

**OTTO FUCHS KG**

**Schlussbericht des Förderprojekts Aton**

**Förderkennzeichen: 20W1904D**

**ATON- Aircraft Technologies on New Green Fuselage**

**Teilvorhaben: Entwicklung eines digitalen Zwillings für hochfeste  
Schmiedeteile für Luftfahrtstrukturen**

Zeitraum 01.01.2020 bis 30.06.2024

Dr.-Ing. Angela Quadfasel, Dr.-Ing. Michael Besel, Dr.-Ing. Thomas Witulski

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 20W1904D

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

**Inhalt**

Inhalt..... 2

1 Kurzdarstellung..... 3

    1.1 Aufgabenstellung..... 3

    1.2 Vorhabensvoraussetzungen ..... 3

    1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens..... 4

    1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand..... 5

    1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 6

2 Detaillierte Darstellung..... 7

    2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen..... 7

        AP1.2.1 Entwicklung der Werkstoffmodelle..... 7

            AP1.2.1.1 Fertigung der Schmiedeteile..... 7

            AP1.2.1.2 Gefüge und Mikrostruktur ..... 10

            AP1.2.1.3 Statistik Werkstoffkennwerte ..... 13

            AP1.2.1.4 Mechanische Werkstoffprüfung (DLR)/ Probenfertigung für DLR..... 14

            AP1.2.1.5 Warmbehandlung und Kaltstauchen..... 15

            AP1.2.1.6 Datenanalyse & Modellbildung ..... 16

        AP1.2.2 Simulation Prozesskette/digitales Schmiedeteil..... 20

            AP1.2.2.1 Gießen: Simulation Gussgefüge..... 20

            AP1.2.2.2 Schmieden: Freiform-, Gesenkteile ..... 21

            AP1.2.2.3 Lösungsglühen, Abschrecken & Kaltstauchen: Simulation Abkühlkurven & Eigenspannungen..... 22

            AP1.2.2.4 Modelloptimierung & Implementierung: Implementierung aller Vorhersagemodelle..... 24

            AP1.2.2.5 Validierung: Werkstoffeigenschaften & Zerspanungsstrategie ..... 26

            AP1.2.2.6 Definition Datenformat: Airbus, Aleris, OTTO FUCHS ..... 29

        AP2.1 Komplexe Strukturen..... 30

            AP2.1.1.1 Definition Exploratorbauteil/-baugruppe: Auswahl & Integralteil-Design..... 30

            AP2.1.1.2 Erzeugung des Digitalen Schmiedeteils: Simulation der Fertigungsroute ..... 30

            AP2.1.1.3 Variantensimulation: Überdeckendes Freiform-/Gesenkschmiedeteil / Genaupressteil..... 31

            AP2.1.1.4 Optimierung: In Abstimmung mit Airbus..... 33

    2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises..... 34

    2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ..... 34

    2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse..... 35

    2.5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ..... 36

    2.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse ..... 36

3 Literatur ..... 37

## **1 Kurzdarstellung**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Digitaler Zwilling („Digitales Schmiedeteil“) für 7xxx-Schmiedeteile entwickelt. Mithilfe der digitalen Prozesskettensimulation für die Prozessschritte Freiformschmieden, Fertigpressen, Lösungsglühen, Kaltstauchen und Auslagern können dadurch die oftmals über den Bauteilquerschnitt inhomogenen Randbedingungen von Schmiedebauteilen abgebildet werden. Aufgrund der vollständig dreidimensional simulierten Vorgänge während der Umformungen sowie der Wärmebehandlung und unter Anwendung der im Vorhaben entwickelten Werkstoffmodelle enthält dieser Zwilling neben der lokalen Herstellungshistorie auch die zugehörigen lokalen Werkstoffeigenschaften (d.h. das individuelle Eigenschaftsfeld des Bauteils) inklusive Anisotropie. Bei neuen Designs können Optimierungen zukünftig unter Berücksichtigung der lokalen Eigenschaften erfolgen, wodurch sich weitere Gewichtseinsparungen und/oder gesteigerte Lebensdauern realisieren lassen. Daneben wurden mit der bei OTTO FUCHS durchgängig realisierten digitalen Abbildung der eigenen Schmiedeteil-Prozesskette sowie dem digitalen Zwilling elementare Zwischenziele auf dem Weg zur „Industrie 4.0“ erreicht

### **1.2 Vorhabensvoraussetzungen**

Die Einführung der Integralbauweise für Flugzeugstrukturen ermöglicht es Kerbstellen und Spannungssprünge an Fügstellen zu vermeiden, indem viele diskrete Einzelbauteile durch ein einzelnes monolithisches Bauteil ersetzt werden. Dies führt zu einem geringeren Bauteil-/ Baugruppengewicht und reduziert gleichzeitig den Montageaufwand und die Fertigungskosten. Werden solche Integralbauteile durch Gesenkschmieden hergestellt, so lassen sich die herausragenden Eigenschaften eines Schmiedeteils mit dem Ressourcen schonenden Einsatz der meist teuren Aluminiumlegierungen kombinieren [1, 2].

Hochbeanspruchte Schmiedeteile aus 7xxx-Aluminiumlegierungen für Luftfahrtanwendungen weisen jedoch in der Regel ein vergleichsweise komplexes räumliches Eigenschaftsprofil auf. Aufgrund lokal unterschiedlicher Herstellungsbedingungen (z.B. lokale Umformgrade, Abkühlraten während einer Wärmebehandlung etc.), ergeben sich lokal unterschiedliche Eigenschaften. Außerdem weisen die Eigenschaften aufgrund des Herstellungsprozesses teils deutlich ausgeprägte Anisotropien in die drei Raumrichtungen auf. All dies führt dazu, dass sowohl im Rahmen des Design- als auch des Fertigungsprozesses häufig mehrfache Iterationen benötigt werden, um Teile geeigneter Qualität anzufertigen. Gleichzeitig wird ein Schmiedeteil in diesem Zusammenhang meist mehrfach mit Aufmaßen versehen, die hinterher im Rahmen der Zerspanung wieder abgearbeitet werden müssen. Das digitale Schmiedeteil ermöglicht es hier die Gradienten der mechani-

schen Eigenschaften schon in der Konstruktions- und Prozessauslegungsphase zu berücksichtigen, sodass sowohl Schmiedeteil als auch der Herstellungsprozess besser an die Kundenanforderungen angepasst werden können.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartnern Airbus und DLR durchgeführt. Innerhalb des übergreifenden Vorhabens zur Entwicklung ökologisch nachhaltiger Metalltechnologien konzentrieren sich die Beiträge von Otto Fuchs auf das HAP1 zur digitalen Abbildung des Entwicklungs- und Charakterisierungsprozesses von Strukturbauteilen und dem HAP2 zur Auslegung von ressourcenschonenden Bauteilen und Fertigungsprozessen einer Seitenwand. Im AP1.2 „Digitaler Zwilling“ wurden die Simulationskette sowie die Materialmodelle entwickelt und anhand eines Serienbauteiles zur Verbindung von Pylon und Flügel (Validator) validiert. In AP2.1 „Komplexe Strukturen“ wurden diese Modelle auf ein neu zu entwickelndes Integralschmiedebauteil im unteren Türbereich der Seitenschale (Explorator) übertragen.

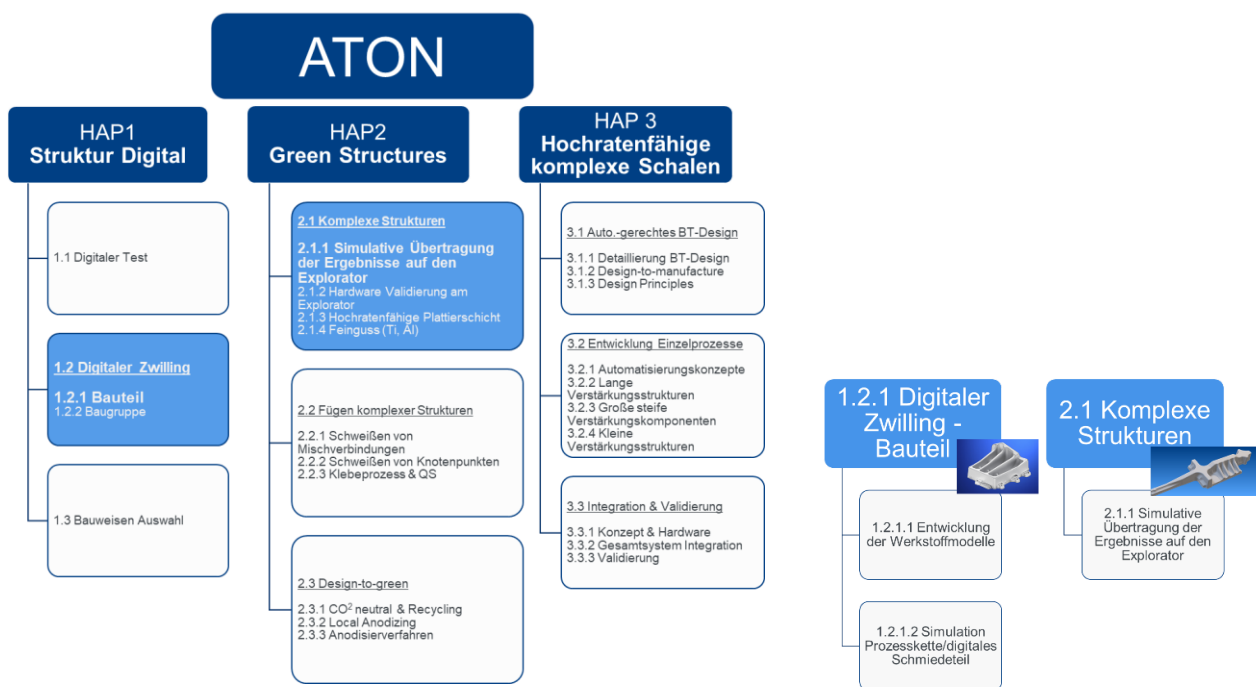


Abbildung 1: Schematische Struktur der Arbeitspakete im Aton-Vorhaben (links) und die Arbeitspakete, an denen Otto Fuchs beteiligt war (rechts).

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Grundsätzlich existieren zahlreiche Arbeiten, die sich mit den Zusammenhängen zwischen Gefüge und Eigenschaften metallischer Werkstoffe beschäftigen. Die relevanten mechanischen Eigenschaften zur Bauteil- und Lebensdaueranalyse sind in diesem Fall die statischen (Festigkeit, Bruchzähigkeit...) und dynamischen (Ermüdungsrissausbreitung) Werkstoffeigenschaften sowie die herstellbedingten Eigenspannungen.

Statische Werkstoffeigenschaften (z.B. Zugfestigkeit) werden bei 7xxx-Legierungen bei gegebener Chemie überwiegend durch die Wärmebehandlung (Abkühlraten nach dem Lösungsglühen, Temperaturen und Haltezeiten der Warmauslagerung) sowie die Ausprägung des Gefüges (Korngröße, -form, -streckung) bestimmt. Hierzu existiert eine Vielzahl an Arbeiten. Im Falle von warmgehärteten Aluminiumlegierungen wird überwiegend die Abschreckempfindlichkeit betrachtet, siehe z.B. [3-7]. Hier ist die Quenchfaktoranalyse in Kombination mit der Avrami-Gleichung eine weit verbreitete Methode, um die oftmals nichtlinearen Abkühlbedingungen, die in massiven Bauteilen vorliegen, mit der Festigkeit zu korrelieren. Diese Arbeiten beziehen sich in der Regel jedoch auf Werkstoffe mit isotropen Mikrostrukturen und vernachlässigen den überlagerten Mikrostruktureffekt in komplexen Schmiedebauteilen. Die Ausprägung des Gefüges wird in der Literatur in der Regel, abgesehen von Hall-Petch Effekten bei kleineren Korngrößen, bestenfalls qualitativ, aber nicht quantitativ berücksichtigt.

Für die Auslegung der Lebensdauer von Luftfahrtbauteile ist die Ermüdungsrissausbreitung ein relevantes Kriterium. Andersson und Johansson zeigen in [8] einige Ursachen für die anisotrope Rissausbreitung in dicken Platten aus AA7010. In [9] erfolgen ähnliche Untersuchungen für dünnere Bleche aus AA7050 mit grundsätzlich ähnlichen Ergebnissen. Beide Arbeiten interpretieren die Ergebnisse vornehmlich vor dem Hintergrund der jeweils vorgefundenen Kornmorphologie, ohne dabei kristallographische Orientierungen explizit zu berücksichtigen. Neuere Arbeiten wiederum gehen deutlich stärker ins Detail bezüglich der Einflüsse von Kornorientierungen, Texturen und Korngrenzen, siehe z.B. [10-12].

Die für die spanende Bearbeitung beim Kunden relevanten Eigenspannungen entstehen insbesondere aufgrund der ausgeprägten Temperaturgradienten während des Abschreckens nach dem Lösungsglühen und können z.B. durch Kaltstauchen reduziert werden. Sowohl zu ihrer Entstehung als auch deren Simulation existieren zahlreiche Arbeiten, auf die im Rahmen des Projekts zurückgegriffen wurde, siehe z.B. [13-16].

Die oben beispielhaft genannte Literatur hat im Wesentlichen zwei Nachteile, die vor der Übertragung bzw. Anwendung der bereits vorhandenen Ergebnisse auf reale Schmiedeteile im Rahmen

des Projekts ausgeräumt wurden. Zum einen wurde die überwiegende Mehrzahl aller Untersuchungen an Blech bzw. Plattenwerkstoffen durchgeführt, so dass eine direkte Übertragung auf komplexere 3D-Gefüge per se nicht möglich ist. Zum anderen weisen insbesondere die Mechanismen nahen Modelle (z.B. [10-12]) einen so hohen Detaillierungsgrad auf, dass bereits die entsprechende Charakterisierung eines vollständigen Bauteils zur Bereitstellung der benötigten Parameter (z.B. lokale Kornorientierungen, Ausprägung von Korngrenzen etc.) in der Praxis nicht möglich ist.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Projektlaufzeit erfolgt die Zusammenarbeit insbesondere mit dem Verbundführer Airbus sowie den Projektpartnern vom DLR.

Die Zusammenarbeit mit Airbus vollzog sich auf unterschiedlichen Ebenen:

- (1) Bei der Entwicklung Digitaler Zwillinge für die Luftfahrtindustrie wurde in enger Abstimmung mit Airbus die Vorgehensweisen, die Daten/Informationsgehalte und die Datenformat abgestimmt, um die Kompatibilität ebendieser Digitalen Zwillinge zu den Systemen von Airbus sicherzustellen.
- (2) Im Gegensatz zu Airbus verfügt OTTO FUCHS über keinerlei eigene Kenntnisse hinsichtlich lokaler Last- oder Beanspruchungszustände in den am Standort Meinerzhagen produzierten Luftfahrtkomponenten. Daher erfolgte die Bewertung der simulativ oder experimentell ermittelten Bauteileigenschaften gemeinsam mit Airbus.
- (3) Analog Punkt (2) erforderte die Definition eines attraktiven Exploratorbauteils zur Darstellung und Bewertung der Leistungsfähigkeit des Digitalen Prozesskettenzwillings und dem darauf basierenden Digitalen Schmiedeteilzwillings eine enge Abstimmung mit Airbus.

Für die Arbeiten im AP 1.1 „Digitaler Test“ des DLR-Teilprojekts wurden Proben aus Schmiedeteilen von OTTO FUCHS (OF) zur Verfügung gestellt. Die beim DLR durchgeführten Rissgeschwindigkeitsversuche gehen deutlich über die experimentellen Möglichkeiten im Hause OF hinaus. Zusammen mit den FEM-basierten mechanischen Analysen sowie den weiterführenden Datenauswertungen mittels „intelligenter Algorithmen“ bilden diese die Basis zur Datenbereitstellung für die Entwicklung der benötigten Werkstoffmodelle. Die Entwicklung des Rissgeschwindigkeitsmodells erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen DLR und Otto Fuchs.

Das im Vorhaben entwickelte Vorgehen zur Simulation von Eigenspannungen wurde innerhalb der Projektmeetings zwischen Otto Fuchs und Aleris ausgetauscht.

## 2 Detaillierte Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen

#### AP1.2.1 Entwicklung der Werkstoffmodelle

Im Rahmen dieses Unterarbeitspakets erfolgte entsprechend der im Antrag formulierten Ziele sowohl die Herstellung aller benötigten Schmiedeteile und Werkstoffproben sowie deren Charakterisierung und Erstellung der Werkstoffmodelle für Festigkeit, Risszähigkeit, Rissgeschwindigkeit und Leitfähigkeit. Die Prozesskette besteht aus dem Freiformschmieden, ein optionales Gesenkschmieden, Lösungsglühen, Kaltstauchen, Warmauslagern und mechanischer Prüfung.

##### AP1.2.1.1 Fertigung der Schmiedeteile

Insgesamt wurden innerhalb des Projektes 10 Schmiedekampagnen mit unterschiedlicher Zielsetzung durchgeführt. Unterschieden werden die Kampagnen zur Untersuchung des Einflusses der Kornstreckung auf die mechanischen Eigenschaften, die Kampagnen zur Untersuchung des Einflusses der eingebrachten Verformung beim Schmieden und die Kampagnen zur Herstellung der Validatorbauteile. Während die ersten zwei Kampagnen zur Herstellung von Probenmaterial für die Charakterisierungsversuche dienen, aus denen die Werkstoffmodelle abgeleitet werden, sind die Validierungskampagnen durchgeführt worden, um die simulative Vorhersage der Materialeigenschaften zu validieren. Im Falle der Fertigung von Probenmaterial wurden aus den Schmiedeblocken Teilblöcke entnommen und das Kaltstauchen sowie Warmbehandlung erfolgt in der Regel an den Teilblöcken oder den Probenrohlingen unter kontrollierten Laborbedingungen und wird näher in AP1.2.1.5 beschrieben. Im Fall der Validatorbauteile erfolgte das Kaltstauchen und die Warmbehandlung an den Versuchsbauteilen und gibt Aufschluss über die Übertragbarkeit der Simulationsmodelle auf den realen Prozess.

| Kampagnen | Kornstreckung   | Umformgrad   | Validator  |
|-----------|---|--|--|
| 2020      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsschmiedung V10-V14</li> </ul>                            |  |  |
| 2021      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsschmiedung BL5-BL7</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gussstutzen</li> <li>Stauchen von Platten BL1- BL4</li> </ul> |  |
| 2022      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Stauchen von Platten (IBF)</li> <li>Strangpressprofil</li> </ul> |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Freiform FFD1</li> <li>Freiform FFD2</li> </ul> |
| 2023      |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsschmiedung Guss/Ronde/Block</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gesenkteil</li> </ul>                           |

Abbildung 2: Übersicht der verschiedenen Schmiedekampagnen über die Laufzeit des Vorhabens und deren Motivation

In der ersten Schmiedekampagne zum Thema Kornstreckung wurden durch unterschiedliche Schmiederouten gezielt fünf unterschiedliche Gefüge (insbesondere hinsichtlich Kornstreckung) eingestellt. Aus einem annähernd rundem Guss-Korn wurden durch verschiedene Zwischenstufen und Endabmessungen die Kornformen „rund & flach“, „gestreckt & flach“ und „gestreckt & zylindrisch“ mit Seitenverhältnissen von bis zu 1:10 eingestellt. Bei ausgewählten Varianten wurde das Vormaterial (AA7010-Strangguss) zuvor einfach oder dreifach umgeschmiedet.

Um neben dem Einfluss der Abschreckgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften der AA 7010 Legierung den Einfluss der Kornstreckung und des Faserverlaufs näher untersuchen zu können, wurden weitere Umformversuche (zweite Schmiedekampagne) durchgeführt. Hierfür wurden einerseits längliche Stützen über die Mantelfläche flach gestaucht (Platten). Andererseits ein Schmiedebarren mit quadratischem Querschnitt und einer hohen Streckung über das Freiformschmieden eingestellt. Das Flachstauchen über die Mantelfläche stellt hierbei eine einfache Umformoperation mit niedrigem Streckungsverhältnis dar, welche im weiteren Verlauf des Projekts simuliert und als ein erster Abgleich zwischen den gesammelten Werkstoffdaten und der Simulation dienen konnte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Stauchoperation ohne vorheriges Umschmieden des Gussstützens zu einem geringen Umformgrad unterhalb eines kritischen Wertes führt. Unterhalb dieses kritischen Wertes hat neben der Kornstreckung zusätzlich der Umformgrad einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und schränkt daher den Vergleich von Modell und Versuch ein. Im Detail wird hierauf in AP1.2.1.2 eingegangen. Der gefertigte Schmiedebarren mit hohem Streckungsverhältnis hingegen wurde vor dem Ausrecken in alle drei Raumrichtungen gestaucht und wieder annähernd in die Ausgangsabmessung gebracht (Umschmieden) und ermöglicht so Aussagen über den Einfluss höherer Streckungsgrade auf die mechanischen Eigenschaften, ohne den Einfluss des Umformgrades berücksichtigen zu müssen.

Für den Modellaufbau des Einflusses der Kornstreckung auf die Festigkeit wurden mehrere Platten in verschiedenen Stauchstufen gefertigt, anhand derer die Streckung der Körner im Verlauf des Stauchprozesses nachvollzogen werden konnte. Es wurden 5 Platten mit einer minimalen Stauchhöhe von 26 mm und einer maximalen Stauchhöhe von 83mm gefertigt. Die detaillierte Beschreibung der Ergebnisse aus der mechanischen Prüfung und der Abgleich mit der Simulation wird in AP1.2.1.2 näher beschrieben.

Um den Einfluss des Umformgrades beim Schmieden auf die mechanischen Eigenschaften näher zu untersuchen, wurde eine zusätzliche Schmiedekampagne und mechanische Prüfungen durchgeführt, bei denen Proben aus einem Gussblock ( $\varphi = 0$ ), mit gestauchten Ronden von  $\varphi = 0.3$ ,  $\varphi = 0.7$  und  $\varphi = 1$  sowie Schmiedeblocken mit einfachem ( $\varphi = 2$ ) und dreifachem ( $\varphi = 5$ ) Umschmieden verglichen wurden. Die Ergebnisse der Zugprüfung und metallographischen Untersuchung werden näher in AP1.2.1.2 beschrieben.

Für einen ersten Abgleich der Prozesssimulation sowie der Werkstoffmodelle und der Versuchsergebnisse wurden zwei Freiformschmiedeblocke entsprechend einer herkömmlichen Schmiede-  
route bei Otto Fuchs hergestellt und die Prozessrandbedingungen dokumentiert. Für die Prozess-  
simulation wurden die IST-Prozessrandbedingungen für Abkühlgeschwindigkeit beim Abschrecken  
und Kaltstauchgrad in verschiedenen Positionen gemessen. Aufgrund der großen Abmessungen  
der Schmiedebauteile sind die Prozessrandbedingungen nicht über das gesamte Bauteil homogen  
verteilt, sodass durch die Positionierung mehrerer Thermoelemente z.B. Temperaturgradienten er-  
mittelt werden können. Bei der Warmauslagerung wurde FFD1 als gesamter Block ausgelagert  
und bei FFD2 erfolgte zuerst die Probenentnahme und anschließend die Auslagerung unter kon-  
trollierten Laborbedingungen.

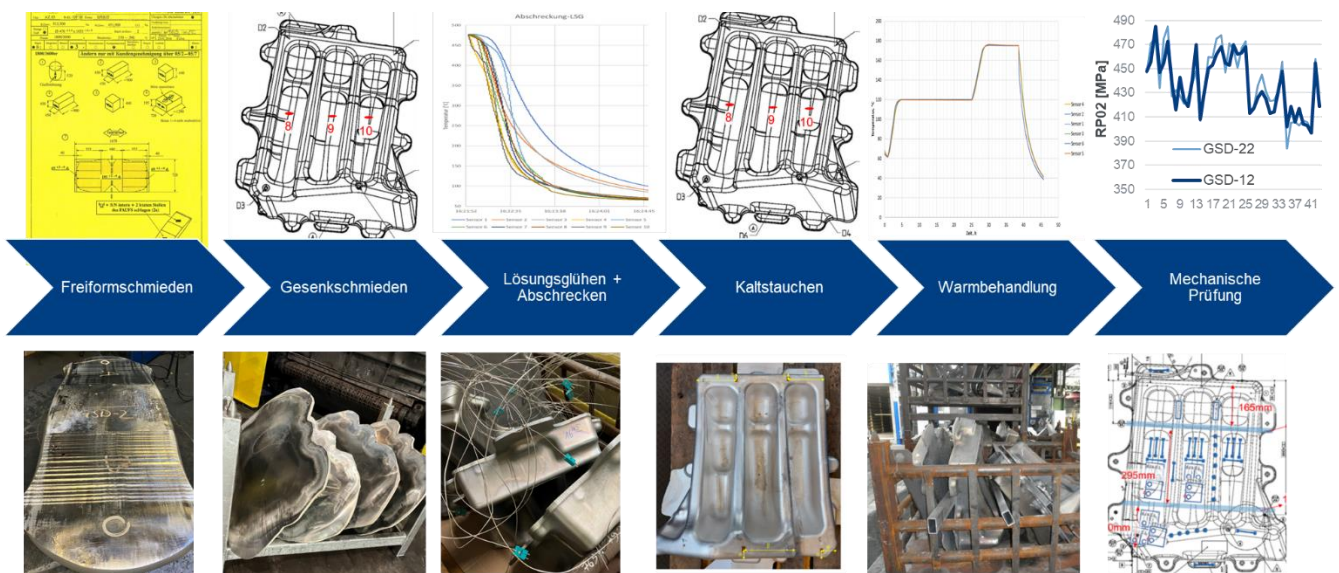


Abbildung 3: Schematische Übersicht der Prozessroute zur Herstellung des Validator-Gesenschmiedebauteiles und die begleitende Messung der Randbedingungen

Die Validatorbauteile wurden analog der Fertigung von Serienbauteilen unter Betriebsbedingungen hergestellt und bilden in Bezug auf die Kornstreckung und die Prozessrandbedingungen den komplexesten Anwendungsfall ab. Die entsprechende Prozessroute und die begleitende Datenauf-  
nahme sind in Abbildung 3 dargestellt. Im Anschluss an die Fertigung wurden aus dem Bauteil  
zahlreiche Proben entnommen, um das Eigenschaftsfeld des Schmiedeteiles möglichst genau ab-  
zubilden. Dafür wurde ein von der Serie abweichender Probenlageplan erstellt, der die aus werk-  
stoffkundlicher Sicht interessanten Bauteilbereiche (Gradienten im Faserverlauf oder Kaltstauch-  
grad) abdeckt. Basierend auf diesem Plan wurden Zugproben, Mikro-Schliffproben und K1C-Pro-  
ben entnommen und entsprechend der Airbus Prüfnormen geprüft. Die Probenpositionen aus dem

Probelageplan wurden digitalisiert und als Input für die Simulation verwendet. Zukünftig wird es daher möglich sein, die Festigkeit sowie die weiteren mechanischen Eigenschaften und die Kornstreckung an den exakten Probenpositionen mit den Ergebnissen der FE-Simulation zu vergleichen. Die Ergebnisse aus dem Abgleich von Simulation und Validatorbauteil sind in AP1.2.2.5 näher beschrieben.

#### **AP1.2.1.2 Gefüge und Mikrostruktur**

Die für die mechanischen Eigenschaften relevanten Gefügeeigenschaften, die in diesem Projekt berücksichtigt wurden, sind die Kornstreckung und der an den Korngrenzen ausgeschiedene Phasenanteil nach der Lösungsglühung. Während die Kornstreckung im Schmiedeprozess eingestellt wird, beeinflusst sowohl der Umformgrad beim Schmieden als auch die Abschreckgeschwindigkeit nach dem Lösungsglühen den Phasenanteil, der sich an den Korngrenzen ausscheidet. In diesem Abschnitt wird lediglich der Einfluss des Umformgrades betrachtet, der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit ist in AP1.2.1.5 näher erläutert.

Um den Einfluss der Kornstreckung auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden Gussstutzen über die Mantelfläche auf „Plattenhöhen“ von 83 bis 26 mm gestaucht. Aus diesen Platten wurden Zugproben in x und y-Richtung an drei Positionen der jeweils vier Platten entnommen und nach einer Warmbehandlung mit schneller und langsamer Abkühlgeschwindigkeit geprüft. Da die Mikroschliffe an den entsprechenden Positionen keine eindeutige Auswertung der Kornstreckung erlaubt haben. Wurden die Festigkeitsergebnisse mit den Simulationsergebnissen aus der Kornstreckungssimulation vom Institut für Bildsame Formgebung (IBF) korreliert.

Dazu wurde am IBF die Subroutine „GrainFlow“ der Firma Transvalor zur Berechnung der Kornstreckung beim Schmieden an die Anforderungen von Otto Fuchs angepasst und zur Simulation des Stauchvorganges verwendet. In Abbildung 4 ist exemplarisch dargestellt, wie inhomogen die Dehnung und damit einhergehend auch die Kornstreckung innerhalb einer Stauchplatte ist. Sowohl an den verschiedenen Messpositionen als auch in die verschiedenen Raumrichtungen können starke Unterschiede in der Dehnung erkannt werden, die in der Anisotropie der Festigkeitswerte resultieren. Mithilfe der Korrelation der Festigkeitswerte und der lokalen Kornstreckungswerte aus der Simulation konnte ein empirisches Modell abgeleitet werden, mit dem die Festigkeiten die drei Richtungen der Längung (L), transversal zur Längung (LT) und in Stauchrichtung (ST) abgebildet werden können.

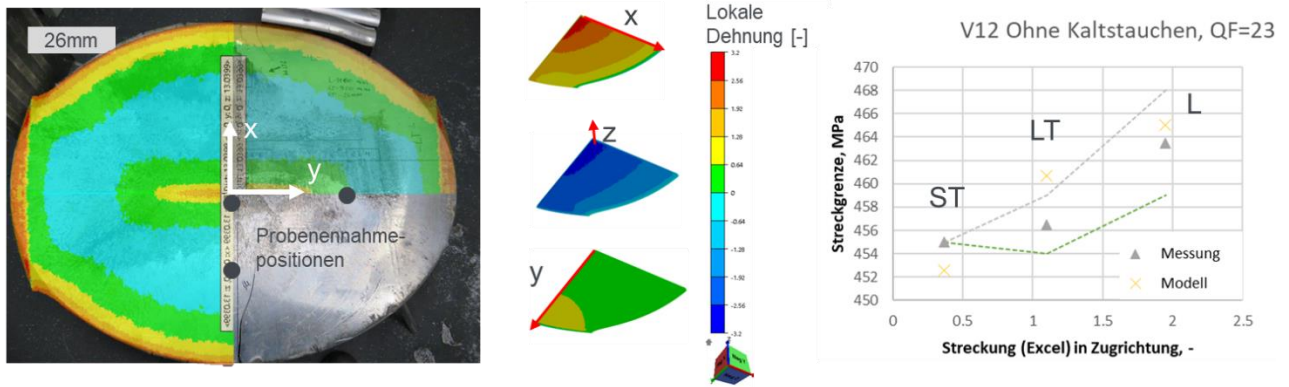


Abbildung 4: Verteilung der Dehnung über die stark gestauchte Schmiededeplatte (links) und die unterschiedlich starke Dehnung in die drei Raumrichtungen als Ursache der Anisotropie (Mitte) sowie die aus der Anisotropie resultierenden Festigkeitsunterschiede in die drei Raumrichtungen aus der Messung und dem Materialmodell (rechts).

Mithilfe der bei Otto Fuchs implementierten GrainFlow-Subroutine wurden ebenfalls die Kornstreckungsunterschiede beim einfachen und dreifachen Umschmieden untersucht. Durch das dreifache Umschmieden wird wieder eine nahezu runde Kornform eingestellt, während nach dem einfachen Umschmieden eine stärkere Inhomogenität und Anisotropie beobachtet werden kann.

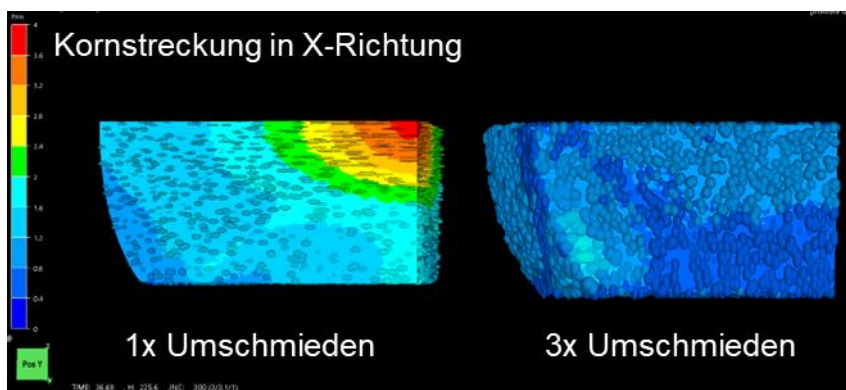


Abbildung 5: Unterschiede in der Kornstreckung nach einfachem und dreifachem Umschmieden aus der FE-Simulation mit der Kornstreckungs-Subroutine.

Da jedoch eine simulative Abbildung der im Vorhaben durchgeführten Freiformschmiedepoperationen eine zu hohe Rechenleistung und -Zeit erfordert, wurde im Rahmen des Projektes darauf verzichtet und alternativ ein Tool entwickelt, das anhand der geometrischen Abmessungen der einzelnen Schmiedeprozessschritte aus dem Schmiedepflan die Kornstreckung in die drei Raumrichtungen abschätzen kann. Mithilfe dieses Tools kann unter Vernachlässigung der Gradienten im Schmiedeblock eine mittlere Kornstreckung für einen Block ermittelt werden. In Kombination mit

dem empirischen Modell zur Korrelation von Kornstreckung und Festigkeit konnten die in Abbildung 6 dargestellte Streckgrenze für die Versuchsblöcke V10, V11, V14 und des Strangpressprofils in Richtung L und LT zur Validierung des Modells vorhergesagt werden.

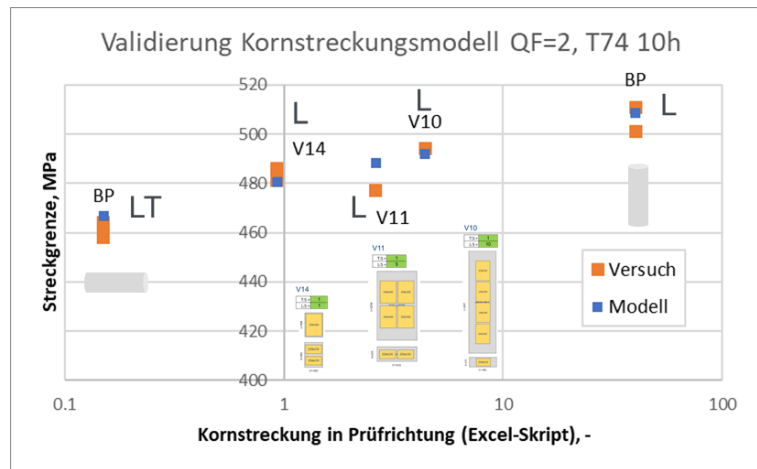


Abbildung 6: Vergleich der Streckgrenzen aus Versuch und Materialmodell für verschiedene Kornstreckungsvariationen.

Der Einfluss des Umformgrades beim Schmieden wurde anhand der Schmiedekampagne mit verschiedenen Umformgraden ( $\varphi = 0$  bis  $\varphi = 5$ ) untersucht. Die Zugprüfung der verschiedenen Materialzustände ergab, dass die Festigkeit, wie in Abbildung 7 dargestellt, mit zunehmendem Umformgrad abfällt. Ab einem Umformgrad von  $\varphi = 2$  (einfach Umschmieden) wurde bei der Festigkeit eine Sättigung beobachtet. Dies wird darauf zurückgeführt, dass mit zunehmendem Umformgrad mehr Keimstellen für die Vorausscheidung bereits beim Abschrecken nach dem Lösungsglühen in die Mikrostruktur eingebracht werden. Da diese überwiegend als grobe Phase, wie in Abbildung 8 erkennbar, an den Korngrenzen ausgeschieden wird, stehen die Legierungselemente nicht mehr für die Festigkeitssteigerung durch die fein ausgeschiedenen Phasen bei der Warmauslagerung zur Verfügung. Eine schnellere Keimbildung bei einer sonst gleichbleibenden Warmauslagerung (Temperatur & Zeit) führt im Bereich der Überalterung (T74) zu einem weiteren Abfall der Festigkeit. Da die Mikrostruktur mit steigender Umformung einen Sättigungszustand erreicht, verläuft ebenfalls die Festigkeit in einen Sättigungswert.

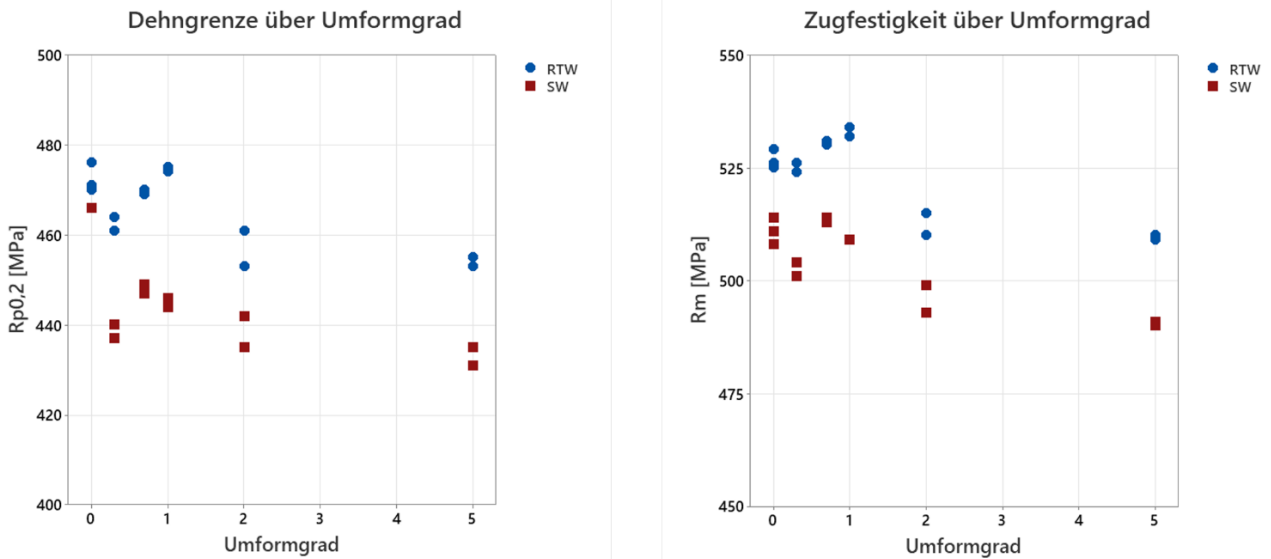


Abbildung 7: Vergleich des Festigkeitsabfalls (Streckgrenze links und Zugfestigkeit rechts) mit zunehmendem Umformgrad beim Schmieden für einen Materialzustand mit hoher (RTW) und langsamer (SW) Abkühlgeschwindigkeit nach dem Lösungsglühen.

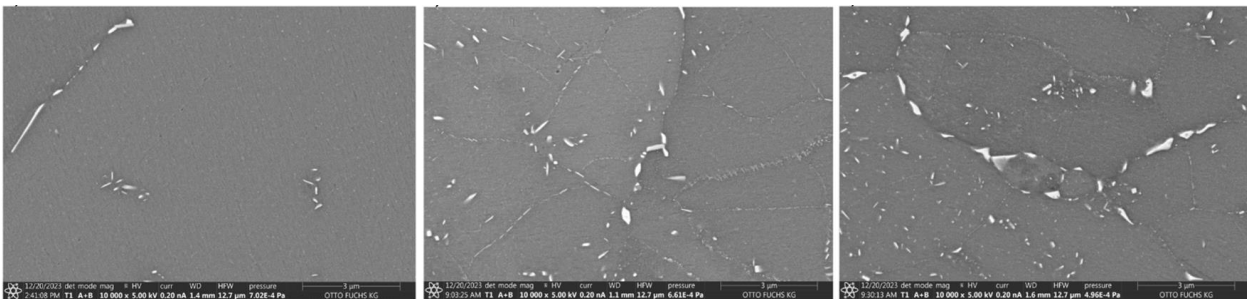


Abbildung 8: Darstellung der Vorausscheidungen (weiß) an den Korngrenzen und im Korninneren im Materialkontrast (REM) für die Umformgrade  $\varphi = 0$  (links),  $\varphi = 0.3$  (Mitte) und  $\varphi = 5$  (rechts) bei gleicher Abschreckgeschwindigkeit nach dem Lösungsglühen und gleicher Auslagerung.

### AP1.2.1.3 Statistik Werkstoffkennwerte

Für die im Vorhaben durchgeführten Schmiedekampagnen wurde der Zugversuch zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte für alle hergestellten Materialzustände herangezogen und eine Excel-Datenbank aufgebaut. Versuche zur Ermittlung der Bruchzähigkeit, Rissgeschwindigkeit, Spannungsrisskorrosion und Ermüdung wurden hingegen nur an ausgewählten Materialzuständen geprüft.

Die im Vorhaben aufgebaute Datenbank enthält für 1025 Zugversuche die Historie der Materialherstellung (Charge, Kornstreckung, Warmbehandlungsbedingungen, Abkühlbedingungen, Kaltschweißgrad) sowie die Prüfbedingungen (Prüfrichtung) und die Prüfergebnisse (Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung). Darüber hinaus wurden an den Zugproben Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt, um die Korrosionseigenschaften abschätzen zu können. Mithilfe der Datenbank

konnten Analysen zur Korrelation der Festigkeit, Bruchdehnung und Leitfähigkeit mit den Prozessrandbedingungen durchgeführt werden, die als Grundlage zum Aufbau der in AP1.2.1.6 beschriebenen Materialmodelle verwendet wurden.

Anhang von Zugproben aus Serienbauteilen verschiedener Chargen sollte ein Zusammenhang der Legierungselementgehalte Cu, Mg und Zn und der Festigkeitsänderung hergestellt werden. Die Festigkeitsergebnisse wiesen jedoch eine sehr hohe Streuung auf, die nicht in eine eindeutige Korrelation mit den Legierungsgehalten gebracht werden konnte. Es wird angenommen, dass zusätzliche variierende Prozessrandbedingungen, wie z.B. die Warmbehandlungstemperatur die Festigkeit bei dieser Probenauswahl zu stark beeinflussen. Im Rahmen des Vorhabens wurde zunächst auf die Integration des Legierungseinflusses in die Materialmodelle verzichtet.

#### AP1.2.1.4 Mechanische Werkstoffprüfung (DLR)/ Probenfertigung für DLR

Aus den Versuchsblöcken V2, V5 bis V7, V10, V13, V14 wurden Proben für die Rissgeschwindigkeitsprüfung in L und LT-Richtung entnommen und dem DLR zur Verfügung gestellt. Die unterschiedlichen Schmiederouten und Prüfrichtungen resultieren in Korngrenzenabständen in Risswachstumsrichtung von 57 µm bis 1187 µm. Am DLR wurde der Einfluss des Korngrenzenabstandes auf die Risswachstumsgeschwindigkeit untersucht und ein empirisches Modell abgeleitet.

Darüber hinaus hat Otto Fuchs an Proben aus den Versuchsblöcken V10 und V14 die in Abbildung 9 dargestellten EBSD Messungen zur Ermittlung der Korngröße bzw. Kornstreckung durchgeführt. Die Analyse der Korngröße erfolgte am DLR.

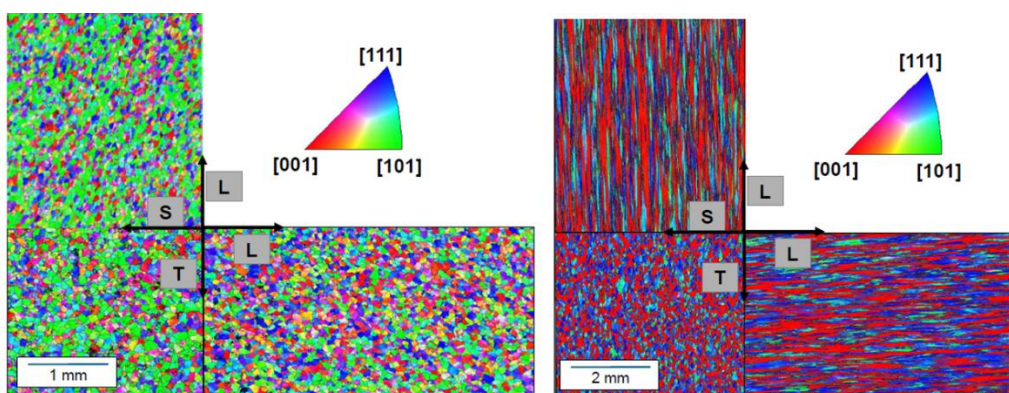


Abbildung 9: EBSD-Messung (REM) der Kornorientierung zur Bewertung der Textur für einen Materialzustand mit globularem Korn (links) und stark gestrecktem Korn (rechts).

Darüber hinaus wurden bei Otto Fuchs Rissgeschwindigkeitsprüfungen an Materialzuständen mit unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten und Kaltstauchgraden durchgeführt, um den Einfluss dieser Prozessrandbedingungen auf die Rissgeschwindigkeit zu bewerten und in dem Rissgeschwindigkeitsmodell zu ergänzen.

#### **AP1.2.1.5 Warmbehandlung und Kaltstauchen**

Der Einfluss der Warmbehandlung und des Kaltstauchens wurde in kombinierten Versuchsreihen untersucht, da beide Faktoren die Bildung der aushärtenden Phase beeinflussen. Im Prozessschritt Lösungsglühen werden zunächst die ausscheidungshärtenden Legierungselemente gelöst und durch das Abschrecken in der Matrix eingefroren. Je nachdem, wie stark die Abschreckgeschwindigkeit in massiven Bauteilen verzögert wird, werden bereist Phasen an den Korngrenzen vorausgeschieden. Bei der anschließenden Auslagerung werden die verbleibenden gelösten Elemente fein verteilt in der Matrix ausgeschieden und tragen zur Festigkeitssteigerung bei. Das Kaltstauchen findet im Anschluss an das Abschrecken statt und dient der Reduktion von Eigenspannungen, die sich während des Abschreckens nach dem Lösungsglühen ausbilden können. Nach der anschließenden Warmauslagerung werden in der Regel zwei Effekte durch das Kaltstauchen beobachtet. Zum einen kommt es zu einer Beschleunigung der Ausscheidungskinetik, so dass die Warmauslagerung geeignet angepasst werden muss. Zum anderen tritt meist ein ausgeprägter Abfall der Fließgrenze (RP0,2) bei Zugversuchen parallel zur Kaltstauchrichtung auf. Der Einfluss des Kaltstauchens ist somit nicht nur Richtungsabhängig, sondern auch abhängig von der Probenlage im Verhältnis zur Kaltstauchrichtung. Beide Effekte sollen im Rahmen des Projekts durch geeignete Modelle abgebildet werden, die in AP1.2.1.6 näher beschrieben sind.

Zur Untersuchung des Einflusses von Warmauslagerung und Kaltstauchen wurden modifizierte Jominy-Tests durchgeführt. Hierzu wurden aus den Schmiedeblocken entnommene Proben gleicher Abmessung (70x70x200mm) im heißen Zustand nach dem Lösungsglühen in einer von OTTO FUCHS erstellten Vorrichtung eingespannt und wie in Abbildung 10 dargestellt, mit einem konstanten Wasserstrahl (Durchflussmenge, Temperatur, Druck und Abstand zur Probe konstant) stirnseitig bestrahlt. In Abhängigkeit zum Abstand zur Stirnfläche ergeben sich folglich unterschiedliche Abschreckraten innerhalb der Proben. Das Entnehmen von Zugproben aus den Jominy-Proben im unterschiedlichen Abstand zur wasserbestrahlten Stirnseite ermöglicht die Korrelation der Festigkeitswerte mit verschiedenen Abschreckraten und erlaubt den Einfluss der Abschreckung getrennt von den Einflussgrößen des Kaltstauchens und der Kornstreckung zu betrachten. Um den Einfluss der Abschreckgeschwindigkeit in Kombination mit dem Kaltstauchen zu untersuchen, wurden die Jominy-Proben anschließend mit Kaltstauchgraden zwischen 0 und 5% kaltgestaucht und ausgelagert.

gert. Zur Abbildung der kombinierten Einflussfaktoren, Kaltstauchgrad, Probenlage und Kaltstauchrichtung, war eine Versuchsmatrix von 16 Jominy-Versuchen erforderlich, aus denen Zugversuchsproben entnommen wurden. Die Untersuchung des Einflusses auf die Bruchzähigkeit erfolgte im Gegensatz dazu anhand einer weiteren Versuchsreihe mit ausgewählten Kaltstauchgraden und Kornstreckung für die Jominy-Proben. Zur Untersuchung des Einflusses von Kaltstauchgrad und Abschreckgeschwindigkeit wurden die finalen Auslagerungsbedingungen konstant gehalten.

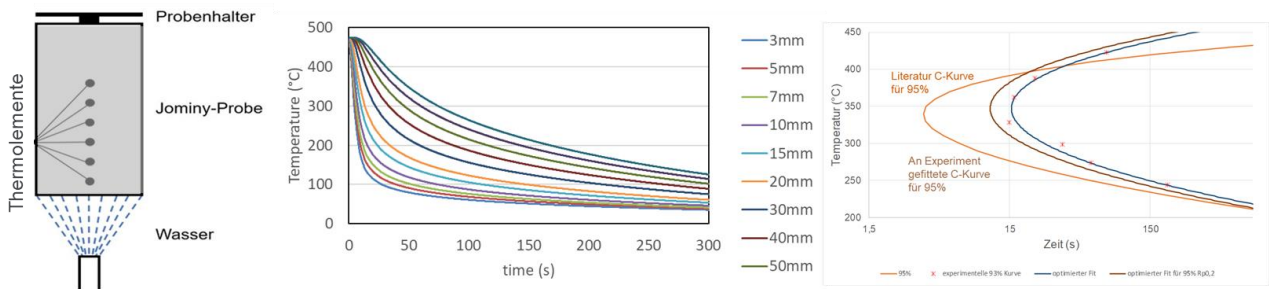


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Jominy-Probe bei der einseitigen Abkühlung (links) und der entsprechenden Abkühlkurven aus den Thermoelementen (Mitte). Vergleich der C-Kurven aus Literatur und eigener Messung zur Berechnung des Quenchfaktors (rechts).

Ergänzend zu den Jominy-Versuchen wurden zahlreiche Abschreckversuche direkt an Zugprobenrohlingen durchgeführt. Je nach Temperatur des Abschreckmediums (z.B. Wasser mit Raumtemperatur oder siedend) konnten definierte Abschreckgeschwindigkeiten eingestellt werden. Diese Methode wurde unter anderem dazu verwendet, die Proben für die Rissgeschwindigkeitsversuche, die Spannungsrisskorrosion und die Ermüdungsversuche vorzubereiten. Eine zusätzliche Zugversuchsreihe wurde mit unterschiedlich warmen Abschreckmedien durchgeführt, um die zur Modellbildung aus der Literatur verwendete C-Kurve für das im Vorhaben verwendete Material und Materialzustand zu validieren. Der Vergleich beider C-Kurven ist in Abbildung 10 dargestellt.

Darüber hinaus wurden systematische Variationen der Warmbehandlungstemperatur und -dauer der zweiten Auslagerungsstufe für Jominy-Proben durchgeführt, um mögliche Prozessschwankungen bei der Warmbehandlung in das zu entwickelnde Festigkeitsmodell integrieren zu können. Die Variation der Warmbehandlungsdauer lag zwischen 4 und 28 Stunden und die Variation der Temperatur lag zwischen 165 und 180°C.

#### AP1.2.1.6 Datenanalyse & Modellbildung

Zur Beschreibung des Materialverhaltens der 7xxx Legierung im überalterten Zustand (T74) wurden entsprechend eines Lastenheftes (Prüfanweisung) von Airbus, die folgenden mechanischen

Eigenschaften durch empirische Materialmodelle abgebildet: Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Leitfähigkeit, Bruchzähigkeit und Rissgeschwindigkeit. Im Fall der Streckgrenze und Zugfestigkeit wurden alle untersuchten Einflussfaktoren (Abkühlgeschwindigkeit, Kaltstauchen, Kornstreckung, Auslagerung, Kaltstauchrichtung) in Form von Teilmodellen in der Modellbildung berücksichtigt. Für die weiteren Materialmodelle lagen nicht für alle Einflussfaktoren Messergebnisse vor oder es konnte bei der Analyse kein Einfluss beobachtet werden, sodass der Faktor vernachlässigt wurde. Eine Übersicht der Materialmodelle und der berücksichtigten Einflussfaktoren ist in Abbildung 11 zu sehen.

| Modell   | Quenchfaktor | Kaltstauchen | Kornstreckung/<br>Prüfrichtung | Auslagerung | Kaltstauchrichtung |
|--|--------------|--------------|--------------------------------|-------------|--------------------|
| Streckgrenze<br><i>R<sub>p0.2</sub>(QF, KS, STR, WB, BS)</i>         | ✓            | ✓            | ✓                              | ✓           | ✓                  |
| Zugfestigkeit<br><i>R<sub>m</sub>(QF, KS, STR, WB, BS)</i>           | ✓            | ✓            | ✓                              | ✓           | ✓                  |
| Bruchdehnung<br><i>A<sub>5</sub>(R<sub>m</sub>, QF, KS, WB, STR)</i> | ✓            | ✓            | ✓                              | ✓           | ✗                  |
| Leitfähigkeit<br><i>IACS(R<sub>p0.2</sub>, QF, WB)</i>               | ✓            | ✗            | ✗                              | ✓           | ✗                  |
| Bruchzähigkeit<br><i>K<sub>IC</sub>(QF, KS, STR)</i>                 | ✓            | ✓            | ✓                              | ✗           | ✗                  |
| Rissgeschwindigkeit<br><i>da/dn(QF, KS, STR)</i>                     | ✓            | ✓            | ✓                              | ✗           | ✗                  |

Abbildung 11: Übersichtstabelle der berücksichtigten Prozessrandbedingungen in den verschiedenen Materialmodellen.

Das Festigkeitsmodell wurde auf dem aus der Literatur bekannten Ansatz der Quenchfaktoranalyse in Kombination mit der Avrami-Funktion aufgebaut. Diesem Modell liegt die Theorie zugrunde, dass die beim Abschrecken entstandenen Vorausscheidungen keinen Festigkeitsbeitrag leisten und korreliert daher die Abkühlgeschwindigkeit mit dem Anteil der Vorausscheidungen bzw. der Festigkeit. Die Quenchfaktoranalyse dient dabei als alternative Methode, mit der aus einer oft nichtlinearen Abkühlkurve ein bewertbarer skalarer Wert ermittelt werden kann. Untersuchungen haben ergeben, dass die Abkühlrate innerhalb eines definierten Temperaturintervalls insbesondere bei komplexen Bauteilgeometrien nicht geeignet ist, um den Verlauf der Abkühlkurve zu ersetzen. Mithilfe der Quenchfaktoranalyse wird durch Integration der Abkühlkurvenverlauf in Relation zur C-Kurve berücksichtigt, sodass ein präziserer Wert zur Korrelation mit der Festigkeit zur Verfügung steht. Zur Berechnung des Quenchfaktors wurde für das Modell in diesem Vorhaben das Temperaturintervall von 450-200°C verwendet. Der Zusammenhang zwischen dem Quenchfaktor (QF) und Festigkeit (RP0.2) lässt sich mathematisch mittels einer Avrami-Funktion beschreiben, indem der Festigkeitsabfall zwischen einer Spannung  $\sigma_{max}$  (keine Vorausscheidung) und  $\sigma_{min}$  (maximaler Anteil Vorausscheidung) mit abnehmender Abkühlrate beschrieben wird.

Der aus der Literatur bekannte Avrami-Ansatz wurde im Rahmen dieses Vorhabens erweitert, um auch die Effekte von Kornstreckung, Kaltstauchen und Warmbehandlungsparametern abbilden zu können. Hierzu wurden aus den innerhalb von AP1.2.1.2 und AP1.2.1.5 beschriebenen Versuchen Teilmodelle abgeleitet. Diese Teilmodelle definieren den Wert von  $\sigma_{max}$  und  $\sigma_{min}$  in Abhängigkeit der Kornstreckung, des Kaltstauchgrades im Verhältnis zur Prüfrichtung sowie der Warmbehandlungstemperatur und -zeit der zweiten Auslagerungsstufe. Eine schematische Darstellung der Teilmodelle ist in Abbildung 12 zu sehen.

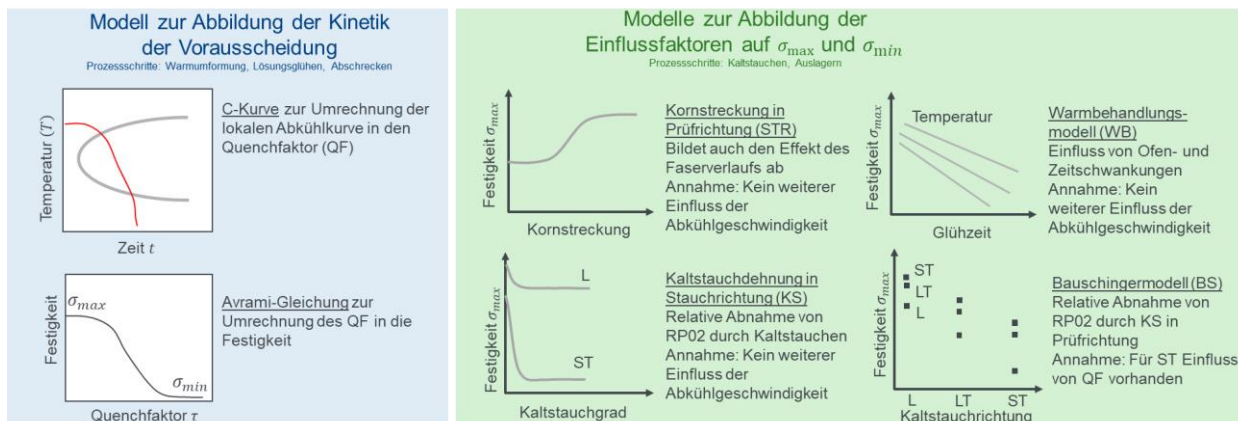


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Modellansatzes für die Festigkeitsmodelle bestehend aus dem Quenchfaktor, der Avrami-Gleichung und den Teilmodellen zur Korrektur der maximalen und minimalen Festigkeit in der Avrami-Gleichung.

Die Avrami-Gleichung wurde mit dem folgenden Ansatz erweitert:

$$R_{P02} = \exp(k1 * QF)^n * (\sigma_{max} + STR\_Modell + WB\_Modell + BS\_Modell * KS\_Modell - \sigma_{min}) + \sigma_{min}$$

Für die Zugfestigkeit wurde ein Materialmodell analog zum Streckgrenzenmodell aufgebaut. Für das Bruchdehnungsmodell wurde ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung (A5) bei schnellstmöglicher Abkühlung und der Zugfestigkeit (Rm) abgeleitet. Zusätzliche Teilmodelle wurden integriert, um den Einfluss des Quenchfaktors, der Warmbehandlungszeit, des Kaltstauchgrades und der Kornstreckung zu berücksichtigen. Ein vergleichbares Modell wurde für die Leitfähigkeit entwickelt, indem die mathematische Korrelation von Leitfähigkeit und Streckgrenze für eine schnellstmögliche Abkühlung hergestellt wurde und Teilmodelle für Quenchfaktor und Warmbehandlungszeit ergänzt wurden. Insbesondere bei 7xxx-Legierungen ist die elektrische Leitfähigkeit ein guter Indikator für den Wärmebehandlungszustand, und es existiert eine ausgeprägte Korrelation zwischen Leitfähigkeit und Festigkeit, sodass dieser Effekt für die Modellbildung genutzt werden konnte.

Bei der Modellbildung für die Bruchzähigkeit sollte auf einen gängigen Ansatz aus der Literatur zurück gegriffen werden, bei dem ein inverser Zusammenhang zwischen der Festigkeit und der Bruchzähigkeit vorausgesetzt wird. Aufgrund der komplexen Wechselwirkung der Matrixphase, der aushärtenden Phase und Vorausscheidungen mit Ausscheidungsfreien Zonen bei der Rissentwicklung konnte jedoch ein einfacher linearer Zusammenhang in Form von sinkender Bruchzähigkeit bei steigender Festigkeit nicht abgeleitet werden. Stattdessen führen zwei gegenläufige Effekte dazu, dass die Bruchzähigkeit bei hohen Abschreckraten wie erwartet mit sinkender Festigkeit steigt, bei niedrigeren Abkühlraten jedoch im Gegensatz dazu parallel zur Festigkeit wieder ansteigt. Bei geringen Abkühlraten ist möglicherweise die Belegung der Korngrenzen durch die Vorausscheidungen der dominierende Faktor, da mit zunehmendem Quenchfaktor auch die Belegung zunimmt und damit die Bruchzähigkeit abnimmt. Mit weiterhin zunehmendem Quenchfaktor bei bereits belegten Korngrenzen steigt der Anteil von Phasenfreien Zonen aufgrund der Überalterung, die die Zähigkeit der Matrix erhöhen und somit die Bruchzähigkeit wieder steigen lassen. Für die Modellbildung wurde die Bruchzähigkeit mithilfe einer quadratischen Funktion mit den Quenchfaktor korreliert. Weitere Teilmodelle wurden für den Einfluss von Kaltstauchgrad und Kornstreckung ergänzt.

Für das Rissgeschwindigkeitsmodell hat das DLR das Teilmodell für den Einfluss der Korngröße bzw. der Kornstreckung zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden die Teilmodelle für Kaltstauchgrad und Quenchfaktor von Otto Fuchs ergänzt. Da die Ergebnisse der Rissgeschwindigkeitsversuche eine komplexe Wechselwirkung des Einflusses von Kaltstauchen und Quenchfaktor aufweisen, ist die Modellgenauigkeit des aktuellen Entwurfes noch nicht hoch genug und die Vorhersagekraft noch gering. Die Rissgeschwindigkeit ist bei Probenorientierung mit Rissausbreitung transversal zur Kornstreckung bei einem Kaltstauchgrad von 0% geringer als bei kaltgestauchten Materialzuständen. Dabei ist die Differenz besonders groß für hohe Quenchfaktoren. Die höchste Rissgeschwindigkeit ist beim Materialzustand mit Kaltstauchen und hohem Quenchfaktor aufgetreten.

Die Genauigkeit der abgeleiteten Materialmodelle wurde anhand der Daten aus den Jominy-Blöcken der verschiedenen Materialzustände geprüft. In Abbildung 13 ist zu sehen, dass die Festigkeitsmodelle eine sehr hohe Genauigkeit erreichen, während das Bruchzähigkeitsmodell und Leitfähigkeitsmodell stärker streuen.

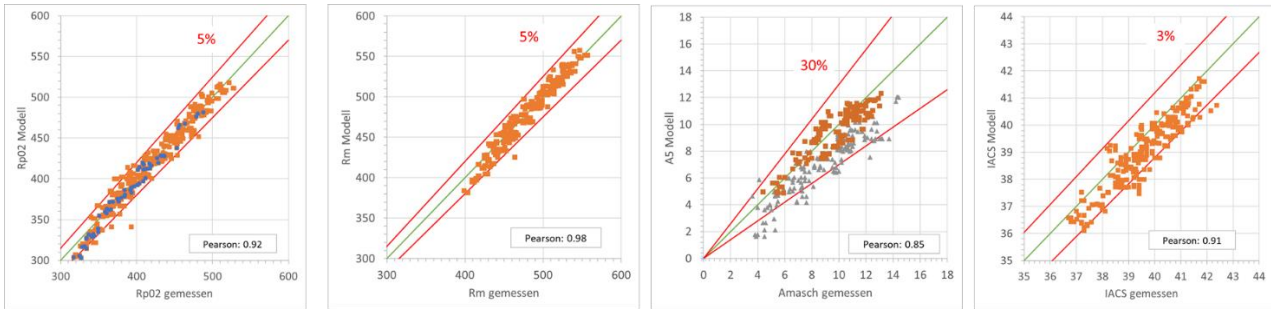


Abbildung 13: Vergleich der Zielgrößen aus Jominy-Versuchen (gemessen) und Materialmodell für Streckgrenze ( $R_{p02}$ ), Zugfestigkeit ( $R_m$ ), Bruchdehnung ( $A_5$ ) und Leitfähigkeit (IACS).

### AP1.2.2 Simulation Prozesskette/digitales Schmiedeteil

Im Rahmen dieses Unterarbeitspakets sollten die Werkstoffmodelle implementiert und die zugehörige Simulationskette aufgebaut werden. Die Simulation der Fertigungskette erfolgt in der Software Forge Version 3.4 und dient der Ermittlung der lokalen Randbedingungen als Input für die Materialmodelle. Die folgenden Größen werden für die Eigenschaftsberechnung verwendet: Kornstreckung aus dem Fertigpressen, Abkühlrate nach dem Lösungsglühen und Kaltstauchgrad beim Kaltstau- chen. In den folgenden APs werden die Ergebnisse näher betrachtet. Der Einfluss des Umformgrades beim Schmieden wurde zwar im Vorhaben experimentell untersucht, jedoch noch nicht in die Materialmodelle integriert, da bei aktuellen Serienprozessen ein Mindestumformgrad durch das Umschmieden eingebracht wird, der dazu führt, dass der Effekt des Umformgrades vernachlässigt werden kann. Eine Erweiterung z.B. des Festigkeitsmodells sollte jedoch aufgrund des modularen Aufbaus der Teilmodelle problemlos möglich sein.

Simuliert wurde die Prozessketten eines Freiformschmiededemonstrators (FFD) sowie eines Gesenkschmiedeteiles (Validator). Die Simulationsergebnisse der Materialmodelle wurden mithilfe von Labordaten dieser beiden Bauteile validiert. Neben der Validierung der mechanischen Eigenschaften war darüber hinaus auch eine Validierung der lokalen Prozessrandbedingungen erforderlich, um eine Fehlerfortpflanzung auf die mechanischen Eigenschaften beurteilen zu können. Hierzu wurden die Messerergebnisse aus den Thermoelementmessungen und den Geometrieprüfungen während der Fertigung für ausgewählte Positionen am Bauteil verwendet. Die Materialmodelle wurden zunächst an den Ergebnissen eines Freiformschmiedeblockes validiert, da hier die Randbedingungen weniger inhomogen sind, im Vergleich zu dem Strukturbauteil.

#### AP1.2.2.1 Gießen: Simulation Gussgefüge

Die Gussimulation wurde im Rahmen des Vorhabens nicht mehr betrachtet, da das Gussgefüge in den Stranggussstützen homogen und equaxial waren, sodass hier keine spezielle Kornform als

Input für die Schmiedesimulation berücksichtigt werden musste. Das Gussgefüge wurde anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen, wie in Abbildung 14 dargestellt, überprüft.

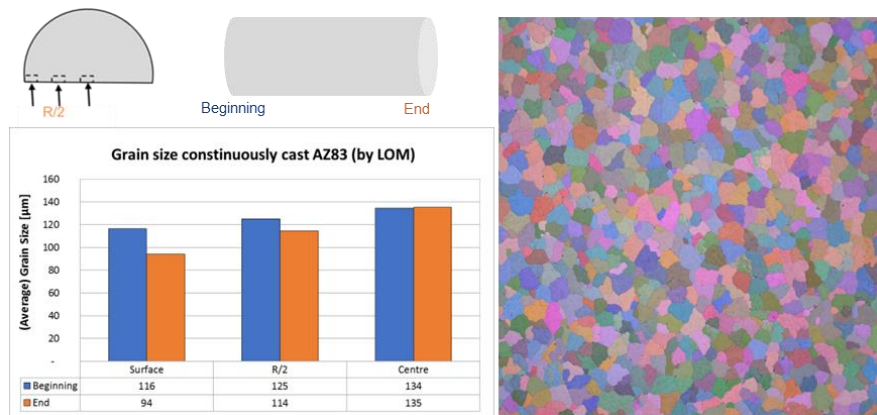


Abbildung 14: Korngrößen aus verschiedenen Bereichen eines 7010 Gussstutzens (links) und ein Mikrostrukturbild (rechts) aus dem Gussstutzen, in dem die globularen Körner erkennbar sind.

### AP1.2.2.2 Schmieden: Freiform-, Gesenkteile

Wie bereits in AP1.2.1.2 beschrieben, wurde das Freiformschmieden sowohl bei dem FFD als auch das Vormaterial für das Gesenkschmieden nicht mit der FE-Simulation simuliert. Stattdessen wurde das Excel-Tool verwendet und auf Basis der Schmiedepläne eine homogene mittlere Kornstreckung für die drei Raumrichtungen der Schmiedeblöcke berechnet. Die Kornstreckung der beiden Bauteile ist in Abbildung 15 dargestellt. Im Fall des Freiformschmiedeblockes ist diese Ausgangskornstreckung auch der Input für die Materialmodelle, da keine weitere Umformung stattfindet. Die Verwendung einer mittleren Kornstreckung für das gesamte Volumen ist eine Vereinfachung, die den Gradienten der Umformung im Schmiedeblock vernachlässigt. Im Falle des Festigkeitsmodells ist diese Vereinfachung akzeptable, da die Festigkeitssteigerung durch die Kornstreckung bei  $\pm 20$  MPa liegt. Bei anderen Materialmodellen mit einer höheren Sensitivität für die Kornstreckung, wie z.B. der Rissgeschwindigkeit, muss diese Vereinfachung bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

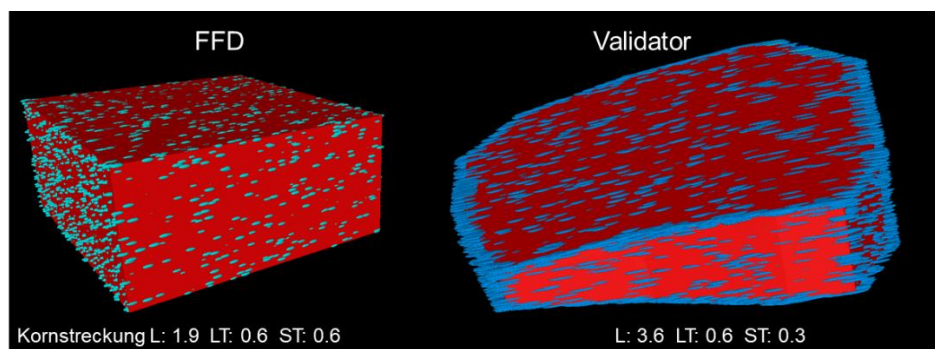


Abbildung 15: Mit dem Excel-Tool berechnete Kornstreckung nach dem Freiformschmieden, dargestellt mit der Forge Kornstreckungs-Subroutine, für den Freiformschmiedeblock (links) und als Ausgangsstreckung für das Gesenkschmieden (rechts).

Im Prozessschritt Gesenkschmieden wird die zusätzliche Kornstreckung durch das Gesenkschmieden durch die FE-Simulation abgebildet, dabei wird die aus dem Excel-Tool berechnete mittlere Kornstreckung als Input für die Subroutine verwendet. Hierbei wird die in AP1.2.1.2 beschriebene GrainFlow Subroutine in Forge verwendet. Als Ergebnis stehen Kontur-Plots der Kornstreckung in X, Y und Z-Richtung und eine 3D Darstellung der Ellipsoiden in Forge zur Verfügung. Die Validierung der Kornstreckungssimulation erfolgte anhand von Mikro- und Makroschliffen des Validatorbauteiles. Auf dem Makro in Abbildung 16 erkennbare Fließlinienzeigen zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Verlauf der Kornstreckung in dem Schnitt des Simulationsmodells.

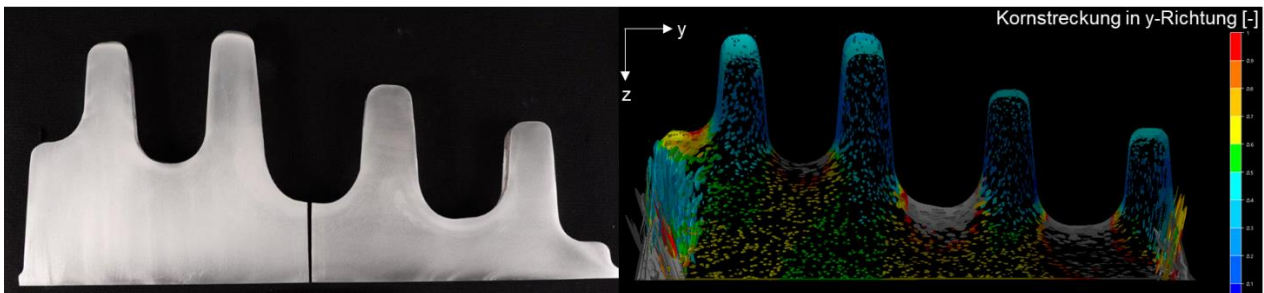


Abbildung 16: Makroschliff mit Faserverlauf aus dem Validatorbauteil (links) und Darstellung des Faserverlaufes und der Kornstreckung mithilfe der Kornstreckungs-Subroutine in Forge (rechts).

### AP1.2.2.3 Lösungsglühen, Abschrecken & Kaltstauchen: Simulation Abkühlkurven & Eigenstressungen

Die Abschrecksimulation wurde sowohl für den Freiformschmiedeblock als auch für das Validatorbauteil durchgeführt. Für die Abschrecksimulation können sogenannte Point-Trackings für einzelne Elemente definiert werden, sodass der Temperaturverlauf beim Abschrecken mit den Ergebnissen von Thermoelement-Messungen aus dem Versuch abgeglichen werden können. Darüber hinaus wurde im Vorhaben eine Subroutine zur Berechnung des Quenchfaktors zwischen 450°C und 200°C in der Software Forge implementiert. Die Ergebnisse des Quenchfaktors können dadurch wie in Abbildung 17 als Konturplot ausgegeben werden. Der Quenchfaktor liegt in der Simulation zwischen einem Wert von 0 und 60. Die höchsten Werte vom Quenchfaktor sind erwartungsgemäß im Bereich des größten Volumens zu finden. Der Vergleich der berechneten Quenchfaktoren aus Simulation und Versuch zeigen in einigen Messpunkten eine gute Übereinstimmung (grüne Punkte) jedoch in anderen Bereichen eine schlechte Übereinstimmung. Ursache für die schlechte Übereinstimmung können gelöste Thermoelemente im Versuch sein oder abweichende Wärmeübergänge in der Simulation aufgrund von nicht berücksichtigter Dampfblasenbildung im Versuch.

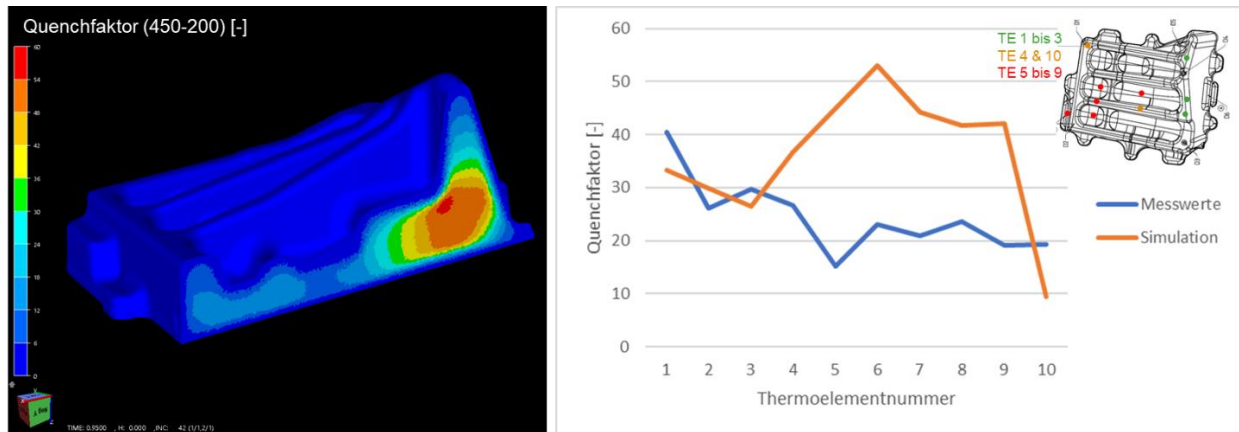


Abbildung 17: Darstellung der Quenchfaktorverteilung über den Bauteilquerschnitt aus der FE-Simulation (links) und Vergleich der berechneten Quenchfaktoren aus den Abkühlkurven aus Thermoelementen im Versuch (Messwerte) und der FE-Simulation (rechts).

Für das Kaltstauchen des Validatorbauteiles wurde ein Soll-Wert von 2,5% verwendet. Die daraus resultierende Verteilung des Kaltstauchgrades bzw. der Kaltstauchdehnung ist in Abbildung 18 dargestellt und liegt zwischen 0 und 6%. Die höchste Kaltstauchdehnung ist in den Rippen und am Boden der mittleren Tasche des Bauteiles zu finden. Der Abgleich mit dem Versuch zeigt einen ähnlichen Trend in Versuch und Simulation. Allerdings können Abweichungen durch eine ungenaue Messung oder einer Schräglage des Bauteiles in der Presse verursacht werden.

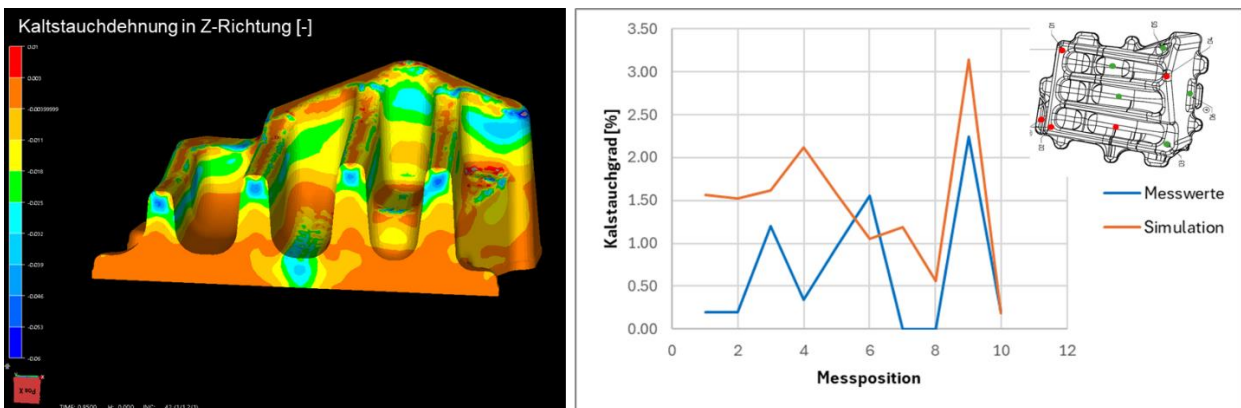


Abbildung 18: Darstellung der Verteilung der Kaltstauchdehnung in Stauchrichtung über den Querschnitt aus der FE-Simulation (links) und Abgleich des Kaltstauchgrades aus Versuch (Messwerte) und FE-Simulation (rechts)

Die Eigenspannungen werden durch die Prozessschritte Abschrecken, Kaltstauchen und Warmauslagern beeinflusst und wurden am Ende der Simulationskette mit den Messwerten aus der Bohrlochmethode verglichen. Die Eigenspannungen dienen als Grundlage zur Bewertung des Verzuges während der spanenden Bearbeitung und sind daher eine relevante Prozessgröße für Airbus, um die spanende Bearbeitung auszulegen. Die Eigenspannungen aus Versuch und Simulation zeigen einen vergleichbaren Trend in Abbildung 19. Die Abweichungen können durch die Vernachlässigung des Kriechens während der Warmauslagerung in der Simulation entstehen.

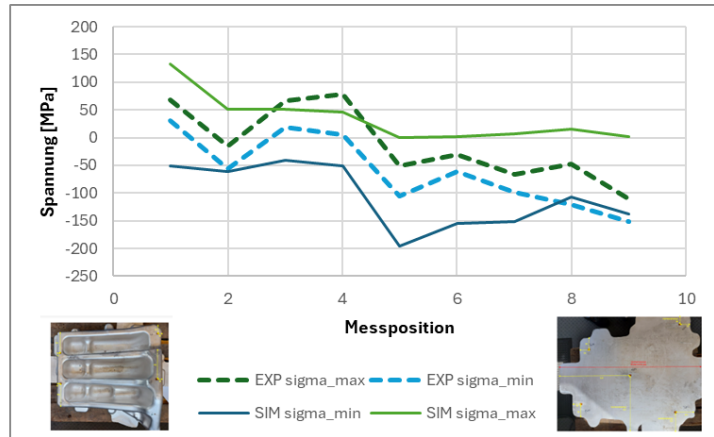
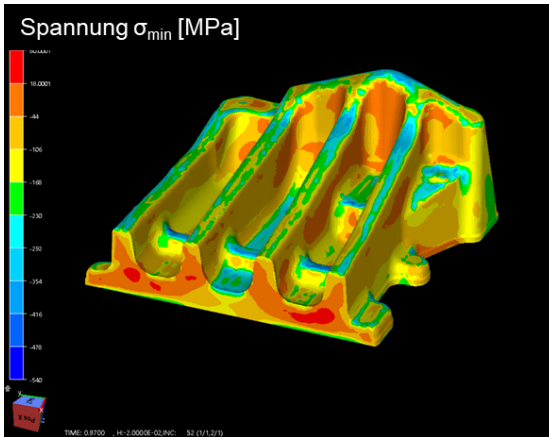


Abbildung 19: Darstellung der Verteilung der Eigenspannungen über den Bauteilquerschnitt (links) und Abgleich der gemessenen (EXP) Eigenspannungen mit den simulierten (SIM) Eigenspannungen (rechts).

### AP1.2.2.4 Modelloptimierung & Implementierung: Implementierung aller Vorhersagemodelle

Eine Übersicht der Simulationskette mit den enthaltenen Prozess- und Materialmodellen ist in Abbildung 20 dargestellt. Die in AP 1.2.1 entwickelten Materialmodelle für die Festigkeit, Risszähigkeit, Rissgeschwindigkeit und Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Prozessrandbedingungen wurde von Otto Fuchs als Subroutine in die FE-Prozesssimulation in Form eines Postprocessors implementiert.

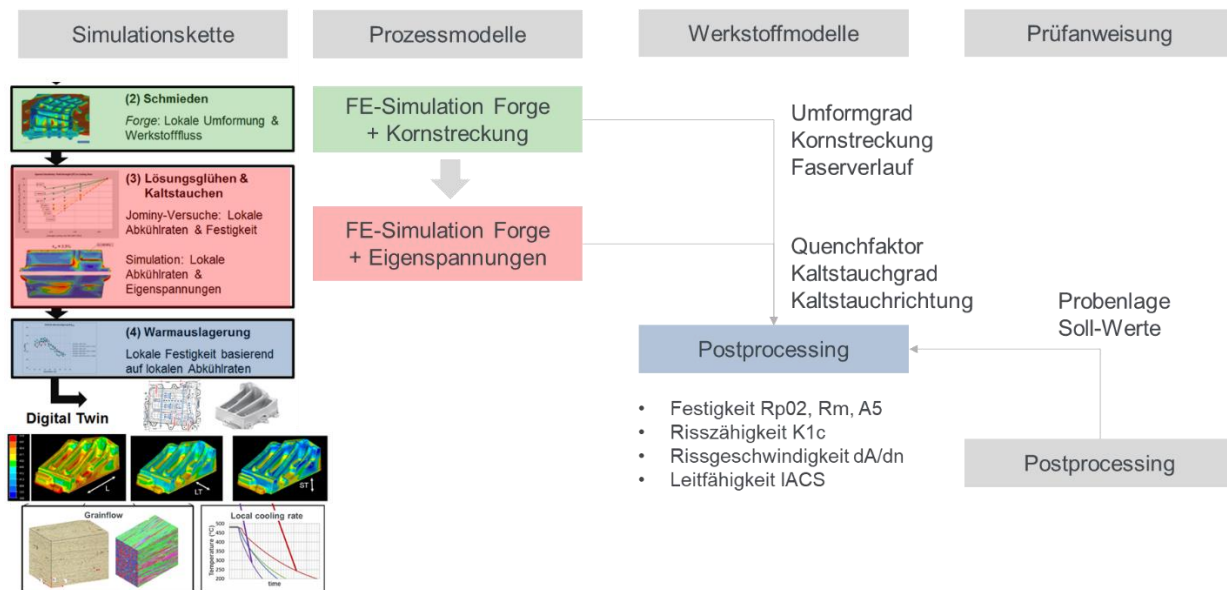


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Simulationskette, bestehend aus Prozessmodellen und Werkstoffmodellen.

Um die lokalen Eigenschaften vorherzusagen, werden elementweise die Prozessrandbedingungen Quenchfaktor, Kaltstauchgrad und Kornstreckung des letzten Prozessschrittes eingelesen. Darüber hinaus wurden die Gleichungen und Modellparameter der Materialmodelle implementiert und die Ausgabegrößen für die Konturplots definiert. Die Ausgabegrößen werden aufgrund der Anisotropie des Werkstoffes für alle drei Raumrichtungen ausgegeben. Die einzelnen Ausgabewerte in

X, Y oder Z-Richtung entsprechen z.B. einer Zugprüfung an der ausgewählten Bauteilposition in die Richtung L, LT oder ST, die in der Prüfanweisung anhand der äußeren Kontur des Bauteiles definiert ist.

Dadurch, dass die Kornstreckung für einen Materialpunkt jeweils einen Wert in jede Raumrichtung besitzt, war es möglich das anisotrope Werkstoffverhalten über die Materialmodelle abzubilden. Insbesondere bei Gesenkschmiedeteilen weicht die Richtung der stärksten Streckung der Körner lokal häufig von der anhand der Außenabmessungen definierten L, LT und ST Richtung ab. Durch die Betrachtung der Ausrichtung der längsten Kornachse für jedes einzelne Element, wird eine lokal individuelle Definition von L, LT und ST für jeden Materialpunkt vorgenommen. Ein Konturplot der lokalen Ausrichtung der längsten Kornachse ist in Abbildung 21 zu sehen. Eine vergleichbare Bewertung erfolgt, um lokal die Richtung der höchsten Kaltstauchdehnung zu ermitteln, da die Untersuchungen in AP1.2.1.1 ergeben hatten, dass die relative Lage von Kaltstauchrichtung und Prüfrichtung einen großen Einfluss auf die Streckgrenze besitzt. Der entsprechende Konturplot ist ebenfalls in Abbildung 21 zu sehen.

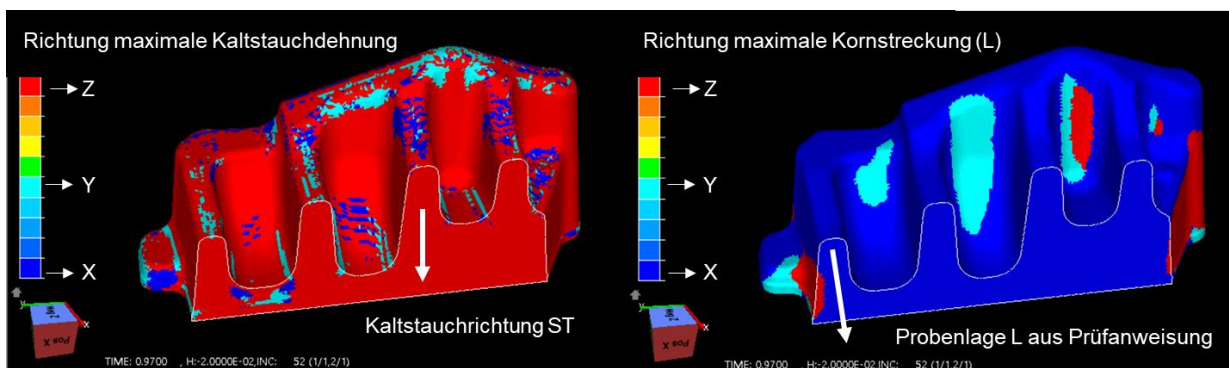


Abbildung 21: Darstellung der Richtung der maximalen Kaltstauchdehnung im Vergleich zur Kaltstauchrichtung (links) und der Richtung der maximalen Kornstreckung im Vergleich zur definierten Probenlage L aus der Prüfanweisung (rechts).

Die im Rahmen des Vorhabens interessanten Probenlagen wurden in AP1.2.1.1 anhand der Zeichnung der finalen Bauteilkontur definiert und die Koordinaten zu einem Referenzkoordinatensystem gemessen. Diese Koordinaten wurden als Sensor-Positionen für Point-Trackings in Forge eingeladen. Im Anschluss an die Simulation konnten für die Sensoren sämtliche Ergebniswerte der Materialmodelle für die drei Raumrichtungen, die lokalen Randbedingungen sowie einige Kontrollgrößen ausgegeben werden. Die weitere Bearbeitung der Sensordaten erfolgte mithilfe von Python-Skripten. Hier wurde z.B. der relevante Zeitschritt aus den zeitabhängigen Daten und die relevante Prüfrichtung für die entsprechende Position ausgefiltert.

### AP1.2.2.5 Validierung: Werkstoffeigenschaften & Zerspanungsstrategie

Für die erste Stufe der Validierung der Materialmodelle wurde der Freiformschmiedeblock gewählt, da dieser vergleichsweise einfachen Randbedingung unterliegt, die auch über das Bauteil verteilt in etwa den Soll-Vorgaben entsprechen, bzw. die Gradienten der Randbedingungen auch ohne unterstützende FEM-Rechnung anschaulicher vorstellbar sind. Hierfür wurden entlang von zwei Positionen am Block (Mitte & Rand) die lokalen Randbedingungen (Kaltstauchgrad & Quenchfaktor & homogene Kornstreckung) von zwei Pfaden aus der FE-Simulation exportiert und als Inputgrößen für die Materialmodelle verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt. Mithilfe des Festigkeitsmodells konnte der experimentell beobachtete Festigkeitsabfall aufgrund von steigendem Kaltstauchgrad und Quenchfaktor von der Oberfläche zur Mitte des Schmiedeblockes gut abgebildet werden. Insbesondere die Vorhersage der Festigkeitsverhältnisse zwischen den verschiedenen Prüfrichtungen am Block (L, LT, ST) aufgrund der Kornstreckung und dem Einfluss von Kaltstauchrichtung zu Probenlage sind nun mit dem Modell gut vorhersagbar. Bei den Modellen von Bruchdehnung und Bruchzähigkeit sind die richtigen Trends zu erkennen, jedoch gibt es noch stärkere Abweichungen zwischen Modell und Versuch. Eine Ursache könnte hier die stärkere Sensitivität der Modelle gegenüber der Kornstreckung sein, die für den Schmiedeblock vereinfachend als homogen angenommen wurde.

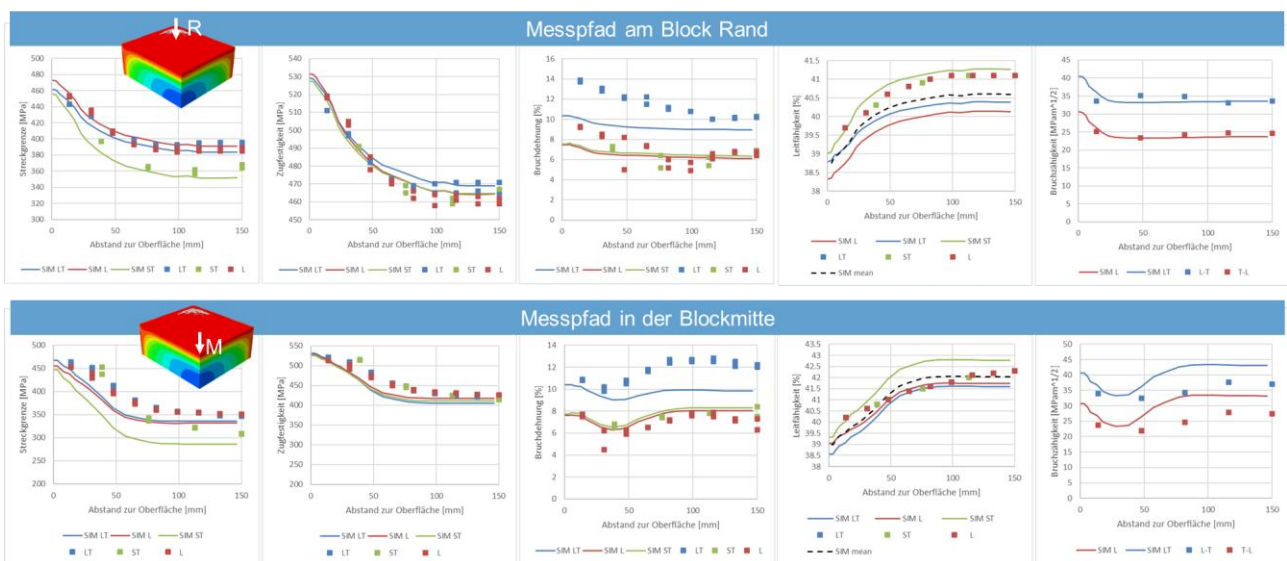


Abbildung 22: Vergleich der Simulationsergebnisse der verschiedenen Materialmodelle aus dem digitalen Zwilling des Freiformschmiedeblockes mit den Messergebnissen für einen Messpfad am Blockrand (oben) und in der Blockmitte (unten).

Für die Validierung der Materialmodelle für den komplexen Fall des Schmiedebauteiles wurden die Daten der Sensoren Point-Trackings verwendet. Der Abgleich der Ergebnisse der beiden Festigkeitsmodelle für Streckgrenze und Zugfestigkeit in Abbildung 23 geben die Festigkeitsschwankun-

## ATON

gen innerhalb des Bauteiles gut wieder. Auch hier wurden Zugproben in verschiedenen Raumrichtungen geprüft. Da die Festigkeitsmodelle bei dem Abgleich mit den Jominy-Blöcken eine sehr gute Übereinstimmung gezeigt haben, ist davon auszugehen, dass die verbleibenden Abweichungen zwischen Modell und Versuch bei dem Validatorbauteil eher aus mangelnder Genauigkeit der simulierten Randbedingungen stammen.

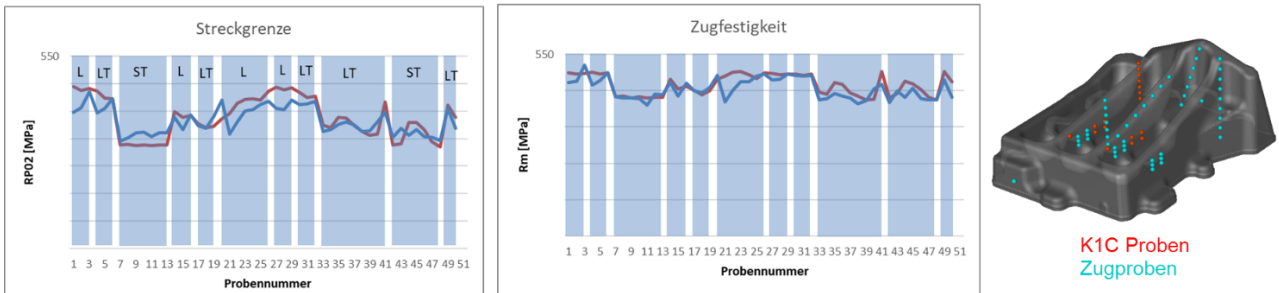


Abbildung 23: Vergleich der Simulationsergebnisse (rot) der Festigkeitsmodelle Streckgrenze (links) und Zugfestigkeit (Mitte) aus dem digitalen Zwilling des Validatorbauteiles mit den Messergebnissen (blau) für die rechts dargestellten Prüfpositionen.

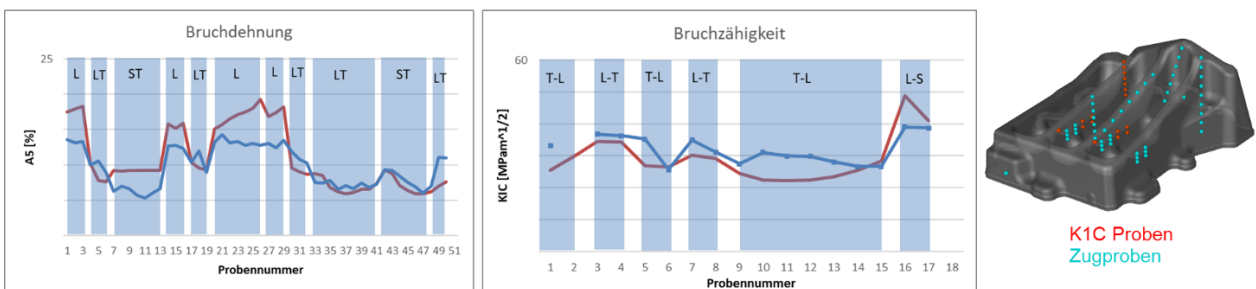


Abbildung 24: Vergleich der Simulationsergebnisse (rot) der Materialmodelle Bruchdehnung (links) und Bruchzähigkeit (Mitte) aus dem digitalen Zwilling des Validatorbauteiles mit den Messergebnissen (blau) für die rechts dargestellten Prüfpositionen.

Im Gegensatz dazu können zwar die Trends für Bruchdehnung und Bruchzähigkeit mit dem Modell abgebildet werden, aber die Abweichungen zum Versuch sind in einigen Positionen in Abbildung 24 noch sehr hoch. Hier ist für präzise Ergebnisse eine weitere Überarbeitung der Modelle erforderlich, da schon der Abgleich mit den Jominy-Blöcken gezeigt hat, dass die Genauigkeit von den Materialmodellen gering ist.

Mithilfe der bei der Firma Imprintec im Unterauftrag durchgeführten Härtemessungen in Abbildung 25 sollte ein neues Messverfahren zur Ermittlung von Streckgrenze und Zugfestigkeit etabliert werden, dass eine örtlich höhere Auflösung besitzt als der klassische Zugversuch.

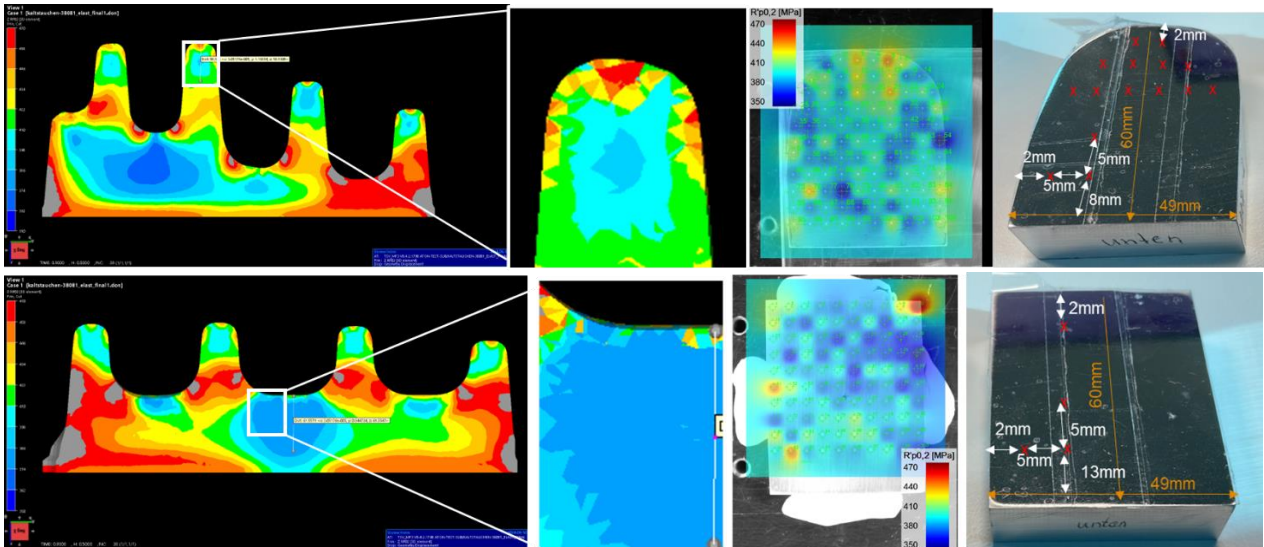


Abbildung 25: Verteilung der Streckgrenze innerhalb der Makro-Querschnitte des Validatorbauteiles (links) und Festigkeitsverteilung berechnet aus den Härteeindrücken für die L-Richtung (rechts).

Mithilfe von Forge können die Eigenspannungen des bearbeiteten Bauteiles ermittelt werden und daraus der Verzug berechnet werden. Mit der Software GOM Inspect war es möglich, den Verzug darzustellen und eine potentielle geometrische Abweichung der IST-Geometrie zur Soll-Geometrie nach der spanenden Bearbeitung zu beurteilen. Bei dem betrachteten Validator in Abbildung 26 sind im Wesentlichen die Spannlaschen von dem Verzug betroffen sowie die im Bild oben rechts dargestellte gelb eingefärbte Kante des Bauteiles. Innerhalb des Vorhabens wurde der Verzug lediglich zum Ende des Zerspannungsprozesses (einmaliges Einspannen) bewertet. Perspektivisch besteht jedoch die Möglichkeit diese Eigenspannungsverteilung als Datensatz an Airbus zu übermitteln, sodass der Verzug während mehrstufiger Zerspannungsvorgänge ggf. mit Umspannen der Bauteile simuliert werden kann. Die Validierung des Verzuges anhand von Zerspannungsversuchen bei Airbus hat innerhalb des Projektes nicht stattgefunden, da auf Grund der relativ großen Wandstärke des Bauteils nur geringfügige Verzüge entstehen, die bei der Zerspannung keine Probleme bereiten.

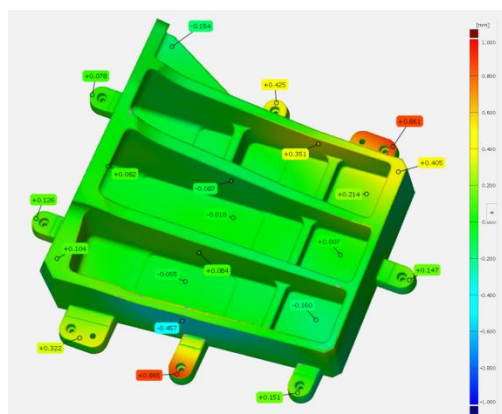


Abbildung 26: Darstellung des Verzugs nach der spanenden Bearbeitung aufgrund von Eigenspannungen im Validatorbauteil.

**AP1.2.2.6 Definition Datenformat: Airbus, Aleris, OTTO FUCHS**

Für die Definition der Datenformate für den Datenaustausch zwischen Otto Fuchs und Airbus, bzw. dem DLR als unterbeauftragter Forschungspartner, wurde zunächst eine Übersicht der geplanten Simulationskette und der auszutauschenden Daten erstellt. Übertragen werden sollen die Daten aus der FE-Simulation von Otto Fuchs aus der Software Forge (Kornstreckung, Eigenspannung, mechanische Eigenschaften) auf die Rissfortschrittsberechnungen beim DLR mit der Software Ansys. Die Übertragung erfolgte im Projekt am Beispiel der Modellgröße „lokale Kornstreckung“ für jedes Element in alle drei Raumrichtungen, die gemeinsam mit der Information der zugehörigen Knotenkoordinaten übertragen werden sollte. Die FE-Simulationsergebnisse konnten mithilfe des \*.unv Formates in ein universell einlesbares Datenformat aus der Software Forge exportiert werden. Das universelle Datenformat ist nach einer Transformation mit einem Python Skript einlesbar in der Software Paraview und ermöglicht daher die Darstellung der Ergebnisse für die Projektpartner unabhängig von der Software Forge. Neben den Dateiformat mussten noch weitere Herausforderungen der Schnittstelle FE-Simulation und Bruchmechaniksimulation gelöst werden. Zum Beispiel war es erforderlich die Koordinatensysteme des Datensatzes aus der FE-Simulation in Einklang mit dem Koordinatensystem „Flugzeugkoordinatensystem“ von Airbus zu bringen.

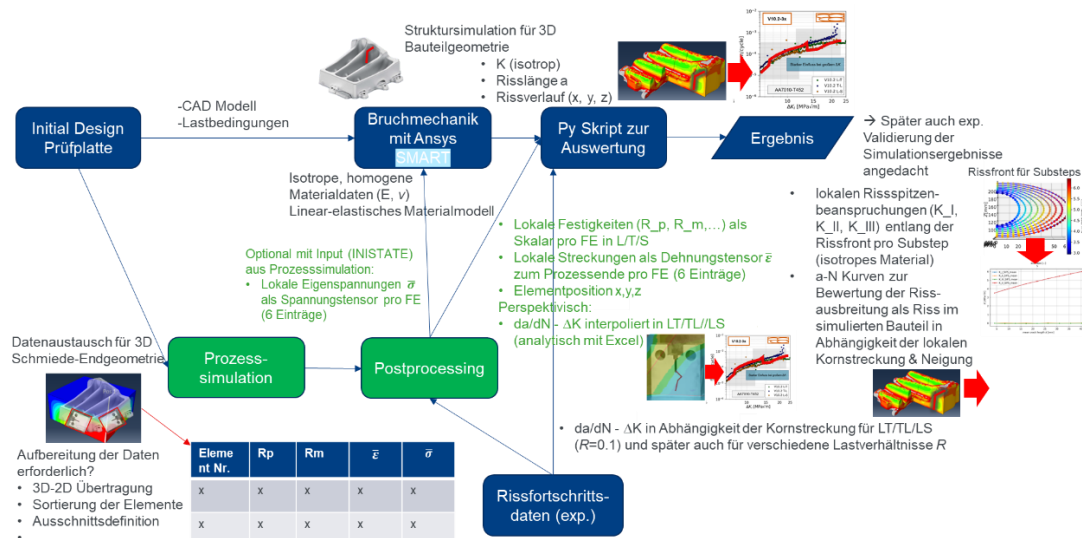


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Schnittstellen und der Datenübertragung mit Airbus und DLR zur Simulation der Rissfortschrittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des lokalen Faserverlaufes.

Während die mechanischen Belastungen bei Airbus in Simulationen mit Bauteillagen relativ zur Einbauposition im Flugzeug durchgeführt werden, erlaubt die auf Schmiedesimulation spezialisierte Software Forge lediglich die Definition der Z-Achse in Schmiederichtung. Beim DLR wurde daher eine Koordinatentransformation durchgeführt, die die Koordinatensysteme in Übereinstimmung gebracht hat, sodass die Eigenschaften auf das Ansys Elementenetz gemappt werden konnten. Darüber hinaus werden die Eigenschaften gemittelt für ein Element für dessen „Mittelpunkt“ in

der Universalformat ausgegeben, sodass für die weiterverarbeitende Software die Zuordnung von Element, Knoten und Elementeigenschaft eindeutig sein muss. Eine schematische Darstellung der Schnittstellen ist in Abbildung 27 zu finden.

## AP2.1 Komplexe Strukturen

Ziel dieses Unterarbeitspaketes ist der Nachweis der Leistungsfähigkeit des Digitalen Schmiedeteils am Beispiel einer neu zu konstruierenden Unterstruktur aus dem Türumgebungsbereich. Dieser Nachweis erfolgte in enger Abstimmung mit Airbus.

### AP2.1.1.1 Definition Exploratorbauteil/-baugruppe: Auswahl & Integralteil-Design

Bei Airbus wurde ein Strukturbauteil unterhalb des Türbereiches als Explorator ausgewählt, um den Auslegungsprozess mithilfe des digitalen Zwillings anhand eines Integralschmiedeteiles zu demonstrieren. Das Integralschmiedeteil, dargestellt in Abbildung 28, zeichnet sich dadurch aus, dass aus mehreren genieteten Einzelteilen ein integrales Schmiedeteil konstruiert wird. Auf Basis der Bauteilzeichnung von Airbus wurde bei Otto Fuchs die Rohteilgeometrie ausgelegt und ein Spannkonzep für die spanende Bearbeitung vorgeschlagen, bei dem anstelle der für den Schmiedeprozess ungünstigen Spannlaschen alternativ Spanntaschen (rot in Abbildung 28) in das Rohteil integriert werden. Während das Rohteil mit den Spanntaschen fixiert wird, gibt es mehrere Auflagepunkte über das Bauteil verteilt, die die Ausrichtung des Bauteiles während des Umspannens definieren.

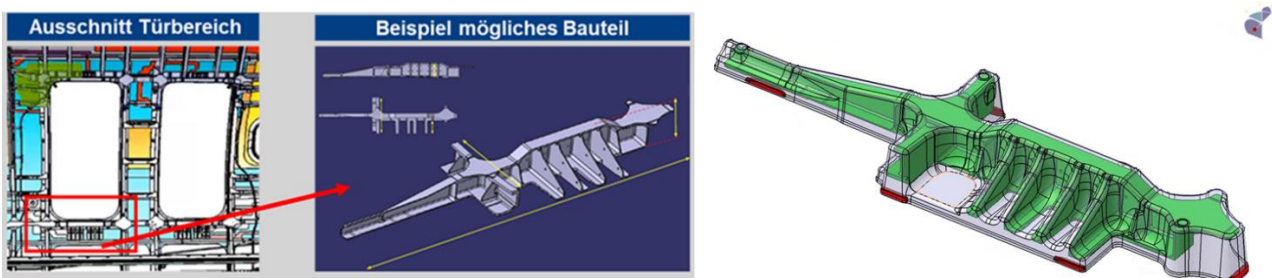


Abbildung 28: Position und Abbildung des Exploratorbauteiles aus dem Türbereich (links) und Darstellung des von Otto Fuchs ausgelegten Rohteils (rechts).

### AP2.1.1.2 Erzeugung des Digitalen Schmiedeteils: Simulation der Fertigungsroute

Für die Simulation der in Abbildung 29 dargestellten Fertigungsroute wurde auf die in AP1.2 beschriebenen Methoden zurückgegriffen. Die initiale Kornstreckung nach dem Freiformschmieden wurde mithilfe des Excel-Tools anhand des Schmiedeplanes ermittelt und als konstanter Wert für das gesamte Bauteil vorgegeben. Die weitere Kornstreckungssimulation erfolgte mit der Forge

Subroutine GrainFlow und der Quenchfaktor wurde mit der Erweiterung der Abkühl-Subroutine ermittelt. Die mechanischen Eigenschaften wurden letztendlich mit den in AP1.2.2.4 implementierten Materialmodellen berechnet.

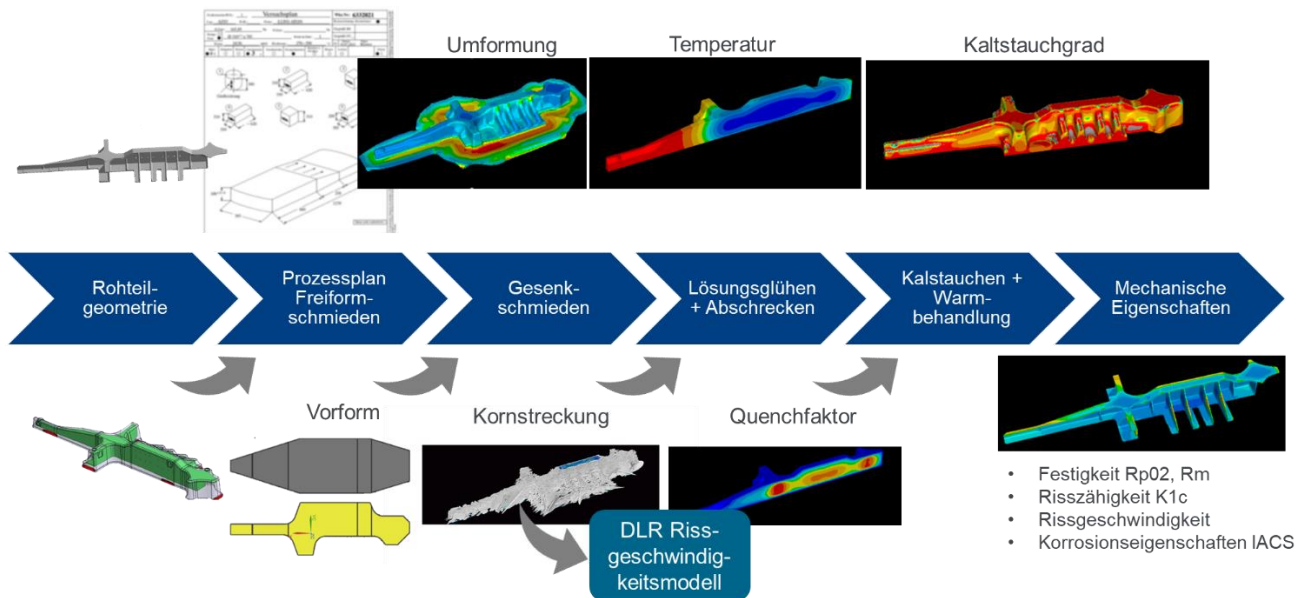


Abbildung 29: Schematische Darstellung der Simulationskette des Exploratorbauteiles.

### AP2.1.1.3 Variantensimulation: Überdeckendes Freiform-/Gesenkschmiedeteil / Genau- pressteil

Die Variantensimulation für Freiform- und Gesenkschmiedebauteil wurde in dem Vorhaben bereits für das Validatorbauteil durchgeführt, da der Freiformschmiedeblock ebenfalls als Rohteil für das Validatorbauteil dienen kann. Alternativ wurde für das Exploratorbauteil die Prozesskette mit und ohne Kaltstauchschritt durchgerechnet und der Einfluss auf Festigkeit, Leitfähigkeit und Bruchzähigkeit bewertet und in Abbildung 30 dargestellt. Durch den zusätzlichen Prozessschritt Kaltstauchen wird die Festigkeit im Bauteil gesenkt, die Leitfähigkeit minimal erhöht und die Bruchzähigkeit steigt leicht an.

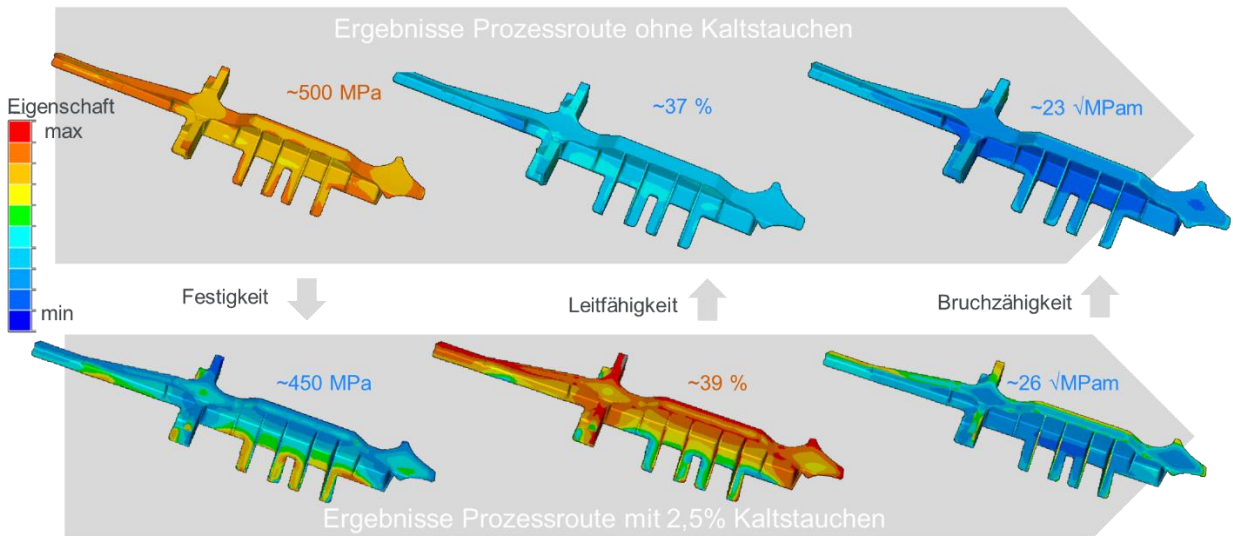


Abbildung 30: Berechnung der Eigenschaftsänderung mithilfe des digitalen Zwillings bei der Prozessroute ohne Kaltstauchen (oben) im Vergleich zu der Prozessroute mit 2,5% Kaltstauchen (unten).

Der Verlust in der Festigkeit um ca. 50 MPa wird akzeptiert, da sich gleichzeitig, wie in Abbildung 31 erkennbar, die Eigenspannungen durch das Kaltstauchen reduzieren lassen. Während bei dem Prozess ohne Kaltstauchen Eigenspannungen von über 130 MPa auftreten, werden diese durch das Kaltstauchen in den meisten Bauteilbereichen auf 50 MPa gesenkt und reduzieren dadurch erheblich den Verzug bei der Zerspanung. Mithilfe des digitalen Zwillings kann zukünftig ein Optimum zwischen den Eigenspannungen und den mechanischen Eigenschaften identifiziert werden.

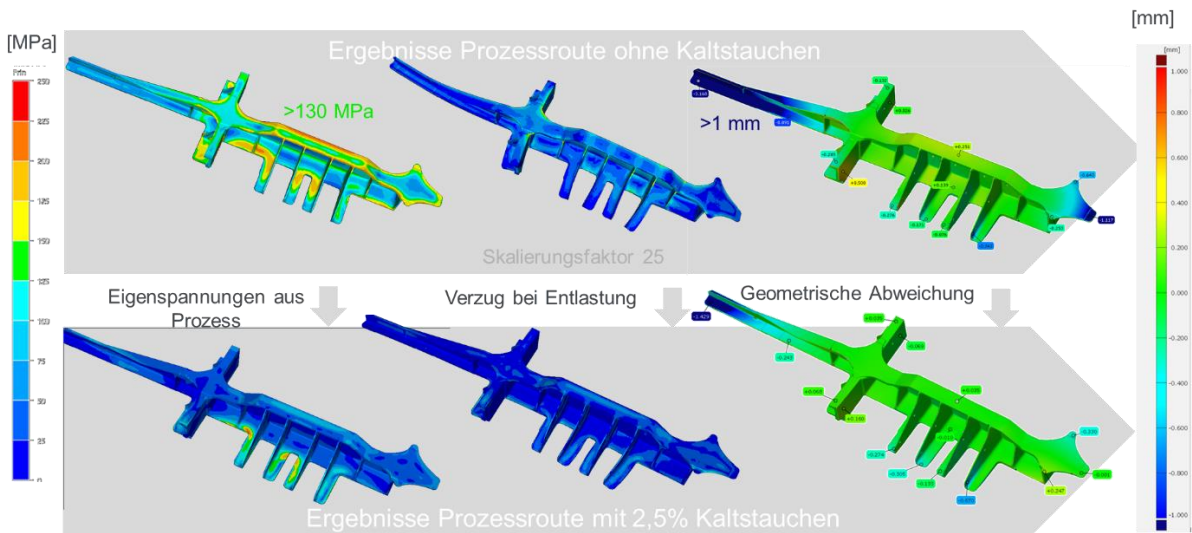


Abbildung 31: Berechnung der Eigenspannungsänderung und des Verzuges mithilfe des digitalen Zwillings bei der Prozessroute ohne Kaltstauchen (oben) im Vergleich zu der Prozessroute mit 2,5% Kaltstauchen (unten).

### AP2.1.1.4 Optimierung: In Abstimmung mit Airbus

Da der Kaltstauchgrad ein sehr starker Einflussfaktor auf die Festigkeit darstellt, können geringe Geometrieänderungen an dem Schmiederohrteil einen großen Einfluss auf die Festigkeitsverteilung im finalen Bauteil haben. Wird für das Kaltstauchen der in Abbildung 32 dargestellte Rohling verwendet, der um 2,5% gleichmäßig größer ist als das finale Schmiedeteil, können bei der Verteilung der Kaltstauchdehnung lokale Maxima von bis zu 5% Kaltstauchdehnung beobachtet werden.

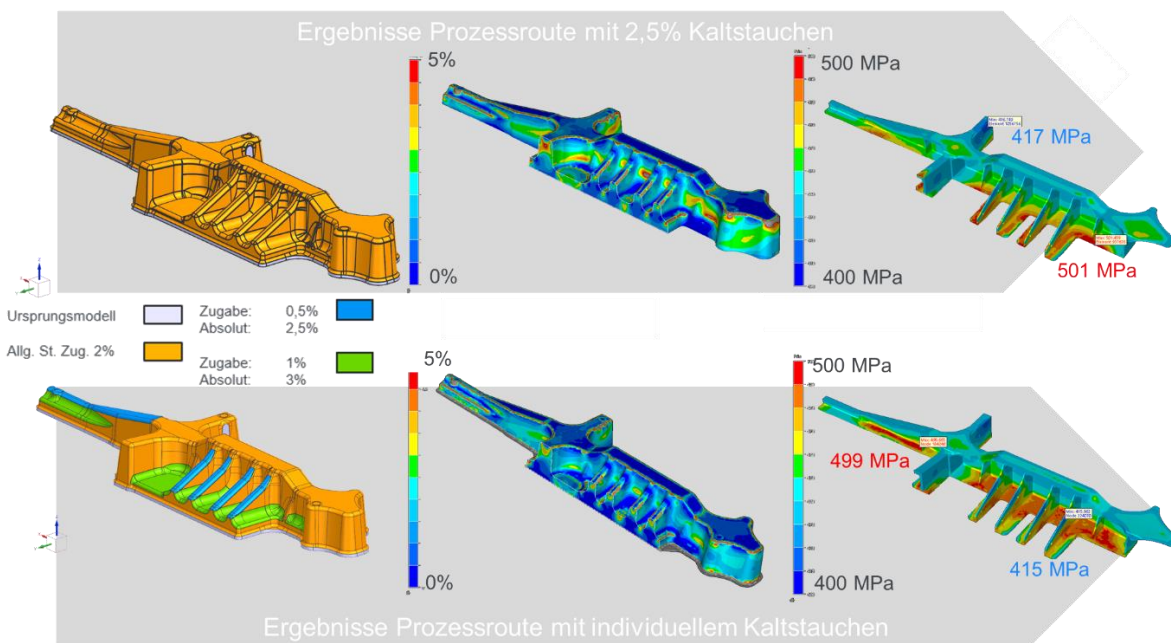


Abbildung 32: Darstellung der Kaltstauchdehnungs- und Festigkeitsverteilung im Bauteil für die Prozessroute mit konstanter Bauteilaufdickung von 2,5% für das Kaltstauchen (oben) und individuell angepasster Aufdickung (unten).

Wird stattdessen der Rohling für das Kaltstauchen individuell angepasst, können die Maxima in der Kaltstauch-Dehnungsverteilung reduziert werden. Mit Blick auf die Festigkeitsverteilung im finalen Bauteil für die beiden Kaltstauchstrategien ist erkennbar, dass die minimale und maximale Festigkeit sich nicht unterscheiden, jedoch aber die Verteilung der Festigkeit innerhalb des Bauteiles unterschiedlich ist. Bei der individuellen Kaltstauchstrategie nehmen die Bereiche mit höherer Festigkeit zu. Der individuelle Kaltstauchgrad ist demnach eine geeignete Strategie, um die Festigkeitsverteilung im Bauteil gezielt beeinflussen zu können.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Personalaufwand: Zur Durchführung der Versuche, der Entwicklung der Materialmodelle und der Implementierung der neuen Simulationsmethodik war der Einsatz von hochqualifiziertem und erfahrenem Personal erforderlich. Die Versuchsplanung und -betreuung der Schmiede- und Laborversuche erfolgte im Wesentlichen durch die OTTO FUCHS Mitarbeiter aus dem Laborbereich. Weitere Mitarbeiter aus den Laboren und Betrieben haben die Arbeiten unterstützt. Die Ableitung der Materialmodelle erfolgte durch Dr.-Ing. Angela Quadfasel und Dr.-Ing. Thomas Witulski. Für die Prozesssimulation und die Anpassung der FE-Software Subroutinen waren Mitarbeiter aus der Entwicklungsabteilung tätig.

Innerbetriebliche Kosten: Im Rahmen der Schmiedeversuche und der umfangreichen Materialcharakterisierung fielen erhebliche Materialkosten, Anlagenkosten und Kosten für Probenfertigung sowie die Herstellung von Vorrichtungen an. Weiterhin entstanden Kosten für die Einbringung von zahlreichen Thermoelementen sowie interne Prüfkosten für die mechanischen Prüfungen.

FE-Fremdleistungen: Im Rahmen des Projektes wurde das Institut für Bildsame Formgebung (IBF) unterbeauftragt, um die Forge-Subroutine GrainFlow zu testen, neue Funktionen zu implementieren und auf das Anwendungsbeispiel der gestauchten Platten anzuwenden, um die lokale Kornstreckung im Schmiedeblock mithilfe der Simulation zu ermitteln.

Darüber hinaus wurde die Firma Imprintec beauftragt mithilfe einer inversen Simulation von Härteindrücken das anisotrope Verfestigungsverhalten ausgelagerter 7010 Legierung zu bestimmen. Die Methode wurde innerhalb des Projektes erarbeitet.

Ergänzend zu den bei Otto Fuchs durchführbaren REM Untersuchungen, wurden am IWW TEM Messungen beauftragt, mit denen die Ausscheidungsart und -größe nach dem Lösungsglühen (mit und ohne Kaltstauchen) sowie nach der Auslagerung für verschiedenen Abstände zur Oberfläche im Freiformschmiedeblock (FFD) untersucht werden konnten.

## **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die durchgeführten Arbeiten waren in den jeweiligen Disziplinen komplex und erforderten entsprechende Erfahrungen. Zur Realisierung der Projektziele wurde eine umfangreiche experimentelle Datenbasis (an Laborproben und Bauteilen) benötigt. Die untersuchten mechanischen Eigenschaften und daraus abgeleiteten Materialmodelle sind an die im Serienprozess geforderten Prüfungen

von Airbus angelehnt. Die komplexe Versuchsmatrix mit den verschiedenen Prozessrandbedingungen und deren Kombinationen wurde an die real im Prozess auftretenden Schwankungen angepasst, um die Gültigkeit der entwickelten Modelle zu gewährleisten. Nur auf Basis dieser Versuchsergebnisse konnte letztendlich eine für praktische Anwendungsfälle geeignete Simulation methodology entwickelt werden. Die Planung und Betreuung solcher Bauteilversuche in der industriellen Praxis erfordern eine entsprechende Expertise. Um den komplexen Einfluss der verschiedenen Prozessrandbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften für Schmiedebauteile visualisieren zu können, erfolgte die Implementierung der Materialmodelle als Subroutine in die FE-Software Forge. Durch die so geschaffene Möglichkeit zur Darstellung sowohl der Gradienten der Prozessrandbedingungen aus der Prozesssimulation als auch der mechanischen Eigenschaften aus den Materialmodellen in Form von Konturplots, ist eine ganzheitliche Betrachtung der Einflussfaktoren möglich und ein tieferes Prozessverständnis konnte geschaffen werden. Die Ergebnisse dieses Projektes stellen einen wichtigen Meilenstein für die Firma Otto Fuchs im Bezug auf die Vorhersage von Bauteileigenschaften durch die Prozesssimulation dar und legen den Grundstein für die Übertragung der Methodik zur Modellentwicklung auf weitere Werkstoffe sowie andere für die Luftfahrt relevante Bauteilgruppen. Zum Beispiel werden die erarbeiteten Subroutinen für den Quenchfaktor und die Materialmodelle im Lufo Projekt „InDiPro - Integrierte digitale Prozessketten zur Effizienzsteigerung aller Zulieferstufen für eine klimaneutrale Luftfahrt“ weiterentwickelt und auf Nickelbasislegierungen übertragen werden.

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Das Digitale Schmiedeteil ermöglicht bei der im Rahmen des Projekts erreichten Vorhersagequalität der entwickelten Simulations- und Werkstoffmodelle eine Vielzahl an Prozess-, Produkt-, Bearbeitungs- und Designoptimierungen. Insbesondere die Festigkeitsmodelle sind bereits mit Abschluss des Vorhabens auf einem ausreichenden Niveau, um für Neubauteile eine Festigkeitsabschätzung machen zu können.

Kurzfristig erschließbare Optimierungspotentiale (1-2 Jahre nach Projektabschluss):

- Optimierung der Prüfstrategien (z.B. Probeentnahmeorte) für die Qualitätssicherung und Überprüfung der tatsächlich im Bauteil vorliegenden Faserrichtung
- Optimierung der Bauteileigenschaften durch angepasstes Design des Schmiederohlings / der Vorform zum anschließenden Gesenkschmieden (z.B. durch unterschiedliche Ausrichtung des Faserverlaufes in der Vorform)
- Optimierung der Zerspanungsstrategie basierend auf den im Digitalen Schmiedeteil abgebildeten Eigenspannungen

## ATON

- Reduktion der Eigenspannungen durch eine optimierte Kaltstauchstrategie
- Simulationsgestützte Bewertung der Auswirkung von Abweichungen im Herstellungsprozess auf die zu erwartenden Bauteileigenschaften. Insbesondere beim Kaltstauchen können bereits kleine Abweichungen vom Soll-Prozess zu starken Eigenschaftsveränderungen führen.
- Bestätigung oder (Neu-)Definition geeigneter Fertigungsparameter (insbesondere Schmieden, Warmauslagerung, Kaltstauchen) hinsichtlich Robustheit und Optimalität. Zum Beispiel wurde innerhalb des Vorhabens deutlich, dass die Festigkeit sehr sensibel auf Schwankungen der Warmbehandlungstemperatur innerhalb der Ofentoleranz reagiert, sodass hier Grenzen ggf. neu definiert werden müssten.

Mittel-/längerfristig erschließbare Optimierungspotentiale (3-7 Jahre nach Projektabschluss):

- Reduzierung des Prüfumfangs durch „digitale Prozesskontrolle“; z.B. ein Entfall der bauteilspezifischen zerstörenden Qualitätssicherungsprüfungen durch Prozess- statt Bauteilqualifikation.
- Beim OEM: Konstruktion und Auslegung optimierter Bauteile für die zukünftige Flugzeuggeneration. Drastische Verkürzung der Entwicklungszeiten beim OEM und bei Otto Fuchs. Kosten – und ressourceneffizienter Werkstoffeinsatz.

Das Projekt trägt essenziell zum Erhalt der Konkurrenzfähigkeit des Antragstellers als deutscher strategischer Zulieferer der Luft- und Raumfahrtindustrie im internationalen Wettbewerb bei und ist ein Baustein für die langfristige Sicherung als auch Schaffung neuer, hochqualifizierter Arbeitsplätze am Luftfahrtstandort Deutschland.

### **2.5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Hierzu sind keine Fortschritte bekannt.

### **2.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Das Projekt wurde auf Aeromat 2023 im Mai 2023 vorgestellt (Application of the Digital Twin for the Development of integral Forgings for the Aerospace Industry, Thomas Witulski, Otto Fuchs GmbH) und auf dem ASK im Oktober 2022 (Anwendung des digitalen Zwillings zur Entwicklung von Integralschmiedeteilen für die Luftfahrt, Thomas Witulski, Otto Fuchs GmbH) vorgestellt. Eine weitere Veröffentlichung mit dem Titel „Crack deflection and crack paths in anisotropic aluminum alloy AA7010: uncertainties and stochastic aspects“ ist gemeinsam mit dem DLR im Journal Engineering Fracture Mechanics geplant. Die Veröffentlichung wurde bereits eingereicht.

### 3 Literatur

- [1] L. Bölkow; Ein Jahrhundert Flugzeuge: Geschichte und Technik des Fliegens, VDI Verlag (1990)
- [2] Metallwerke Otto Fuchs; Konstruieren mit Leichtmetall, Grundlagen der Gestaltung hochbeanspruchter Leichtmetall-Bauteile; Technischer Verlag Günter Grossmann (1966)
- [3] G.P. Dolan, R.J. Flynn, D.A. Tanner, J.S. Robinson: *Quench factor analysis of aluminium alloys using the Jominy end quench technique*. Materials Science and Technology, Vol. 21, No. 6, 2005
- [4] M. Reich, O. Kessler: *Quenching Simulation of Aluminum Alloys Including Mechanical Properties of the Undercooled States*. Materials Performance and Characterization, Vol. 1, No. 1, 2012
- [5] Y. Zhang, B. Milkereit, O. Kessler, C. Schick, P.A. Rometsch: *Development of continuous cooling precipitation diagrams for aluminium alloys AA7150 and AA7020*. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 584, 2014
- [6] D. S. MacKenzie: *Quenching of Aluminum Alloys*. In ASM Handbook, Volume 4E, *Heat Treating of Nonferrous Alloys*, 2016 ASM International
- [7] Y. Zhang, M. Weyland, B. Milkereit, M. Reich, P.A. Rometsch: *Precipitation of a new platelet phase during the quenching of Al-Zn-Mg-Cu alloy*. Scientific Reports, 6:23109, 2016
- [8] N.E. Andersson, S.A.H. Johansson: *Fatigue crack growth rate in thick plates of AA7010*. Proceeding zum Seventh International Fatigue Congress, Fatigue 1999, Beijing
- [9] J.J. Schubbe: *Fatigue crack propagation in 7050-T7451 plate alloy*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, 2009
- [10] Z. Liu, F. Li, P. Xia, S. Bai, Y. Gu, D. Yu, S. Z: *Mechanisms for Goss-grains induced crack deflection and enhanced fatigue crack propagation resistance in fatigue stage II of an AA2524 alloy*. Materials Science and Engineering: A, Vol. 625, 2015
- [11] F. Li, Z. L, W. Wu, P. Xia, P. Ying, Q. Zhao, J. Li, S. Bai, C. Ye: *On the role of texture in governing fatigue crack propagation behavior of 2524 aluminum alloy*. Materials Science and Engineering: A, Vol. 669, 2016
- [12] W. Wu, Z. Liu, Y. Hu, F. Li, S. Bai, P. Xia, A. Wang, C. Ye: *Goss texture intensity effect on fatigue crack propagation resistance in an Al-Cu-Mg alloy*. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 730, 2018
- [13] D.A. Tanner, J.S. Robinson: *Residual stress prediction and determination in 7010 aluminum alloy forgings*. Experimental Mechanics, Vol. 40, No. 1, 2000
- [14] G.P. Dolan, J.S. Robinson: *Residual stress reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 aluminium alloys using quench factor analysis*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, 2004
- [15] J.S. Robinson, D.A. Tanner: *The Influence of aluminium alloy quench sensitivity on the magnitude of heat treatment induced residual stress*. Materials Science Forum, Vol. 524-525, 2006
- [16] A.S. Ahmad, W. Yunxin, G. Hai, L. Lei: *Determination of the effect of cold working compression on residual stress reduction in quenched aluminium alloy 2219 block*. Journal of Mechanical Engineering, Vol. 65, 2019