sigma_{ij}$ für Zug- oder Druckspannungen senkrecht zur Fläche, $\tau_{ij}$ für Schubspannungen tangential zur Fläche)*

Als Anforderung an die Messung wurde abgeleitet, dass die Komponenten der Eigenspannung für Zug, Druck und Schub gemessen werden müssen. Im Experiment muss entschieden werden, an wie vielen Stellen dies geschieht. Für die Messung werden Prüfkörper in typischen akademischen Formen, wie z.B. Zylinder, Gabelung, Kante etc., hergestellt, auch um ggf. typische Eigenspannungen zu messen. Weiterhin ist für die Simulation relevant, ob im Experiment die Eigenspannungen für eine Sektion (z.B. eine Fläche), eine Strecke, einen Punkt oder ein Probevolumen gemessen werden. Hierzu gibt es mehrere Möglichkeiten, wobei die Eigenspannungen in der Simulation auf dem einzelnen Element sitzen.

Um Eigenspannungen auf ein Bauteil zu übertragen, besteht in ABAQUS das folgende Vorgehen: Zunächst können über den Befehl **INITIAL CONDITIONS, INPUT=filename* Spannungen als Anfangsbedingungen eingelesen oder direkt editiert werden (*By Element* – Eigenspannung für ein Einzelelement, *By Set* - alle enthaltenen Elemente mit gleicher Eigenspannung). Zur Übertragung der Messungen auf die Simulationsrandbedingungen wird eine Messwertedatei erstellt und den Messwerten werden Messkoordinaten zugeordnet. Die

Messwerte werden nach Sektionen gemäß den spezifischen typischen Formen (z.B. Zylinder, Gabelung, Kante usw.) geclustert. Mittels Korrelation kann herausgefunden werden, ob die Zuordnung der Eigenspannungen zu gewissen Formen realistisch ist, wenn die typische akademische Form zwar ähnlich zum Bauteil ist, aber in der Größe abweicht, oder ob Krümmungen von Flächen mit bestimmten Spannungen einhergehen. In der Simulation ist jedes Element durch seine Knoten definiert, wobei jeder Knoten geometrische Koordinaten hat. Im Endeffekt ist eine Zuordnung von Messkoordinaten zu Elementknotenkoordinaten zu entwickeln.

Von den Forschungspartnern sollte ein topologischer Ähnlichkeitsalgorithmus entwickelt werden, der durch vergleichende Betrachtungen und Messungen an Bauteilen mit bestimmten geometrischen Merkmalen eigenspannungsbehaftete Bauteileigenschaften erkennen und im FE-Modell lokale Eigenspannungen zuweisen kann. Geplant war, dass der Ähnlichkeitsalgorithmus ein Bauteil abtastet und eine Ähnlichkeit feststellt. Bei Ähnlichkeit wird dem Elementmittelpunkt der nächstliegende Messwertknoten zugeordnet, dabei werden die Eigenspannungen mitgenommen. Dazu ist es notwendig, dass zuvor die abgetastete Bauteil-Sektion mit der Messdatei-Sektion in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert wird. Die Eigenspannungskomponenten müssen mittransformiert werden. Wenn dies für das gesamte Bauteil durchgeführt ist, müssen alle Eigenspannungen in ein globales Koordinatensystem transformiert werden. Dabei erhält jedes Element, das aus acht Knoten besteht, einen einzigen Element-Eigenspannungstensor, der aus den acht Knoten-Eigenspannungsvektoren besteht.

Weiterhin wurden im Rahmen der statischen Rechnung Materialmodelle für inhomogene Materialien recherchiert. Vollständig anisotrope Materialien sind in ABAQUS über die 21 voneinander unabhängigen Einträge der oberen Dreiecksmatrix der Steifigkeitsmatrix definiert (Abbildung 4). Diese volle Anisotropie besteht im globalen Materialgesamtmodell, während die die Symmetrie in jedem Element vorliegt.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1113} & D_{1123} \\ & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2213} & D_{2223} \\ & & D_{3333} & D_{3312} & D_{3313} & D_{3323} \\ & & & D_{1212} & D_{1213} & D_{1223} \\ & sym & & & D_{1313} & D_{1323} \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = [D^d] \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

*Abbildung 4: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für anisotrope Materialien mit 21 voneinander unabhängigen Steifigkeitsparametern (Quelle: ABAQUS-Handbuch)*

Für den Fall, dass kein globales Materialmodell vorliegt und das anisotrope elastische Verhalten räumlich im Bauteil oder innerhalb einer PID (property identity - ein Teil einer Baugruppe mit definierter Geometrie und Material) variiert, muss diese räumliche Verteilung über eine Tabelle eingeben und einem Elementset zugewiesen werden. Eine Temperaturabhängigkeit der Materialparameter, z.B. des E-Moduls, wird zunächst nicht berücksichtigt, denn bei der Zuweisung der Materialtabelle kann keine Temperaturvariable mitgenommen werden. Sonst müsste der Solver erweitert werden. TECOSIM hat versucht, im Projekt ein anisotropes globales Materialmodell zu finden, welches die Situation realistisch abbildet.

Zyklische Rechnung zur Dauerfestigkeit mit FEMFAT:

Zur Vorbereitung der zyklischen Rechnung zur Dauerfestigkeit mit FEMFAT haben Mitarbeiter von TECOSIM an einem Online-Workshop des FEMFAT-Softwareherstellers Magna Steyr

teilgenommen. Hierbei wurde die Problematik der Anisotropie beim 3D-Druck detailliert erläutert, so dass wichtige Erkenntnisse gewonnen werden konnten:

FEMFAT rechnet auch bei anisotropem Material immer nur mit einem E-Modul, das auch ein lokales E-Modul sein kann. Ein E-Modul, das in drei Raumrichtungen aufgespalten wird, gibt es nicht. Anisotrope Materialien werden berücksichtigt, indem die lokale Zugfestigkeit (*Rm*) und/oder die lokale Streckgrenze (*Rp02*) und außerdem die lokale Bruchdehnung *A* in *node characteristics* (local material properties) im eingelesen werden. Nach den oben erwähnten Werkstoffgrößen *Rm, Rp02* und *A* erfolgt der Lösungsvorgang, wenn der FEMFAT-Rechnung eine Gießereisimulation vorausgeht, entweder Moldflow für Plastik-Spritzguss oder Magmasoft für Metallguss. Mit ABAQUS geht eine Tiefziehrechnung voran, bei der tatsächlich *Rm, Rp02* und *A* lokal verteilt werden.

Im Projekt sollte hingegen ein statischer elastischer Lastfall berechnet werden, bei dem sich die Ausgangsmaterialparameter *Rm, Rp02* und *A* nicht ändern. Nach diesen Parametern wird auch nicht gelöst und sie können nicht als *result* in der Ausgabe des ABAQUS-Files adressiert und herausgeschrieben werden. In FEMFAT können Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Schwellfestigkeit und Scherfestigkeit als globale Materialparameter eingegeben werden. Dennoch kann FEMFAT die Anisotropie der Festigkeit im Bauteil sinnvoll berechnen, da die zugrundeliegenden Spannungen und Dehnungen aus dem statischen Lastfall anisotrop verteilt sind. Geplant war, diese nicht nach einer räumlich verteilten Materialfestigkeit zu bewerten, sondern die Festigkeitsbewertung mit verschiedenen Materialgüten aus einem Ersatzmaterialmodell für 3D-gedruckte Bauteile durchzuführen.

Schließlich wurden Möglichkeiten zur Simulation von im SLM-Prozess gefertigten Bauteilen eruiert. In ABAQUS ist es möglich, Schichten zu modellieren und diese über Kohäsionselemente zu verbinden. Analog dazu können auch in FEMFAT Schichten wie Faserlagen modelliert werden. Allerdings wäre dieser Aufwand größer gewesen als eine verfahrenstechnische 3D-Druck-Simulation durchzuführen. Es hätte aber auch nichts gebracht, da die Materialinformation nicht für die einzelnen Schichten vorliegt, sondern für die charakteristischen Sektionen des gedruckten Bauteils.

Die Firma Autodesk (Software-Hersteller u.a. von AutoCAD) bietet einen Optimierer an, der weitestgehend automatisiert Vorschläge für Leichtbaustrukturen bis hin zu bionisch anmutenden 3D-Druckstrukturen entwirft. Diese können in der Autodesk-Softwarefamilie auch berechnet werden. Der Berechnung liegt das CAE-Tool NASTRAN zugrunde. Allerdings werden hier Eigenspannungen oder Materialinhomogenitäten nicht berücksichtigt.

Ansonsten gibt es für den 3D-Druck „verfahrenstechnische“ Simulationen von verschiedenen Anbietern, welche auch Verzug vorhersagen. Aber genau dieser aufwendige und teure Weg sollte im Projekt CAEaddFert vermieden werden. Denn verfahrenstechnische Prozesse wie das Gießen werden selten, das Weben von Fasern nie, das Schweißen auch nie und das Tiefziehen sehr selten simuliert. Dennoch werden alle Bauteile, welche mit diesen Verfahren hergestellt wurden, auch im derzeit bestehenden CAE-gestützten virtuellen Produktentwicklungsprozess bewertet.

### II.1.2 Ausarbeitung Pflichtenheft, Simulation

Von TECOSIM wurde für das CAEaddFert-Konsortium ein gemeinsames Lasten-/Pflichtenheft entworfen und die Anforderungen aus Sicht der Simulation wurden eingebracht. Dazu wurde die folgende Gliederung vorgesehen:

a) Anforderung von ABAQUS
b) Messwertedatei

c) Bauteildatei *geo.inp*
d) Skript zum Mappen des jeweiligen Eigenspannungstiefenprofils in Abhängigkeit von der Aufbaurichtung (ersetzt den ursprünglich vorgesehenen topologischen Ähnlichkeitsalgorithmus)
e) Zuweisung der Eigenspannungen auf das Bauteil
f) Definition Anisotropie für ABAQUS
g) Übertragung von Orientierungsvektoren und Eigenspannungen durch Einbau bei der Lastfall-Analyse in ABAQUS
h) Vorgehen mit FEMFAT für die Dauerfestigkeitsbewertung

Die Randbedingungen an die Konstruktion wurden mit den Möglichkeiten der Messtechnik abgeglichen: Die zu messenden Prüfbauteile müssen geometrische Mindestmaße einhalten, z.B. dürfen Zylinder nicht zu dünn werden. Das bedeutet, dass auch die Stege im 3D-Druck nicht zu dünn werden dürfen. Sonst wird gleich beim ersten Prototyp in Bereiche skaliert, die gar nicht experimentell verifiziert werden können. Es wurde ein Prüfplan ausgearbeitet.

### II.1.3 Demonstratorentwurf

Für eine Leistungsüberprüfung und eine experimentelle Validierung des Ansatzes wurde ein Bauteil gewählt, das dem im Förderantrag vorgeschlagenen Freischneider sehr ähnlich ist: Es handelt sich um eine rotierende Bürste (Abbildung 5). In den Ösen befinden sich Nylonborsten mit einer Bruchspannung von 34,4 MPa. Bei diesem Wert treten Schädigungen des Nylons auf, wobei es zum Bruch noch einige Zeit dauern würde.

Der Querschnitt der Borsten ist entweder quadratisch oder sternförmig (Abbildung 6). Durch Multiplikation der Querschnittsfläche mit der Bruchspannung ergibt sich die Kraft, die als Last in die Ösen eingegeben werden kann. Die Bürste befindet sich auf einer rotierenden Achse. Für FE-Berechnungen wird der Schaft mit einem Masterknoten gekoppelt und für die statische Drehung translatorisch fix und rotatorisch fix gelagert. Dieser Verbund wird im Modell durch die Randbedingungen in Form von Lagerung und Last abgebildet. Der Lasteintrag für die 24 Ösen wurde zunächst in einer Excel-Tabelle berechnet.

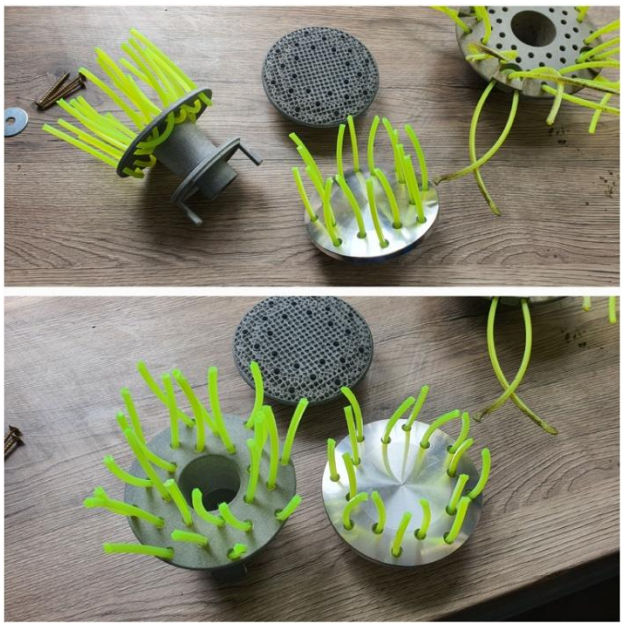


*Abbildung 5: Beispiel für eine Bürste mit Nylonborsten als Demonstrator (Quelle: PMT)*

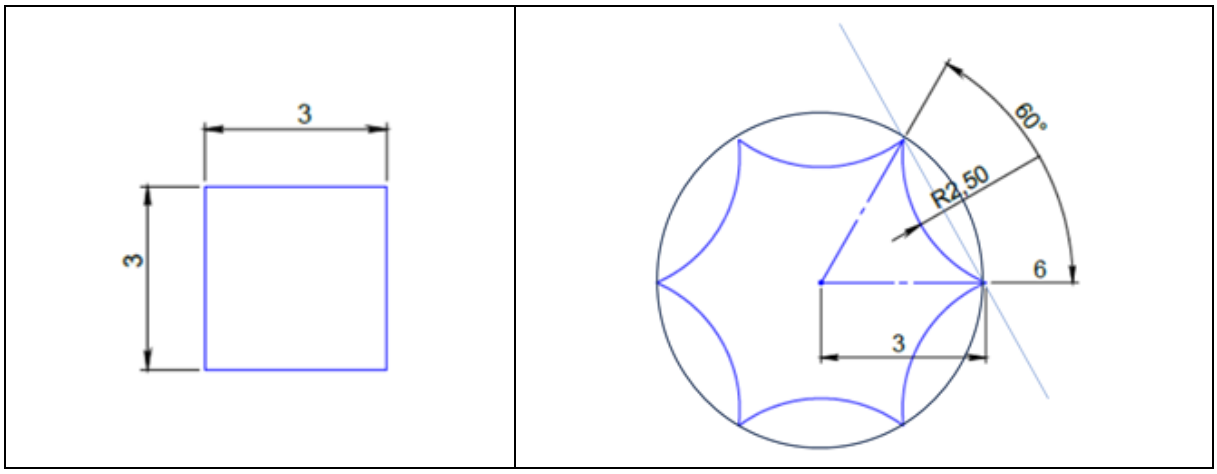



*Abbildung 6: Querschnitt der Borsten der Bürste (Quelle: PMT)*

Für die Konstruktion wurde vom Projektpartner PMT ein erster Entwurf vorgelegt (Abbildung 7), der zwar das geringste Gewicht aufwies, aber die geometrischen Mindestmaße der Prüfkörper nicht erfüllte und außerdem mit sich durchdringenden .stl-Dreiecken nicht optimal konstruiert war. Das hätte nachkonstruiert und anschließend vernetzt werden müssen. Interessant war, dass der Algorithmus für die Scheibe eine rechtwinklige Schachbrettstruktur gefunden hat. Manchmal werden auch Wabenstrukturen daraufgelegt, rotationssymmetrische Lösungen sind nicht priorisiert. Im zweiten Schritt hat TECOSIM zwei sinnvolle Entwürfe modelliert, den einen hat das KIT beigesteuert (Abbildung 8), den anderen die Firma PMT (Abbildung 9).

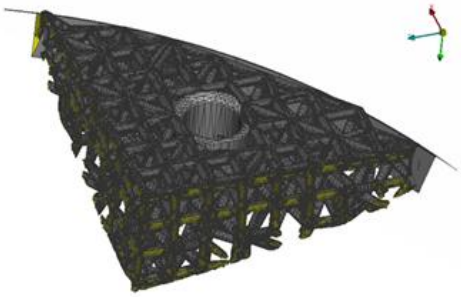


*Abbildung 7: Erstes Design der rotierenden Bürste (geviertelt zur besseren Darstellung)*

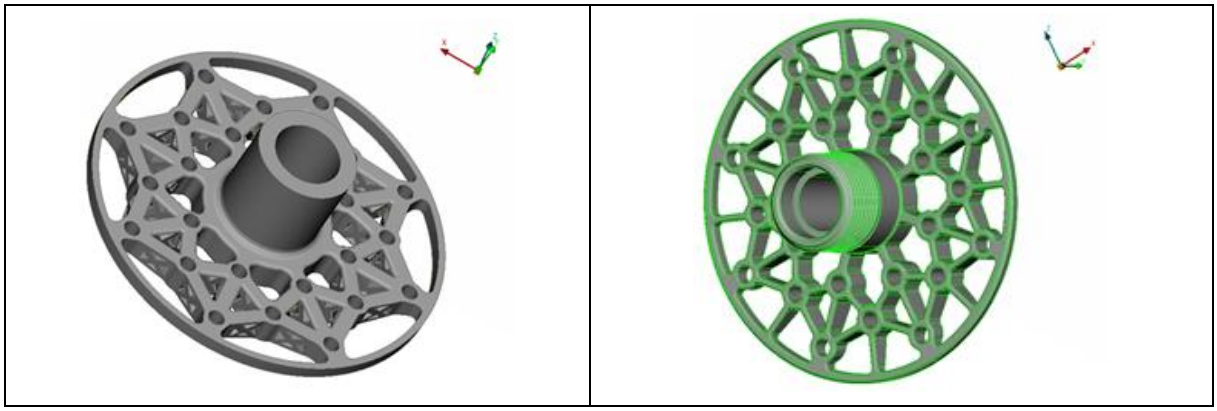


*Abbildung 8: Entwurf des KIT für die Bürste*

*Abbildung 9: Entwurf von PMT für die Bürste*

Interessanterweise wies die erste Simulation des Projektpartners IPEK zur Topologieoptimierung auch auf eine Andreaskreuzstruktur im radialen Fachwerk hin (Abbildung 10). Das Andreaskreuz ist ein Kreuz mit zwei diagonal verlaufenden sich kreuzenden Balken.

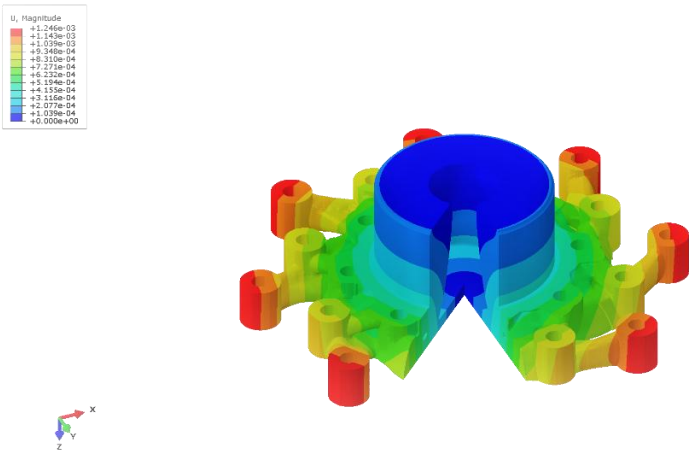



*Abbildung 10: Simulation des Projektpartners IPEK zur Topologieoptimierung (Quelle: IPEK)*

Die gezeigten ersten Entwürfe wurden verworfen, wobei bei der Andreaskreuzstruktur der Nachteil hinzukam, dass darin schlecht sandgestrahlt werden kann.

### II.1.4 Modellierung und FE-Analyse im Verbund

Nachdem zunächst Berechnungen durchgeführt wurden, bei denen nur eine einzige Öse unter schräger Zuglast belastet wurde, wurden die weiteren Simulationen als Verbundlastfälle durchgeführt.

Es ist schwierig, bei der Bürste mit Nylonborsten das Einzelbauteil vom Verbundbauteil zu unterscheiden. Da die Achse der Bürste gelagert wird, ist die Bürste auch mit der Antriebswelle verbunden, sei es als Einzelbauteil oder als Bauteil im Verbund. Außer der Achse und der Nylonborsten gibt es keine Anbauteile. Im Verbundlastfall werden alle Ösen unter schräger Zugbelastung analysiert (Abbildung 11). Als Belastung wurde die Zugkraft aus der Bruchspannung (Datenblatt der Nylonborsten) und dem Querschnitt der Nylonborste berechnet und auf die Knoten in der jeweiligen Öse verteilt.

Mit dem Bauteil können statische und dynamische Berechnungen durchgeführt werden. Die „statische“ Drehung bedeutet, dass Spannungen aufgrund der eintretenden Zentrifugalkraft berechnet und der rotationssymmetrischen Bürste überlagert werden, ohne dass sich die Bürste drehen muss. Der Abriss der Nylonborsten wurde durch den Schrägzug simuliert, die in Wirklichkeit auftretende Reaktionskraft wirkte im Modell als Lasteintrag. In einem ersten Schritt wurde somit die „statische“ Drehung berechnet, welche geringe von-Mises-Spannungen von bis zu 30 MPa bei Stahl bzw. 10 MPa bei Aluminium hervorruft. Darauf wurde der Lastfall Ösenzug aufgesetzt. Er führte zu weit überkritischen von-Mises-Spannungen, d.h. bevor ein Nylonfaden reißt, wäre der Arm der Öse am Anschluss an der Achse nach Maßgabe der von-Mises-Spannungen gebrochen.

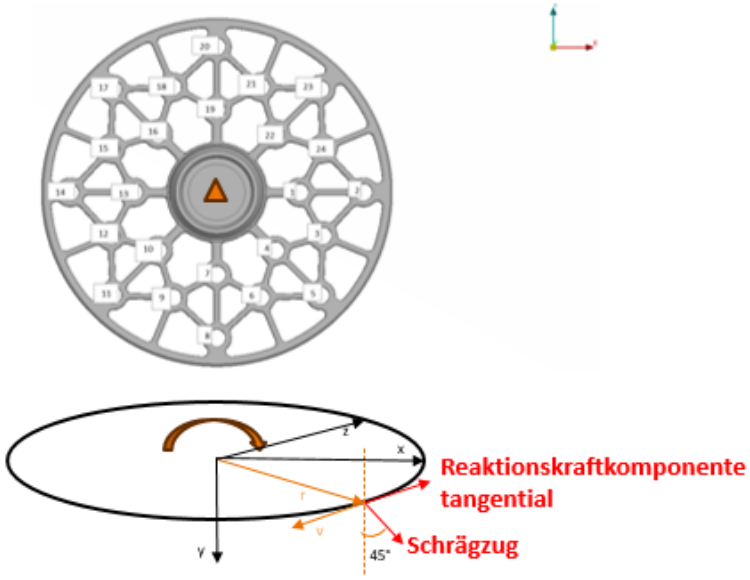



*Abbildung 11: Auslegung des Lastfalls Schrägzug für den Demonstrator rotierende Bürste*

Der Projektpartner IAM-WK stellte alle für den Demonstrator notwendigen Materialdaten bereit. Soweit die Daten nicht experimentell ermittelt werden konnten, wurden sie vom IAM-WK in der Literatur recherchiert, aufbereitet und zur Verfügung gestellt, um die Berechnungen seitens TECOSIM zu ermöglichen.

Voruntersuchungen am IAM-WK haben gezeigt, dass das 3D-gedruckte Material transversal isotrop ist und damit eine Vorzugsrichtung mit besonderen Eigenschaften im Unterschied zu allen anderen Richtungen aufweist. Dies ist ein Sonderfall der Orthotropie mit der Symmetrieebene normal zur Aufbaurichtung (hier die axiale Richtung). Diese ist wesentlich einfacher abzubilden als eine generelle Anisotropie ohne irgendeine Symmetrie. Transversale Isotropie kann abgebildet werden mit den fünf Ingenieurskonstanten Elastizitätsmoduln $E_1 = E_2$ und $E_3$, den beiden Querkontraktionszahlen $\nu_{12}$ und $\nu_{13}$, und dem Schubmodul $G_{13}$. Alle anderen Werte der Steifigkeitsmatrix lassen sich aus diesen fünf Parametern berechnen.

Die Untersuchungen an ersten Proben haben ergeben, dass die Porenbildung beim Stahl 316L äußerst gering (0,69%) ist, während die Porosität bei AlSi19Mg bei 2,46% lag mit Porendurchmessern von max. 0,5 mm (Abbildung 12). Die Porenverteilung ist ungleichmäßig, die Poren befinden sich überwiegend direkt unter einer Deckschicht in einem Randbereich der Probe.

Die Poren selber können aufgrund ihrer Kerbwirkung die statische Festigkeit beeinträchtigen. Außerdem sinkt das E-Modul von $E_1 = E_2 = 71.000$ MPa sowie $E_3 = 71.000$ MPa bei monolithischem Aluminium bei ca. 2% Porosität auf $E_1 = E_2 = 65.000$ MPa sowie $E_3 = 60.000$ MPa bei porenbehaftetem Material ab[3], die Kerbwirkung der Poren kann die Festigkeit um 30-40% mindern. In der Simulation wurden die Festigkeiten entsprechend angepasst. Der Einfluss der Porosität könnte bei Proben simuliert werden, indem Poren durch das Löschen von finiten Elementen erzeugt werden. TECOSIM hat dagegen für die Simulation auf ein globales Materialmodell mit verminderten Steifigkeiten und Festigkeiten zurückgegriffen. Die Erstellung eines globalen Materialmodells hat sich als vielversprechendere Methode herausgestellt. Es kann über das komplette Bauteil angewendet werden und löst die individuelle Porenverteilung im Bauteil nicht auf.

[3] S. Czink et al.; Ultrasonic evaluation of elastic properties in laser powder bed fusion manufactured AlSi10Mg components; NDT & E International, Band 132, S. 102729, Jan.2022 (international journal on nondistructive testing and evaluation)

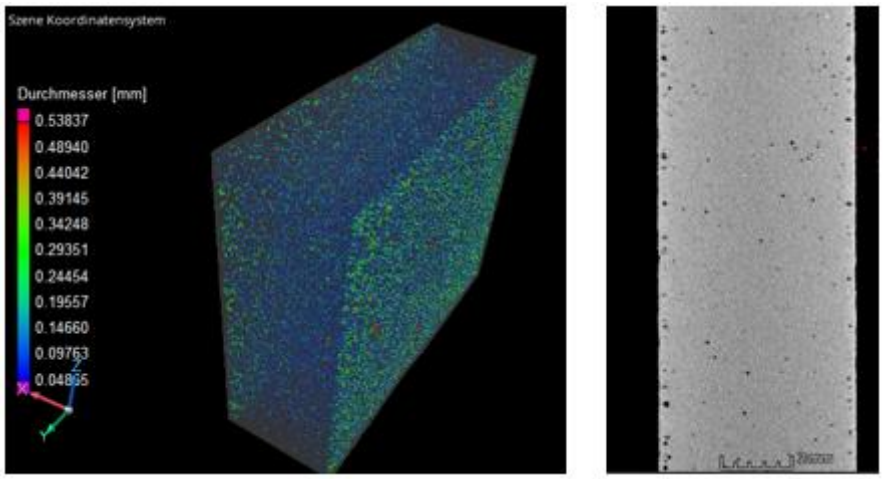



*Abbildung 12: Mikro-Computer-Röntgentomographie, Aluminium*

In der Simulation zeigte sich, dass die Materialstrukturänderung im betrachteten Lastfall beim Demonstratorbauteil kaum eine Auswirkung auf die von-Mises-Spannungen aufgrund der Zentrifugalkraft hat. Beim porenbehafteten Aluminium ergab sich zwar aufgrund der Zugkraft eine über 10% höhere Verschiebung gegenüber dem monolithischen Material (Abbildung 13). Allerdings sind die totalen Dehnungen in Hauptachsenrichtung geringer als 2%, was für ein insgesamt robustes Design spricht. Das porenbehaftete Material zeigte eine geringfügig stärkere Dehnung. Die Berechnungen erfolgten ausschließlich im linear-elastischen Bereich; Plastifizierung, Kriechen oder Bruch wurden nicht betrachtet.

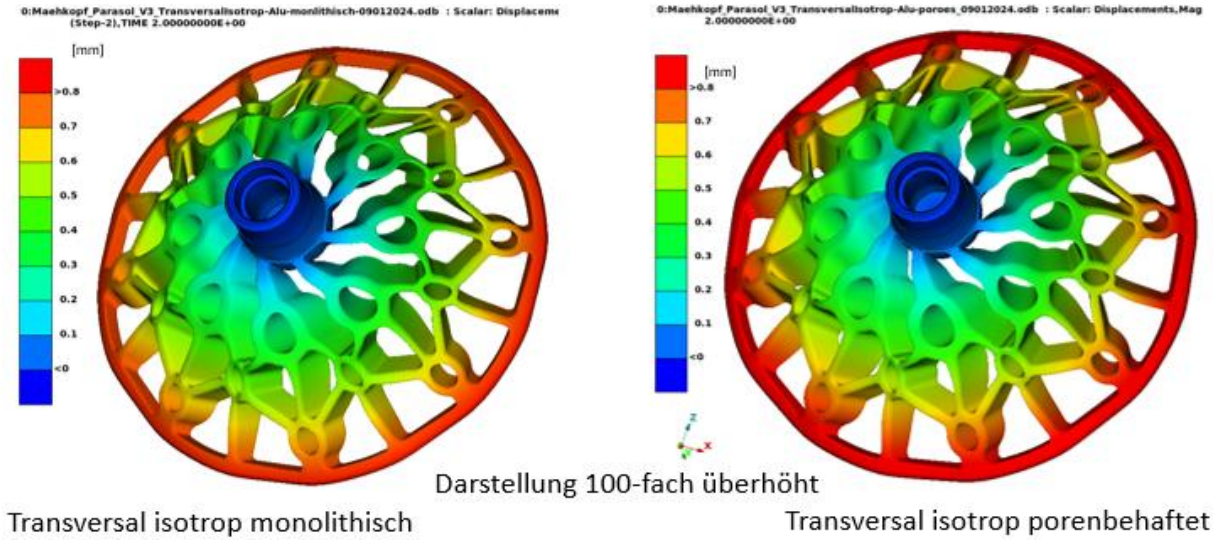



*Abbildung 13: Vergleich der Verformungen des Demonstratorbauteils aus monolithischem und porenbehaftetem Aluminium*

Untersuchungen zum Einfluss der Porosität auf die statische und zyklische Festigkeit können auch in der Literatur gefunden werden[4]. Mit zunehmender Porosität sinken Zugfestigkeit (Abbildung 14) und Nennspannungsamplitude (Abbildung 15).

[4] Powazka, Dawid; Einfluß der Porosität auf die Betriebsfestigkeit von Al-Druckgussbauteilen; Dissertation, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, 2009

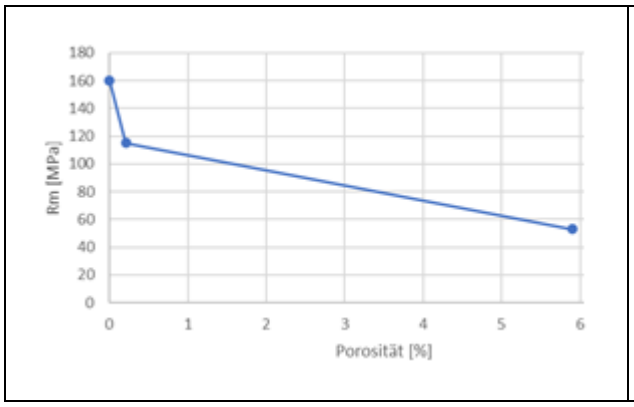



*Abbildung 14: Einfluss der Porosität auf die statische Festigkeit, die auf der y-Achse bei Schwingspielzahl 1 abgelesen werden kann*

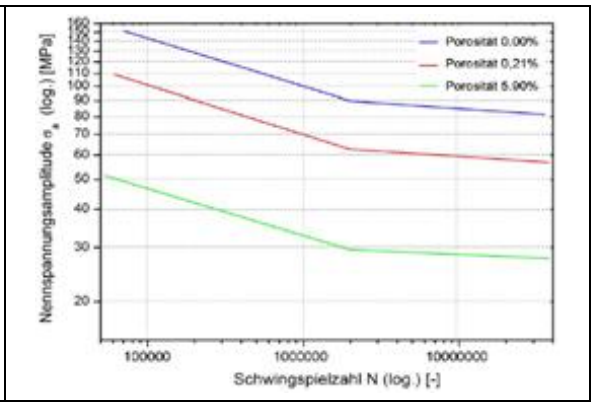



*Abbildung 15: Berechnete Wöhlerlinie für porenfreie Randschicht und porenbehaftetes Grundmaterial²*

Das Schicht-für-Schicht-Prinzip des 3D-Druckprozesses führt dazu, dass auch 3D-gedruckte Teile aus Stahl transversale isotrope Materialeigenschaften aufweisen. Während das porenfreie 3D-gedruckte Aluminium annähernd isotrop ist und die Textur durch den schichtweisen Aufbau hier wenig Einfluss auf die Steifigkeiten hat, beeinflusst die Textur bei Stahl durch den schichtweisen Aufbau die Steifigkeiten, obwohl Stahl fast immer porenfrei ist. Das E-Modul verändert sich bei isotropem Edelstahl 316L von $E_{123}$ = 210.000 MPa auf $E_1 = E_2$ = 215.000 MPa sowie $E_3$ = 190.000 MPa bei transversal isotropem Material. Letzteres wirkt steifer und erfährt etwas höhere Spannungen, vermutlich weil sich die höhere Steifigkeit in $E_1$ und $E_2$ stärker auswirkt, als die geringere Steifigkeit in $E_3$. Die totalen Dehnungen in Hauptachsenrichtung liegen bei nur 0,6%, so dass insgesamt ein robustes Design resultiert.

### II.1.5 Festigkeitsanalyse bei anisotropem Material ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen

Zur Entwicklung des virtuellen Prüfstands wurden zyklische Werkstoffkennwerte und später die Eigenspannungsverteilung aus experimentellen Ergebnissen in die Simulation integriert. Dazu wurden Materialkarten für die FE-Struktursimulation (anisotropisch monolithisch bzw. porenbehaftete Steifigkeitsmatrix) abgeleitet und die korrespondierenden Materialcharakteristiken (Wöhler-Kurven und Haigh Diagramme) für die Zeit- und Dauerfestigkeitsbewertung konstruiert.

Anhand von Werten aus der Literatur kann die Steifigkeitsmatrix für transversal isotropes Material mit fünf Ingenieurskonstanten bestimmt werden. Für orthotropes Material wären neun Konstanten erforderlich, bei völliger Anisotropie ohne Symmetrieebene sogar 21. Im vorliegenden Fall wird jedoch die transversale Isotropie im selektiven Laserschmelzen (SLM) von vielen Autoren bestätigt. Dadurch werden die Technologie handhabbar und das Bauteilverhalten vorhersagbar.

Einige Werte für die Schwell- und Wechselfestigkeiten konnten aus der Literatur entnommen werden, aber z.B. die Biegewechselfestigkeit ist selten dokumentiert. Versuche zur Biegewechselfestigkeit sind auch aufwendiger als z.B. Zugversuche. Die Dauerfestigkeitsergebnisse sind sehr sensitiv bezüglich der Biegewechselfestigkeit. Die folgenden Werte waren für die Analysen erforderlich:

- E-Modul $E_1/E_2/E_3$ [GPa]
- Schubmodul $G_{12}/G_{13}/G_{23}$ [GPa]
- Querkontraktionszahlen $\nu_{12}/\nu_{13}/\nu_{23}$ [ ]
- Rm Zugfestigkeit in 1,2,3 [MPa]
- $Rp_{02}$ Zug [MPa]

- Schwellfestigkeit_Zug [MPa]
- Wechselfestigkeit_Zug [MPa]
- Rm Druckfestigkeit in 1,2,3 [MPa]
- $Rp_{02}$ Druck [MPa]
- Schwellfestigkeit_Druck [MPa]
- Rm Biegefestigkeit [MPa]
- Wechselfestigkeit_Biegung [MPa]
- Rm Schubfestigkeit [MPa]
- $Rp_{02}$ Schub [MPa]
- Schwellfestigkeit Schub [MPa]
- Wechselfestigkeit Schub [MPa]

Durch die transversale Isotropie reduzieren sich die oberen drei Zeilen der Steifigkeitsmatrix auf fünf Einträge. Soweit möglich wurden die Zugfestigkeit sowie die Schubfestigkeit und die Biegewechselfestigkeit gemessen. Verbleibende offene Werte wurden mit den Werten dieser Materialklassen (Alu bzw. Stahl) in FEMFAT abgeschätzt.

Auf Basis der statischen FE-Analyse hat TECOSIM die Dauerfestigkeit für Stahl 316L Transversal isotrop mit zwei verschiedenen Materialgüten berechnet. Die zyklischen Materialwerte entstammen zum Teil der Literatur bzw. wurden von KIT IAM-WK zur Verfügung gestellt, zum Teil wurden sie vom Materialgenerator des CAE-Programms FEMFAT berechnet. Beide Werte-Sets stimmen recht gut überein (Tabelle 2), allerdings gibt es auch Ausnahmen. Die Dauerfestigkeit für Druck, Biegung und Scherung stimmte recht gut mit den Literaturangaben überein, hingegen setzte der FEMFAT-Materialgenerator die Druck-Schwellfestigkeit pauschal auf null. Die Vorgehensweise der internen FEMFAT-Berechnung ist nicht bekannt, aber das resultierende Haigh-Diagramm und die Dauerfestigkeitsergebnisse für beide Materialgüten sind plausibel. Das Versagen tritt ohnehin im Zugbereich des Haigh-Diagramms auf, der zyklische Lastfall (2 Mio. Zyklen von null bis zur Zugfestigkeit) berechnet die Zug-Schwellfestigkeit.

| Eigenschaft [Einheit] | Stahl 316L | Güte 1 | Güte 2 |
|---|---|---|---|
| **Eingesetzte Werte:** | | | |
| E-Modul E1/E1/E3 [GPa] | 215/215/190 | 215 | 215 |
| Schubmodul G12/G13/G23 [GPa] | 82,7/75/75 | | |
| Querkontraktionszahl 12/13/23/31 [ ] | 0,3/0,3/0,3/0,265 | 0,3 | 0,3 |
| Rm Zugfestigkeit in 1 und 2 Richtung [MPa] | 700/700 | 700 | 700 |
| Rp02 Streckgrenze bzw. Dehngrenze Zug [MPa] | 580/580 | 580 | 580 |
| Schwellfestigkeit Zug [MPa] | 350 bis 420 | 350 | 420 |
| Wechselfestigkeit Zug [MPa] | 210 bis 315 | 210 | 315 |
| **Von FEMFAT berechnete Werte:** | | | |
| Rm Druckfestigkeit in 1 und 2 Richtung [MPa] | -1700/-1700 | 700 | 700 |
| Rp02 Quetschgrenze Druck [MPa] | -1400 | 580 | 580 |
| Schwellfestigkeit Druck [MPa] | -464 bis -580 | 0 | 0 |
| Rm Biegefestigkeit [MPa] | 980 | 849,8 | 849,8 |
| Wechselfestigkeit Biegung [MPa] | 280 bis 385 | 228,9 | 343,3 |
| Rm Schubfestigkeit [MPa] | 406 | 404,2 | 404,2 |
| Rp02 Fließgrenze Schub [MPa] | 336 | 334,9 | 334,9 |
| Schwellfestigkeit Schub [MPa] | 210 bis 280 | 248,9 | 282,3 |
| Wechselfestigkeit Schub [MPa] | 140 bis 245 | 121,2 | 181,9 |

*Tabelle 2: Statische und zyklische Materialparameter für die Dauerfestigkeitsberechnung von Stahl 316L*

Für das Demonstratorbauteil „Bürste mit Nylonborsten“, anhand dessen der virtuelle Prüfstand entwickelt wurde, hat TECOSIM eine Überlastung von 45% für die Materialgüte 1 ermittelt. Die typischen Stellen der Überlastung befinden sich nahe der Achse (Abbildung 16). Bei Schrägzug und rotierendem Bauteil befindet dort auch die größte statische Belastung.

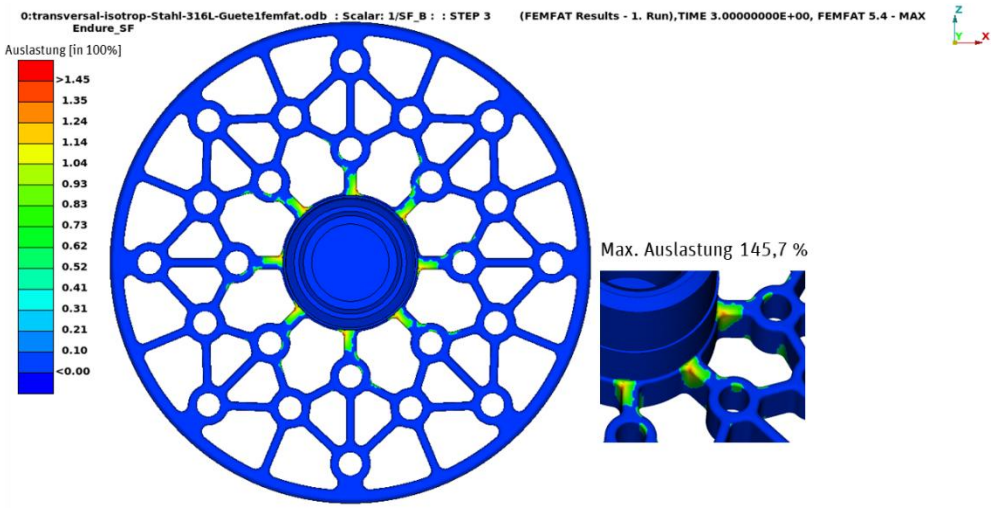



*Abbildung 16: Dauerfestigkeitsberechnung Stahl 316L mit Materialgüte 1*

Dem lokalen Haigh-Diagramm kann entnommen werden (Abbildung 17), dass das Versagen (roter Punkt) im Bereich der Zug-Schwellfestigkeit stattfindet, an einer Stelle, bei der das Verhältnis R von Unter- zu Oberspannung sehr klein ist.

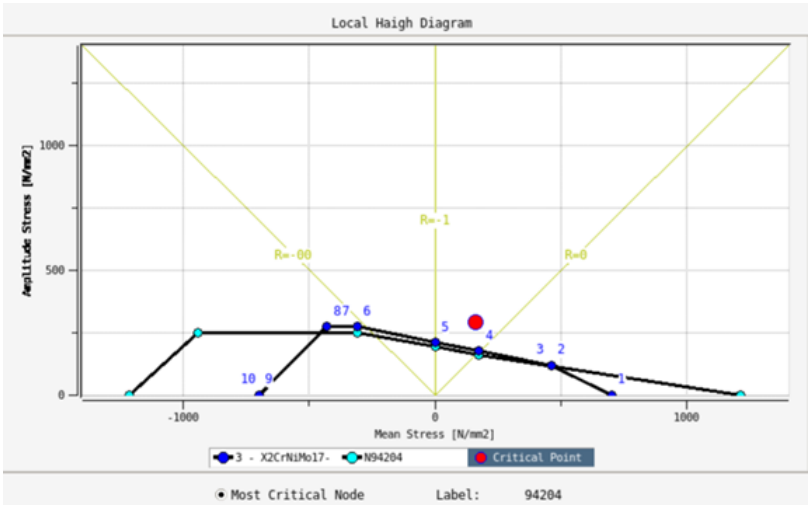



*Abbildung 17: Haigh-Diagramm bei 2 Mio. Zyklen im Zug-Schwellbereich für Stahl 316L mit Materialgüte 1*

Bei der besseren Materialgüte 2 betrug die Überlastung ungefähr 25% an den gleichen Stellen (Abbildung 18). Das zugehörige Haigh-Diagramm zeigt Abbildung 19. Das Versagen (roter Punkt) tritt bei ähnlicher zyklischer Spannung auf, allerdings kann der Werkstoff mit Materialgüte 2 eine höhere zyklische Belastung ertragen.

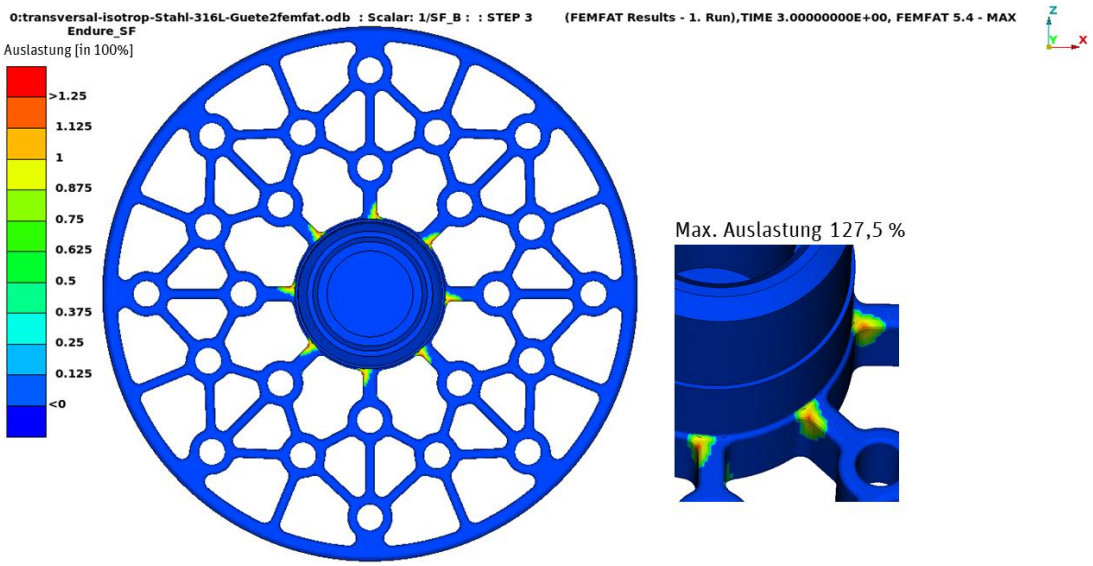



*Abbildung 18: Dauerfestigkeitsberechnung Stahl 316L mit Materialgüte 2*

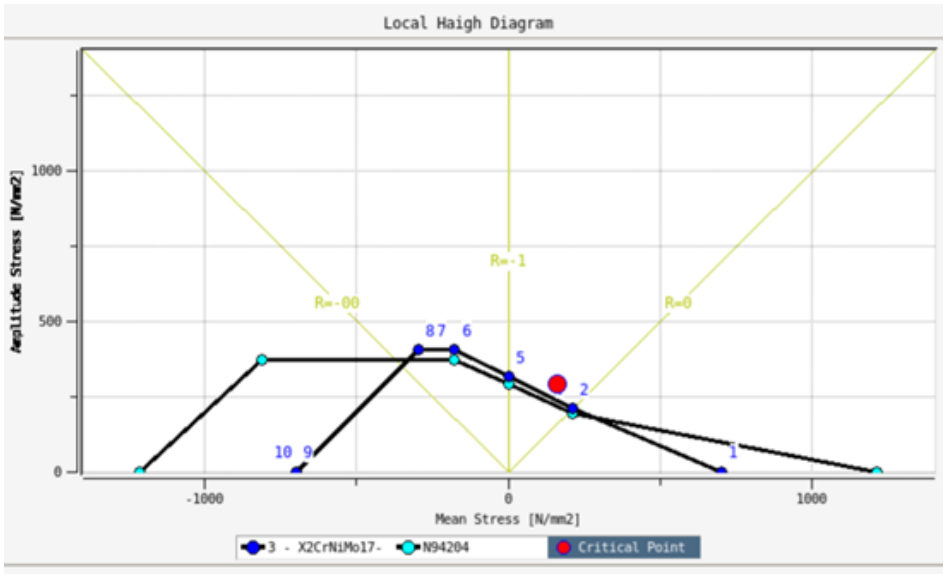



*Abbildung 19: Haigh Diagramm bei 2 Mio. Zyklen*
*im Zug-Schwellbereich für Stahl 316L mit Materialgüte 2*

Das Bauteil wurde auch mit dem Werkstoff Aluminium (AlSi10Mg) transversal isotrop mit zwei Güten berechnet (Tabelle 3), welche die monolithische und die poröse Struktur abbilden. Die zyklischen Materialwerte entstammen teilweise der Literatur, teilweise wurden sie vom KIT IAM-WK gemessen, teilweise wurden sie ergänzt durch den FEMFAT-Materialgenerator. Das Versagen tritt im Zugbereich des Haigh-Diagramms auf, der zyklische Lastfall (10 Mio. Zyklen von null bis Zugfestigkeit) berechnet die Zug-Schwellfestigkeit.

| Eigenschaft [Einheit] | AlSi10Mg monolithisch | AlSi10Mg mit ca. 2% Porosität | Güte 1 mono-lithisch | Güte 2 porös |
|---|---|---|---|---|
| **Eingesetzte Werte:** | | | | |
| E-Modul E1/E1/E3 [GPa] | 71/71/71 | 65/65/60 | 71 | 71 |
| Schubmodul G12/G13/G23 [GPa] | 26,3/27/27 | 24,1/25/25 | | |
| Querkontraktionszahl 12/13/23/31 [ ] | 0,35 als Mittelwert | 0,35 als Mittelwert | 0,35 | 0,35 |
| Rm Zugfestigkeit in 1 und 2 Richtung [MPa] | 340 | 240 | 340 | 240 |
| Rp02 Streckgrenze bzw. Dehngrenze Zug [MPa] | 204 | 144 | 204 | 144 |
| Schwellfestigkeit Zug [MPa] | 54 bis 95 | 38 bis 67 | 95 | 67 |
| Wechselfestigkeit Zug [MPa] | 68 bis 119 | 48 bis 84 | 68 | 48 |
| **Von FEMFAT berechnete Werte:** | | | | |
| Rm Druckfestigkeit in 1 und 2 Richtung [MPa] | -510 | -360 | 510 | 360 |
| Rp02 Quetschgrenze Druck [MPa] | -360 | -254 | 306 | 216 |
| Schwellfestigkeit Druck [MPa] | -163 bis -204 | -115 bis -144 | 0 | 0 |
| Rm Biegefestigkeit [MPa] | 357 bis 510 | 252 bis 360 | 408 | 288 |
| Wechselfestigkeit Biegung [MPa] | 102 bis 170 | 72 bis 120 | 98,8 | 71,4 |
| Rm Schubfestigkeit [MPa] | 204 bis 272 | 144 bis 192 | 255 | 180 |
| Rp02 Fließgrenze Schub [MPa] | 122 bis 163 | 86 bis 115 | 153 | 108 |
| Schwellfestigkeit Schub [MPa] | 102 | 72 | 82,2 | 58 |
| Wechselfestigkeit Schub [MPa] | 68 bis 102 | 48 bis 72 | 51 | 36 |

*Tabelle 3: Statische und zyklische Materialparameter für die Dauerfestigkeitsberechnung von AlSi10Mg*

Für das Demonstratorbauteil beträgt die maximale Überlastung beim monolithischen Aluminium 34% (Abbildung 20). Das Versagen tritt bei Erreichen der Zug-Schwellfestigkeit auf (Abbildung 21), wobei die Unterspannung sehr klein ist, mit R = Unterspannung/Oberspannung ~0.

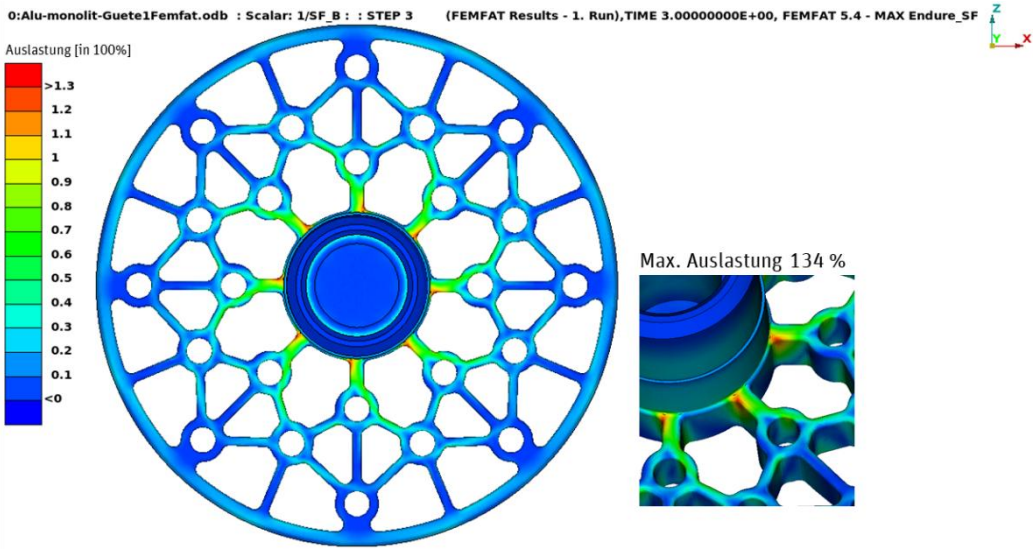



*Abbildung 20: Dauerfestigkeitsberechnung AlSi10Mg mit Materialgüte monolithisch*

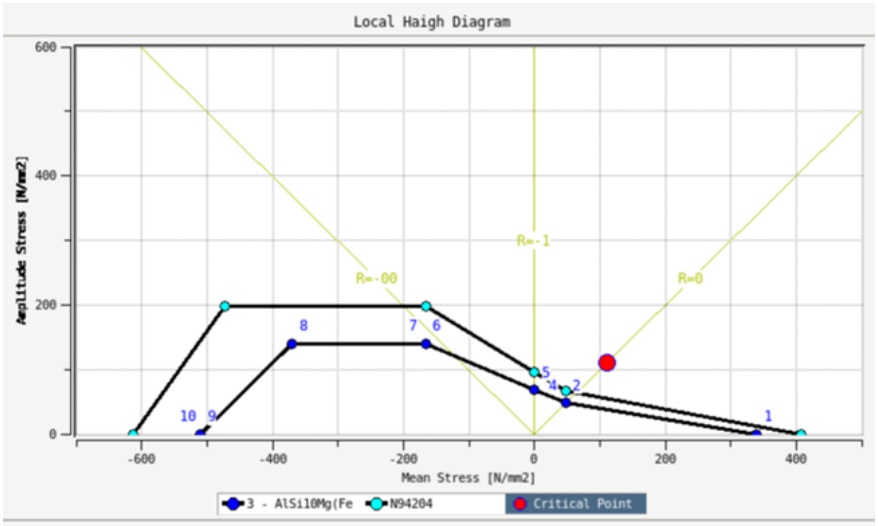



*Abbildung 21: Haigh-Diagramm bei 10 Mio. Zyklen im Zug-Schwellbereich für AlSi10Mg mit Materialgüte monolithisch*

Bei porösem Werkstoff ergeben sich 60% Überlastung (Abbildung 22). Das Versagen tritt bei Erreichen der Zug-Schwellfestigkeit auf, mit R = Unterspannung/Oberspannung klein (Abbildung 23).

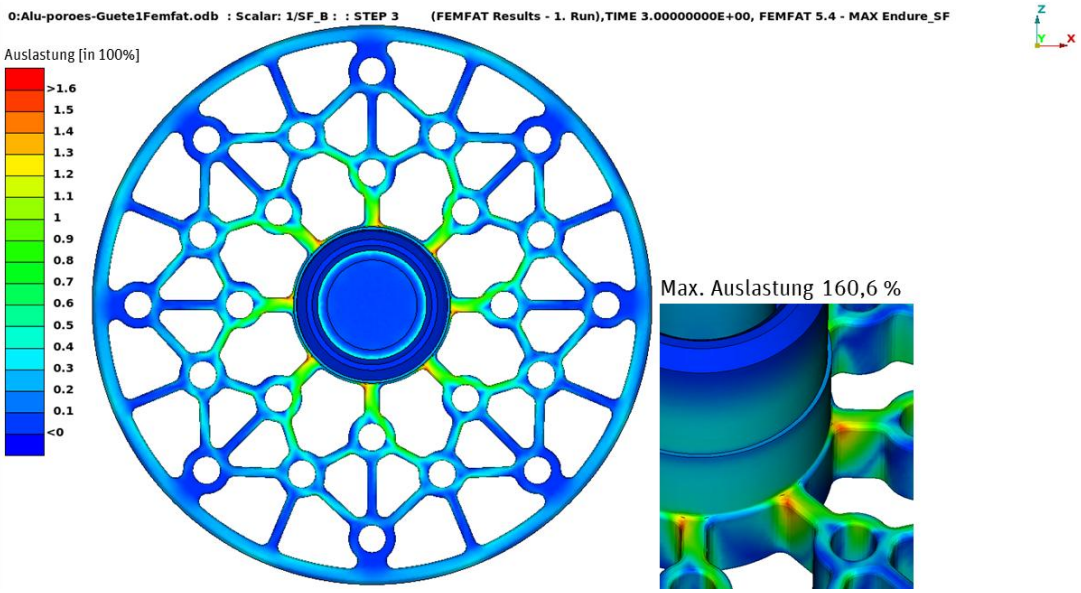



*Abbildung 22: Dauerfestigkeitsberechnung AlSi10Mg mit Materialgüte porös*

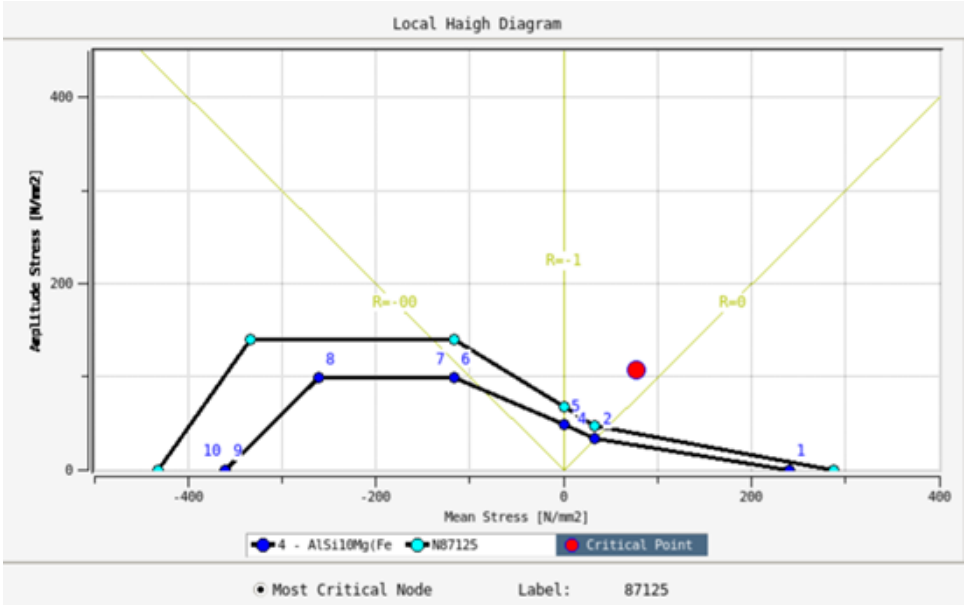



*Abbildung 23: Haigh-Diagramm bei 10 Mio. Zyklen im Zug-Schwellbereich für AlSi10Mg mit Materialgüte porös*

## II.1.6 Statische FE-Analyse mit Eigenspannungen

Der virtuelle Prüfstand sollte eine Methode des virtuellen Testens zur effizienten Einbeziehung experimenteller Daten zu Material und Eigenspannungen von additiv gefertigten Bauteilen beinhalten. Am KIT IAM-WK wurden an Probekörpern zahlreiche Eigenspannungsmessungen durchgeführt und Eigenspannungstiefenprofile aufgenommen. Im Allgemeinen liegen bei Stahl auf der Oberfläche Druckeigenspannungen, in der Tiefe, in die zu Messzwecken mittels Abtragung durch chemisches Ätzen vorgedrungen wird, dagegen Zugeigenspannungen vor. Bei Aluminium hingegen sind die Eigenspannungen sehr gering. Diese Sachverhalte verdeutlicht Abbildung 24.

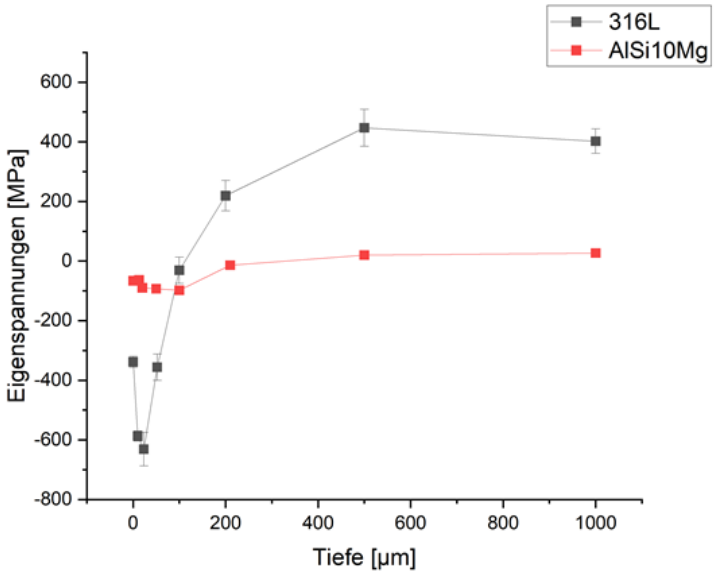



*Abbildung 24: Typischer Eigenspannungsverlauf bei einer 3D-gedruckten Quaderprobe (Quelle: KIT IAM-WK, Messdaten aus CAEaddFert)*

Der Eigenspannungsverlauf ist typisch und ist an verschiedenen unterschiedlichen lokalen Geometrien (Radien, Kanten, ebenen Flächen) zu finden. Er unterscheidet sich nur in den absoluten Werten und in der Steigung. Ein Eigenspannungstiefenprofil aufzunehmen ist aufwendig und anfällig für Fehler, die Messung der Eigenspannung nur auf der Oberfläche ist wenig aufwendig und zuverlässig. Eine solche Korrelation lässt sich auch leichter übertragen auf Bauteile, die aufwendige Datenbank zur Verwaltung charakterisierter Eigenspannungen inkl. assoziierter geometrischer Kriterien für deren korrekte Zuweisung könnte dann entfallen.

Das Eigenspannungsprofil wurde bis in 1 mm Tiefe gemessen. Eine Übertragung auf ein Bauteil setzt voraus, dass dieses sehr fein diskretisiert ist, mit Elementgrößen im Randbereich von ca. 0,1 mm. Daher ist diese Form der Modellierung nur für einen Bauteilausschnitt möglich, der sich bei einem rotationssymmetrischen Bauteil anbietet.

Um den Effekt fertigungsbedingter Eigenspannungen des 3D-Drucks isolieren und mit Eigenspannungswerten Simulationen für die verschiedenen Materialien durchführen zu können, wurde am KIT IPEK die in Abbildung 24 dargestellte Messkurve für Stahl 316L als Polynom approximiert und mit einem Mapping-Skript auf den Ausschnitt des rotationssymmetrischen Bauteils übertragen (Abbildung 25). Da die Randschicht sehr fein aufgelöst werden muss, muss auch die Oberfläche sehr fein diskretisiert werden. Daher ist die Übertragung von Eigenspannungen insbesondere bei Berücksichtigung des Tiefenprofils nur für einen Modellausschnitt handhabbar. Für Aluminium sind die Eigenspannungen zu gering und spielen keine Rolle. Die Druckeigenspannungen auf der Oberfläche und die Zugeigenspannungen in der Randschicht werden gut übertragen, während das Bauteil im Inneren eigenspannungsfrei ist.

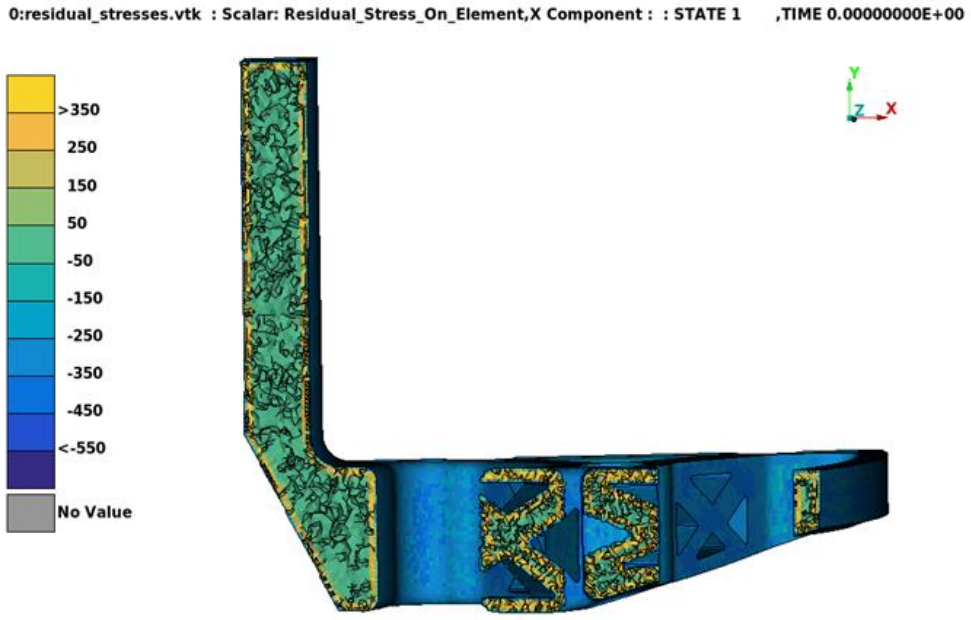



*Abbildung 25: Mapping eines typischen Eigenspannungstiefenprofils auf den rotationssymmetrischen Ausschnitt des Bauteils (Modell und Mapping KIT IPEK).*

In der Probe gemessen wurde ein ebener Spannungstensor

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xz} \\ \tau_{xz} & \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & \sigma \end{pmatrix}$$

Im CAE-Programm ABAQUS wird die obere Dreiecksmatrix des lokalen Spannungstensor als *initial stress auf die Oberflächen-Facets der Elemente des Bauteils übertragen, die bei einem Tetramesh aus Oberflächendreiecken bestehen.

$$\boldsymbol{S}_{lokal} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{pmatrix}$$

Dabei sind die beiden Spannungskomponenten der Hauptachse $\sigma$ Funktionen von der Tiefe in der Randschicht. Die Schubspannungen $\tau$ wurden nicht gemessen und werden mit null initialisiert. Es handelt sich um eine Initialisierung mit Eigenspannungen vor der eigentlichen Berechnung des Lastfalls. Wird Last aufgegeben, überlagern die von der Last verursachten Spannungen die initialen Eigenspannungen. Physikalisch entstehen die Eigenspannungen durch ein lokales Fließen des Werkstoffs, also einer geringen lokalen plastischen Verformung. Der gesamte Bereich hingegen ist bestrebt, den ursprünglichen unverformten Zustand wieder einzunehmen und aufgrund der Elastizität des Bereichs stellen sich Eigenspannungen ein. Diese sind stabil, solange keine Last den lokal plastifizierten Zustand stört. Bei geringer Last kommt es zu internen Spannungsüberlagerungen, bei größerer Last kann es auch zu internen Spannungsumlagerungen kommen, so dass sich bei einer weiteren plastischen Verformung ein neues Spannungsgleichgewicht einstellt.

Eine erste statische Analyse des mit Eigenspannungen initialisierten Bauteils unter Zentrifugalspannung und geringer Last (Schrägzug Öse) zeigte, dass die initialen Eigenspannungen sowohl im Druckbereich auf der Oberfläche als auch im Zugbereich in der Randschicht abgenommen haben. Verglichen wurde die erste Spannungskomponente der Hauptachse (Abbildung 26).

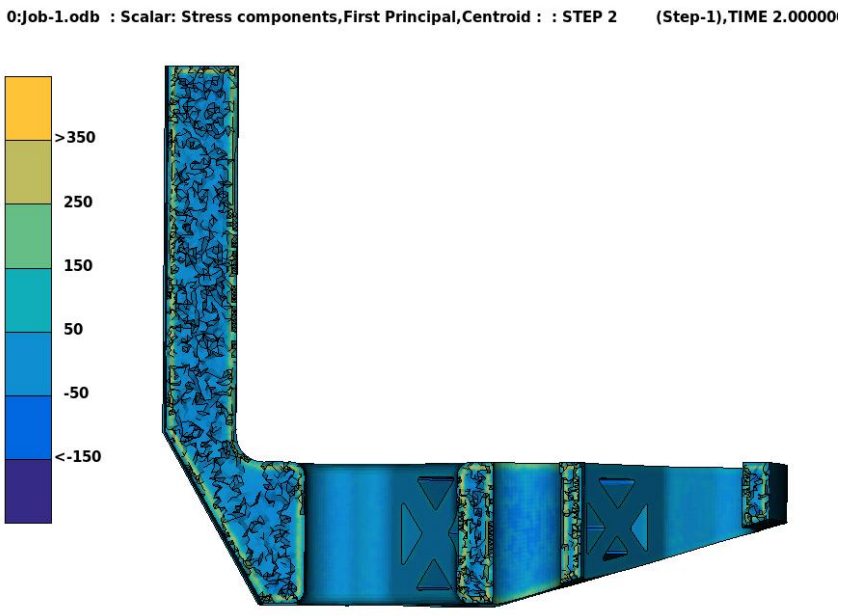



*Abbildung 26: Analyse des mit einem typischen Eigenspannungsprofil initialisierten Bauteils unter Zentrifugalspannung und geringer Schrägzuglast (Modell und Analyse KIT IPEK).*

Die Eigenspannungen überlagern ähnlich wie die Mittelspannung statisch die zyklischen Lastspannungen, d.h. sie addieren sich zur Mittelspannung. Bei der Addition muss die lokale Verteilung und die lokale Richtung der Spannungen berücksichtigt werden. Die Verteilung der

Mittelspannung ist mit der Verteilung der Lastspannung über den Querschnitt identisch und sie wirken auch in derselben Richtung. Die Eigenspannungen sind immer inhomogen verteilt, und können sich auch wie oben beschrieben bei hoher Belastung abbauen. Die Eigenspannungsempfindlichkeit hängt i. a. ähnlich wie die Mittelspannungsempfindlichkeit bei Stahlwerkstoffen von der Zugfestigkeit ab [Rörup 2003][5].

Im Projekt bestanden Überlegungen, eine analytische Korrelation des Eigenspannungstiefenprofils mit lokalen geometrischen Größen herzustellen, auch um Eigenspannungstiefenprofile auf der Basis von Oberflächenmessungen vorherzusagen. Nennenswerte Eigenspannungen traten nur bei Stahlproben auf, Proben aus Aluminium zeigten nur sehr geringe Eigenspannungen. Daher wurden alle Untersuchungen zum Einfluss der Eigenspannungen am Werkstoff Stahl 316 L durchgeführt.

Die Untersuchung hinsichtlich einer analytischen Korrelation zwischen dem Eigenspannungstiefenprofils und den verschiedenen lokalen Geometrien (Kante, Radius) war allerdings aufwendig und erforderte zahlreiche Messungen. Dennoch konnte keine klare Korrelation zwischen lokalen geometrischen Größen und gemessenen Eigenspannungstiefenprofilen festgestellt werden. Hingegen konnte eine Abhängigkeit der gemessenen Eigenspannungstiefenprofile von der Aufbaurichtung erkannt werden. Wesentlich ist der Winkel zwischen der Messebene, d.h. der tangentialen Ebene auf der Oberfläche des Körpers, in der der Messpunkt liegt, und der Aufbaurichtung. Das Eigenspannungstiefenprofil wird normal zu dieser Messebene ermittelt, wobei durch Ätzen in die Tiefe eingedrungen wird. Diese Eigenspannungstiefenprofile wurden nicht am Bauteil gemessen, sondern an akademischen Prüfkörpern, welche soweit wie möglich identisch gefertigt wurden wie das Bauteil. Denn es sollte gerade nicht das Bauteil vermessen werden, das dann durch geätzte Löcher beschädigt worden wäre. Die gemessene Information an den akademischen Prüfkörpern wird auf das Bauteil übertragen, neben den Eigenspannungen auch die Materialbeschaffenheit. Dies erfolgt zwar nicht mehr - wie ursprünglich angenommen - in Abhängigkeit der lokalen Geometrie, sondern in Abhängigkeit des Winkels zur Aufbaurichtung. Auch bei transversal isotropen Materialien muss die Aufbaurichtung bekannt sein.

Abbildung 27 zeigt die Messungen bis in 1 mm Tiefe. Je nach Winkel zwischen Aufbaurichtung und Messebene werden in der Tiefe Zugeigenspannungen, Druckeigenspannungen oder ein eigenspannungsfreier Zustand gemessen. Die Druckeigenspannungen direkt an der Oberfläche zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf für jeden Winkel. Allerdings haben Vergleichsmessungen am IAM-WK zwischen sandgestrahlten und unbehandelten Proben gezeigt, dass die hohen Druckeigenspannungen an der Oberfläche vom Sandstrahlen herrühren. Ohne Sandstrahlen zeigt sich ein eigenspannungsarmer Zustand an der Oberfläche.

Eigenspannungen innerhalb eines Bauteils befinden sich immer in einem mechanischen Gleichgewicht, im Sinne von actio = reactio. Das bedeutet nicht, dass sich bei dem gemessenen Tiefenprofil die lokalen Druck- und die benachbarten Zugeigenspannungen ausgleichen müssten. Es bildet sich im gesamten Bauteil ein Spannungsfeld aus, das sich in einem Gleichgewicht befinden muss, obwohl man lokal kaum auf ein Gleichgewicht schließen würde. Übersteigen die Eigenspannungen die Fließgrenze, verzieht sich das Bauteil, was mit einer Eigenspannungsumlagerung und auch mit einer Reduzierung der Eigenspannungen einhergeht.

[5] Rörup J.; Einfluss von Druckmittelspannungen auf die Betriebsfestigkeit von geschweißten Schiffskonstruktionen; Dissertation, Schriftenreihe Schiffbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2003

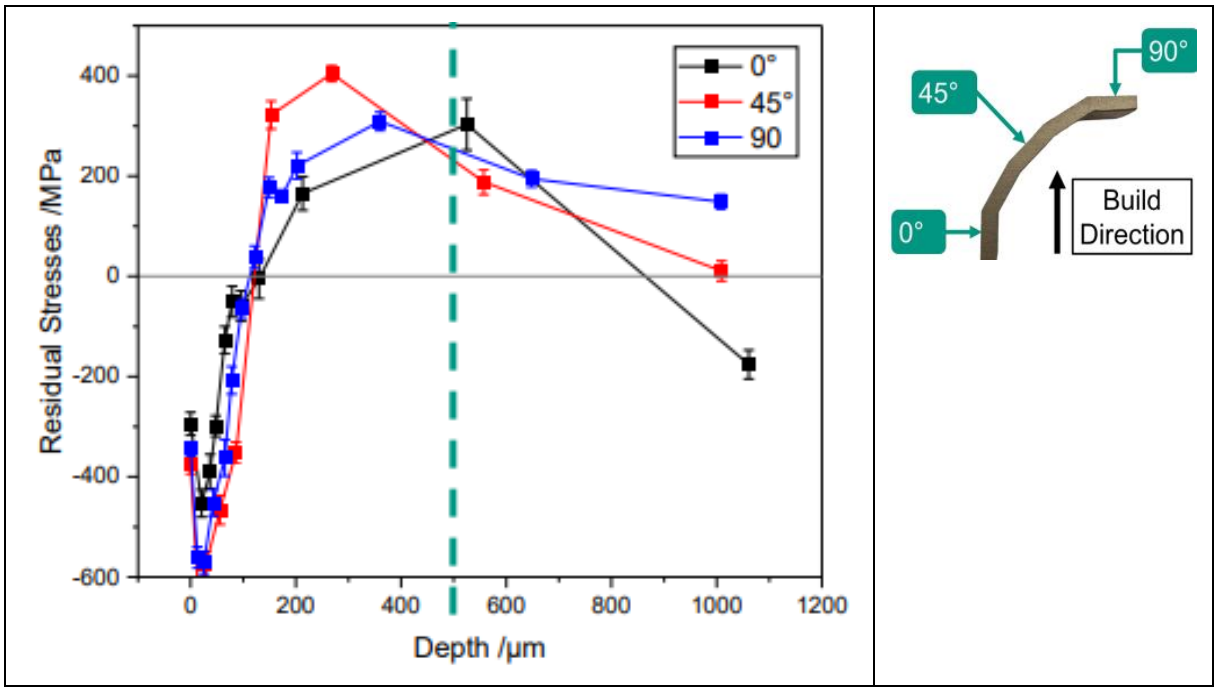



*Abbildung 27: Beispiel für gemessene Eigenspannungstiefenprofile an einem Probekörper für verschiedene Winkel der Messebene gegenüber der Aufbaurichtung (Quelle: CAEaddFert Arbeitsbesprechung, IPEK KIT, 10.01.2025. Messwerte von IAM-WK KIT)*

Die experimentellen Möglichkeiten, mit Diffraktometrie tiefere Schichten zu messen, sind praktisch begrenzt durch die Blendenweite und die erwarteten Bragg'schen Winkel, da durch chemisches Ätzen nur Vertiefungen mit relativ kleinem Durchmesser erzeugt werden. In der Literatur finden sich zumeist nur Eigenspannungsmesswerte bis in eine Tiefe von maximal mehreren hundert Mikrometer, in dieser Tiefe haben sich die Eigenspannungen meistens relaxiert. Offensichtlich ist dies beim im Projekt additiv gefertigten Bauteil nicht der Fall. Aufgrund des Fertigungsverfahrens können Eigenspannungen bis in großer Tiefe auftreten.

Um Erkenntnisse über das Bauteilverhalten unter dem Einfluss von Eigenspannungen zu erlangen, wurden vom IPEK aus den Messdaten verschiedene Polynome abgeleitet und bis zu 3 mm in die Tiefe extrapoliert, wobei in der Tiefe die drei Zustände (Zug-, Druckeigenspannung, eigenspannungsfreier Zustand) abgebildet wurden. Das Demonstratorbauteil wurde mit den unterschiedlichen Eigenspannungsbelegungen berechnet.

Am rotationssymmetrischen Ausschnitt des Demonstrators wurde der Einfluss der Eigenspannungen mit der gleichen Lastfallsequenz (zuerst Zentrifugallast, danach Schrägzug) analysiert, mit der auch der Demonstrator als Ganzes ohne Eigenspannungen analysiert wurde, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das vom IAM-WK gemessene Eigenspannungstiefenprofil wurde vom IPEK als Polynom abgebildet (vergleiche Abbildung 28) und mit einem Skript in der Programmiersprache Julia auf die Elemente projiziert. Das Skript erzeugt eine Zuweisungstabelle, bei der die Eigenspannungswerte der jeweiligen Messebene den Elementen zugeordnet wird. Die Zuweisungstabelle wird im Berechnungsdeck von ABAQUS als Initialisierung aufgerufen. Die Eigenspannungswerte wurden im lokalen Messkoordinatensystem (immer normal zur gekrümmten Oberfläche am Messort) aufgenommen. Bei der Zuweisung der Eigenspannungswerte auf die oberflächennahe Randschicht des Bauteils werden die Eigenspannungswerte vom lokalen Koordinatensystem rücktransformiert auf das globale Bauteilkoordinatensystem, mit dem ABAQUS rechnet und in dem die Auswertung stattfindet. Auch diese Koordinatentransformation findet vor der eigentlichen ABAQUS-Rechnung statt. Die Zuweisungstabelle enthält daher die Eigenspannungswerte transformiert vom lokalen

Messkoordinatensystem auf das globale Bauteilkoordinatensystem. Dieses aufwendige Preprocessing läuft dennoch zügig durch, da nur wenige Zellen (nämlich nur die ersten Lagen der Randschicht) betroffen sind. Auf der anderen Seite bleibt die ABAQUS-Rechnung schlank, da ABAQUS nur eine zusätzliche Initialisierungsschleife einmalig durchlaufen muss.

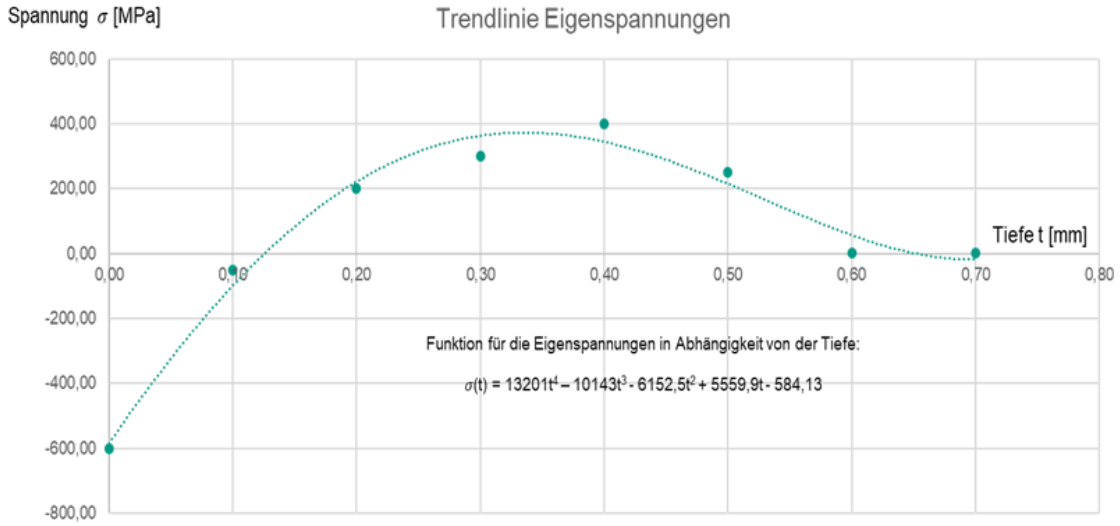



*Abbildung 28: Polynom vom Eigenspannungstiefenverlauf nach Messwerten (Quelle: CAEaddFert IPEK KIT)*

TECOSIM hat einen Beitrag zur Konzeption dieses Skripts geleistet und es zur industriellen Anwendung geführt. Die wesentlichen Beiträge zum Abbildungsprozess und insbesondere die programmiertechnische Realisierung wurde vom IPEK geleistet. Das Skript bietet noch viele Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Ohne den hier stattfindenden Technologietransfer vom KIT zu TECOSIM wäre es nicht möglich gewesen, den Einfluss von Eigenspannungen so flexibel zu analysieren. Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik bei kommerzieller Software wird ein zweites (elementgleiches) Modell benötigt, welches Eigenspannungen (z.B. aus einer expliziten Tiefziehrechnung oder einer Thermospannungsrechnung) besitzt. Ein solches zweites Modell liegt zumeist in der Praxis nicht vor. Daher werden bis heute in der Regel die Eigenspannungen nicht berücksichtigt. Mit diesem Forschungsskript lassen sich Eigenspannungsprofile auf sämtliche Bereiche eines beliebigen Bauteils übertragen. Ein zweites elementgleiches Modell mit vorhandenen Eigenspannungen wird überflüssig. Gerade da Eigenspannungen nur aufwendig (indirekt) bestimmbar sind, kann ein solches Skript helfen, verschiedene (auch Worst-Case-Szenarien) Eigenspannungsprofile auf Bauteile zu projizieren und deren möglichen Einfluss auf statische Festigkeit und Dauerfestigkeit zu analysieren. Damit kann die Berücksichtigung möglicher Eigenspannungen in den herkömmlichen CAE-Prozess regulär Eingang finden und die Auslegung absichern.

Die Eigenspannungsverteilung auf den Bauteilausschnitt nach Projektion des Eigenspannungstiefenprofils ist in Abbildung 29 dargestellt. Dabei sind die beiden Hauptspannungskomponenten im ebenen Spannungsfall identisch (hier z.B. $\sigma_{yy} = \sigma_{zz}$) mit den Schubspannungen $\tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$.

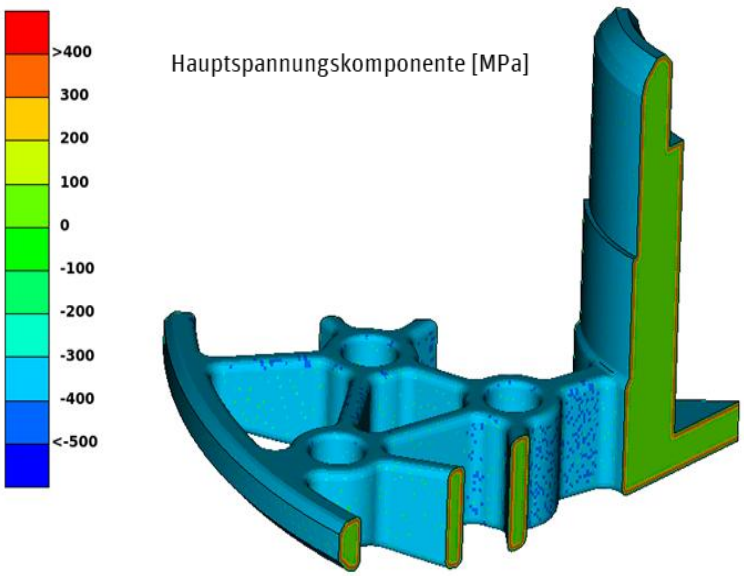



*Abbildung 29: Projektion des Eigenspannungstiefenprofils auf das 45°-Segment des Demonstrators*

Die Unstetigkeiten auf der Oberfläche werden durch die grobskalige Farbeinteilung hervorgehoben. Allerdings ist die Zuweisung auch immer eine Approximation. Jedem Oberflächendreieck wird ein Eigenspannungstiefenverlauf zugeordnet, wobei der erste Wert des Polynoms mit dem Abstand des Mittelpunkts des Elements von seinem Oberflächendreieck ermittelt wird. Daher ist es nicht möglich, dass direkt auf der Oberfläche - 600 MPa Druckeigenspannung projiziert wird, das würde einen Abstand d = 0 bedeuten, d.h. ein Oberflächensolid-Element hätte kein Volumen. Ob z.B. ein Wert unter oder über - 400 MPa projiziert wird, hängt letztendlich von der Größe des Oberflächensolid-Elements ab (Abstand Elementmittelpunkt zu Oberflächendreieck). Für den weiteren Verlauf in die Tiefe werden diejenigen Elemente ausgewählt, deren Abstandsvektor zur Oberfläche möglichst nahe an dem Normalenvektor des initialen Oberflächendreiecks liegt. D.h. auch beim Tiefenverlauf kann es zu Versetzungen kommen. Letztendlich sind diese der Diskretisierung geschuldet, denn die Messung erfolgt an geometrischen Orten mit exakten Koordinaten, die bestmöglich auf diskrete Elementmittelpunkte abgebildet werden sollen. Diese Elementmittelpunkte müssen im Skript erst ausgerechnet werden, denn ein Element ist durch die Eckknoten und die Seitenflächen definiert und hat keinen numerischen Knoten als Elementmittelpunkt.

Der Einfluss des ersten Lastfalles (Zentrifugallast) auf die Eigenspannungsverteilung ist kaum sichtbar. Abbildung 30 zeigt die Zentrifugalspannungen im Rotationslastfall des eigenspannungsfreien Demonstratorsegments. Die von-Mises-Spannungen sind gering und liegen unter 40 MPa.

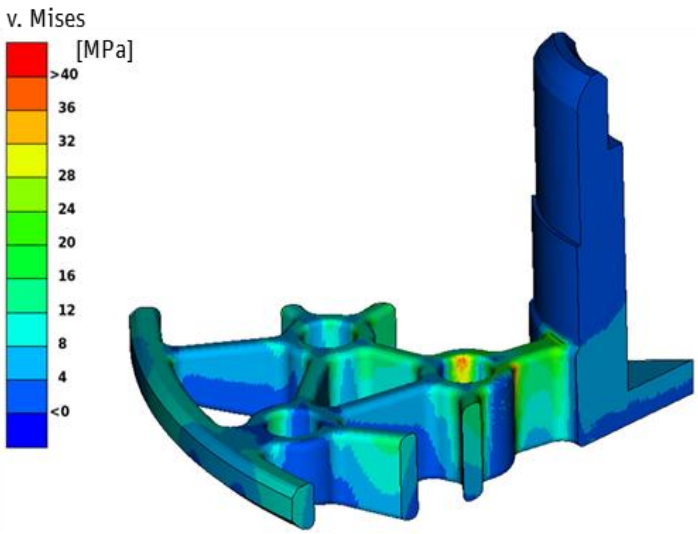



*Abbildung 30: Rotationslastfall im eigenspannungsfreien Zustand. Die von-Mises-Spannungen werden ausschließlich durch die Zentrifugalkräfte erzeugt.*

Wird der gleiche Lastfall mit dem eigenspannungsbehafteten Demonstratorsegment gerechnet (Abbildung 31), ist die Zentrifugalspannungsverteilung kaum mehr zu erkennen. Die Eigenspannungen betragen bis zu dem 10-fachen der Zentrifugalspannungen. Im Verlauf der Rechnung kommt es zu einer Spannungsumlagerung, und ein neues mittleres Spannungsgleichgewicht stellt sich ein, das sich aber aufgrund der Dominanz der Eigenspannungen kaum vom reinen Eigenspannungszustand unterscheidet. Es ist hingegen auffällig, dass die Eigenspannungen in der Randschicht trotz des großen Spannungsgradienten weitgehend erhalten bleiben und sich nicht umlagern.

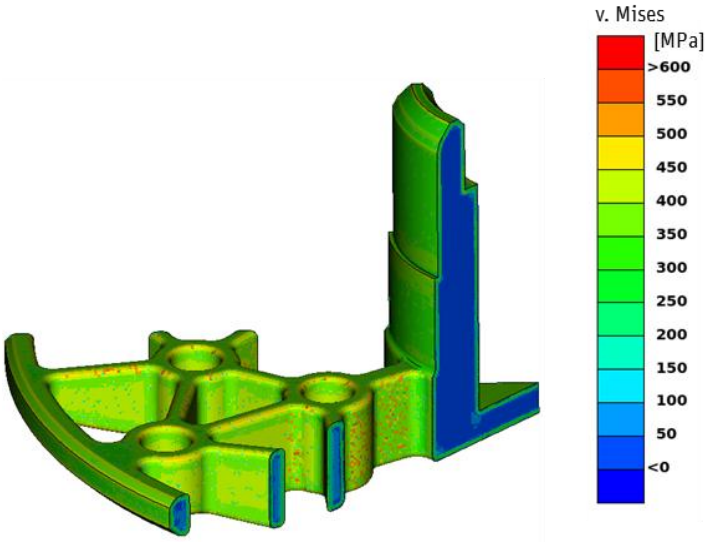



*Abbildung 31: Rotationslastfall im eigenspannungsbehafteten Zustand. Die von-Mises-Eigenspannungen dominieren die von-Mises-Zentrifugalspannungen.*

Auch im Zuglastfall bleiben die Eigenspannungen erhalten und lagern sich nur in stark belasteten Bereichen um (Abbildung 32). Die Lastfall-Spannungen überlagern sich den Eigenspannungen. Hier wirkt die Bruchlast der Nylonborsten in den Ösen.

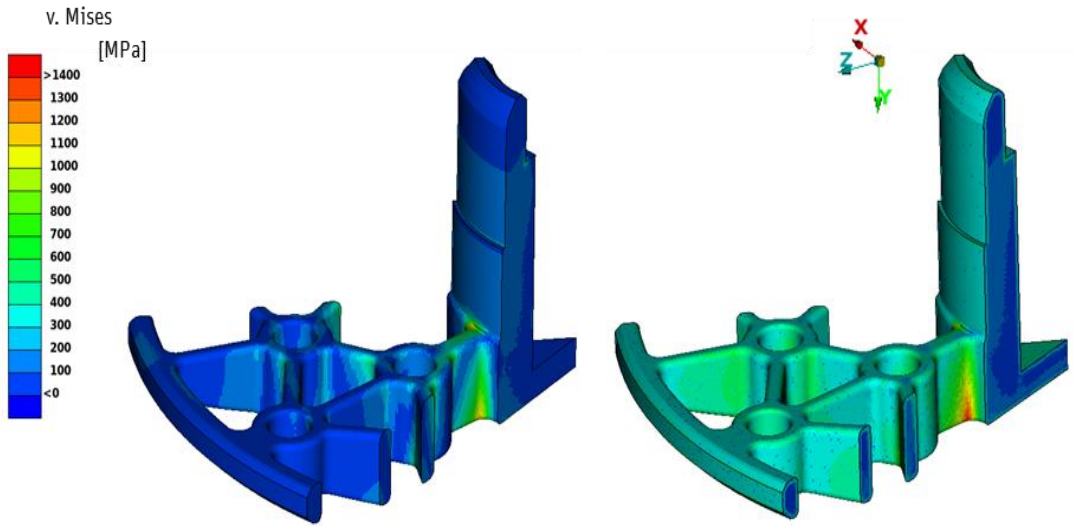



*Abbildung 32: Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). In fast dem gesamten Bauteil bleiben die Eigenspannungen erhalten.*

Mit der ANSA-Funktion „shrink“ wurde in das Demonstratorbauteil eine zweite Innenfläche generiert, mit einem Abstand von 0,8 mm zur Bauteilfläche, und dadurch eine äußere Randschicht generiert, die separat vernetzt werden konnte (Abbildung 33). Die Elementkantenlänge betrug ca. 0,3 mm bei sehr gleichmäßigem Tria-Netz. So konnten über 4 Elementlagen in die Tiefe von 0,8 mm abgebildet werden. Es sind Tetra-Elemente, so dass mehrere Elementmittelpunkte pro Lage berechnet werden können, auf die das Polynom sich stützen kann. Der Algorithmus sucht auf seinem Weg normal zur Oberfläche in die Tiefe der Randschicht immer nur den dem Normalenvektor nächstgelegenen Elementmittelpunkt.

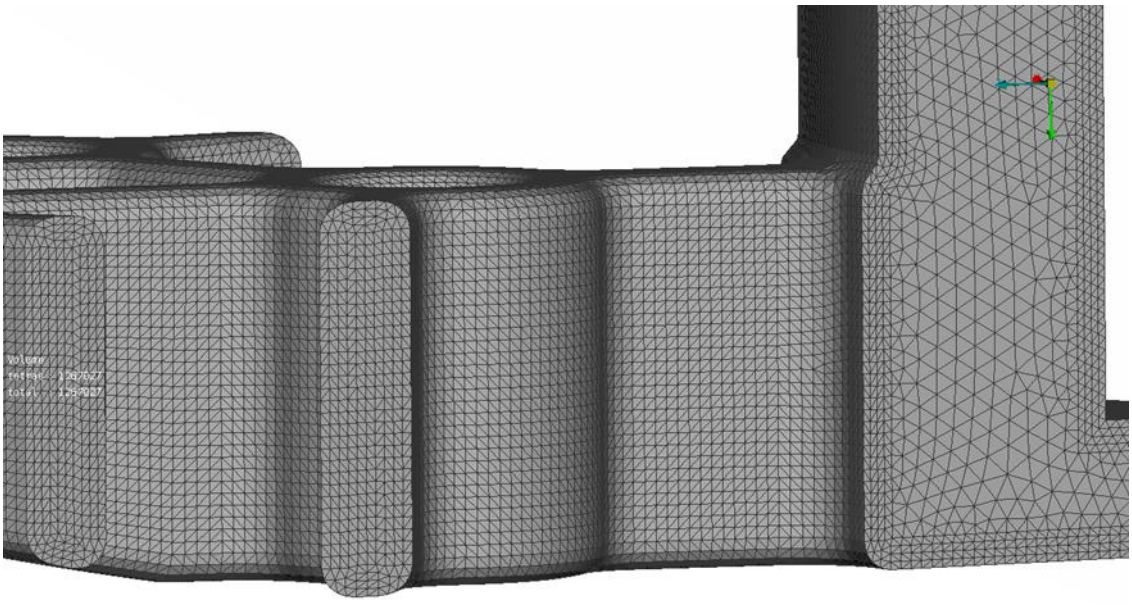


*Abbildung 33: Diskretisierung insbesondere der 0,8 mm starken Randschicht mit mindestens 4 Elementlagen (tetra-mesh)*

Die separate Randschichtmodellierung hat sich bewährt und sollte als Standard für diese Art der Eigenspannungstiefenprofilübertragung gewählt werden.

Die FE-Analyse mit Eigenspannungen wurde mit einer statischen und zyklischen Festigkeitsanalyse für den isotropen Stahl 316L bei einem reinen Torsionslastfall fortgeführt, um den Einfluss der Eigenspannungen zu ergründen. Der Torsionslastfall wurde zudem auf einem Prüfstand am IAM-WK eingerichtet. Zusätzliche Bauteile wurden extra für die Prüfung von PMT hergestellt. Bei der Prüfung sollte ein Ring mit Stiften in die äußersten Ösen eingreifen und das Bauteil tordieren (Abbildung 34).

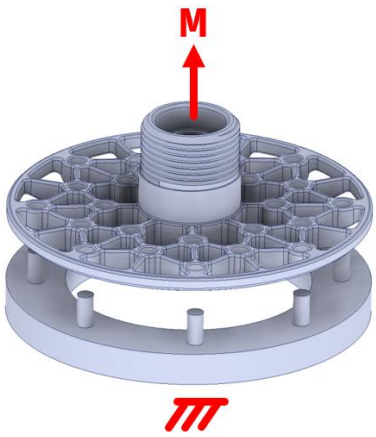



*Abbildung 34: Geplanter Torsionsprüfversuch*

Dieser statische Lastfall wurde in einem Ausschnitt modelliert (Abbildung 35). Die Kraft auf die halbe Öse liegt etwas über der Bruchkraft der Nylonborste.

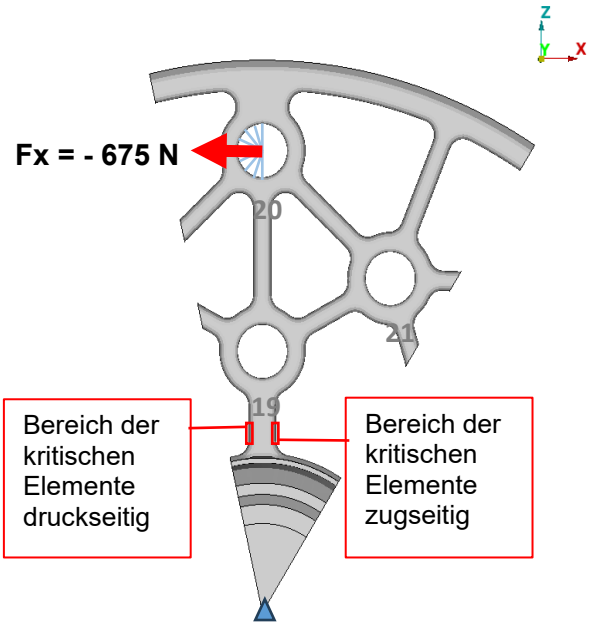



*Abbildung 35: Segment zur Modellierung des Torsionlastfalls*

Ohne Eigenspannungen ergeben sich 506 MPa (Abbildung 36), als Zugfestigkeit wird bei S316L im Datenblatt[6] 500 – 700 MPa angegeben. Die nichtlineare Spannungsantwort ist der Geometrie geschuldet.

[6] WITTE TUBE Werkstoffdatenblatt 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) Austenitischer korrosionsbeständiger Edelstahl

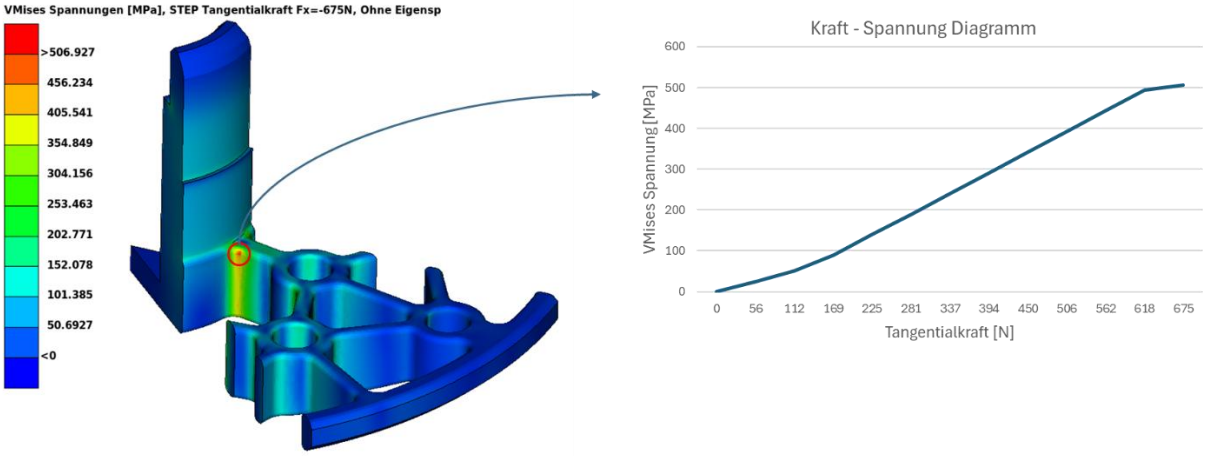



*Abbildung 36: Torsionslastfall ohne Eigenspannungen*

Wie bereits in Abbildung 28 gezeigt können je nach Winkel gegenüber der Aufbaurichtung in der Tiefe Zug- oder Druckspannungen auftreten. Daher wurde das ursprüngliche Polynom für die Randschicht bis 0,5 mm ergänzt mit zwei weiteren Polynomen (Abbildung 37), welche ab 0,5 mm Tiefe das ursprüngliche Polynom weiterführen in Richtung eigenspannungsfrei bei 2 mm (oben) oder eine Druckeigenspannung bis in eine Tiefe von 3 mm (unten) aufzeigen.

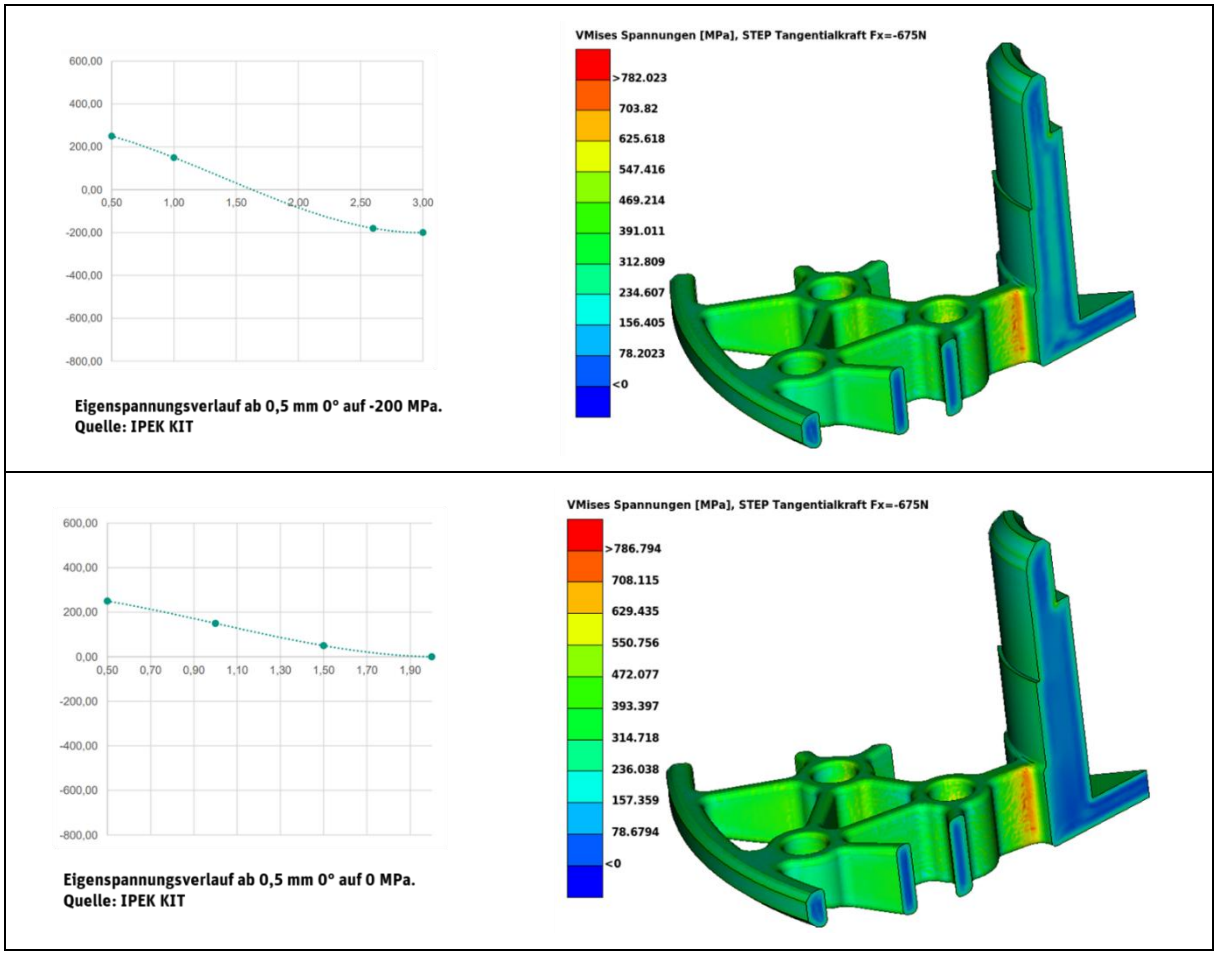



*Abbildung 37: Einfluss des Eigenspannungsprofils in Tiefen größer 0,5 mm auf die erhaltenen Lastspannungen im Torsionsversuch*

Im statischen Torsionslastfall hat sich gezeigt, dass der Einfluss der Eigenspannungen in größerer Tiefe auf die maximale Spannung (die immer auf der Bauteiloberfläche auftritt) nur sehr gering ist (wenige MPa). Allerdings erhöht die Eigenspannung die von-Mises-Gesamtspannung auf Werte oberhalb der angegebenen Zugfestigkeit.

Daher liegt auch in zyklischen Torsionslastfällen (Dauerfestigkeit) bei Änderung des Eigenspannungstiefenprofils ab einer Tiefe von 0,5 mm die Auslastung 1/SFB nur wenige Prozent auseinander (Abbildung 38). Insgesamt ist die Auslastung gegen 100% oder wenig darüber, es wird Schädigung vorhergesagt.

$$1/SF_B = A[\%] = (\sigma_{Mittel}+\sigma_{Ampl})/(\sigma_{Mittel}+\sigma_{zulässige\ Ampl})$$

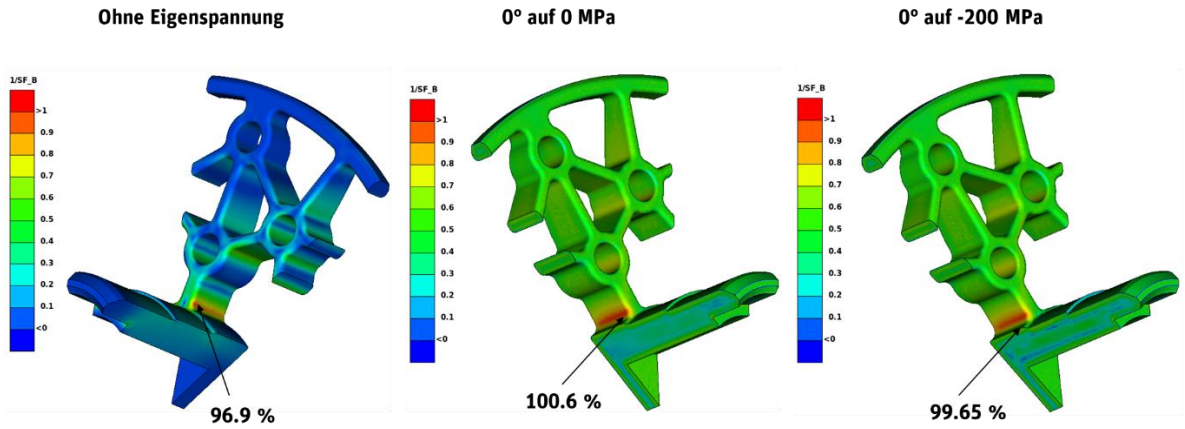



*Abbildung 38: Einfluss des Eigenspannungstiefenprofils auf die Dauerfestigkeit*

Eigenspannungstiefenprofile wurden nur 0°, 45° und 90° gegenüber der Aufbaurichtung gemessen. Das Zuweisungsskript erkennt den Winkel zwischen Flächennormale und Aufbaurichtung und teilt die Zuweisung der entsprechenden Polynome in Abschnitte von 0° bis 30°, 30° bis 60° und 60° bis 90 ° ein. Das Zuweisungsskript kann auf eine feinere Abschnittsaufteilung mit weiteren Polynomen erweitert werden und dadurch auch andere Eigenspannungstiefenprofile abbilden. Die bisherigen Rechnungen zeigen allerdings, dass der Einfluss der Eigenspannungen in der Tiefe auf die kritische Spannung an der Oberfläche eher gering ist. Außerdem findet eine quasistatische Eigenspannungsrelaxation statt, so dass kein abrupter Übergang stattfindet.

### II.1.7 Analyse der Zeit- und Dauerfestigkeit des Bauteils mit Eigenspannungen

Basierend auf den statischen Berechnungen zum Zuglastfall mit und ohne Eigenspannungen wurden Festigkeitsanalysen bis 2 Mio. Zyklen für Stahl durchgeführt. Die Auslastung $1/SF_B$

$$A\ [\%] = 1/SF_B = (\sigma_{\ Mittel} + \sigma_{\ Ampl}) / (\sigma_{\ Mittel} + \sigma_{\ zulässige\ Ampl})$$

liegt mit und ohne Eigenspannungen nur wenige Prozent auseinander (siehe Abbildung 39). Die kritische Auslastung tritt an den gleichen Stellen auf und ist weitgehend unabhängig vom Eigenspannungszustand. Die Eigenspannungsverteilung kann nur teilweise in der Verteilung der Auslastungswerte gefunden werden, z.B. an der inneren Achse und im äußeren Ring, und zwar dort, wo keine Belastung auftritt. So verschwindet die Auslastung in den Randschichten an manchen Stellen und die Auslastungsbänder sind unterbrochen (vergleiche Abbildung 40). Diese scheinbar zufällige Verteilung von Unstetigkeiten wird wahrscheinlich in der Berechnungsstatistik von FEMFAT abgebildet. Offensichtlich treten Auslastungen von 10 bis 40%

zumindest in der Berechnung nicht auf. Unstetigkeiten wie bei der Auslastung finden sich auch bei den Mittelspannungen und den Spannungsamplituden (Abbildung 42 und Abbildung 44).

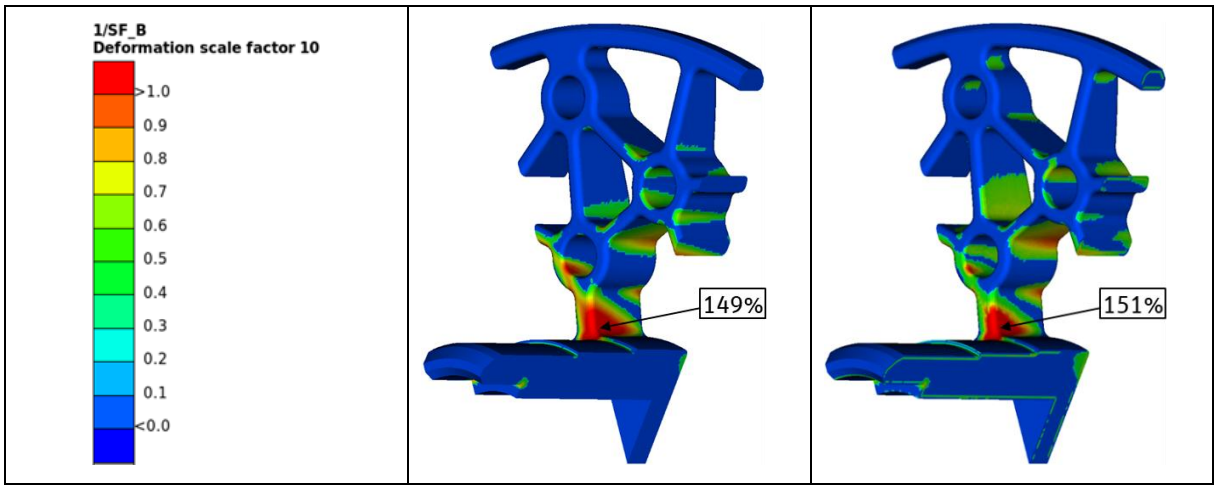



*Abbildung 39: Festigkeitsanalyse bei 2 Mio. Zyklen Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). Dargestellt ist die Auslastung.*

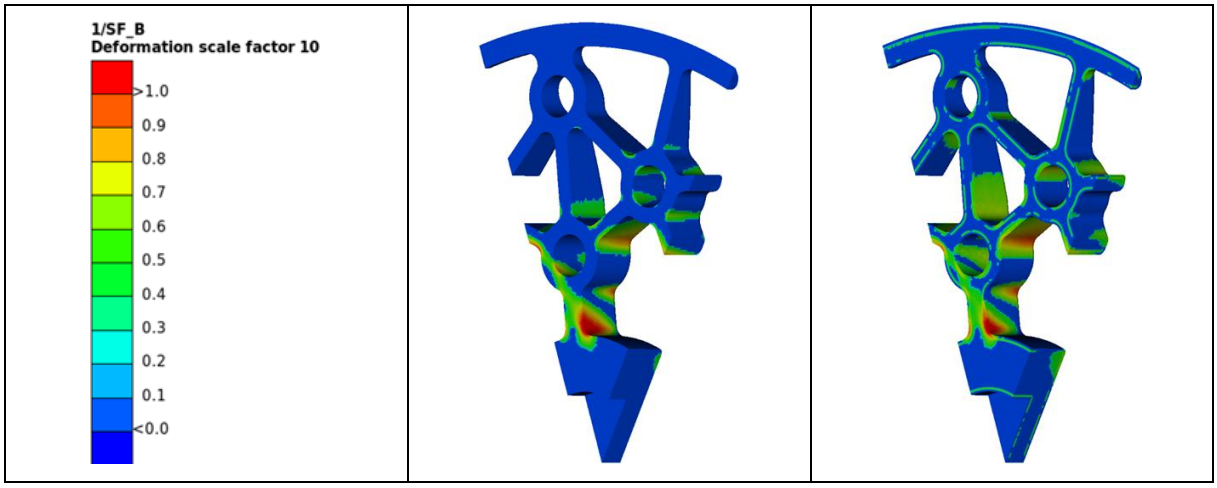



*Abbildung 40: Festigkeitsanalyse bei 2 Mio. Zyklen Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). Auswertung der Auslastung im horizontalen Schnitt.*

Für die Auslegung der Bauteile ist die maximale Auslastung entscheidend. Die Verteilung der Auslastung im kritischen Bereich ist in beiden Fällen sehr ähnlich. Die initialen Eigenspannungen beeinflussen die während des zyklischen Be- und Entlastungsprozesses auftretende Auslastung nicht wesentlich. Es ist anzunehmen, dass sich die Eigenspannungen bei zyklischer Last umlagern, aber nur in den Bereichen, wo tatsächlich eine zyklische Belastung auftritt.

Bei zyklischer Last reagiert das Material mit Mittelspannung +/- Spannungsamplitude. Eigenspannungen addieren sich mit den Mittelspannungen und beeinflussen nicht direkt die Spannungsamplitude. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die Verteilung der Spannungsamplitude. Die Größenordnung der Spannungsamplitude ist vergleichbar mit den initialen Eigenspannungswerten. Der horizontale Schnitt (Abbildung 42) zeigt, dass Eigenspannungen die Spannungsamplitude geringfügig erhöhen, auch in Bereichen, an denen

keine zyklische Belastung stattfindet. Die Eigenspannungen sind eine initiale Spannung und nicht Teil der zyklischen Belastung.

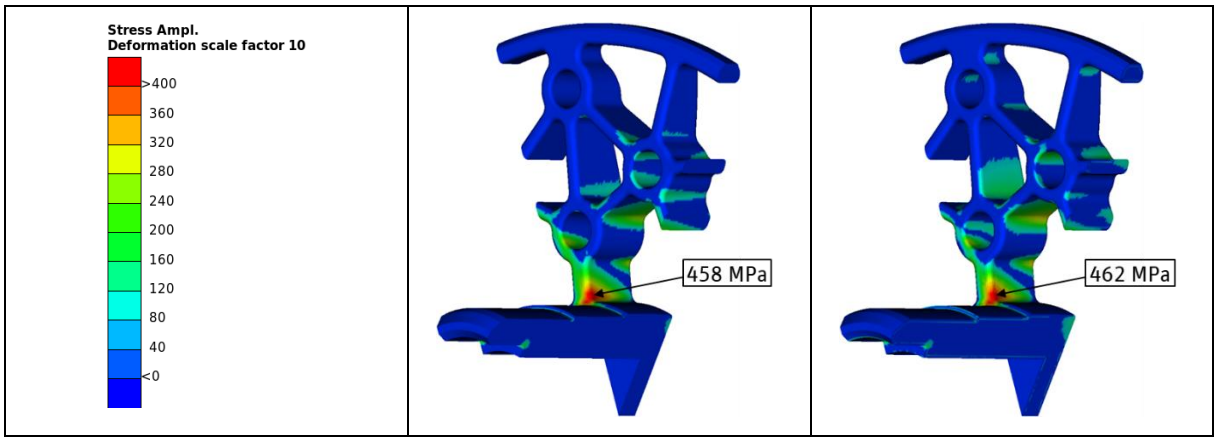



*Abbildung 41: Festigkeitsanalyse bei 2 Mio. Zyklen Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). Dargestellt ist der Betrag der Spannungsamplitude.*

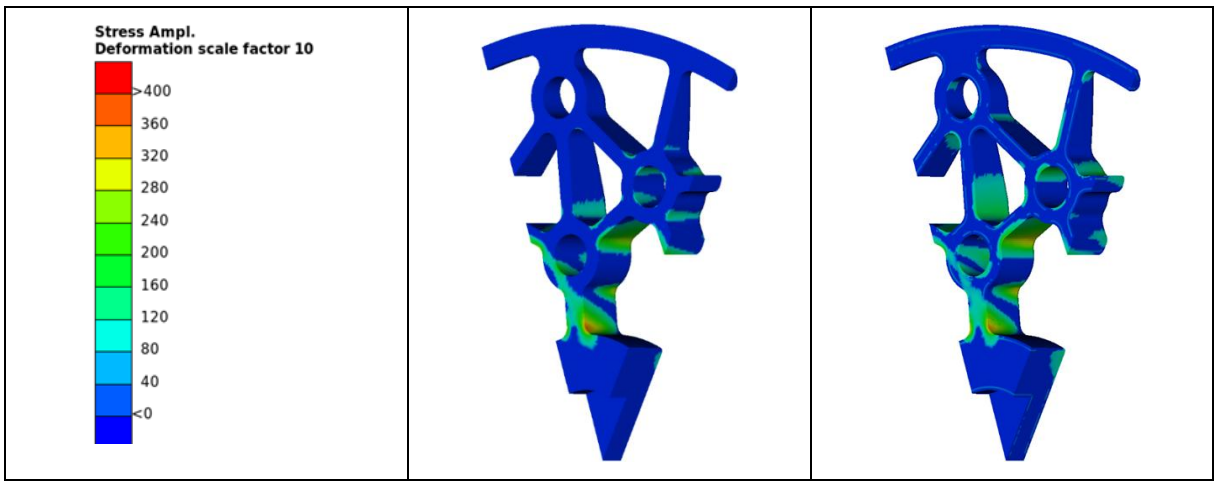



*Abbildung 42: Festigkeitsanalyse bei 2 Mio. Zyklen Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). Dargestellt ist der Betrag der Spannungsamplitude. Auswertung im horizontalen Schnitt.*

Werden die Mittelspannungen in Abbildung 43 und Abbildung 44 betrachtet, zeigt sich, wie Druck-Eigenspannungen auf der Bauteiloberfläche Zugspannungen aus dem Lastfall teilweise kompensieren bzw. Druckspannungen aus dem Lastfall verstärken können.

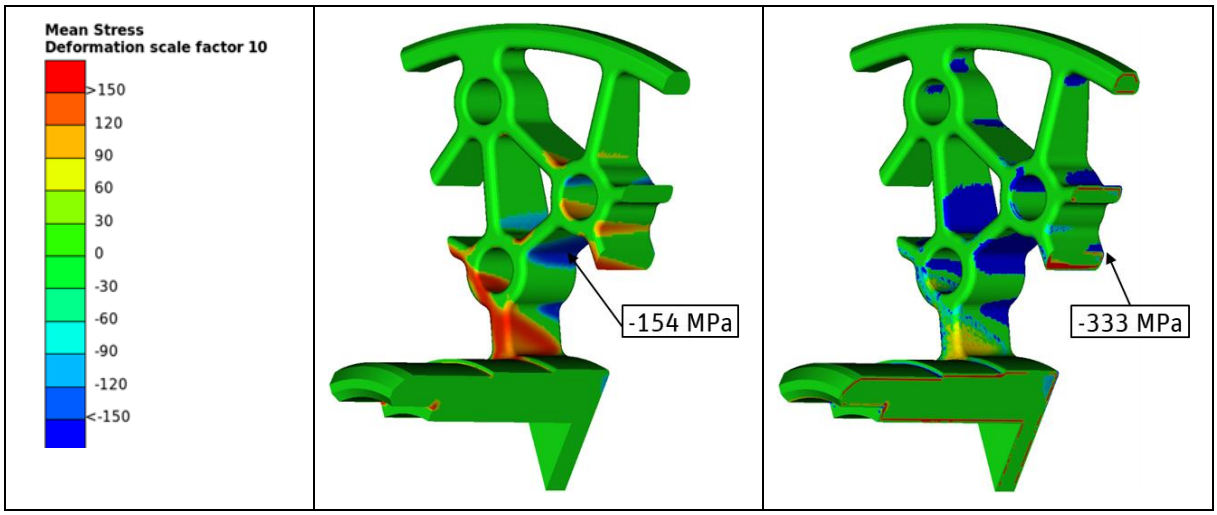



*Abbildung 43: Festigkeitsanalyse bei 2 Mio. Zyklen Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). Dargestellt ist die Mittelspannung.*

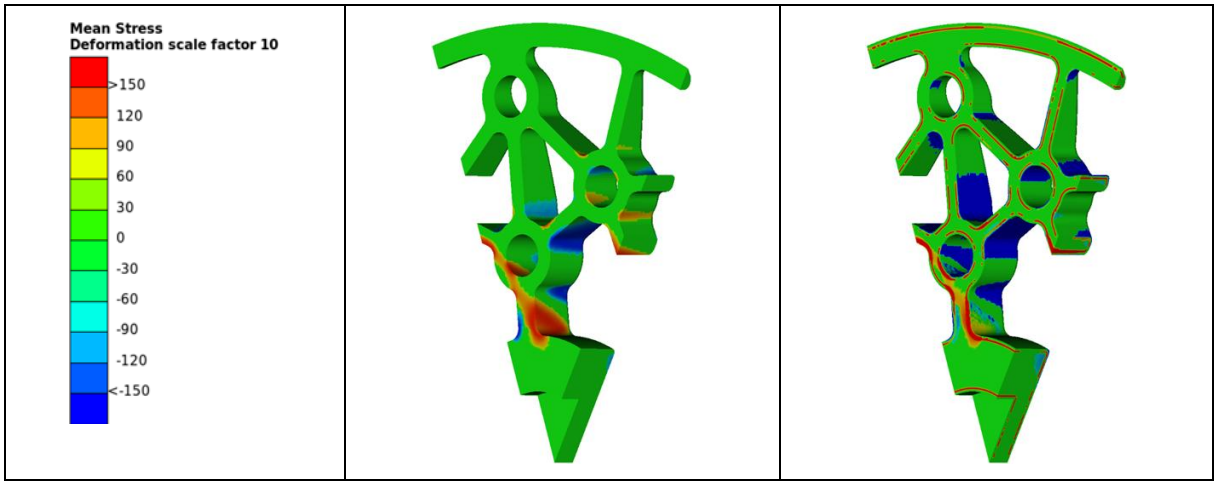



*Abbildung 44: Festigkeitsanalyse bei 2 Mio. Zyklen Zuglastfall im eigenspannungsfreien Zustand (links) und eigenspannungsbehafteten Zustand (rechts). Dargestellt ist die Mittelspannung mit Auswertung im horizontalen Schnitt.*

Die Eigenspannungen bleiben nicht durchgängig erhalten, es treten Unstetigkeiten auf, an denen die Eigenspannungen verschwinden, was sich auch bei der Auslastung zeigt. Die Unstetigkeiten beruhen wahrscheinlich auf dem FEMFAT-eigenen Berechnungsprozess.

Die Berechnungsdiagramme für den Lastfall ohne Eigenspannungen (Abbildung 45) zeigen eine lokale Ermüdungsfestigkeit von 267,5 MPa bei 2 Mio. Zyklen. Die lokale Wöhlerlinie zeigt keine Dauerfestigkeit, denn die hellblaue Kurve müsste sonst horizontal enden, sondern eine zulässige Spannungsamplitude. Sie erreicht 293,4 MPa bei 924.000 Zyklen. Das Bauteilversagen bei einer Spannungsamplitude von $\sigma_A$ = 457,6 MPa ist rot eingetragen.

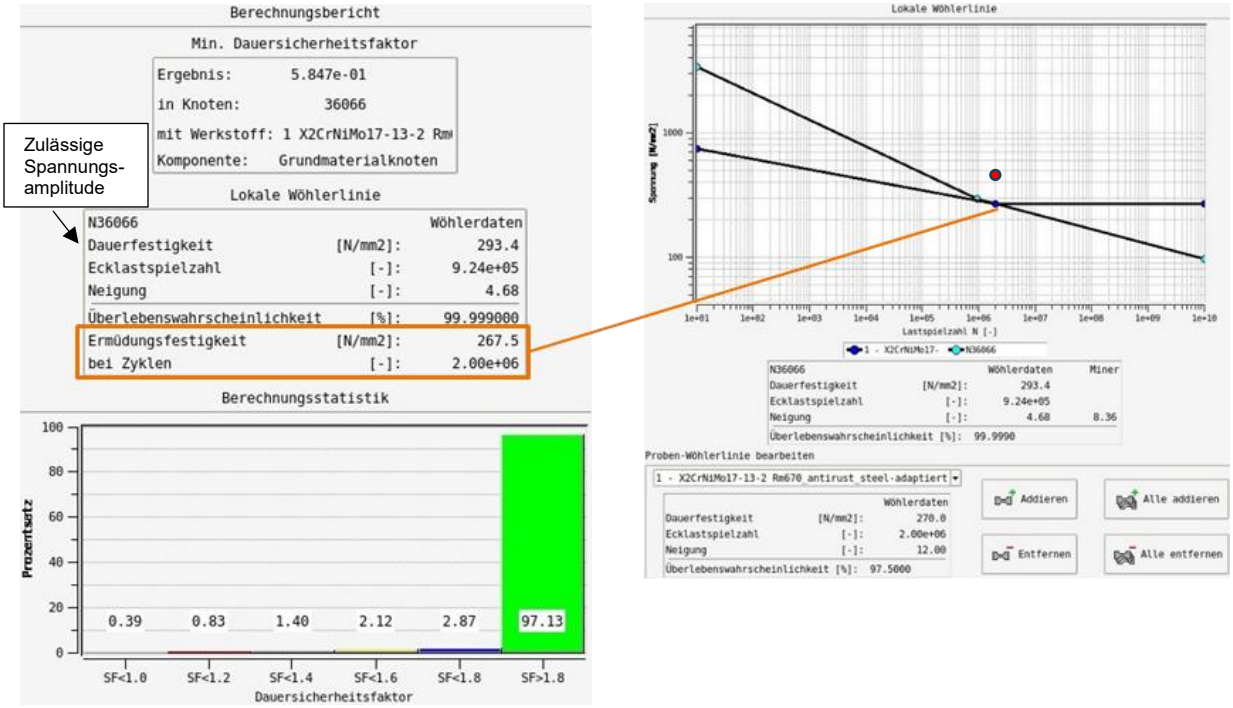



*Abbildung 45: Berechnungsdiagramme für den Lastfall ohne Eigenspannungen (hellblau: lokale Wöhlerlinie, dunkelblau: Materialwöhlerlinie)*

Das dazugehörige Haigh-Diagramm (Abbildung 46) zeigt ein Bauteilversagen bezüglich der Wechselfestigkeit im Zugbereich bei einer Mittelspannung von 118,4 MPa und einer Spannungsamplitude von 457,6 MPa. Die reine Materialkurve im Haigh-Diagramm (dunkelblau) berücksichtigt keine Einflussfaktoren und gilt bei 2 Mio. Zyklen. Das lokale Haigh-Diagramm (hellblau) hingegen berücksichtigt Einflussfaktoren und gilt bei der kritischen Ecklastspielzahl 924.000. Ein fiktives lokales Haigh-Diagramm für 2 Mio. Zyklen würde zwischen den beiden Kurven liegen. Zu den Einflussfaktoren gehören u.a. Spannungsgradient, Mittelspannung, Oberflächenrauheit, Sequenz der Spannungsumlagerung, Statistik.

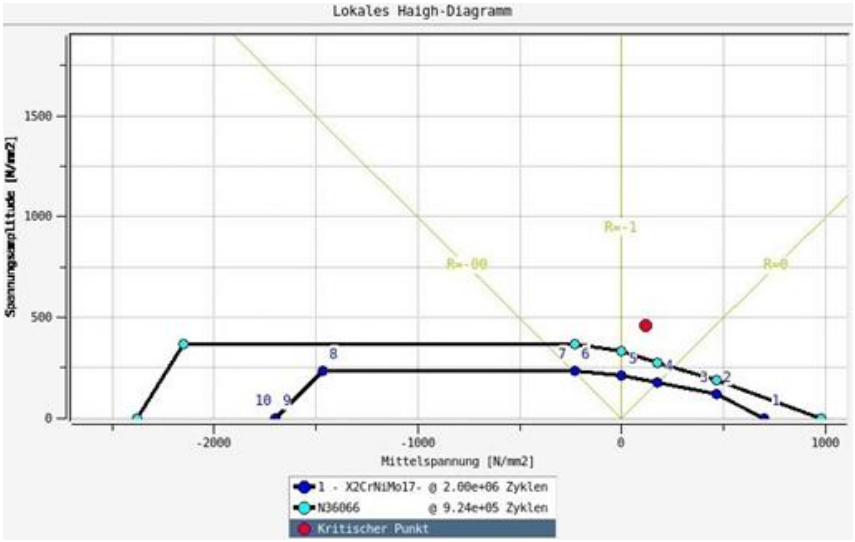



*Abbildung 46: Haigh Diagramm für den Lastfall ohne Eigenspannungen (rot: Bauteilversagen)*

Die Berechnungsdiagramme und das Haigh-Diagramm für den Lastfall mit Eigenspannungen sind sehr ähnlich. Der Einfluss der Eigenspannungen auf das Bauteilversagen ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

| | Ohne Eigenspannungen | Mit Eigenspannungen |
|---|---|---|
| Zulässige Spannungsamplitude [MPa] | 293,4 | 307,2 |
| Ecklastspielzahl | 924000 | 929500 |
| | | |
| Ermüdungsfestigkeit [MPa] | 267,5 | 280,2 |
| Anzahl Zyklen | 2 Mio. | 2 Mio. |
| | | |
| Mittelspannung $\sigma_M$ [MPa] | 118,4 | 75,4 |
| Spannungsamplitude $\sigma_A$ [MPa] | 457,6 | 462,3 |

*Tabelle 4: Auswertung der zyklischen Festigkeitsanalyse des Bauteils mit und ohne Eigenspannungen*

Ein Bauteil mit Eigenspannungen besitzt eine um ca. 5% höhere zulässige Spannungsamplitude bei etwas größerer Ecklastspielzahl. Auch die Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Zyklen steigt um ca. 5%. Bauteilversagen tritt bei einer um 43 MPa geringeren Mittelspannung und einer etwas größeren Spannungsamplitude auf. Die initialen statischen Eigenspannungen erhöhen oder reduzieren die Mittelspannungen, die Spannungen überlagern sich und bilden eine resultierende Mittelspannung. Allerdings bauen sich auch Eigenspannungen während der zyklischen Belastung ab bzw. lagern sich um. Das bedeutet, dass sich die resultierende Mittelspannung im Verlauf der zyklischen Belastung ändert, und zwar nicht nur aufgrund der Materialermüdung, sondern auch aufgrund der sich umlagernden Eigenspannungen. Offensichtlich sind hier nur noch ca. 10% der initialen Eigenspannungen, welche in der Größenordnung von +/- 400 MPa waren, am Ende der Belastungszyklen bei Bauteilversagen wirksam.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass initiale Eigenspannungen die Auslastung des Bauteils nur sehr geringfügig erhöhen. Die zulässige Spannungsamplitude und Ermüdungsfestigkeit nehmen geringfügig zu und die Mittelspannung bei Bauteilversagen wird um einen Bruchteil der initialen Eigenspannungen reduziert (oder erhöht, je nach Vorzeichen der Eigenspannung).

### II.1.8 Numerische Analyse der Eigenspannungsrelaxation

Am Torsionslastfall wurde die Relaxation von Eigenspannungen im statischen und zyklischen Versuch analysiert, indem neben den von-Mises-Spannungen auch die Mittelspannungen ausgewertet wurden.

Eigenspannungsrelaxation bei statischer Last

Die Eigenspannungsrelaxation in der statischen Rechnung, die mit dem CAE-Tool ABAQUS durchgeführt wurde, findet in drei Stufen statt:

1) Die erste Stufe kann als quasistatische Eigenspannungsrelaxation bezeichnet werden. Hierbei sucht ABAQUS ein neues Gleichgewicht, indem im Ruhezustand ohne irgendwelche äußeren Lasten und ohne Wärmeeintrag eine Umlagerung der in ein

bestimmtes Elementset initialisierten Eigenspannungen in die Nachbarelemente stattfindet.

2) Die zweite Stufe ist die Eigenspannungsrelaxation bei der Erhitzung des Prüfkörpers, die davon herrührt, dass die elastischen Materialparameter temperaturabhängig definiert sind. Wird ein Metall erhitzt, sinkt in der Regel das E-Modul, damit relaxieren Eigenspannungen automatisch. Wird es wieder abgekühlt, steigen die Eigenspannungen wieder auf den alten Wert.
3) Erst die dritte Stufe, die Berechnung der Eigenspannungsrelaxation mit dem Norton-Gesetz im Kriechzustand des Materials, führt zu einer wahren Eigenspannungsrelaxation. Abbildung 47 zeigt, dass die Relaxation bei geringen Eigenspannungen (50 MPa) nur gering ist, jedoch bei 200 MPa deutlicher wird. Nach der Initialisierung von 200 MPa bei 20°C findet die erste Stufe zur Umlagerung in ein neues quasistatisches Gleichgewicht statt, das dann 132 MPa zeigt. Bei Erhitzung sinkt das E-Modul und die Eigenspannungen betragen noch 92 MPa. Dann wird die Creep-Rechnung bei konstanten 700°C über 30 Minuten vorgenommen, und nach Abkühlung resultieren 99 MPa. Somit wurde bei einer Temperatur von 20°C eine von-Mises-Eigenspannung um 132 MPa - 99 MPa = 33 MPa relaxiert. Dieser Prozess kann wiederholt durchlaufen werden, wie eine Hysterese. Auch kann die Creep-Zeit erhöht werden. Die Creep-Berechnung startet mit einem expliziten Zeitschritt, schaltet aber dann auf ein implizites Verfahren um. Das bedeutet, dass obwohl das Kriechen ein transienter Vorgang und die Dehnungsänderung eine Ableitung nach der Zeit ist, diese mit Werten vorbelegt wird.

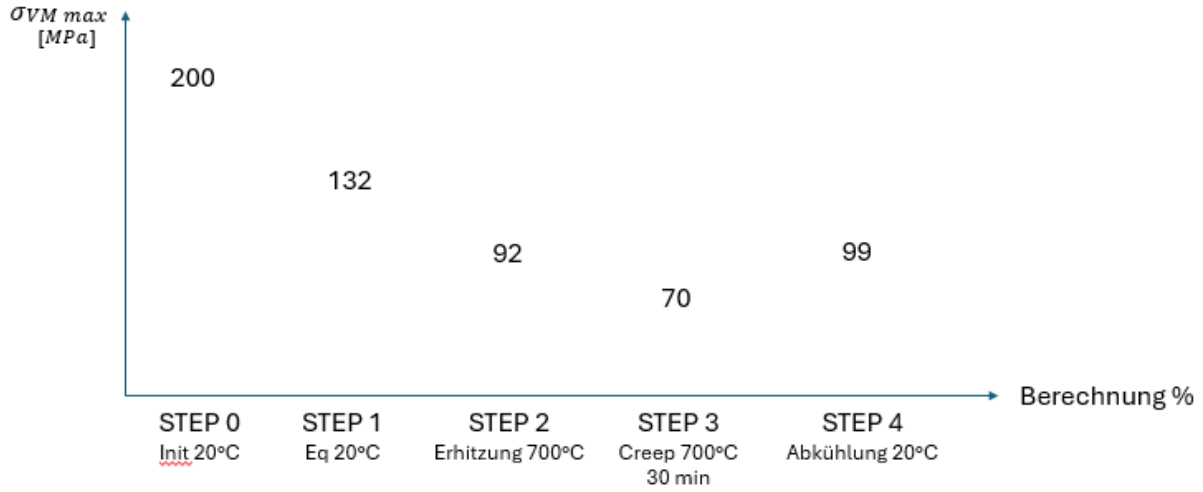



*Abbildung 47: Eigenspannungsabbau durch Wärmebehandlung (Berechnung in ABAQUS) Die Eigenspannungen verringern sich bei der Erhitzung wegen der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls gemäß dem Hookeschen Gesetz. Der Creep-Schritt entspannt die Eigenspannungen.*

Diese Eigenspannungsrelaxation durch Wärmenachbehandlung wurde nicht mit dem Demonstrator-Bauteil entwickelt, sondern anhand der akademischen Zugprobe. Im ursprünglichen Förderantrag war die Wärmenachbehandlung im virtuellen Prüfstand nicht vorgesehen. Der virtuelle Prüfstand soll helfen, Bauteile „as printed“ auszulegen, um auf Nachbehandlungen verzichten zu können. Dennoch ist die Relaxationsrechnung ein gutes und brauchbares Ergebnis und die Eigenspannungsrelaxation durch Wärmenachbehandlung konnte mit einer Parametrisierung aus der Literatur plausibel abgebildet werden.

In der statischen Berechnung berechnet sich die Mittelspannung als $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}+\sigma_{zz})$. Bei der Dauerfestigkeitsberechnung lässt sich $\sigma_m$ als Lösungsvariable auslesen. Bewertet wurden die kritischen Elemente sowohl zug- als auch druckseitig (Abbildung 38). Die

Initialisierung von Eigenspannungen auf Elemente generiert einen Ungleichgewichtszustand ähnlich einer Deltafunktion, die jedoch in der Realität so nie auftreten würde. Bei einer statischen Iteration wird immer ein Gleichgewichtszustand angestrebt. Daher zeigt sich selbst beim Aufbringen einer statischen Last ein Relaxieren der initialen Eigenspannung, aber es findet nur eine Eigenspannungsumlagerung in die nähere Umgebung statt. Im zyklischen Lastfall gibt es auch eine Eigenspannungsrelaxation. Allerdings findet sie im Zug- und Druckbereich nicht gleichmäßig statt, und es ist schwer, am Bauteil mit seinem geometrie- und lastfallbedingten komplexen dreidimensionalen Spannungszustand klare Erkenntnisse zu erlangen.

Aus diesem Grund wurde ein einfaches akademisches Zugversuchsmodell (Abbildung 48), das bereits im Rahmen des Verbundforschungsprojekts Solid4E aufgebaut worden war, in einer Sektion rechts und links der Mittelebene mit Eigenspannungen initialisiert. Beim Zugversuch wird ein ebener Spannungszustand erzeugt, aus dem mehr Klarheit über die Relaxation von Eigenspannungen unter statischer und zyklischer Last sowie durch Wärme gewonnen werden konnte.

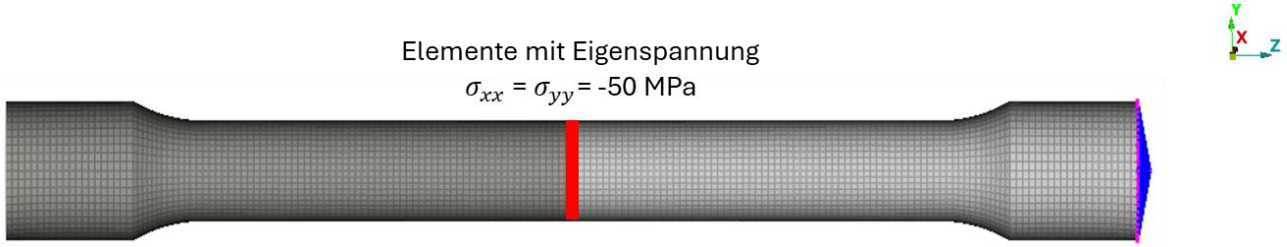



*Abbildung 48: Druck-Eigenspannungsinitialisierung auf der Hauptachse in x und y Richtung. Die von-Mises-Spannung wäre hier 50 MPa, die statische Mittelspannung -33 MPa.*

Mit diesem Modell wurden zahlreiche Versuche zur Eigenspannungsrelaxation gerechnet, auch ohne Zug. Bei der Initialisierung der Eigenspannungen wird das Kräftegleichgewicht gestört. Bereits im statischen linear-elastischen Fall relaxieren die Eigenspannungen in einer einfachen impliziten Rechnung ohne Zuglast auf ca. 32 MPa von-Mises-Spannung, es findet eine Spannungsumlagerung in die benachbarten Regionen statt (Abbildung 49).

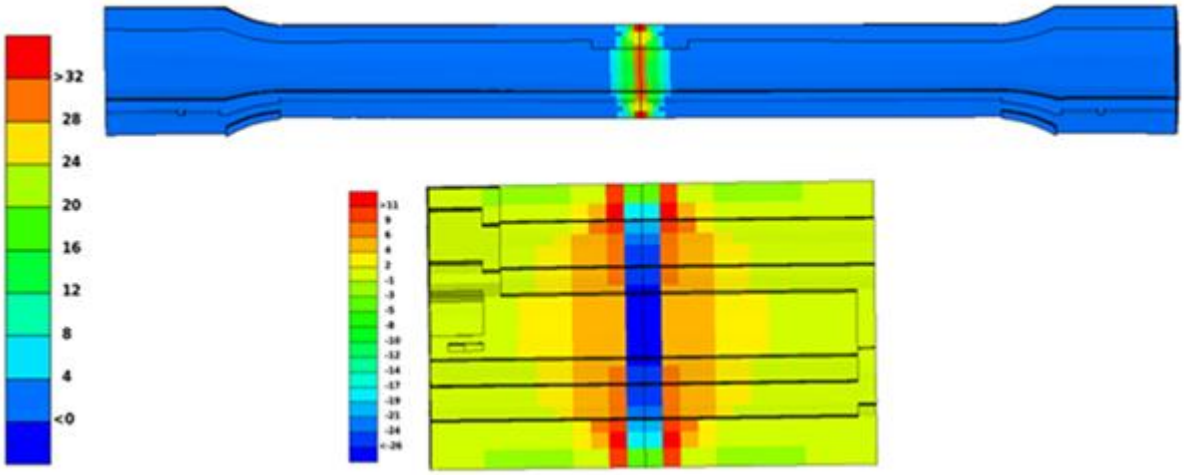



*Abbildung 49: Initialisierte Eigenspannungen ohne Zuglast, Spannungsumlagerung auf ca. 32 MPa von-Mises-Spannungen, entsprechend einer statischen Mittelspannungsverteilung von 11 MPa bis -26 MPa, Darstellung auf den Elementen (unten vergrößert)*

Die Relaxation der Eigenspannungen um 18 MPa von-Mises-Spannungen kann auch festgestellt werden, wenn die Zugprobe einem statischen Zug ausgesetzt ist. Ein quasistatischer Eigenspannungsabbau bei einem linear elastischen Werkstoffverhalten von Edelstahl wird auch bei Hoffmeister [7] beschrieben und modelliert.

Eigenspannungsrelaxation bei zyklischer Last (Dauerfestigkeitsberechnung mit FEMFAT).

Die Relaxation der Eigenspannungen aufgrund der zyklischen Last bei der Dauerfestigkeitsberechnung wurde sowohl beim Demonstrator als auch bei der akademischen Zugprobe untersucht. Wesentlich ist dabei, die Mittelspannungen auf den kritischen Elementen auszuwerten und nicht auf den kritischen Knoten. Grundsätzlich wird der Spannungswert an jedem Knoten aus dem am Integrationspunkt des Elements berechneten Spannungswert mittels Interpolationsfunktionen extrapoliert und anschließend mit den extrapolierten Werten der benachbarten Elemente an diesem Knoten gemittelt. D.h. der Wert im Knoten wird wesentlich durch die Nachbarelemente bestimmt, welche u.U. nicht mit Eigenspannungen initialisiert wurden.

Verglichen wird die Mittelspannung $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx}+\sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ für das kritische Element nach der zyklischen Belastung mit 2 Mio. Zyklen mit der Mittelspannung vor der zyklischen Belastung, als nur die statische Last wirkte. Initialisierte Eigenspannungen von ca. -220 MPa auf der Oberfläche aufgrund des Sandstrahlens, die von der Lastspannung überlagert werden, reduzieren sich durch die zyklische Belastung in der Zugzone des Bauteils um über 100 bis 200 MPa, in der Druckzone um 8 bis 30 MPa (Abbildung 50).

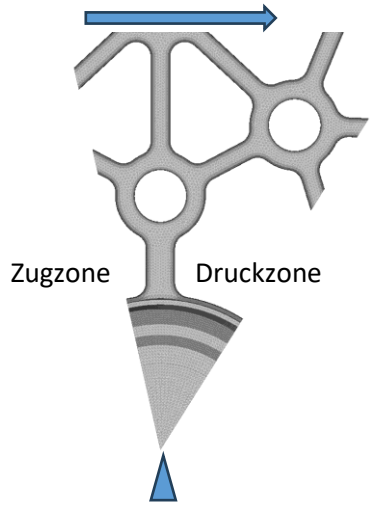



*Abbildung 50: Zug- und Druckzone am Demonstrator-Bauteil Bürstenkopf*

Die Relaxation der Eigenspannungen aufgrund der zyklischen Last um bis zu 2/3 kann auch für die Elemente der Zugprobe bestätigt werden.

Bei einer Dauerfestigkeitsberechnung der eigenspannungsinitialisierten Zugprobe ergibt sich eine erhöhte Mittelspannungen durch die Initialisierung (Abbildung 51 und Abbildung 52).

[7] Hoffmeister J.; Beschreibung des Eigenspannungsabbaus in kugelgestrahltem Inconel 718 bei thermischer, quasistatischer und zyklischer Beanspruchung; Dissertation, Institut für Werkstoffkunde I, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH) (heute KIT) 2009

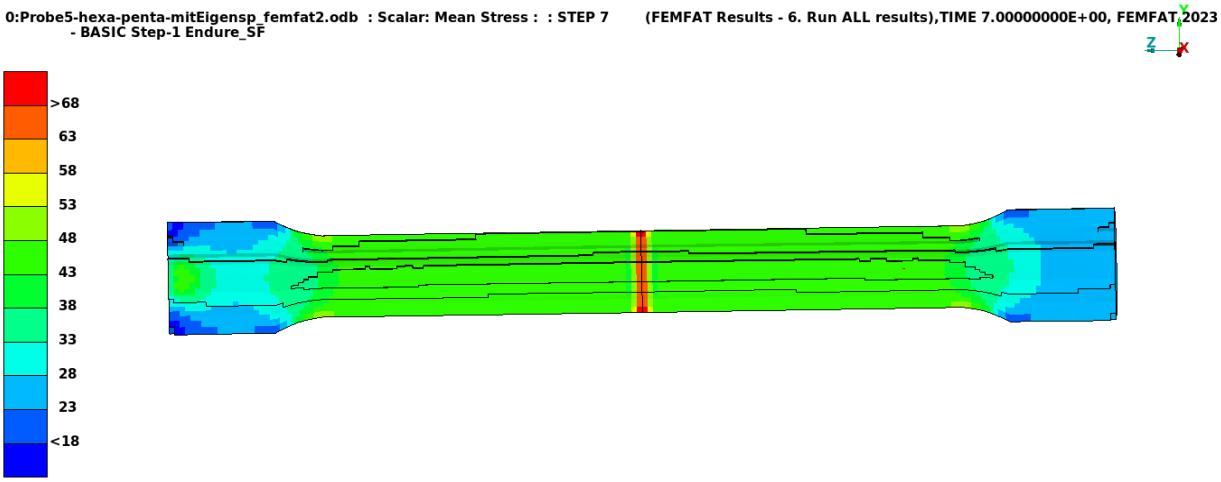



*Abbildung 51: Mittelspannungen [MPa] bei Dauerfestigkeitsberechnung, Darstellung auf den Elementen*

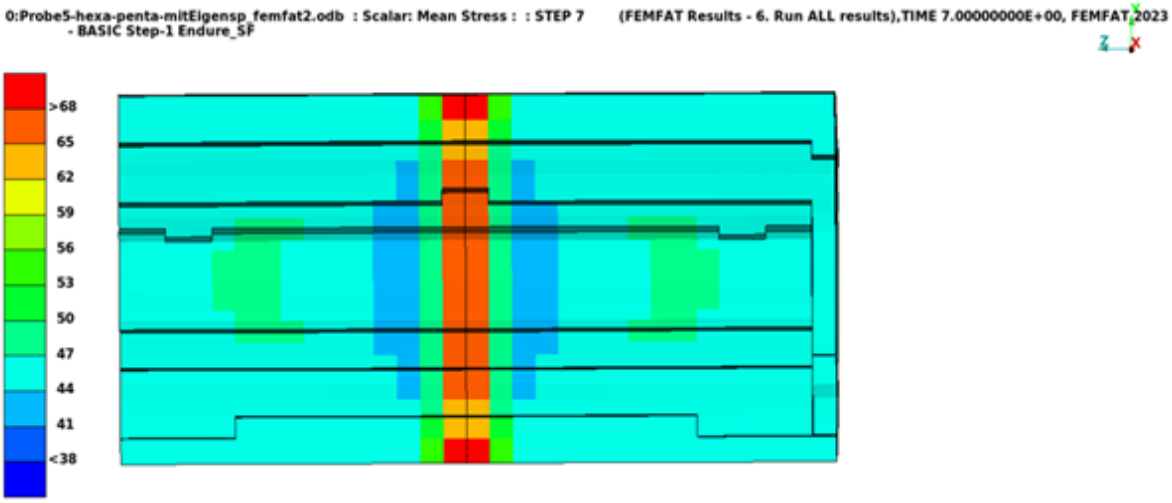



*Abbildung 52: Mittelspannungen [MPa] bei Dauerfestigkeitsberechnung von 40 bis 68 MPa, Darstellung auf den Elementen, Zoom und angepasste Werteskala auf die Eigenspannungsregion*

Wenn bei statischem Zug die Eigenspannung um 18 MPa relaxiert sind, können sich nur noch die verbliebenen 32 MPa v. Mises Eigenspannungen bzw. die statische Mittelspannungsverteilung von 11 bis -26 MPa zu den Dauerfestigkeits-Mittelspannungen addieren.

Ohne Eigenspannungen zeigt die Zugprobe eine gleichmäßige Mittelspannung von 46 MPa in der Mitte der Probe, also ca. 22 MPa weniger (Abbildung 53).

*Abbildung 53: Spannungsverlauf der Zugprobe ohne Eigenspannungen*

Die statische Mittelspannungsverteilung zeigt Werte im Druckbereich bis -26 MPa, so dass es von der Größenordnung stimmt. Aber die Verteilungen zeigen, dass sich die statische Mittelspannungsverteilung nach statischer Spannungsumlagerung nicht mit der zyklischen Mittelspannung einfach linear superponiert. Es müssen in der zyklischen Belastung auch Spannungsumlagerungen stattfinden. Werden die Elemenzonen grob in 40 MPa | 68 MPa | 40 MPa eingeteilt und mit 11 MPa | -26 MPa | 11 MPa suponiert, so ergeben sich die Zonen 51 MPa | 40 MPa | 51 MPa. Bei einer Spannungsumlagerung könnten sich einheitlich 46 MPa ergeben.

Die Spannungsamplitude der Dauerfestigkeitsrechnung (Abbildung 54) ist mit und ohne Eigenspannungsinitialisierung identisch, d.h. die initialen Eigenspannungen beeinflußen die Spannungsamplitude bei der Dauerfestigkeit nicht, aber heben zumindest lokal am Ort der Eigenspannungen das gesamte Spannungsniveau an, da sie die Mittelspannung erhöhen.

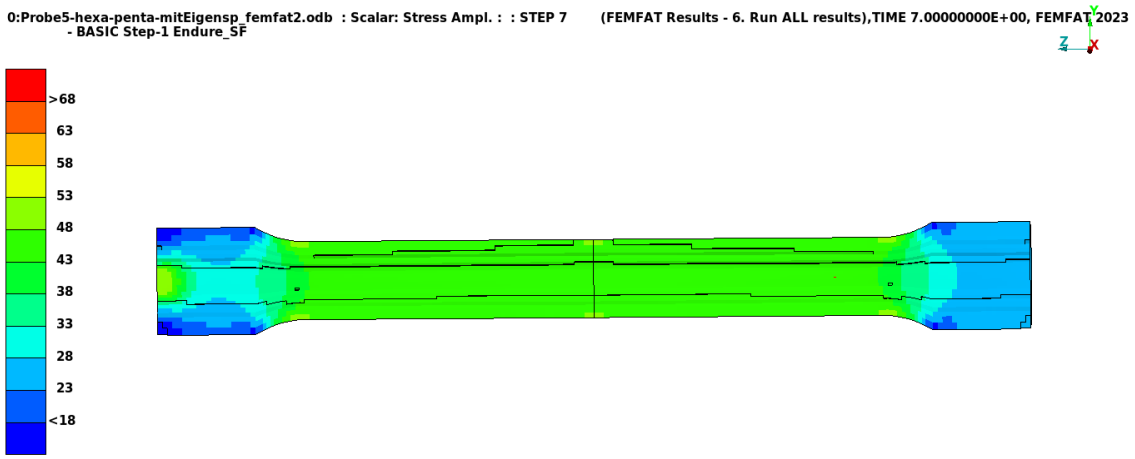



*Abbildung 54: Spannungsamplitude [MPa] bei Dauerfestigkeitsberechnung, Darstellung auf den Elementen*

An diesem Modell kann auch der Einfluss einer möglichen Wärmenachbehandlung gezeigt werden. Hierzu wird das Modell mit Eigenspannung auf 700°C erhitzt, danach für verschiedene physikalische Zeiten gehalten (1/2 Stunde, 1 Stunde, 2 Stunden). Hierbei wird die Steifigkeit

des Materials ergänzt durch Temperatur- und zeitabhängige Kriechgesetze, welche auf dem Norton-Gesetz basieren[8]. Anschließend wird ein Abkühlungsvorgang berechnet.

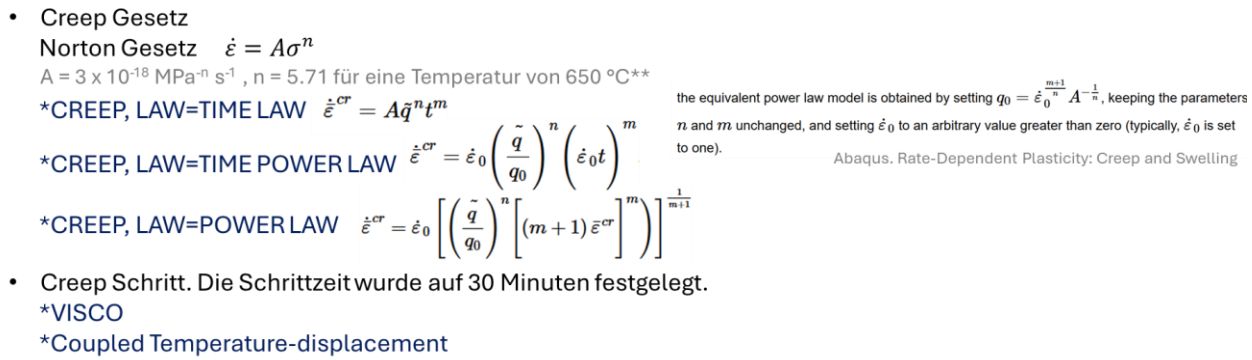



*Abbildung 55: Auf dem Norton-Gesetz aufbauende Kriechgesetze, die in ABAQUS verwendet werden*

Das Norton-Gesetz kann alternativ zum Avrami-Zener-Wert Ansatz, der im Forschungsantrag vorgeschlagen wurde, implementiert werden. Weder in der Literatur noch beim Verbundforschungspartner KIT konnten die materialabhängigen Parameter für S316L für den Avrami-Zener-Wert Ansatz gefunden werden. Oft wird in Arbeiten mit dem Avrami-Zener-Wert der gleiche materialbezogene Parametersatz verwendet, dieser gilt für eine bestimmte Aluminiumlegierung[9]. Für das Norton-Gesetz hingegen konnten die entsprechenden Parameter für S316L in der Literatur gefunden werden. Beides sind Kriechgesetze, die mit empirischen Parametern an materialbezogene Messungen angepasst werden. Das Norton-Gesetz betrachtet die Dehnungsänderung in Abhängigkeit der lokalen Spannungen, es ist ein eher „mechanisches“ Modell. Der Avrami-Zener-Wert Ansatz hat einen Arrhenius-Term mit einer Relaxationsenthalpie und einen materialspezifischen Strukturterm. Ein Arrhenius-Term beschreibt einen temperaturabhängigen Prozess, bei dem eine gewisse Aktivierungsenergie überwunden werden muss. Er ähnelt einem thermischen Diffusionsmodell, aber der Ansatz mit dem Boltzmann-Faktor beschreibt sehr viele Zustandsänderungen in der Natur. Beide Ansätze sind anerkannt.

### II.1.9 Virtuelle Validierung durch Vergleich der erhaltenen Ergebnisse der statischen Analysen mit und ohne Eigenspannungen

Im Verlauf des Projekts hat sich das direkte Übertragen von Eigenspannungstiefenprofilen als ein gangbarer Weg herausgestellt. Eine Korrelation zwischen lokaler Geometrie und Eigenspannungstiefenverlauf war jedoch nicht deutlich nachweisbar. Daher wurde der Aufbau der Eigenspannungsdatenbank und die Zuweisung aus der Eigenspannungsdatenbank nicht weiter vertieft und die Validierungsaufgabe hat sich auf die Korrelation des Eigenspannungstiefenprofils mit der Aufbaurichtung verlagert (vergleiche Abbildung 27). Die Aufbaurichtung wird bezüglich des globalen Koordinatensystems definiert und wird z.B. bei einem transversal isotropen Werkstoff dem Material als Orientierung mitgegeben. Die Abhängigkeit von der Aufbaurichtung wurde in einem Zuweisungsskript implementiert, mit dem

[8] Williams et al. (2020); Effects of heat treatment on residual stresses in the laser powder bed fusion of 316L stainless steel: Finite element predictions and neutron diffraction measurements; Journal of Manufacturing Processes 57, pp. 641-653 https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.023

[9] Ko D.-H. et al. (2013); Prediction and measurement of relieved residual stress by cryogenic heat treatment for Al6061 alloy: mechanical properties and microstructure; Journal of Mechanical Science and Technology 27, pp. 1949-1955

den Randelementen in Relation zur Normalen auf die Oberflächenelemente ein winkelabhängiges Eigenspannnungstiefenprofil zugewiesen werden kann.

Zur statischen Validierung wurde das Bauteil am IAM-WK in einem Torsionslastfall geprüft. Hierbei wurden die äußeren Ösen des Bürstenkopfs über Zapfen gelagert und die Torsion wurde durch die Beaufschlagung mit einem Drehmoment mit Stiften in die Ösen eingebracht. (vergleiche Abbildung 56). Gemessen wurden lokale Dehnungen. Vom Projektpartner PMT wurden mehrere Bauteile gefertigt und an das IAM-WK geschickt.

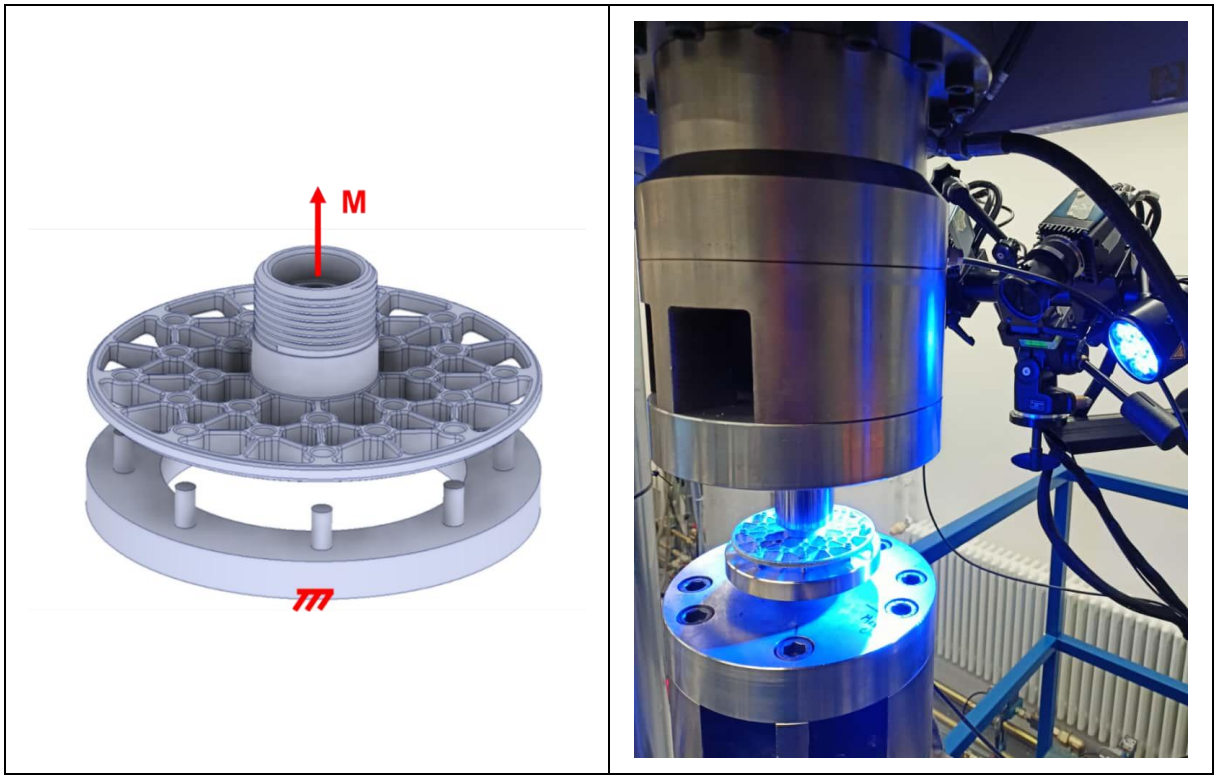



*Abbildung 56: Statischer Torsionslastfall (links: Modell, rechts: Prüfstand des IAM-WK) (Quelle: CAEaddFert Projektbesprechung IAM-WK)*

Die optische Messung der Dehnungen erfolgte durch Differential-Interferenzkontrast-Mikroskopie (DIC) auf der Oberfläche des intransparenten Bauteils. Die Lagerung erfolgte durch Aufschrauben des Bauteils auf die Achse. Hierbei wurden 200 Nm als Referenzlastfall gewählt, erst bei 200 Nm saß die Verschraubung komplett fest. Bezüglich dieser Referenz wurde das Drehmoment weiter erhöht und gemessen wurden dann die drei logarithmischen Hauptdehnungen und die von-Mises-Äquivalenzdehnung. Hierbei sei daran erinnert, dass das optische System im intransparenten Bauteil nicht normal zur Oberfläche in die Tiefe messen kann. Daher fallen die drei gemessenen logarithmischen Hauptdehnungen nicht mit der Auswertung der logarithmischen Hauptdehnungen in der Simulation zusammen, die an manchen Stellen auch normal zur Oberfläche steht. Aus diesem Grund wurden nur die Hauptspannungen verglichen, die sinnvoll verglichen werden können. Im Zugspannungsbereich ergab sich eine Abweichung von ca. 12% für die erste Hauptspannung, im Druckspannungsbereich betrug die Abweichung ca. 14 % für die dritte Hauptspannung (Abbildung 57). Dies deutet darauf hin, dass die in den interessierenden Bereichen berechneten Hauptspannungen eine recht gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen zeigen.

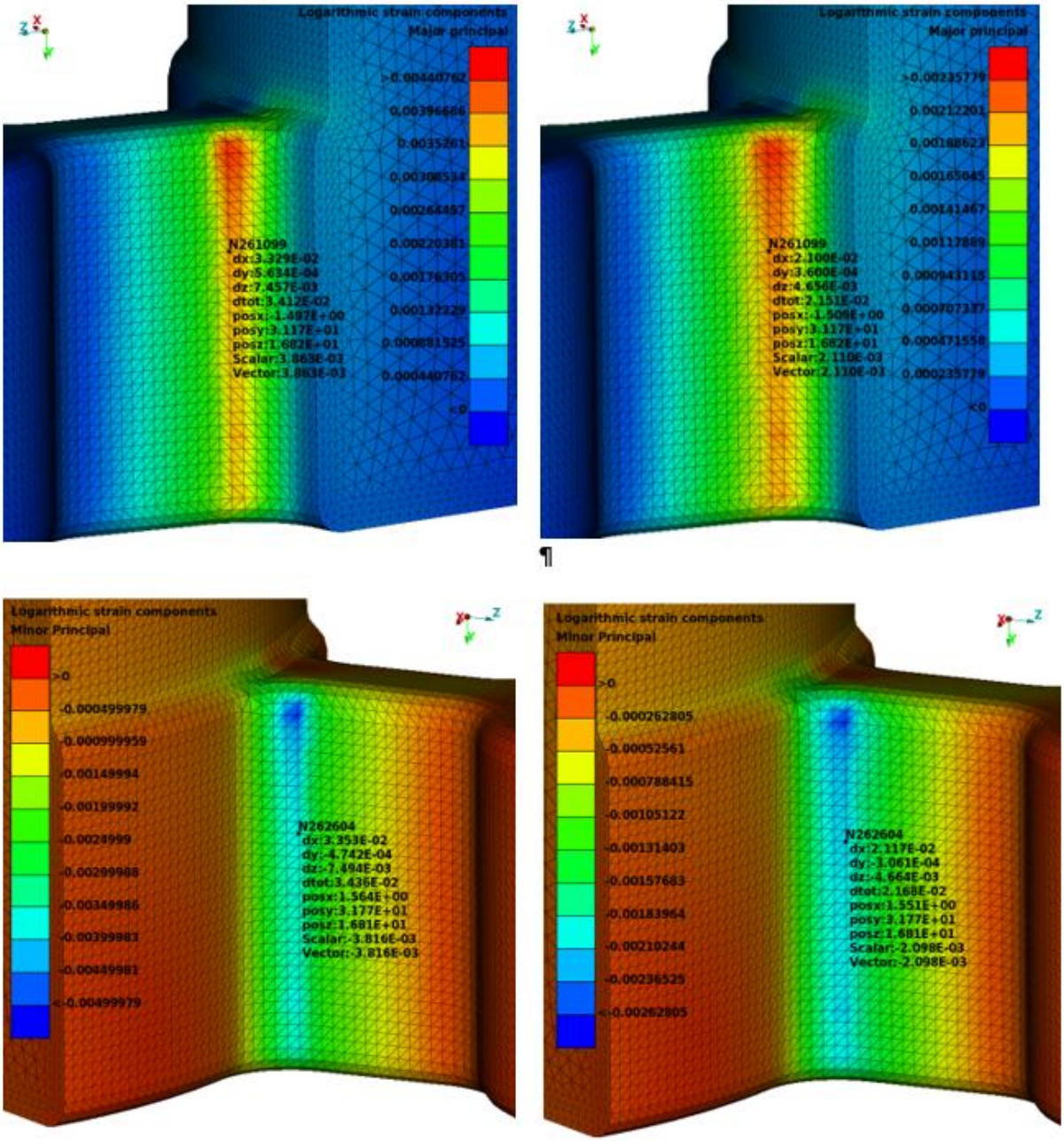



*Abbildung 57: Große und kleine logarithmische Hauptdehnungen an den relevanten Stellen (jeweils zug- und druckseitig)*

Unsicherheiten können aus der optischen Messtechnik herrühren oder aus der Lagerung oben in der Achse. Eine geringfügige Asymmetrie kann aufgrund der Hebelwirkung einen großen Einfluss auf die lokalen Dehnungen haben. Es ist auch schwierig, genau die richtigen Punkte miteinander zu vergleichen.

Abbildung 58 zeigt eine Abbildung der DIC-Auswertung. Zu erkennen sind die Zapfen in den Ösen, die kritischen Stellen mit maximaler Dehnung liegen wie erwartet an den achsnahen Schenkeln.

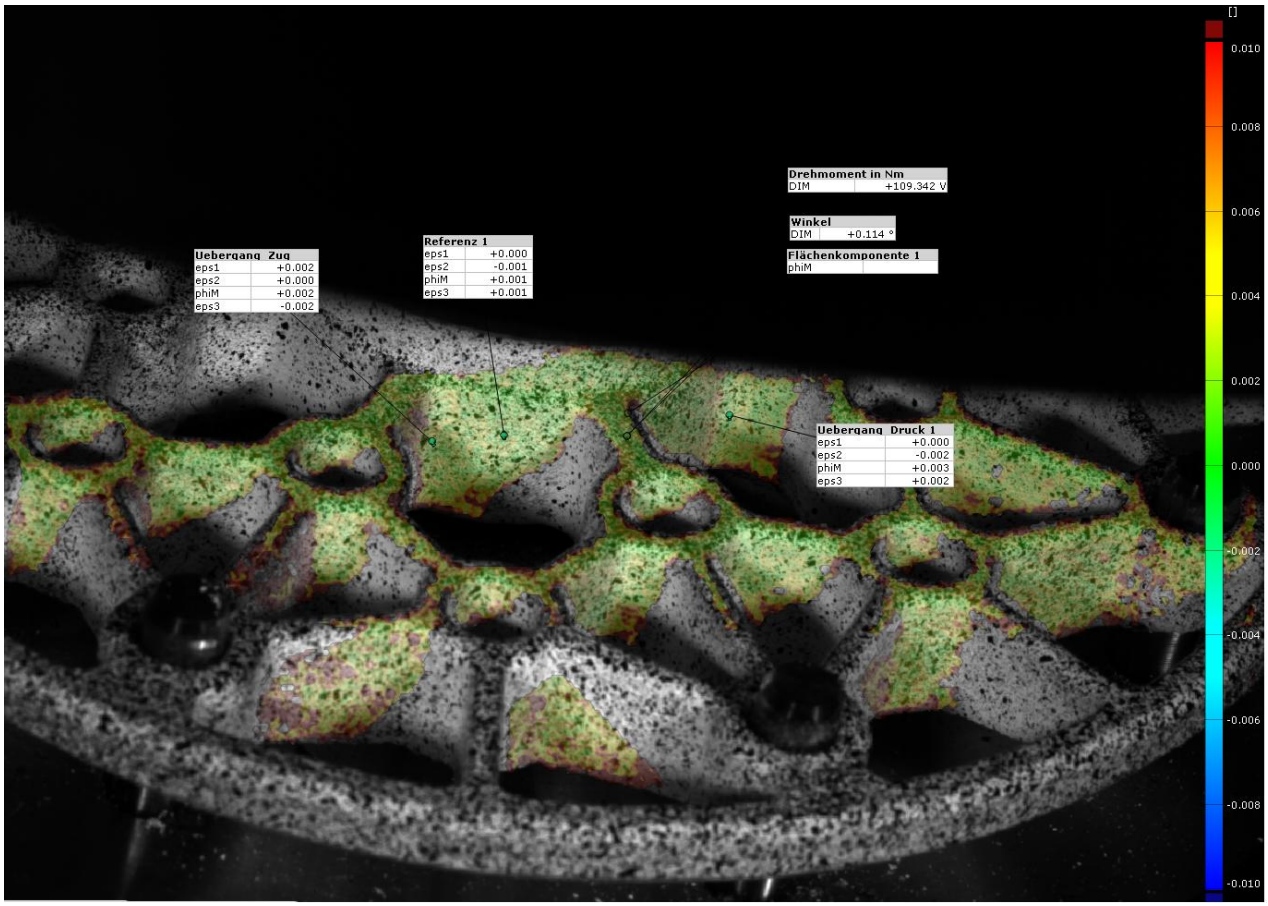



*Abbildung 58: DIC Auswertung beim Lastfall 109 Nm (bezgl. Referenz 200 Nm). Die Farbscala beschreibt die äquivalente Dehnung (bzw. Stauchung).*

In der Simulation wurde die Plastifizierung von Stahl S316L mit etablierten Materialwerten aus der Literatur und aus bestehenden Datenbanken berücksichtigt. Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten war erst dann zufriedenstellend, wenn das E-Modul in der Simulation von ursprünglich mit Ultraschall gemessenen 175.000 MPa auf 160.000 MPa reduziert wurde. Die E-Modul-Messung fand mit Ultraschall am Probekörper am IAM-WK statt. Nach Auskunft der Kollegen des IAM-WK ist diese Ultraschall Messung durchaus mit einer Unsicherheit behaftet aufgrund einer möglichen Dichteverteilung, und eine Abweichung des E-Moduls um 10.000 MPa sei begründbar. Die Ultraschallmessung misst das dynamische E-Modul, das geringfügig über dem von der Simulation benötigten statischen E-Modul liegt. Ferner könnte es geringe Unterschiede geben zwischen Materialparametern der vermessenen Referenzprobe und dem lokalen Zustand des Demonstratorbauteils. Fehler durch die vielleicht nicht exakt vertikale Ausrichtung im Experiment aufgrund der Lagerung könnten auch einen Einfluss haben.

Eigenspannungen wurden hier nicht in der Simulation berücksichtigt, da sowohl in der Messung als auch bei der Simulation zwischen zwei mit Lastspannung beaufschlagten Betriebspunkten verglichen wurde. Insofern stellt das Messverfahren eine Differenzenmessung dar.

Für eine Validierung der implementierten Methoden des virtuellen Prüfstands hätten statische und zyklische Lastfälle an den Prüfkörpern verglichen werden müssen. Der Vergleich mit der statischen Torsionslast am Demonstrator ist zufriedenstellend ausgefallen. Zyklische Versuche waren nicht vorgesehen.

Kern des Verfahrens ist die Übertragung von Messergebnissen am Prüfkörper auf das Bauteil bei gleichen Fertigungsparametern. Ob dies für die sich im jeweiligen Körper ausbildenden Eigenspannungen zulässig ist, kann diskutiert werden. Gerade weil im Projekt keine Korrelation mit der lokalen Geometrie gefunden werden konnte, erscheint diese Übertragung zulässig. Im Allgemeinen ist es üblich, an Prüfkörpern gemessene Materialeigenschaften auf das Bauteil zu übertragen. Bei Zugversuchen zur Bestimmung der plastischen Dehnung mit einer spezifischen Zugprobe müssen die Werte erst auf „wahre“ Werte umgerechnet werden, um allgemeingültige Materialwerte zu erhalten. Die Eigenspannungen entstehen jedoch lokal und sind durch lokale Zustände bestimmt, die globale Geometrie spielt wahrscheinlich keine Rolle.

### II.1.10 Virtuelle Validierung durch Vergleich der erhaltenen Ergebnisse der Festigkeitsanalyse

Die Schwell- und Wechselfestigkeiten für Zug, Druck und Schub sowie die Biegefestigkeiten wurden aus der Literatur abgeleitet und mit den Werten aus dem FEMFAT-Materialgenerator verglichen. Stahl 316 L ist an sich ein bekannter Werkstoff, dennoch wurden die elastischen Materialparameter für gedruckte Proben (d.h. isotrop und transversal isotrop) von IAM-WK bestimmt. Mit diesen elastischen Materialparametern fand FEMFAT in seiner Materialfamilie die dazugehörenden zyklischen Festigkeiten. TECOSIM hat auch Rechnungen mit verschiedener Güte durchgeführt.

Abbildung 59 zeigt die Wöhlerkurve von additiv gefertigten Proben (selective laser melting, entsprechend dem vorliegenden Verfahren) aus Stahl 316 L bei unterschiedlicher Behandlung[10]. Von Hand eingezeichnet ist die lokale Wöhlerlinie am kritischen Knoten (hellblau) und die Materialwöhlerlinie (dunkelblau) aus dem FEMFAT-Berechnungsdiagramm Abbildung 45. Die reine Materialwöhlerlinie ist eher theoretisch, die gefertigten Proben sind zumeist irgendwie behandelt, so dass Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen, und werden daher besser von der lokalen FEMFAT-Wöhlerlinie getroffen. Die berechneten Wöhlerlinien passen gut zu den Literaturwerten. Abbildung 59 zeigt auch, dass – evtl. mit Ausnahme der polierten Probe - keine Dauerfestigkeit erreicht werden kann, wie es auch die lokale Wöhlerlinie im FEMFAT-Diagramm zeigt.

Die Dauerfestigkeitsanalyse aus CAEaddFert wird daher mit den experimentellen Werten aus der Literatur bestätigt. Die konkrete Bauteilwöhlerkurve zeigt die zulässige Spannungsamplitude von 293 MPa bei einer Ecklastspielzahl von 924000, welches in die Werteschar von Abbildung 59 passt. Üblicherweise wird auch bei Stahl eine Zyklenanzahl von 2 Mio. gerechnet.

[10] Zeng F., Yang Y. und Qian G.; Fatique properties and S-N curve estimating of 316L stainless steel prepared by SLM; International Journal of Fatigue 162, 2022, 106946

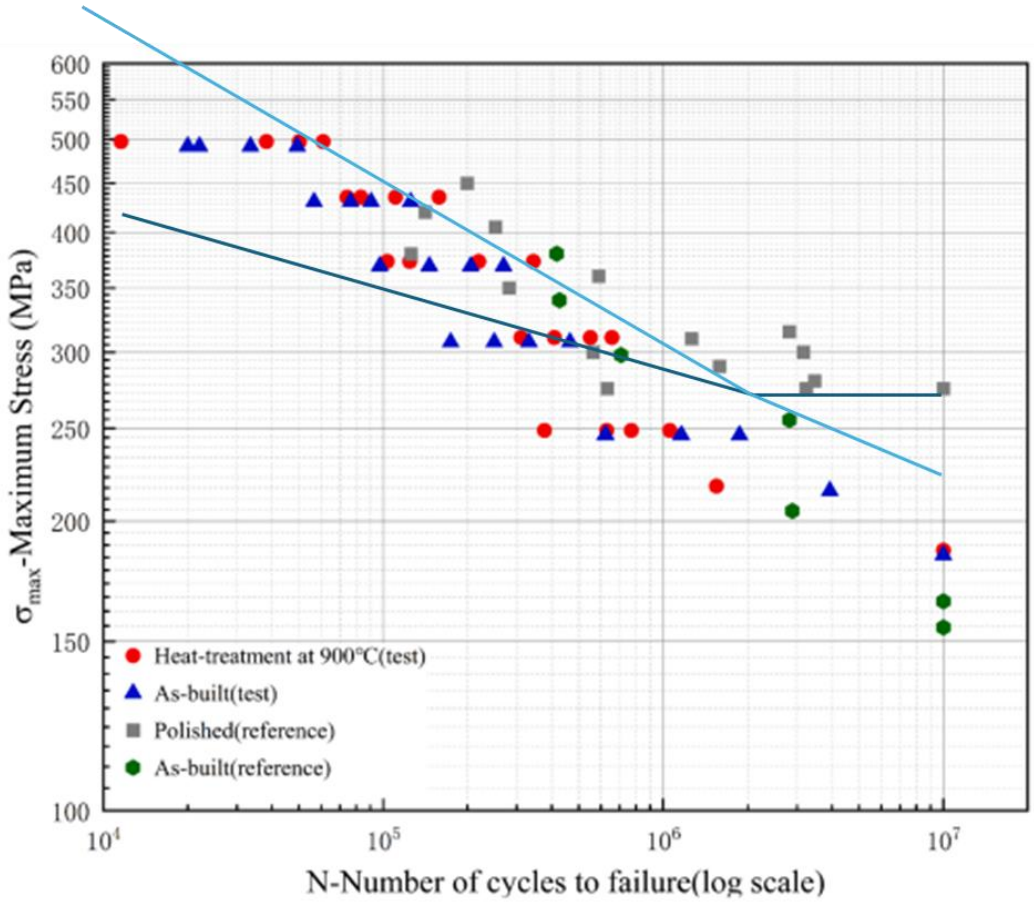



*Abbildung 59: Experimentelle Werte der Wöhlerkurve von unterschiedlich bearbeiteten Proben aus Stahl 316 L (SLM gefertigt) (Quelle siehe Fußnote 1). Zum Vergleich wurden die lokale Wöhlerkurve am kritischen Punkt (hellblau) und die Materialwöhlerkurve (dunkelblau) aus Abbildung 45 eingetragen.*

### II.1.11 Integration von Eigenspannungen in eine Topologieoptimierung (Aufgabe des KIT–IPEK)

Ursprünglich war geplant, dass das IPEK den Demonstrator durch Topologieoptimierung unter Berücksichtigung des Eigenspannungs-Mappings optimiert, um dann dieses optimierte Bauteil zu drucken, zu berechnen und zu testen. Die Topologieoptimierung hat sich unter Berücksichtigung des Eigenspannungs-Mappings als komplizierter als gedacht herausgestellt und hat bei dem Demonstrator zu keinen plausiblen Ergebnissen geführt. Kern des Problems war, dass in der Optimierung manche Zellen nicht mehr mit 1 gewichtet werden, sondern kleiner 1, d.h. dort sollte Material eingespart und das Bauteil abgespeckt werden. Damit wurden die dort aufgebrachten Eigenspannungen falsch bewertet. Genaueres ist im Abschlussbericht des IPEK beschrieben.

Oft geht dem ersten Entwurf eines im 3D-Druck zu fertigenden Bauteils eine Topologieoptimierung voran. Dieser erste Entwurf kann jetzt auch im virtuellen Prüfstand untersucht werden, z.B. wie sich das Bauteil verhält, wenn Eigenspannungen vorliegen. Wird diese Prüfung nicht bestanden, können bei der ersten Topologieoptimierung Randbedingungen geändert werden, indem das Bauteil z.B. überall eine gewisse Mindeststärke (Holmdicke etc.) nicht unterschreiten darf.

### II.1.12 Kosten/Nutzen-Betrachtung hinsichtlich Nachbehandlung

Auf Basis der Simulationsergebnisse und der Auswertung von Validierungsergebnissen sollte eine Bewertung der Notwendigkeit einer Nachbehandlung abgeleitet werden. Mit den Projektpartnern wurden im Wesentlichen die folgenden Punkte für Handlungsempfehlungen erörtert:

a) Die technischen Möglichkeiten der Eigenspannungsrelaxation bei Edelstahl (vor allem S316L) durch Wärmenachbehandlung wurden diskutiert, wobei insbesondere der Einfluss der Wärmenachbehandlung auf die Materialgüte für die verschiedenen Stahlsorten angesprochen wurde. Wesentlich ist, dass die Eigenspannungsrelaxation vor dem Sandstahlen erfolgt, da die Druckeigenspannungen in der äußersten Randschicht vorteilhaft sind.
b) Technische Möglichkeiten zur Gefügeänderung durch Wärmenachbehandlung mit dem Ziel isotropen Werkstoffverhaltens bei Aluminium und Stahl wurden diskutiert
c) Technische Möglichkeiten von heiß-isostatischem Pressen (HIP) von Aluminium wurden diskutiert, wobei HIP für Aluminium aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes noch nicht kommerziell etabliert zu sein scheint.
d) Die eingebrachten CAE-Methoden wurden erläutert, um Eigenspannungen, Anisotropie und Inhomogenität zu berücksichtigen. Die Resultate der Berechnungen wurden diskutiert.

Für die Wärmenachbehandlung, das Sandstrahlen und das heiß-isostatische Pressen wurden auf Basis umfassender Recherchen beispielhaft Prozessdiagramme und Kostendiagramme der Verfahren entworfen. Diese können für eine qualitative Kostenabschätzung herangezogen werden und zeigen die kritischen Stellgrößen, welche die Kosten maßgeblich bestimmen können, wie z.B. Anzahl der Chargen. Zur genauen Ermittlung der Kosten müssen Angebote eingeholt werden.

Die Abschätzung des Aufwands für CAE findet mit Erfahrungswerten statt. Mehraufwand beim Modellaufbau kommt durch die besonders feine Vernetzung der mit Eigenspannungen beaufschlagten Randschicht zustande. Da in der Praxis oft nur wenig oder keine Messwerte zu Anisotropie, Inhomogenität und Eigenspannungen vorliegen, werden mehrere Simulationsläufe mit Best- und Worst-Case-Szenarien notwendig sein, um ein Bauteil abzusichern. Die abschließende Dauerfestigkeitsberechnung könnte sich dann auf das Worst-Case-Szenario beschränken. Die CAE gestützte Auslegung hat den Vorteil, dass sie nur einmal in der Produktentwicklung erfolgt. Mehrkosten aufgrund der Anzahl der gleichen Bauteile entstehen nicht.

Auch das nachbehandelte Bauteil, das dann zugeigenspannungsfrei, isotrop und homogen wäre, würde mit CAE ausgelegt oder zumindest abgesichert. Diese Auslegung wäre weniger aufwendig und müsste keine Best-Case- / Worst-Case-Szenarien abfangen. Ein Druckeigenspannungstiefenprofil nach dem Sandstrahlen müsste immer initialisiert werden.

In der Bilanz ergibt sich, dass die CAE-gestützte Auslegung „as printed“ empfohlen wird, es sei denn, dass die Auslegung ergibt, dass der „as-printed“-Zustand nicht tolerierbar ist.

Für Handlungsempfehlungen zur Kosten-/Nutzen-Betrachtung hinsichtlich einer Nachbehandlung SLM-gefertigter Bauteile hat TECOSIM einen Bericht zur beispielhaften Berechnung von Nachbehandlungen (spannungsarm Glühen bzw. warm Auslagern zur Gefügeänderung, Sandstrahlen und heiß-isostatisches Pressen) verfasst. Im Prinzip setzen sich die Kosten wie in Abbildung 60 aufgegliedert zusammen.

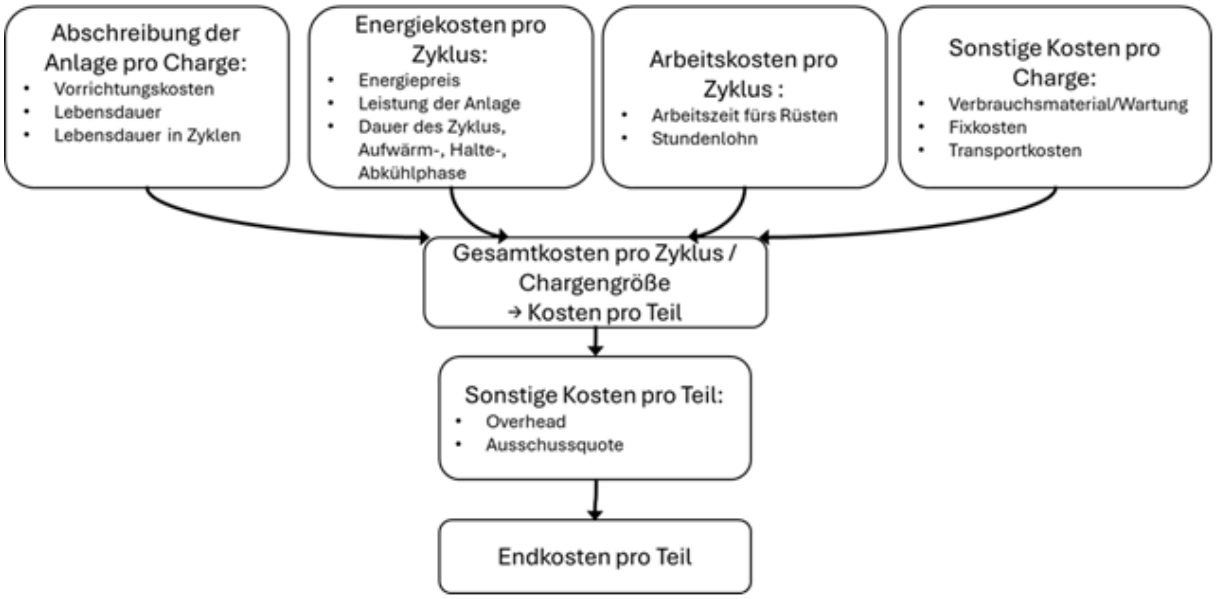



*Abbildung 60: Kostenbetrachtung des Nachbehandlungsverfahrens Spannungsarmglühen pro Charge*

### II.1.13 Fazit

Als wichtiges Ergebnis ist im Projekt CAEaddFert ein validierter Demonstrator des virtuellen Prüfstands für additiv zu fertigende Bauteile entstanden, der im Anschluss von TECOSIM in den CAE-gestützten Produktentwicklungsprozess integriert werden kann. Kern des virtuellen Prüfstandes ist die Berücksichtigung des Eigenspannungstiefenprofils. Bisher war die verfahrenstechnische Simulation additiver Fertigung kein Bestandteil der CAE-gestützten Prozesskette der Produktentwicklung. Der virtuelle Prüfstand ist universell und unabhängig von der Geometrie einsetzbar. Selbst bei der Verwendung von anderen SLM-metallischen Werkstoffen können jetzt plausible und realistische Abschätzungen getroffen werden. Davor fehlten die Erfahrung, das Vorstellungsvermögen und der CAE-Prozess, um getroffene Abschätzungen zu prüfen und zu bewerten. Damit kann ein enormes Leichtbaupotential erschlossen werden, verbunden mit der entsprechenden $CO_2$-Minderung in der Produktion und Anwendung der Produkte.

Für das Demonstrator-Bauteil Bürstenkopf konnte unter den vielen Entwürfen ein Design identifiziert werden, welches alle Ziele sehr gut erfüllt und unter Beibehaltung der technischen Anforderungen und der Funktionalität leichter, materialsparender und stabiler ausfällt. Dieses Design wurde auch durch Topologieoptimierung (Ösenzuglastfall) bestätigt, abgesehen von den „Andreaskreuz“-Lösungen, die für das anschließende Sandstrahlen eher ungünstig sind. Ursprünglich war geplant, diese Geometrie durch Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der Eigenspannungen noch weiter zu optimieren (Aufgabe von IPEK-KIT). Diese Optimierung hat jedoch nur bei einem akademischen Tragarm plausible Ergebnisse erbracht, aber nicht beim Demonstrator. Daher wurde das vorliegende Design final produziert und im Torsionslastfall am IAM-WK getestet.

Das Ziel der Erkundung eines methodischen Vorgehens, das im Projekt mit TRL 6 „Prototyp in Einsatzumgebung“ abschließt, wurde erreicht. Vom Projektpartner PMT wurden sämtliche Proben und die Demonstratoren (auch für den Torsionstest) gefertigt. Die entsprechende Messtechnik und die FE-Modellierung sind standardisiert verfügbar.

TECOSIM konnte wichtige Erfahrungen zu den SLM-Materialien Aluminium und Edelstahl sammeln. Mit Materialersatzmodellen können sie jetzt einschließlich der Einflüsse von Anisotropie und Inhomogenität modelliert werden. Im Projekt wurde der Einfluss von Eigenspannungen auf die statische Festigkeit und Dauerfestigkeit an einem praktischen Anwendungsfall untersucht, während diese Spannungen in der Praxis bei der Auslegung von Bauteilen oft vernachlässigt werden. Für TECOSIM gelang erstmalig eine plausible Modellierung der Eigenspannungsrelaxation durch Wärmenachbehandlung. Der ursprünglich geplante Avrami-Zener-Wert Ansatz, der in der Literatur mehrfach beschrieben wird - aber nur für eine Aluminiumlegierung, konnte dabei nicht verfolgt werden, da keine Hinweise zur Parametrisierung für Stahl gefunden wurden. Stattdessen wurde das Norton-Gesetz im Kriechfall implementiert.

Einige Projektziele wurden im Projektverlauf angepasst. Die Ähnlichkeitserkennung zur Ermittlung von Eigenspannungen und deren Aufprägung auf FE-Modelle wurde nicht weiterverfolgt. Stattdessen werden Eigenspannungstiefenprofile ermittelt und in Abhängigkeit der Aufbaurichtung auf die Lagen des 3D-gedruckten Bauteils als Information in ein Zuweisungsskript eingebracht. Das entstandene Skript zur Übertragung von Eigenspannungstiefenprofilen auf sämtliche Bereiche eines beliebigen Bauteils ist sehr praktisch und wertvoll. Die Initialisierung von Eigenspannungen lässt sich sonst nur händisch durchführen oder erfordert ein zweites Modell mit ausgeprägten Spannungen, die dann auf das Lastfallmodell übertragen werden können. Bei komplizierterer Eigenspannungsverteilung ist die händische Initialisierung praktisch nicht durchführbar, und ein zweites Modell mit ausgeprägten Spannungen ist nur im allerseltensten Fall vorhanden.

Wenn TECOSIM in Zukunft 3D-gedruckte Bauteile mit anderen, noch unbekannten Materialien mit dem virtuellen Prüfstand analysiert, werden Messungen an akademischen Probekörpern benötigt, die genau wie die Bauteile gefertigt wurden, und die Aufbaurichtung muss bekannt sein. Liegen keine gemessenen Eigenspannungstiefenprofile vor, kann in der Simulation der Einfluss möglicher Eigenspannungstiefenprofile geprüft und eine Ergebnistoleranz dargestellt werden.

## II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Verwendungsnachweis des Teilvorhabens der TECOSIM GmbH beinhaltet die Positionen Personalkosten, die für die Entwicklung der Modelle und Simulationsverfahren angefallen sind, Reisekosten für Besprechungen sowie sonstige Kosten zur Nutzung verschiedener CAE-Software-Tools.

Abweichungen von der Gesamtvorkalkulation traten insofern auf, als dass etwas mehr Personalkosten und sonstige Kosten und etwas weniger Reisekosten angefallen sind, als ursprünglich geplant.

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit ergab sich aus der Arbeitsplanung. Die geleistete Arbeit war zum Erreichen der Ergebnisse notwendig.

## II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch den virtuellen Prüfstand zur Beurteilung additiv gefertigter Bauteile hinsichtlich deren mechanischer Eigenschaften als Einzelteil sowie im Verbund mit deren Baugruppe wird die einzigartige Möglichkeit geboten, bereits vor der Fertigung erster Prototypen und physischer Tests die additiv gefertigten Bauteile innerhalb eines virtuellen Systems auf dessen mechanisches Verhalten sowie Wechselwirkungen in der Baugruppe zu bewerten und daraus Empfehlungen hinsichtlich einer Verbesserung des mechanischen Verhaltens durch beispielsweise eine Nachbehandlung abzuleiten. Dies reduziert den Zeit- und Kostenaufwand, gerade auch für sicherheitsrelevante Bauteile, die bisher für jedes Einzelstück eine separate Nachbehandlung (z. B. spannungsarm glühen, HIP, polieren etc.) erfordern, was den für die Herstellung eigentlich prädestinierten 3D-Druck oft unrentabel macht.

## II.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Fortschritte durch Dritte in Deutschland oder Europa sind nicht bekannt geworden.

## II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Der Projektleiter von TECOSIM hat das Projekt in einem Gastvortrag in der Vorlesungsreihe „Konstruktiver Leichtbau“ des IPEK am KIT am 26.06.2023 vorgestellt.

Ebenso hat er das Projekt auf dem 10. Forum Leichtbau am 28.09.2023 vorgestellt. Veranstaltungsort war die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin.

Außerdem wurde das Projekt im NEWSLETTER Nr. 03/2023 des BMWE erwähnt. Im Sinne der Verwertung wurde darauf hingewiesen, dass mit dem Projekt und dem virtuellen Prüfstand erstmals 3D-Druck-Bauteile im Prozess der virtuellen Produktentwicklung mit CAE-Verfahren auf ihre statische und zyklische Festigkeit beurteilt werden können. Erst dadurch wird eine Serienentwicklung mit 3D-Druck-Bauteilen denkbar.

Die Projektpartner haben mit einem Beitrag zum Projekt beim International Materials Science and Engineering Congress - MSE 2024, der vom 24.-26.09.2024 in Darmstadt stattfand und von der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V. organisiert wurde, teilgenommen. Im Anhang ist das präsentierte Poster beigefügt.

Ferner gab es einen Konferenzbeitrag auf QDE 2025[11], ein Vortrag und ein begleitendes Paper über die Messergebnisse vom IAM-WK, Simulationsergebnisse waren nicht Teil des Beitrags.

Die BMWE-Webseite leichtbauatlas.de stellt die leichtbaurelevanten Kompetenzen in Deutschland dar. Hier werden die im TTP LB geförderten Projekte mit Porträts in einer eigenen Rubrik vorgestellt. Auch das Projekt CAEaddFert wird mit einem anschaulichen Projektporträt präsentiert werden.

TECOSIM hat eine kurze Projektvorstellung beim Fachblog-Metamagazin www.leichtbauwelt.de eingereicht, die im Jahrbuch Leichtbau2025 erscheinen soll.

Ein Auszug des Projektthemas wurde von der Universität Stuttgart als Master-Thesis angenommen, die bei TECOSIM durchgeführt wurde. Der geplante Abschluss mit mündlicher Verteidigung ist im Dezember 2025 geplant.

[11] On the Influence of Geometrical Features on Residual Stresses in Additively Manufactured 316L for Lightweight Engineering; Christian Krämer, Volker Schulze, Stefan Dietrich Institute for Applied Materials – Materials Science and Engineering (IAM-WK), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Baden-Württemberg, Germany

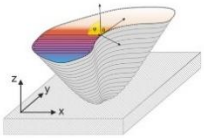
# Investigation of the manufacturing-related residual stresses in PBF-LB components and their consideration in the topology optimization for the virtual test bench for additive manufacturing – CAEaddFert

Lenhardt, S. (Speaker)[1]; Krämer, C.[2]; Dannecker, R.[3]; Meier, A.[4]; Albers, A.[1]; Schulze, V. [2]; Dietrich, S.[2]

[1]IPEK – Institute of Product Engineering, Karlsruhe Institute of Technology; [2]Institute for Applied Materials – Materials Science and Engineering (IAM-WK), Karlsruhe Institute of Technology; [3]TECOSIM GmbH, Stuttgart; [4]PMT GmbH, Rahden

## Motivation

Components manufactured using the **laser powder bed fusion (PBF-LB) process** are subject to **residual stresses** due to an **uneven temperature gradient** during production. To take the residual stresses into account in the simulation and optimization, a **virtual test bench** is required that can map the residual stresses on the component depending on the component geometry.



Uneven temperature gradient during the PBF-LB process

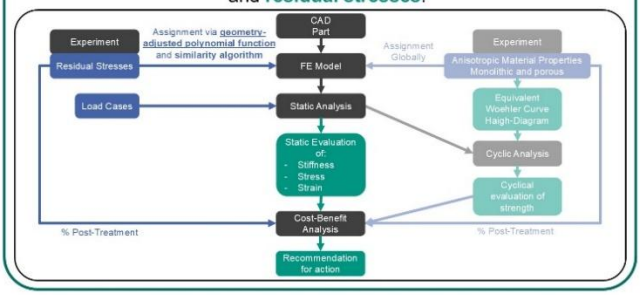
Considering the residual stresses...

- … leads to **less rejects**
- … enables **time** and **cost reduction**
- … increases the **lightweight potential**

→ Using the virtual test bench in a **topology optimization** can **support** the product developer in **finding** a **design** where residual stresses are already considered

## Objective

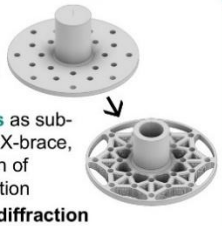
Within the project **CAEaddFert** a **virtual test bench** for additive manufacturing is build that aims to predict the strength of additively manufactured components, considering specific **material properties** and **residual stresses**.




## Demonstrator and residual stress measurement

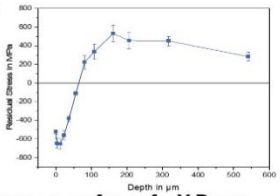
**Demonstrator component**

- Head for brush cutter
- Topology optimization from the simulation of typical loads
- Identification of **characteristic structures** as sub-elements of a topology-optimized design: X-brace, Y-brace, change in cross-section, variation of aspect ratio, holes, variation of build direction

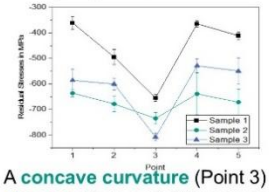


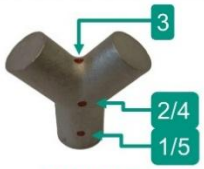
**Residual stress depth profile using X-ray diffraction**

- **Depth profile characteristic** for a shot blasted 316L on flat surface
- Maximum residual compressive stresses 15-20 µm below the surface
- Focus on the layers close to the surface, as this is where the damage usually occurs




**Geometry-dependent residual stresses on surface of a Y-Brace**



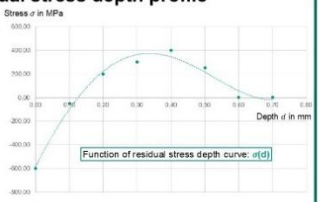




- A **concave curvature** (Point 3) results in **higher compressive stresses** than a slightly convex curvature (Points 1,2,4,5)

## Using residual stresses in simulation and optimization

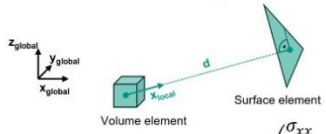
**Polynomial function of the residual stress depth profile**

- Assumption: Residual stresses close to zero in the inside
- Polynomial function $\sigma(d)$ from measurement points to describe the residual stresses as a function of depth




**Residual stress consideration for a 3D component**

- Assumption: Plane stress state related to surface plane
- Stress tensor 2D: $\boldsymbol{S}_{2D} = \begin{pmatrix} \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & \sigma \end{pmatrix}$



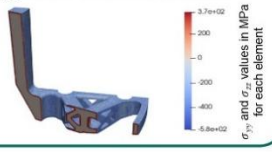

- Local stress tensor (3D) $\boldsymbol{S}_{lokal} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{pmatrix}$
- For every volume element the closest surface element is identified

**Pre-Load step is inserted for a simulation in Abaqus**

- Distribution table for the orientation of the local coordinate system of each element
- Initial condition with residual stress distribution for each element

## Topology Optimization Method

- Density based topology optimization method with Abaqus and Tosca
- Objective function **combination** of **maximizing stiffness** and **minimizing stresses** for a given volume reduction
- **Overwriting** the orientation and stress tensor distribution tables for **each iteration** depended on the iso-surface of each iteration
- Example of stress values $\sigma_{yy}$ and $\sigma_{zz}$ of the local stress tensor
  - Cut through demonstrator geometry to show the residual stress distribution




## Conclusion and Outlook

**Conclusion**

- The residual stress depth profile is similar in the Y-brace but the stresses close to the surface are geometry-dependent
- Residual stresses can be considered in simulation and optimization with a **general function** for the residual stress depth profile

**Outlook**

- Residual stresses of **different geometries** will be measured
- **Geometry-dependent residual stresses** as well as the **similarity algorithm** will be integrated in the simulation and optimization process
- Carrying out topology optimizations with the presented method