

Schlussbericht zum Verbundprojekt TATT
Titanium Aluminide Turbine Toolbox
Teilprojekt Access



access

powered by technology

Autor: Dipl.-Ing. Rüdiger Tiefers
Status: 03.07.2017

– Leerseite –

Schlussbericht zum Verbundprojekt TATT

Titanium Aluminide Turbine Toolbox

Teilvorhaben Access e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 20T1112A

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2012 bis 31.12.2016

Verbundpartner: Access e.V., 52072 Aachen
DLR e.V., 51147 Köln

Projektleiter: Dipl.-Ing. Rüdiger Tiefers

Telefon: 0241 943249-19

Aachen, 13.07.12

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters

– Leerseite –

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung des Projektes	7
1.1	Aufgabenstellung	7
1.2	Voraussetzungen	8
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Eingehende Darstellung der Projektergebnisse	12
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	12
2.1.1	Gießsimulation und Gießversuche	12
2.1.1.1	Gießtechnische Auslegung des Gießsystems	12
2.1.1.2	Ermittlung geometrischer Grenzen für den Guss	14
2.1.1.3	Versuchsdurchführung	20
2.1.2	Validierung des Auslegungstools	32
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	37
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	37
2.4	Nutzen und Verwertbarkeit	38
2.5	Fortschritt anderer Stellen	38
2.6	Veröffentlichungen	38

— Leerseite —

1 Kurzdarstellung des Projektes

Dem weltweiten Luftverkehrsaufkommen wird in den kommenden 20 Jahren eine jährliche Wachstumsrate von 4,7 % bzw. 5,0 % vorhergesagt. Damit verbunden ist eine Verdoppelung des weltweiten Luftverkehrs in den kommenden 15 Jahren. Gleichzeitig steigt die Zahl der transportierten Passagiere von derzeit ca. 2,9 Milliarden/Jahr (2012) auf ca. 6,7 Milliarden/Jahr im Jahr 2032. Um diesem enorm steigenden Aufkommen gerecht zu werden, ist laut einer Marktstudie von Boeing die Auslieferung von ca. 37.000 Flugzeugen mit mehr als 100 Sitzen bis zum Jahr 2033 erforderlich. Dies entspricht einem Gegenwert von 5,2 Billionen US-Dollar. Dabei wird die Hauptnachfrage weiterhin aus dem asiatisch-pazifischen Raum erwartet, mit weiterhin stabilen Bestellungen aus Europa und Nordamerika.

Vor dem Hintergrund des permanent wachsenden Luftverkehrs und der damit verbundenen Umweltbelastung, wurden bereits 2001 in der ACARE VISION 2020 hochgesteckte Ziele zur Verminderung der Schadstoff- und Lärmemissionen formuliert. Da der enorm steigende Luftverkehr signifikant zum globalen CO₂-Ausstoss beiträgt, wird eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 50% bis zum Jahr 2020, basierend auf dem Jahr 2000, angestrebt. Weitere Ziele sind die Reduzierung der Stickoxide (NO_x) um 80% sowie eine Halbierung der Lärmemissionen. Allein durch Optimierung der Flugzeugtriebwerke besteht ein Potential zur Reduzierung der CO₂-Emissionen von 15-20%. Noch einen Schritt weiter geht die 2011 von der Europäischen Union veröffentlichte Vision Flightpath 2050. Diese sieht vor, dass die bis zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Technologien und Verfahren eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 75% pro Passagierkilometer und eine NO_x-Verringerung um 85% erlauben, Lärmemissionen sollen um 65%, jeweils bezogen auf das Jahr 2000, reduziert werden. Abgesehen von den dargelegten Umweltaspekten ist auch vom wirtschaftlichen Standpunkt aus eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs vor dem Hintergrund steigender Energiepreise erstrebenswert.

Aufgrund dieser Vorgaben sind die Triebwerkshersteller gefordert, die Effizienz und die Umweltverträglichkeit ihrer zukünftigen Triebwerke zu verbessern.

Dabei liegt der Fokus vor allem auf der Verwendung höherer Einsatztemperaturen, Gewichtseinsparung sowie höherer Arbeitsgeschwindigkeiten. Die herkömmlichen metallischen Systeme, die derzeit in Verwendung sind, wurden in den letzten 50 Jahren bis an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit entwickelt. Wenn weitere Fortschritte gemacht werden sollen, werden neue Klassen von Materialien erforderlich. Titanaluminid-Legierungen auf der Basis der intermetallischen Phasen γ -TiAl und α_2 -Ti₃Al haben das weithin anerkannte Potential, um die oben genannten Design-Anforderungen zu erfüllen.

Vor allem bei der Substitution der herkömmlichen Nickel-Basislegierungen in der Niederdruckturbinen (LPT) der Triebwerke durch Titanaluminide, kann eine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen aufgrund ihres um 50% niedrigeren Gewichts erreicht werden.

Vor diesem Hintergrund haben nahezu alle OEM ihre aktuellen Triebwerks-Entwicklungsprogramme angepasst und planen den Einsatz von Niederdruckturbinenschaufeln aus TiAl in der kommenden Triebwerksgeneration. Der Herstellprozess von TiAl-Niederdruckturbinenschaufeln, unter anderem im near-net-shape Feingussverfahren, ist schon in verschiedenen Abhandlungen beschrieben worden.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel ist es, ein vernetztes Auslegungstool (**Abbildung 1.1**) für die Herstellung von Niederdruckturbinenkomponenten aus dem Hochleistungswerkstoff TiAl zu entwickeln, mit dem automatisiert eine Schaufelgeometrie generiert werden kann, die das Optimum aus effizienter Aerodynamik, wirtschaftlicher Herstellung, werkstoffgerechter Bauweise und langer Lebensdauer darstellt. Bisher ist diese aero-thermodynamische und strukturdynamische Auslegung von Turbinenschaufeln, insbesondere für den Werkstoff TiAl, von den Fertigungsprozessen aufgrund der Trennung von Turbinen- und Komponentenherstellern entkoppelt. Die ganzheitliche Betrachtung dieses Auslegungsprozesses hat eine Maximierung der Wirtschaftlichkeit im gesamten Lebensdauerzyklus zum Ziel.

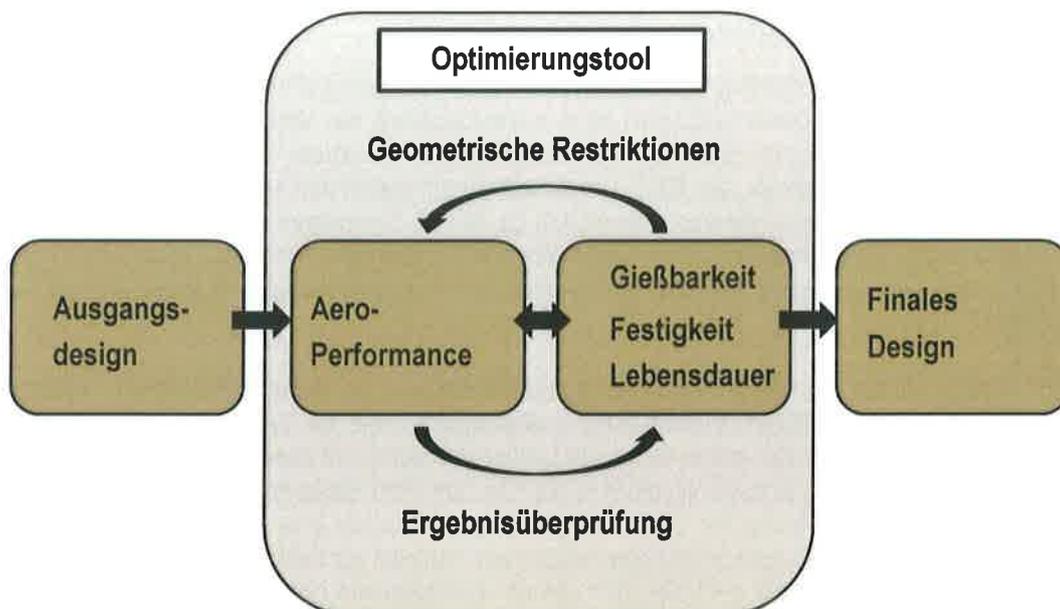


Abbildung 1.1: Schema des Auslegungstools

1.2 Voraussetzungen

Access ist seit mehr als 15 Jahren federführend in der Entwicklung von Gießverfahren für Hochleistungskomponenten aus TiAl. Innerhalb der letzten Jahre ist es sowohl durch die Unterstützung öffentlich geförderter Projekte im LuFo-Programm (TANs) als auch in direkten Entwicklungsprogrammen mit den wichtigsten OEM (Safran und Rolls Royce) gelungen, das nötige Gieß-Know-how und eine vollständige Feingussroute aufzubauen, um eine serienfähige Herstellung von near-net-shape und net-shape TiAl-Niederdruckturbinenschaufeln darstellen zu können. Die Guss-Technologie wurde mit der Inbetriebnahme der Leicomelt Gießanlage, welche das Kernstück des Fertigungsprozesses darstellt, sukzessive ausgebaut.

Access besitzt aufgrund der geleisteten Vorarbeiten das nötige Know-how zur Erarbeitung einer „Casting Toolbox“ zur gießgerechten Auslegung von TiAl Komponenten. Die bis Ende 2009 aufgebaute systemfähige Plattform für Schmelz- und Gießtechnik metallischer Hochleistungswerkstoffe, an der nationale Unternehmen der Gießereibranche (TITAL, GfE, u.a.) beteiligt sind, sowie das LuFo-Projekt TANs unterstützten die Umsetzung dieses Vorhabens maßgeblich.

Sämtliche Gießversuche werden mit der Feingusstechnologie durchgeführt. Dies ist die Prozessroute, nach der heute komplexe Bauteile verschiedenster Werkstoffklassen für die Luftfahrtindustrie gefertigt werden und die auch im LuFo TANs Projekt zur Anwendung kommt.

Access verfügt über ein TechCenter, an dem für die spezielle Werkstoffgruppe des Titan-Aluminiums bereits eine Feingussroute für Turbinenschaufeln bis zu einer Länge von 300 mm aufgebaut worden ist. Dieses TechCenter wurde mit Mitteln des Landes NRW und der Industrie in Höhe von 5 Mio. € zu einer Plattform für Schmelz- und Gießtechnik für hochreaktive Werkstoffe erweitert.

Der Verbundpartner DLR, repräsentiert durch die folgenden Institute, steuert seinerseits das nötige Know-how zur erfolgreichen Durchführung des Projektes bei.

Das **Institut für Antriebstechnik (AT)** besitzt Erfahrung in der Schaufelauslegung und Optimierung hinsichtlich aerodynamischer Kriterien unter anderem aus dem Projekt EVITA, in dem in einer Prozesskette eine gesamte Turbine hinsichtlich der geforderten Daten wie Leistung und Massenstrom ausgelegt werden soll. In der Prozesskette werden Programme mit immer höherer Detailgenauigkeit verknüpft. Die einzelnen Programme (PrEDiCT, Mises, FEMT, TRACE) funktionieren bereits alleinstehend, eine Kommunikation zwischen den Programmen ist in dem Projekt in Vorbereitung.

Bereits seit mehreren Jahren wird der vom Institut entwickelte CFD-Code TRACE angewendet, der mittlerweile auch von Teilen der Triebwerksindustrie und von diversen Hochschulen benutzt wird. Ebenso wurde der im Institut entwickelte generische Optimierer AutoOpti bereits mehrfach für spezielle Anwendungen in der Abteilung eingesetzt, um sowohl einzelne Schaufelschnitte als auch ganze Stufen inklusive einer Endwandkonturierung und einer 3D Schaufelgeometrie hinsichtlich des (Gesamt-)Wirkungsgrades zu optimieren.

Das **Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung (BT)** hat in der Vergangenheit auch schon institutsübergreifende gekoppelte aerodynamische / mechanische Optimierungen eingesetzt. Für den Bereich des Verdichters sind hier beispielsweise verschiedene Industrieprojekte sowie das EU-Projekt VITAL zu nennen. Bei dieser kombinierten Optimierung konnten im aerodynamischen Auslegungsprozess die Restriktionen durch die Mechanik gleich mit berücksichtigt werden. Der dabei erreichte Erfolg zeigt die Notwendigkeit die Anzahl der eingebundenen Disziplinen und Parameter zu erhöhen, um alle Optimierungspotenziale nutzen zu können. Es liegen auch Erfahrungen vor die ausgelegte Geometrie in ein entsprechend genaues CAD Modell zu überführen, damit die Fertigung von Strukturen oder Werkzeugen unmittelbar erfolgen kann. Eine entsprechende Umrechnung der Geometrien erfolgt dabei schon teilweise während des Auslegungsprozesses. Erste Erfahrungen zur Integration von angrenzenden Strukturen wie beispielsweise der Scheiben in den gekoppelten Optimierungsprozess liegen ebenfalls vor.

Das **Institut für Werkstoff-Forschung (WF)** verfügt über langjährige und umfangreiche Erfahrungen im Bereich der mechanischen Prüfung sowie der mikrostrukturellen Charakterisierung. Die Palette der bisher untersuchten Werkstoffe reicht von Aluminiumlegierungen über Strukturkeramiken bis hin zu hybriden Werkstoffsystemen. Der Werkstoff Titan-Aluminid wird am Institut ebenfalls seit mehreren Jahren erforscht. Neben der umfangreichen Charakterisierung des Werkstoffes stand dabei der Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Eigenschaften und das Versagensverhalten des Werkstoffes unter hohen Belastungen und Temperaturen im Vordergrund. Gleichzeitig verfügt das Institut über umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Simulation des Verhaltens sowohl von spröden als auch duktilen Werkstoffen unter verschiedensten Beanspruchungsarten. Als öffentlich geförderte Projekte im Bereich der Werkstoffmodellierung sind z.B. Optimat (BMBF/WING) und InnoTurb (BMW, LuFo IV-2) zu nennen. Zudem gibt es mit beiden Triebwerksherstellern in Deutschland intensive Zusammenarbeit in den Bereichen Charakterisierung, Beurteilung und Simulation von TiAl unter realen Belastungen, in Form von direkten Beauftragungen und Patenschaften.

Darüber hinaus wurden mit Beginn des LuFo-Projektes HERMET Arbeiten im Bereich der Validierung von Simulationsmodellen unter Berücksichtigung vorhandener Streuungen aufgenommen. Im Rahmen dieser Aktivitäten werden die am Institut eingesetzten Methoden aus den Bereichen der Statistik und Stochastik ausgebaut. Die bisher gesammelten Erfahrungen fließen ebenfalls in das geplante Vorhaben und dort speziell in die Lebensdauerbewertung ein.

Die **Einrichtung Simulations- und Softwaretechnik (SC)** hat mehrjährige Erfahrung mit der Kopplung und Integration von multidisziplinären Anwendungen. So wird in Projekten aus der Luftfahrt wie TIVA, UCAV-2010, VAMP, EVITA die Integrationsinfrastruktur in Form der multidisziplinären Vorentwurfsumgebung Chameleon entwickelt. Im Raumfahrtprojekt IMENS-3C wird eine multidisziplinäre Entwurfsumgebung für Raumfahrzeugstrukturen realisiert. Als Integrationsframework kommt die Eigenentwicklung RCE (Remote Component Environment) zum Einsatz. In allen Projekten entwirft und realisiert die Einrichtung die Konzepte zur Integration der Anwendungen und Daten und entwickelt dafür neben der Software-Plattform auch Tools wie Geometrie- und Schnittstellenbibliotheken.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für den Herstellprozess von TiAl-Niederdruckturbinenschaufeln liegt das zentrale Augenmerk dieses Berichtes auf der Ermittlung geometrischer Grenzen, die bei den schwer zu vergießenden TiAl-Schaufeln zu beachten sind. Hierzu wird ein Baustein zur gießgerechten Auslegung von TiAl Komponenten erarbeitet, in dem geometrische Zusammenhänge in Abhängigkeit vom Gießprozess für die reproduzierbare und kosteneffektiven Herstellung von qualitativen LPT-Komponenten definiert sind. Dieser Baustein wird interaktiv mit den zu erarbeitenden Bausteinen der o.g. Partner abgestimmt und integriert. Eine Kombination von numerischer Simulation und Gießexperimenten wird für diese Aufgabe eingesetzt. Damit wird ein Auslegungstool für LPT-Komponenten für alle Turbinenhersteller zur Verfügung gestellt, so dass bereits bei der Planung von Komponenten alle Anforderungen berücksichtigt

werden und damit aufwendige Iterationen zwischen Bauteilentwicklern und -herstellern bezüglich Anforderungen und Machbarkeit deutlich vereinfacht werden können.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Bisher wird die Auslegung von Turbinenschaufeln in den drei Disziplinen Aerodynamik, Strukturmechanik und Herstellbarkeit größtenteils voneinander entkoppelt vorgenommen. Das aerodynamisch optimierte Design wird aus strukturmechanischer Sicht geprüft und dem Gießer übergeben. Häufig ist jedoch die Gießbarkeit der Schaufel durch die hohen Anforderungen aus dem so festgelegten Design nicht gewährleistet, so dass ein unter Umständen häufiges manuelles Redesign der Schaufel vorgenommen werden muss. Im Bereich des Verdichters ist die Kopplung von Strukturmechanik und Aerodynamik im DLR schon eingeführt und wird erfolgreich für die Auslegung von integral gefertigten Rotoren genutzt. Dieser Stand der Arbeiten ist die Basis für die Erweiterung der Technologie auf die Turbine. Für die Turbine ergeben sich derzeit noch Einbußen im theoretisch zu erreichenden Wirkungsgrad, da die Optimierung nicht unter (quasi-)simultaner Berücksichtigung aller Randbedingungen erfolgt bzw. der Herstellungsprozess nicht berücksichtigt wird. Folglich wird das Ergebnis einer solchen seriellen Optimierung meist ein lokales Optimum darstellen, womit eher ein allseitiger Kompromiss denn eine optimale Lösung vorliegt. Im kritischsten Fall ist eine Rückkoppelung vom Gießer zum Blatt designer gar nicht vorhanden was dazu führt, dass Werkstoffpotenziale nicht umfassend genutzt werden können.

Da es sich bei der oben dargestellten Vorgehensweise zur der Auslegung von Turbinenschaufeln um die gängige Praxis im industriellen Umfeld handelt und hierzu aufgrund von Vertraulichkeiten keine internen Details frei publizierbar sind, wird im Folgenden die Innovation dieses Vorhabens welches auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik aufbaut näher dargelegt.

Die Innovation des Vorhabens besteht unter anderem in der Zusammenführung des Expertenwissens verschiedener Fachrichtungen und dessen direkter Anwendung durch vernetzte Simulationswerkzeuge in einer flexiblen multi-physikalischen Toolbox. Hierdurch wird eine simultane Optimierung in allen beteiligten Disziplinen ermöglicht.

Durch die Einbindung der aerodynamischen Auslegungs- und Optimierungstools in diese umfassende Toolbox soll die Anzahl der Redesigns verringert werden. Dies führt zu einem effizienteren universalen Auslegungsprozess. Zudem werden erstmals auch fertigungsrelevante Restriktionen in den Optimierungsprozess der Schaufelform direkt eingebunden. Somit kann während der Optimierung bereits in der ersten Auslegungsphase, dem aero- und thermodynamischen Design, die Machbarkeit der Fertigung berücksichtigt und damit den Optimierungsprozess von vornherein in die richtige Richtung gelenkt werden. Des Weiteren können die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse auch bei zukünftigen aerodynamischen Auslegungs- und Optimierungstätigkeiten verwendet werden, so dass stets parallel eine Einschätzung der Fertigbarkeit vorgenommen werden kann.

Mit der geplanten Lebensdauerbewertung beinhaltet die Toolbox einen weiteren wesentlichen Baustein, der eine erste Einschätzung der zu erwartenden Zuverlässigkeit der gegossenen Schaufel erlaubt. Dies eröffnet nicht nur die Möglichkeit, die direkten überwiegend geometrischen Einflussfaktoren verschiedener Designs auf die Lebensdauer zu untersuchen, sondern auch die damit einhergehenden durch den Gießprozess bestimmten Änderungen in der lokal vorliegenden Mikrostruktur zu berücksichtigen. Da verschiedene Mikrostrukturen durchaus unterschiedliche Schädigungsmechanismen aufweisen können, fließt bei dieser Vorgehensweise ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor in die Lebensdauerbewertung mit ein [1-3]. Folglich liegt somit erstmals ein ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung des Designs einer Schaufel bezüglich der zu erwartenden Zuverlässigkeit im Betrieb vor.

Durch den modularen Aufbau der Toolbox sind weitere Aspekte integrierbar, um auf geänderte herstellungs- und materialspezifische sowie wirtschaftliche Randbedingungen zu reagieren.

Schließlich wird ein „Guss-Regelwerk-Handbuch für TiAl“ erstellt, welches erste Ergebnisse der zusammengeschlossenen Softwaretools für das Gießen von TiAl darstellt. Hierbei können für ein Parameterfeld von bspw. Blattlänge, Sehnenlänge, Wölbung und Kantenradien die Designgrenzkurven der Herstellbarkeit von Turbinenschaufeln aus TiAl erstellt werden.

Literatur

- [1] Bayraktar, E., H. Xue, C. Bathias., Damage mechanisms of Ti-Al intermetallics in three point ultrasonic bending fatigue, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 24,1 (2007) 153-161
- [2] Punnet, F. C., A.-M. Ronaele, The fatigue damage mechanisms of gamma titanium aluminide Ti-4722, Ph.D. thesis, Univ. of Sheffield, 1999
- [3] Chakraborty, A., J.C. Earthman, The Numerical Analysis of Creep Deformation and Cavitation in TiAl Inter-metallic Alloys, JOM, 50, 8 (1998)

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes sind folgende Firmen maßgeblich an die Weiterentwicklung des Feingussprozesses und der anschließenden Bearbeitung beteiligt gewesen:

- SGA GmbH, Geisingen, Schleifen/Polieren der Hochdruckschaufeln
- AWB Aviation GmbH, Lampertheim, Fräsen der Hochdruckschaufeln
- Bodycote Belgien und Bodycote HIP N.V. als führender Anbieter von Wärme- und HIP-Behandlungen
- Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH, Durchführung des Schleudertests der Hochdruckschaufeln

2 Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Gießsimulation und Gießversuche

Im Bereich Gießsimulation und Gießversuche wurde zunächst eine gießtechnische Auslegung des Gießsystems vorgenommen. Im Anschluss daran erfolgte die Ermittlung geometrischer Grenzen für den Guss anhand einer Parameterstudie. Abschließend erfolgte die Validierung des Tools anhand einer Hochdruckturbinenschaufel.

2.1.1.1 Gießtechnische Auslegung des Gießsystems

Basierend auf dem CAD-Modell der bei DLR-AT aerodynamisch ausgelegten und von DLR-BT strukturmechanisch berechneten TATT-Schaufel wird zunächst unter Berücksichtigung gießtechnischer Anforderungen ein Gussbauteil ausgelegt. Hierzu wurde das Blatt der Schaufel noch mit einem frei verfügbaren Fuss- und Deckband-Design versehen. Daraus wurde ein standardmäßig bei Access verwendeter Gießaufbau für den Schleuderguss konstruiert. Die entsprechende einzelne Schaufel sowie den kompletten Simulations- /Gießaufbau zeigen die **Abbildungen 2.1 und 2.2**.

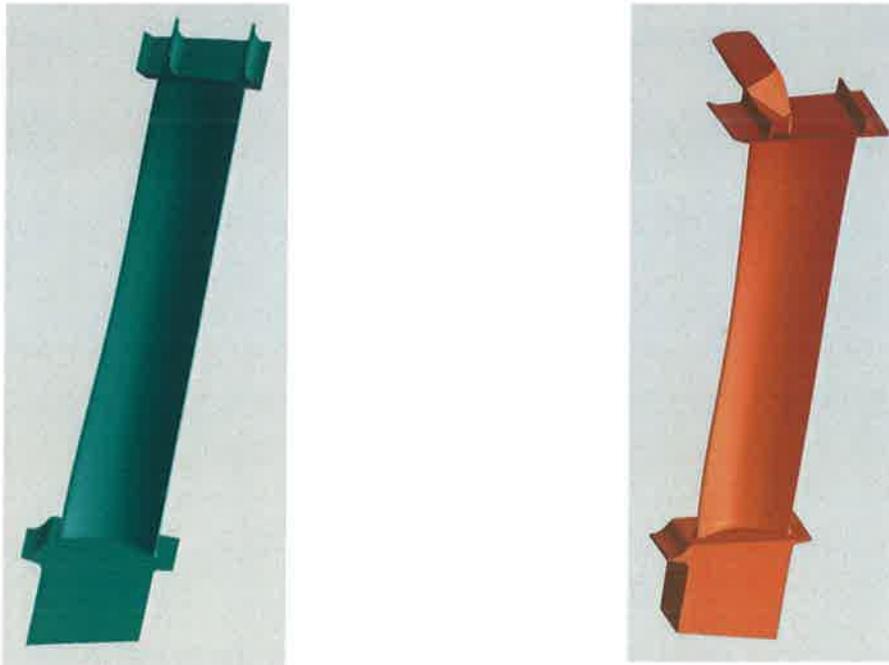


Abbildung 2.1: Ausgelegte Schaufel inkl. Fuss und Deckband sowie Speiser

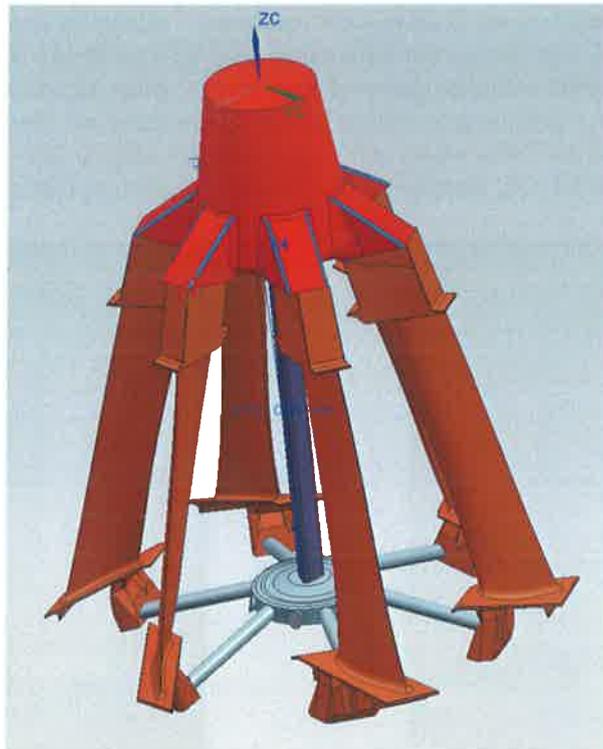


Abbildung 2.2: Kompletter Aufbau für Simulation und Guss

Mit diesem Aufbau wurde zunächst ein Simulationslauf durchgeführt, um einen ersten Eindruck bzgl. Formfüllung und Erstarrung zu erhalten. Aus diesem Grund wurde die Schaufel exakt wie ausgelegt simuliert, d.h. ohne etwaige Aufdickung des Blattes, die bei einer wie in diesem Fall vorliegenden sehr dünnen Austrittskante von ca. 0,9mm erfahrungsgemäß bei TiAl erforderlich wäre. **Abbildung 2.3** zeigt das Ergebnis dieses Simulationslaufes. Auf den ersten Blick sind mögliche Kaltläufe im Bereich der Austrittskante zu erkennen.

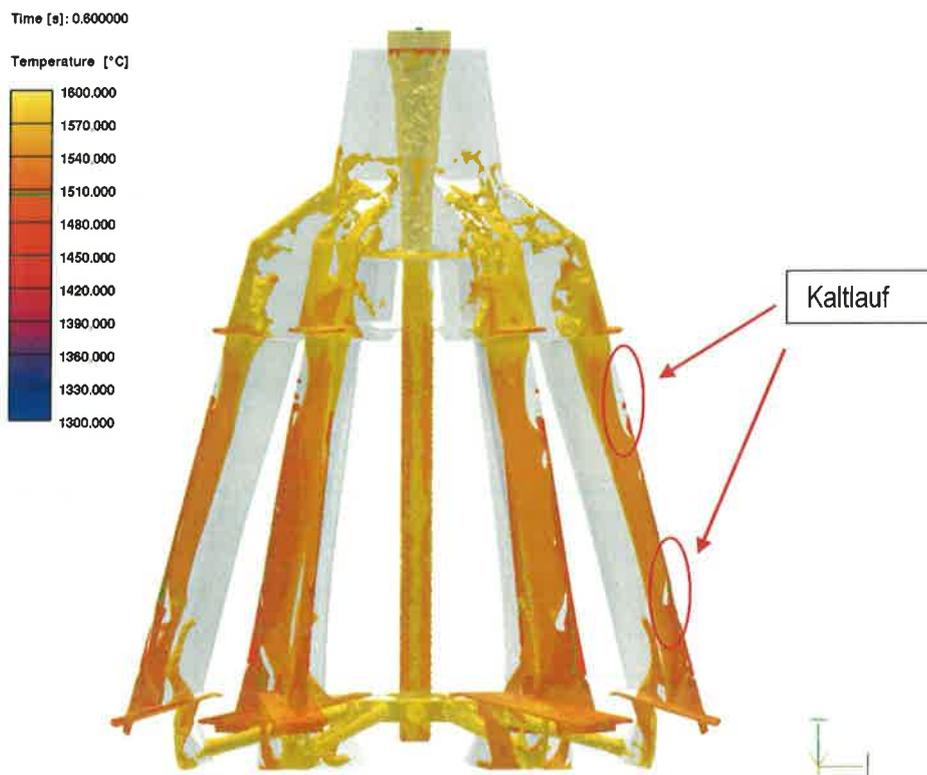


Abbildung 2.3: Ergebnis des 1. Simulationslaufes

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Um das Ergebnis der Simulation zu verifizieren wurde ein erster Testabguss durchgeführt. Hierzu wurde auf Grundlage des in **Abbildung 2.1** auf der rechten Seite gezeigten CAD-Modells inkl. Speiser ein Rapid Prototyping-Modell (RP-Modell) erstellt. Dieses Verfahren ist immer dann sinnvoll, wenn noch keine endgültige Gießgeometrie vorliegt, was hier der Fall war. Herstellungsbedingt ist bei der Verwendung von RP-Modellen die Oberfläche des Gussteils nicht so fein wie bei der Verwendung von Wachsmodellen, aber für die Überprüfung der Formfüllung völlig ausreichend. **Abbildung 2.4** zeigt diesen aus RP-Modellen aufgebauten Gießcluster.



Abbildung 2.4: Gießaufbau mit RP-Modellen

Das Ergebnis dieses ersten Versuchsabgusses zeigt **Abbildung 2.5**. Deutlich ist zu erkennen, dass einige Schaufeln wie vermutet Kaltläufe aufweisen, vornehmlich im Bereich der Schaufel, die auch aufgrund der Analyse der Simulation aus **Abbildung 2.3** zu erwarten waren.



Abbildung 2.5: Gegossene TATT-Schaufel mit Kaltlauf

Die durchgeführten Simulationen und Testabgüsse der im Rahmen des Projektes ausgelegten Niederdruckturbinenschaufel bestätigen die bisher gemachten Erfahrungen beim Feinguss von Turbinenschaufeln aus TiAl. Die hier auftretenden Austrittskantendicken von 0,9-1,0mm sind in diesem Maßstab im Schleuderguss gießtechnisch nicht zuverlässig darstellbar. Aus diesem Grund ist die Ermittlung gießtechnischer Limits für die gängigen Gusslegierungen erforderlich.

Im folgenden Kapitel wird darauf im Detail eingegangen.

2.1.1.2 Ermittlung geometrischer Grenzen für den Guss

Im Zuge zahlreicher Projektarbeiten und interner Versuchsserien sind Prozess- und Anlagenparameter ermittelt worden, die zumeist eine detailgetreue Abbildung komplex gestalteter Niederdruckturbinenschaufeln erlaubten.

Allerdings war hierfür stets ein Übermaß (Aufdickung) an gießtechnisch-kritischen Bauteilbereichen vonnöten. In den folgenden Jahren soll das Maß dieser Schaufelaufdickung minimiert werden. Langfristig wird damit das Ziel verfolgt, eine möglichst ökonomische endkonturnahe (near-net-shape) Herstellungsrouten für die Fertigung von Turbinenschaufeln industriell zu etablieren.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen findet eine Prozessevaluierung statt, mit deren Hilfe die exakte derzeitige anlagenspezifische Limitierung des Schaufeldesigns herausgestellt wird.

Im ersten Schritt gilt es, universelle Probekörpergeometrien in Anlehnung an real existierende Niederdruckturbinenschaufeln zu entwickeln, welche die wesentlichen Gestaltungsmerkmale vereinfacht abbilden und als Referenzproben dienen. Bei der Auslegung der Prüfkörper sind die gegensätzlichen Anforderungen an eine komplexe, realitätsnahe Schaufelgestaltung einerseits und an eine möglichst einfache geometrische Beschreibbarkeit andererseits zu erfüllen. Weiterhin sollen die Probekörperwachstmodelle für den Feingussprozess mit Hilfe eines modularen Matrizenaufbaus gefertigt werden.

Unter Verwendung der Probekörpergeometrien werden anschließend die Legierungen GE 48-2-2 und 45-2-2XD in Bezug auf ihre gießspezifischen Eigenschaften (Formfüllungsvermögen, Fließvermögen, Lunkerverhalten) charakterisiert.

Zeitgleich mit den praktischen Versuchen werden die Prüfkörpergeometrien der numerischen Simulation zugeführt. In der Folge findet ein Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit den Resultaten der Simulationssoftware statt. Der Fokus liegt dabei auf der Evaluierung der Parameter für die numerische Simulation zur Erwirkung möglichst realitätsnaher Simulationsergebnisse.

Nachdem die legierungs- und anlagenspezifischen geometrischen Gestaltungslimits anhand der vorgestellten Prüfmethodik ermittelt und die Simulation parametrisiert wurde, ist eine angeschlossene Prozessoptimierung angedacht. An deren Ende soll eine endkonturgetreuere Herstellung künftiger Niederdruckturbinenschaufel-Geometrien durch die Verschiebung der geometrischen Auslegungsgrenzen ermöglicht werden.

Probekörpergestaltung

Für die systematische Untersuchung der geometrischen Gestaltungslimits bei der Herstellung von Niederdruckturbinenschaufeln werden drei Probekörpergruppen (A, B, C) mit jeweils sechs Auslegungsvarianten unterschieden. Somit ergeben sich insgesamt 18 verschiedenartige Probekörpergeometrien.

Die Komplexität im Schaufelblattdesign steigt von Gruppe A über B bis C an. Außerdem sind die Probekörpergruppen B und C nicht unabhängig voneinander, sondern erlauben auch Rückschlüsse über die Gruppengrenze hinweg.

So basiert die Gestaltung der Probekörpervarianten von Gruppe C auf einer speziell ausgewählten Variante (Variante IV) der Gruppe B.

Die generell für alle Probekörpergruppen A, B und C geltenden Parameter sind in Tabelle 2.1 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 2.1: Bemaßung der Bauteilbereiche für die Probekörpergruppen A, B, C

Schaufelbereich	Parameter	Wert [mm]	Schaufelbereich	Parameter	Wert [mm]
Fuss	b_{F1}	20	Deckband	b_{D1}	30
	l_{F1}	25		l_{D1}	25
	h_{F1}	10		h_{D1}	10
	b_{F2}	3		b_{D2}	2
	l_{F2}	45		l_{D2}	45
	b_{F2}	20		b_{D2}	35
Schaufelblatt	s	40	Schaufelblatt	l	200

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Versuchsbeschreibung

Ein entscheidendes Kriterium neben der eigentlichen Probekörpergestaltung bildet die Forderung nach einem modularen Aufbausystem für die Matrizen zur Herstellung der jeweiligen Wachsmodelle. Da die Metallmatrizen für die Erzeugung der Wachsmodelle in der Regel aus mindestens zwei Teilen bestehen, soll die benötigte Formteilung im Hinblick auf eine reduzierbare Gesamtmenge an Formhälften konstruktiv genutzt werden.

Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Einteilung der Matrize in Basis- und eine Profilhälfte:

Basishälfte: Besitzt einen Geltungsbereich für mindestens eine Probenkörpergruppe. So existiert eine Basishälfte für Gruppe A und eine für Gruppe B/C

Profilhälfte: Beinhaltet im Allgemeinen den komplexer gestalteten Anteil der Probekörpergeometrie und kann auf die entsprechende Basishälfte passgenau aufgesetzt werden

In **Abbildung 2.6** sind die Matrizenhälften nebeneinander dargestellt und relevante Bauteilbereiche gekennzeichnet. Neben dem Bauteilhohlraum und dem dazugehörigen Anschnitt sind in den beiden Metallmatrizen Bohrungen vorgesehen, in welche Positionsstifte als Zentrierereinheit eingesetzt werden.

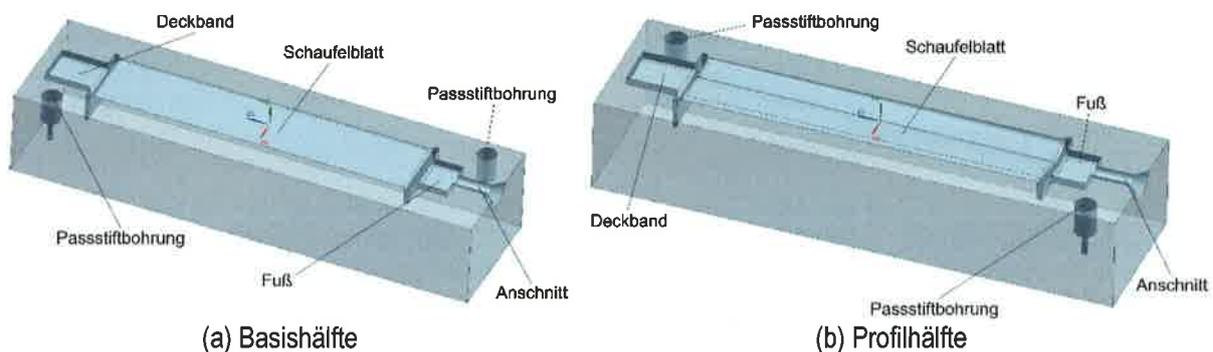


Abbildung 2.6: Zweiteiliges, modulares Aufbausystem der Metallmatrizen

Probekörpergruppe A

Bei den Probekörpern der Gruppe A werden anstelle von komplex gestalteten Schaufelprofilen flache Platten mit rechteckigem Querschnitt verwendet. Weiterhin sind die Kanten des Schaufelblattes abgerundet. Dies ermöglicht eine bessere Entnahme der Wachsmodelle aus der Matrize.

Gemäß **Tabelle 2.2** unterscheiden sich die sechs Varianten I - VI lediglich in der Plattendicke d , da entlang des Schaufelblattes vom Naben- zum Außenschnitt keine Verjüngung des Querschnitts vorgenommen worden ist.

Tabelle 2.2: Dimensionierung der einzelnen Varianten der Probekörpergruppe A

Variante	Plattenlänge l [mm]	Plattenbreite s [mm]	Plattendicke d [mm]
A I	200	40	1
A II			1,5
A III			2
A IV			2,5
A V			3
A VI			4

Das veranschlagte Parameterfeld von 1mm bis 4mm für d fußt auf zahlreichen Erfahrungswerten und Erkenntnissen, die anhand Untersuchungen von vorliegenden Niederdruckturbinenschaufeln gewonnen wurden. So fallen die dünnsten Bereiche realer Niederdruckturbinenschaufeln (zumeist an der Hinterkante) nur in kleinen Schaufelarealen unter 1mm ab. Im Gegenzug haben sich bei der Summe aller bis dato erfolgten Abgüsse auf der Leicomelt 5

TP Bauteilbereiche $> 4\text{mm}$ als keine gießtechnische Herausforderung offenbart. Zudem wird der Wert von $d_{\text{max}} = 4\text{mm}$ nur bei realen Schaufeln mit Schaufelblattlängen über 200mm überschritten.

Mit dem Konzept der geometrisch bewusst einfach gestalteten Plattengeometrien werden mehrere Ziele verfolgt. Dazu zählt die systematische Untersuchung folgender Eigenschaften (jeweils in Abhängigkeit von der Plattendicke d):

1. Formfüllungsvermögen und
2. Fließvermögen

Zusätzlich sollen wertvolle Erkenntnisse bezüglich des Formfüllvorgangs gewonnen werden.

Probekörpergruppe B und C

Anders als bei der Probekörpergruppe A werden keine Platten mit rechteckigem Querschnitt als Schaufelblätter verwendet, sondern die realen Niederdruckturbinenschaufelblattprofile durch ein schaufelähnliches Design angenähert. Der Untersuchungsschwerpunkt bei den Prüfkörpern der Gruppe B liegt auf der Gestaltung des Profilverlaufs, während die Probekörper der Gruppe C speziell auf die Hinterkantengestaltung des Schaufelblattes eingehen. Allgemein stehen sich bei der Auslegung der Probekörpergeometrien beider Gruppen zwei widersprüchliche Argumente gegenüber:

- größtmögliche Realitätsnähe
- einfache geometrische Beschreibbarkeit

Um dieser Problematik entgegenzuwirken wird zunächst der gewöhnliche Aufbau eines Schaufelblattprofilschnittes vereinfacht.

Abbildung 2.7 beschreibt die Metamorphose vom grundsätzlichen Profilverlauf einer realen Niederdruckturbinenschaufel (**Abbildung 2.7a**) in eine Probekörpergeometrie mit simplifizierter geometrischer Beschreibbarkeit (**Abbildung 2.7i**).

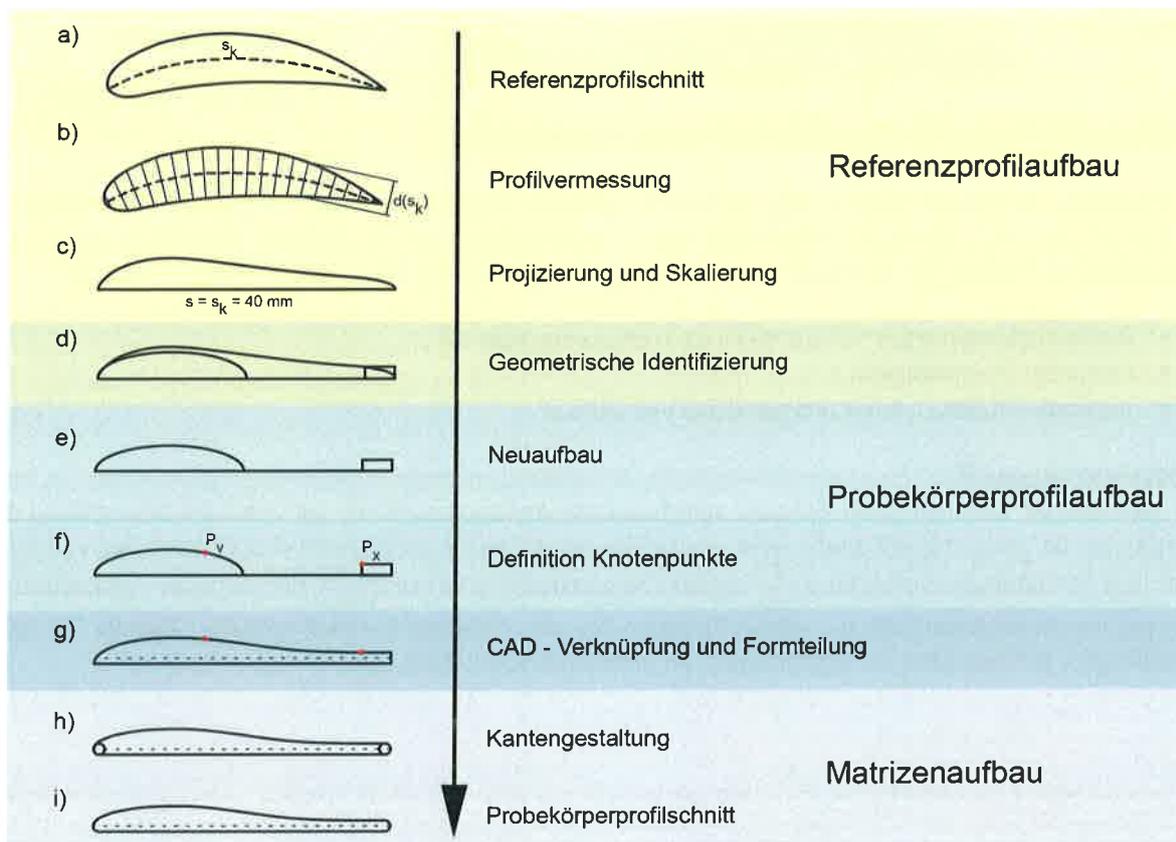


Abbildung 2.7: Ableitung des prinzipiellen Profilschnittverlaufs der Probekörper

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Zur Beschreibung des so entstandenen Probekörperprofilschnitts werden Parameter bestimmt, die den Profilverlauf hinreichend charakterisieren (**Abbildung 2.8**).

Eine Reihe von Kenngrößen werden für alle Prüfkörper der Gruppe B und C konstant gehalten. Dazu zählen:

- Sehnenlänge $s = 40\text{mm}$
- Basishinterkantenradius $r_{H2} = 0.75\text{mm}$
- Maximale Dickenrücklage $x_d = 10\text{mm}$
- Verknüpfungslage $x_v = 15\text{mm}$

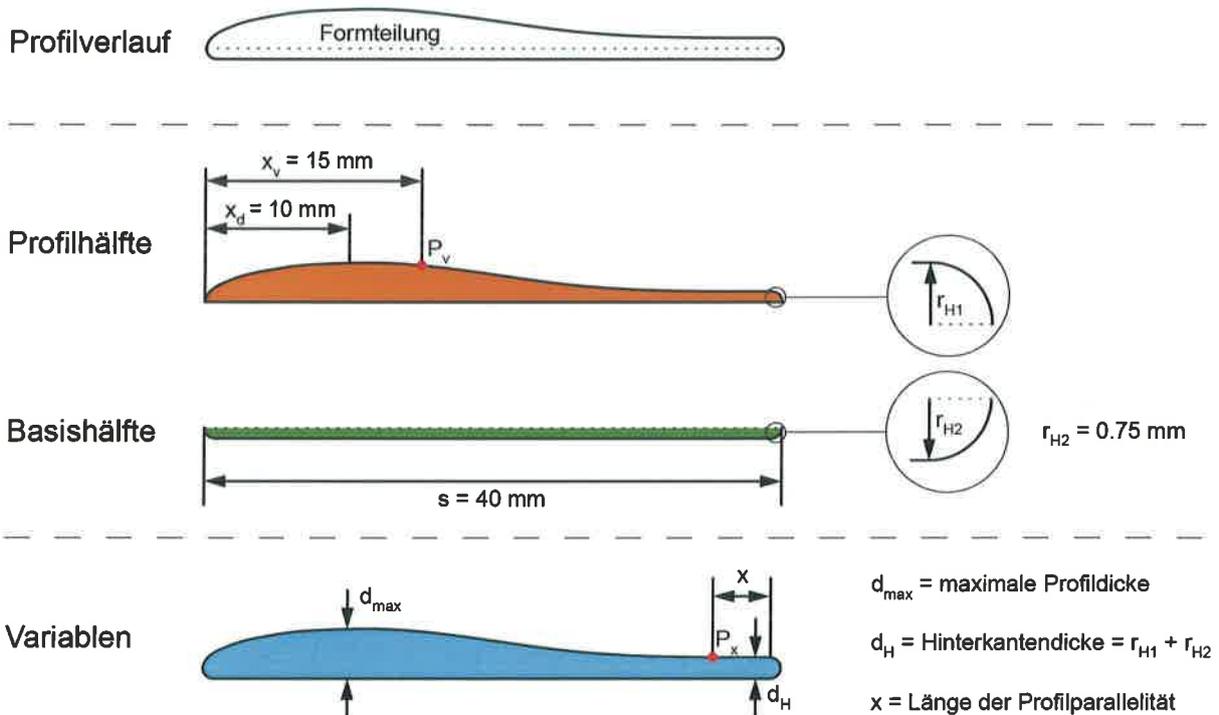


Abbildung 2.8: Prinzipieller Schaufelprofilsschnitt der Probekörper B/C

Die Profilhälfte der Matrize benötigt aufgrund ihrer komplexeren Gestaltungsmöglichkeit naturgemäß ein Mehr an Parametern zur Beschreibung und erlaubt eine individuelle Anpassung des Profilverlaufs, während die Basishälfte stets unverändert bleibt. Für die experimentellen Untersuchungen werden die folgenden Parameter variiert:

- Profilhinterkantenradius r_{H1} und damit die Hinterkantendicke d_H
- Länge der Profilparallelität x
- maximale Profildicke d_{max} und damit das Verhältnis δ

Probekörpergruppe B

Die resultierende Verjüngung der Schaufel vom Fuß zum Deckband spielt bei der Schaufelblattgestaltung der Probekörper der Gruppe B eine große Rolle. So wird bei den sechs Varianten dieser Gruppe allein das Verhältnis δ mit Hilfe der maximale Profildicke $d \frac{N}{max}$ variiert. Die maximale Profildicke $d \frac{A}{max}$, die Länge der Profilparallelität x sowie die Hinterkantendicke d_H werden hingegen bei alle Varianten konstant gehalten. **Tabelle 2.3** zeigt diesbezüglich die Parameter zur Beschreibung der unterschiedlichen Varianten.

Tabelle 2.3: Dimensionierung der einzelnen Varianten der Probekörpergruppe B

Parameter	Variante B I	Variante B II	Variante B III	Variante B IV	Variante B V	Variante B VI
l	200 mm					
s	40 mm					
x	4 mm					
d _H	1,5 mm					
d_{max}^A	3,5 mm					
d_{max}^N	3,5 mm	4,375 mm	5,25 mm	6,125 mm	7 mm	7,875 mm
δ	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25

Abbildung 2.9 verdeutlicht beispielhaft für Variante IV die Veränderungen im Profilschnitt vom Außen- zum Nabenschnitt. So bleibt die Hinterkantengestaltung (x und d_H) über die Schaufelblattlänge identisch, während der Profilverlauf aufgrund der unterschiedlichen Werte für d_{max}^N variiert.

Mit Hilfe der Probekörpergeometrien der Gruppe B soll das Lunkerverhalten in Abhängigkeit von Gestaltung des Schaufelblattes (ausgedrückt durch δ) über die Blattlänge ermittelt werden. Weiterhin kann eine Aussage über die Formfüllung im Hinblick auf das Formfüllungsvermögen getroffen werden.

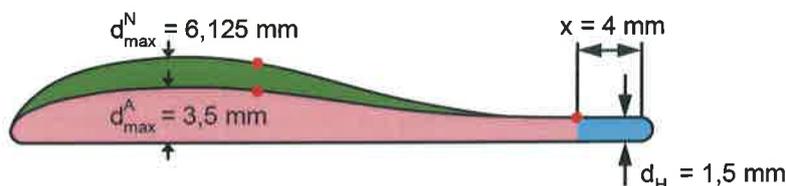


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Profilverlaufänderung vom Außen- zum Nabenschnitt am Beispiel von Variante IV der Probekörpergruppe B

Probekörpergruppe C

Ausgehend von der in **Abbildung 2.9** dargestellten Variante IV der Probekörpergruppe B wird im Rahmen der Probekörpergruppe C der Einfluss der Hinterkantengestaltung auf die gießspezifischen Eigenschaften bestimmt. Schaufelblattlänge l, die Sehnenlänge s und die maximale Profildicke am Nabenschnitt entsprechen bei allen Prüfkörpern der Gruppe C demnach denen der Variante IV aus Probekörpergruppe B.

Die Hinterkante wird sowohl im Nabenschnitt als auch im Außenschnitt durch die beiden Parameter x und d_H hinreichend in ihrer geometrischen Gestaltung beschrieben. Wie bei der Prüfkörpern der Gruppe B bleibt die Auslegung der Hinterkante über die Blattlänge konstant, verjüngt sich demnach im Gegensatz zur Profildicke nicht vom Nabenschnitt zum Außenschnitt.

Wie aus **Tabelle 2.4** erkennbar, wird bei den Varianten I - IV der Probekörpergruppe C eine Hinterkantendicke d_H von 1.5mm festgelegt. Als variabel erscheint im Gegenzug die Länge der Profilparallelität x im Intervall von 0mm bis 8 mm.

Bei den Varianten V und VI wird der Einfluss von d_H bei fester Profilparallelität von 4mm erforscht. An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei diesen Varianten aufgrund der modularen Matrizenbauweise der Profilhinterkantenradius r_{H1} ungleich dem Basishinterkantenradius r_{H2} ist. Bei Variante V liegt r_{H1} bei 0.25 mm, bei Variante VI bei 0.5 mm.

Untersuchungsziel bei den Experimenten mit den Probekörpern der Gruppe C ist primär die Ermittlung des Formfüllungs- und Fließvermögens in Abhängigkeit von der geometrischen Dimensionierung der Schaufelblatthinterkante. Einflussgrößen auf die Ergebnisse sind besonders die Länge der Profilparallelität x und die absolute Hinterkantendicke d_H.

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Tabelle 2.4: Dimensionierung der einzelnen Varianten der Probekörpergruppe C

Parameter	Variante C I	Variante C II	Variante C III	Variante C IV	Variante C V	Variante C VI
l	200 mm					
s	40 mm					
x	0 mm	2 mm	6 mm	8 mm	4 mm	4 mm
d _H	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	1 mm	1,25 mm
$d \frac{A}{max}$	3,5 mm					
$d \frac{N}{max}$	6,125 mm					
δ	1,75					

2.1.1.3 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Entwicklungsarbeit bei Access wurde ein anlagenspezifischer, optimierter Gießaufbau erarbeitet. Für Niederdruckturbinenschaufeln bis zu einer Schaufelblattlänge von ca. 200mm wird ein speziell entwickelter 12er-Clusteraufbau gemäß **Abbildung 2.10** verwendet. Ähnlich dem modularen Matrizenaufbau der Probekörper wird der gesamte Gießaufbau aus lediglich vier unterschiedlichen Wachskomponenten zusammengesetzt, die unter Verwendung von Metallmatrizen gespritzt werden.

Es sei angemerkt, dass die Fuß- und Deckbandgeometrie der Probekörper einerseits in Anlehnung an reale Niederdruckturbinenschaufelfüße bzw. -Deckbänder bemaßt wurden, andererseits eine optimale Dimensionierung für die Montage an die übrigen Komponenten des Clusters (Schmelzeverteiler, Bodenverteiler) besitzen.

Aufgrund der rotationssymmetrischen Bauweise des 12er-Clusters sollte die Platzierung der einzelnen Probekörper keinen Einfluss auf die Gießergebnisse haben. Trotzdem und zur Vereinheitlichung werden die Gießeinheiten folgendermaßen aufgebaut:

1. Jeder Cluster umfasst jeweils nur eine Probekörpergruppe
2. Entlang der x-Achse wird Variante I platziert (**Abbildung 2.10a**)
3. Im Uhrzeigersinn (aus Sicht des Schmelzeverteilers) sind die Varianten II - VI angebracht

Bei dieser als Rainbow-Konfiguration bezeichneten Anordnung der Prüfkörper am Schmelzeverteiler ist gewährleistet, dass gleiche Varianten stets gegenüber liegen und jede Variante zweimal am jeweiligen Gießaufbau angebracht ist. Dies hat zur Folge, dass eine Unwucht beim Schleudervorgang minimiert bzw. gänzlich vermieden wird.

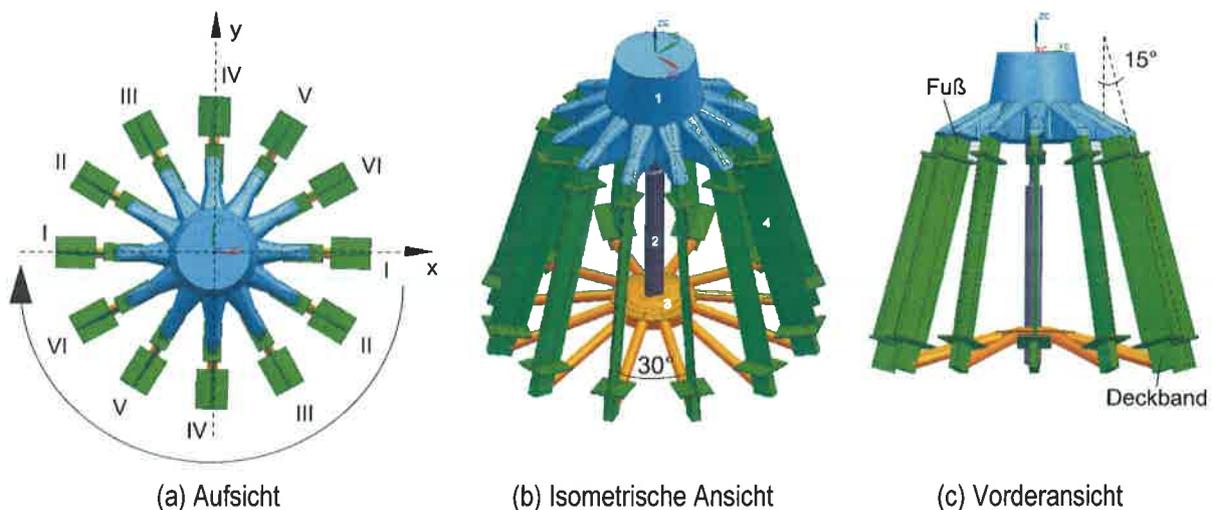


Abbildung 2.10: Aufbau einer Gießeinheit (12er-Cluster) aus Schmelzeverteiler (1), Zentrierstab (2), Bodenverteiler (3) und montierten Probekörpern (4)

Für die Formschalenherstellung als auch für den Gießvorgang – d.h. im Einzelnen das Chargieren, das Aufschmelzen und die Kippbewegung des KIT sowie die exakten zeitlichen Abläufe – werden die standardmäßig bei Access etablierten Parameterfelder angewandt. Dies erlaubt Rückschlüsse auf geometrische Gestaltungslimits bei der Auslegung von realen Niederdruckturbinenschaufeln.

Pro Probekörpergeometrie wurden 2 Abgüsse (für die Gruppe A in der Legierung 45-2-2 XD 4 Abgüsse, da weniger Simulationsergebnisse aus vorherigen Versuchen für diese Legierung vorlagen) durchgeführt, so dass insgesamt 168 Gussteile vorlagen. Da diese Versuchsreihen somit nur eine niedrige Reproduzierbarkeit aufweisen, werden im Gegenzug die experimentell ermittelten Ergebnisse mit den Resultaten der numerischen Simulation abgeglichen, welche in der Vergangenheit für eine Vielzahl von Abgüssen realitätsnahe Ergebnisse präsentiert hat. Dieses Vorgehen reduziert einerseits die Anzahl der benötigten Gießaufbauten erheblich, erlaubt aber dennoch eine Evaluierung der Simulationsergebnisse anhand relativ einfach zu beschreibender Probekörpergeometrien.

Tabelle 2.5: Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen

Cluster	Gruppe	Legierung	Vorheizung	Einsatzmenge	Drehzahl	Abkühlprogramm
3103-1	A	GE 48-2-2	1.100°C	8,4 kg	250 U/min	1
3103-2		GE 48-2-2		8,1 kg		1
3103-3		45-2-2 XD		7,05 kg		1
3104-1		45-2-2 XD		8 kg		1
3104-2		45-2-2 XD		8 kg		2
3104-3		45-2-2 XD		7,95 kg		2
3112-1	B	GE 48-2-2	1.100°C	8,4 kg	250 U/min	1
3112-2		45-2-2 XD		7,9 kg		1
3112-3		Reserve				
3113-1		GE 48-2-2		8,35 kg		1
3113-2		45-2-2 XD		7,9 kg		1
3113-3		Reserve				
3128-1	C	GE 48-2-2	1.100°C	8,45 kg	250 U/min	1
3128-2		GE 48-2-2		8,5 kg		1
3128-3		Reserve				1
3129-1		45-2-2 XD		7,9 kg		1
3129-2		45-2-2 XD		8,3 kg		1
3129-3		Reserve				1

Die Vorheiztemperatur beträgt unabhängig von Gruppe oder Legierung stets 1100°C, die nach 15 h Aufheizen erreicht werden. Die Einsatzmenge liegt bei ca. 8 kg und leitet sich von der Masse des Wachclusters ab. Die Rotationsgeschwindigkeit des Drehtellers in der Gießformenkammer ist mit 250 U/min veranschlagt und beruht auf dem Parameterfeld für Abgüsse realer Niederdruckturbinenschaufeln.

Im Anschluss an den Gießvorgang durchlaufen die Gussteile ein Abkühlprogramm, sodass die erstarrte Schmelze innerhalb der Formschale langsam unterhalb die Spröd-Duktil-Übergangstemperatur abkühlt. Das verwendete Abkühlprogramm läuft wie folgt ab:

- Abkühlung innerhalb der geschlossenen Heizkassette; Kassettendeckelentfernung bei ca. 500 – 550°C; Entnahme der Formschale und Entformung bei ca. 100 – 150°C

Gemäß dem in **Tabelle 2.5** vorgestellten Versuchsplan sind insgesamt vier Probekörper pro Variante für die Legierung GE 48-2-2 und acht pro Variante für 45-2-2 XD gegossen worden. Anhand dieser Gusstücke erfolgt die systematische Untersuchung der gießspezifischen Eigenschaften.

Abbildung 2.11 zeigt die Gegenüberstellung des Formfüllungsvermögens der abgegossenen Legierungen.

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Es zeigt sich, dass ab einer Plattendicke von $d = 2.5\text{mm}$ mit einer vollständigen Formfüllung gerechnet werden kann. Bei geringeren Plattenstärken – insbesondere bei $d \rightarrow 1\text{mm}$ – zeigt sich ein deutlich höherer Formfüllungsgrad bei der Legierung GE 48-2-2. Auch die Fehlerbalken fallen geringer aus. So kann bei GE 48-2-2 bereits bei $d = 2\text{mm}$ mit einer 99 %igen Formfüllung gerechnet werden, während \bar{X}_{FFV} bei der Legierung 45-2-2 XD stark um 95 % schwankt.

Interessanterweise bleibt die Differenz der FFV-Mittelwerte \bar{X}_{FFV} für die Plattendicken $d = 1.5\text{mm}$ und $d = 1\text{mm}$ nahezu unverändert bei ca. 15 %. Dies ist ein Zeichen für das generell gesteigerte Formfüllungsvermögen der GE 48-2-2 gegenüber der 45-2-2 XD. Vor dem Hintergrund, dass bei allen Abgüssen die Druck- und Temperaturverhältnisse optimal an die jeweilige Legierung angepasst wurden, sind die Gründe für die abweichenden Formfüllungsgrade mitunter bei physikalischen Größen zu suchen. Dazu zählen beispielsweise die Viskosität oder Oberflächenspannung der Legierungen. Auch erstarrungsmorphologische Phänomene können als Ursache nicht ausgeschlossen werden. Ein erster Einfluss für die schlechtere Formfüllung der Legierung 45-2-2 XD kann im Vergleich zur Legierung GE 48-2-2 niedrigeren Al-Gehalt begründet werden. Hierdurch weitet sich das Erstarrungsintervall aus und es liegt eine stark dendritische Erstarrung vor. Der Überhitzungsgrad der Schmelze sowie die Beschaffenheit und Temperatur der Formschalen beim Abguss sind für beide Legierungen als gleichwertig zu betrachten und erlauben daher keine ursächlichen Rückschlüsse auf das differenzierte Formfüllungsvermögen der Legierungen.

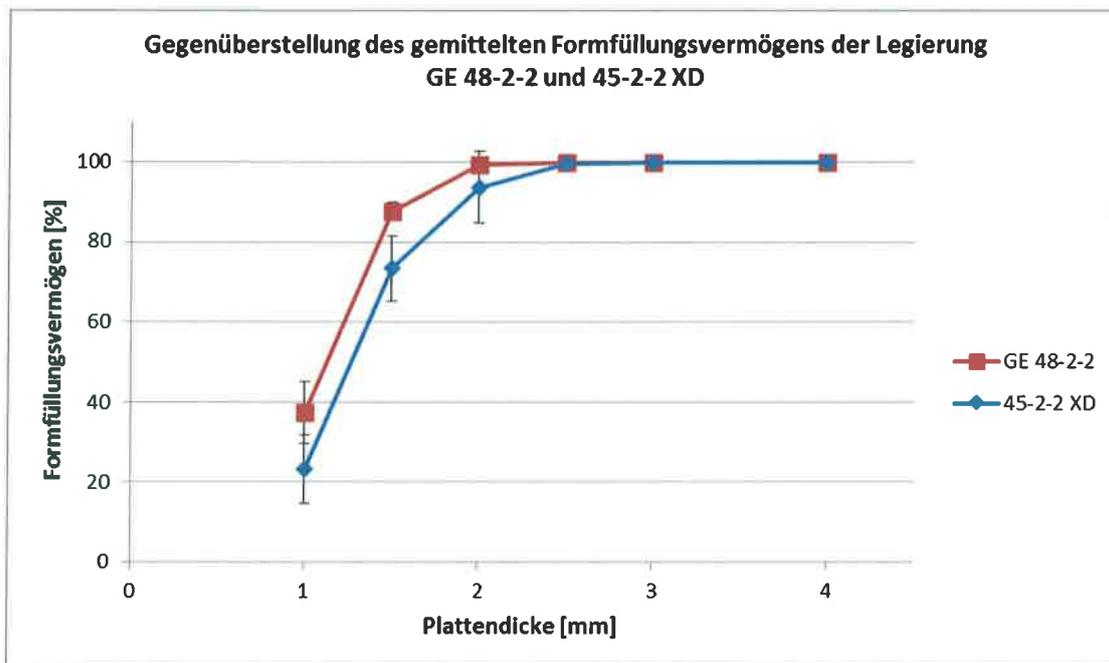


Abbildung 2.11: Gegenüberstellung des gemittelten Formfüllungsvermögens der Legierungen GE 48-2-2 und 45-2-2 XD abhängig von der Plattendicke d

Simulation

Im Zuge der Untersuchung der gießspezifischen Eigenschaften mit Hilfe der Probekörpergruppe A findet eine Evaluierung der numerischen Simulation statt. Für die Simulation wurde die von Access e.V. und CD-adapco in Zusammenarbeit entwickelte Software STAR-Cast verwendet. Als Kalibrierungsgrößen werden die realen Abgußergebnisse herangezogen.

Bevor der Verlauf des simulierten Formfüllvorgangs analysiert wird, sind in **Tabelle 2.6** zunächst die Anfangs- und Randbedingungen angegeben, welche für die Berechnungen verwendet wurden. Weitere materialspezifische Größen wie beispielsweise die Viskosität werden der STAR-Cast Materialdatenbank entnommen. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der keramischen Formschale und dem gegossenen Bauteil basiert auf entsprechenden Gießversuchen.

Tabelle 2.6: Anfangs- und Randbedingungen der numerischen Simulationen

Parameter	GE 48-2-2	45-2-2 XD
Anfangstemperatur der Formschale [°C]	1050	
Drehtischgeschwindigkeit [U/min]	250	
Druck beim Guss [mbar]	$6 * 10^{-2}$	$1 * 10^{-1}$
Anfangstemperatur der Schmelze [°C]	1570	
Schmelzemenge [kg]	8,5	
Liquidustemperatur [°C]	1505	1525
Solidustemperatur [°C]	1448	1462

Zur Verminderung des Rechenaufwandes wird lediglich die Formfüllung und Erstarrung des Gießaufbaus simuliert, während der KIT sowie der Trichter der Gießanlage Leicomelt 5 TP vernachlässigt werden. **Abbildung 2.12** zeigt den entsprechenden Simulationsaufbau zum Zeitpunkt $t = 0$ s und somit unmittelbar vor Eintritt der Schmelze in den Formhohlraum über den Schmelzeverteiler.

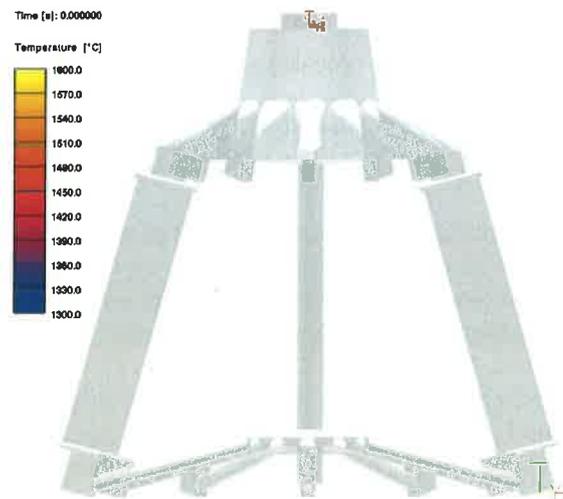


Abbildung 2.12: Exemplarische Ansicht des Simulationsergebnisses zum Zeitpunkt $t = 0$ s

Ausgehend von **Abbildung 2.12** wird in **Abbildung 2.13** der zeitliche Ablauf der Formfüllung exemplarisch an Variante VI der Probekörpergruppe A mit der Plattendicke $d = 4$ mm für die Legierung GE 48-2-2 betrachtet.

Um einen optimalen Einblick auf den Füllvorgang zu erhalten sind zunächst die Formfüllung und Erstarrung des gesamten Gießaufbaus simuliert und erst im Postprocessing die Plattenbereiche der Dicke $d = 4$ mm freigeschnitten worden.

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

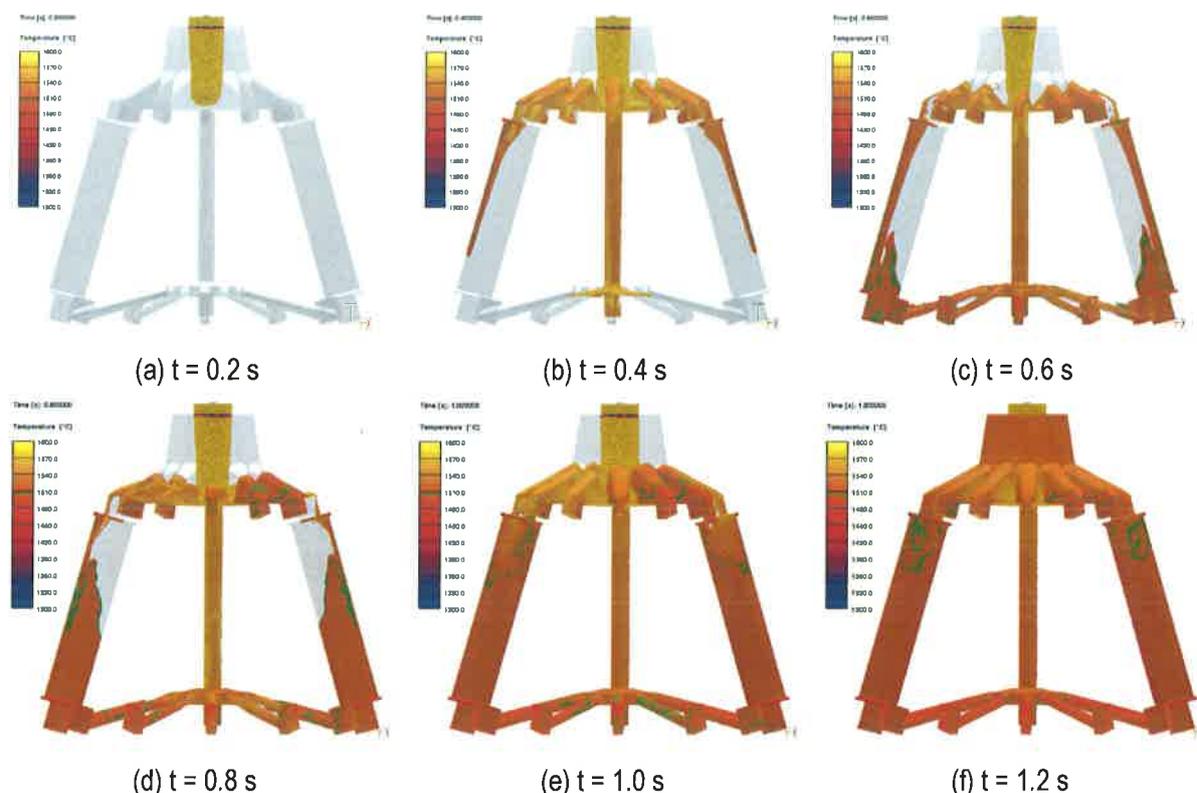


Abbildung 2.13: Simulierter zeitlicher Ablauf der Formfüllung beispielhaft dargestellt für die Variante A VI mit der Legierung GE 48-2-2

0.2 s nach Eintritt der Schmelze in den Schmelzeverteiler der rotierenden, vorgeheizten keramischen Formschale erreicht das flüssige Metall den Boden des Schmelzeverteilers sowie den zentralen Stab des Clusters (**Abbildung 2.13a**).

Der nachfolgende in **Abbildung 2.13b** dargestellte Simulationsschritt offenbart die Einwirkung der Schleuderkräfte bei der Formfüllung. So werden die Probekörper eindeutig über die vom Clusterzentrum fort zeigenden Kanten gefüllt. Zudem hat die Schmelze zu diesem Zeitpunkt den zentralen Stab vollständig durchflossen und trifft auf den Bodenverteiler, um in Richtung Bauteildeckbänder weitergeleitet zu werden.

Nach $t = 0.6 \text{ s}$ treffen die Schmelzefronten im Bereich des Deckbandes aufeinander und führen in der Folge zu einem steigenden Guss der übrigen Probekörperareale. Dies ist sehr gut aus dem Zeitschritt bei $t = 0.8 \text{ s}$ gemäß **Abbildung 2.13d** ersichtlich. Auch hierbei zeigt sich der Einfluss des Schleudergussverfahrens auf die Formfüllung, da die Schmelze an der Außenseite vorseilt.

Bei ca. $t = 1.0 \text{ s}$ (**Abbildung 2.13e**) sind die Probekörper erstmals vollständig mit Schmelze gefüllt. Im Anschluss daran wird der Schmelzeverteiler gefüllt und der Formfüllungsvorgang ist als abgeschlossen anzusehen (**Abbildung 2.13f**).

Prinzipiell gilt es im Hinblick auf ein homogenes Gussgefüge und ein defektfreies Gussteil eine turbulente Formfüllung zu vermeiden. Wie **Abbildung 2.13** offenlegt, ist beim vorliegenden Gießaufbau trotz steigendem Guss keine ruhige Formfüllung auszunehmen. Als besonders kritisch im Hinblick auf fehlerverursachende Einflüsse ist die Zeitspanne zwischen $t = 0.6 - 1.0 \text{ s}$.

Vor diesem Hintergrund zeigt **Abbildung 2.14** die Zeitschritte $t = 0.6 \text{ s}$, $t = 0.8 \text{ s}$ und $t = 1.0 \text{ s}$ sowie die Röntgenaufnahme (**Abbildung 2.14 rechts**) eines real mit der Legierung GE 48-2-2 gegossenen Probekörpers der Plattendicke $d = 4 \text{ mm}$.

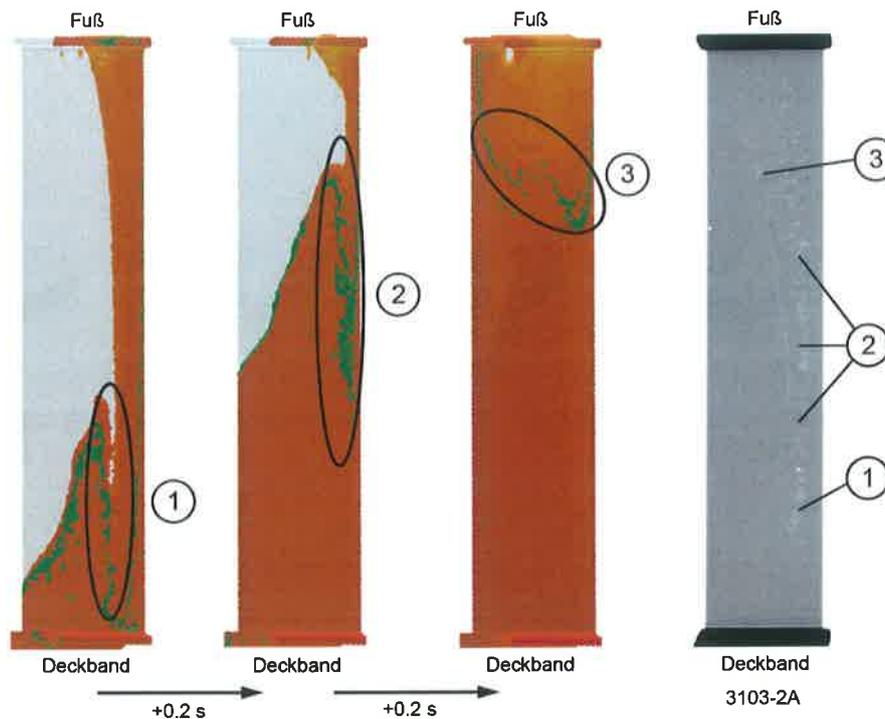


Abbildung 2.14: Evaluierung des simulierten Formfüllvorgangs unter Verwendung einer geeigneten Röntgenaufnahme

Beim Zeitschritt $t = 0.6$ s (**Abbildung 2.14 links**) treffen die Schmelzfronten innerhalb des simplifizierten Schaufelblattes aufeinander. Dieser mit Punkt 1 in **Abbildung 2.14** gekennzeichnete Bereich des Bauteils ist besonders defektgefährdet. Durch das Zusammentreffen von flüssigen und teilerstarrten Schmelzbereichen entsteht in der Regel eine inhomogene Mikrostruktur, welche auch durch nachfolgende Wärmebehandlungen nur schwerlich beseitigt werden kann. Zudem sind derartige Gebiete für das Auftreten von inneren Defekten prädestiniert. Wie aus Punkt 2 in **Abbildung 2.14** erkennbar, setzt sich diese Formfüllungsart über die Blattlänge l in Richtung Fuß fort. Im weiteren Verlauf trifft zusätzlich vom Fußbereich Schmelze auf die vom Deckband her durch das Blatt steigende Schmelzfront, sodass sich ein in Schaufelblattquerrichtung verlaufende Fließfrontenverlauf ergibt (Punkt 3).

Das Röntgenbild des entsprechenden Bauteils zeigt die drei kritischen Areale deutlich. So sind exakt in Schaufelblattlänge l gemäß **Abbildung 2.14** die Porositäten nach Abguss im Röntgenbild lokalisiert. Zusätzlich breitet sich der defektbehaftete Bereich in der Nähe von Punkt 3 in Schaufelblattbreite s aus. In Bezug auf möglichst lunkerfreie und qualitativ hochwertige Gussstücke ist eine derart vorliegende Formfüllungsart zwingend zu vermeiden. Dies kann beispielsweise durch eine Optimierung im Gießdesign ermöglicht werden.

Neben der Beschreibung des Füllvorgangs steht besonders die Aussagekraft der numerischen Simulation bezüglich des Endfüllgrads der untersuchten Probekörper im Fokus des Projektes. Deswegen werden im Folgenden diejenigen Probekörper der Probekörpergruppe A betrachtet, welche beim realen Abguss eine unvollständige Formfüllung aufwiesen. Vor dem Hintergrund einer Vergleichbarkeit der legierungsspezifischen Auswertung wurden hierzu die Probekörper mit den Plattendicken $d = 1\text{mm}$, 1.5mm und 2mm herangezogen.

Exemplarisch stellt **Abbildung 2.15** die Abgussresultate den Ergebnissen der numerischen Simulation für die Legierung GE 48-2-2 in Abhängigkeit von der Plattendicke d gegenüber.

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse



Abbildung 2.15: Gegenüberstellung der numerisch berechneten Formfüllung mit der Gestalt realer Gussteile mit $d = 1\text{ mm}$ für die Legierung GE 48-2-2

Bei der gezeigten Abbildung befindet sich gemäß der Clustermontage der Schaufelfuß an der Oberseite, das Deckband an der Unterseite. Die Simulationsergebnisse sind jeweils farbig links dargestellt und die Abgussresultate rechts daneben.

Die Ergebnisse der parametrisierten numerischen Simulation für die Legierung GE 48-2-2 bilden die Realität verhältnismäßig gut ab. So erlauben sie eine qualitative Aussage zu möglichen Kaltläufen und beschreiben die Formfüllung hinreichend genau. Als Beispiel hierfür sei **Abbildung 2.15e** im Vergleich zu **Abbildung 2.15a** angeführt. Der über den Fußbereich gefüllte Probekörperbereich zeigt eine nahezu identische Ausprägung. **Abbildung 2.15b** und **2.15d** zeigen ebenfalls ein vergleichbares Füllverhalten entlang der vom Clusterzentrum nach außen weisenden Kante der Prüfkörper.

Trotz der vielversprechenden Erkenntnisse ist der Vergleich der Abgussresultate mit den Berechnungen aus der Simulation kritisch zu beleuchten. Dies betrifft speziell die nicht gegebene absolute statistische Sicherheit aufgrund der relativ geringen Anzahl von praktisch durchgeführten Abgüssen. So darf nicht unterschlagen werden, dass die Simulationsergebnisse ein statistisches Mittel aus einer sehr großen Grundgesamtheit widerspiegeln und beim Abgleich mit nur einem Abgussresultat stets eine gewisse Abweichung vorhanden ist.

Unter Anbetracht der oben geschilderten Einflussfaktoren sind die Simulationsergebnisse für die Legierung GE 48-2-2 abschließend als durchweg positiv zu bewerten. Eine weitere Kalibrierung sollte insbesondere auf den in **Abbildung 2.15** dargestellten Deckbandbereich zielen, da trotz geringerer Probekörperdimensionierung eine signifikant höhere Formfüllung beim realen Abguss auftritt.

Angelehnt an die geschilderten Einflussgrößen erfolgte auch die Beurteilung der Simulationsergebnisse für die Legierung 45-2-2 XD. Im Gegensatz zur Legierung GE 48-2-2 führt die größere statistische Masse je Plattendicke zu einer verbesserten Evaluierung der Simulation durch eine größere statistische Sicherheit.

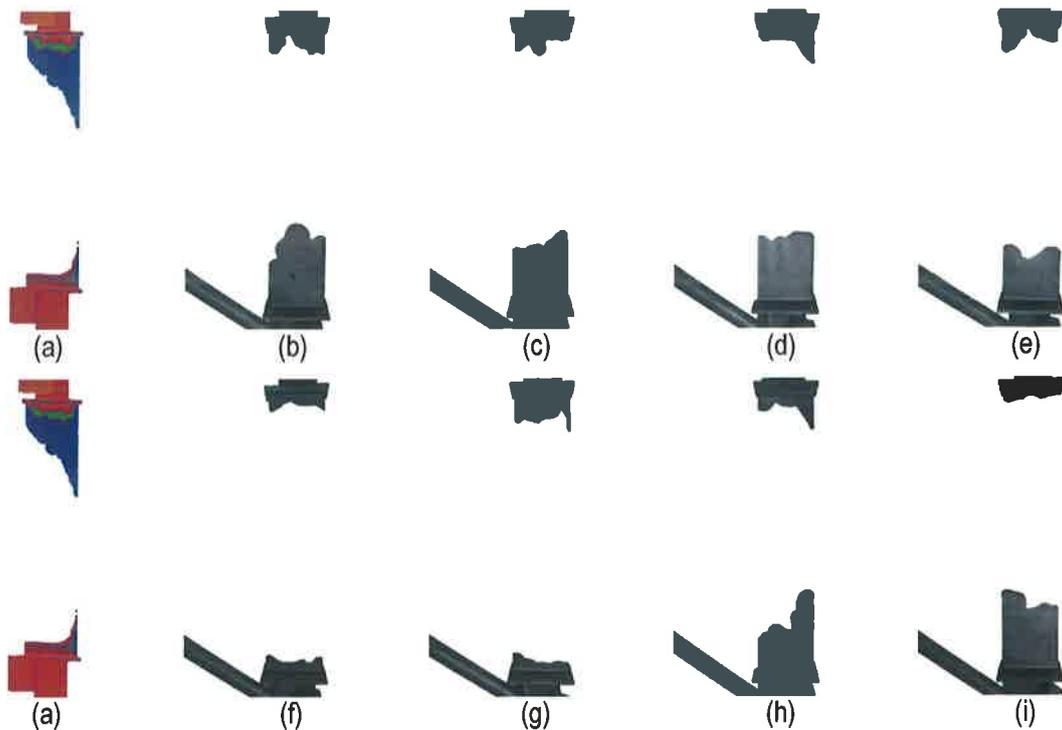


Abbildung 2.16: Gegenüberstellung der numerisch berechneten Formfüllung mit der Gestalt realer Gussteile mit $d = 1\text{mm}$ für die Legierung 45-2-2 XD

Abbildung 2.16 zeigt im Deckbandbereich der Probekörper ein vergleichbares Bild wie bei der Legierung GE 48-2-2. Demnach liegt außer bei **Abbildung 2.16f** und **2.16g** im angesprochenen Probekörpergebiet eine verbesserte Formfüllung beim Realabguss gegenüber der Simulation vor. Mit einem klaren legierungsspezifischen Optimierungsbedarf ist die fußseitige Prüfkörperfüllung anzusehen. Hier zeigt sich über die Gesamtheit der Abgüsse in **Abbildung 2.16** keine klare Auswirkung der Schleuderkräfte auf die Formfüllungsart, während die Simulation einen Schmelzfluss unter starkem Einwirken der Schleuderkräfte prophezeit.

Vor dem Hintergrund, dass die Simulation für die Legierung GE 48-2-2 im Hinblick auf die Prozessgrößen erfolversprechend parametrisiert wurde, scheinen für die Legierung 45-2-2 XD die legierungsspezifischen Kenngrößen noch nicht in ausreichendem Maße kalibriert zu sein. Diese Thematik wird dadurch bekräftigt, dass die prozessbedingten Parameter wie zum Beispiel die Formschalentemperatur und die Drehtischgeschwindigkeit legierungsunabhängig eingestellt worden sind. Einzig die Anfangstemperatur und der Druck beim Abguss kann prozessseitig für die Legierung 45-2-2 XD im Vergleich zur GE 48-2-2 abweichen.

Schlussendlich ist eine optimierte Parametrisierung der Anfangs- und Randbedingungen bei der Simulation für beide untersuchten Legierungen anzustreben, sodass der Ansatz zum Aufzeigen der geometrischen Gestaltungslimits bei der Auslegung von Niederdruckturbinenschaufeln aus $\gamma\text{-TiAl}$ -Legierungen auch mittels numerischer Berechnungen verfolgt werden kann.

Die Probekörper der Gruppe B dienen primär der Charakterisierung des Lunkerverhaltens. In diesem Kapitel wird deshalb die Lunkerverteilung in Abhängigkeit von der geometrischen Gestaltung der Prüfkörper und der Legierungen untersucht.

Die Probekörper der Gruppe B sind in Anlehnung an reale Turbinenschaufeln entworfen worden. Einen besonderen Stellenwert im Hinblick auf den Gießprozess besitzt das spezielle Design der Niederdruckturbinenschaufeln. So bleibt die maximale Profildicke (d_{max}) entlang der Schaufelblattlänge stets auf dem vorderen Viertel der Skellettlinienlänge des jeweiligen Profilschnitts. Daraus resultiert der in **Abbildung 2.17** schematisch dargestellte Füllkanal, entlang welchem die Schmelze im Zuge der Erstarrung die dünnwandigen Bereiche der Schaufel (Vorder- und Hinterkante) speisen kann. Die Prüfkörper der Probekörper B verfügen über denselben Füllkanal und erlauben daher eine Vergleichbarkeit des darin auftretenden Volumendefizits mit realen Turbinenschaufeln.

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

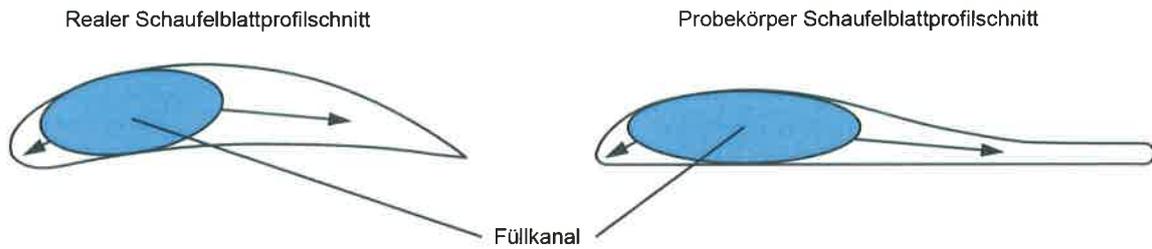


Abbildung 2.17: Schematischer Vergleich der Lokalisierung des Füllkanals beim realen Schaufelblattprofilschnitt und Probekörperprofilschnitt

Relevant ist in diesem Zusammenhang, dass die Schmelze beim Beginn der Formfüllung nicht primär über den angesprochenen Füllkanal in den Formhohlraum transportiert wird, sondern dieser lediglich am Ende des Formfüllvorganges die größte Materialanhäufung darstellt. Da er somit gewissermaßen das Wärmezentrum im Schaufelblatt bildet, wird dort die Erstarrung zuletzt ablaufen. Die Folge ist eine erhöhte Gefahr der Lunkerbildung aufgrund des damit einhergehenden Volumendefizits.

Abbildung 2.18 zeigt beispielhaft die Röntgenaufnahme eines Probekörpers der Legierung 45-2-2 XD. Deutlich zu erkennen ist ein Makrolunker im Deckbandbereich.



Abbildung 2.18: Exemplarische, unbearbeitete Röntgenaufnahme eines Gruppe B-Probekörpers

Für die Analyse des Lunkerverhaltens besitzt jedoch der zuvor beschriebene Schaufelblattbereich des Füllkanals die größte Relevanz. Aus diesem Grund ist in **Abbildung 2.19** im linken Teilbild die Lage des Füllkanals hervorgehoben. Weiterhin offenbaren die Schnitte in Fuß- und Deckbandnähe schematisch die Gestaltung des Schaufelblattes. Beim betrachteten Röntgenbild handelt es sich um dasselbe Bauteil wie bei **Abbildung 2.18**.

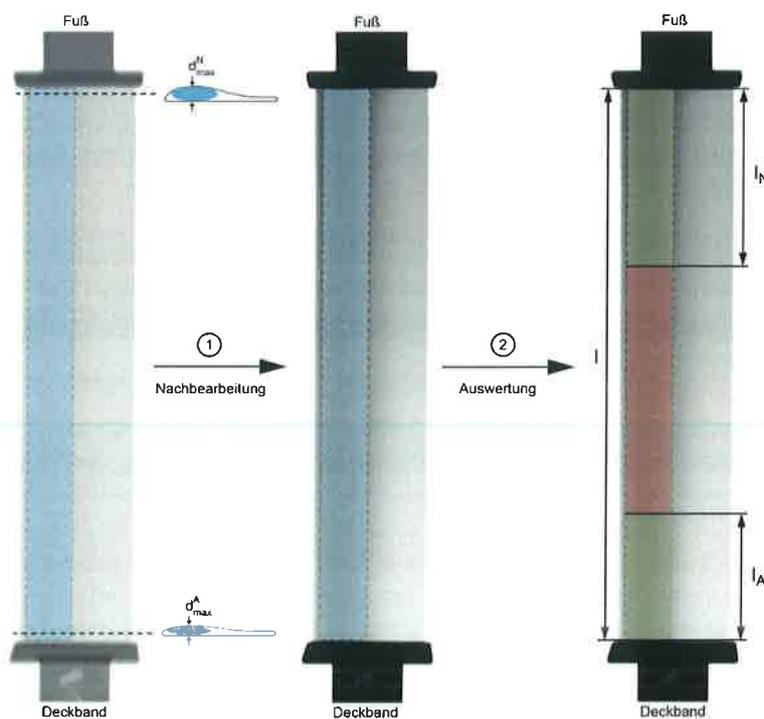


Abbildung 2.19: Ablauf der röntgenographischen Auswertung der Lunkerverteilung im Füllkanal

Bei der Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte \bar{L}_F beider Legierungen in einem Diagramm (**Abbildung 2.20**) zeigt sich zunächst, dass eine legierungsunspezifische Verbesserung des Lunkerhaltens mit zunehmendem δ existiert.

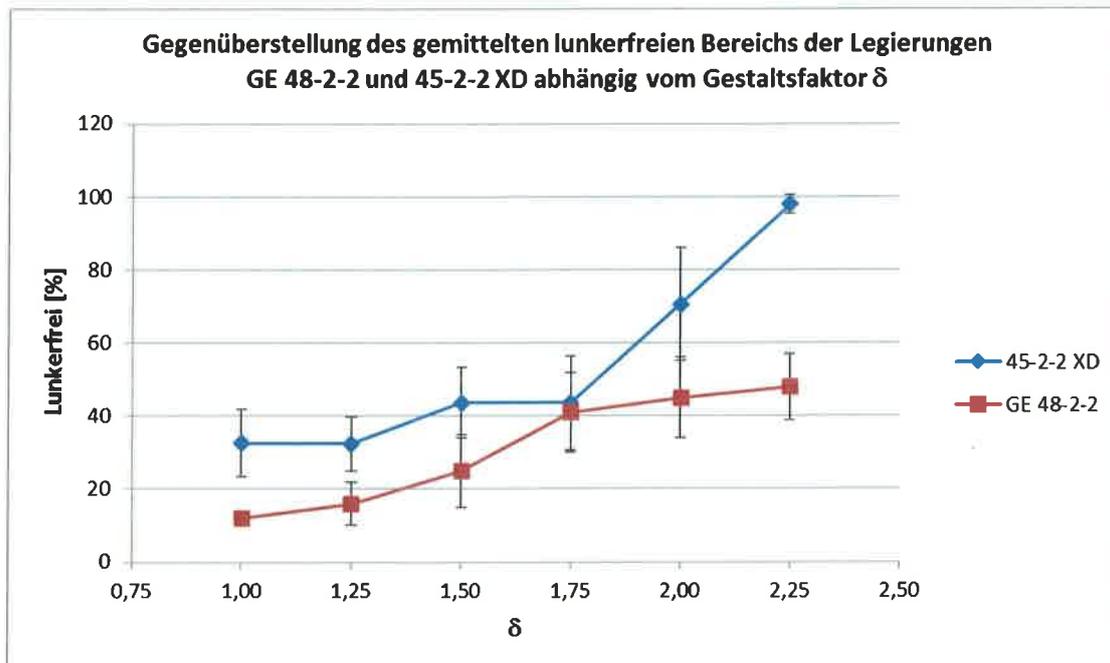


Abbildung 2.20: Gegenüberstellung des gemittelten lunkerfreien Bereichs der Legierungen GE 48-2-2 und 45-2-2 XD abhängig vom Gestaltungsfaktor δ

Als Begründung für die tendenziell volumenfehlerfreieren Gussstücke mit wachsendem δ ist bei der damit einhergehenden Gestaltänderung der Probekörper zu suchen. So beschreibt δ prinzipiell die Keilförmigkeit des Füllkanals des Schaufelblattes. Bei $\delta = 1$ ist ein paralleler Profilverlauf entlang der Schaufelblattlänge l gegeben, während bei $\delta = 2.25$ die maximale Profildicke am Nabenschnitt um den Faktor 2.25 größer gegenüber der maximalen Profildicke am Außenschnitt ausfällt.

Besonders zeigt sich der legierungsspezifische Einfluss bei δ -Werten ≥ 1.75 . So erreichen die zwei untersuchten Legierungen bei $\delta = 1.75$ einen nahezu gleichwertigen lunkerfreien Schaufelblattanteil (ca. 40 %). Bis $\delta = 2.25$ steigert sich die Lunkerfreiheit für die 45-2-2 XD sogar auf nahezu 100 %, während für die GE 48-2-2 lediglich ca. 50 % der Füllkanals im Inneren defektfrei erscheinen.

Diese legierungsspezifischen Unterschiede bei identischer geometrischer Probekörpergestaltung sind dem verschiedenartigen Speisungsvermögen der Legierungen zuzuschreiben. Hierbei wird das Speisungsvermögen entscheidend von der Erstarrungsmorphologie geprägt.

Gemäß den vorherigen Ausführungen basieren die Probekörper der Gruppe C auf der geometrischen Gestaltung der Variante IV der Probekörpergruppe B und werden daher im Folgenden unter Einbeziehung dieser Variante ausgewertet.

Bei realen Niederdruckturbinenschaufeln resultiert jedwede Abweichung von der vollständigen Formfüllung unmittelbar in der Aussortierung des betroffenen Bauteils. Da die Auslegung der Probekörper der Gruppe C auf der Gestaltung realer Turbinenschaufelgeometrien beruht, wird anders als bei der Bewertung des Formfüllungs- und Fließvermögens im Rahmen der Probekörpergruppe A der zentrale Fokus nicht auf die exakte Defekt- bzw. Kaltlaufgestaltung gelegt.

Vielmehr rückt das absolute Auftreten von unvollständiger Formfüllung in Abhängigkeit von der Schaufelblattthinterkantengestaltung in den Vordergrund der Analyse, d.h. primär die Ausschussrate. Gemäß Versuchsplan sind insgesamt vier Probekörper pro Variante für die Legierung GE 48-2-2 und vier für die Legierung 45-2-2 XD gegossen worden. Tabelle 2.7 zeigt die Ausschussanzahl für die Variante I - IV der Probekörpergruppe C sowie

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

der Variante IV der Probekörpergruppe B. Die Hinterkantendicke d_H liegt konstant bei 1.5 mm, während die Profilparallelität x variiert wird.

Tabelle 2.7: Anzahl fehlerhafter Gussstücke mit $d_H = 1.5\text{mm}$ in Abhängigkeit von der Profilparallelität x und der Legierung

Legierung	$x = 0\text{mm}$	$x = 2\text{mm}$	$x = 4\text{mm}$	$x = 6\text{mm}$	$x = 8\text{mm}$
GE 48-2-2	0 von 4	0 von 4	0 von 4	0 von 4	2 von 4
45-2-2 XD	1 von 4	0 von 4	0 von 4	1 von 4	0 von 4

Trotz der nicht zu 100 % gefüllten Prüfkörper bei $x = 6\text{mm}$ bei der Legierung 45-2-2 XD und bei $x = 8\text{mm}$ bei der Legierung GE 48-2-2, kann von einem ausreichend hohen Füllvermögen gesprochen werden. So sind die Gründe für eine unvollständige Formfüllung im Wesentlichen durch Prozessschwankungen bedingt, wodurch auch der nicht komplett gefüllte Formhohlraum bei $x = 0\text{mm}$ für die Legierung 45-2-2 XD begründet ist. Speziell der Vergleich zwischen den Legierungen bei $x = 8\text{mm}$ zeigt, dass das Ausmaß der Formfüllung einem klaren Prozesseinfluss unterliegt.

Anhand der Resultate gemäß **Tabelle 2.7** zeigt sich insgesamt, dass im betrachteten Intervall von $x = 0\text{mm}$ bis $x = 8\text{mm}$ für eine Hinterkantendicke d_H von 1.5mm legierungsunabhängig eine vollständige Formfüllung angenommen werden kann. Unter Anbetracht der Gesamtschaufelbreite s von 40mm nimmt der kritisch zu füllende Bereich bei der $x = 8\text{mm}$ Variante bereits 20 % der Breite ein. Bei realen Turbinenschaufelgeometrien wird eine derartige Größe der nahezu Profilparallelität nur in seltenen Fällen überschritten, sodass die gewonnenen Ergebnisse in **Tabelle 2.7** durchaus positiv zu bewerten sind. Die kritische Grenzlänge für x ist oberhalb von 8mm zu veranschlagen.

Die Analyse der absoluten Formfüllung in Abhängigkeit von einer variablen Hinterkantendicke d_H bei konstanter Profilparallelität $x = 4\text{mm}$ bringt ein anderes Ergebnis zum Ausdruck. **Tabelle 2.8** führt die ermittelte Fehlproduktion legierungsspezifisch in Abhängigkeit von der geometrischen Gestaltung auf.

Tabelle 2.8: Anzahl fehlerhafter Gussstücke mit $x = 4\text{mm}$ in Abhängigkeit von der Hinterkantendicke d_H und Legierung

Legierung	$d_H = 1\text{mm}$	$d_H = 1,25\text{mm}$	$d_H = 1,5\text{mm}$
GE 48-2-2	4 von 4	2 von 4	0 von 4
45-2-2 XD	4 von 4	1 von 4	0 von 4

Zunächst ist auch hier kein klarer Legierungseinfluss auszumachen, sodass die nachfolgende Auswertung für beide Legierungen gleichermaßen Gültigkeit besitzt. Als kritische Größe für die Gestaltung der Hinterkantendicke d_{Hkrit} folgt aus **Tabelle 2.8** ein Wert von 1.25mm mit einer Ausschussrate von ca. 50 %. So ist für $d_H < d_{Hkrit}$ keine sichere Formfüllung gewährleistet, während für $d_H > d_{Hkrit}$ der Grad der vollständigen Formfüllung zunimmt und bei $d_H = 1.5\text{mm}$ eine 100 %ige Formfüllung vorliegt.

Die Ergebnisse aus **Tabelle 2.8** sind bei der Auslegung der Hinterkante von realen Niederdruckturbinenschaufeln von großer Relevanz. So zeigt sich unter Einbezug der Erkenntnisse aus **Tabelle 2.7**, dass die Hinterkantendicke d_H einen deutlich größeren Einfluss auf die Ausschussrate hat als die Profilparallelität x . Folglich ist nicht so sehr der nahezu parallel verlaufende Längenabschnitt an der Hinterkante eines Schaufelprofilschnitts als kritisch zu erachten, sondern viel mehr die absolute Dicke an der Hinterkante. Ist für einen fehlerfreien Abguss eine Aufdickung des Schaufelprofils unumgänglich, so muss das Übermaß nicht entlang des gesamten Profilverlaufs eines Schaufelprofilschnitts erfolgen, sondern tatsächlich nur im Areal nahe der Hinterkante. In der bisherigen Praxis ist man jedoch dazu übergegangen, das Schaufelprofil umlaufend aufzudicken, nicht zuletzt deshalb, um für die spätere Bearbeitung des Profils das nötige Aufmaß zu haben. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Auslegungstool strebt jedoch eine gesamtheitliche Anpassung des Schaufelprofils unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Gießlimits an, so dass ein net-shape Guss möglich ist und somit der anschließende Bearbeitungsaufwand minimiert wird.

Wie die Ergebnisse der Probekörpergruppe A zeigen, ist davon auszugehen, dass die vorherrschenden thermischen Bedingungen für eine vollständige Füllung der Hinterkantendicke von 1mm ausreichend sein sollte. Die auftretenden Kaltläufe bei einer Hinterkantendicke d_H von 1.5mm bei der Probekörpergruppe C haben folglich prozessbedingte und weniger thermische Ursachen. Diesbezüglich ist eine Optimierung des Gießaufbaus anzustreben, um die einwirkenden Schleuderkräfte zu maximieren und in Folge des höheren Schleuderdruckes eine vollständige Formfüllung an der Hinterkante zu erreichen.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurde eine neue Schaufel unter Berücksichtigung der Gießlimits generiert.

Abbildung 2.21 zeigt das Simulationsergebnis der optimierten Schaufel. Deutlich ist zu erkennen, dass nach ca. 0,4 s die Austrittskanten schon komplett gefüllt sind und somit keine Kaltläufe zu erwarten sind. Die komplette Formfüllung ist bereits nach 0,8s abgeschlossen.

Solution Time 0.404 (s)

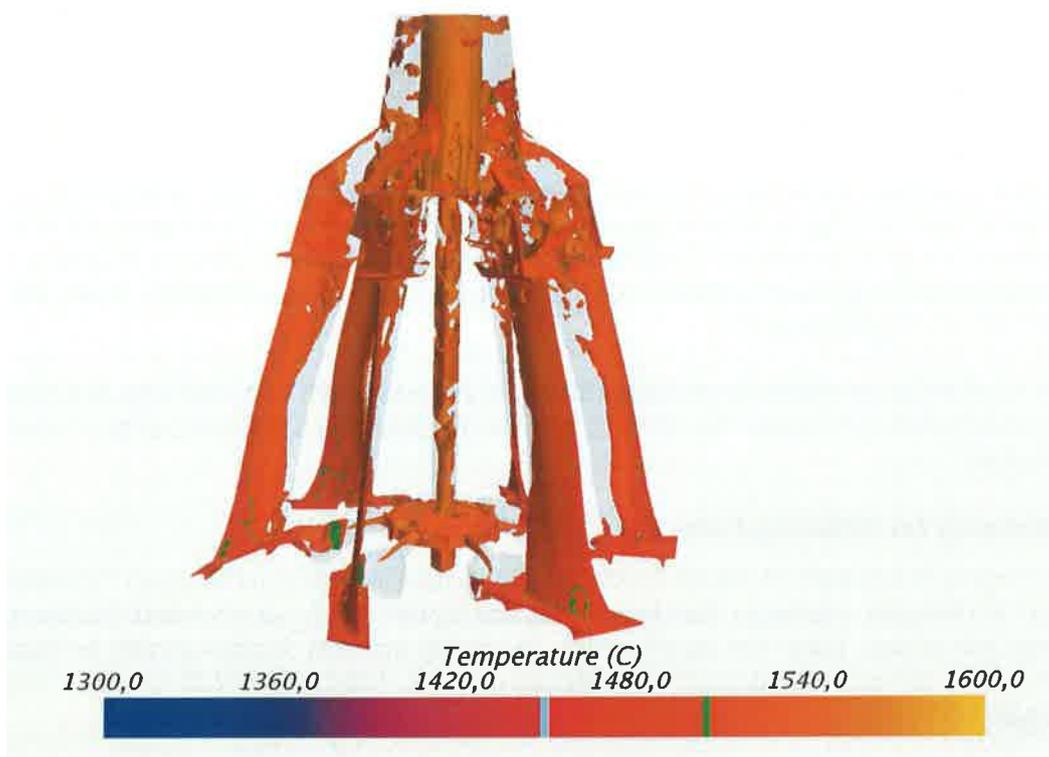


Abbildung 2.21: Ergebnis der Formfüllungssimulation der optimierten Schaufel

Abbildung 2.22 zeigt den Abguss der optimierten Schaufel. Deutlich ist die vollständige Formfüllung des Blattes zu erkennen.

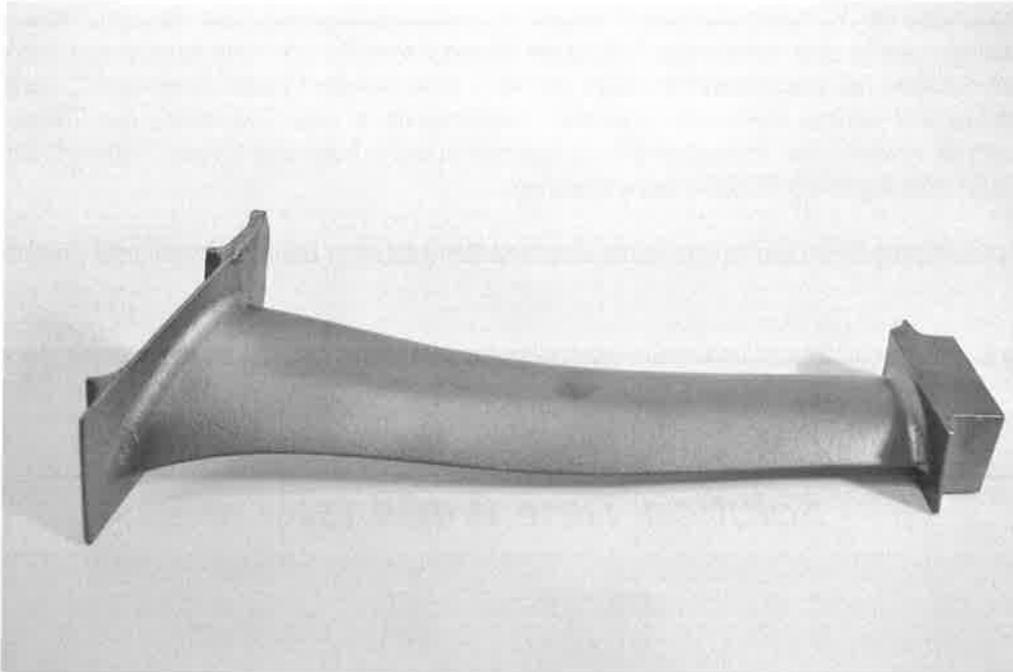


Abbildung 2.22: Abguss der optimierten TATT-Schaufel

Die wichtigste Erkenntnis, die hieraus gewonnen werden kann ist die Tatsache, dass umfangreiche aerodynamische Anpassungen am Schaufeldesign vorgenommen werden können, ohne die Performance der Niederdruckturbinenschaufel und somit der gesamten Stufe signifikant zu beeinflussen. Insbesondere die Erkenntnis, dass die Berücksichtigung von Gießlimits und somit die Gewährleistung der Gießbarkeit eines Designs, keinen Einfluss auf die Effizienz eines Schaufeldesigns hat.

Somit wird deutlich dass es möglich ist ein Schaufeldesign so zu gestalten, dass es sowohl die aerodynamischen und strukturmechanischen Vorgaben des OEM als auch die gießtechnischen Erfordernisse des Herstellers der Schaufeln erfüllt.

2.1.2 Validierung des Auslegungstools

Zur Validierung der Prozesskette ist anhand von Demonstratorschaufeln ein Testlauf auf einem Turbinenprüfstand bei DLR-AT in Göttingen vorgesehen. Bei diesem Prüfstand können jedoch nur Hochdruck-Turbinenschaufeln (HPT) eingesetzt werden. Daher war es erforderlich, die bereits etablierte Auslegungskette für Niederdruckturbinenschaufeln, auf eine Hochdruckschaufel anzuwenden. Die **Abbildungen 2.23** und **2.24** zeigen den entsprechenden Prüfstand.

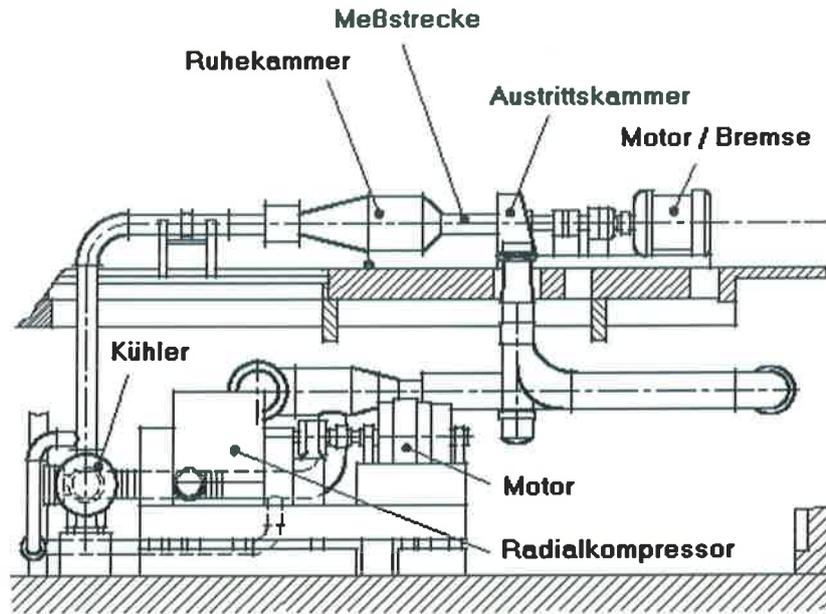


Abbildung 2.23: Turbinenprüfstand mit geschlossenem Strömungskreislauf

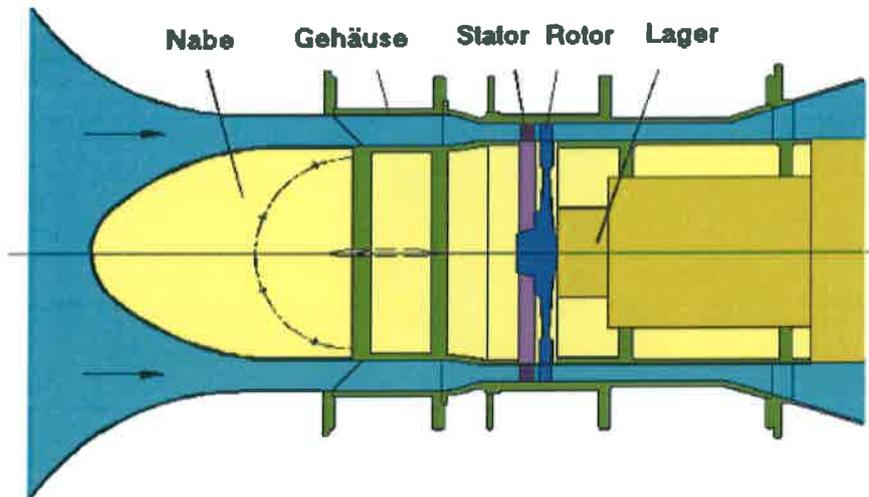


Abbildung 2.24: Messstrecke mit eingebauter Turbinenstufe

Abbildung 2.25 zeigt das bisher verwendete Design der Hochdruckschaufel, die auf dem Prüfstand in Göttingen bisher montiert war. Diese war aus einer Ni-Basis Legierung gefertigt und wurde nur für aerodynamische Messungen verwendet.

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

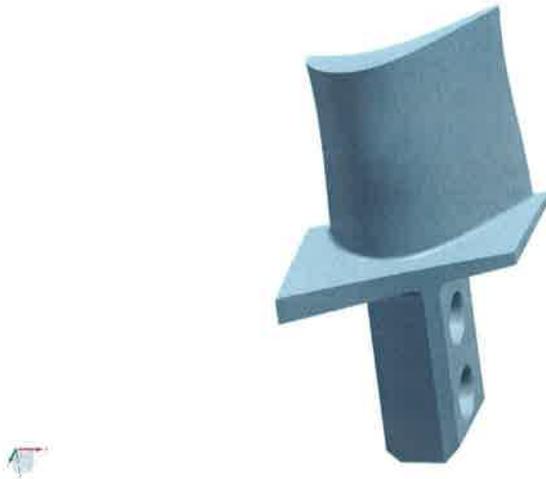


Abbildung 2.25: Original-Design der Hochdruckschaufel

Die DLR Institute für Werkstofforschung in Köln, Aerodynamik in Göttingen und Strukturmechanik in Stuttgart erzeugten unter Anwendung des Auslegungstools eine modifizierte Turbinenschaufel, die aerodynamisch optimierte, strukturmechanisch überprüfte und unter Berücksichtigung von Gießlimits ausgelegte HDT-Schaufel. In der nachfolgenden Abbildung 2.26 ist die CAD-Zeichnung der Schaufel im endbearbeiteten Zustand dargestellt.



Abbildung 2.26 HPT-Turbinenschaufel im Endzustand

Anhand des vorliegenden CAD-Datensatzes der optimierten HPT-Schaufel wurde bei Access zunächst ein geeignetes Gießsystem aufgebaut und numerisch simuliert.

Im Anschluss an die Simulation wurden die entsprechenden Gießaufbauten gefertigt und vergossen. Da die fertigen Bauteile in einen Prüfstand eingebaut wurden, wurde eine Metallmatrize gefertigt, um eine bestmögliche Qualität der Wachsmodele zu gewährleisten. **Abbildung 2.27** zeigt die verwendete Matrize, **Abbildung 2.28** ein endbearbeitetes Bauteil.

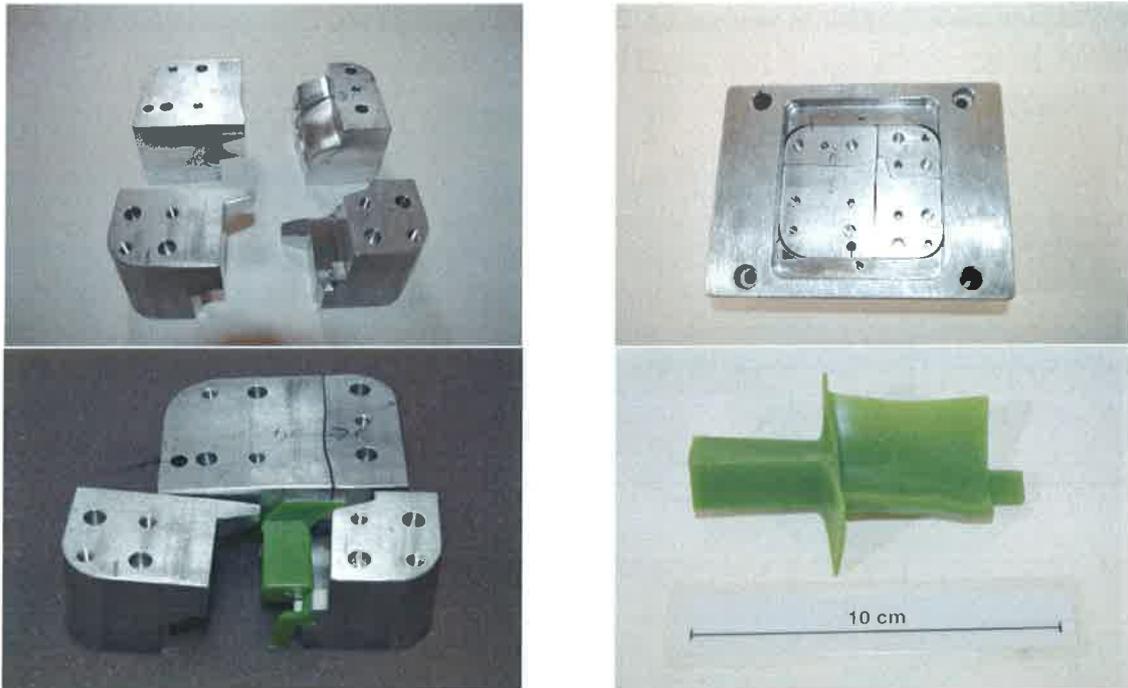


Abbildung 2.27: Matrize mit Wachsmodell



Abbildung 2.28: Endbearbeitete HPT-Schaufel

Bei der Herstellung der Hochdruckturbinenschaufeln für den Prüfstandtest beim DLR-AT in Göttingen kam das komplette Auslegungstool zur Anwendung. Die Schaufel wurde aerodynamisch, unter Berücksichtigung der Gießlimits, ausgelegt, anhand der Werkstoffkennwerte strukturmechanisch überprüft und mittels Gießsimulation auf Gießbarkeit validiert. Die hergestellten HDT-Schaufeln waren größtenteils defektfrei, Defekte im Fußbereich, die vereinzelt zu beobachten waren, können durch entsprechende Modifikation des Gießaufbaus abgestellt werden. Dies war jedoch im Rahmen der Erstellung des Auslegungstools zweitrangig.

Die Auslegungskette funktionierte reibungsfrei und lieferte gute Ergebnisse. Entsprechende Feinabstimmungen sind noch erforderlich, die Resultate zeigen jedoch die Einsatztauglichkeit bei der Auslegung von Turbinenschaufeln. Der Einsatz des Tools als Supportleistung bei der Auslegung realer Profile ist in Vorbereitung.

Die gefertigten HPT-Schaufeln wurden als Vorbereitung der aerodynamischen Messungen beim DLR in Göttingen einem sogenannten Schleudertest unterzogen. In diesem vom TÜV vorgeschriebenen Vor-Test müssen die Bauteile den Nachweis der Festigkeit bei der zuvor ausgelegten Prüfstand-Drehzahl erbringen, um im späteren

2. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

realen Prüfstand keine Schäden zu verursachen. Die **Abbildungen 2.29** und **2.30** zeigen diese Schleudertest-Anlage.



Abbildung 2.29: Schleudertest-Anlage

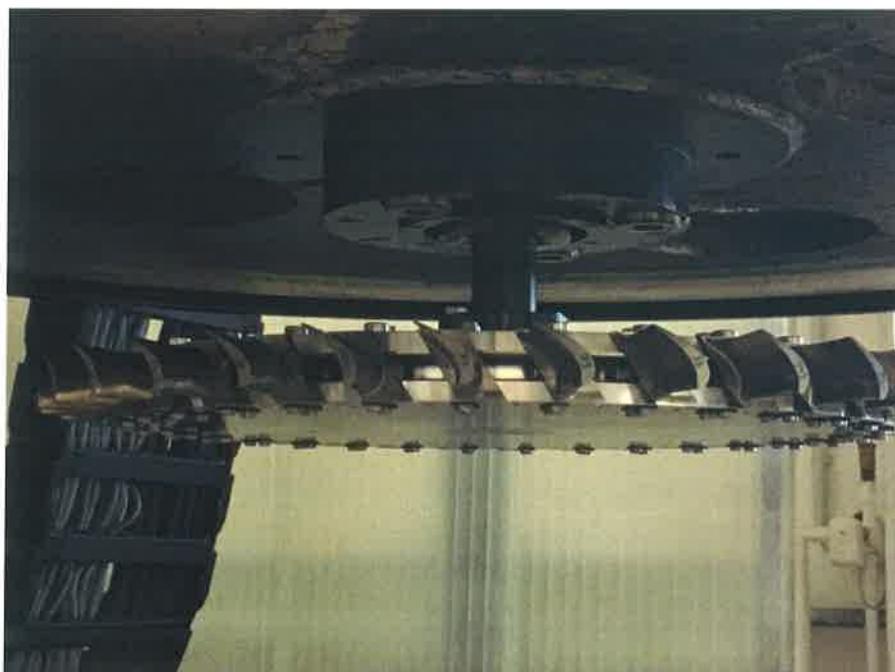


Abbildung 2.30: Rotor am Deckel der Schleudertest-Anlage

Zunächst wurden einige Vorversuche bei einer niedrigen Drehzahl (2000Upm) durchgeführt, um das Verhalten des Rotors bzgl. eventueller Unwucht sowie Überschwingen der angefahrenen Drehzahl zu ermitteln. Eine Unwucht war nicht zu erkennen und nach Verringerung der Beschleunigungswerte trat ein Überschwingen des Systems nur noch in geringem Maße auf. Auf Basis dieser Anpassungen wurde der eigentliche Test durchgeführt. Hierzu wurde der Rotor zunächst in 210s auf eine Drehzahl von 6000Upm beschleunigt und für ca. 60s konstant gehalten. Zu diesem Zeitpunkt war es dann noch möglich, bei einem zu hohen Überschwingen der Drehzahl, den Versuch abzubrechen. Da dies nicht der Fall war, wurde auf die Ziel-Drehzahl von 6515Upm beschleunigt und für 5Min. gehalten und anschließend abgebremst. Abbildung 2.31 zeigt grafisch den Versuchsablauf. Als weitere wichtige Kenngröße ist in der Grafik der Schwingweg der Drehachse zu erkennen. Deutlich ist bei einer Drehzahl von ca.

500Upm die Eigenfrequenz des Systems zu erkennen, da hier die größten Ausschläge zu erkennen sind. Ansonsten läuft das System bei Nenn-Drehzahl äußerst stabil, d.h. es sind keine Unwuchten zu erkennen, die bei einem Schaufelbruch auftreten würden.

Der erfolgreiche Schleudertest bestätigt die Auslegung der Schaufeln bzgl. der erforderlichen Festigkeiten und bestätigt somit das Anwendungspotential des Auslegungstools.

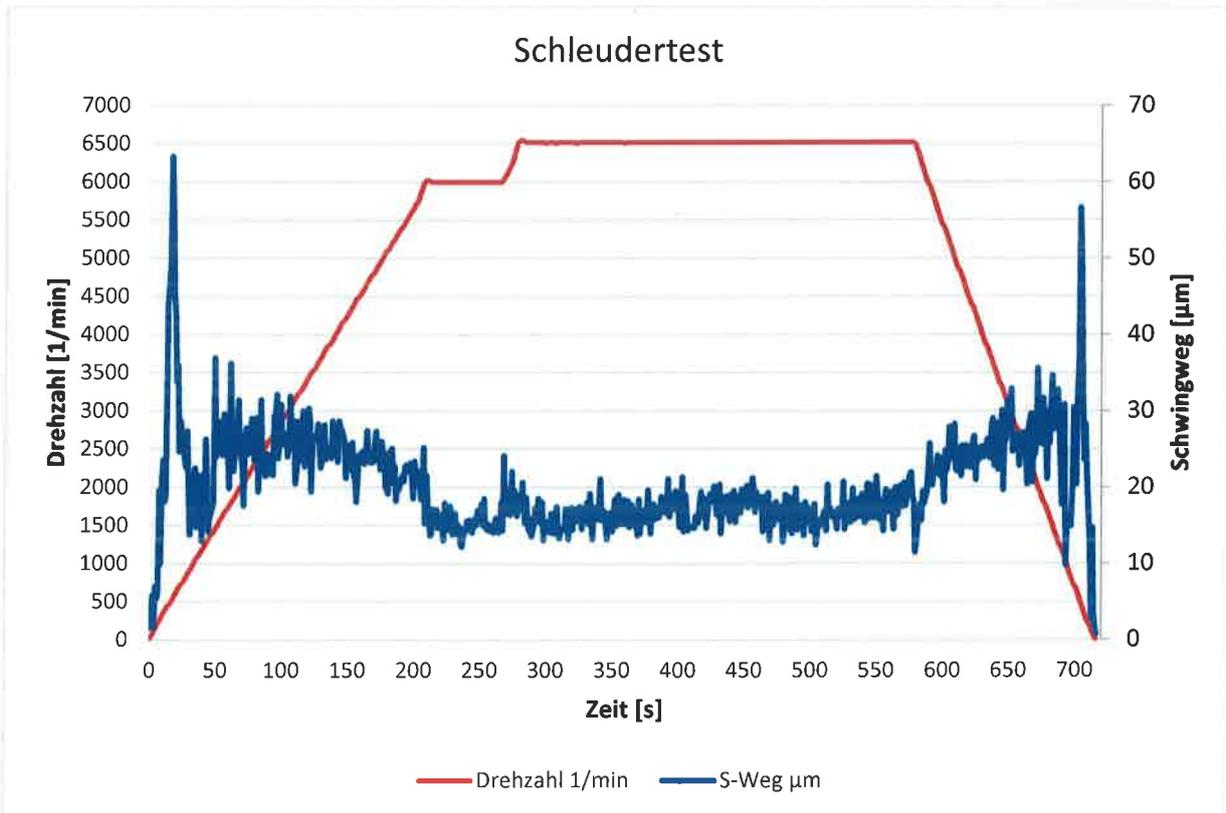


Abbildung 2.31: Grafische Darstellung des Schleuder-Tests

Abschließend erfolgten noch die aerodynamischen Messungen im Prüfstand in Göttingen. Auch diese Tests bestätigten das Anwendungspotential des Auslegungstools, da der Wirkungsgrad der optimierten und gießbaren Schaufel in der gleichen Größenordnung des Ursprungsdesigns lag.

Mit Abschluss dieser Tests konnten alle zuvor definierten Ziele des Projektes erreicht werden.

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projektes sind hauptsächlich Personalkosten angefallen. Vorrangig sind dies Kosten für den Projektgenieur zur Koordination des Projektes sowie zur Planung und Auswertung der umfangreichen Gießversuche zur Ermittlung der geometrischen Limits für den Guss sowie für den Techniker zur Durchführung der Versuche.

Die Position „Vergabe von Aufträgen“ besteht zum einen aus den Kosten für das Hippen der gefertigten Bauteile sowie der externen mechanischen Bearbeitung der Hochdruckschaufeln für die Prüfstandtests.

Der größte Posten in der Rubrik „Verbrauchsmaterial“ besteht in der Beschaffung von Legierung sowie der Herstellung von keramischen Formschalen zur Durchführung der Gießversuche.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Sämtliche im Projekt geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Der Verwertungsplan des Vorhabens TATT basiert, wie in dem Zuwendungsbescheid gefordert, wesentlich auf den folgenden beiden Punkten:

- Angebot der Unterstützung und Expertendienstleistung mit der Toolbox an Triebwerks-OEM ab Mitte 2017
- Herausgabe des Handbuchs „Guss-Regelwerk für TiAl“ u.a. mit Designgrenzkurven für die Zielgruppe der Designer der OEMs ab Ende 2017

Darüber hinaus werden die in dem Projekt gewonnen Erkenntnisse und Ergebnisse ebenfalls für wissenschaftliche Publikationen, Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie für die Akquise weiterer Forschungsvorhaben mit industrieller Relevanz genutzt.

2.5 Fortschritt anderer Stellen

Soweit bisher bekannt, existiert ein vergleichbares Auslegungstools an keiner anderen Stelle.

2.6 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen:

“Simulation of Cold Shuts and Misruns in Centrifugal Casting of TiAl Low Pressure Turbine Blades”, S. Jana, J. Jakumeit, R. Tiefers and T. Stoyanov, Materials Science Forum Vol. 765 (2013) pp 155-159

“Prediction of Misruns in Thin Wall Castings Using Computational Simulation”, J. Jakumeit, E. Subasic, M. Bünck, TMS 2014

“Numerical Modelling of Centrifugal Casting Processes and Comparison of Numerical Predictions against Experiments”, S. Jana, J. Aguilar, T. Stoyanov, R. Tiefers and M. Buenk, AMPT 2015

“A Stochastic Reliability Model for Application in a Multidisciplinary Optimization of a Low Pressure Turbine Blade made of Titanium Aluminide”, C. Dresbach, T. Becker, C. Buske, S. Reh, T. Schmidt, R. Tiefers, J. Wischek, S. Zur, Latin American Journal of Solids and Structures

“Distributed Multidisciplinary Optimization of a Turbine Blade Regarding Performance, Reliability and Castability”, C. Buske, A. Krumme, T. Schmidt, C. Dresbach, S. Zur, R. Tiefers, ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT 2016

Bachelor-, Master-, Studien- und Diplomarbeiten:

Stefan Zimmermann, „Entwicklung einer Prüfmethode zur Evaluierung der Gießereigenschaften und geometrischen Gestaltungslimits von near-net-shape TiAl-Turbinenschaufeln im Schleuderguss“, 09/2012, Masterarbeit

Bianca Wiedemann, „Untersuchung der geometrischen Limitierungen bei der gießtechnischen Herstellung von TiAl-Turbinenschaufeln“, 10/2014, Masterarbeit

Anastasia Troitskaya, „Bewertung der Prozessstabilität entlang der gesamten Fertigungskette von Hochdruck-Turbinenschaufeln aus TiAl zur Validierung der aerodynamischen Auslegung im RGG-Test“, 04/2015, Bachelorarbeit

Doktorarbeit:

Rüdiger Tiefers, „Optimierung der Auslegung und des Gießprozesses von near-net-shape Bauteilen zur reproduzierbaren und kosteneffektiven Herstellung von Niederdruckturbinenschaufeln aus dem Hochleistungswerkstoff Titanaluminium“, in Arbeit

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Titanium Aluminide Turbine Toolbox - TATT	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Tiefers, Rüdiger	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Access e.V., Intzestr. 5, 52072 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 20T1112A
	11. Seitenzahl 38
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 8
	15. Abbildungen 32
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Bisher wird die Auslegung von Turbinenschaufeln in den drei Disziplinen Aerodynamik, Strukturmechanik und Herstellbarkeit größtenteils voneinander entkoppelt vorgenommen. Das aerodynamisch optimierte Design wird aus strukturmechanischer Sicht geprüft und dem Gießer übergeben. Häufig ist jedoch die Gießbarkeit der Schaufel durch die hohen Anforderungen aus dem so festgelegten Design nicht gewährleistet, so dass ein unter Umständen häufiges manuelles Redesign der Schaufel vorgenommen werden muss.</p> <p>Ziel ist ein vernetztes Auslegungstool für die Herstellung von Niederdruckturbinenkomponenten aus dem Hochleistungswerkstoff TiAl zu entwickeln, mit dem automatisiert eine Schaufelgeometrie generiert werden kann, die das Optimum aus effizienter Aerodynamik, wirtschaftlicher Herstellung, werkstoffgerechter Bauweise und langer Lebensdauer darstellt.</p> <p>Die Partner führen ihre Kernkompetenzen aus den Bereichen Aerodynamische Performance, Mechanik und Design, Qualität und Zuverlässigkeit sowie Fertigung und Kosten zusammen. Bestehende Lücken werden durch eine interaktive Verzahnung von numerischen und experimentellen Methoden einschließlich Bauteilfertigung und -validierung geschlossen. Durch den iterativen Austausch entsteht eine optimierte Auslegungsmatrix zum Bauteildesign.</p> <p>Die Partner beabsichtigen mit dem Auslegungstool schneller und effizienter die Optimierung der Bauteile unter Einbeziehung aller Aspekte zu erreichen. Durch den frühzeitigen Einsatz kann die Anzahl der Iterationen zwischen Auslegung und Fertigung entscheidend reduziert werden und somit erheblich zur Kostenersparnis beitragen.</p>	
19. Schlagwörter TiAl, Multidisziplinäre Optimierung, Schleuderguss, Turbinenschaufeln, net-shape	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Titanium Aluminide Turbine Toolbox - TATT	
4. author(s) (family name, first name(s)) Tiefers, Rüdiger	5. end of project 31.12.2016
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Access e.V., Intzestr. 5, 52072 Aachen	9. originator's report no.
	10. reference no. 20T1112A
	11. no. of pages 38
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 3
	14. no. of tables 8
	15. no. of figures 32
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Up to now, the design of turbine blades has largely been decoupled from each other in the three disciplines aerodynamics, structural mechanics and manufacturability. The aerodynamically optimized design is inspected from the structural mechanics point of view and handed over to the founder. Often, however, the castability of the blade is not guaranteed by the high requirements from the defined design, so that a manual redesign of the blade may have to be carried out frequently. The goal is to develop a networked design tool for the production of low-pressure turbine components from the high-performance material TiAl, to generate blade geometry automatically, which is the optimum of efficient aerodynamics, economical production, material-friendly construction and long life. The partners bring together their core competencies in the fields of aerodynamic performance, mechanics and design, quality and reliability as well as production and costs. Existing gaps are closed by an interactive interlinking of numerical and experimental methods, including component fabrication and validation. The iterative exchange results in an optimized design matrix for building construction design. The partners intend to use the design tool to achieve the optimization of the components more quickly and efficiently, taking all aspects into account. Through the early use, the number of iterations between design and production can be decisively reduced and thus contribute significantly to the cost savings.	
19. keywords TiAl, multidisciplinary optimization, centrifugal casting, turbine blades, net-shape	
20. publisher	21. price