



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Evolution im Aluminium-Guss von Fahrwerk-Komponenten

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.),

vorgelegt

von Dipl.-Ing. (TU) Thomas Beganovic

geboren am 13.11.1979 in Celle

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Eigenfeld, Konstanz
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Rüdiger Bähr, Magdeburg

Tag der Verleihung: 12. September 2016

– Leerseite –

Haftungsausschlusserklärung

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

– Leerseite –

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich keine Unterstützungsleistungen von anderen Personen erhalten.

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Braunschweig, den 08. Juni 2016

Ort, Datum

Dipl.-Ing. (TU) Thomas Beganovic

– Leerseite –

„Wichtig ist, dass man nicht aufhört zu fragen.“

Albert Einstein

deutsch-amerikanischer Physiker (1879 - 1955)

– Leerseite –

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Entwicklung Achsen der Volkswagen AG in Braunschweig. Mein Dank gilt allen, die mich in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und gefördert haben.

Besonderer Dank gebührt dem ehemaligen Leiter des Gießerei-Institutes der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Eigenfeld für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit sowie für seine Geduld, sein Engagement und die aufschlussreichen Gespräche.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Rüdiger Bähr gilt mein besonderer Dank für die Übernahme der Zweitprüfung und der informativen wie lehrreichen Gespräche. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolf für die Unterstützung. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Holger Manz für die unternehmensseitige Betreuung meiner Arbeit sowie Herrn Jürgen Sellschopp und Herrn Maik Drobeck für die gewährte Zeit, die anregenden Diskussionen und Ratschläge sowie das entgegenbrachte Vertrauen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen aus der Entwicklung für Ihre Geduld und ihre Unterstützung. Besonders erwähnen möchte ich hier Adrijan Jazbec, Carsten Demmer und Martin Welzel. Auch bedanke ich mich bei Andreas Marx und Sebastian Gierth aus der Konzernforschung der Volkswagen AG für die spannenden Diskussionen und die tolle Zusammenarbeit. Mein Dank gilt Sönke Elvers der Firma Arkentec für die Unterstützung. Mein Dank gebührt den Kollegen im Leichtmetallzentrum und im Werkzeugbau der Volkswagen AG in Braunschweig, ohne die viele der Versuche nicht möglich gewesen wären. Bedanken möchte ich mich bei der Fa. KSM Castings in Hildesheim für die Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen. Besonderer Dank gilt Andreas Kuhlmann, René Rautenstrauch, Jan Lanser, Ninja Meyn und Sebastian Gellrich, die mich im Rahmen ihrer studentischen Tätigkeit tatkräftig unterstützen.

Besonders herzlicher Dank gilt meinen Eltern, auf deren Unterstützung ich zu jeder Zeit zählen konnte.

– Leerseite –

Kurzfassung

Basierend auf einem umfangreichen Überblick nachhaltiger Schlüsseltechnologien wird gezeigt, wie den aktuellen Herausforderungen im Automobilbau unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Ziele für Produkt und Prozess entgegnet wird. Konsequenter Leichtbau dient dabei als zentrales Element, neben der Erreichung übergeordneter Ziele zur Emissionsreduzierung auch das Mehrgewicht aus Elektrifizierung, integraler Sicherheitssysteme und Komfortfeatures zu kompensieren und die Gewichtsspirale umzukehren.

Ausgehend vom Leichtbaugedanken im Fahrwerk ergibt sich die Fragestellung, welche Werkstoff- und Prozessgrenzen Leichtbaupotenziale beschränken und wie diese zu durchbrechen sind. Zentraler Bestandteil der Betrachtungen ist dabei der Aluminiumguss von Fahrwerk-Komponenten im Schwerkraft-Kokillenguss sowie im Gegendruck-Gießen (CPC). Mit Hilfe der LifeCycle-Analyse werden zunächst Kostentreiber und ökologische Potenziale für den Bereich des Aluminium-Gusses identifiziert. Schlüsselpositionen nehmen dabei das Bauteilgewicht und der Wärmebehandlungsprozess ein.

Zur Potenzialanalyse der Gewichtsreduzierung wird anhand von Umlaufbiegeprüfungen das dynamische Verhalten unterschiedlicher Wandstärken untersucht. Im Weiteren wird gezeigt, wie Wandstärkenreduzierungen am Bauteil durch das Fließ- und Formfüllverhalten verbessernde Oberflächenstrukturierungen der zugehörigen Kokillen, umgesetzt werden können, welche neuen konstruktiven Regeln dabei zu beachten und welche Potenziale zur Gewichtsreduzierung damit verbunden sind.

Im Bereich der Wärmebehandlung wird untersucht, wie diese Gesamtprozesszeit verkürzt werden kann. Zudem werden Untersuchungen zum dynamischen Bauteilverhalten für unterschiedliche Zeit-Temperatur-Folgen durchgeführt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Parametervariation von Abschreck- und Auslagerungsprozess.

– Leerseite –

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1. Einleitung.....	3
1.1 Treibende Kräfte – Umwelt, Komfort und Verbrauch	3
1.2 CO ₂ -Emissionen als Herausforderung.....	4
1.3 Leichtbau im Fahrzeug	7
1.3.1 Der Leichtbaugedanke im Fahrwerk	10
1.4 Motivation und Ziel der Arbeit.....	15
2. Grundlagen.....	17
2.1 Das Fahrwerk	17
2.2 Auslegung von gegossenen Fahrwerk-Komponenten	20
2.2.1 Grundlagen der Topologieoptimierung von Gussbauteilen	22
2.2.2 Gießsimulation von Aluminium-Komponenten	27
2.2.3 Betriebsfestigkeitsprüfung von Fahrwerk-Komponenten.....	28
2.3 Aluminium-Guss	33
2.3.1 Schwerkraft-Kokillengießverfahren	34
2.3.2 Gegendruck-Gießverfahren (CPC)	35
2.3.3 Das System Aluminium-Silizium	39
2.4 Wärmebehandlung	43
2.4.1 Schritt I: Lösungsglühen	45
2.4.2 Schritt II: Abschrecken	48
2.4.3 Schritt III: Auslagern.....	49
3. Identifizierung von Optimierungsansätzen.....	52
3.1 Fertigung gegossener Fahrwerk-Komponenten	52
3.2 Umweltbilanzierung (LCA) am Beispiel eines Aluminium-Radträgers	55
4. Optimierung ausgewählter Prozessparameter	64

4.1	Reduzierung des Materialeinsatzes durch Dünnwand-Guss	66
4.1.1	Voruntersuchung zur Reduzierung von Wandstärken.....	66
4.1.2	Leichtbau durch strukturierte Werkzeugoberflächen.....	72
4.2	Verkürzung der Wärmebehandlung	86
5.	Einflüsse auf das dynamische Bauteilverhalten	92
5.1	Einflüsse der Wärmebehandlung.....	95
5.1.1	Ofenabgleich.....	101
5.1.2	Einfluss der einzelnen Prozessschritte der Wärmebehandlung	120
5.2	Einfluss durch Variation des Magnesium-Gehaltes	133
6.	Diskussion.....	136
6.1	Bedeutung für die Entwicklung gegossener Fahrwerk-Komponenten	145
6.2	Prozessoptimierung durch Prozesswissen	146
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	151
	Abbildungsverzeichnis.....	IX
	Symbole und Abkürzungen.....	XVII
	Literaturverzeichnis	XXI
	Anhang	LII

1. Einleitung

1.1 Treibende Kräfte – Umwelt, Komfort und Verbrauch

Digitalisierung, automatisiertes bzw. autonomes Fahren sowie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die Erreichung der CO₂-Ziele sind die aktuellen Themen in der Automobilindustrie. Gemäß Prof. Dr. Winterkorn, ehemaliger Vorstandsvorsitzender des Volkswagen-Konzerns, hat für das Auto eine neue Ära begonnen. Gesellschaftlicher Wertewandel und weltweite strenge CO₂-Gesetze sind Treiber für sparsame Antriebe, Elektromobilität, Leichtbau und energieeffiziente Fabriken. Auch sieht er das Auto zum rollenden Computer werden, wozu insbesondere Motor- und Fahrwerksteuerung, Kommunikation und Infotainment, sowie Assistenz- und Navigationssysteme als auch das autonome Fahren gehören. [1] Sein Nachfolger, Matthias Müller, unterstreicht dies in seiner Ankündigung für eine Strategie 2025, in dem er Digitalisierung, Elektromobilität und Nachhaltigkeit als wesentliche Ziele hervorhebt. [2]

Ähnliches sagt Dr. Hans-Dieter Zetsche, Vorstandsvorsitzender der Daimler AG. Innovationen für saubere Mobilität durch intelligenten Antriebsmix aus Verbrennungsmotor, Hybrid- und reinem Elektroantrieb, eine integrale Sicherheitsphilosophie, eine vernetzte Mobilität und das autonome Fahren sind Schlüsseltechnologien zur Gestaltung der Zukunft der Mobilität. [3] Nachhaltige Mobilitätslösungen und konsequentes Umweltmanagement in den betrieblichen Prozessen oder eine umweltgerechte Produktentwicklung sind einige der Bestandteile der Nachhaltigkeitsstrategie der Daimler AG. [4]

Einen ganzheitlichen Ansatz in Bezug auf Nachhaltigkeit verfolgt auch die BMW AG, wie deren Vorstandsvorsitzender Dr. Dr. Norbert Reithofer ausführt. Zentrale Bestandteile der Unternehmensstrategie *Number ONE* sind dabei u.a. die Emissionsreduzierung der Fahrzeugflotte, der Einsatz erneuerbarer Energien in Produktion und Wertschöpfung sowie eine Senkung der Ressourcenverbräuche bei der Herstellung der Fahrzeuge. Zudem wird ein ganzheitlicher Ansatz für Elektromobilität verfolgt. [5] Ein wichtiges Feld zur Differenzierung und für Wachstum ist für Dr. Dr. Reithofer die digitale, vernetzte Welt im Kontext von Automobil aber

auch der Produktion. Das vernetzte Fahrzeug sowie das autonome Fahren bieten für ihn Chancen, die Zukunft im Sinne der Kunden zu gestalten. Intelligenter Leichtbau als wesentlicher Baustein der *Efficient Dynamics Strategie* gehört zum Grundverständnis der BMW Group. Konsequenter Leichtbau ist besonders bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb von Bedeutung, da neben der Batteriekapazität das Fahrzeuggewicht die Reichweite begrenzt. [6]

General Motors forciert ebenfalls das Thema Elektrifizierung wie auch das Thema Fahrzeugsicherheit und Vernetzung. Leichtbau ist hier wichtiger Bestandteil der Firmenstrategie. [7] Bei Ford [8], Hyundai [9] oder Kia [10] sind vergleichbare Ansätze zu finden.

Allein gemein ist das Ziel durch nachhaltiges Handeln zukunftsfähige Geschäftsmodelle zu etablieren und die Gesellschaft, also potenzielle Kunden, durch ein grünes Image zu begeistern und für sich gewinnen zu können. Die ökologische Verantwortung, das Streben nach effizienten Fahrzeugen und Fertigungsprozessen, Ressourcenschonung und Energieeinsparungen sind zentrale Bestandteile der Unternehmensphilosophie. Leichtbau wird von allen als wichtiges Mittel gesehen und ist bei allen Herstellern von zentraler Bedeutung zur Erreichung der gesteckten Ziele. Insbesondere die europäischen Hersteller fokussieren dabei die Themen Emissions-Reduzierung und Leichtbau in besonderer Weise. Dies ist nicht zuletzt den bei diesen Herstellern häufig anzutreffenden höheren Motorisierungen bzw. Fahrzeuggewichten und damit tendenziell höheren Flottenverbräuchen geschuldet.

1.2 CO₂-Emissionen als Herausforderung

Untermuert und angeschoben werden diese ökologischen Ziele durch äußere Zwänge, die insbesondere der Gesetzgebung entspringen. Anreize für die Firmen, ökologische Aspekte aufzunehmen und umzusetzen, werden durch drohende Strafzahlungen geschaffen. Im April 2009 trat die EU-Verordnung 443/2009 zur Verminderung der CO₂-Emissionen von PKW in Kraft, die einen verbindlichen Rechtsrahmen und Planungssicherheit für die Automobilindustrie schafft. Hiernach

gilt es, den Flottenverbrauch bis 2020 auf 95 g CO₂/km zu senken. Bei Überschreitung dieses Grenzwertes fallen 95 €/g CO₂ an. [11, 12, 13]

Auch auf dem amerikanischen Markt gelten strenge Regeln, die seitens der Environmental Protection Agency (EPA) überwacht werden. [14, 15] Sieben weitere Regierungen – Brasilien, China, Kanada, Indien, Mexiko und Südkorea – haben ebenfalls Standards zur Reglementierung von Kraftstoffeffizienz und Treibhausgas-Emissionen eingeführt bzw. haben dies angekündigt. Damit unterliegen etwa 80 Prozent der weltweiten PKW-Verkäufe bezogen auf das Jahr 2013 Regeln bezüglich ihrer Emissionen. [16] Allen gemein ist eine kontinuierliche Verschärfung der Grenzwerte in den kommenden Jahren.

Betrachtet man das Jahr 2014, so weist die Volkswagen AG für die europäische Neuwagenflotte CO₂-Emissionen in Höhe von 126 g CO₂/km aus. [1] Die Daimler AG nennt 129 g CO₂/km [3] und die BMW Group meldet 130 g CO₂/km [6]. Damit wurde das Zwischenziel für 2015 erreicht. [17] Für die kommenden Jahre besteht allerdings Handlungsbedarf zur Schließung der Lücke.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sieht zentrale Hebel zur Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Reduzierung von Fahrwiderständen und der Effizienzerhöhung der Energiewandlung. Während Rollwiderstandsreduzierungen, sowie Leichtbau- und Aerodynamikmaßnahmen dem ersten Aspekt dienen, gehören zum zweiten Bereich Maßnahmen im Bereich des Motors, des Getriebes und sonstiger Nebenaggregate, also z.B. Downsizing, Hybridisierung und Elektrifizierung. Die Studie empfiehlt die Umsetzung kosteneffizienter Technologiepakete, die aus den Bereichen Motor, Elektrifizierung, Getriebe, übergeordneter Maßnahmen und Fahrwiderständen zusammengesetzt sind. Während aus technischer Sicht je nach Einsatz von Hybridantrieben bis 2020 CO₂-Flottenemissionswerte von 78-90 g CO₂/km möglich sind, sieht ein realistisches Szenario eine Verfehlung des Ziels von 8-13 g CO₂/km. Zur Schließung der Lücke sind weitere Ökoinnovationen erforderlich. Bei bester Kosten-/Nutzeffizienz technischer Maßnahmen bedeutet dies zusätzliche Herstellkosten in Höhe von etwa 2.000,- € pro Fahrzeug. [18]

Über 2020 hinaus sind weitere Bestrebungen erforderlich, die CO₂-Emissionen noch stärker abzusenken. Vorschläge reichen aktuell von 60-78 g CO₂/km im Jahr 2025 und hinunter bis auf 50 g CO₂/km im Jahr 2030. Je nach Art der eingesetzten Technologien und ihrem Durchdringungsgrad in der Neuwagenflotte sind in 2030 Reduzierungspotenziale von 26-81 g CO₂/km möglich. Die korrelierenden Mehrkosten reichen dabei von 9.000 bis 5000 €/Fahrzeug. Die Abbildung 1-1 veranschaulicht dies.

Kosten und Nutzen der eingesetzten Technologien definieren Kosteneffizienz und Markterfolg. Sie müssen in angepasstem Verhältnis zu den Energiekosten stehen und wirtschaftlich sein. [19]

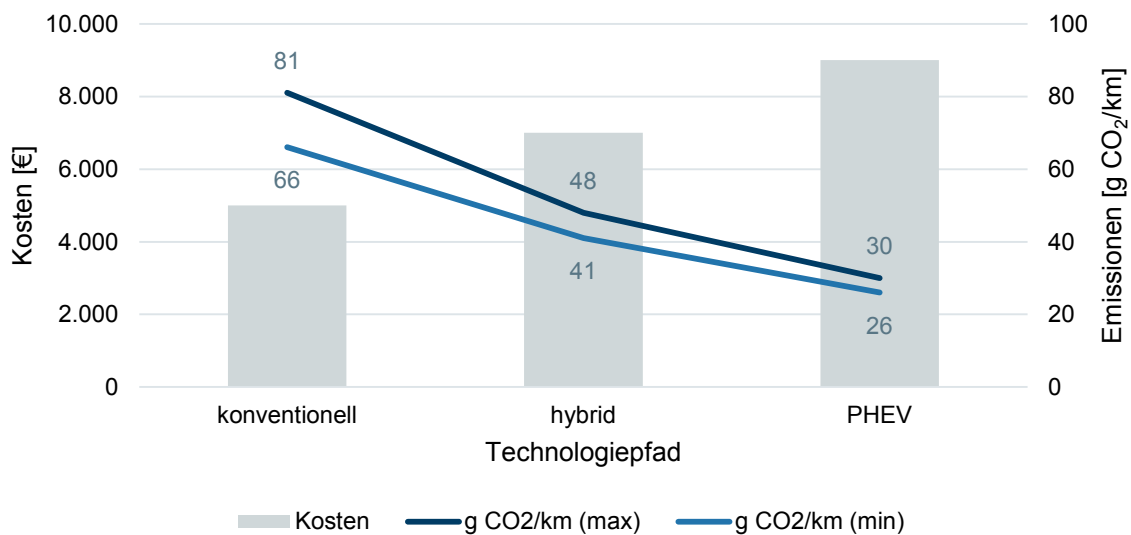


Abbildung 1-1: CO₂-Emissionen und Technologiekosten in Abhängigkeit des Technologiepfades im Jahre 2030 in Anlehnung an [19]

Die Herausforderung besteht folglich darin, den Zielkonflikt zwischen Ökoinnovationen, Wirtschaftlichkeit und Kundenakzeptanz zu lösen. Gleichzeitig dürfen Agilität und Fahrvergnügen, Qualität und Sicherheit sowie Komfort- und Designmerkmale nicht leiden. Solch rationale und emotionale Merkmale müssen in Einklang gebracht werden. Zusammengenommen fließen all diese Aspekte in die Marken-DNA der jeweiligen Hersteller ein.

1.3 Leichtbau im Fahrzeug

Ökoinnovationen, also „Innovationen, die einen wesentlichen Beitrag zur Verwirklichung des Zieles einer nachhaltigen Entwicklung leisten, indem sie die Auswirkungen von Produktionsweisen auf die Umwelt verringern, die Widerstandsfähigkeit der Natur gegenüber Umweltbelastungen stärken oder zu einer effizienteren und umsichtigeren Nutzung von natürlichen Ressourcen führen“ [21], bedingen dabei häufig Technologieinnovationen.

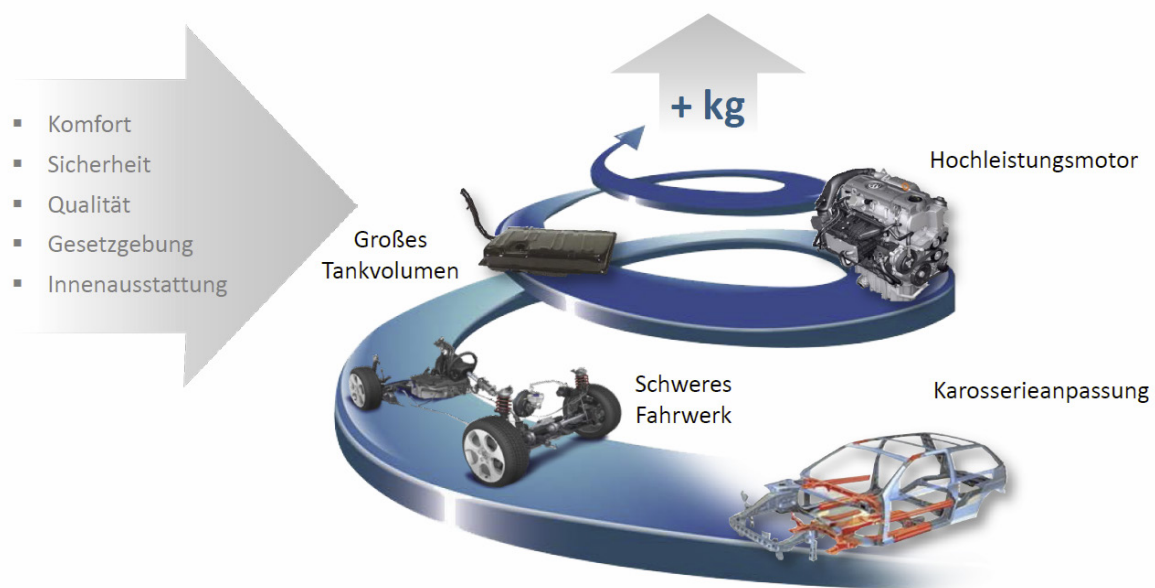


Abbildung 1-2: Gewichtsspirale [20]

Beispiele hierfür lassen sich in unterschiedlichsten Bereichen und Ausprägungsstufen finden. Natürlich gehören hierzu Elektro- und Hybridantriebe. Jenseits davon seien an dieser Stelle auch ökologische Fertigungsprozesse und Produkte im Automotive-Sektor anzumerken. Hierzu zählen u.a. die 9-Stufen Automatik von ZF, die im Vergleich zur 6-Stufen Automatik bis zu 16% Kraftstoff einspart [22]. Der Einsatz anorganischer Kernbinder [23, 24, 25, 26], die u.a. in Konzerngießereien von BMW (Landshut) und Volkswagen (Hannover) zur emissionsarmen Herstellung von Zylinderköpfen genutzt werden, trägt ebenso bei. Im Bereich der Karosserie seien die Weiterentwicklung von (Blech-)Werkstoffen wie z.B. hoch- und höchstfester Stähle oder Tailor Rolled Blanks, Aluminium- bzw. Aluminium-Hybrid-Karosserien wie der Audi Space Frame [27], der Einsatz von CFK

und der zielgerichtete Multi-Materialmix [28] genannt, die zu signifikanten Gewichtseinsparungen und damit zu niedrigeren Kraftstoffverbräuchen führen.

Auf der anderen Seite treiben Maßnahmen im Bereich der Crashesicherheit, Fußgängerschutz, neue Sicherheitsfeatures und Komfortmerkmale wie Abstandsradar, Einparksensoren, Massagesitze oder High-End-Soundsysteme das Gewicht nach oben. Zur Kompensation des Mehrgewichts sind in der Vergangenheit Fahrwerk, Karosserie, Motor und Tankvolumen verstärkt bzw. angepasst worden, um vergleichbare Fahrzeugleistungen anbieten zu können. Auch bei heutigen Hybrid- oder Elektrofahrzeugen entsteht ein Mehrgewicht durch das Batteriesystem. Im Ergebnis schaukelt sich durch diese primären und sekundären Maßnahmen das Fahrzeuggewicht hoch. Man spricht von einer ansteigenden Gewichtsspirale, wie Abbildung 1-2 verdeutlicht.

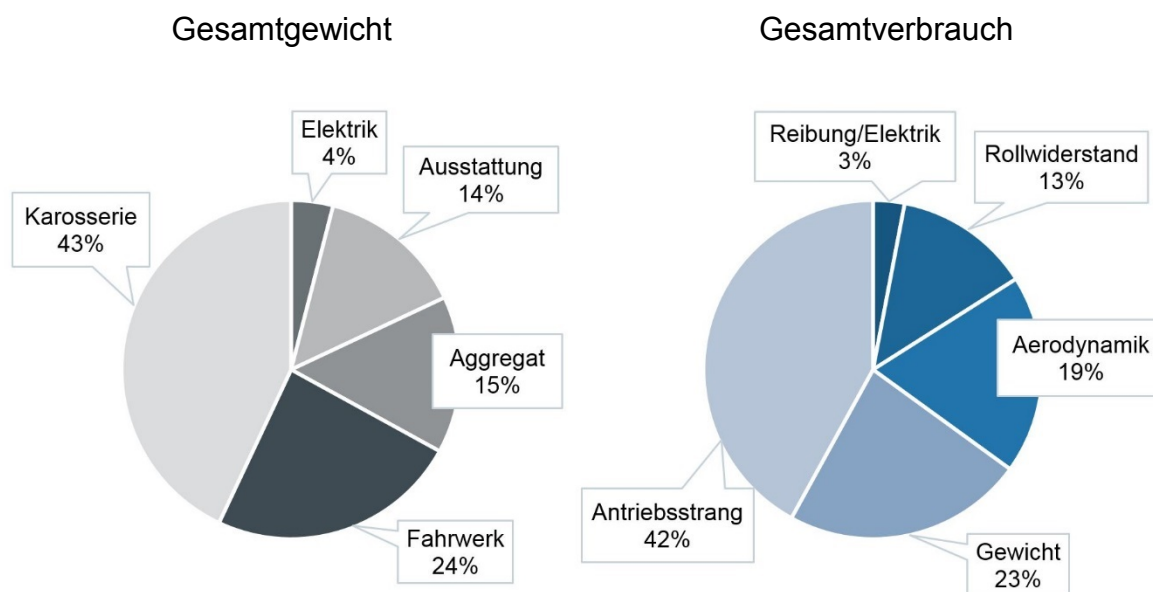


Abbildung 1-3: Anteile am Gesamtgewicht bzw. Gesamtverbrauch eines typischen PKWs der Kompaktklasse nach [29]

Um den mit zusätzlichen Komponenten verbundenen steigenden Fahrzeugmassen entgegenzuwirken und den Verbrauch weiter zu senken, steht das Thema Leichtbau mehr denn je im Fokus. Betrachtet man das Gesamtfahrzeug, sind die aktuellen Trends, insbesondere im Bereich der Karosserie Gewicht einzusparen und über einen effizienteren Antriebsstrang den Kraftstoffverbrauch zu senken, nur konsequent. Wie Abbildung 1-3 veranschaulicht sind diese doch die Hauptbeitragsleister.

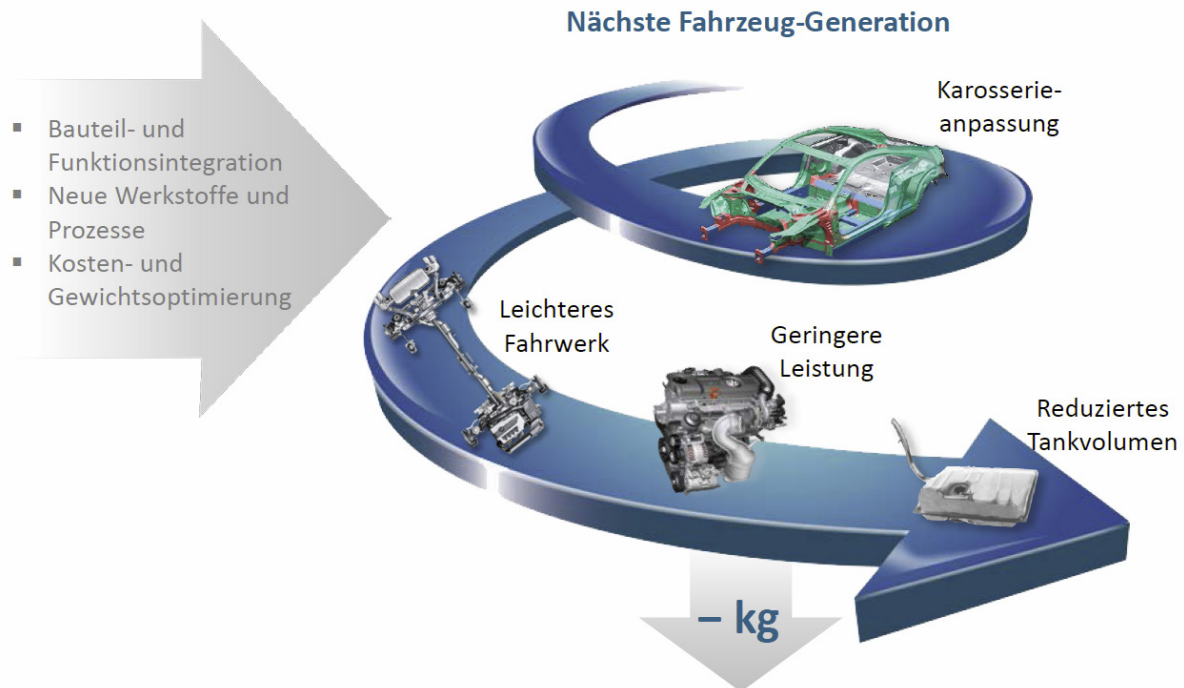


Abbildung 1-4: Umkehr der Gewichtsspirale [20]

Gelingt es, das Gewicht signifikant zu reduzieren, sind möglichst früh in den Entwicklungsprozess eingesteuerte Maßnahmen als Sekundäreffekte wirksam. Unter Berücksichtigung konstanter funktioneller Aspekte können häufig Komponenten der nächstkleineren Dimensionierung gewählt, bzw. zielgerichtet leichtere Komponenten entwickelt werden. Analysen haben hierbei gezeigt, dass bei einer Gewichtseinsparung von 100 kg Sekundäreffekte einen Beitrag von 37 kg leisten können. Auf das Fahrwerk entfallen dabei 15 kg, auf die Rohkarosserie 16 kg und den Antrieb 6 kg. [30] Die reine Einsparung von 100 kg Fahrzeugmasse bewirkt dabei eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 3,2 g/km (Dieselmotor) bzw. 3,4 g/km (Ottomotor). [31] Unter Berücksichtigung von Leistungsanpassungen im Motor und voller Ausschöpfung von Sekundäreffekten kann dieser Wert bei linearer Skalierbarkeit auf 8,4 bis 10,6 g/km erhöht werden was einer Kraftstoffeinsparung in Höhe von 0,36 bis 0,45 l/100km entspricht. [32] Die erforderlichen Technologien zur Gewichtsminimierung sind dabei unter Berücksichtigung von Kosten, Industrialisierbarkeit sowie Kompatibilität mit gegebenen Produkt- und Produktionskonzepten realistisch einzuordnen und im Sinne eines gesamtsystemorientierten Leichtbaugedankens umzusetzen. [33]

Damit kann die Gewichtsspirale (Abbildung 1-4) umgekehrt und der Flottenverbrauch gesenkt werden. Aktuelle Fahrzeugentwicklungen spiegeln dies wieder. Der Volkswagen Golf der siebten Generation (2012) ist bis zu 100kg [34], der Passat der achten Generation bis zu 85 kg [35] leichter als sein Vorgänger. Bei der Mercedes C-Klasse des Jahres 2014 konnte das Gewicht ebenfalls um 100 kg gesenkt werden [36]. Der neue Audi A4 (2015) weist ein um bis zu 120 kg [37], der neue Q7 (2015) sogar bis zu 325 kg [38] geringeres Gewicht auf. Beim neuen BMW der 7er-Reihe (2015) konnte bis zu 130kg [39] Gewicht eingespart werden. Von diesen Maßnahmen profitieren auch die Elektro- und Hybridvarianten der entsprechenden Modelle, wie beispielsweise der Volkswagen Passat GTE [40].

Ein Schlüssel zur Erreichung der CO₂-Ziele ist neben der Weiterentwicklung alternativer Antriebe und konventioneller Aggregate folglich die konsequente, ganzheitliche Optimierung der Fahrzeugstruktur. Schwerpunkte bilden dabei neben Karosserie und Aggregat auch Fahrwerk und Aerodynamik.

1.3.1 Der Leichtbaugedanke im Fahrwerk

Die Zielanforderungen für Fahrwerke sind umfangreich. Sicherheit, Komfort, Dynamik und Agilität sind die bestimmenden Zielgrößen, die eine erhebliche Spreizung bilden. [41, 42, 43] Durch aktive Systeme wird diese Spreizung für den Kunden erlebbar gemacht. [44, 45, 46] Den Zugewinn an Fahrstabilität, Fahrspaß und Fahrkomfort erkaufte man sich dabei potenziell durch ein Mehrgewicht, welches es durch zielgerichtete Maßnahmen zu kompensieren gilt. Im Fahrwerk ist der Leichtbaugedanke dabei dem Sicherheitsaspekt untergeordnet. Den Anforderungen aus Steifigkeit, Belastbarkeit und Robustheit wird durch konstruktive Ausführung und Materialauswahl begegnet. Der Trend geht hierbei ähnlich wie in Karosserie und Antriebsstrang hin zu einem Multi-Material-Design. Maßgabe ist, das richtige Material am richtigen Ort einzusetzen.

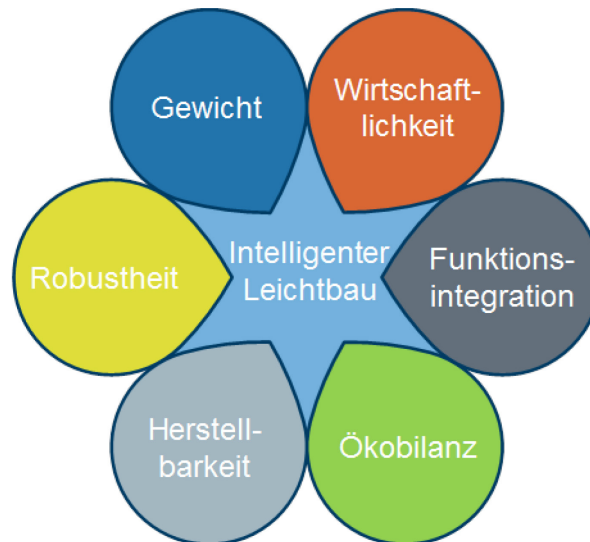


Abbildung 1-5: Intelligenter Leichtbau im Fahrwerk, Darstellung wichtiger Einflussfaktoren

Es gibt mehrere Optionen den Leichtbau voranzutreiben. So kann einerseits durch Werkstoffleichtbau, wie der Substitution von Stahl und Eisen durch Aluminium Gewicht gespart werden. Andererseits bieten Form- und Strukturoptimierungen umfangreiche Möglichkeiten, das optimale Design umzusetzen. Auch die Funktionsintegration bietet Chancen, leichtere Produkte umzusetzen. In der Kombination ergeben sich die größten Effekte. Intelligenter Leichtbau bildet dann das wirtschaftlichste Optimum aus Gewicht und Herstellbarkeit bei geforderter Robustheit unter Einhaltung einer positiven Ökobilanz, wie Abbildung 1-5 zusammenfasst.

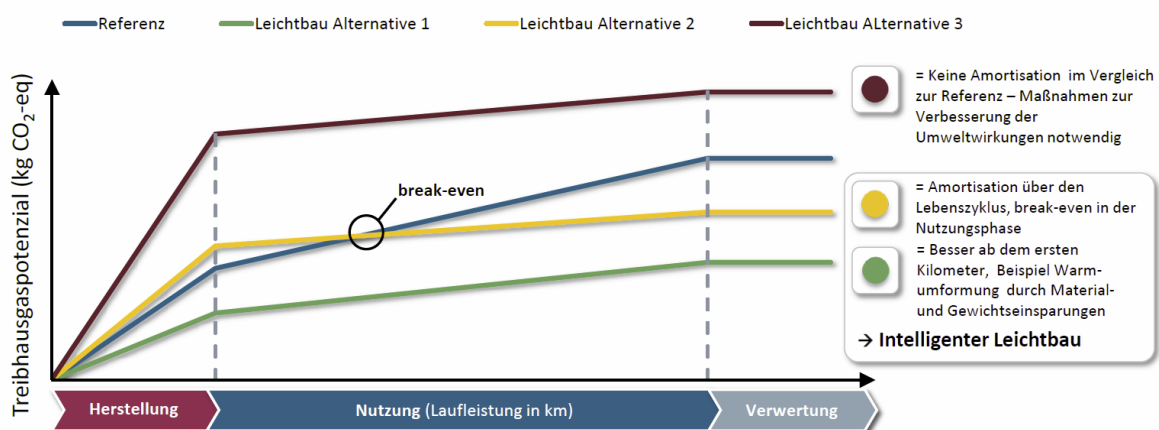


Abbildung 1-6: LifeCycle Engineering und intelligenter Leichtbau [20]

Es ist folglich ein Leichtbau-Design zu wählen, dessen Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebenszyklus aus Herstellung, Nutzung und Verwertung geringer als das des Referenz-Designs ausfällt, wie Abbildung 1-6 veranschaulicht. [20]

In diesem ganzheitlichen Optimierungsansatz sind insbesondere ungefederte Massen, also im Wesentlichen das Rad mit Felge, Radträger, Bremse sowie Anteile von Lenkern und Reifen im Sinne der Fahrdynamik möglichst leicht auszuführen. [47]

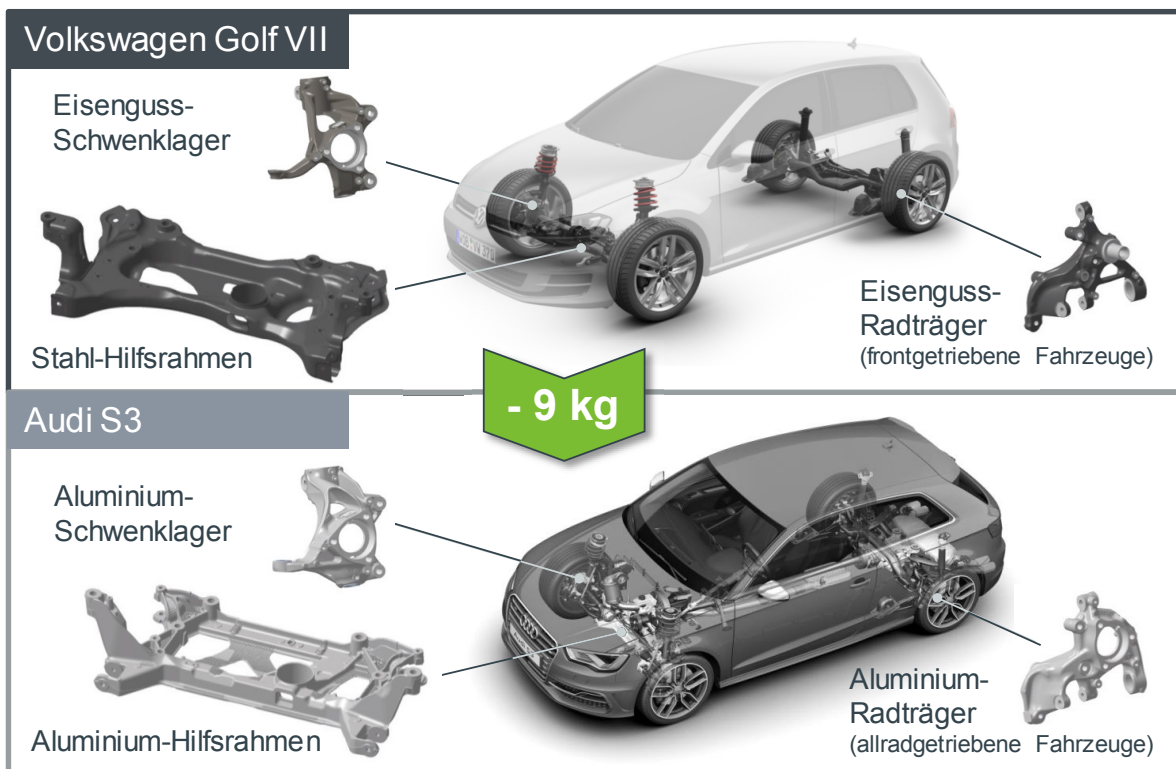


Abbildung 1-7: Vergleich Fahrwerk Volkswagen Golf und Audi S3 [48]

Folglich ist vielfältig Aluminium als Leichtbauwerkstoff für Radträger, Querlenker, Quer- und Achsträger im Einsatz [49, 50]. Im Volkswagen Konzern kommen an der McPherson-Vorderachse des modularen Querbaukastens (MQB) z.B. Schwenklager und Hilfsrahmen sowohl als Eisenguss bzw. Stahlblechlösung als auch in Form von Aluminium-Derivaten zum Einsatz. So ist dies, wie in Abbildung 1-7 veranschaulicht, im Vergleich von Volkswagen Golf und Audi A3 anzutreffen, wobei in der Vorderachse des Audi die jeweiligen topologieoptimierten Aluminium-Lösungen aus dem MQB genutzt werden. Dadurch entsteht ein Gewichtsvorteil von insgesamt mehr als 6 kg. An der Hinterachse findet Eisenguss nur beim Radträger für frontgetriebene

Fahrzeuge Verwendung. Die Allrad-Variante ist aus hochfestem Aluminium-Guss und pro Fahrzeug 3 kg leichter.

Auch Mercedes setzt vielfach auf Werkstoffleichtbau. Beispielsweise kann der Aluminium-Integralträger (Hilfsrahmen) der S-Klasse den leichtesten Wert seiner Klasse aufweisen. [51]. Die eingesetzten Leichtbaubremsscheiben sind in Hybridbauweise aus Stahl-Topf und Eisenguss-Reibring gefügt und bieten bis zu 15% Gewichtsvorteil. [52] Weitere Leichtbaukonzepte im Bremsen-Bereich sind durch den Einsatz von faserverstärkten Keramikbremscheiben, bei denen Carbonfaser-verstärktes Siliziumcarbid (C/SiC) zum Einsatz kommt [53], oder innovativen Bremssätteln für Höchstleistungsfahrzeuge wie dem Ferrari LaFerrari oder dem 458 Speciale A geprägt. Letztere sind ggü. Ihren Vorgängern um 3kg leichter bei gleichzeitig verbesserter Kühlwirkung. [54, 55, 56] Abbildung 1-8 veranschaulicht dies.



Abbildung 1-8: Leichtbau-Bremsscheiben und –Sättel (oben links: Leichtbaubremsscheibe Mercedes S-Klasse [57], unten links: C/SiC Bremsscheibe SGL Group [53], rechts: Brembo Bremssattel für Ferrari [58])

Typische Schmiedebauteile wie Radlagergehäuse werden weiterentwickelt. Neue Verfahren wie Hohlschmieden werden forciert und der Werkstoff besser ausgelastet. Durch Formoptimierung können Flansche oder Muttern leichter werden. Auch löst das Aluminiumschmieden von Radträgern bisherige Stahllösungen ab. [59] Zudem

gewinnt das Hybrid-Schmieden, also der geschmiedete Verbund zweier Materialien wie z.B. Aluminium und Stahl, welches durch die Leiber Group forciert wird, zunehmend an Bedeutung. Beispiele sind Antriebsflansche mit 47% Gewichtsersparnis gegenüber vergleichbaren Stahllösungen [60], Hybrid-Lenker aus einerseits hochfestem und andererseits zähen Aluminium [61] oder der Bremsscheibentopf für bei BMW verbaute Carbon-Bremsscheiben, die ein Gewichtsvorteil von 50% gegenüber der bisherigen Edelstahlösung besitzt. [62] Schmiedelösungen können aber auch durch oftmals kostengünstigere Eisengusslösungen ersetzt werden, wie das Beispiel des Hinterachs-Radträgers der PQ35-Plattform (z.B. VW Golf V/VI) der Volkswagen AG zeigt. [63]

Eisenguss-Komponenten bieten trotz ihrer hohen Dichte Leichtbaumöglichkeiten und sind aufgrund ihrer attraktiven Kosten nach wie vor interessant. [64] Bionische Ansätze, wie von Georg Fischer verfolgt, liefern so auch in Verbindung mit hochfesten und gleichzeitig hochduktilen Gusswerkstoffen mehr als 20% Gewichtsersparnis im Vergleich zu konventionell entwickelten Eisengusskomponenten, wie das Beispiel von Schwenklager oder Radträger belegen. [65]

Neue Leichtbauwerkstoffe wie Carbon- oder Glasfaserverstärkte Kunststoffe (CFK/GFK) finden abseits des Motorsports anders als in Aufbau oder Karosserie bisher wenig Anwendung im Fahrwerk. Hervorzuheben im Serieneinsatz sind GFK-Federn von Audi und dem Zulieferer Sogefi, die gegenüber Ihrem Stahl-Pendant 40% leichter sind. [66] Weiterhin sind die seit 2005 in den leichten Nutzfahrzeugen Mercedes Sprinter und Volkswagen Crafter eingesetzten GFK-Querblattfedern, die bis zu 80% leichter sind, zu nennen. [67] Gründe hierfür sind die noch sehr hohen Kosten, aber auch Herausforderungen bei der Schadensdetektion. Daneben gibt es viele Studien, wie des Federbein-Radträger-Modul inklusive Balgfeder aus Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) oder die radführende Querblattfeder des Zulieferers ZF Friedrichshafen. Diese stellen vielversprechende Konzepte dar. [68, 69] Auch erste Lenker, wie der Querlenker des Fraunhofer LBF [70] liegen als Entwürfe vor.

Zusammenfassend gibt es eine Vielzahl an Ideen und Innovationen, die den Leichtbaugedanken im Fahrwerk zielgerichtet und erfolgreich verfolgen. Potenziale

sind nach wie vor vorhanden. Für die nächste Produktgeneration wird mit Nachdruck an optimalen Lösungen gearbeitet, wie z.B. das Komponentenwerk der Volkswagen AG durch seine Leichtbau-Offensive für Fahrwerk-Komponenten zeigt. [71]

1.4 Motivation und Ziel der Arbeit

Gesetzgebung, ökologisches Umdenken als Teil des gesellschaftlichen Wertewandels sowie Zusatzgewicht durch Komfort- und Sicherheitsfeatures erhöhen den Leichtbaudruck in der Fahrzeugentwicklung. Dem wird durch umfangreiche Leichtbauansätze im Gesamtfahrzeugkontext entgegnet. Der Schwerpunkt liegt dabei vielfach auf Karosserie und Antrieb. Umfangreiche Ansätze für neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen in Form hybriden Multimaterial-Designs werden dabei intensiv verfolgt, die aufgrund Ihrer Komplexität große Anforderungen an Auslegung und Fertigung stellen. Begrenzt man sich in der Betrachtung auf kompakte Einzelkomponenten, werden diese zumeist als Uni-Material-Konzept umgesetzt. Die verwendeten, klassischen Werkstoffe sind aber noch nicht ausgereizt. Hier gilt es, Potenziale zu heben.

Bei gegossenen Aluminium-Fahrwerk-Komponenten ist das Ende des Machbaren noch nicht erreicht. Insbesondere der grundsätzlich energieintensive Fertigungsprozess bietet Chancen, den CO₂-Ausstoß entlang der Fertigungskette zu optimieren. Auch beschränken Fertigungsrestriktionen Designfreiheiten und Leichtbau. Um den umfangreichen Anforderungen gerecht zu werden, ist daher ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich, der Leichtbau und eine energieeffiziente Wertschöpfungskette vereint. Prozesskenntnis und -Optimierung sind dabei untrennbar mit dem Leichtbau verknüpft.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es einerseits, die eingesetzten Aluminium-Werkstoffe und dazugehörige Prozesse auszuloten und neue Leichtbaupotenziale aufzudecken. Andererseits gilt es, Kostentreiber und ökologische Potenziale zu identifizieren. Zunächst wird hierzu eine LifeCycle-Analyse für eine ausgewählte Fahrwerk-Komponente durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse können relevante Prozessschritte bzw. Parameter ausgewählt werden, die den zuvor genannten

Kriterien Rechnung tragen. Anschließend werden diese identifizierten Größen mit Maßnahmen belegt, sodass ökonomische und ökologische Verbesserungen erzielt werden können. Der Abgleich erfolgt dabei insbesondere vor dem Hintergrund dynamischen Bauteilverhaltens unter Berücksichtigung von Parametervariationen im Herstellprozess. Dadurch soll ein Beitrag zu nachhaltiger Bauteilentwicklung geleistet werden.

2. Grundlagen

2.1 Das Fahrwerk

Die Schnittstelle zwischen Fahrzeugaufbau und Fahrbahn bildet das aus diversen Komponenten zusammengesetzte Fahrwerk. Die Komponenten dienen der Steuerung und Übertragung von Kräften und Momenten zwischen Aufbau und Fahrbahn. Darüber hinaus beeinflussen sie in gegenseitigem Zusammenspiel und in Abhängigkeit von Achskonzept und Kinematik Fahrdynamik, Fahrkomfort, Agilität und akustisches Verhalten des Fahrzeugs. Das Fahrwerk spielt daneben die wesentlichste Rolle, wenn es um Fahrsicherheit geht. [72]

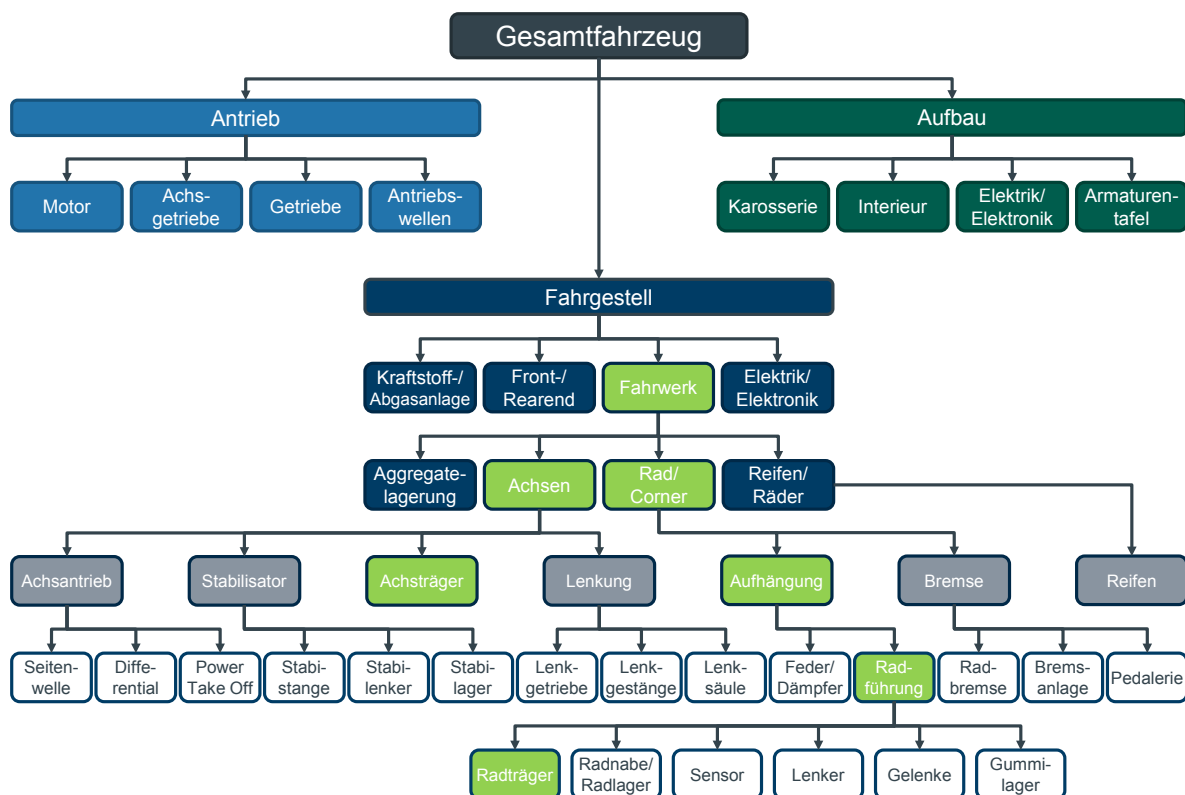


Abbildung 2-1: Bestandteile eines modernen Fahrzeugs im Gesamtfahrzeug-Kontext in Anlehnung an [73]

Zunehmend finden auch immer mehr elektronische Regelsysteme, wie ESP, ABS, Fahrerassistenz, adaptive Dämpfer oder adaptiver Wankausgleich Einzug in das Fahrwerk. Antriebs-, Lenkungs- und Fahrwerksysteme sind darüber hinaus vielfach vernetzt und ermöglichen so durch Rad-individuelle Verteilung der Antriebs-, Brems-

und Lenkmomente eine Optimierung des Fahrverhaltens. [74] Individuelle Einstellungen sind häufig auch dem Kunden möglich, sodass das Fahrverhalten auf Knopfdruck eine Spreizung von komfortabel bis sportlich-dynamisch erfährt. [75] Man spricht dann von aktiven oder intelligenten Fahrwerken. [76]

Das Fahrwerk ist neben dem Front- und Rearend, der Kraftstoff- und Abgasanlage sowie der zugehörigen Elektrik und Elektronik Bestandteil des Fahrgestells. Zusammen mit Antrieb und Aufbau entsteht das Gesamtfahrzeug. Achsträger als Teil der Achse werden häufig auch Hilfsrahmen, Fahrschemel oder mit ihrer englischen Bezeichnung als front bzw. rear suspension modul (FSM/RSM, Vorderachs- bzw. Hinterachsträger) bezeichnet. Radträger sind an der gelenkten Vorderachse auch als Schwenklager bekannt. Diese zählen wie auch das Rad, die Radbremse oder Anteile der Lenker zu den ungefederten Massen und haben somit großen Einfluss auf das Komfortverhalten des Fahrzeugs.

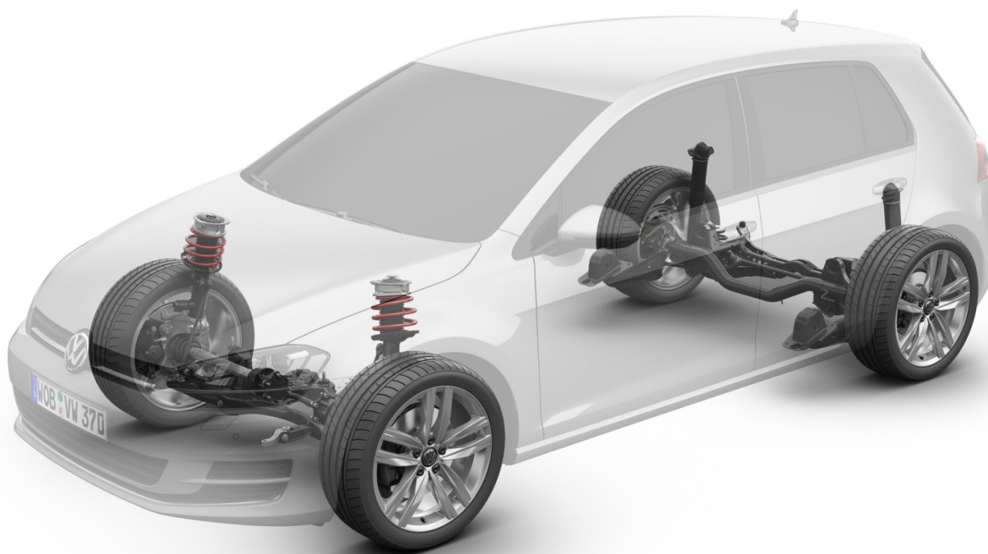


Abbildung 2-2: Volkswagen Golf 7 - Fahrwerk

Abbildung 2-2 zeigt exemplarisch das Fahrwerk des modularen Querbaukastens (MQB) des Volkswagen Konzerns in der Ausführung für den Golf der 7. Generation.

Fahrwerkteile sind sicherheitsrelevante Bauteile, die im Rahmen der Auslegung vielfältige Ansprüche erfüllen müssen. Abbildung 2-3 zeigt diese schematisch. So

sind neben Anforderungen hinsichtlich statischer Lasten, den Lebensdauernanforderungen durch die Betriebsbelastung auch Sonderereignis- und Missbrauchslasten, also Belastungen außerhalb des bestimmungsgemäßen Gebrauchs durch die Bauteile so zu kompensieren, dass diese zu einem gewissen Grad ertragen werden bzw. der Missbrauch unter Einhaltung einer Schadenskette dem Fahrer ohne Ausfall der Funktion angezeigt wird. Während Lenker typischerweise zu den sogenannten Opferbauteilen zählen, sind sicherheitsrelevante Komponenten wie Radträger, Schwenklager oder Hilfsrahmen zu schützen. Ebenso sind Anforderungen hinsichtlich des Crashverhaltens zu berücksichtigen, wobei diese Komponenten zumeist in sekundären Crashebenen zum Tragen kommen.

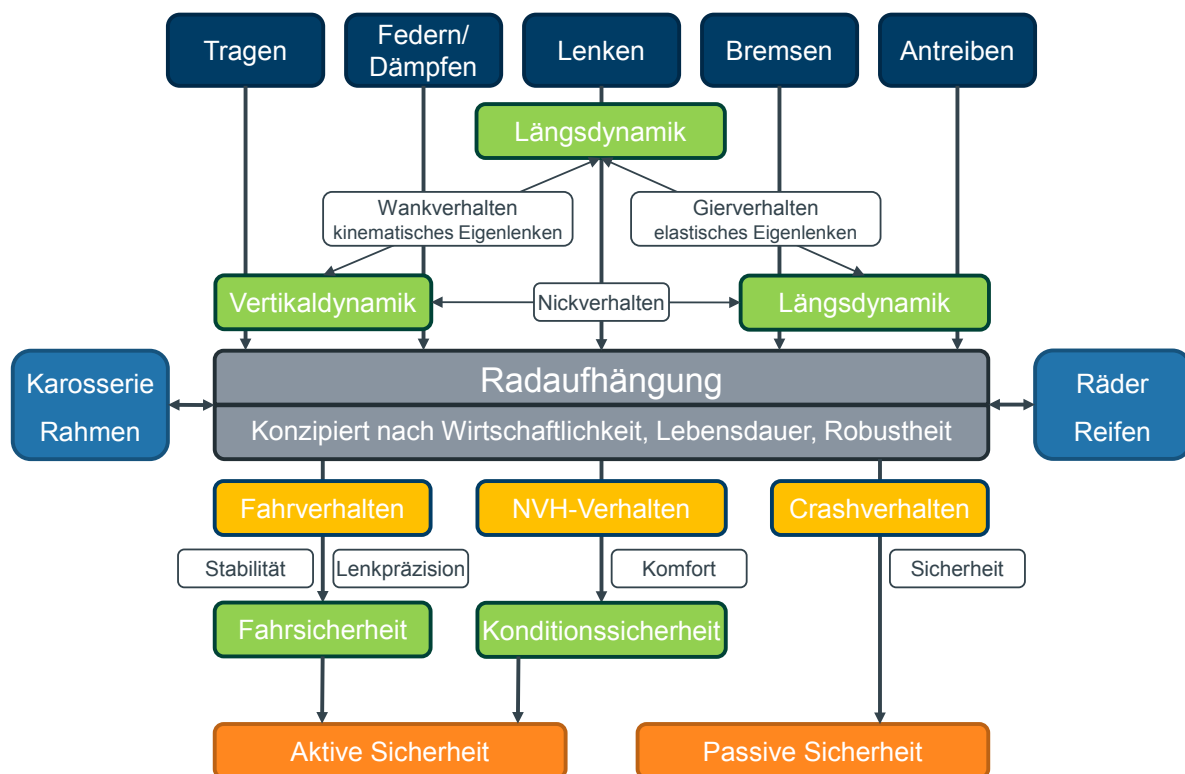


Abbildung 2-3: Anforderungen an das Fahrwerk nach [73]

Im Allgemeinen sollen Fahrwerk-Komponenten hohe Dehnungen ertragen, insbesondere wenn sie stark dynamisch beansprucht werden und in der Schadenskette große Verformungen zulassen müssen. Gleichzeitig sind bauraumbedingt zumeist hohe Festigkeiten erforderlich, um die Belastbarkeit in geringen Querschnitten zu gewährleisten. Darüber hinaus gilt es, bei vielen Fahrwerkkomponenten hohe Steifigkeiten zur Erreichung der geforderten

elastokinematischen Effekte und zur Verbesserung von Agilität und Fahrzeugstabilität zu realisieren.

Die Anforderungen an die Bauteilperformance nehmen zu. Die Bauteile müssen vor dem Hintergrund steigenden Leichtbaudrucks bei weniger Gewicht mehr leisten.

2.2 Auslegung von gegossenen Fahrwerk-Komponenten

Die Entwicklung von einzelnen Fahrwerk-Komponenten ist Bestandteil des Produktentstehungsprozesses eines Fahrzeuges und wird häufig von Tier 1-Zulieferern der OEM's übernommen. Dabei sind Qualitätskriterien insbesondere nach DIN EN ISO 9001 [77] und ISO/TS 16949 [78] zu beachten. Erweitert werden diese Regularien durch die Automotive-Standards der VDA 6.x-Bände sowie weiterer mitgeltender und themenbezogener Standards des VDA. Zusammenhänge, Verweise und Grundlagen erläutert dabei Band 6.0 [79] Darüber hinaus ist den erweiterten Anforderungen OEM-spezifischer Normen gerecht zu werden.

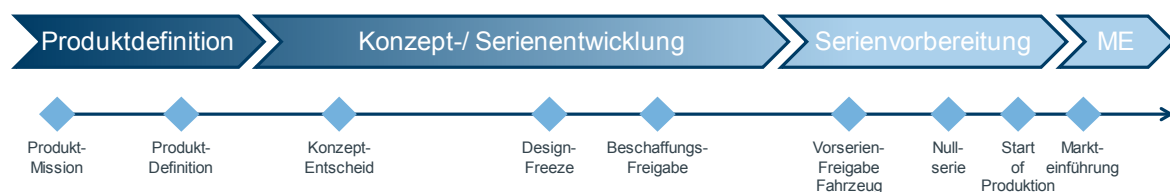


Abbildung 2-4: Der Produktentstehungsprozess, schematische Darstellung mit den wichtigsten Phasen und Meilensteinen

Die gebündelten Anforderungen hinsichtlich Liefer- und Leistungsumfang für eine Komponente werden in Form von Lastenheften durch den Auftraggeber zusammengestellt. Über das Pflichtenheft werden seitens des Auftragnehmers alle Leistungen beschrieben, die zur Zielerreichung des Projektes erforderlich sind oder gefordert werden. Die grundsätzliche Vorgehensweise der Erstellung von Lasten- und Pflichtenheften ist in der VDI-Richtlinie 2519 [80] beschrieben. Vorgaben zum Projektmanagementsystem geben DIN 69901-2 bzw. -5 [81, 82]. Für Fahrzeug-Komponenten (Systeme, Module oder Einzelteile) wird seitens des VDA für Ausführung, Form und Vorgehen bei der Erstellung von Lastenheften eine

standardisierte Struktur bereitgestellt. Basierend auf BestPractice-Beispielen werden Regeln und Qualitätskriterien als Leitlinie für die präzise Formulierung der Anforderungen genannt. [83]

Die Detailkonstruktion beginnt basierend auf Bauraumangaben, Kinematikpunkten und Belastungsdaten der zugehörigen Gesamtachse im Fahrzeug-Kontext. Hierbei gilt es, neben den Fahrzeug-seitigen Anforderungen wie in Abbildung 2-3 vorgestellt, den Produktlebenszyklus vom Entstehungs- und Fertigungsprozess über die spätere Nutzungsphase hin zur Verwertung unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte in die Bauteil实现 einzubeziehen. Dazu werden interdisziplinäre Teams gebildet, deren Mitglieder aus den unterschiedlichen an der Produktentstehung beteiligten Abteilungen wie z.B. Entwicklung, Planung, Qualitätssicherung und Fertigung zusammengesetzt sind. In Form des Simultaneous Engineerings wird nun, wie in Abbildung 2-5 veranschaulicht, vernetzt und parallel an der Entwicklung von Produkt und Herstellprozess gearbeitet.

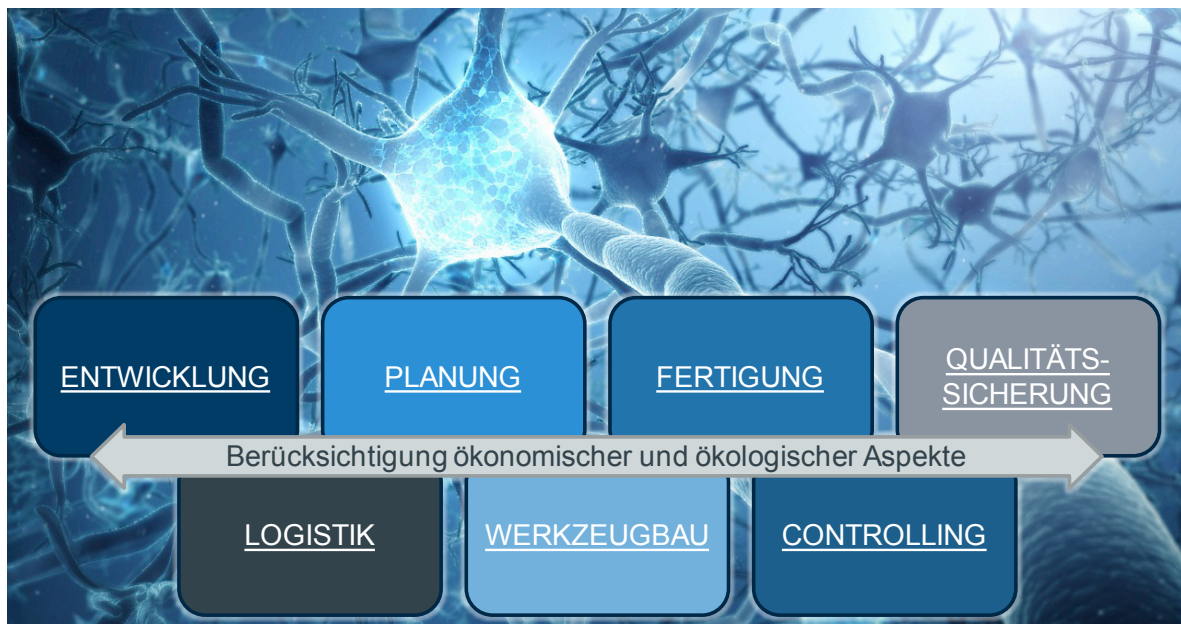


Abbildung 2-5: Interdisziplinäre Entwicklung gegossener Fahrwerk-Komponenten, (Hintergrundgrafik: Scientific Animations [84])

Bei gegossenen Komponenten wird zunächst mittels 3D-CAD ein Bauraummodell erstellt. Anwendung finden verbreitet die Programme Catia von Dassault Systèmes [85], Creo Parametric (ehemals Pro/Engineer) von PTC [86] oder SolidEdge von

Siemens [87]. Dieses Bauraummodell enthält alle erforderlichen geometrischen Randbedingungen wie beispielsweise Anbindungspunkte, Lagerstellen und Freigänge zu benachbarten Bauteilen oder für Montagebelange vor.

Dieses Modell wird dann unter Zugrundelegung der Belastungssituation einer Topologieoptimierung unterzogen, mit dem Ziel einen qualitativ hochwertigen virtuellen Erstentwurf zu bekommen, der basierend auf Restriktionen wie Festigkeit, Steifigkeit und Fertigbarkeit ein gewichtsoptimales Ergebnis liefert. Anwendung finden hierbei Programme wie SIMULIA Tosca Structure von Dessel Systems [88], OptiStruct von Altair [89] oder eigenentwickelte Lösungen wie der Deltaoptimierer Leopard von Volkswagen.

Ausgehend von diesem Ergebnis erfolgt die parametrische Auskonstruktion, die in enger Abstimmung der prozessbeteiligten Fachbereiche interdisziplinär ausdetailliert wird. Wichtiger Bestandteil ist hier die Gießsimulation zur Absicherung von Gießbarkeit und Lunkerverhalten. Eingesetzt werden hierfür Softwaretools wie Magmasoft der MAGMA Gießereitechnologie GmbH [90] oder Flow3D der Flow Science Deutschland GmbH [91]. Erfüllt das erarbeitete Design alle Anforderungen, wird ein DesignFreeze ausgesprochen und mit der Anfertigung von Prototypen begonnen, die anschließend vielfältigen statischen und dynamischen Erprobungen unterzogen werden. Ergebnisse aus diesen Untersuchungen fließen, sofern erforderlich, in die Bauteilauslegung zurück. Mit einem optimierten Design beginnt der Prüflauf erneut. Mit erfolgreichem Abschluss aller Erprobungen und damit der Freigabe des Bauteils unter Berücksichtigung der VDA-Bände und ISO/TS 16949 [78] sowie der Erteilung der Baumustergenehmigung (BMG) enden die Entwicklungsschleifen. Der Serieneinsatz kann nun erfolgen.

2.2.1 Grundlagen der Topologieoptimierung von Gussbauteilen

Eines der wichtigsten Hilfsmittel bei der Designfindung gegossener Fahrwerk-Komponenten ist die Topologieoptimierung. Dieses Verfahren dient der rechnergestützten, automatisierten Findung einer optimalen Gestalt bei gegebener Belastung, Bauraum und sonstiger Randbedingungen. Die Grundlagen der FEM-

basierten Verfahren gehen auf die Homogenisierungs- und SIMP-Methode (Solid Isotropic Microstructure With Penalization) zurück. [92, 93, 94, 95] Weitere Optimierungsansätze sind im Verlauf zur BESO-Methode (Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization) entwickelt worden, die entgegen des SIMP-Ansatzes diskrete Designelemente verwendet und diese entfernen und anlagern kann. [96, 97] Weitere Methoden sind in Form von auf biologischem Wachstum basierender heuristischer Ansätze aufgebaut [98] bzw. binden die Level-Set-Methode [99] ein. Einen guten Überblick über die Verfahren, Grenzen und Möglichkeiten geben Eschenauer und Olhoff [100] sowie Razvan und Grama [101]. Für Gussbauteile stellen diese prinzipiellen Ansätze noch nicht das Optimum dar, da das vorgeschlagene Design ohne Berücksichtigung von Fertigungserfordernissen häufig zerklüftet ist und damit hohen Interpretationsspielraum bei der Ableitung eines gießfähigen Designs bildet. [102] Die Berücksichtigung von Fertigungsrestriktion wird daher verstärkt vorangetrieben und weiterentwickelt. [103, 104] Unter Berücksichtigung minimaler Wandstärken sowie der Formoptimierung von Rippen können bereits besser herstellbare Geometrien abgeleitet werden. [105] Auch können die Formteilung und die Entformungsrichtung als Variablen im Rahmen der Optimierung berücksichtigt werden. [106, 107, 108] Kommerzielle Produkte wie Optistruct [89] oder Tosca [88] berücksichtigen diese Möglichkeiten.

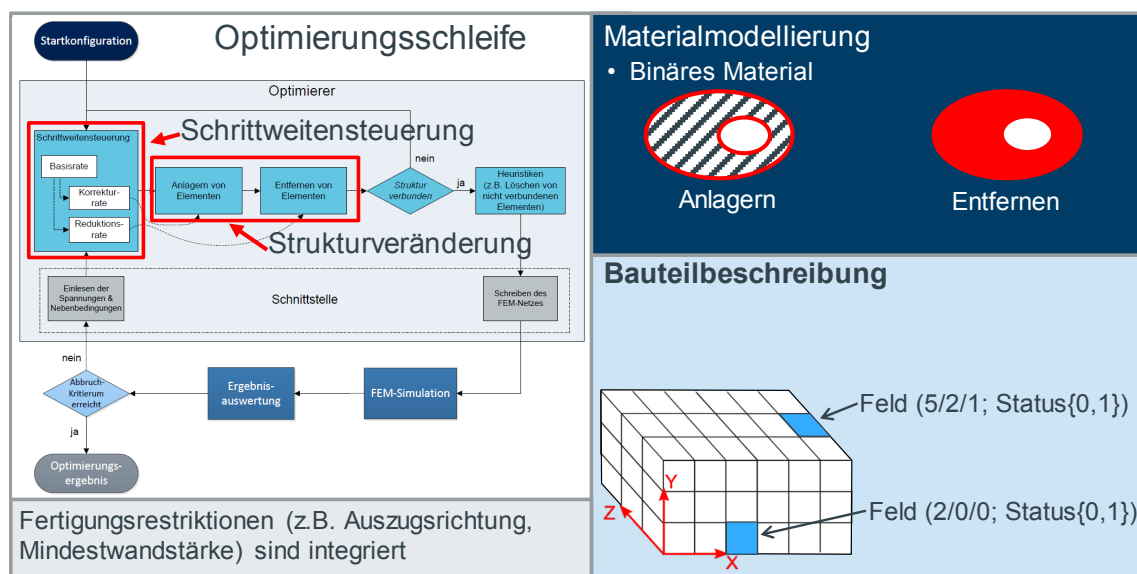


Abbildung 2-6: Arbeitsweise des Deltaoptimierers (Volkswagen-Topologieoptimierung) [109]

Heutige Herausforderungen bestehen dabei, einen hochqualitativen Erstentwurf in die Konstruktion zu geben, mit dem Ziel, ein möglichst leichtes und kostengünstiges Bauteil herstellen zu können. Dazu ist es erforderlich, den unterschiedlichen Anforderungskriterien aus Betriebs- und Missbrauchslasten, Steifigkeits- und weiteren Kundenanforderungen bei gleichzeitig einwandfreier Fertigbarkeit Rechnung zu tragen. Dies bedeutet, dass das neben den in klassischen Optimierern berücksichtigte lineare Materialverhalten um das nichtlineare Verhalten durch eine diskrete Modellierung ergänzt werden muss. [110]

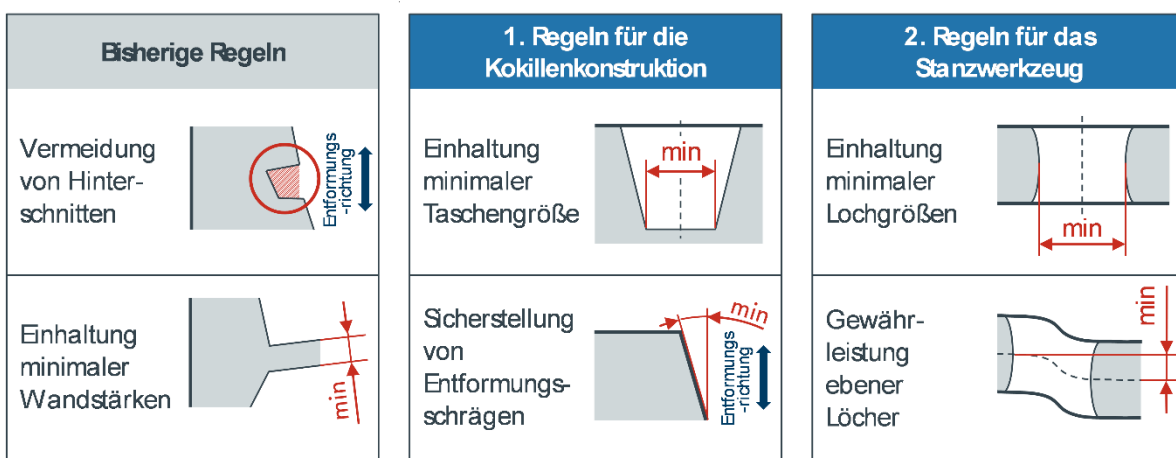


Abbildung 2-7: Integration von Konstruktionsregeln in die Optimierung [111]

In Abgrenzung zu den oben genannten Verfahren wurde durch Fiebig der Deltaoptimierer entwickelt, welcher durch binäre Materialdefinition und heuristische Wachstumsregeln gekennzeichnet ist. Ausgehend von Bauraum und Belastungssituation wird, wie in Abbildung 2-6 veranschaulicht, iterativ nicht benötigtes Material entfernt und innerhalb der Bauraumgrenzen dort, wo benötigt, schrittweitengesteuert angelagert. [109] Bei der Topologieoptimierung mit Hilfe des Deltaoptimierers findet neben der Integration von Fertigungsrandbedingungen wie Entformungsrichtung oder die Vermeidung von Hinterschnitten auch das nichtlineare Materialverhalten Berücksichtigung. [112]

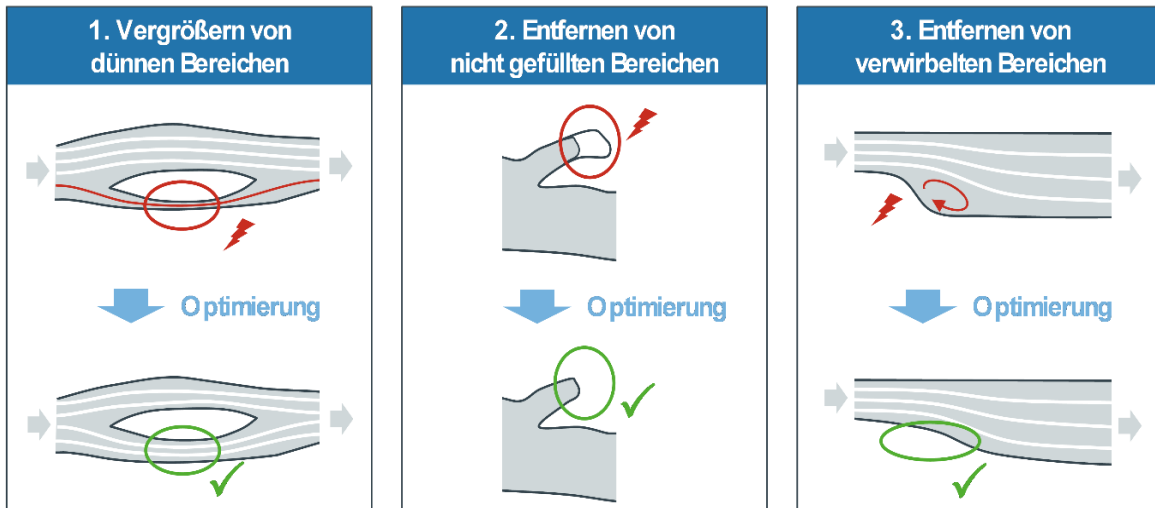


Abbildung 2-8: Integration von Prinzipien zur Verbesserung der Formfüllung in die Optimierung [111]

Im weiterentwickelten Verfahren können neben der Einhaltung minimaler Wandstärken zudem, wie Abbildung 2-7 darstellt, Entformungsschrägen und Taschen- bzw. Lochgrößen berücksichtigt werden. [111]

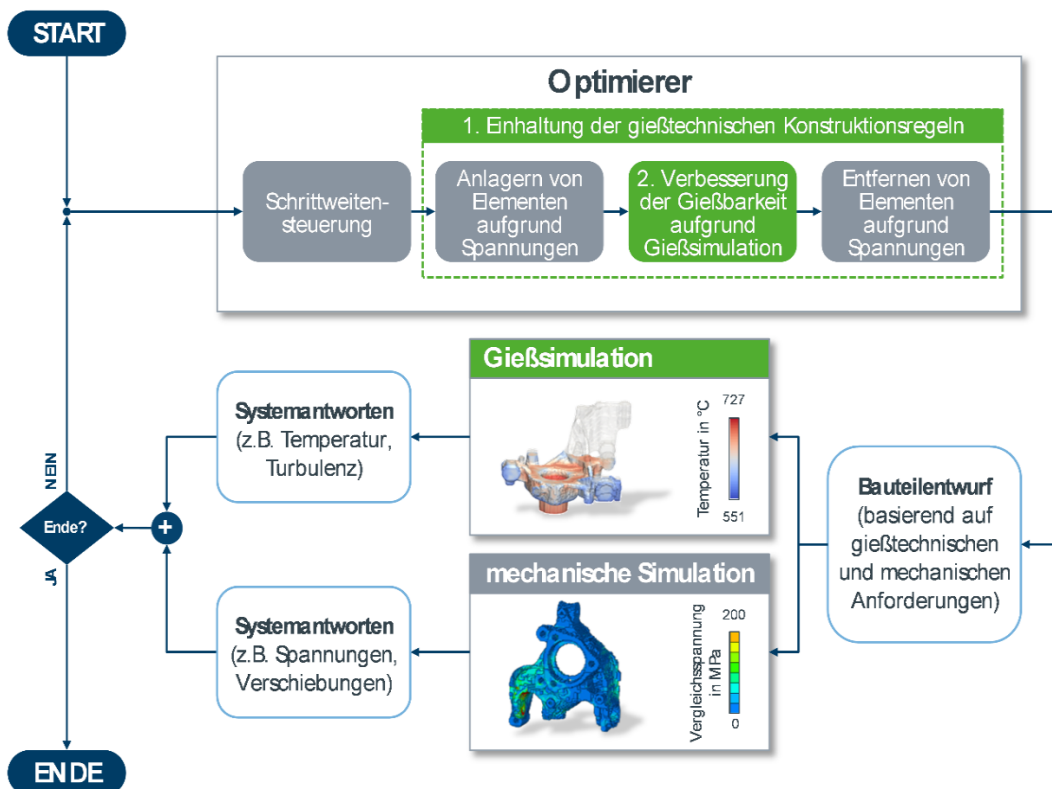


Abbildung 2-9: Integration der Gießsimulation in der Topologieoptimierung als erweiterte Optimierungsschleife [111]

Neben diesen Restriktionen stellen das Formfüll- und Erstarrungsverhalten eines Gussteils wesentliche Anforderungen an die Herstellbarkeit eines ermittelten Designs. Unter Berücksichtigung des Strömungsverhaltens gelingt es dabei, wie aus Abbildung 2-8 hervorgeht, in der Topologieoptimierung einen Kompromiss aus Gewicht und Fertigbarkeit zu finden. Dazu werden dünnere Bereiche verstärkt, nicht vollständig gefüllte oder stark verwirbelte Bereiche entfernt.

Damit ergibt sich der Optimierungsprozess gemäß Abbildung 2-9, bei der mechanischen Simulation und Gießsimulation parallel erfolgen und eine kombinierte Systemantwort die Optimierung steuert. Ziel ist hierbei, wie in Abbildung 2-10 visualisiert, durch Identifikation eines Individuums den besten Kompromiss aus Herstellbarkeit und Gewicht zu finden.

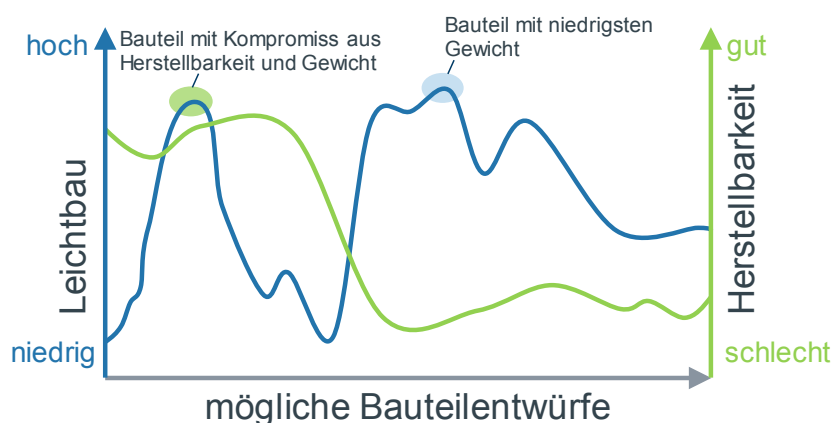


Abbildung 2-10: Konzept der fertigungsgerechten Topologieoptimierung in Anlehnung an [111]

Wichtige Felder zur Weiterentwicklung der Topologieoptimierung stellen neben der Integration von Fertigungssimulationen wie der Gießsimulation, die Berücksichtigung des Crash- und Akustikverhaltens, aber auch die Ableitung eines Multimaterialdesigns für Hybrid-Bauteile dar. Die Entwicklungsziele sehen dabei zukünftig eine direkte Umsetzung des aus der Optimierung stammenden Geometriedesigns ohne konstruktive CAD-seitige Interpretation vor. [113]

2.2.2 Gießsimulation von Aluminium-Komponenten

Die Gießsimulation ist ein wichtiges Werkzeug zur Abschätzung der Herstellbarkeit zunehmend filigraner Bauteildesigns in der frühen Entwicklungsphase. Primäres Ziel ist die Abbildung und Optimierung des Gießprozesses durch Vorhersage von Formfüllung, Erstarrung und Abkühlverhalten. Auch die Simulation auftretender Gussfehler, Bauteilverzüge durch thermisch induzierte Spannungen, sowie die Ausbildung des Gefüges und das Ableiten von Lösungsvorschlägen gehört zur Optimierung. [114] Die Gießsimulation muss dabei mehrere Faktoren berücksichtigen. Hierzu gehören neben der Thermodynamik auch die temperaturabhängigen fluiddynamischen Faktoren der Strömungskinetik und Viskosität.



Abbildung 2-11: Wichtige Möglichkeiten und Einsatzgebiete der Gießsimulation bei der Herstellung von gegossenen Fahrwerk-Komponenten aus Aluminium

Daneben können heutige Lösungen lokale mechanische Kennwerte nach dem Gießen prognostizieren und das Material- und Bauteilverhalten bei nachgeschalteter Wärmebehandlung vorhersagen. Basis für die Simulation des entstehenden Mikrogefüges ist die Legierungszusammensetzung unter Berücksichtigung von Kornfeinung und Veredelung. Mit Hilfe von Gleichgewichtsphasendiagrammen gemäß Abbildung 2-12,1 und der zugehörigen Phasenwachstumskinetik (Abbildung

2-12,2) können Phasen- und Seigerungsbildung (Abbildung 2-12,3) berechnet werden. Im letzten Schritt wird hieraus die freiwerdende, latente Schmelzwärme ermittelt (Abbildung 2-12,4). In dem nun folgenden iterativen Prozess wird die Wechselwirkung im lokalen Seigerungs,- Abkühl- und Erstarrungsverhalten und damit zu lokal variierendem Gefüge ermittelt. Ergänzend zu diesen lokalen Phasenanteilen können weitere Kenngrößen wie Korngröße und sekundärer Dendritenarmabstand (sDAS) sowie Mikroporosität vorhergesagt werden. [115, 116, 117, 118]

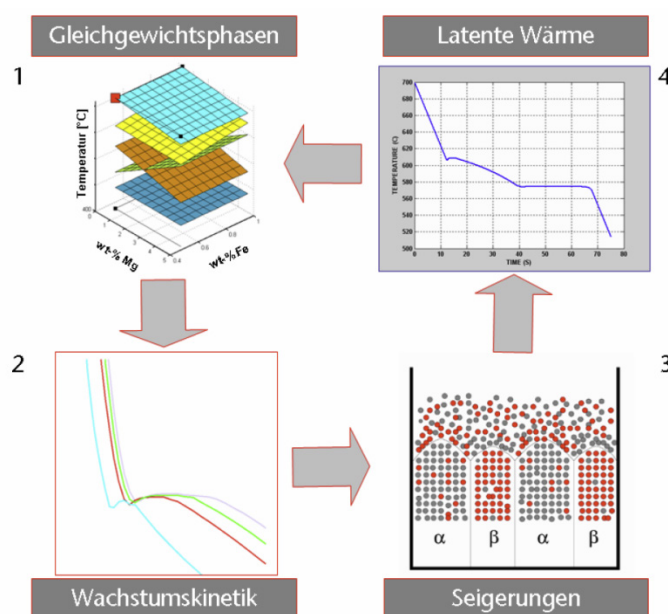


Abbildung 2-12: Gefügeberechnung während der Erstarrung nach [115]

Durch den Einsatz geeigneter Software wie Magmasoft der MAGMA Gießereitechnologie GmbH [90], Flow3D der Flow Science Deutschland GmbH [119], ProCast der ESI GmbH [120] oder Wincast der RWP GmbH [121] kann das Potenzial von sowohl Werkstoff als auch Prozess ausgenutzt und so ein Beitrag zu Leichtbau und Ressourceneffizienz getätigt werden.

2.2.3 Betriebsfestigkeitsprüfung von Fahrwerk-Komponenten

Das Mindest-Auslegungsziel vieler Automobil-Hersteller wie z.B. Volkswagen oder Audi ist für sicherheitsrelevante Bauteile und Baugruppen, zu denen die Fahrwerk-Komponenten gehören, die schadensfreie Erreichung einer Laufleistung von

mindestens 300.000 km. Dieses Ziel muss dabei für das jeweils schlechteste von 1.000 Bauteilen (1 ‰-Bauteil) vom für das jeweilige Bauteil härtesten von 100 Kunden (1%-Kunde) sicher erreicht werden. Dazu ist es erforderlich, die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Streuung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit mittels Lebensdauerprüfungen zu bestimmen. [122]

Die Betriebsfestigkeitsprüfung von Fahrwerk-Komponenten umfasst dabei den Nachweis, statische und dynamische Belastungen unter Berücksichtigung zu erwartender Umwelteinflüsse über die zu Grunde gelegte Lebensdauer schadensfrei zu überstehen. Hierbei ist zwischen Betriebs-, Sonderereignis- und Missbrauchslasten zu unterscheiden. Kontinuierlich auftretende Lasten im Zuge des bestimmungs-gemäßen Gebrauchs werden als Betriebslasten bezeichnet. Sonderereignislasten entstehen bei Ereignissen geringer Häufigkeit und höherer Schädigungswirkung. Diese dürfen zu keiner Funktionsbeeinträchtigung oder Schädigung des Bauteils führen. Im Missbrauchsfall ist die einwirkende Kraft so hoch, dass Funktionsbeeinträchtigungen und Schäden am Bauteil auftreten. Die Schadenskette muss so abgestimmt sein, dass deutliche Bauteildeformationen das Versagen ankündigen. Das Schadensbild hat so eine anzeigende Wirkung, die sich zum Beispiel in einem Schiefstand des Lenkrades äußert. [123]

Das V-Modell der Systementwicklung kann den Entwicklungsablauf methodisch unterstützen. Ursprünglich als German Gouvernement Prozess Modell und Softwareentwicklungsstandard der Bundeswehr entworfen, ist dieses Modell mittlerweile häufig für Hardware im industriellen Einsatz anzutreffen. Das in Abbildung 2-13 vorgestellte Modell dient der Erfassung des Zusammenhangs von konstruktiven und integrativen Phasen innerhalb des Entwicklungsprozesses. Während der zeitliche Verlauf horizontal von links nach rechts erfolgt, ist das Abstraktionsniveau vertikal von oben nach unten abnehmend. Hierbei gilt es, den absteigenden Pfad der konstruktiven Systemspezifikationen durch den aufsteigenden Pfad der testenden Systemintegration zu validieren. Die separierten horizontalen Ebenen regeln dabei die Zuständigkeiten. Prüfstandsversuche validieren und verifizieren folglich Annahmen und Ergebnisse der Simulation, ausgehend von der einzelnen Komponente hin zum Gesamtfahrzeug-Kontext. Dadurch wird es möglich, bereits in frühen Phasen vergleichsweise kostengünstige Aussage über Festigkeits-

und Steifigkeitsverhalten der Bauteile zu gewinnen und Wechselwirkungen mit anderen Bauteilen abzuschätzen. [122, 124]

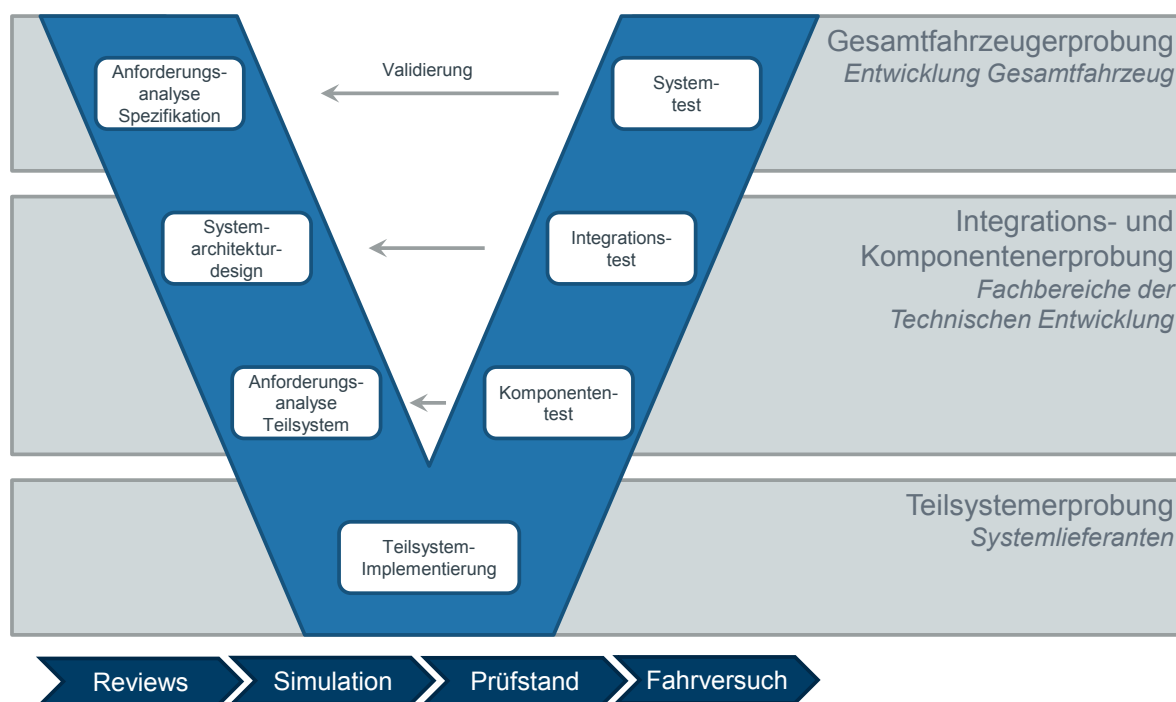


Abbildung 2-13: V-Modell der Systementwicklung nach [122, 124, 125]

Prüfkriterien wie Prüfaufbau und Lastsignale sind typspezifisch und werden vom jeweiligen Fahrzeughersteller vorgegeben. Ausgehend von statischen Erprobungen wie der klassischen Zugprobe zur Ermittlung von Festigkeit und Dehnung werden auch statische Ersatzprüfungen am Bauteil durchgeführt. Hierzu gehören Zug- und/oder Druckbelastungen einzelner Anbindungsbereiche bis zum Versagen, wobei ein definiertes Kraft-Weg-Fenster erreicht werden muss. Im Weiteren werden dynamische Erprobungen mit und ohne korrosiver Belastung mit ein- oder mehrkomponentiger Belastung durchgeführt. Hierbei werden mit Hilfe servohydraulischer Zylinder Kräfte und Momente in definierter Orientierung in das Bauteil eingeleitet. Die Lastsignale entstammen der Mehrkörpersimulation (MKS) und der Prognose aus Belastungsdaten, die in Fahrversuchen von Vorgängermodellen auf Referenzstrecken wie dem Nürburgring oder herstellereigenen Teststrecken über umfangreiche Sensorik im Fahrzeug und am Messrad ermittelt wurden. Virtuelle Manöversimulationen ermöglichen zudem Auswirkungen unterschiedlicher Fahrzeugparameter im Vorfeld abzuschätzen und deren Einfluss zu vergleichen. Die Verifizierung der Lastannahmen erfolgt auf Basis von Messungen der wirksamen

Belastungssituation an ersten Vergleichs- bzw. Prototypenfahrzeugen. Diese Messdaten dienen nun zur Ableitung der Ansteuerdaten der einwirkenden Kräfte und Momente auf den Prüfständen. Gegenüber der Fahrzeugerprobung haben Prüfstandsversuche den Vorteil, durch Raffung des Schadenskollektivs das Fahrzeugleben in kurzer Zeit zu simulieren. Sie sind zudem reproduzierbar und ermöglichen so eine kostengünstige statistische Absicherung des jeweiligen Bauteils. Auf Basis der identifizierten Schwachstellen oder Reserven der Einzelkomponente bzw. des Systems kann eine Optimierung erfolgen. [123, 126, 127]

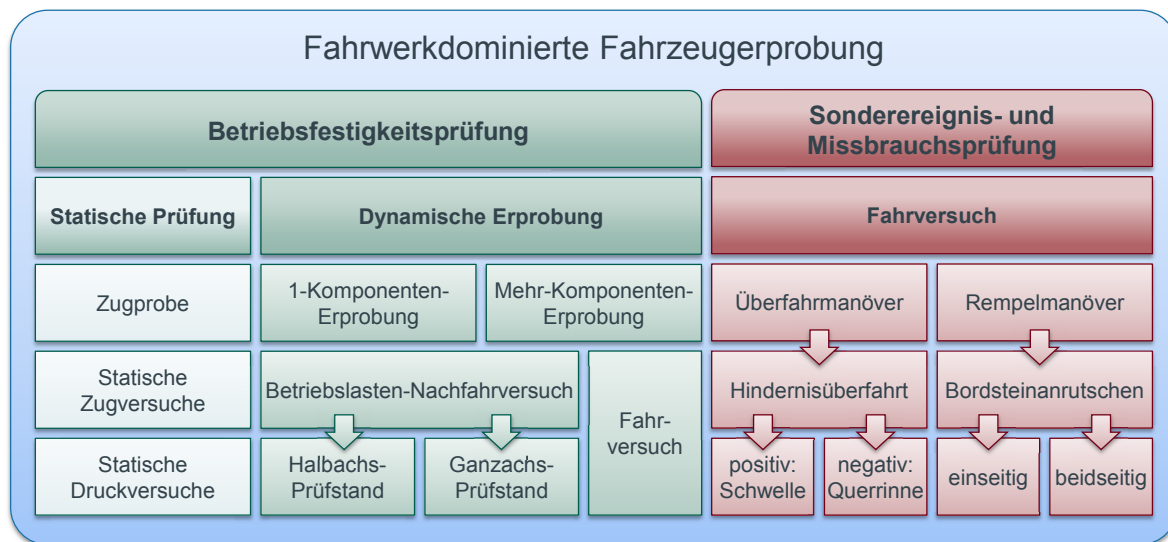


Abbildung 2-14: Betriebsfestigkeitsprüfung von Fahrwerk-Komponenten –
Übersicht über typische Erprobungsarten

Die Erprobungsarten sind wie Abbildung 2-14 veranschaulicht vielfältig. Neben den beschriebenen Betriebsfestigkeitsprüfungen sind auch Sonderereignis- und Missbrauchsversuche zu absolvieren. Die fahrwerkdominierenden Missbrauchserprobungen (Misuse-Lastfälle) werden typischerweise im Fahrversuch durchgeführt und können in Überfahr- und Rempelmanöver unterteilt werden. Die Versuche werden meist im beladenen Zustand gefahren. Das Fahrzeug stellt dabei typischerweise die Worst-Case-Konfiguration dar. Die Überfahrmanöver erfolgen in Form von Schwellentests (positive Hindernisüberfahrt) oder Querrinnenüberfahrt (Schlagloch, negative Hindernisüberfahrt). Rempelmanöver stellen Situationen vergleichbar einem Bordsteinanrutschen bei vereister bzw. verschneiter Fahrbahn dar. Dies wird durch verringerte Reibwerte zwischen Fahrbahn und Reifen simuliert.

Der Aufprall erfolgt mit dem eingeschlagenen gebremsten Rad einseitig in Fahrzeuginnenrichtung oder beidseitig in Fahrzeugquerrichtung. [128]

In der Gesamtfahrzeugerprobung werden darüber hinaus in unterschiedlichen Klimaregionen umfangreiche Fahrversuche auf Erprobungsstrecken mit dem Ziel durchgeführt, unter variierenden Umwelteinflüssen und dynamischen Beanspruchungen einen Zuverlässigkeitsnachweis durch Abbildung unterschiedlicher kundenrelevanter Grenzbeanspruchungen zu erbringen. Tabelle 2-1 stellt wichtige Einsatzarten, den inhaltlichen Schwerpunkt und das zugehörige Laufleistungsziel vor. [129]

Eine wichtige Rolle spielen für die Einzelkomponenten die Prüfungen auf 1-Komponenten-Prüfständen, auf die sich im Rahmen dieser Arbeit beschränkt wird. Hierbei wird das Bauteil in einem definierten Prüfaufbau in festgelegtem Winkel zyklisch im Zugschwellbereich bis zum Erreichen eines Abschaltkriteriums belastet. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Kapitel 5.

Tabelle 2-1: Einsatzarten in der Gesamtfahrzeugerprobung [129]

Erprobungsstrecke	Zielsetzung	Laufleistung
Schlechtwegekurs	Strukturerprobung von Karosserie, Fahrwerk, Antriebsstrang und Anbauteilen	8.000 km
Wechselkurs	Verschleiß- und Funktionserprobung sämtlicher Fahrzeugkomponenten	100.000 km
Hochgeschwindigkeitskurs	Volllasterprobung unter dem Einfluss hoher Umgebungstemperaturen	30.000 km
Rennstrecke	Erprobung unter hohen Längs- und Querkrafteinflüssen	10.000 km
Öffentliche Straße	Kundennaher Betrieb des Erprobungsfahrzeugs auf Landstraßen und Autobahnen	150.000 km
Stadt	Stop-and-Go-Betrieb im Innenstadtbereich in gemäßigten und warmen Klimazonen	30.000 km
Anhänger	Erprobung von Karosserie, Fahrwerk und Antriebsstrang mit erhöhter Zuglast	30.000 km
Kaltland	Beurteilung der Fahrzeugkomponenten unter extremer Kälteeinwirkung	30.000 km
Heißland	Erprobung auf schlecht ausgebauten Landstraßen unter Wärmeeinfluss	30.000 km
Splitt	Beurteilung von Steinschlagschäden an Fahrwerksteilen und Karosserie	10.000 km

Eine finale Freigabe der Bauteile erfolgt nach erfolgreichem Abschluss aller Erprobungen auf den unterschiedlichen Prüfständen sowie der positiv abgeschlossenen Versuche im Gesamtfahrzeug-Kontext unter kundennahen Einsatzbedingungen.

2.3 Aluminium-Guss

Das Gießen beschreibt die geometrisch bestimmbare Formgebung von schmelzflüssigen Werkstoffen, die innerhalb einer Form zum Erstarren gebracht werden. Diese nehmen unter Berücksichtigung gießspezifischer Eigenschaften die Formgeometrie an, die als Kontur- bzw. Volumennegativ ausgebildet ist. [130] Das Gießen gehört gemäß DIN 8580 [131] zu den Fertigungsverfahren des Urformens. Einen Überblick über die Einteilung der Gießverfahren gibt Anhang A. Mit Hilfe der unterschiedlichen Verfahren lassen sich die steigenden Anforderungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der Komplexität der Bauteilgeometrien bei Einhaltung wirtschaftlicher Aspekte erfüllen.

Im Fahrwerkbereich findet man vielfach gegossene Komponenten. Schwerpunkte bilden einerseits in Sandformen vergossene Sphäroguss-Werkstoffe und andererseits im Kokillenguss vergossene Aluminium-Silizium-Legierungen. Zu letzteren gehören typischerweise Primärlegierungen wie die EN-AC AlSi7Mg oder die EN-AC AlSi11.

Nachfolgend wird sich auf den Bereich des Aluminiums beschränkt. Zudem werden die im Rahmen der Arbeit betrachteten Verfahren, bei denen metallische Dauerformen eingesetzt werden, näher erläutert. Grundlage bildet der Schwerkraft-Kokillenguss. Vertieft wird die Betrachtung mit dem Gegendruck-Gießen (Counter-Pressure-Casting, CPC), einer Sonderform des Niederdruck-Gusses. Zur weiteren Eingrenzung werden die Verfahren ohne Berücksichtigung des Einsatzes von verlorenen Kernen (Formstoffkerne) betrachtet. Weiterhin wird das System Aluminium-Silizium näher beschrieben. Weitere Schwerpunkte bilden die Wärmebehandlung und das Verhalten ausgewählter Legierungen unter Korrosion und die zu Grunde liegenden Mechanismen.

2.3.1 Schwerkraft-Kokillengießverfahren

Beim Kokillenguss wird im Gegensatz zum Sandguss in Dauerformen vergossen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kokillenwerkstoffes gegenüber Sand findet eine beschleunigte Abkühlung bei der Erstarrung der Schmelze statt. Das Gefüge wird feinkörnig und dichter. Zu den maßgebenden Merkmalen und Vorteilen des Kokillengusses gehören neben den besseren Festigkeitswerten gegenüber dem Sandguss, die gute Maßgenauigkeit und Oberflächengüte der Gussteile sowie die Möglichkeit wirtschaftlicher Fertigung im Serienguss. [132, 133]

Der Schwerkraftkokillenguss ist das Standard-Kokillengießverfahren. Formfüllung und Erstarrung des Gusstückes erfolgen hierbei ausschließlich unter der Wirkung von Schwerkraft bei Umgebungsdruck. Speiser- und Anschnitttechnik sind darauf ausgelegt. [134, 135]

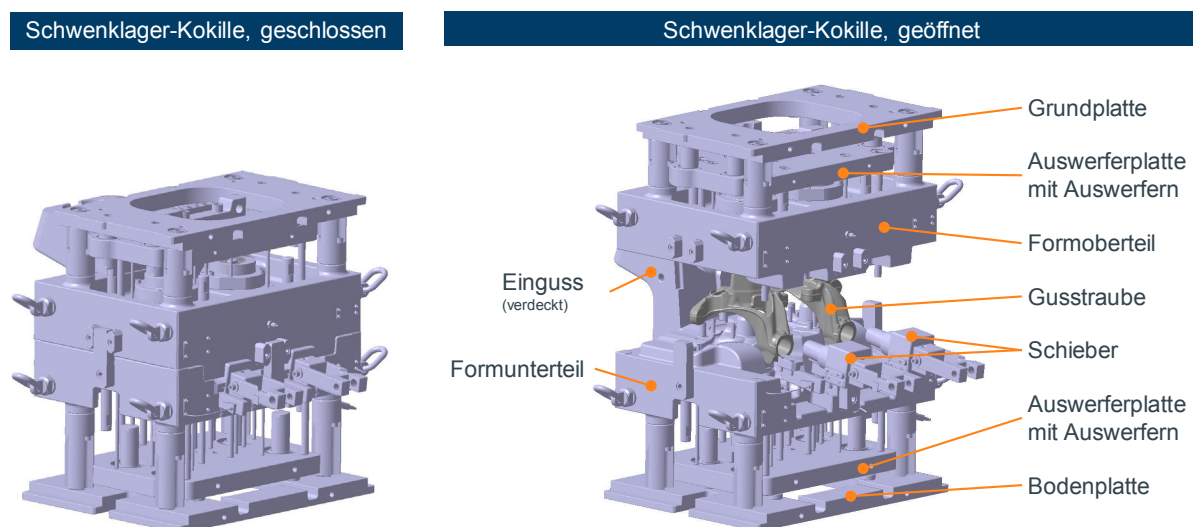


Abbildung 2-15: Schwenklager-Kokille für Schwerkraft-Kokillenguss

Aluminiumschmelzen können aufgrund der geringeren Gießtemperatur und dem damit verbundenen geringen Wärmehalt in metallischen Dauerformen vergossen werden. Als Kokillenwerkstoff wird beim Schwerkraft-Kokillenguss für die Formteile primär hochlegierter, warmfester Werkzeugstahl wie z.B. X38CrMoV5-1 zum Einsatz gebracht, der den hohen thermozyklischen Belastungen beim Gießen standhält. Abbildung 2-15 zeigt beispielhaft eine Schwenklager-Kokille für den Schwerkraftguss mit zwei Kavitäten für die paarweise Herstellung des Bauteils.

Die Formfüllung ist allgemein turbulenzarm zu gestalten. Sie erfolgt entweder in steigender oder fallender Gießweise. Vorteilhaft ist hierbei der steigende Füllvorgang, bei dem eine möglichst beruhigte Formfüllung erzielt wird. Die Schmelze läuft dabei vom Einguss durch den Querlauf über ein oder mehrere Anschnitte in den Formhohlraum. Die Gefahr von Lufteinschlüssen ist gering, sodass prinzipiell eine gute Wärmebehandelbarkeit der Bauteile gegeben ist – die Verwendung warmushärtbarer Legierungen vorausgesetzt. Die Abkühlzeiten sind aufgrund der raschen Wärmeabfuhr durch die aktiv temperierbare Kokillenwand in der Regel deutlich geringer als die beim Sandguss. Daraus ergibt sich im Allgemeinen ein feineres und dichteres Gefüge. Auch kann eine höhere Maßgenauigkeit und, damit verbunden, eine Reduzierung der Bearbeitungszugabe erfolgen. Ebenfalls ist eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität zu beobachten. [136, 135]

Eine Wirtschaftlichkeit wird durch hohen Automatisierungsgrad erreicht. Die Kokillen sind dabei häufig in Form von Karussell-Gießanlage (sogenannten Rundtischen) oder Lineargießanlagen gruppiert. Auch werden vermehrt Mehrfachformen eingesetzt, die die Produktivität erhöhen. Beispiele sind hier bei der Fertigung von Zylinderköpfen oder Kurbelgehäusen aber auch bei Schwenklagern zu finden.

2.3.2 Gegendruck-Gießverfahren (CPC)

Das Gegendruckgießen, oder auch kurz CPC (Counter Pressure Casting) ist dem Niederdruckguss artverwandt und stellt dessen Weiterentwicklung dar. Die heutige Technologie basiert auf Patenten der Bulgaren Balevski, Nikolov et al. [137, 138, 139] Abbildung 2-16 zeigt exemplarisch eine CPC-Maschine, die für die Fertigung von Radträgern im Mehrfachguss genutzt wird sowie den schematischen Aufbau der Maschine.

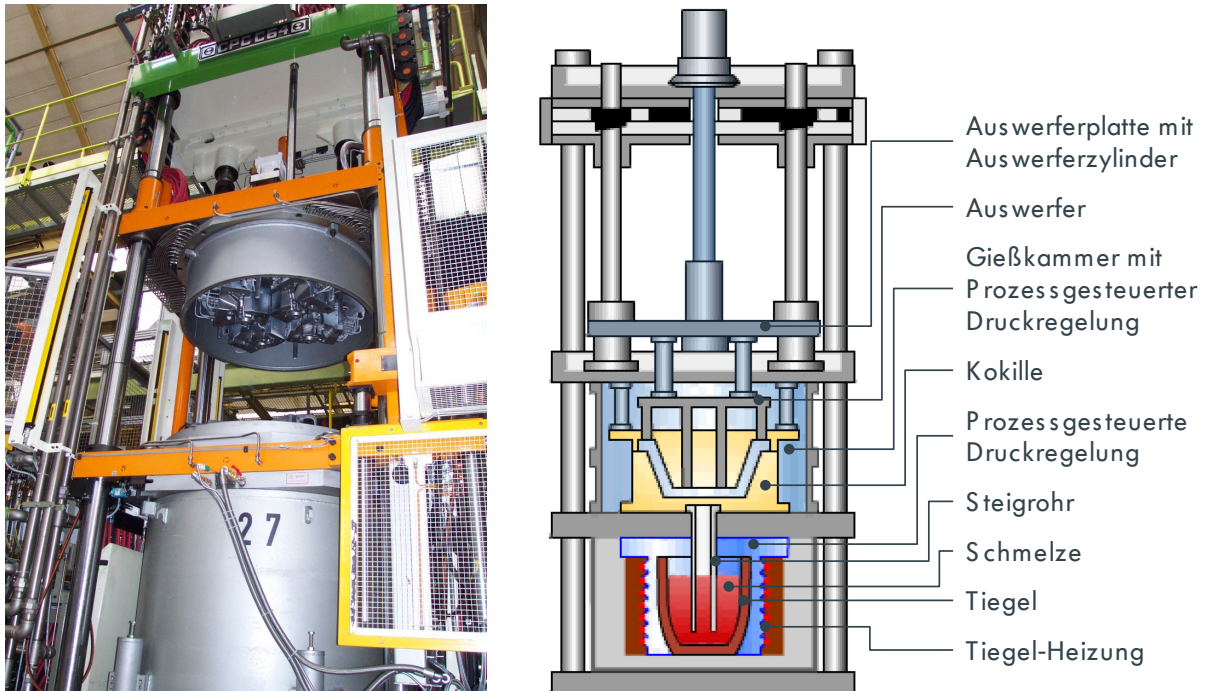


Abbildung 2-16: Die CPC-Gießmaschine. Links: aufgebauete Maschine im geöffneten Zustand; rechts: schematische Darstellung, (Graphik: KSM Castings, Hildesheim)

Wie im klassischen Niederdruck erfolgt die Formfüllung über ein Steigrohr aus einem unter der Kokille befindlichem Tiegel. Die Kokille kann eine oder mehrere Kavitäten, abhängig von Komplexität und Größe des Gussteils und der eingesetzten Maschine, beinhalten. Radträger werden beispielsweise zwei- bis dreipaarig vergossen, wobei jedes einzelne Teil über ein separates Steigrohr befüllt wird. Dieser Mehrfachguss hilft, die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu optimieren.

Die Besonderheit des CPC-Verfahrens stellt die neben dem Ofenraum ebenfalls mit Druck beaufschlagbare Gießkammer dar, in der die Kokille unter erhöhtem Druck gefüllt werden kann. Die Formfüllung erfolgt dabei beruhigt über einen regelbaren und entsprechend höheren Differenzdruck von Ofenraum zur Gießkammer. Dabei ist maschinenseitig ein Überdruck von bis zu 5 bar möglich. Typische Arbeits-Überdrücke finden bis ca. 2,8 bar Anwendung.

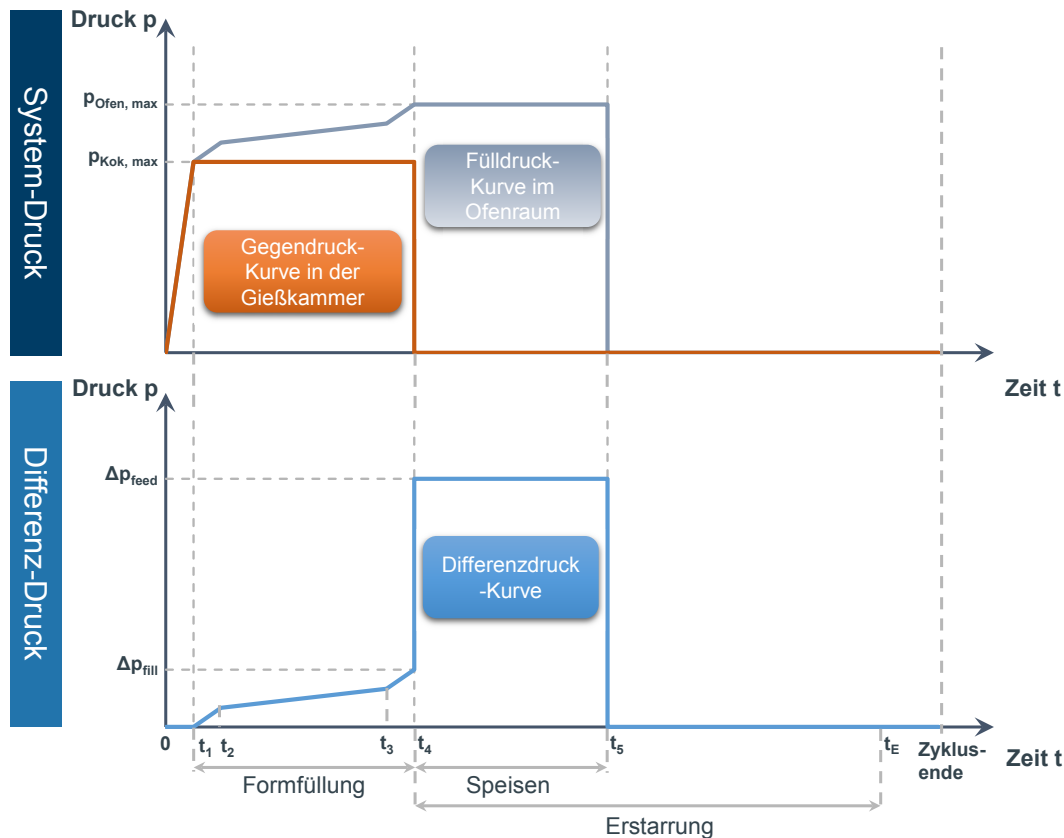


Abbildung 2-17: CPC-Guss – Druckkurve, in Anlehnung an [140]

In Abbildung 2-17 ist der Verlauf der einzelnen Druckkurven veranschaulicht. Zunächst werden Gießkammer und Ofenraum gleichsinnig auf den maximalen Gegendruck $p_{\text{Kok, max}}$ gebracht. Bei Erreichen dieses Wertes zum Zeitpunkt t_1 wird Druck in der Gießkammer konstant gehalten. Das Füllen des Steigrohres beginnt. Zum Zeitpunkt t_2 erreicht der Schmelzespiegel den Formhohlraum. Während und nach der Formfüllung wird der Druck im Ofenraum weiter erhöht. Ab dem Zeitpunkt t_3 ist die Form gefüllt. Ein Speisungs-Vordruck wird aufgegeben. Der Differenz-Fülldruck Δp_{fill} liegt an. Der Druck in der Gießkammer wird zum Zeitpunkt t_4 schlagartig zurückgenommen, sodass ein maximaler Differenzdruck vorherrscht. Über das Steigrohr ist nun der sogenannte Speisungsdruck Δp_{feed} angelegt. Erstarrungsbedingte Volumendefizite werden ausgeglichen. Nach Abfrieren des Speiserhalses (t_5), also dem Bereich zwischen Steigrohr-Ende und Gussstück-Anfang, wird der Druck im Ofenraum reduziert, sodass die Schmelze im Steigrohr zurückfließt. Das Gussteil erstarrt zu Ende (t_E). Nach Formöffnung und Gussstück-Entnahme beginnt der Zyklus von vorne. [141] Eine schematische Darstellung des Prozesses ist in Anhang B zu finden.

Durch den erhöhten Druck wird einerseits die Löslichkeit in der Schmelze gebundener Gase wie z.B. Wasserstoff heraufgesetzt [142]. Der Gas- und insb. Wasserstoffgehalt der Schmelze ist daher möglichst gering zu halten. Andererseits wird das Ausscheiden der Gase während des Erstarrens stark behindert, sodass ein porenarmes, übersättigtes Gussgefüge zurückbleibt. Typische Porositäten liegen oft bei deutlich kleiner als 0,3%.

Untersuchungen zeigen, dass mit Zunahme des Kokillengegendrucks bei gleichem Dichte-Index die Porosität stark abnimmt und die Poren kleiner werden. Gleichzeitig ist ein Anstieg der mechanischen Kennwerte, insbesondere bei der Bruchdehnung, zu beobachten. Der nachgewiesene Zusammenhang wird folglich durch das Gegendruckgießen positiv beeinflusst. [143]

Zudem erfolgt die Formfüllung durch den Überdruck noch beruhigter, als es beim Niederdruckgießen der Fall ist. Auch ist das Abbildungs- und Formfüllvermögen besser, da durch den erhöhten Druck die Schmelze stärker an die Formkontur gepresst wird. In Verbindung mit einer intensiven, auf das Gussteil abgestimmten Formkühlung können so sehr gute mechanische Kennwerte ermittelt werden.

Die Vorteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- sehr gute mechanische Kennwerte (hohe Bruchdehnung bei gleichzeitig hohen Festigkeiten mit bis zu 30% besseren Werten als vergleichbarer Schwerkraftguss)
- dadurch hohes Leichtbaupotenzial
- kontrollierte und turbulenzarme Formfüllung
- nahezu porenfreies Gussgefüge
- höhere Toleranz ggü. schwer vergießbaren Legierungen im Vergleich zum Schwerkraftguss
- Nachspeisung durch den Anguss. Dadurch kann das Anguss- und Speisungssystem im Vergleich zum Schwerkraftguss deutlich reduziert werden.
- hohe Einsatzmaterial-Effizienz

Nachteilig ist die gekapselte Gießkammer. Formschieber sind nur schwer und zu Lasten des Bauraumes integrierbar. Außerdem müssen sie druckdicht ausgeführt werden. Insgesamt kann auch von im Vergleich zum Niederdruckguss höheren Maschinenkosten gerechnet werden. Zudem erhöht sich bei diesem Vergleich der Druckluftbedarf durch die zwei erforderlichen Druckkammern. [144]

Haupteinsatzgebiete des CPC-Verfahrens sind die Fertigung von Fahrwerk-Komponenten wie Radträger, Schwenklager, Querlenker oder Felgen.

2.3.3 Das System Aluminium-Silizium

Allgemeine Bemerkungen

Allgemein erfreuen sich Aluminium-Silizium-Legierungen als Leichtbauwerkstoffe und Gießmaterial im Fahrwerksbereich von Personenkraftwagen zunehmender Beliebtheit. In den vergangenen Jahren haben diese eine große Bedeutung bei Leichtbaukonzepten der Automobilindustrie gewonnen. Haupteinsatzgebiete sind neben Schwenklagern, Radträgern auch Hilfsrahmen auch andere Fahrwerkkomponenten.

Legierungen dieses Typs sind besonders durch ein gutes Verhältnis von Festigkeit zu Dichte bei guten bis ausgezeichneten Gießeigenschaften und wirtschaftlicher Bearbeitbarkeit charakterisiert. Technisch angewendet, weisen Aluminium-Silizium-Legierungen Siliziumgehalte typischerweise in Höhe von 5% bis 20% auf.

Die Siliziumzugabe wirkt durch Volumenzunahme bei der Erstarrung der Erstarrungsschrumpfung des Reinaluminiums entgegen, so dass sich Vorteile bezüglich der Lunckerneigung ergeben und damit eine reduzierte Speiserdimensionierung erfolgen kann. [145, 146, 147]

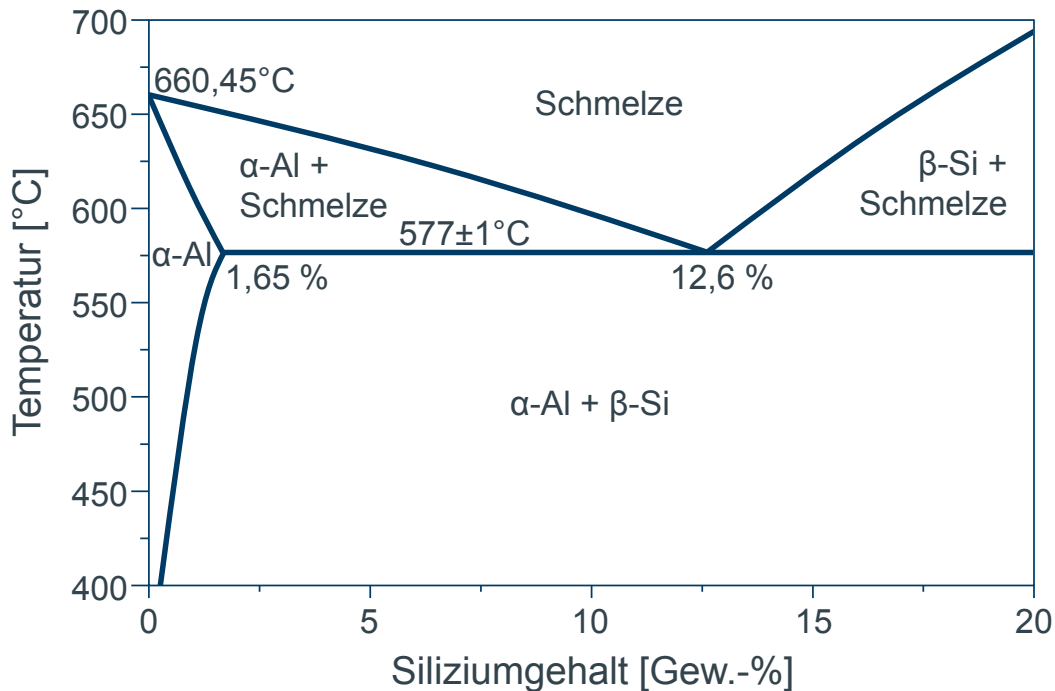


Abbildung 2-18: Das Zustandsdiagramm Aluminium-Silizium (aluminiumreiche Seite) in Anlehnung an [148, 149]

Aluminium bildet mit Silizium bei einem Gehalt von ca. 12,6 % Si ein Eutektikum, das einen Schmelzpunkt von 577 °C aufweist. Das Zulegieren weiterer Elemente wie Kupfer oder Magnesium bewirkt eine Verschiebung der Lage des eutektischen Punktes zu höheren oder niedrigeren Temperaturen. Je nach Siliziumgehalt unterscheidet man zwischen untereutektischen, naheutektischen und übereutektischen Legierungen. Besonders naheutektische Legierungen zeichnen sich aufgrund eines geringen Erstarrungsintervalls durch gute Gießbarkeit bei hoher Fließfähigkeit und guten Formfüllvermögen aus. Allgemein lässt das Fließvermögen mit steigendem Si-Gehalt aufgrund zunehmender schwamm- bis breiartiger Erstarrung nach, steigt aber bei eutektischen und naheutektischen Legierung durch zunehmende schalenbildende Erstarrung wieder an. Eine weitere Verbesserung ist für übereutektische Legierungen aufgrund der Ausbildung von Siliziumprimärkristallen und der höheren latenten Schmelzwärme des Siliziums zu beobachten. Die Löslichkeit von Silizium in festem Aluminium beträgt bei 577°C 1,65% und fällt bei 300°C auf etwa 0,07% ab, wie aus dem Zustandsschaubild entsprechend Abbildung 2-18 zu entnehmen ist. Steigt der Siliziumgehalt einer Legierung auf Werte an, die größer sind, als es der Löslichkeit entspricht, so enthält

das Gefüge neben Aluminium-Mischkristallen auch ausgeschiedene Silizium-Kristalle. [150]

Die im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig behandelten Legierungen entsprechend weitgehend der EN AC-AISi7Mg0,3 (EN AC-42100-T64) sowie der EN AC-AISi11 (EN AC-44000-T64). Die chemische Zusammensetzung dieser Legierungen ist normgemäß nach DIN EN 1706 in Tabelle 2-2 zu finden. [151] Die EN AC-AISi7Mg0,3 stimmt dabei weitgehend mit der amerikanischen ASTM-Normung B108 überein. Diese trägt dort die Bezeichnung A356.0. Abweichungen der DIN zur ASTM lassen sich insbesondere in einem höher tolerierten Wert an Kupfer (0,2% statt 0,05%) festmachen. [152] Im Folgenden werden die Legierungen kurz als AISi7Mg bzw. AISi11 bezeichnet.

Tabelle 2-2: Chemische Zusammensetzung der Gußlegierungen (in Massenanteilen in Prozent ausgedrückt) nach DIN EN 1706 [151]

Legierungsbezeichnung chem. Symbol (numerisch)	Chemische Zusammensetzung in Massenanteilen in%									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Andere Beimengungen*		Al
								einzel	gesamt	
EN AC-AI Si7Mg0,3 (EN AC-42100)	6,5 bis 7,5	0,19	0,05	0,10	0,25 bis 0,45	0,07	0,08 bis 0,25	0,03	0,10	Rest
EN AC-AI Si11 (EN AC-44000)	10,0 bis 11,8	0,19	0,05	0,10	0,45	0,07	0,15	0,03	0,10	Rest

*„Andere Beimengungen“ enthalten nicht die Elemente, die zur Kornfeinung oder Veredlung der Schmelze dienen, wie Na, Sr, Sb und P.

Die Abweichungen der eingesetzten Legierungen beinhalten eine Einschränkung für die Gehalte von Eisen, Kupfer, Magnesium und Titan. Eisen- und Kupfergehalte werden nur sehr gering toleriert, Magnesium auf 0,32-0,36% eingeschränkt. Dadurch können bei den gegebenen Prozessen gleichmäßigere und höhere Werkstoffkennwerte insbesondere unter Berücksichtigung der Wärmebehandlung erzielt werden. Sowohl die AISi7Mg als auch die AISi11, werden diesem Schritt unterzogen. Letztere Legierung wird aufgrund ihres besseren Fließvermögens, wie aus Tabelle 2-3 hervorgeht, für dünnwandige und große Bauteile wie zum Beispiel

Hilfsrahmen eingesetzt. Die AlSi7Mg weist hingegen ein größeres Erstarrungsintervall und damit auch etwas schlechtere Gießbarkeit auf.

Tabelle 2-3: Vergleich der Gießcharakteristika, der mechanischen und weiteren Eigenschaften nach DIN EN 1706 [151]

Legierungs- bezeichnung Chemisches Symbol (numerisch)	Gießbarkeit			Andere Eigenschaften									Mechanische Eigenschaften		
	Fließvermögen	Warmrißbeständigkeit	Druckdichtheit	Bearbeit- barkeit		Korrosionsbeständigkeit	Dekorative anodische Oxidation	Schweißbarkeit	Polierbarkeit	Thermischer Längenausdehnungs- koeffizient [$10^{-6}/K$ bei 293 bis 373 K]	Elektrische Leitfähigkeit [MS/m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]	Festigkeit bei Raumtemperatur	Duktilität (Schlagzähigkeit)	Ermüdungsfestigkeit [Mpa]
				nach Wärmebehandlung	wie gegossen										
EN AC-Al Si7Mg0,3 (EN AC-42100)	B	A	B	---	B	B	D	B	C	22	21 - 27	160 - 180	A	A	80 - 110
EN AC-Al Si11 (EN AC-44000)	A	A	A	C	---	B	E	A	D	21	18 - 24	140 - 170	D	A	60 -90

A = ausgezeichnet; B = gut; C = annehmbar; D = unzureichend; E = nicht empfehlenswert; F = ungeeignet

Zu den metallkundlichen Grundlagen und gießtechnologischen Eigenschaften von Al-Si-Legierungen sei an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Empfehlenswerte Bücher finden sich von Schumann und Oettel [153], Weisbach [154], Hornbogen [155], Gottstein [156], Schatt [157], Guy [158], Askeland [159] oder Ostermann [160], in denen die Zusammenhänge detailliert erläutert werden. Speziell auf die gießtechnologischen Eigenschaften von Aluminium-Gusslegierungen geht die Vereinigung deutscher Schmelzhütten ein. [150]

Zusammenfassungen der wichtigsten Aspekte sind in Anhang C für die metallkundlichen Grundlagen sowie in Anhang D für die gießtechnologischen Eigenschaften zu finden. In Anhang E wird auf das Korrosionsverhalten von Al-Si-Legierungen eingegangen.

2.4 Wärmebehandlung

Korrelierend mit dem Leichtbauwunsch steht die Forderung nach höchstmöglichen Festigkeiten bei gleichzeitig hohen Dehnungswerten für die entsprechenden Bauteile. Für Al-Si-Mg-Legierungen ist die Wärmebehandlung Mittel der Wahl, um diesem Wunsch gerecht zu werden, da die nach dem Gießen vorliegenden Materialeigenschaften im Allgemeinen nicht ausreichend sind. Diese gezielte thermische Nachbehandlung ermöglicht es das Werkstoffpotenzial anforderungsgerecht auszuschöpfen. Art und Parametrierung des erforderlichen Prozesses sind dabei in Abhängigkeit der gewünschten Wirkung, des Gießverfahrens, der Legierung und der Bauteil-Geometrie einzustellen.

Bei der Wärmebehandlung können dabei Gusseigenspannungen gelöst oder durch das Abschrecken erzeugt werden. Auch ist mit einem Bauteilverzug zu rechnen. Letzterer kann durch Richten nach dem Abschrecken in gewissen Grenzen, die durch die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs definiert werden, neutralisiert werden. [160]

Die Aushärtbarkeit von Aluminiumgusslegierungen bedingt dabei die temperaturabhängige, abnehmende Löslichkeit mindestens eines Legierungsbestandteiles, wie z.B. Kupfer, Magnesium, Zink oder Silizium. [161, 160]

Hierdurch können intermetallische Phasen gebildet werden. Einen weiteren, wenn auch nicht so effektiven Aushärtungsmechanismus stellt die Mischkristallverfestigung durch Natrium- oder Strontium-Veredelung des Eutektikums dar. Für die Legierungen AlSi7Mg und AlSi11Mg liegen Silizium und Magnesium vor. Als wirksame intermetallische Phase entsteht Mg_2Si . Bei AlSi-Legierungen liegt der optimale Mg-Anteil zwischen 0,2 % und 0,5 % und sinkt mit steigendem Si-Gehalt leicht. Eine leicht feinende Wirkung des Siliziums wird der Zugabe von Magnesium nachgesagt. [162]

Die unterschiedlichen Wärmebehandlungszustände, die für Aluminium-Gussstücke erreichbar sind, werden gemäß DIN EN 515 [163] und DIN 65582 [164] definiert und gegliedert. Zu den wichtigsten Hauptgruppen gehören dabei:

- F: Herstellungszustand (unbehandelt)
- T4: Lösungsgeglüht, abgeschreckt und kaltausgelagert
- T5: Aus dem Gusszustand (stufenweise) abgeschreckt und warmausgelagert
- T6: Lösungsgeglüht, abgeschreckt (in Wasser) bzw. an Luft abgekühlt und warmausgelagert (alternative Bezeichnung: wa)
- T7: Lösungsgeglüht, abgeschreckt, warmausgelagert und überhärtet bzw. stabilisiert

Für Al-Si-Mg-Legierungen bilden die T6- und T7-Wärmebehandlungen mit Ihren Untergruppen die Schwerpunkte, wobei Fahrwerk-Komponenten zur Erreichung hoher Dehnwerte typischerweise nicht voll ausgehärtet werden.

Die erreichbare Zugfestigkeit hängt vom gewählten Aushärtungszustand ab. Abbildung 2-19 stellt diese gegenüber.

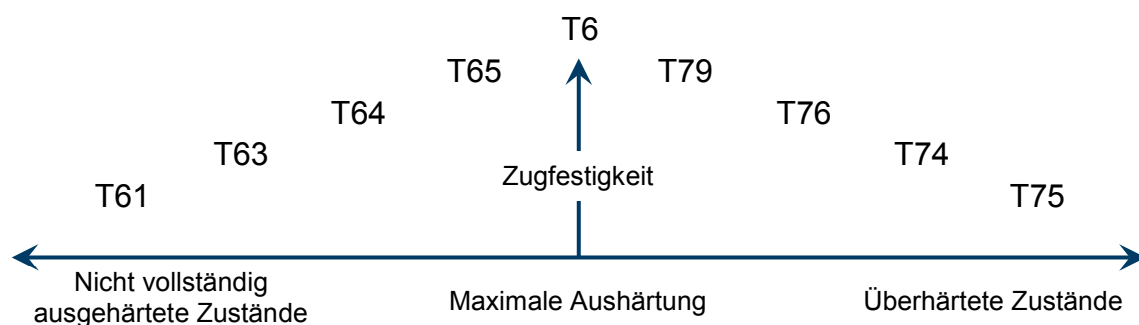


Abbildung 2-19: Gegenüberstellung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Aushärtungszustandes bei den Wärmebehandlungszuständen T6 und T7 nach [163]

Der Aushärtungsmechanismus ist dabei komplex. Das Ausscheiden feinverteilter, kohärenter Partikel einer sekundären Phase aus dem übersättigten Mischkristall ist Ziel des diffusionsgesteuerten und damit zeit- und temperaturabhängigen Prozesses. Zur Erzeugung der Übersättigung ist ein rasches Abkühlen aus hohen Temperaturen (unterhalb des Bereiches schmelzflüssiger Bestandteile) erforderlich. Die sonst unter Gleichgewichtsbedingungen stattfindenden Diffusionsprozesse werden unterdrückt und der im Mischkristall gelöste Legierungsbestandteil am Ausscheiden behindert. Gleichzeitig wird zudem die bei hohen Temperaturen vorliegende

Leerstellenkonzentration eingefroren. Ein doppelt übersättigter Mischkristall mit geringen Festigkeitseigenschaften liegt vor. Anschließend erfolgt eine Verspannung des Kristallgitters und bei mäßig erhöhten Temperaturen der gezielte feindisperse Zerfall des übersättigten Mischkristalls. [165] Der Prozess kann folglich in drei Stufen untergliedert werden: Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern. Am Beispiel einer T6-Wärmebehandlung, wie in Abbildung 2-20 veranschaulicht, können diese Prozessschritte erläutert werden.

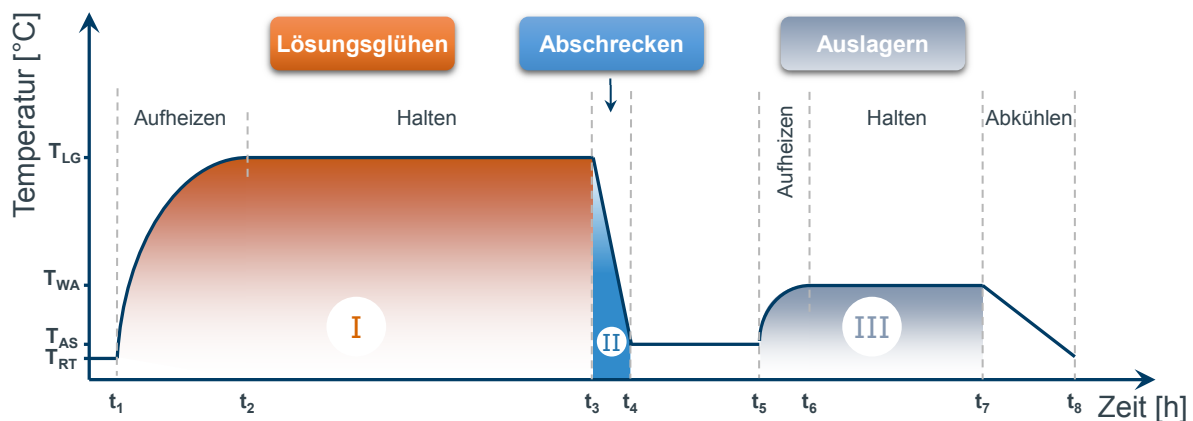


Abbildung 2-20: Prinzipieller Verlauf einer T6-Wärmebehandlung für Aluminiumgussteile

2.4.1 Schritt I: Lösungsglühen

Das Lösungsglühen startet mit der Aufheizphase (t_1 bis t_2), die aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zügig erfolgen sollte, wobei ein Überschwingen der gewünschten Haltetemperatur vermieden werden muss. Es findet bei hoher Temperatur statt, da hier Löslichkeit und Diffusionsgeschwindigkeit einzelner Legierungsbestandteile stark zunehmen. Dabei ist zwingend zu beachten, unterhalb des Phasengebietes „Flüssig-Fest“ der niedrig schmelzenden Gefügebestandteile zu bleiben. Ansonsten können vorzugsweise entlang der Korngrenzen nicht reversible Anschmelzungen entstehen, die zum Ausschuss des Glühgutes führen. Typische Lösungsglüh-Temperaturen liegen legierungsabhängig zwischen 470 °C und 560 °C. Für die Al-Si-Mg-Legierungen werden Werte zwischen 525°C und 540°C empfohlen. Eine enge Tolerierung, möglichst kleiner als $\pm 3\text{K}$, ist dabei obligatorisch. [166, 160, 167]

Durch die erhöhten Temperaturen werden Legierungsbestandteile in höherem Maß in Lösung gebracht, als bei Raumtemperatur unter Gleichgewichtsbedingungen möglich. Wie aus dem in Abbildung 2-21 dargestellten quasibinären Phasendiagramm für die Verbindung Al-Mg₂Si zu erkennen ist, können maximal 1,91% der Mg₂Si-Phase in Lösung gebracht werden.

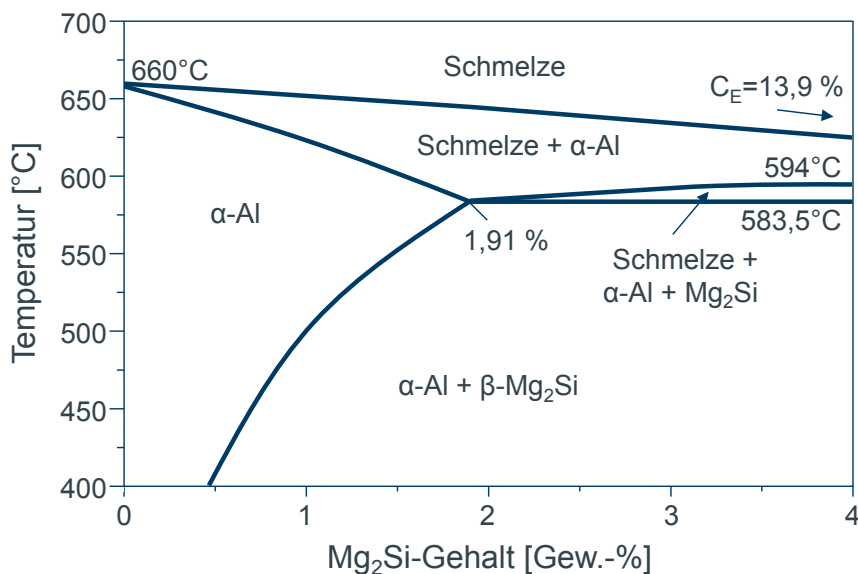


Abbildung 2-21: quasibinäres Al-Mg₂Si-Phasendiagramm nach [168, 169]

Bei einer Lösungsglüh-temperatur von 535 °C sind etwa 1,35 % Mg₂Si lösbar, was einer maximalen Konzentration von 0,85 % Magnesium im Mischkristall entspricht. [165] Bei typischen Magnesium-Gehalten von 0,3 bis 0,6 % in der Legierung ist folglich eine vollständige Löslichkeit gewährleistet.

Gleichzeitig erfolgen durch das Lösungsglüh- ein Zerfall der im Gusszustand grobnadelförmigen Silizium-Strukturen und ein Abrunden der nun kleineren Silizium-Partikel. Größe und Morphologie ändern sich folglich. Mit zunehmender Glühdauer finden, wie in Abbildung 2-22 aufgezeigt, einerseits eine Vergrößerung und andererseits eine kugelige Einformung des Siliziums statt. [170, 171, 172]

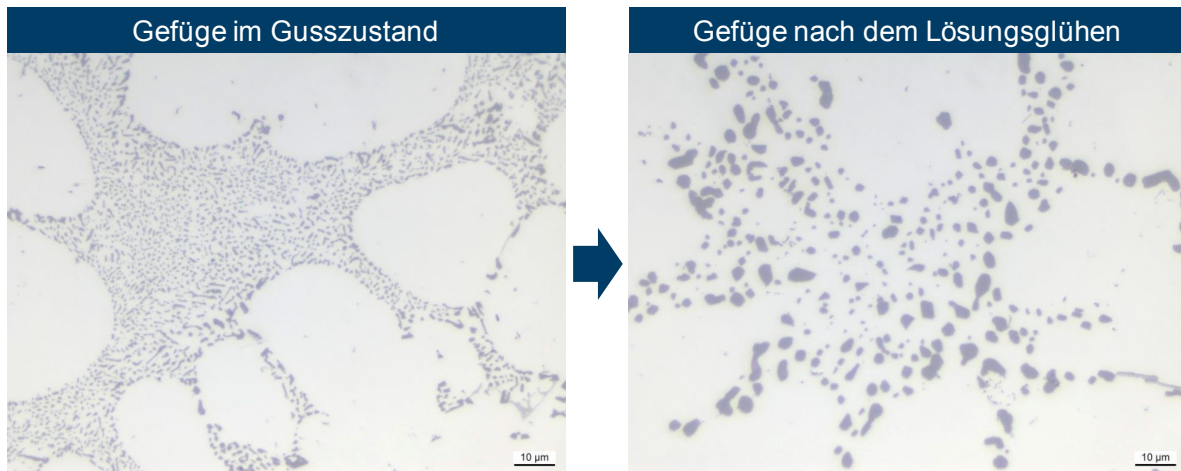


Abbildung 2-22: Gefügevergleich des eutektischen Siliziums vor und nach dem Lösungsglühen am Beispiel einer im CPC-Verfahren vergossenen AlSi7Mg0,3 , Vergrößerung 1000x

Eine im Vorfeld durchgeführte Veredelung der Schmelze durch Natrium oder Strontium begünstigt durch vermehrte Zwillingsbildung der Siliziumkristalle die Morphologie des Siliziums hin zu feiner Körnung. Einen Erklärungsansatz wird als „Impurity Induced Twinning“ bezeichnet und ist in Abbildung 2-23 zu sehen. Hierbei lagern sich Atome des Veredelungsmittels (schwarze Kreise im linken Bild) in den Wachstumsstufen des Siliziumkristalls zwischen der Fest-flüssig-Grenzfläche an. Bei einem Atomradien-Verhältnis von 1,646 des Veredelungsmittels zu Silizium erfolgt die Zwillingsbildung. [173, 174, 175]

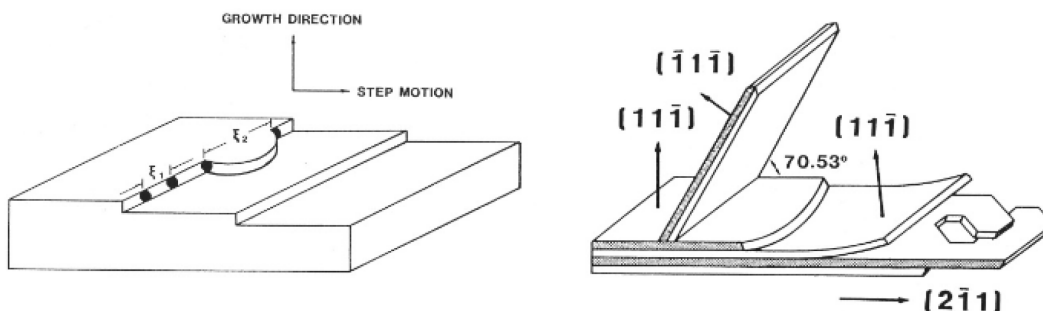


Abbildung 2-23: Theorie der Zwillingsbildung von Siliziumkristallen durch Adsorption von Veredelungselementen an Wachstumsstufen [175]

Diese kombinierte Morphologieänderung hat positive Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, da die grobe, kerbartige, nadelige Ausprägung hin zu

einer feinen, globulitischen Form verändert wird. Verteilung und Morphologie der Siliziumpartikel haben dabei einen größeren Einfluss als der sekundäre Dendritenarmabstand. [176, 177] Selbiger korreliert mit den erreichbaren mechanischen Eigenschaften, wobei für sinkende sDAS ein Anstieg der mechanischen Kennwerte und der Thermoschockbeständigkeit verbunden ist. [178]

Zudem sinken durch die Veredelung die erforderlichen Lösungsglühzeiten. So reichen bei Lösungsglühtemperaturen von 540 °C bis 550 °C wenige Minuten bis die Eiformung der Silizium-Partikel beginnt. Eine Haltezeit von 15-30 Minuten wird als ausreichend beschrieben, um die Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften fast vollständig zu erreichen. [179, 180]

2.4.2 Schritt II: Abschrecken

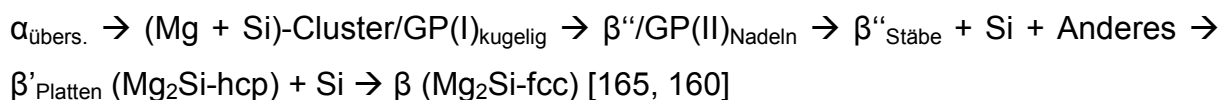
Das Abschrecken dient dem Zweck, den gewünschten übersättigten Mischkristall zu erzeugen. Dies geschieht durch Unterbindung der frühzeitigen Ausscheidung von Magnesium (und ggf. weiteren überschüssig gelösten Bestandteilen wie beispielsweise Cu) und folglich der Mg_2Si -Gleichgewichtsphase. Gleichzeitig wird die Leerstellenkonzentration, die für die Beweglichkeit von Mg- und Si-Atomen in den späteren Diffusionsvorgängen wichtig ist, eingefroren. Dazu ist es von Bedeutung, das Temperaturgebiet zwischen Lösungsglühtemperatur und etwa 200°C möglichst schnell zu durchlaufen. Erfolgt dies nicht, können insbesondere an den Korngrenzen grobe und ungleichmäßige Ausscheidungen gebildet werden, die sich negativ auf Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionsverhalten auswirken. Typisches Medium ist dabei Wasser von 25 °C bis 100 °C. Für die Legierung $AlSi7Mg0,3$ gilt beispielsweise eine kritische Abschreckgeschwindigkeit von 60 K/s, unterhalb der die Vickershärte abnimmt. Die Abschreckgeschwindigkeit ist zudem so zu wählen, dass die Entstehung von Eigenspannungen im Bauteil sowie dessen Verzug ein tolerierbares Maß nicht überschreiten. Abschreckmedium und -Temperatur sind hierbei die maßgebenden Faktoren. Die Zeit bis zum Abschrecken (t_3 bis t_4) sollte in jedem Fall möglichst kurzgehalten werden und innerhalb 30 Sekunden oder kürzer erfolgen. Das Gussteil weist zu diesem Zeitpunkt die geringste Festigkeit auf und kann, falls

erforderlich, vor dem Auslagern in einem Zwischenschritt gerichtet werden. [167, 170, 160, 181]

2.4.3 Schritt III: Auslagern

Das Warmauslagern dient der gezielten feindispersen Ausscheidung der im doppelt übersättigten Mischkristall ($\alpha_{\text{übersättigt}}$) eingefrorenen Gefügebestandteile bei Temperaturen ab mindestens 60°C, typischerweise aber bei 120 °C bis 250°C, wobei die Ausscheidungsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur steigt. [156]

Der Zerfall verläuft gemäß der Ausscheidungsfolge:



In Abhängigkeit der Auslagerungstemperatur bilden sich zunächst ausgehend von zufällig verteilten Legierungselementen in Kupfer-freien Al-Si-Mg-Legierungen fein verteilte siliziumreiche Mg-Si-Cluster. Diese formieren in Abhängigkeit des Leerstellenangebots unter Bildung von Zwischen- und Übergangsphasen durch Anreicherung von Magnesium zu kugeligen GP(I)-Zonen. Diese kohärenten, an Silizium verarmten Ausscheidungen werden auch pre- β'' -Phasen genannt. Mit zunehmender Entmischung bilden die Cluster eine Ordnungsstruktur aus, bei der nadelförmige GP(II)-Phasen, sogenannte β'' -Phasen gebildet werden. Diese aus Mg_5Si_6 bestehenden Einheiten wachsen zu kohärenten, stäbchenförmigen Gebilden an, bei denen die höchste Festigkeit erreicht wird. Bei weiterer Alterung entsteht die teilkohärente, stabförmige β' -Phase aus der abschließend die inkohärente β - bzw. Gleichgewichtsphase Mg_2Si entsteht. Die in Abbildung 2-24a dargestellte β' -Phase der Zusammensetzung $\text{Mg}_{1,7}\text{Si}$ weist dabei die hexagonal dichteste Packung (hcp) auf, wohingegen die in Abbildung 2-24b sichtbare β -Phase kubisch flächenzentriert (fcc) ist. [182, 183, 184, 185, 160, 165, 186]

Wie aus Abbildung 0-7 ersichtlich, haben die einzelnen Phasen temperaturabhängige Löslichkeitsgrenzen. Die Ausscheidungskinetik kann dabei durch die vorzeitige

Ausscheidung einer minderstabilen Phase beeinflusst werden, da eine Reduzierung des Übersättigungsgrades erfolgt und folglich die Bildung der nächststabileren Phase erschwert wird.

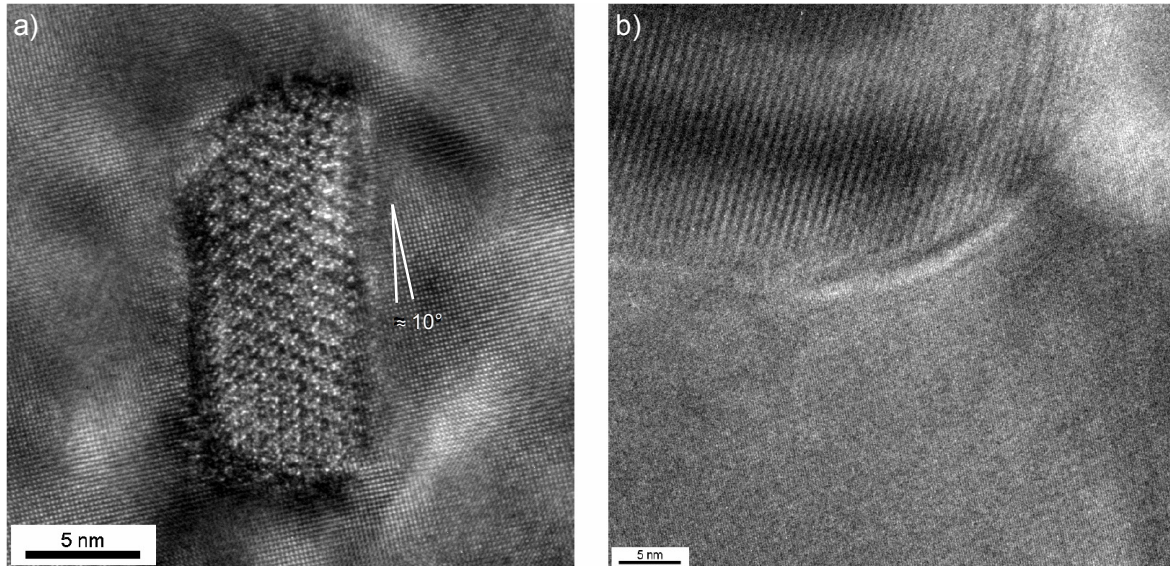


Abbildung 2-24: a) atomar aufgelöste mikroskopische Aufnahme einer teilkohärenten β' -Mg₂Si Ausscheidung mit einer Abweichung von etwa 10° gegenüber des {001}-Gitters der Aluminium-Matrix
b) TEM-Aufnahme einer großen Mg₂Si-Ausscheidung [187]

Neben dem Aushärtungsmechanismus wird auch das plastische Materialverhalten durch diese komplexe Wechselwirkung beeinflusst. Neben Art, Größe, Volumenanteil und Verteilung der Ausscheidungsphasen, beeinflussen auch die Restmenge der gelösten Legierungselemente die Versetzungsbewegung und -reaktionen. Duktilität und das Bruchverhalten werden durch unterschiedliche Ausscheidungszustände beeinflusst. Liegen größere Restmengen an gelösten Elementen nach Cluster- und GP(I)-Zonenbildung vor, wird das Einsetzen dynamischer Entfestigung bei der Verformung durch planares Gleitverhalten verzögert. Geringe Restmengen wie sie beispielsweise nach Überhärtung anzutreffen sind, führt zu Quergleiten und damit zu dynamischer Entfestigung. Während die Festigkeit (und Härte) im Laufe der Auslagerung ein Maximum (Vollaushärtung, T6) erreicht, durchläuft die Duktilität mit weiter zunehmender Auslagerungszeit ein Minimum. [160, 167]

Je nach Zeit- und Temperaturregime können so die mechanischen Eigenschaften hin zu den gewünschten Parametern beeinflusst werden. Fahrwerk-Komponenten, bei denen insbesondere der Wunsch nach höchstmöglicher Duktilität bei gleichzeitig hoher Festigkeit besteht, erfahren folglich typischerweise nur eine Teilaushärtung (Zustand T64).

3. Identifizierung von Optimierungsansätzen

Der Fortschritt in der virtuellen Produktauslegung hat mittlerweile ein beachtliches Niveau erreicht. Es ist möglich, ein Bauteil sehr genau auf seine Anforderungen hin zu optimieren. Die Umsetzung dieser Designs stellt dabei große Anforderungen an den Fertigungsprozess. Dabei stellt sich die Frage, wie unter ökologischen und ökonomischen Aspekten optimaler Leichtbau für diese sicherheitsrelevanten Aluminiumguss-Komponenten aussehen soll und welche Prozesse besonders Beachtenswert sind.

Zunächst wird der reguläre Fertigungsablauf für Fahrwerk-Komponenten aus Aluminiumguss vorgestellt. Anschließend erfolgt zur Identifikation energetisch relevanter Ansatzpunkte exemplarisch an einem im CPC-Verfahren hergestellten Gussteil eine Umweltbilanzierung, da diese für diese Produktgruppe und das zugehörige Verfahren nicht vorliegt. Auf Basis der Ergebnisse werden unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren Prozessparameter ausgewählt, die im Sinne ökologischen Leichtbaus optimiert werden können. Um gleichzeitig einen robusten Fertigungsprozess gewährleisten zu können, gilt es dabei, den Einfluss von Prozessschwankungen und Prozessgrößen auf das dynamische Verhalten kennenzulernen und zu berücksichtigen.

3.1 Fertigung gegossener Fahrwerk-Komponenten

Wie bereits erwähnt, gehören Fahrwerk-Komponenten zu den sicherheitsrelevanten Bauteilen im Fahrzeug. Das Gießen dieser Bauteile erfordert große Sorgsamkeit und wird von umfangreichen Prüfungen im Fertigungsprozess begleitet. Abbildung 3-1 zeigt den prinzipiellen Ablauf.

Basis bildet die Primär-Aluminiumlegierung, welche mit arteigenem Kreislauf (Anguss- und Speisersystem sowie Ausschuß) versetzt wird. Späne sind aufgrund der Erhöhung der Oxidbelastung der Schmelze aus dem Kreislauf fernzuhalten und separat zu verwerten. Die gießfertige Schmelze wird nach vorgabegemäßer Prüfung hinsichtlich Zusammensetzung, Kornfeinung, Veredelung und Dichteindex und

gegebenenfalls Einstellung ihrer Zusammensetzung vergossen. Die Bauteile werden nach der Entnahme aus der Kokille eindeutig markiert und der Rohteilbearbeitung zugeführt, wo das Anguss- und Speisersystem, sowie ein potenziell vorhandener Formteilungsgrad entfernt werden. Nun werden alle Bauteile einer dokumentierten Röntgenprüfung unterzogen und vorgabegemäß aussortiert. Die folgende, ebenfalls dokumentierte Sichtprüfung sortiert weitere Teile aus und führt die Gutteile der Wärmebehandlung zu. Nach dem Lösungsglühen und Abschrecken erfolgt geometrieabhängig ein Richtprozess. Die Wärmebehandlung wird mit dem Auslagern abgeschlossen.

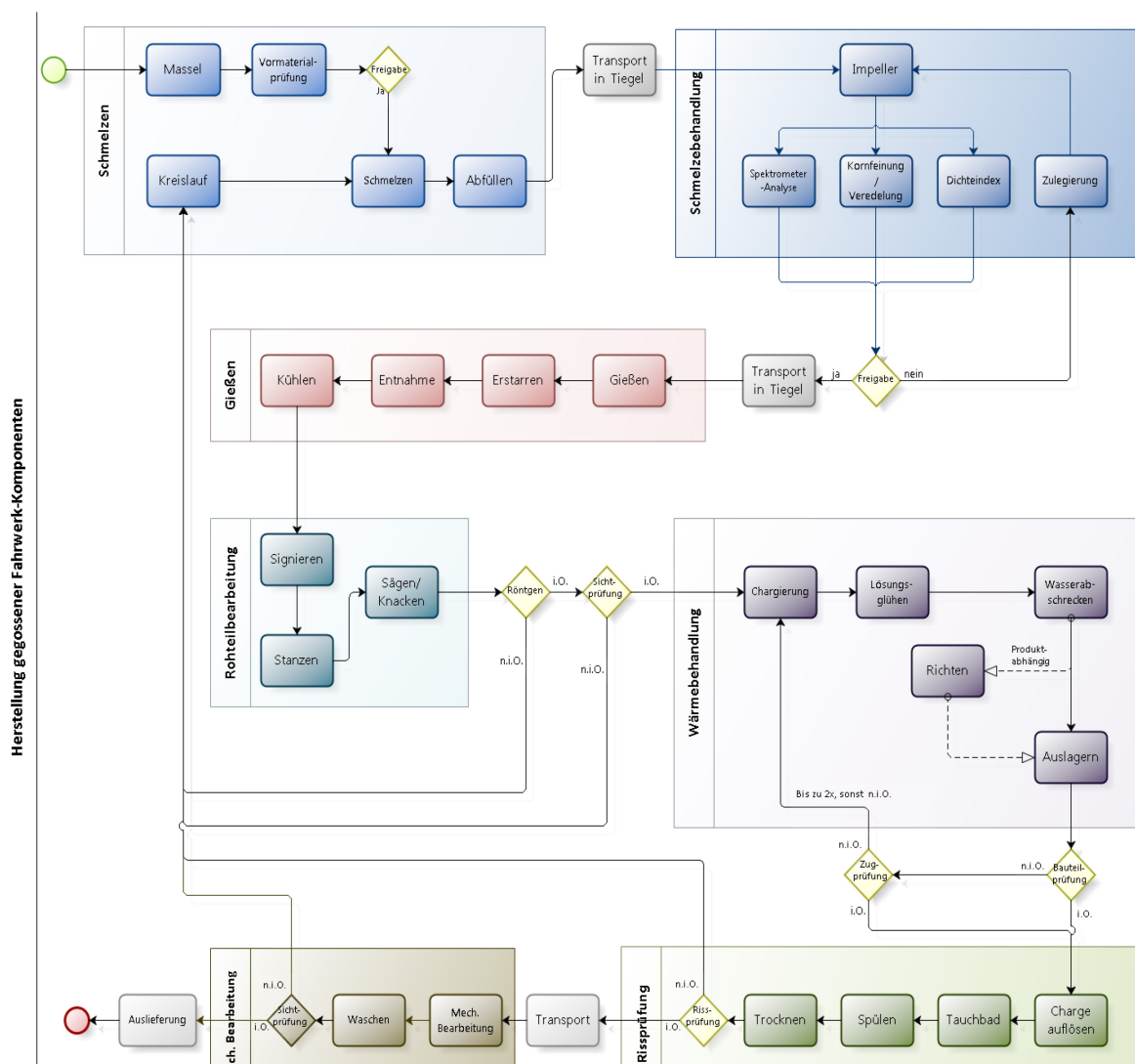


Abbildung 3-1: Schematischer Fertigungsprozess einer Fahrwerk-Komponente aus Aluminium-Guss

Alle Bauteile werden nun einer wiederum dokumentierten Farbeindringprüfung unterzogen, mit dem Ziel etwaige Risse zu entdecken. Parallel findet zur Prüfung des Wärmebehandlungsergebnisses chargenweise eine protokollierte Bauteilprüfung statt. Nach Freigabe werden die Gussteile der mechanischen Bearbeitung zugeführt. Ist diese abgeschlossen, erfolgt eine letzte Sichtprüfung, bevor die Teile in Richtung des Montageprozesses weitergegeben werden. Der Gießprozess unterliegt dabei vielfältigen Einflüssen. Eine Auswahl der Wichtigsten ist dem Ishikawa-Diagramm in Abbildung 3-2 zu entnehmen.

In der Wechselwirkung aller Bereiche können Schwankungen im Gießprozess entstehen. Auslöser können ein einzelner Parameter oder auch eine komplex verwobene Vielzahl von Parametern sein.

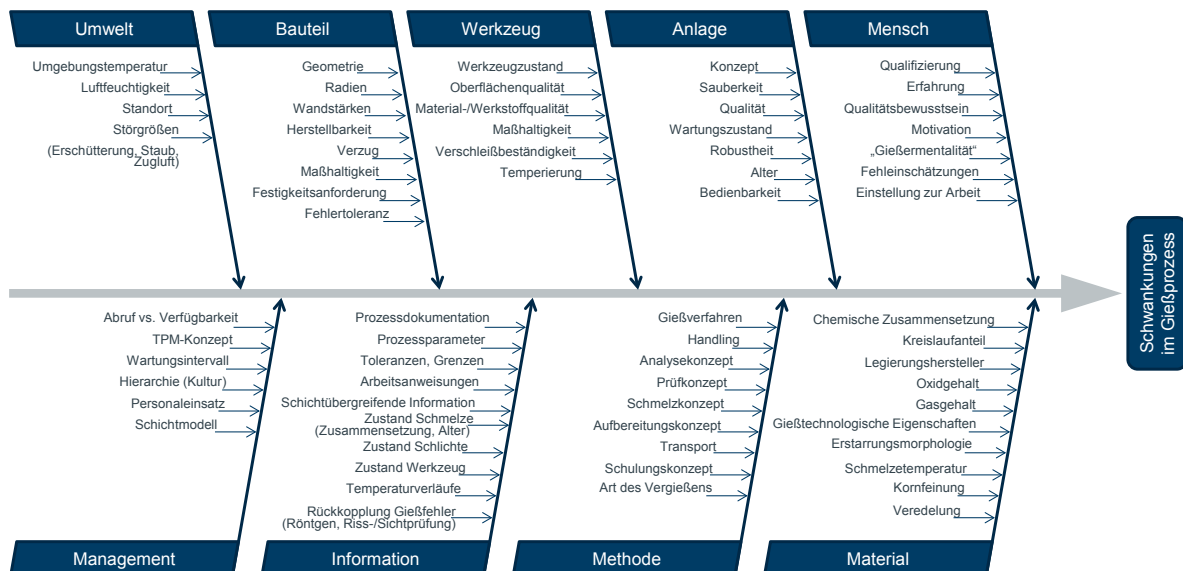


Abbildung 3-2: Ishikawa-Diagramm – Auswahl wichtiger Einflussfaktoren auf den Gießprozess

Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Informationsbereich zu legen, der durch Interaktion alle Bereiche verbindet. Ein detailliertes Prozesswissen unterstützt dabei das Erkennen von Zusammenhängen und Auswirkungen von Abweichungen einzelner Parameter. Ein kontinuierlicher und präziser Informationsfluss, der fortlaufend analysiert und interpretiert wird, gewährleistet dabei, Schwankungen im Gießprozess frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen rechtzeitig einzuleiten. Die eingesetzten Methoden haben dabei Einfluss auf die Effektivität der Maßnahmen.

3.2 Umweltbilanzierung (LCA) am Beispiel eines Aluminium-Radträgers

LifeCycle-Assessment (LCA), oder auch als Ökobilanz oder Umweltbilanzierung bezeichnet, ist in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 definiert. Sie dient der Analyse von potenziellen Umweltwirkungen, wie Ressourcennutzung oder Auswirkung von Emissionen eines Produkts im Laufe seines gesamten Lebenszyklus und ermöglicht die quantitative Beurteilung ökologischer Aspekte, wie etwa der Emission von Treibhausgasen wie CO₂. Dabei regelt DIN EN ISO 14040 zur konsistenten Durchführung der Methode sämtliche Begrifflichkeiten. DIN EN ISO 14044 beschreibt Anforderungen und gibt einen Leitfaden vor. [188, 189] LCA-Studien werden methodisch in vier Phasen untergliedert. Wie aus Abbildung 3-3 ersichtlich, besteht eine Wechselwirkung.

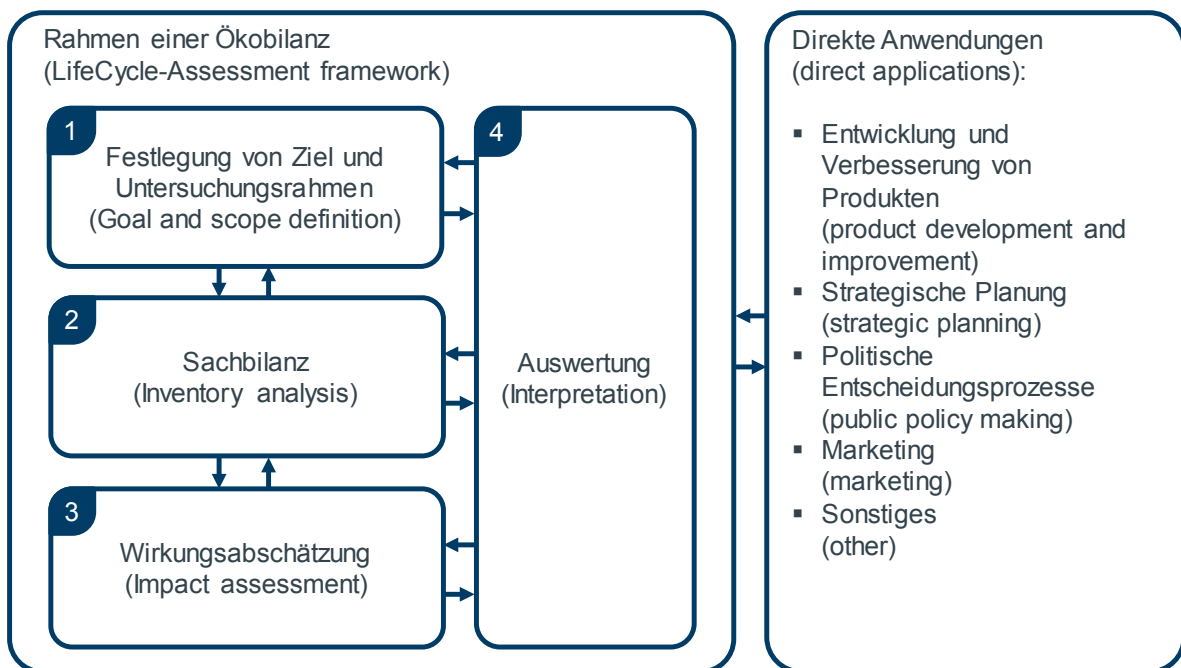


Abbildung 3-3: Phasen einer Ökobilanz (Stages of an LifeCycle-Assessment)

[188]

In der ersten Phase erfolgt die Definition von Funktion und Nutzen des bilanzierten Produktes und bildet die Bezugsgröße der Bilanz. Anschließend erfolgt die Sammlung, Ableitung und Aufbereitung aller für die Betrachtung relevanten Ein- und Ausgangsgrößen. Diese werden in Phase 3 basierend auf Umweltwirkungskategorien gewichtet. Abschließend werden die Ergebnisse

interpretiert. Signifikante Parameter werden dabei über eine Beitrags-, Dominanz- und Einflussanalyse bestimmt. Final erfolgt unter Berücksichtigung des definierten Ziels die Erarbeitung von Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen. [190]

Phase 1: Definition des Ziel- und Untersuchungsrahmens

Zur Identifikation und Wichtung von Beitragsleistern wird ein im CPC-Verfahren gegossener Aluminium-Radträger in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 [188, 189] in vereinfachter Form einer Umweltbilanzierung unterzogen. Hierbei werden Vorketten wie Rohstoffgewinnung und –aufbereitung und der Transport, die Fertigung, die Nutzungsphase sowie das Recycling berücksichtigt. Die Systemgrenzen schließen den gesamten Lebenszyklus der Bauteile ein. Den Beginn stellen die Gewinnung von Aluminium und die Herstellung der Primärlegierung dar. Die Verwertungsphase endet bei der Überführung in Sekundäraluminium. Die Allokation des Recyclings während der Produktion erfolgt als closed loop. Durch die Modellierung der Kreislaufführung ist die Substitution von gleichwertigem Primärmaterial abgebildet und eine explizite Allokation nicht nötig. Das Recycling zum Lebensende des Produktes erfolgt als wertkorrigierte Substitutionsmethode (open loop), da das eingesetzte Primäraluminium in Sekundäraluminium überführt wird. Die Bedingung der Materialeigenschaftsänderung für die Marktwertanalyse wird somit erfüllt. Datengrundlage bilden technische Datenblätter, Messwerte aus dem Fertigungsprozess, die im Rahmen studentischer Zuarbeiten erhoben worden, sowie LCI-Datensätze der European Aluminium Association EAA. Als Wirkungskategorie (mid-point) wird das Treibhauspotenzial (GWP) herangezogen. Den Wirkungsendpunkt (end-point) stellt der Klimawandel dar. Als relevante Eingangsgrößen werden neben elektrischer und fossiler Energie, Druckluft, Wasser und Kraftstoffverbrauch betrachtet. Ausgangsgrößen bilden die treibhauswirksamen Emissionen von Lachgas (N_2O), Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2), auf die sich in der Betrachtung beschränkt wird.

Ziele sind die Identifikation von Beitragsleistern mit hohem Treibhauspotenzial im Herstellprozess, die Ableitung ausgewählter Maßnahmen zur Reduzierung von

Emissionen im bzw. durch den Prozess sowie die Einordnung des CO₂-Footprints der Herstellung in den Gesamtlebenszyklus.

Phase 2 und 3: Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Die Daten zur Sachbilanz wurden im Rahmen separater Arbeiten erhoben und bilden die Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen. Vereinzelt Daten, auf die nicht direkt zugegriffen werden konnten, sind anhand von Literaturwerten abgeleitet worden. Auf eine genaue Aufschlüsselung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und lediglich kurz auf das Vorgehen und die Ergebnisse eingegangen. [191, 192, 193] Die relevanten Datenquellen sind tabellarisch in Anhang F ergänzend zusammengefasst.

Aufgabe der Sachbilanz ist die über die Akquise von Daten stammenden Energieverbräuche in Emissionswerte umzurechnen. Direkte und indirekte Emissionen bilden die Basis für die Emissionsfaktoren. Erstere werden direkt am Prozessschritt in der Fertigung gemessen, letztere fallen bei Herstellung des Energieträgers an. Gemeinsam bilden diese beiden Faktoren den Gesamtemissionsfaktor. [194]

Die indirekten Emissionsfaktoren für Strom, Erdgas, Diesel, Benzin und Heizöl stammen aus der GEMIS-Datenbank (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) Version 4.94 mit Stand März 2015. Die direkten Emissionen für Erdgas, Diesel, Benzin und Heizöl sind aus dem LfU-Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe entnommen worden. Bei Einsatz des Energieträgers Strom entstehen keine direkten Emissionen. [194, 195, 196] Der Druckluft-Bedarf wird in Verbrauch an elektrischer Energie umgerechnet. [197]

Zur Einordnung der unterschiedlich starken Effekte der zuvor genannten treibhauswirksamen Gase auf das Klimasystem wurde der Global Warming Potential Index (Treibhauspotenzial, GWP) durch das Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC eingeführt. Dieser normiert die Umweltwirksamkeit unterschiedlicher Gase relativ zum Kohlenstoffdioxid. Dieser Maßstab wird als CO₂-Äquivalent CO_{2e}

bezeichnet. Unter Zugrundelegung des GWP_{100} hat Methan einen Wert von 28 und Lachgas von 265. [198]

Die Betrachtung wird in Beschaffungs- und Produktionsphase unterteilt. Die erstgenannte wird auch als Masselproduktion bezeichnet und beschreibt die Herstellung und Anlieferung des Primäraluminiums. Sie umfasst die Prozessschritte Bauxitgewinnung, Aluminiumoxid-Produktion, Anoden-Produktion, Elektrolyse, Barren gießen und Anlieferung. Die Produktionsphase beschreibt unter Beachtung von Abbrand, Kreislauf, Ausschuß und Anlagenverfügbarkeit den Fertigungsprozess angefangen vom Schmelzen bis hin zur Auslieferung des mechanisch bearbeiteten Fertigteils. Sie untergliedert sich in die Hauptbereiche Schmelzen, Gießen, Rohteilbehandlung, Wärmebehandlung, mechanische Bearbeitung und nachgelagerter Prozesse. Das Schmelzen fasst die Teilschritte Erschmelzen der Legierung im Schachtschmelzofen sowie die nachgeschaltete Schmelzebehandlung zusammen. Im Gießen sind alle relevanten Teilprozesse zur Wandlung des flüssigen Aluminiums in ein Gussteil enthalten. Nachgeschaltet ist die Rohteilbearbeitung, die aus Kühlen des entnommenen Gussteils, dem Entgratprozess, der Entfernung des Angusses und Speisersystems sowie der Röntgenprüfung besteht. Zur Wärmebehandlung gehört die Rissprüfung. Die mechanische Bearbeitung umfasst neben der Bearbeitung des Rohteils auch die Reinigung des entstandenen Fertigteils in der Waschmaschine. Die nachgelagerten Prozesse fassen die Bereiche Verpacken, Entstaubung, innerbetrieblicher Transport und Auslieferung zusammen.

Für die Nutzungsphase sind insbesondere vergleichende Betrachtungen auf Gewichtsbasis sinnvoll. Gegenüber einem Eisengussprodukt ist für ein Aluminium-Derivat ein Gewichtsvorteil auszuweisen, welcher zu einem reduzierten Fahrzeuggewicht und in der Folge zu reduziertem Energieverbrauch und verminderten Emissionen bei gleichem Fahrprofil des Fahrzeuges führt. Die Abbildung dieser Eigenschaft erfolgt über Fuel Reduction Values (FRV's). Diese sind in Abhängigkeit unterschiedlicher Kraftstoffe ermittelt worden. Die Werte sind dabei als konstant anzunehmen, da eine lineare Abhängigkeit des Kraftstoffverbrauchs von der Gewichtsreduzierung besteht. Für die einzelnen Kraftstoffarten unterscheidet man dabei zwischen FRV's mit und ohne Berücksichtigung von Sekundäreffekten. Diese

beschreiben Sprungfixe, die es ermöglichen, beispielsweise kleinere (leichtere) Aggregate und leichtere Fahrwerke bei gleicher Leistung zu verwenden. [199]

Zur Bewertung der Recyclingphase von Aluminium wird die Wert-korrigierte-Substitutionsmethode (value corrected substitution method) herangezogen. Die Anwendung dieser Methode ist in der DIN EN ISO 14040 [188] vorgeschrieben, sollte die Marktwertanalyse einen Unterschied zwischen dem Marktwert des Primärmaterials und des korrespondierenden Sekundärmaterials aufweisen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Fahrwerk-Komponenten zur Erreichung der hohen Werkstoffanforderungen in der Regel aus Primäraluminium hergestellt werden müssen. Die Allokationsmethode ist eine open-loop Methode, die zum Einsatz kommt, wenn die Eigenschaften der Materialien geändert werden. Die Allokation kann dann auf Basis der physikalischen Eigenschaften oder auf Basis des ökonomischen Wertes erfolgen. Letzteres gilt dabei für Aluminium. Die Annahme dieser Methode ist, dass die Substitutionsfähigkeit durch das Verhältnis der Preise wiedergespiegelt wird. [200]

Die Gesamtemissionen des Recyclingverfahrens setzen sich aus den Emissionen durch das Recyclingverfahren selbst und den Emissionen des notwendigen Materialverlustausgleichs zusammen. Der geringere Energieverbrauch des Recyclings stellt einen Vorteil dar. Dieser beträgt ungefähr 5 % der Energie des Verfahrens zur Herstellung von Hüttenaluminium. Die Emissionen zur Herstellung des Produktes setzen sich unter Berücksichtigung der Recyclinggutschrift folglich aus dem Abbrand bei der Produktion des Primärmaterials, dem eigentlichen Produktionsprozess, der Nutzungsphase und den Recyclingaufwendungen, sowie dem Materialverlustausgleich zusammensetzen. [201, 202]

Unter Berücksichtigung der Beschaffungs- und Produktionsphase sowie des Gussteilgewichtes und der gewichteten Auslastung kann die CO₂-Bilanz berechnet werden. Diese wird durch Betrachtung der Nutzungsphase und des Recyclings ergänzt. Hierbei sei auf [193] verwiesen. Die Ergebnisse werden in Phase 4 vorgestellt. Da für die weiteren Betrachtungen die Umweltwirkungskategorie des Treibhaus-effekts relevant ist, wird auf eine detaillierte Wirkungsabschätzung verzichtet.

Phase 4: Auswertung und Interpretation

Aufgrund literaturbasierter Annahmen, die die Messwerte ergänzen, ist das Ergebnis des CO₂-Footprints mit einer gewissen Unschärfe versehen. Dennoch kann das Ergebnis zur Identifikation von Optimierungsansätzen unter ökologischer Sicht herangezogen werden, da insbesondere die Produktionsphase auf umfangreichen Messwerten am Realprozess basiert.

In den Lebenszyklusphasen bis zur Auslieferung eines Radträgers entstehen Emissionen in Höhe von 20,34 kg CO₂e. Davon entfallen 64 % auf die Masselproduktion. Die Hauptbeitragsleister der Produktionsphase sind mit 13 % das Schmelzen, mit 11 % die Wärmebehandlung und mit 7% die mechanische Bearbeitung. Der CO₂-Footprint ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Dabei wird die Beschaffungsphase zusammengefasst und die Produktionsphase aufgeschlüsselt. Eine Detaillierung ist in Anhang H zu finden.

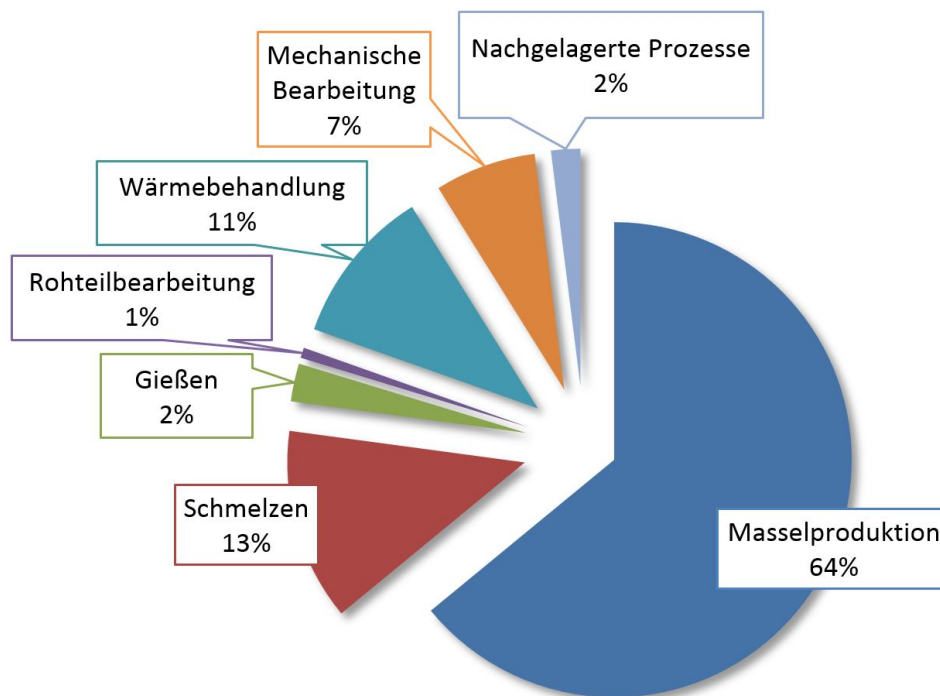


Abbildung 3-4: CO₂-Footprint eines Aluminium-Radträgers aus Beschaffungsphase (Masselproduktion) und aufgeschlüsselter Produktionsphase

Innerhalb der untersuchten Prozessschritte sind 79 % der Emissionen primär durch das Bauteilgewicht beeinflusst, aber nur 21 % primär durch den Prozess. Folgende Aufschlüsselung kann dabei angenommen werden:

- primär gewichtsbeeinflusst: 79 %
→ Masselproduktion, Schmelzen, Gießen
- primär prozessbeeinflusst: 21 %
→ Wärmebehandlung, mech. Bearbeitung, nachgelagerte Prozesse, Rohteilbearbeitung

Unter der Annahme, dass zum Ende des Lebenszyklus das Aluminium in den Sekundärmarkt überführt wird und dadurch der Abbau von Bauxit mit den nachgeschalteten Prozessen zur Aluminiumgewinnung eingespart werden kann, ist eine Recyclinggutschrift in Höhe von 8,7 kg CO₂e/Stk. zu gewähren. Diese errechnet sich als Differenz aus den Emissionen der Neubeschaffung des Recyclingmaterials, welches aus dem Gewicht von Fertigteil und Späne gebildet wird, und der Gesamtemissionen durch das Recyclingverfahren. Die aus der Neubeschaffung resultierenden Emissionen werden dabei im Sinne der Vergleichbarkeit zur Beschaffung des Primärmaterials um den Anteil des Umlaufmaterials reduziert, da ebenfalls in der Phase abgezogen wird. Unter Berücksichtigung der Recyclinggutschrift nimmt folglich der Herstellprozess einen höheren Stellenwert ein. Dieser ist damit verstärkt zu wichten.

Beschränkt man sich folglich bei der Betrachtung auf die Produktionsphase, wie in Abbildung 3-5, dann verursachen Schmelzen und Wärmebehandlung gut zwei Drittel der Emissionen. Untereinander ist ihr Beitrag etwa gleichrangig. An dritter Stelle liegt mit 19 % die mechanische Bearbeitung. Da dieser Beitrag insbesondere von der Anzahl der zu bearbeitenden Bereiche und deren Spanvolumen sowie dem Wirkungsgrad des eingesetzten Maschinenparks abhängig ist, fällt die Beeinflussbarkeit bei gegebener Bauteilkinematik vergleichsweise gering aus. Es kann allerdings darauf geachtet werden, die Bearbeitungszugaben so gering wie möglich zu halten und effiziente Maschinen einzusetzen.

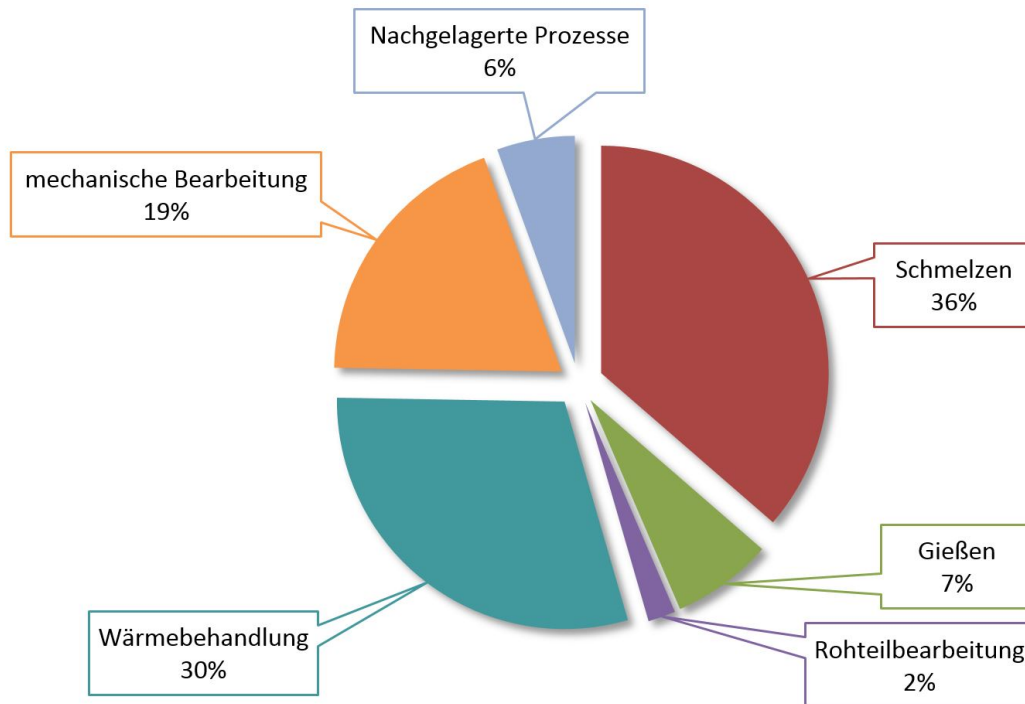


Abbildung 3-5: CO₂-Footprint der Produktionsphase eines Aluminium-Radträgers

Folglich fällt die Betrachtung auf das Schmelzen und die Wärmebehandlung zurück. Der Energiebedarf des Schmelzvorgangs ist insbesondere durch das spätere Gießgewicht beeinflussbar. Jedes Gramm, das nicht erschmolzen werden muss, ist gleichbedeutend mit einer Emissions-Vermeidung. Schwerpunkt bildet hierbei die Vermeidung von Material an der Fertigteil-Geometrie, da diese die Nutzungsphase durchläuft und hierbei auch einen Einfluss auf die dort anfallenden Emissionen hat. Daneben gilt es, die Dimensionierung von Anguss- und Speisersystem zu minimieren und Abbrandverluste zu reduzieren. Diese Betrachtung lässt sich unmittelbar auch auf die Produktionsphase des Primäraluminiums übertragen. Auch hier bedeutet jedes vermiedene Gramm Material eine Reduzierung von Emissionen. Einen wesentlichen Beitrag zur Senkung des CO₂-Impacts stellt also der Leichtbau dar.

Betrachtet man die Wärmebehandlung, spielt auch hier das Bauteilgewicht eine wichtige Rolle. Nicht vorhandenes Material muss nicht erwärmt werden und spart Energie. Berücksichtigt man im Weiteren die vielfach historisch gewachsenen Wärmebehandlungsrezepturen, die häufig durch lange Haltezeiten charakterisiert sind, sowie die in Abschnitt 2.4 erläuterten physikalischen Vorgänge bei der Wärmebehandlung, ist mit der Wahl einer geeigneten Zeit-Temperatur-Folge ein

weiterer Optimierungsansatz identifiziert. Hierbei ist neben den statischen Kennwerten vor allem das dynamische Verhalten von Interesse.

Zusammenfassend stehen folgende Optimierungsansätze im Fokus der weiteren Betrachtung:

- Leichtbau → Reduzierung des Materialeinsatzes
- Wärmebehandlung → Optimierung der Zeit-Temperatur-Folge

4. Optimierung ausgewählter Prozessparameter

Unter ökologischen Aspekten sind insbesondere die Faktoren Bauteilgewicht und Energieeinsatz im Herstellprozess treibende Größen, die es zu optimieren gilt. Durch Materialersparnis kann über den gesamten Produktlebenszyklus Energie eingespart werden. Unter Beibehaltung gegebener Prozess- und Nutzungsparameter sinkt der Energieaufwand. So muss weniger Einsatzmaterial erschmolzen, während der Wärmebehandlung weniger Material erwärmt und in der Nutzungsphase weniger Gewicht bewegt werden, um nur einige Abschnitte im Laufe des Bauteillebens zu nennen. Darüber hinaus können weitere Potenziale im Fertigungsprozess durch Parameteroptimierung gehoben werden.

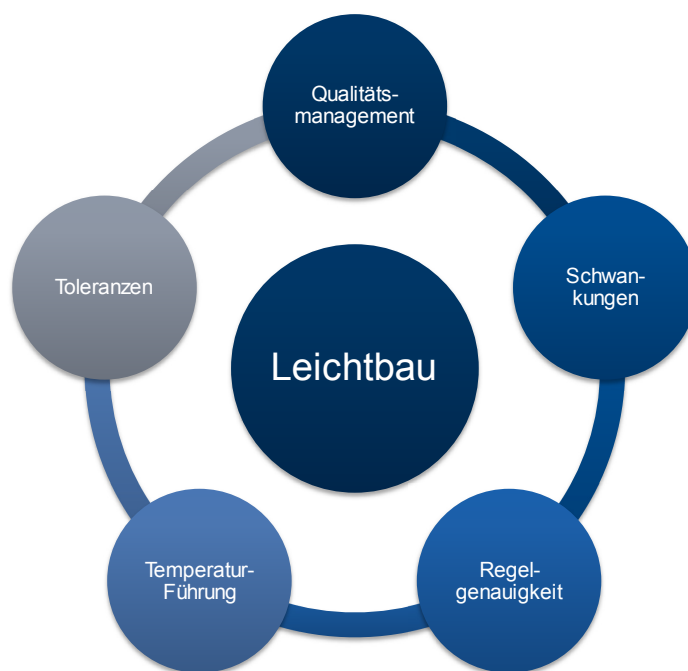


Abbildung 4-1: Auswahl wichtiger prozessbedingter Einflussfaktoren auf den Leichtbau gegossener Aluminium-Komponenten

Bei der Auslegung der Bauteilgeometrie gilt es, das Material so geschickt anzuordnen, dass festigkeitsbedingte Querschnitte mit den fertigungsbedingten Querschnitten korrelieren. Während das Gewicht grundsätzlich, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, durch topologieoptimierte Konstruktionen, die vielfältige Fertigungsrestriktionen berücksichtigen, gesenkt werden kann, beschränken gießtechnische Gegebenheiten wie das Fließvermögen der eingesetzten Schmelze

dabei allerdings häufig minimal gießbare Wandstärken. In der Folge sind prozessbedingte Materialzugaben erforderlich. Einerseits sind dies vergrößerte Querschnitte zur Erzielung einer gerichteten Erstarrung und damit der Vermeidung von Ungängen, andererseits aber auch erhöhte Entformungsschrägen oder erhöhte Wanddicken, die dem Fließvermögen der Schmelze Rechnung tragen. So kann das vollständige Leichtbau-Potenzial nicht ausgeschöpft werden. Abbildung 4-1 veranschaulicht dies in Form einer Übersicht. Daneben ist zu berücksichtigen, dass Legierungen mit herausragenden Festigkeitseigenschaften häufig keine guten Fließ- und Erstarrungseigenschaften mit sich bringen. Während beispielsweise im Bereich der AlSi-Legierungen naheutektische Legierungen gute gießtechnische Eigenschaften durch das kleine Erstarrungsintervall aufweisen, sind niedriglegierte Legierungen mit großem Erstarrungsintervall schlechter gießbar, weisen dabei allerdings bessere Festigkeitseigenschaften auf.

Um die prozessbedingten Grenzen zu verschieben, gibt es vielfältige Ansätze und Möglichkeiten. Einerseits können höherwertige Gießverfahren, wie das Niederdruck-, oder Gegendruckgießen zum Einsatz kommen. Andererseits werden gut gießbare Legierungen mit gleichzeitig hervorragenden mechanischen Eigenschaften entwickelt, wie beispielsweise die Tensal[®]-Legierung von KSM [203]. Auch wird der Kokillentemperierung und dem Schlichtesystem Aufmerksamkeit zur Optimierung und Unterstützung gerichteter Erstarrung geschenkt.

Vielfältig werden viele dieser Maßnahmen und Möglichkeiten ausgereizt. Dabei wird der Bereich der Einflussnahme durch die Oberflächenstrukturierung bisher stark vernachlässigt. Zwar finden raue Schichten Einsatz, die das Ziel haben, die Oxidhaut an der Schmelzefront kontinuierlich aufzureißen. Auch werden erfahrungsbasiert in kaltlaufgefährdeten Bereichen sogenannte Waffelmuster eingesetzt. Das Potenzial scheint hier aber bisher nicht ausgereizt zu sein.

Wie aus der LifeCycle-Analyse in Kapitel 3.2 hervorgeht, ist der energieintensive Wärmebehandlungsprozess ein weiterer Faktor, der nachhaltige und ökologische Leichtbauziele schwächt. Bestehende Wärmebehandlungsrezepturen existieren häufig seit vielen Jahren und werden von Produkt zu Produkt vererbt bzw. können aufgrund der parallelen Fertigung bereits freigegebener und neu anlaufender

Produkte nicht verändert werden. Dies verursacht einerseits erhöhte Energieverbräuche und -kosten. Andererseits reduziert dies die Anlagenkapazität. Folglich gilt es, die verborgenen Potenziale zu heben.

Nachfolgend wird dargestellt, wie abweichend zum Stand der Technik durch Optimierung von Fließ- und Formfüllvermögen sowie der Wärmebehandlung nachhaltiger und ökologischer Leichtbau betrieben werden kann. Weiterhin wird betrachtet, welche Auswirkungen dabei auf das dynamische Bauteilverhalten zu verzeichnen sind, da diese Betrachtungen bisher nicht durchgeführt worden sind.

4.1 Reduzierung des Materialeinsatzes durch Dünnwand-Guss

Unter Großserienbedingungen schränken Fertigungsrestriktionen im Schwerkraftkokillenguss häufig das Leichtbaupotenzial dünnwandiger Gussteile ein. Eine prozesssichere Fertigung ist heute im Wesentlichen nur bei Wandstärken von mehr als 5 mm aufgrund des begrenzten Fließ- und Formfüllvermögens der eingesetzten technischen Legierungen möglich. Der Einsatz naheutektischer Legierungen mit geringem Erstarrungsintervall und damit guten Fließigenschaften ist eine Möglichkeit, dem Ziel näher zu kommen. Beispielsweise sei hier auf den in Abschnitt 1.3.1, Abbildung 1-7 vorgestellten Vorderachs-Hilfsrahmen verwiesen, welcher aus der AlSi11 gefertigt wird. Auch unterstützen stark isolierende Schlichtekonzepte die Verbesserung der Fließfähigkeit. Sind allerdings all diese Schritte bereits umgesetzt, gilt es, weitere Maßnahmen zu identifizieren, um die nächste Evolutionsstufe im Leichtbau von Aluminium-Komponenten einzuläuten.

4.1.1 Voruntersuchung zur Reduzierung von Wandstärken

Von Interesse ist dabei zunächst die Frage, ob es im dynamischen Verhalten einen Wandstärkeneinfluss gibt, da entsprechende Untersuchungen für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kombination aus Fahrwerk-Komponente, Verfahren und Legierung bisher nicht erfolgt sind. Dazu wurden Untersuchungen mit und ohne Korrosionseinfluss an Umlaufbiegeproben nach DIN 50113 [204] durchgeführt, die

unterschiedliche Querschnitte von 2,5 mm bis 6 mm aufweisen. Dabei wird gemäß Formel 4-1 jeweils im Untersuchungsquerschnitt wandstärkenbereinigt durch Variation des Biegemomentes eine Spannung σ dem jeweiligen Lasthorizont entsprechend aufgegeben.

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

M ...Biegemoment

Formel 4-1

W ... Widerstandsmoment

Die Proben sind dabei aus im CPC-Verfahren gegossener Bauteile der Legierung AlSi7Mg0,3 entnommen worden, da hier ein nahezu porenfreies Gefüge vorliegt. Um eine direkte Korrelation zum Bauteil zu haben wurde auf separat gegossene Probestäbe verzichtet. Um Ergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich der Wöhlerkurve zu erzielen, werden Lasthorizonte zwischen 120 MPa und 230 MPa gewählt. Je Lasthorizont werden dabei drei Proben untersucht. Für die Querschnitte 3 mm bis 6 mm werden jeweils fünf Lasthorizonte betrachtet, für den Querschnitt 2,5 mm derer vier.

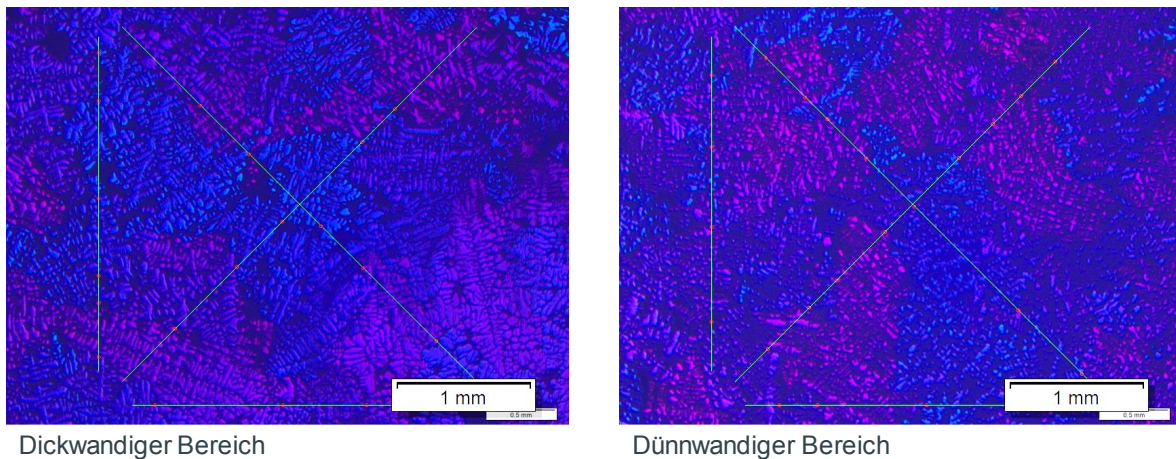


Abbildung 4-2: Vergleich der Korngrößen dick- (links, 597 μm) und dünnwandigen (rechts, 545 μm) Gefüges, Linienschnittverfahren nach ASTM E112, Ätzung nach Barker, Legierung AlSi7Mg, CPC gegossen

Da im Realbauteil dünnwandige Querschnitte typischerweise durch höhere Erstarrungsgeschwindigkeiten und damit einhergehend geringeren Korngrößen

gekennzeichnet sind, wurden Untersuchungen im Probenentnahmebereich und einem im Vergleich dünnwandigeren Bereich durchgeführt. Hierzu wurde das Linienschnittverfahren nach Heyn gemäß ASTM E112 [205] unter Nutzung des Linienkreuzes zur Analyse verwendet. Abbildung 4-2 zeigt exemplarisch nach Barker geätzte Gefügebereiche mit eingeblendetem Linienkreuz für dick- und dünnwandige Bereiche. Für den dünnwandigen Bereich ergibt sich ein Mittelwert von 534,1 μm , für den dickwandigeren Bereich ein Mittelwert von 571,5 μm . Die Differenz beträgt damit etwa 6 %. Für die Umlaufbiegeuntersuchungen wird diese Abweichungen toleriert.

Die Proben, wie in Abbildung 4-3 exemplarisch für den Querschnitt 3 mm dargestellt, wurden folglich aus jeweils dem gleichen Bereich des Bauteils entnommen, vorgabegemäß hergestellt und geprüft.

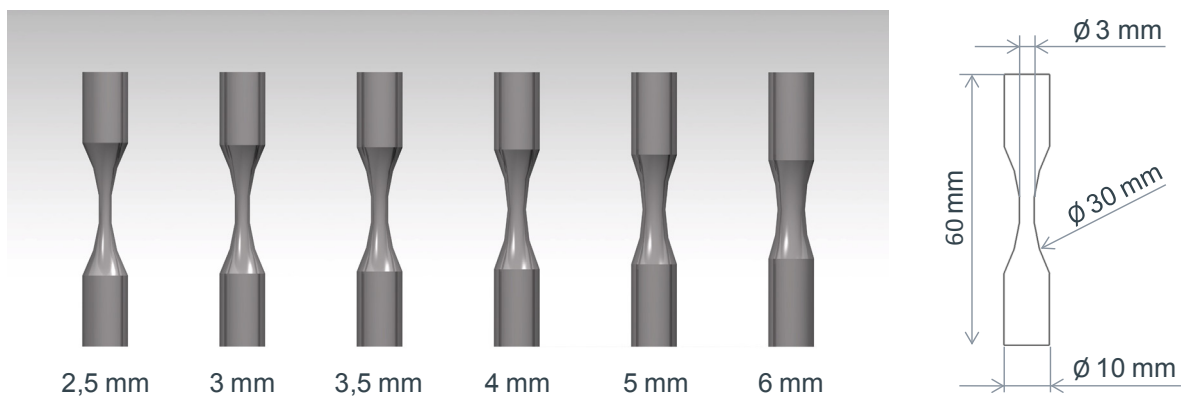


Abbildung 4-3: Umlaufbiegeprobe nach DIN 50113 [204], CAD-Darstellung der einzelnen Probengeometrien (links) und Bemaßung (rechts) am Beispiel für einen Prüfquerschnitt von 3 mm

Tabelle 4-1 zeigt dabei die Mittelwerte der Ergebnisse für Versuche ohne Korrosionseinfluss, Tabelle 4-2 diejenigen mit Korrosionseinfluss. Erwartungsgemäß versagen Proben, die der Korrosion ausgesetzt sind, früher. Die Streuung ist insbesondere bei den Versuchen an Luft und für geringe Lasten sehr groß. Die Ergebnisse aus Untersuchungen in korrosiver Umgebung sind hingegen mit einer erwartungstreuen Standardabweichung von weniger als 0,2 vollständig vertrauenswürdig.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Umlaufbiegeversuche für die Legierung AlSi7Mg an Luft

an Luft		Last				
Prüfquerschnitt		230 Mpa	210 Mpa	180 Mpa	150 Mpa	120 Mpa
2,5 mm	Lastwechsel, MW	25.311	33.878	136.530	---	595.508
	StabW	0,19	0,25	0,13	---	0,73
3 mm	Lastwechsel, MW	23.919	25.973	60.578	221.079	1.251.674
	StabW	0,07	0,22	0,22	0,27	0,43
3,5 mm	Lastwechsel, MW	39.735	50.495	149.902	308.023	3.455.963
	StabW	0,10	0,16	0,03	0,14	0,28
4 mm	Lastwechsel, MW	69.070	98.857	308.876	520.043	1.788.034
	StabW	0,06	0,06	0,08	0,17	0,17
5 mm	Lastwechsel, MW	79.810	108.385	253.016	641.578	3.138.088
	StabW	0,08	0,06	0,16	0,16	0,52
6 mm	Lastwechsel, MW	56.430	66.163	291.177	975.003	1.368.836
	StabW	0,04	0,11	0,07	0,41	0,33

Während an Luft über alle Mittelwerte gesehen mit Faktor 124 eine sehr große Spreizung zu erkennen ist, fällt diese mit einem Faktor von 26,5 in korrosiver Umgebung um 78,6 % geringer aus.

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Umlaufbiegeversuche für die Legierung AlSi7Mg in korrosiver Umgebung (5%ige NaCl-Lösung)

Unter korrosiver Umgebung		Last				
Prüfquerschnitt		230 Mpa	210 Mpa	180 Mpa	150 Mpa	120 Mpa
2,5 mm	Lastwechsel, MW	13.295	20.655	27.614	---	102.855
	StabW	0,10	0,08	0,15	---	0,08
3 mm	Lastwechsel, MW	19.468	18.475	41.937	72.317	100.744
	StabW	0,14	0,13	0,19	0,07	0,19
3,5 mm	Lastwechsel, MW	25.018	21.599	29.061	72.806	151.209
	StabW	0,09	0,10	0,15	0,17	0,09
4 mm	Lastwechsel, MW	23.107	29.032	49.368	91.558	220.590
	StabW	0,05	0,08	0,07	0,03	0,14
5 mm	Lastwechsel, MW	34.721	46.140	99.879	139.231	303.603
	StabW	0,07	0,12	0,11	0,06	0,15
6 mm	Lastwechsel, MW	26.789	48.928	74.887	174.496	352.272
	StabW	0,13	0,06	0,10	0,09	0,20

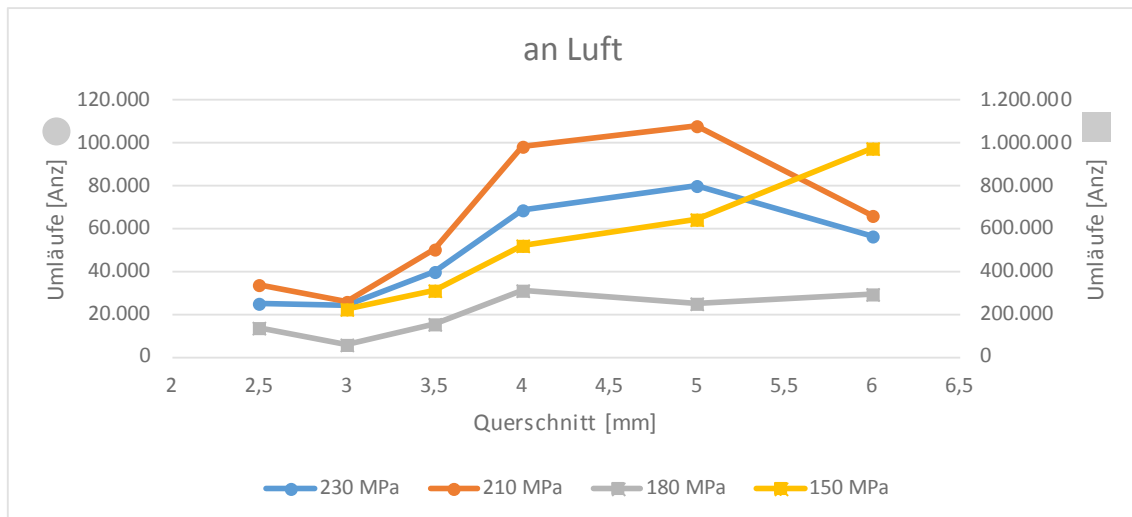


Abbildung 4-4: Wandstärkenabhängigkeit dynamischer Belastung der Legierung AISi7Mg, Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung an Luft für die Lasthorizonte 230 MPa und 210 MPa auf der Primär- sowie für 180 MPa und 150 MPa auf der Sekundärachse

Wie aus Abbildung 4-4 ersichtlich, ist unterhalb von vier Millimetern ein deutlicher Abfall der erreichbaren Umläufe zu beobachten. Dies bedeutet, dass die Versagensgeschwindigkeit des Querschnittes für diese Belastungsart (Zug-/Druckschwellend) zunimmt und ein spröderes Verhalten vorliegt.

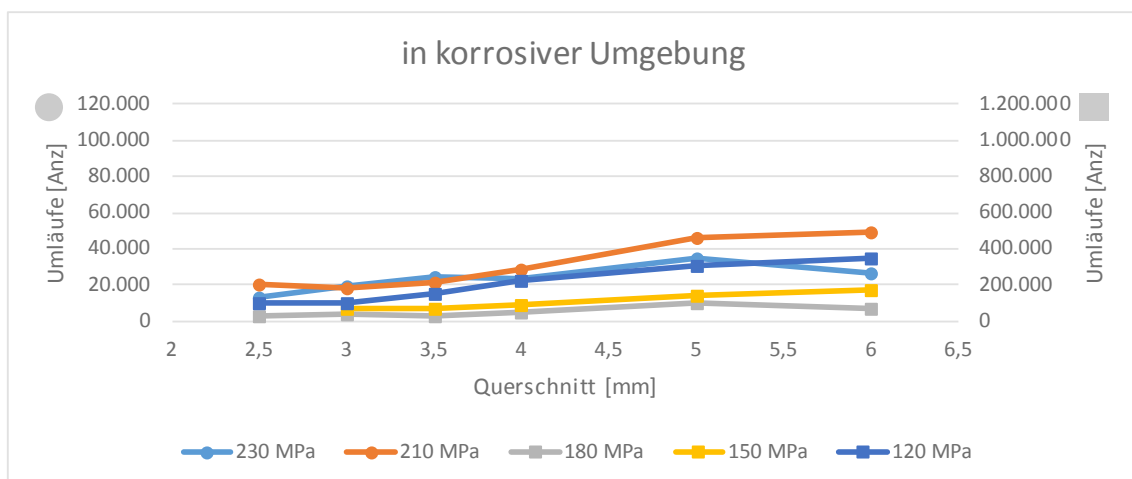
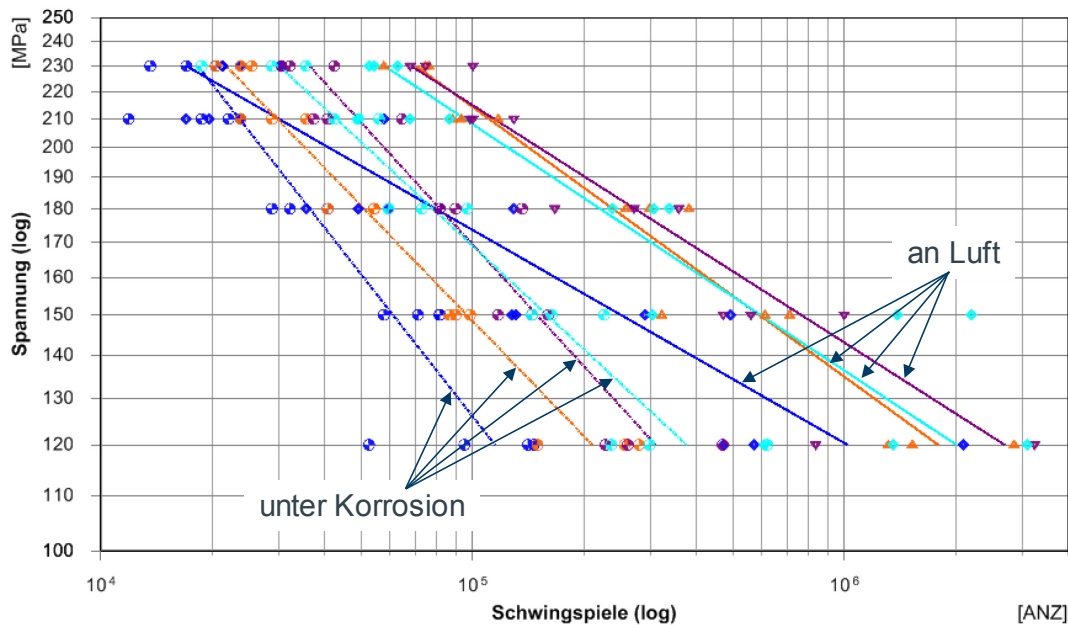


Abbildung 4-5: Wandstärkenabhängigkeit dynamischer Belastung der Legierung AISi7Mg, Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung in korrosiver Umgebung für die Lasthorizonte 230 MPa und 210 MPa auf der Primär- sowie für 180 MPa, 150 MPa und 150 MPa auf der Sekundärachse

Dieses Phänomen ist unter korrosiver Belastung ebenfalls erkennbar, wenn auch weniger signifikant ausgeprägt. Der Abfall beginnt, wie in Abbildung 4-5 erkennbar, bereits bei vier Millimetern und bleibt dann weitgehend konstant.

Betrachtet man die Wöhlerneigung der Untersuchungen im Zeitfestigkeitsbereich für die vier Kurven 3 mm, 4 mm, 5 mm und 6 mm analog der in Kapitel 5 ausführlich vorgestellten Systematik, erkennt man für an Luft geprüfte Bauteile eine Neigung von 5 bis 6,3. Die in Abbildung 4-6 dargestellten Wöhlerlinien liegen für 4 mm, 5 mm und 6 mm dicht beieinander. Für 3 mm ist ein deutlicher Abfall erkennbar. Die Streuung ist dabei sehr hoch.



Wertefeld

	◆ —	▲ —	▼ —	◆ —	⊕ ····	⊕ ····	⊕ ····	⊕ ····
	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	3 mm (NaCl)	4 mm (NaCl)	5 mm (NaCl)	6 mm (NaCl)
Anzahl Werte	20	15	15	15	20	15	15	15
Neigung (ZF), LinReg	6,3	4,97	5,65	5,44	2,83	3,49	3,3	3,88
Erw.treue StdAbw. (slog.n, exakt)	0,287	0,132	0,258	0,288	0,166	0,081	0,115	0,131

Abbildung 4-6: Wöhlerkurve für die Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung an Luft (durchgezogene Linie) und in korrosiver Umgebung (gestrichelte Linie) für die Legierung AlSi7Mg

Unter Korrosion erhält man mit 2,8 bis 3,9 um etwa 40% abweichende Steigungen bei deutlich niedrigerer Streuung. Während hier die Proben mit einem Querschnitt von 5 mm und 6mm noch vergleichbare Ergebnisse liefern, ist für 4 mm bereits ein deutlicher Abfall zu verzeichnen, der sich zu 3 mm hin fortsetzt.

Damit ist festzuhalten, dass bei hochdynamischer, wechselnder Zug- oder Torsionsbelastung Wandstärken kleiner vier Millimeter vermieden werden sollten. Steifigkeitsgetriebene Bauteile, wie z.B. Hilfsrahmen, fallen in großen Teilen ihres Designs allerdings nicht unter diese Restriktion. Hier kann insbesondere aufgrund einer Abflachung der Wandstärkenabhängigkeit zu kleinen Wandstärken hin versucht werden, minimale Querschnitte umzusetzen.

4.1.2 Leichtbau durch strukturierte Werkzeugoberflächen

Kann aufgrund von Bauteil-Geometrie und Festigkeitsanforderungen der Druckguss nicht als Herstellverfahren für dünnwandige Komponenten zum Einsatz kommen, gilt es, den Schwerkraftguss und verwandte Verfahren einzusetzen.

Der Fokus bisheriger Untersuchungen zur Herstellung dünnwandiger Geometrien im Schwerkraft-Kokillenguss beschränkt sich auf dem Einfluss gießtechnologischer Eigenschaften wie dem Fließ- und Formfüllungsvermögen von nah- und untereutektischen AlSiMg-Legierungen in Abhängigkeit von Kokillen- und Schmelztemperatur. [206] Auch bilden Untersuchungen zum Einfluss von Legierungsbestandteilen [207, 208] oder Kornfeinung und Veredelung [209], aber auch der Kokillenbeschichtung und -atmosphäre [210] Schwerpunkte. Als Einflussfaktoren auf die Fließfähigkeit technischer Schmelzen sind folglich neben der Zusammensetzung insbesondere Überhitzung, Kornfeinung, Schmelzequalität (Oxidgehalt) und Art der verwendeten Kokillenschichte zu nennen. [211, 212]

In vielen steifigkeitsrelevanten Bereichen heutiger Fahrwerks-Komponenten wird oft prozessbedingt mehr Material eingesetzt, als es strukturmechanisch erforderlich ist. Dadurch wird das Leichtbaupotenzial der eingesetzten Aluminiumgusswerkstoffe nicht vollständig ausgenutzt. Die Umsetzung geringer Wandstärken im Schwerkraft-

Kokillenguss kann die nächste Evolutionsstufe insbesondere steifigkeitsgetriebener Aluminiumgussbauteile einläuten. Hierfür sind Technologieinnovation im Bereich der Gießtechnik erforderlich, die es ermöglichen, heutige prozessbedingte Grenzen zu verschieben. Für flächige Bereiche liegt diese Grenze unter Großserienbedingungen bei etwa 5 mm. Dabei finden bereits naheutektische Legierungen, wie die AlSi11Mg mit guten Fließ- und Formfülleigenschaften, aber auch weitere Hilfsmittel, wie isolierende Schichten, eine gezielte Formtemperierung oder Oberflächenstrukturierungen wie „Waffelmuster“ oder „Krähenfüße“ Einsatz. Diese häufig erfahrungsbasiert aufgebrachten Fließhilfen sind schematisch in Abbildung 4-7 veranschaulicht. Der positive Einfluss des Einsatzes von „Waffelmustern“ und weiteren Strukturen konnte dabei ausgehend von Untersuchungen an einer modularen Versuchskokille gemäß Abbildung 4-9 bereits belegt werden. [213, 48]

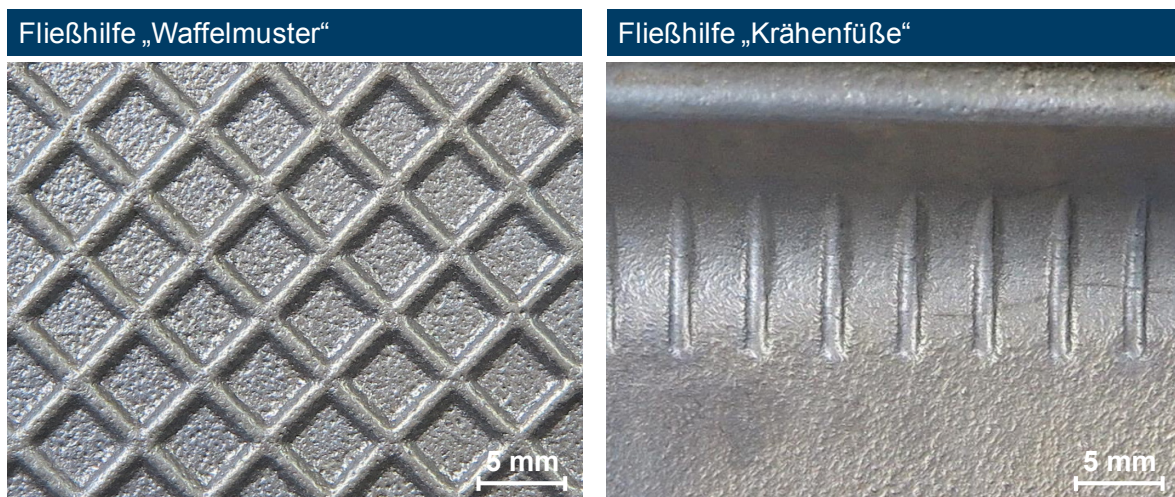


Abbildung 4-7: „Waffelmuster“ und „Krähenfüße“ als Gießhilfe, Darstellung des Gussteils

Neuartige Strukturen, die in Form und Topologie von den bekannten Strukturen abweichen, wurden hingegen bisher nicht untersucht. Daher entstand die Idee, neuartige Strukturen zu entwickeln und umfangreiche gießtechnische Analysen zu den Auswirkungen auf einerseits das Formfüllverhalten und andererseits der Bauteilauslegung durchzuführen. Für die Strukturdefinition ist zunächst der Begriff der Elementarzelle geprägt worden. Dieser Elementarzelle ist durch wiederkehrende Merkmale einer gegenüber der Gießfläche vertieften bzw. erhöhten dreidimensionalen Struktur definiert. Die in der Kokille zumindest abschnittsweise

eingebraachte Oberflächenstrukturierung wird durch wiederholtes kippen, verschieben, drehen oder spiegeln der Elementarzelle ausgebildet, sodass ein Muster entsteht. Dieses Muster kann durch die Oberflächenkrümmung der Kavität verzerrt sein. [214] Abbildung 4-8 verdeutlicht schematisch die Definition. Die „Waffelmuster“-Struktur setzt sich beispielsweise über die Elementarzelle kontinuierlich fort. Strukturen können auch in ihr beginnen und enden.

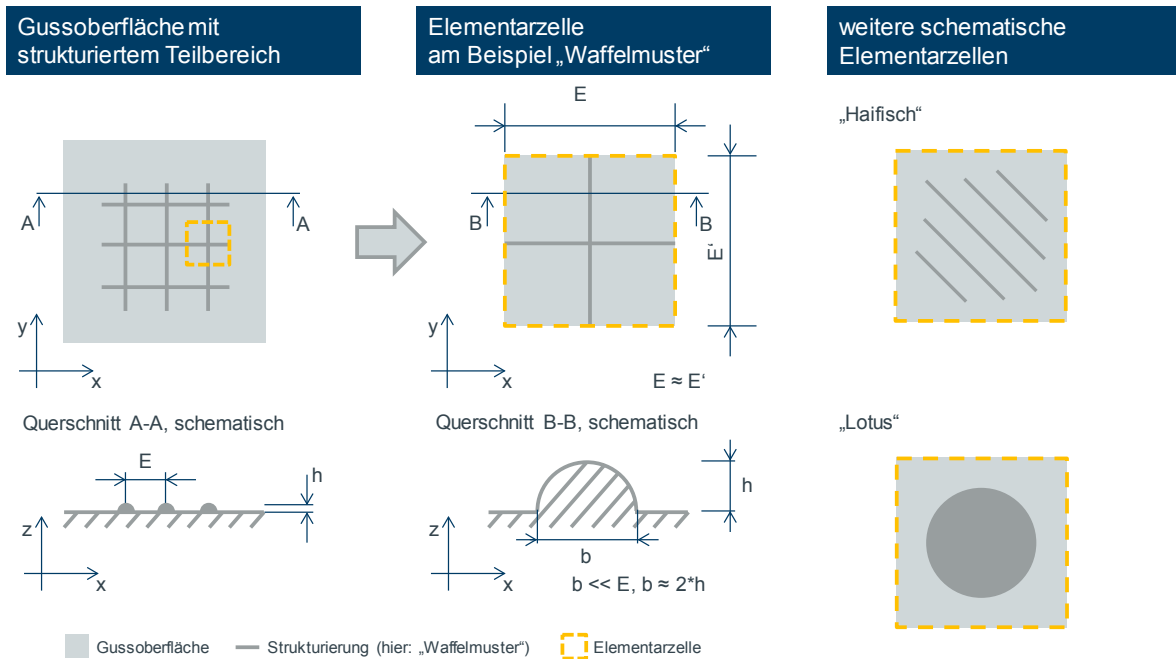


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Elementarzelle

Aufgrund der Komplexität des Themas sind weitere Dissertationen entstanden, die sich mit der Potenzialfindung befassen. Während Herr Gierth sich im Rahmen seiner Dissertation mit der Identifikation und Wirksamkeit geeigneter Oberflächenstrukturen befasst [215] und Herr Knorr die zu Grunde liegenden Mechanismen genauer untersucht, erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Übertragung der Strukturen auf das Serienwerkzeug sowie die Untersuchung des Struktureinflusses auf das Bauteil. Dabei gilt es, neue konstruktive Regeln abzuleiten, die eine Adaption identifizierter, optimaler Strukturen unter Realbedingungen ermöglichen.

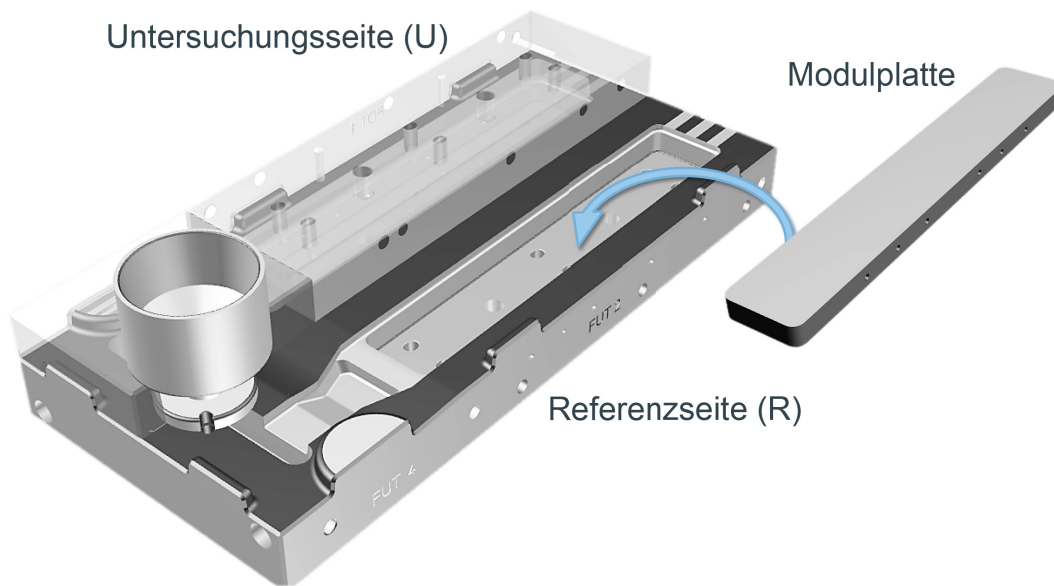


Abbildung 4-9: modulare Versuchskokille, CAD-Darstellung mit Kennzeichnung von Untersuchungsseite (U) und Referenzseite (R); Transparent: Formoberteil der Untersuchungsseite, Modulplatte als Einsatz für beide Seiten des Formober- und Formunterteils

Aus Abbildung 4-10 ist ersichtlich, dass gegenüber der glattwandigen Kokillenoberfläche (Struktur A) durch Verwendung des „Waffelmusters“ (Struktur B) sowohl in geschichteter als auch ungeschichteter Versuchskokille eine erhöhte Fließfähigkeit der Schmelze gegeben ist, was sich in einer Steigerung der Formfülllänge, also der Fließlänge, bei der die Kokillengeometrie vollständig abgebildet ist, zeigt. Daneben zeigen die fließrichtungsunabhängige Struktur F, die der Lotusstruktur nachempfunden ist, als auch die fließrichtungsgebundene Struktur K, welche die Haifischhaut nachahmt, signifikante Vorteile gegenüber dem Waffelmuster. Folglich werden diese Strukturen zur Übertragung auf das Realbauteil empfohlen.

Betrachtet man das wandstärkenabhängige Formfüllverhalten strukturierter Werkzeugoberflächen im Vergleich zu einer glatten Kokillenoberfläche ist, wie aus Abbildung 4-11 hervorgeht, eine andere Neigung ausweisbar. Das Waffelmuster hat ab etwa 5 mm Wandstärke Vorteile gegenüber der glattwandigen Kokille. Bei Einsatz der innovativen Oberflächenstruktur K findet eine nahezu Parallelverschiebung hin zu

höheren Formfülllängen statt. Oberhalb 3 mm Wandstärke hat hier Struktur K einen Vorteil. Dieser Vorteil kann genutzt werden, um zur Reduzierung der Bauteil-Wandstärke beizutragen, da die erforderliche Fließlänge im betrachteten Bauteil gleichbleibt. [48]

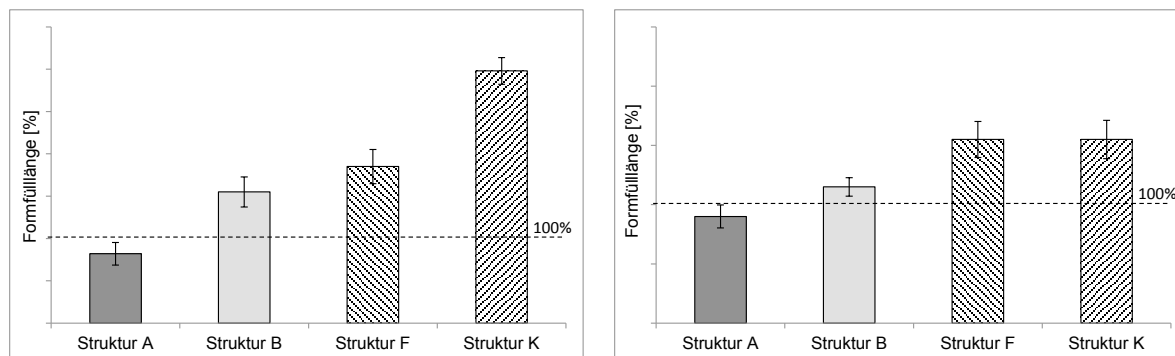


Abbildung 4-10: Formfülllänge [%] in Abhängigkeit von der Strukturierung, ohne (links) und mit (rechts) Verwendung hochisolierender Schichte [48]

Um die identifizierten Oberflächenstrukturen auf die zur Erzeugung des Bauteils erforderliche Kokille übertragen zu können, gilt es, vielfältige Aspekte zu berücksichtigen. Neben der gewünschten Zielwandstärke gehören das Verhalten unter dynamischer Belastung als auch in korrosiver Umgebung zu den wichtigsten Kriterien bei der Auswahl geeigneter Strukturen. Auch ist zu beachten, dass strukturierte Flächen nur soweit erzeugt werden, wie keine Hinterschnitte bei der Entformung entstehen.

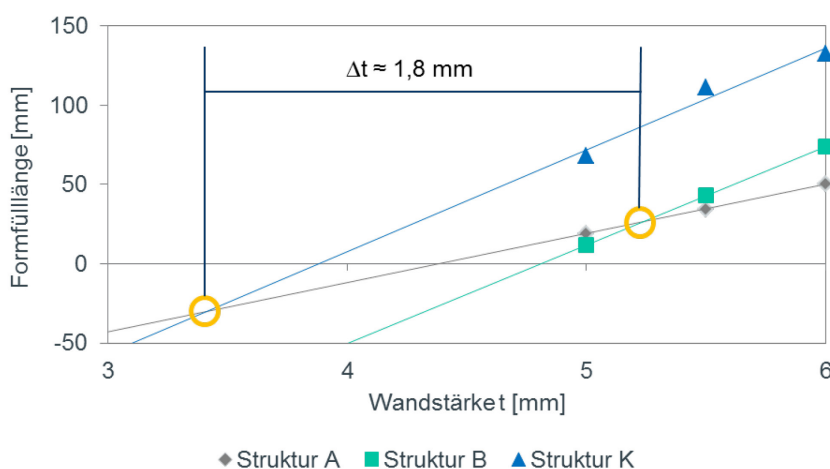


Abbildung 4-11: Formfülllänge [%] in Abhängigkeit von Strukturierung und Wandstärke, Untersuchung in schlichtefreier Kokille [48]

Um dem dynamischen Bauteilverhalten Rechnung zu tragen, gilt es, die Oberflächenstrukturen so auszulegen, dass eine Kerbwirkung sowie die Ansammlung lokaler Spannungen vermieden wird. Insbesondere eine nachgelagerte mechanische Bearbeitung des Bauteils ist zu berücksichtigen, da hier durch Materialentfernung für das Bauteilverhalten ungünstige Geometrien entstehen können.

Es lassen sich folgende Konstruktionsregeln festhalten [48]:

1. Scharfkantige Geometrien sind zu vermeiden. Diese sind kerbwirkend und können bei ungünstiger Lage die Lebensdauer des Bauteils reduzieren.
2. Strukturen sind gegenüber dem konstruktionsseitig vorgesehenen Mindestquerschnitt erhaben auszuführen. Eine Querschnittsschwächung über den gesamten Geometriebereich durch Einsatz einer Strukturierung muss vermieden werden.
3. Ein harmonischer Auslauf der Struktur zu Bereichen, die später mechanisch bearbeitet werden, ist zu gewährleisten. Dabei endet die Struktur außerhalb des Bereiches der späteren Bearbeitung.
4. Der Einlauf in Rippenbereiche ist mit einem weichen, abgerundeten Übergang zu versehen. Dies kann durch einen großen Radius im Rippengrund, durch eine Abflachung der Struktur zur Rippe hin oder durch frühzeitigen Auslauf der Struktur erfolgen. (Grat- und Kerbwirkung)
5. Der Auslauf der Strukturierung zu Kantenbereichen ist vor deren Ende in die Geometrie mit weichem Einlauf auszuführen.
6. Bei Einsatz von Oberflächenstrukturen dürfen keine Hinterschnitte entstehen. Hierdurch kann bei der Entformung das Bauteil beschädigt werden.
7. Die strukturbedingte Oberflächenvergrößerung ist bei der Bauteilauslegung zu beachten, da bei erheblicher Oberflächenvergrößerung das korrosive Verhalten beeinflusst werden kann.

In Abbildung 4-12 bis Abbildung 4-14 sind diese Regeln am Beispiel des „Waffelmusters“ veranschaulicht.

	ungünstige Ausführung		günstige Ausführung	Beschreibung
Gusszustand		→		Im Bereich späterer mech. Bearbeitung ist die Oberflächenstrukturierung mit hinreichendem Abstand zu unterbrechen.
mech. Bearb.		→		Dadurch ist die Vermeidung undefinierter Schnittkonturen gewährleistet.
Detail		→		Diese können, wie im Detail zu erkennen, bei ungünstiger Ausführung eine kerbartige Wirkung haben. Diese gilt es zu vermeiden.

Abbildung 4-12: Konstruktionsrichtlinie – Vergleich günstiger und ungünstiger Ausführung der Oberflächenstrukturierung unter Berücksichtigung mechanischer Bearbeitung, Darstellung des Bauteils

	ungünstige Ausführung		günstige Ausführung	Beschreibung
Kantenauslauf		→		Bei der Umsetzung von Oberflächenstrukturen ist darauf zu achten, diese nicht bis in den Randbereich des Bauteils laufen zu lassen, da sich hier ungünstige, kerbartige Geometrien bilden können. Ein Auslaufen vor Beginn des Kantenradius ist vorteilhaft.
Rippeneinlauf		→		Beim Einlauf von Strukturen in Rippen ist darauf zu achten, den Rippengrund so zu verrunden, dass ein weicher Einlauf der Struktur gegeben ist. Ist dies nicht möglich, ist die Struktur abflachend auszuführen. Auch hier gilt es, kerbwirkende Bereiche zu vermeiden.

Abbildung 4-13: Konstruktionsrichtlinie – Vergleich günstiger und ungünstiger Ausführung der Oberflächenstrukturierung unter Berücksichtigung von Kantenaus- und Rippeneinlauf, Darstellung des Bauteils

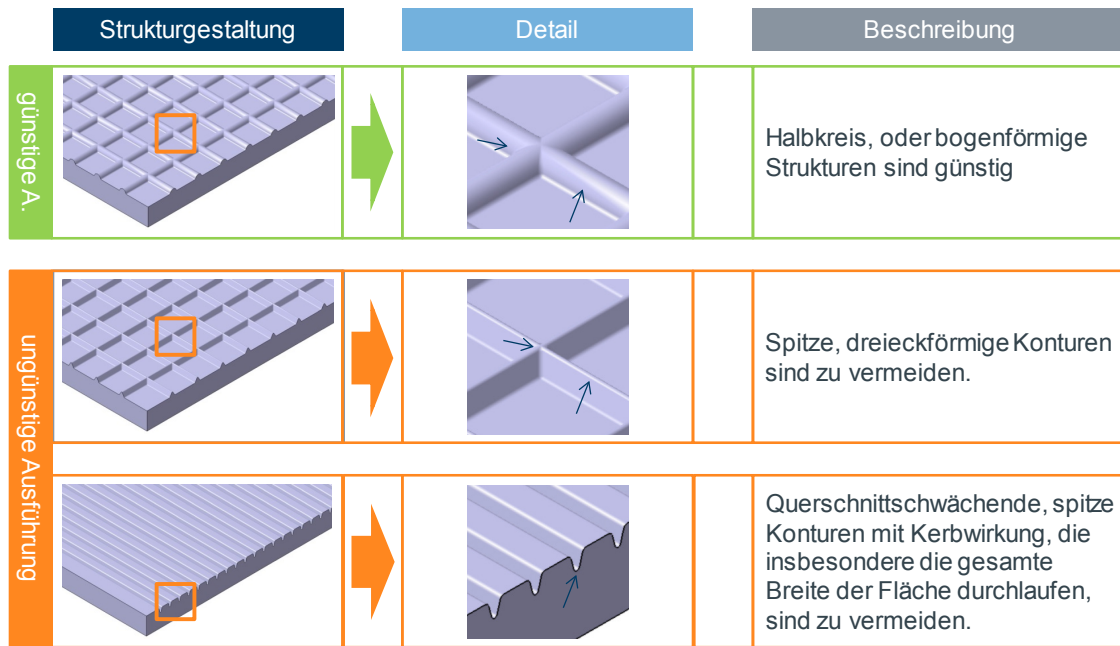


Abbildung 4-14: Konstruktionsrichtlinie – Vergleich günstiger und ungünstiger Ausführung der Oberflächenstrukturierung, Darstellung des Bauteils

Die Strukturen B, F und K berücksichtigen die strukturelevanten Regeln. Wie aus Tabelle 4-3 hervorgeht, ist die Oberflächenvergrößerung von Struktur K geringer, als beim Waffelmuster. Die von Struktur F höher. Obwohl kein negativer Einfluss unter Korrosion zu erwarten ist, wird der verstärkte Einsatz von Struktur K empfohlen.

Tabelle 4-3: Oberflächenvergrößerung durch Einsatz von Oberflächenstrukturierungen am Beispiel der Strukturen B, F und K gegenüber glattwandiger Oberfläche

Glatt	Struktur B (Waffelmuster)	Struktur F	Struktur K
0 %	22,3 %	32,9 %	16,7 %

Um die Wirksamkeit an einem konkreten Bauteil nachzuweisen, wurden die identifizierten Strukturen auf einen Hilfsrahmen überführt, dessen Basis der in Abschnitt 1.3.1 vorgestellte Vorderachs-Hilfsrahmen bildet. Weitere Anforderungen an dieses Dünnwand-Pendant sind neben der Fertigung unter Serienbedingungen die Übernahme bisheriger Prozessparameter wie beispielsweise Legierungszusammensetzung, Schmelztemperatur, oder Art der verwendeten

Kokillenschichte. Auch sollte der nachgeschaltete verkettete Fertigungsprozess durchlaufen werden, sodass Formteilung und Aussenkontur unverändert bleiben müssen. Damit ist das Produkt zum Serienprozess kompatibel und es kann ein direkter Vergleich zum Serienstand getroffen werden. Im Re-Design sind folglich nur großflächige, bisher prozessbedingt mit höherer Wandstärke ausgeführte Bereiche als strukturmechanisch erforderlich, konstruktiv abgeändert worden. Der Abgleich erfolgte mittels FEM-basierter Betriebslasten- und Lebensdauerrechnungen. Der Querschnitt dieser weitgehend senkrecht zur Formteilung stehenden ausgewählten Bereiche wurde dabei um 35 % auf 3,5 mm abgesenkt. Für den Hilfsrahmen kann gemäß Abbildung 4-15 ein Leichtbaupotenzial von 6 % gegenüber dem Serienstand ausgewiesen werden.

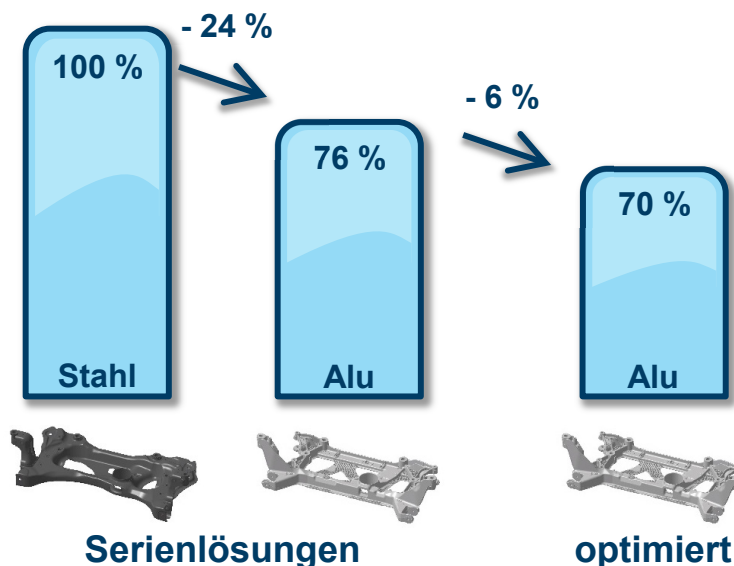


Abbildung 4-15: Gewichtsbilanz für den Hilfsrahmen im Vergleich zu den Serien-Lösungen

Neben den Konstruktionsregeln gilt es bei der Übertragung der Strukturen insbesondere für fließrichtungsgebundene Varianten erforderliche Bereiche und die zugehörigen Orientierungen zu identifizieren. Die Festlegung, ob lokal Struktur F oder K einsetzbar ist, erfolgt durch Unterstützung der Gießsimulation. Das Fließ- und Formfüllverhalten wird wie Abbildung 4-16 zeigt, einerseits über den Verlauf der Schmelzefront, die dabei erreichten Fließgeschwindigkeiten und Formtemperaturen sowie durch die Tracer-Teilchen zur Darstellung des Schmelzehistorie bewertet.

Bereiche, die kontinuierlich mit einer Vorzugsrichtung gefüllt werden, sind für fließrichtungsgebundene Strukturen wie Struktur K geeignet. Turbulent bzw. mit Richtungswechsel gefüllte Bereiche werden mit der fließrichtungsunabhängigen Struktur F versehen.

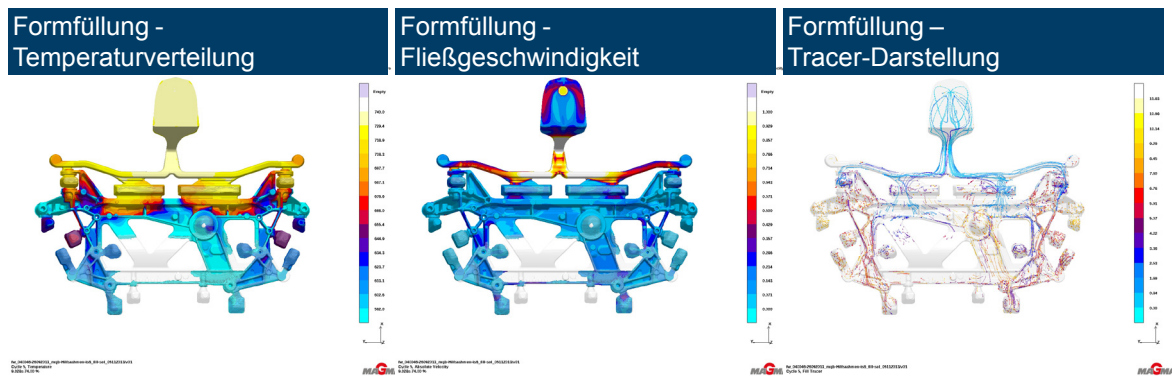


Abbildung 4-16: Gießsimulation eines Hilfsrahmens im Schwerkraft-Kokillenguss, Temperaturverteilung, Fließgeschwindigkeit und Schmelzehistorie als Faktoren zur Auswahl geeigneter Oberflächenstrukturierungen

Abbildung 4-17 zeigt das Ergebnis der Auswahl der strukturierten Bereiche. Insgesamt für Formober- und Formunterseite 66 Einzelbereiche ausgewählt. Von der gesamten strukturierten Fläche tragen etwa 80 % Struktur K, der Rest ist mit Struktur F versehen.

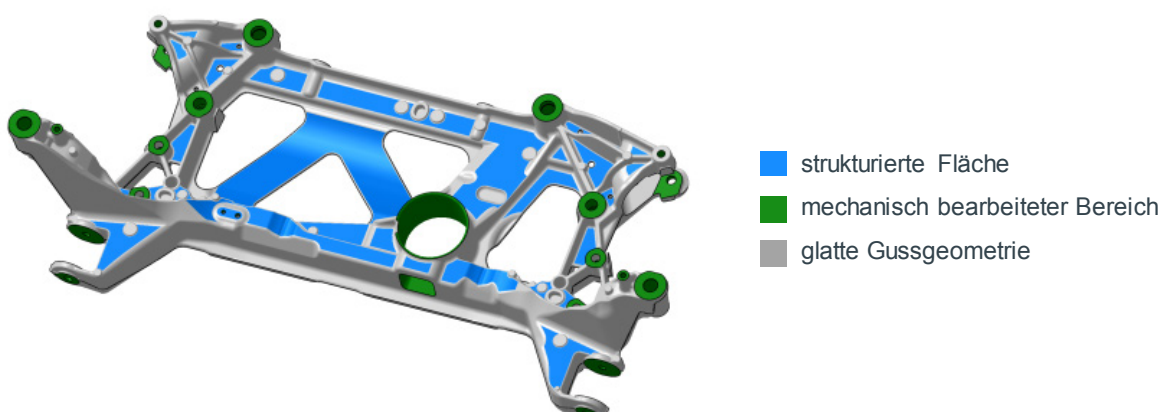


Abbildung 4-17: Darstellung der strukturierten Bereiche des Hilfsrahmens am Beispiel der Bauteiloberseite

Aufgrund der Komplexität der innovativen Oberflächenstrukturen F und K können klassische Fertigungsverfahren wie das Fräsen, welches bisher zur Erzeugung von Waffelmustern Einsatz fand, nicht verwendet werden. Das aus der Bearbeitung von Spitzgießwerkzeugen zur Herstellung von Narbentoptiken für den Interieurbereich bekannte Laserstrukturieren mittels 3D-Laserabtrag bietet die Lösung. Bei diesem auch als Lasernarben bezeichneten Fertigungsverfahren wird die im CAD erzeugte Zielstruktur in einer speziellen Software in ein Graustufenbild überführt. Der einzelnen Graustufe wird anschließend eine Abtragtiefe zugeordnet. Damit kann die Struktur mit hoher Abbildungsgenauigkeit hergestellt werden. Der maximale Abtrag erfolgt bei Schwarz. Weiße Bereiche werden nicht abgetragen. Eine Übersicht des Verfahrens ist unter [216] zu finden.

Durch die umfangreichen Möglichkeiten des Software-seitigen Design-Prozesses für Lasernarben können die Konstruktionsregeln berücksichtigt werden. Homogene, weiche Strukturverläufe sind gewährleistet und kerbwirksame Bereiche werden vermieden. Abbildung 4-18 stellt die innovativen Strukturen am gefertigten Gussteil dar.

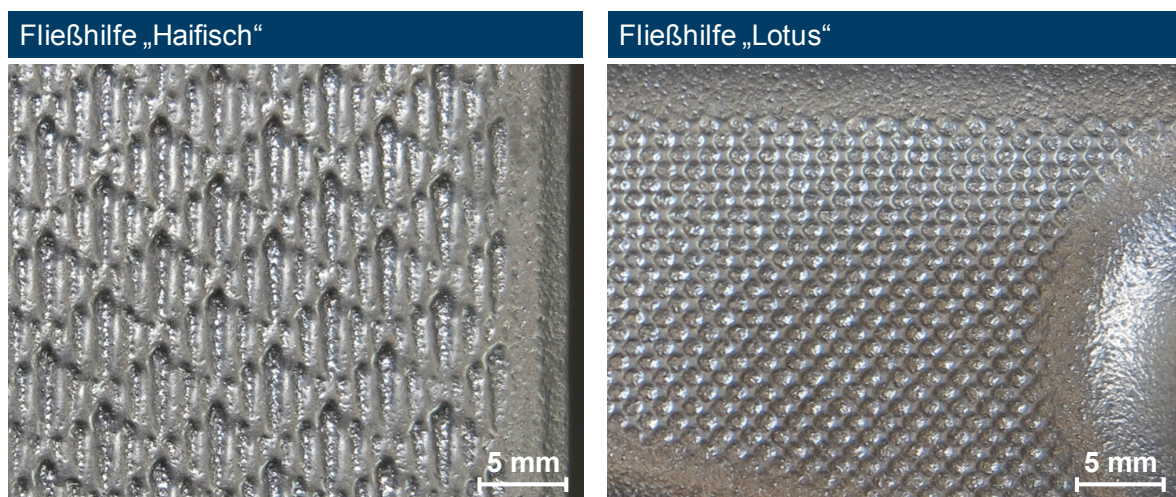


Abbildung 4-18: „Haifisch“ und „Lotus“ als innovative Gießhilfen, Darstellung des Gussteils

Die Gießversuche fanden unter Serienbedingungen auf einem Rundtisch mit mehreren Gießmaschinen statt. Die Kokille mit dem Dünnwand-Geometriestand wurde gemäß den Serienparametern aufbereitet, vorgeheizt und auf eine der

Gießmaschinen aufgebaut. Die restlichen Plätze waren dabei mit Serienkokillen belegt. Die durchgeführten Abgüsse erfolgten ohne Auffälligkeiten oder Abweichungen zum Serienprozess. Die Kavität ist vollständig gefüllt und das Bauteil komplett abgebildet worden. Kaltlauf konnte insbesondere in den dünnwandigen Bereichen nicht festgestellt werden. Die Abbildungsgüte der Strukturierung blieb bis zum Ende der Gießversuche trotz mehrmaligem Nachschlichtens im Verlauf der Gießversuche erhalten. Alle nachgelagerten Prozesse vom Gießen bis zur mechanischen Bearbeitung wurden problemfrei durchlaufen. Gegenüber dem Serienprozess sind in den Zwischenschritten Rohteilbearbeitung, Röntgen, Wärmebehandlung, Richten, Farbeindring- und Sichtprüfung keine signifikanten Abweichungen festgestellt worden.

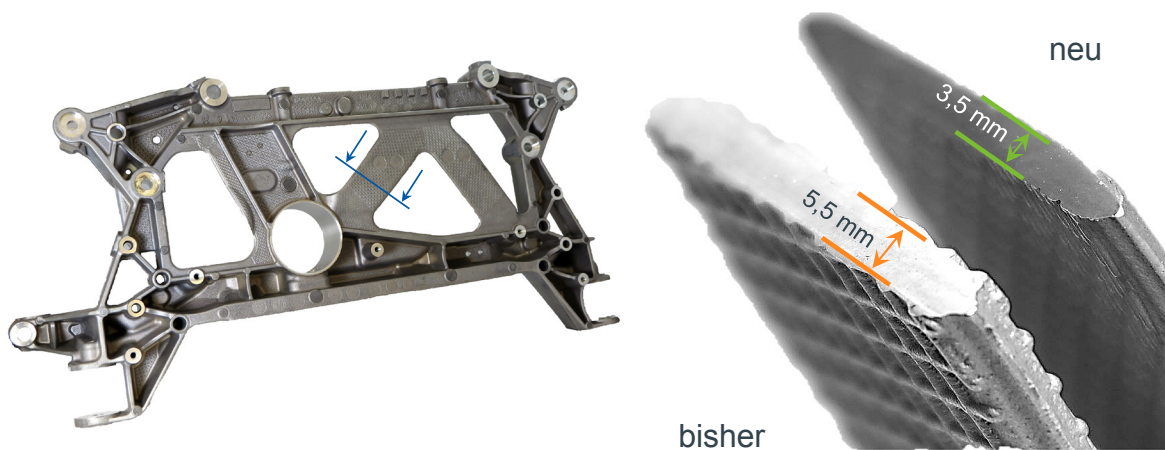


Abbildung 4-19: Potenzial der Wandstärkenreduzierung am Beispiel des Aluminium-Vorderachs-Hilfsrahmens; links: Bauteil, rechts: Schnittdarstellung im Vergleich zur bisherigen Lösung

Die gewünschte Wandstärkenreduzierung konnte, wie aus Abbildung 4-19 ersichtlich, erfolgreich umgesetzt werden. Großflächige Bereiche können mit einer Wandstärke von 3,5 mm unter Großserienbedingungen gegossen werden.

Als nächstes ist es erforderlich, die gefertigten Bauteile auf einem Mehrkomponenten-Prüfstand einer vergleichenden Betriebslastenprüfung unter Korrosion zu unterziehen. Das dynamische Lastsignal zur Simulation des Fahrzeuglebens wird spielarm und seitenkrauffrei über Anbindungen und Anbauteile durch servohydraulische Zylinder in das Bauteil eingeleitet. Während der Erprobung

wird der Hilfsrahmen zyklisch mit einer 5%igen NaCl-Lösung beregnet. Die Beregnungsphase dauert 5 Minuten, die Trockenphase 20 Minuten. Das Bauteil wird bis zum Ausfall durch technischen Anriss erprobt.

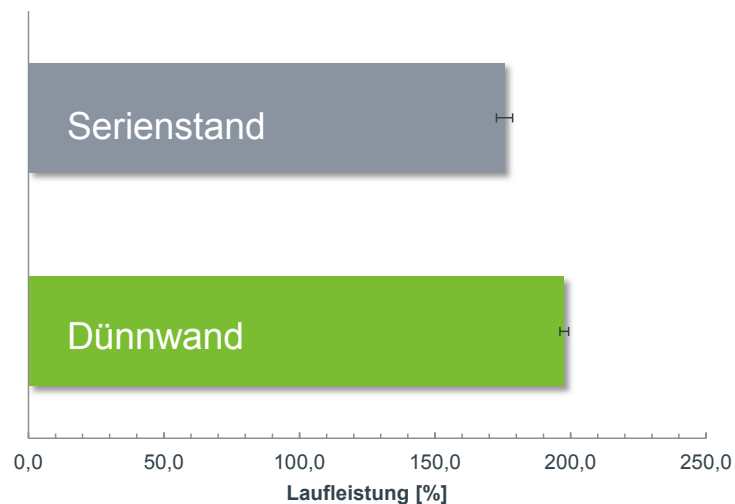


Abbildung 4-20: Laufleistungsvergleich auf dem Mehrkomponenten-Prüfstand unter Korrosion

Wie aus Abbildung 4-20 ersichtlich, erreicht der Dünnwand-Hilfsrahmen vergleichbare Laufleistungen, die um 12 % über dem Referenzstand liegen. Diese Abweichung kann durch eine höhere Toleranz des Dünnwand-Derivates gegenüber Dynamikeffekten der eingeleiteten Kräfte erklärt werden, da dünnwandige Teilbereiche lokal geringere Steifigkeiten aufweisen, obwohl die globalen Steifigkeiten mit der Referenz vergleichbar sind. Der Bereich, in dem das Abschaltkriterium der Prüfung erreicht wird, ist über alle Bauteile identisch und außerhalb strukturierter Bereiche anzutreffen. Selbige weisen weder erhöhte Korrosionsangriff noch andere Auffälligkeiten auf.

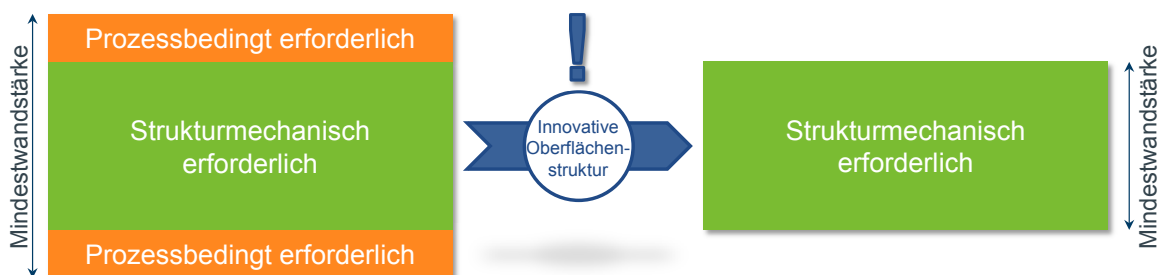


Abbildung 4-21: Vergleich prozess- und strukturbedingter Wandstärke

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen von Gierth [215] können damit bestätigt werden. Wie aus Abbildung 4-21 ersichtlich, gelingt es die prozessbedingt erforderliche Wandstärke mittels innovativer Oberflächenstrukturen zu reduzieren und einen Einklang mit der strukturmechanisch erforderlichen Mindestwandstärke zu finden, sodass hierdurch ein deutlicher Beitrag zum Leichtbau gegeben ist.

4.2 Verkürzung der Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung stellt einen zusätzlichen Prozessschritt in der Fertigung von Aluminiumkomponenten dar. Da dieser energie- und damit auch kostenintensiv ist, gilt es, eine unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten vertretbare, sowie im Hinblick auf erreichbare statische und dynamische Materialeigenschaften optimale Lösung zu finden. Die bestehenden Rezepturen sind wie bereits erwähnt häufig an die neue Bauteilgeneration weitergegeben oder aufgrund von gestaffeltem Einsatz neuer Produkte übernommen worden. Alte Ofentechnik mit ungenauer Regelung legitimierte seinerzeit diese vielfach langen Verweilzeiten im Ofen. Die Idee ist nun, ein für den Prozess optimales Zeit-Temperatur-Regime umzusetzen, welches einerseits sehr kurze Durchlaufzeiten aufweist und andererseits keine Einbußen in den Bauteileigenschaften nach sich zieht. Zur Zuarbeit wurde hierfür eine Diplomarbeit [217] ausgekoppelt. Nachfolgend wird basierend auf den Ergebnissen aufgezeigt, wie verborgene Potenziale in der Wärmebehandlung genutzt werden können.

Ausgehend von der möglichen Zeitkombination in den Serienöfen wurden drei unterschiedliche Wärmebehandlungsrezepturen gewählt. Ziel war dabei eine möglichst signifikante Reduzierung von mindestens 40% der Gesamtprozesszeit, was eine Halbierung der Einzelschritte Lösungsglügen und Auslagern erfordert. Wie aus Tabelle 4-4 hervorgeht, ist die Temperaturführung beim Lösungsglügen mit reduzierter Zeit leicht angehoben worden, während die Variation des Auslagerns bei konstanter Temperatur stattfindet. Eine Zeit von 100 % entspricht dabei einer Dauer von 210 Minuten. Die verkürzte Wärmebehandlung weist dabei knapp eine Halbierung der Prozesszeiten aus. Alle Rezepturen entsprechen dabei einer nicht vollständig ausgehärteten T64-Wärmebehandlung, die das Ziel hat, möglichst hohe Dehnwerte bei gleichzeitig hoher Festigkeit zu erreichen. Neben den drei Hauptuntersuchungen für konventionelle, mittellange und verkürzte Wärmebehandlung werden auch die jeweiligen Grenzversuche betrachtet, die aus langer Lösungsglühdauer bei kurzer Auslagerung und umgekehrt entsprechen. Hierdurch kann ein Rückschluss auf die Auswirkungen der Teilprozessoptimierungen gezogen werden.

Zur Analyse der Versuchsergebnisse werden primär die statischen Festigkeitseigenschaften mittels Zugproben und das dynamische Bauteilverhalten in einer vereinfachten Einkomponenten-Prüfung analysiert.

Tabelle 4-4: Versuchsparmetrierung von Lösungsglühen und Auslagern im Zuge der Verkürzung der Wärmebehandlung

		Lösungsglühen			
		538°C	540°C	543°C	
Auslagern	Temperatur	Zeit	100 %	69 %	54 %
		53 %	Grenztyp A	---	verkürzt
	190 °C	85 %	---	mittellang	---
		100 %	konventionell	---	Grenztyp B

Für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte wurden dabei Zugproben gemäß DIN 50125 – B 6 x 30 [218] aus jeweils drei Bereichen von drei Bauteilen entnommen. Eine Übersicht der Ergebnisse gibt Tabelle 4-5. Es ist zu erkennen, dass eine kürzere Auslagerungszeit, wie sie bei der verkürzten Wärmebehandlung und bei dem Versuch Grenzmuster A vorliegt, erwartungsgemäß Vorteile bei der Bruchdehnung erzielt. Es liegt eine leichte Steigerung der Werte von 8 % bzw. 6 % gegenüber der konventionellen Wärmebehandlung vor. Die Festigkeitsänderungen liegen im Allgemeinen bei unter einem bis maximal drei Prozent und werden daher als nicht signifikant eingestuft.

Tabelle 4-5: Vergleich der erreichten mechanischen Kennwerte für konventionelle, mittellange und verkürzte Wärmebehandlung am Beispiel eines im CPC-Verfahren gegossenen Bauteils der Legierung AISi7Mg0,3

	Zugfestigkeit R _m		Dehngrenze R _{p0,2}		Bruchdehnung A ₅	
	[N/mm ²]	Stabw.	[N/mm ²]	Stabw.	[%]	Stabw.
konventionell	332	3,01	270	6,82	10,3	1,88
mittellang	334	4,14	278	6,35	9,9	2,51
verkürzt	339	4,33	270	8,14	11,1	2,26
Grenzmuster A	335	3,72	269	8,83	10,9	1,20
Grenzmuster B	331	4,35	273	5,51	10,3	1,67

Das vorliegende Ergebnis zeigt aus statischer Sicht stark vergleichbare Ergebnisse. Auch ist im Gefügevergleich, wie in Abbildung 4-22 für konventionelle und verkürzte Wärmebehandlung dargestellt, keine direkt sichtbare Abweichung festzustellen. Auf eine weitere Untersuchung wurde daher verzichtet. Eine weitere Verfolgung der Reduzierung der Wärmebehandlungszeiten mit dem Ziel, die verkürzte Version zur Umsetzung zu bringen, ist folglich legitim.

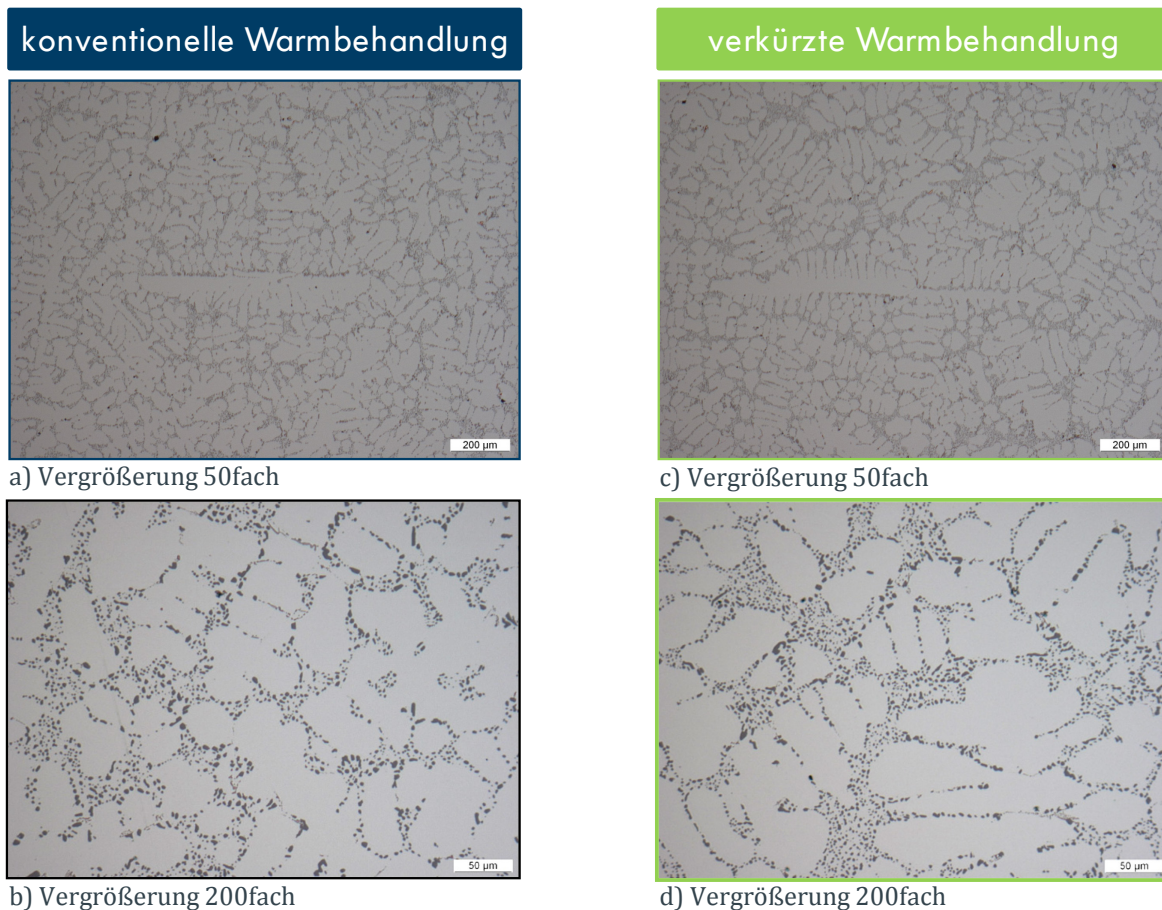


Abbildung 4-22: Gefügevergleich für konventionelle und verkürzte Wärmebehandlung, Legierung AlSi7Mg0,3, CPC-Guss

Dazu wurden Bauteile der ersten drei Versuchsreihen einer vereinfachten dynamischen Prüfung unter Korrosion unterzogen. Hierbei wurde ein Radträger auf eine Spannplatte fixiert und über eine Verschraubungsposition dynamisch belastet. Der Versuchsaufbau ist in Anhang I veranschaulicht. Die Bauteile sind dabei einer Wechselbelastung auf unterschiedlichen Belastungsniveaus ausgesetzt worden. Als Korrosionsmedium wurde 5%ige NaCl-Lösung gewählt. Während des Versuch wurde abwechselnd 5 Minuten beregnet und eine anschließende Trockenphase

eingehalten. Da für die Untersuchung nur eine begrenzte Anzahl an Teilen zur Verfügung stand, wurde der Versuch auf ein Bauteil je Lastniveau beschränkt. Damit kann folglich nur ein erster Einblick in das Versagensverhalten geworfen werden, da keine statistische Absicherung vorliegt.

Wie aus Abbildung 4-23 erkennbar, sind auf Basis der durchgeführten Versuche keine signifikanten Abweichungen ersichtlich. Die Steigungen der Wöhlerneigungen sind für konventionelle und mittellange Wärmebehandlung nahezu identisch. Für die verkürzte Wärmebehandlung ist ein geringer Vorteil auf hohem sowie ein leichter Abfall auf niedrigstem Lastniveau festzuhalten, der zu einem leichten Abfall der Wöhlerneigung führt.

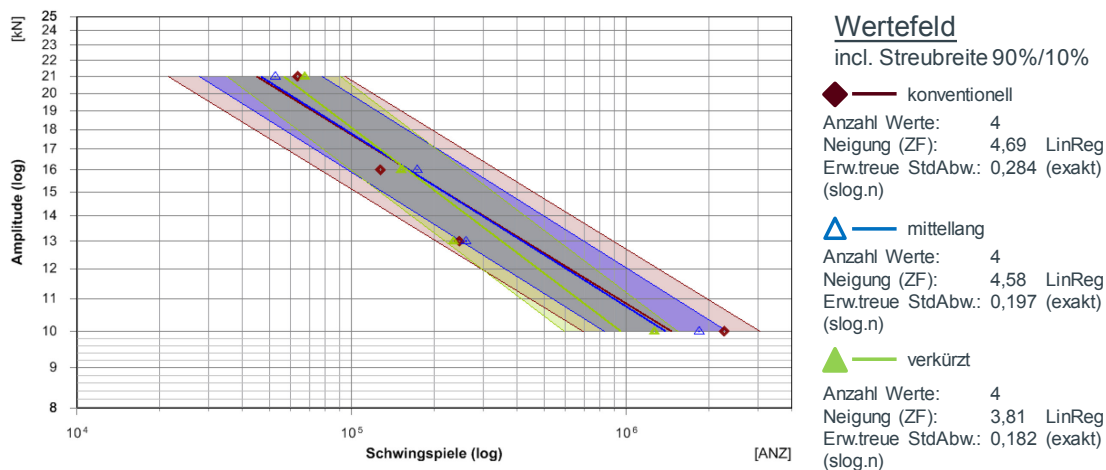


Abbildung 4-23: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung für konventionelle, mittellange und verkürzte Wärmebehandlung

Berücksichtigt man die Anzahl der geprüften Teile und die Streuung, die insbesondere für die konventionelle Wärmebehandlung sehr groß ausfällt, ist die Wertung nicht eindeutig. Betrachtet man alle Ergebnisse in einer gemeinsamen Wöhleranalyse, ergibt sich eine mittlere Wöhlerneigung von 4,36, bei der im Vergleich niedrigsten, erwartungstreuen Streuung von 0,168. Daher ist davon auszugehen, dass die verkürzte wie auch die mittellange Wärmebehandlung auf Basis der durchgeführten Untersuchungen als technisch kompatibel gegenüber der konventionellen Wärmebehandlung einzustufen sind. Sie zeigen weder im statischen

Festigkeitsverhalten noch in der dynamischen Erprobung massiv auffällige Abweichungen.

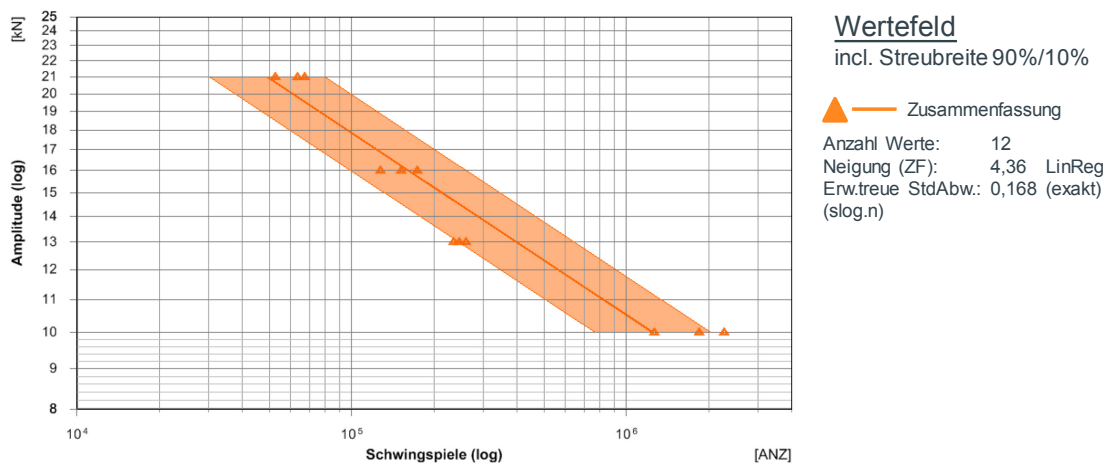


Abbildung 4-24: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Zusammenfassung der Ergebnisse für konventionelle, mittellange und verkürzte Wärmebehandlung

Empfohlen wird daher, die verkürzte Wärmebehandlung für zukünftige Serienprodukte nach weiteren Erprobungen umzusetzen und gegebenenfalls weiter zu optimieren. Der Schwerpunkt der Betrachtung ist dabei verstärkt auf das dynamische Bauteilverhalten zu legen.

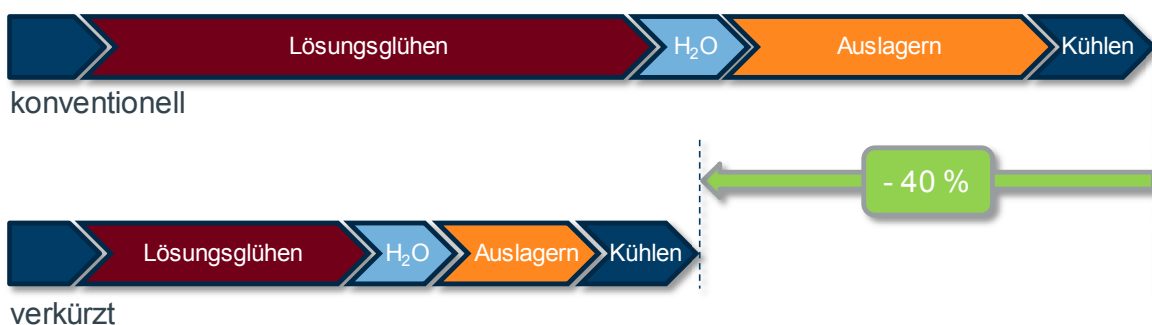


Abbildung 4-25: Schematischer Vergleich der Gesamtprozesszeit konventioneller und verkürzter Wärmebehandlung

Bei Einsatz der verkürzten Wärmebehandlung kann, wie aus Abbildung 4-25 hervorgeht, unter Berücksichtigung von Nebenzeiten die Gesamtprozesszeit der

Wärmebehandlung um 40 % gesenkt werden. Dadurch kann einerseits der Durchsatz bei bestehenden Anlagen erhöht werden und somit Neuanschaffungen vermieden werden. Andererseits wird pro Bauteil weniger Energie in der Herstellung verbraucht. So wird ein Beitrag zu gleichzeitig ökologischem und ökonomischen Leichtbau geleistet.

Da in dieser Untersuchung vergleichbare mechanische Kennwerte und eine ähnliche dynamische Lebensdauer erreicht wurden, stellt sich die Frage, ob durch die geänderte Parametrierung der Wärmebehandlung tatsächlich nur geringe Abweichungen zu erwarten sind. Auch muss geklärt werden, ob statische, mechanische und dynamische Kennwerte miteinander korrelieren und welche Einflussfaktoren im Zusammenhang mit dem dynamischen Bauteilverhalten stehen.

5. Einflüsse auf das dynamische Bauteilverhalten

Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, können Fertigungsprozesse weiterentwickelt werden, um den gestiegen Anforderungen aus Leichtbaudruck, Energie- und Kosteneffizienz gerecht zu werden. Bisherige Untersuchungen beschränken sich auf die Zusammenhänge mit statischen mechanischen Kennwerten, wie vorzugsweise Härte, Zugfestigkeit, Dehngrenze oder Bruchdehnung. Es stellt sich im Weiteren allerdings die Frage, wie Variationen im Prozess durch Anlagentechnik oder Parametrierung das dynamische Bauteilverhalten beeinflussen und in wie weit dies durch statische, mechanische Kennwerte sichtbar ist. Umfangreiche bauteilbezogene Untersuchungen, die diese Fragestellung beantworten, sind bislang nicht durchgeführt worden. Auch sind keine Untersuchungen speziell für den CPC-Guss durchgeführt worden

Zur Identifikation von Einflüssen auf das dynamische Bauteilverhalten sind diverse Versuche an Fahrwerk-Komponenten, die im Gegendruckgießverfahren hergestellt wurden, durchgeführt worden. Die Ergebnisse werden im Weiteren vorgestellt und diskutiert.

Aus den unterschiedlichen Versuchschargen wurden dabei zunächst aus Zugproben gemäß DIN 50125 – B 6 x 30 [218] die mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit (R_m), Dehngrenze ($R_{p0,2}$) und Bruchdehnung (A_5) ermittelt. Hierbei ist der Mittelwert aus mindestens acht Zugstäben, die aus mindestens zwei Bauteilen entnommen wurden, gebildet worden. Je Teil ist dabei ein Streichergebnis zulässig. Der Ausfall in der Zugprüfung muss dabei auf einen Fehler wie einen Einschluss, Lunker oder Gaspore zurückzuführen sein, der eine für das Bauteil zulässige Größe aufweist. In die Wertung fließen folglich mindestens sechs Ergebnisse aus fehlerfreien Stäben ein.

Die dynamische Erprobung der Bauteile erfolgt auf zwei unterschiedlichen Lasthorizonten im Zeitfestigkeitsbereich, sodass die Neigung der Wöhlergeraden für diesen Bereich ermittelt werden kann. Hierdurch können Rückschlüsse auf das Versagensverhalten gezogen werden. Die Erprobung erfolgt dabei an Mindestens vier Teilen je Lasthorizont als einkanalige Prüfung mit schwingender Belastung bis

zum Erreichen eines definierten Ermüdungszustandes, dem Abbruchkriterium. Abweichungen von diesem Vorgehen werden für die jeweiligen Versuche in den zugehörigen Kapiteln genannt.

Die Krafteinleitung erfolgt mit Hilfe eines Hydraulikzylinders in einem definierten Winkel in spezielle Bereiche des Bauteils. Dieses ist über Ersatzlenker und -lager an eine massive Grundplatte gebunden. Die Belastung wird sinusförmig im Zugschwellbereich vollzogen und wird über die Dauer des Versuchs nicht verändert. Ein Schwingenspiel ($N = 1$) ist durch die anliegende Mittellast S_m sowie der Amplitude S_a charakterisiert. Der Prüfaufbau ist so ausgelegt, dass ein Schädigungsverhalten in Anlehnung an jenes im Fahrzeugleben simuliert wird. Als Vergleichskriterium werden die im Mittel erreichten Schwingenspiele ($N_{50\%}$) bei Erfüllung des Abbruchkriteriums sowie die Neigung k der Wöhlergeraden bei doppellogarithmischer Betrachtung herangezogen. Für die nachstehenden Untersuchungen wird ein mit dem „unbewaffneten Auge“ sichtbarer technischer Anriss von mindestens 10 mm aber nicht mehr als 20 mm als Abbruchkriterium gewertet. Die bauteiltypischen Spezifikationen des Prüfaufbaus sind in Anhang J zu finden.

Für die grafische Aufbereitung in Form eines Wöhlerdiagramms im Zeitfestigkeitsbereich sowie der Bewertung der Ergebnisse aus den dynamischen Versuchen wird das Excel Add-On *Techgraf* genutzt. Die Betriebsfestigkeit wird hierbei auf Basis der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner bewertet. [219]

Der statistischen Analyse liegen folgende Berechnungen zugrunde, die von Martin et al. erarbeitet wurden [220, 221]:

Zunächst werden je Lasthorizont (S_{a1} und S_{a2}) die zugehörigen Mittelwerte $N_{50\%,1}$ und $N_{50\%,2}$ der erreichten Schwingenspiele ermittelt

$$N_{50\%,1} = 10^{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \log(N_{i,1})} = \sqrt[n_1]{\prod_{i=1}^{n_1} N_{i,1}} \quad \text{Formel 5-1}$$

$$N_{50\%,2} = 10^{\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \log(N_{i,2})} = \sqrt[n_2]{\prod_{i=1}^{n_2} N_{i,2}} \quad \text{Formel 5-2}$$

Anschließend wird für $n_1 = n_2$ die zugehörige Varianz $s_{\log N,1}^2$ und $s_{\log N,2}^2$ bestimmt.

$$s_{\log N,1}^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (\log(N_i) - \log(N_{50\%,1}))^2 \quad \text{Formel 5-3}$$

$$s_{\log N,2}^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (\log(N_i) - \log(N_{50\%,2}))^2 \quad \text{Formel 5-4}$$

Die erwartungstreue Standardabweichung ergibt sich damit für $n_1 = n_2$ unter Berücksichtigung von

$$n = n_1 + n_2 \quad \text{Formel 5-5}$$

zu:

$$s_{\log N, \text{korr}2D} = \sqrt{\frac{s_{\log N,1}^2 + s_{\log N,2}^2}{2} \cdot \frac{n - 1,74}{n - 2}} \quad \text{Formel 5-6}$$

Variiert die Probenanzahl n_1 und n_2 auf den Lasthorizonten, wird die Streuung $s_{\log N, \text{korr}2D}$ durch zur Wöhlerlinie paralleles Verschieben der Einzelergebnisse N_j^* auf einem fiktiven gemeinsamen Lasthorizont S_a^* und der zugehörigen Amplitude S_{aj} sowie der Probenanzahl j bestimmt. Die zugehörigen fiktiven Einzelwerte N_j^* ergeben sich zu:

$$N_j^* = N_j \cdot \left(\frac{S_a^*}{S_{aj}} \right)^{(-1) \cdot k} \quad \text{Formel 5-7}$$

Für diesen neuen Lasthorizont wird zunächst nach Formel 5-1 der fiktive Mittelwert der erreichten Schwingspiele $N_{50\%}^*$ bestimmt. Anschließend ergibt sich die Streuung $S_{\log N, \text{korr}2D}$ zu:

$$S_{\log N, \text{korr}2D} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^n (\log(N_j^*) - \log(N_{50\%}^*))^2} \cdot \frac{n-1,74}{n-2} \quad \text{Formel 5-8}$$

Die Mittelwerte für die Lasthorizonte $N_{50\%,1}$ und $N_{50\%,2}$ werden weiterhin nach Formel 5-1 und Formel 5-2 berechnet.

Abschließend kann die Neigung der Wöhlerlinie k über den Differenzquotienten der logarithmischen mittleren Schwingspiele $N_{50\%}$ und der zugehörigen Amplitude S_a berechnet werden:

$$k = (-1) \frac{\log(N_{50\%,1}) - \log(N_{50\%,2})}{\log(S_{a1}) - \log(S_{a2})} \quad \text{Formel 5-9}$$

Am Beispiel eines Radträgers mit Vorserienstatus werden im Folgenden Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses des Wärmebehandlungsprozesses durchgeführt. Anschließend werden auf Basis der gleichen Geometrie die Wirkung eines um 20 % abgesenkten Magnesiumgehaltes unter dynamischen Gesichtspunkten bewertet.

5.1 Einflüsse der Wärmebehandlung

Für die Identifikation des Einflusses der Wärmebehandlung und ihrer technischen Umsetzung werden drei unterschiedliche Versuchsreihen durchgeführt. Begonnen wird mit einem Ofenvergleich zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Anlagentechnologie. Im Weiteren wird der Einfluss signifikant unterschiedlicher Wärmebehandlungsrezepturen und unterschiedlicher Gießparametrierung analysiert.

Der dritte Bereich umfasst die gezielte Variation einzelner Parameter der Wärmebehandlung und der Schmelze-Zusammensetzung.

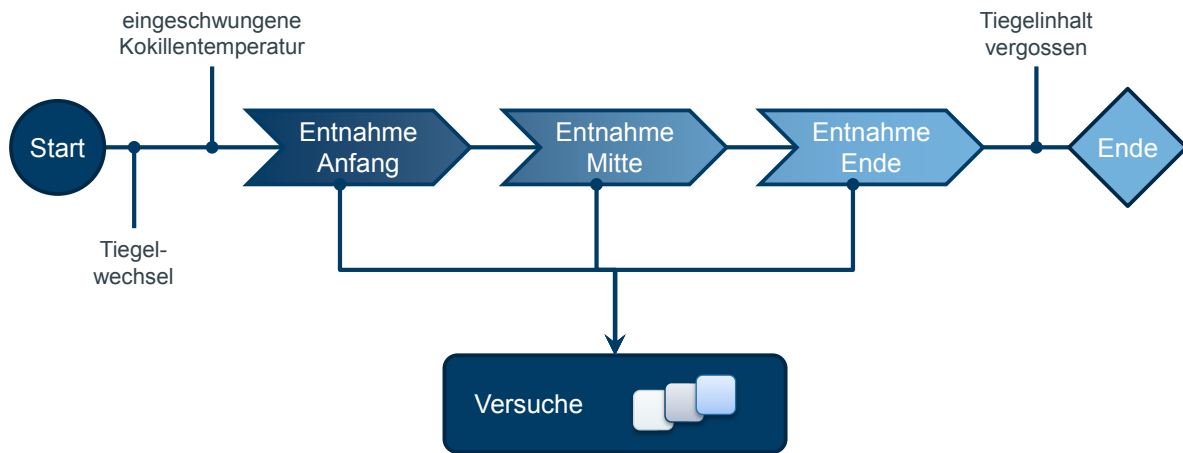


Abbildung 5-1: Grundsätzlicher Ablauf der Herstellung von Gussteilen für die Erprobung

Für alle Versuche ist es dabei zwingend erforderlich, die Einflussfaktoren aus dem vorgelagerten Gießprozess – sofern nicht ausdrücklich anders gewünscht – so gering wie möglich zu halten. Hierzu wurden im CPC-Verfahren gegossene Radträger aus einer Mehrfachkokille in einer Anlage vergossen. Dabei wurde eine Schmelzcharge verwendet, die dem Inhalt eines Tiegels entspricht. Wie in Abbildung 5-1 veranschaulicht, sind den jeweiligen Versuchen Teile aus Anfang, Mitte und Ende des Gießens zugeordnet worden.

Tabelle 5-1: Übersicht der Wärmebehandlungsanlagen

Lfd-Nr.	Typ	Kurzbezeichnung	Einsatzzweck
I	Kammerofen	KO	Serie
II	Durchlaufofen	DLO	Serie
III	Drehherdofen	DHO	Serie
IV	Durchlaufofen	DLO 2	Serie
V	Kammerofen	VO	Versuch

Für die Versuche konnten insgesamt 5 unterschiedliche Wärmebehandlungsanlagen genutzt werden. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick. Während die Öfen I-IV für den Großserieneinsatz konzipiert sind, wird Ofen V als flexibler Versuchsofen genutzt.

Die Wärmebehandlungsanlagen unterscheiden sich deutlich in den Konzepten. Betrachtet man den Kammerofen, wie in Abbildung 5-2 schematisch dargestellt, liegt hier ein abgeschlossener Raum vor, in den eine große Charge an Bauteilen gleichzeitig eingebracht wird. Es besteht die Möglichkeit, den Ofenraum sowohl als Hochtemperaturofen (HTO) als auch als Niedertemperaturofen (NTO) zu nutzen, was häufig bei Versuchsanlagen wie auch beim Ofen V vorliegt. Im Großserieneinsatz finden sich hingegen sowohl HTO als auch NTO an. Für T64-Wärmebehandlungen kommen dabei häufig mehr Hochtemperaturofen wie Niedertemperaturofen zum Einsatz, da das Lösungsglühen geringere Zeiten in Anspruch nimmt. Folglich kann ein weitgehend kontinuierlicher Durchsatz bei geringen Leerstandszeiten einzelner Öfen erfolgen. Da der Ofenraum nach jedem Ausschleusen leer ist, kann mit dieser Technologie eine flexible Parametrierung erfolgen. Eine neue Charge kann mit einer neuen Rezeptur behandelt werden.

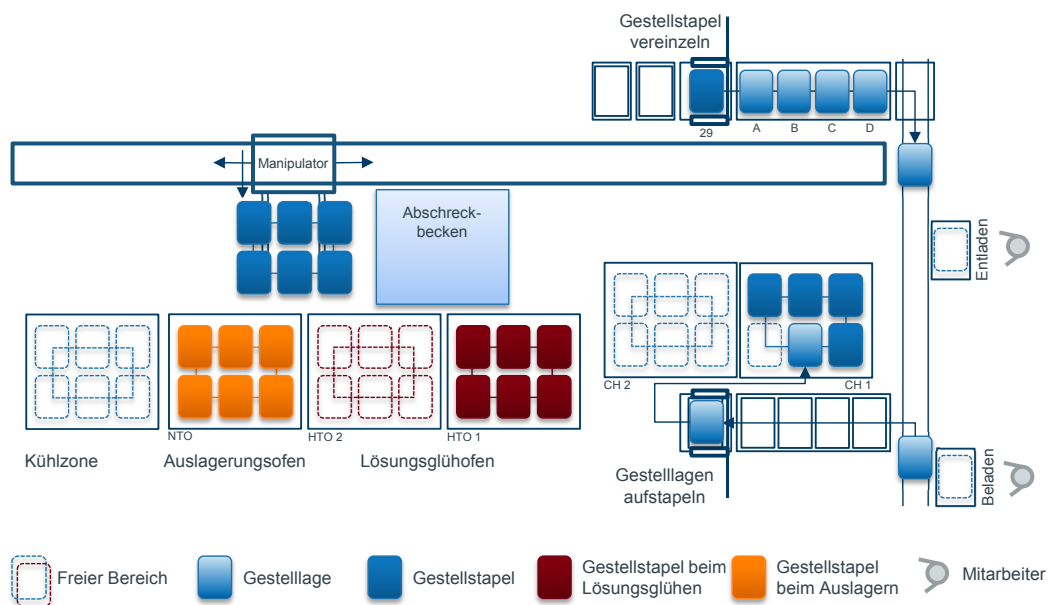


Abbildung 5-2: Schematischer Aufbau eines Kammerofens

Der Durchlaufofen zeichnet sich hingegen durch einen kontinuierlichen Durchsatz an Bauteilen aus. Die Charge wird über eine Vorwärmstation in den

Hochtemperaturbereich des Lösungsglühens geführt. Die Ofengröße richtet sich dabei nach Chargengröße, Durchlaufzeit und Lösungsglühdauer. Das Einschleusen erfolgt dabei taktgesteuert. Der Takt wird von Lösungsglühdauer und Durchlaufzeit bestimmt. Abbildung 5-3 stellt den Aufbau schematisch dar. Über eine Ausschleusestation erfolgt das Zusteuern der Charge zum Abschreckbecken. Von dort wird die Charge über einen weiteren Einschleusebereich in den Niedertemperaturbereich geführt. Die Länge dieses Ofens ist von der Auslagerungsdauer und dem Takt des Lösungsglühens abhängig. Folglich ist die Flexibilität einer solchen Anlage beschränkt. Bei gegebener Technik ist das Verhältnis von Lösungsglühdauer zu Auslagerungszeit vorgegeben. Die Dauer kann nur in Relation zueinander variiert werden.

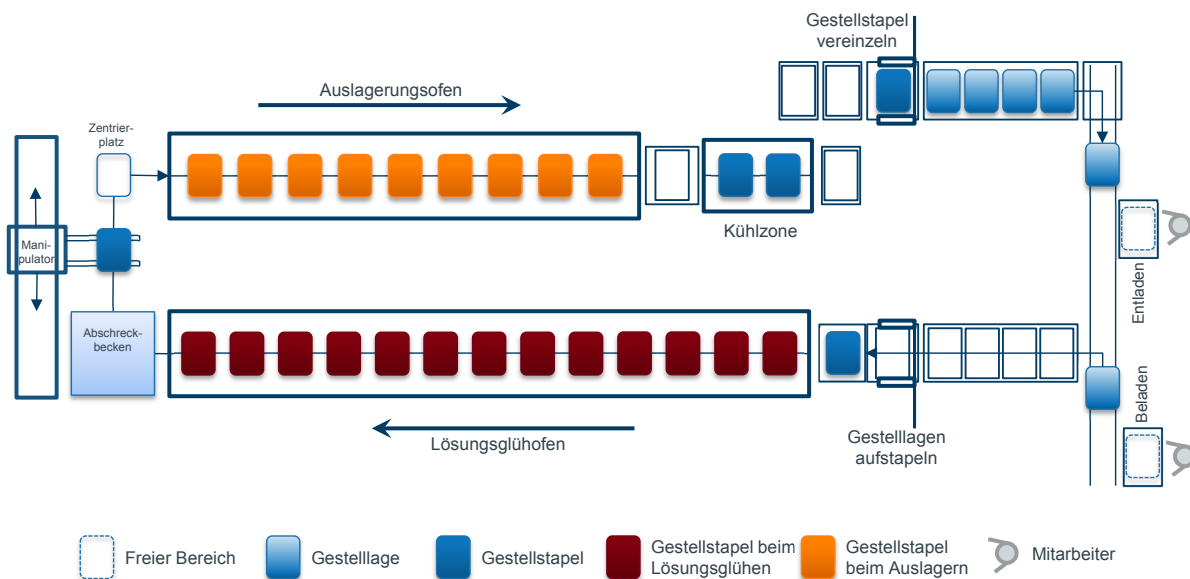


Abbildung 5-3: Schematischer Aufbau eines Durchlaufofens

Aus Abbildung 5-4 geht der schematische Aufbau eines Drehherdofens hervor. Anders als bei Kammer- oder Durchlauföfen wird bei dieser Ofentechnik im Allgemeinen kein Wärmebehandlungsgestell mitgeführt, wodurch Vorteile in der Energieeffizienz erreicht werden. Sowohl Hoch- als auch Niedertemperaturöfen sind in Segmente eingeteilt. Der Durchsatz richtet sich neben der Temperierzeit nach Ebenen, Segmentanzahl und Drehgeschwindigkeit. Ähnlich wie beim Durchlauföfen liegt auch hier eine taktgebundene Verknüpfung von HTO und NTO vor. Das Bauteilhandling erfolgt robotergestützt einzeln bzw. paarweise, sodass keine Charge im eigentlichen Sinne existiert.

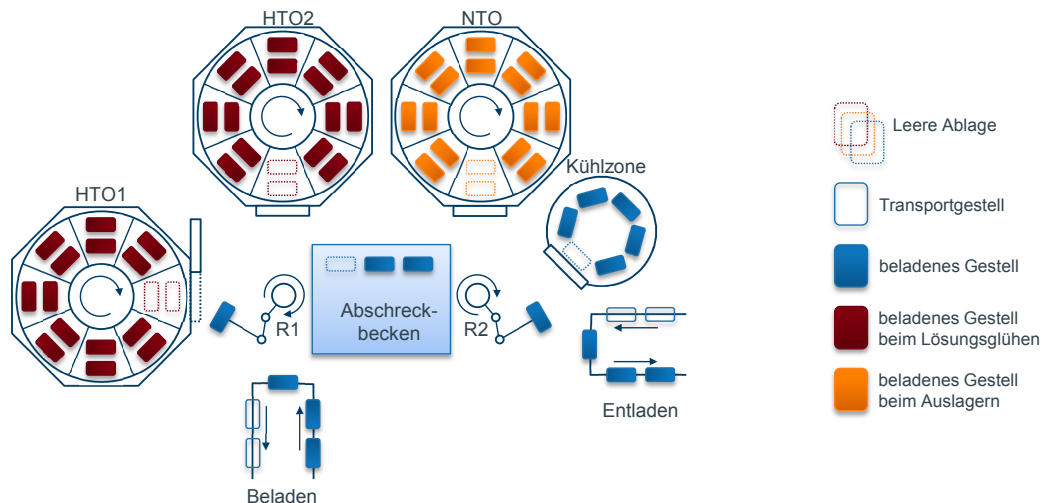


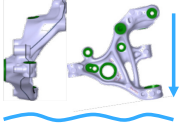
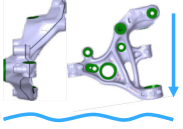
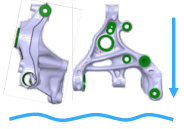
Abbildung 5-4: Schematischer Aufbau eines Drehherdofens

Die einzelnen Anlage-Konzepte bringen folglich trotz gleicher Grundparametrierung (Basisrezeptur A) für Temperaturen und Verweildauer in den Öfen gewisse Unterschiede mit sich, die in Tabelle 5-2 zusammengefasst sind. Die Basisrezeptur A entspricht dabei der verkürzten Wärmebehandlung aus Kapitel 4.2 gemäß Tabelle 4-4.

Neben der Anzahl an Teilen je Charge und folglich dem Chargengewicht, variiert das Verhältnis von Chargen- zu Wasservolumen sehr stark. Während der Kammerofen ein Verhältnis der Wassermenge zu Wärmebehandlungsmasse von etwa 18:1 aufweist, erhöht sich dieses Verhältnis im Durchlaufofen auf 29:1. Fast 30-mal mehr Wasser steht mit einem Verhältnis von etwa 536:1 im Drehherdofen pro Bauteil zur Verfügung. Daneben sind deutliche Abweichungen bei der Abschreckzeit, also der Zeit von Beginn der Entnahme aus dem Lösungsglühöfen bis zum vollständigen Eintauchen der Charge im Wasserbad zu nennen. Während Drehherd- und Durchlaufofen mit 15 bzw. 18 Sekunden etwa gleichauf liegen, benötigt der Handlingsroboter des Kammerofens gut doppelt so lange bis die Charge unter Wasser ist.

Es stellt sich die Frage, ob diese vermeintlich geringen Abweichungen zu Effekten im dynamischen Bauteilverhalten führen. Ferner ist zu hinterfragen, ob dies mit zugehörigen statischen, mechanischen Kennwerten korreliert.

Tabelle 5-2: Vergleich der unterschiedlichen Wärmebehandlungsöfen

Parameter		Kammerofen	Durchlaufofen	Drehherdofen	
Bauteilgewicht (Rohteil)	[kg]	2,8			
Teile pro Gestell	[%]	25	25	2,8	
Teileanzahl pro Charge	[%]	900	100	2,8	
Gestell	Gewicht	[kg]	50	50	ohne (Greifer)
	Anzahl	[Stk.]	36	4	1
Chargenträger	Gewicht	[kg]	800	50	ohne
Gewicht der Wärmebehandlungscharge		[kg]	4414,4	451,6	5,6
Beckengröße		[m ³]	80	13	3
Verhältnisse Masse Becken/Charge			18,1	28,8	535,7
Lösungsglühen	Temperatur	[°C]	542		
	Haltezeit	[%]	100		
Wasserbadtemperatur (Eintauchen)		[°C]	65	65	65
Abschreckzeit (Ofen bis Abschreckbad, Charge vollständig eingetaucht)		[sec]	30-45	18	15
Verweilzeit im Bad		[sec]	180	95	120
Badumwälzung			Thermisch induziert	Thermisch induziert	bogenförmiges Eintauchen
Bauteillage während des Abschreckvorgangs					
Auslagern	Temperatur	[°C]	190		
	Haltezeit	[%]	57		

Nachfolgend werden drei Versuchsgruppen behandelt, die Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten in Abhängigkeit von Anlagentechnik und Parametrierung aufweisen. Eine Übersicht gibt Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3: Übersicht der Wärmebehandlungs-Versuche

Versuch	Reihe	Bezeichnung	Anlage	WB-Rezeptur	Ofen	Gusscharge
1	Ofenabgleich	KO	1	a	I	A
2	Ofenabgleich	DLO	1	a	II	A
3	Ofenabgleich	DHO	1	a	III	A
4	Parameter WB	DLO 2, Basis	2	b	IV	B
5	Parameter WB	VO, Basis	2	b	V	B
6	Parameter WB	VO, LG 545°C	2	c	V	B
7	Parameter WB	VO, Wasser 65°C	2	d	V	B
8	Parameter WB	VO, AT 190°C	2	e	V	B
9	Parameter WB	DLO 2, Mg gesenkt	2	b	IV	C

Begonnen wird mit einem Abgleich unterschiedlicher Anlagenkonzepte. Anschließend werden Abhängigkeiten von Guss und Wärmebehandlungsrezeptur untersucht. Im dritten Teil liegt das Augenmerk auf der Variation einzelner Parameter innerhalb der Basisrezeptur für eine T64-Wärmebehandlung.

5.1.1 Ofenabgleich

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Anlagentechniken sind aus den fünf zur Verfügung stehenden Öfen drei mit unterschiedlichem Anlagenkonzept ausgewählt worden. Dies sind der Kammerofen (KO), der Durchlaufofen (DLO) sowie der Drehherdofen (DHO). Die Rezeptur hinsichtlich der Wärmebehandlungstemperaturen und -zeiten für die einzelnen Schritte wurden beibehalten. Anlagenbedingt ist die Bauteillage nur für den Kammer- und Durchlaufofen identisch. Im Drehherdofen müssen die Bauteile um 90° gekippt wärmebehandelt werden.

Zur Minimierung gießbedingter Einflüsse wurden dazu Bauteile aus einer Schmelzecharge vergossen. Den einzelnen Wärmebehandlungsversuchen sind dabei, wie Abbildung 5-5 veranschaulicht, Teile aus je Anfang, Mitte und Ende des Vergießens zugeführt worden.

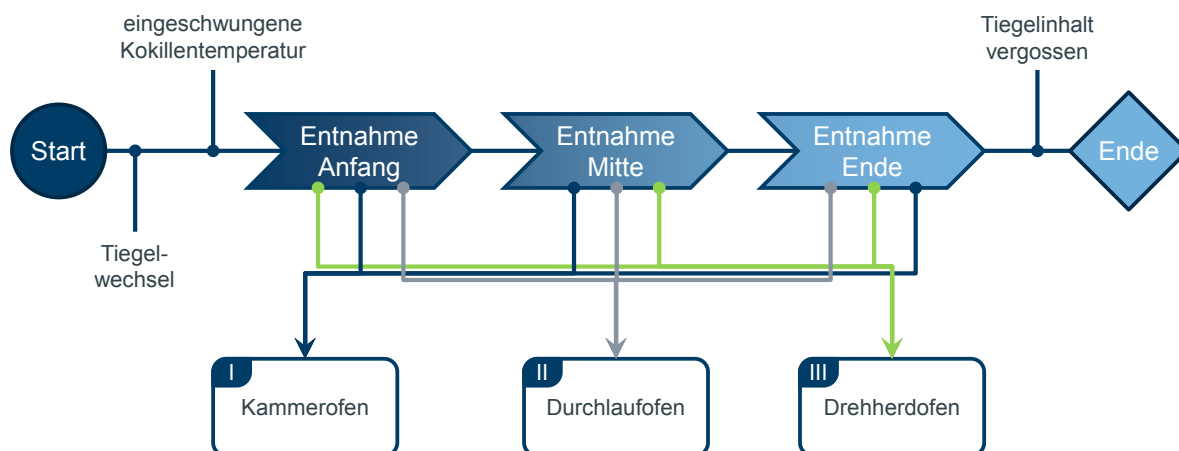


Abbildung 5-5: Aufteilung der Gusscharge für den Ofenabgleich

Nach erfolgter Wärmebehandlung in den drei Anlagen wurden je Versuch aus zwei Bauteilen vier Zugstäbe entnommen. Je Versuchsreihe ist dabei ein Streichergebnis aufgrund eines fehlerbehafteten Zugstabes zu verzeichnen. Im vorliegenden Versuch konnten jeweils sieben Stäbe in die Wertung aufgenommen werden. Wie aus Tabelle 5-4, in der die Ergebnisse vorgestellt werden, ersichtlich ist, weichen die erreichten Ergebnisse nur geringfügig voneinander ab. Auffällig ist die etwas niedrigere Dehngrenze der Proben aus dem Drehherdofen. Die Zugfestigkeit zeigt sich sehr konstant. Bei der Bruchdehnung sind ein leichter Vorteil für den Durchlaufofen sowie der niedrigste Mittelwert für den Kammerofen auszumachen, wobei alle Werte innerhalb der Standardabweichung liegen. Sowohl Zugfestigkeit, Dehngrenze als auch Bruchdehnung lassen keinen linearen Zusammenhang zu den variierenden Parametern der Anlagenkonzepte erkennen.

Tabelle 5-4: Übersicht der mechanischen Kennwerte (Mittelwerte) für die Versuche V1 bis V3 (Ofenabgleich)

Mittelwert n = 7	Zugfestigkeit R _m		Dehngrenze R _{p0,2}		Bruchdehnung A ₅	
	[N/mm ²]	Stabw.	[N/mm ²]	Stabw.	[%]	Stabw.
V1 - KO	327,3	2,2	271,9	3,6	8,5	1,1
V2 - DLO	329,6	4,0	271,3	4,6	9,1	1,3
V3 - DHO	329,4	5,7	263,1	3,2	8,8	1,1

Im Anschluss an die mechanische Bearbeitung der Teile erfolgte die dynamische Prüfung auf dem 1-Komponenten-Prüfstand. Hier wurden auf zwei Lasthorizonten jeweils sechs bis acht Bauteile bis zum Erreichen des Abschaltkriteriums erprobt. Die statische Vorlast ist für das hohe Lastniveau um 31,6 % erhöht. Die Amplitude des niedrigen Lastniveaus beträgt 90,9 % der zugehörigen statischen Last von 10,45 kN. Die Amplitude des hohen Lastniveaus liegt 19,9 % oberhalb der statischen Last des niedrigen Lastniveaus. Tabelle 5-5 gibt einen Überblick der gewählten Parametrierung, die für alle weiteren Versuche auf dem 1K-Prüfstand verwendet werden. Insgesamt werden basierend auf den erzielten mechanischen Kennwerten nur geringe Abweichungen im dynamischen Versuch erwartet.

Aus der Wöhleranalyse im Zeitfestigkeitsbereich des Ofenabgleichs gemäß Abbildung 5-6 ist erkennbar, dass trotz allgemein gleicher Wärmebehandlungsrezeptur und für zumindest Kammer- und Durchlaufofen gleicher

Bauteillage im Chargengestell signifikant unterschiedliche Schwingspielzahlen erreicht werden. Die Streuung nimmt dabei von Kammer- über Durchlauf- zu Drehherdofen hin ab. Dies ist über die Chargengröße erklärbar. Der Drehherdofen hat die gleichmäßigsten Bedingungen bei satzweiser Betrachtung.

Tabelle 5-5: Übersicht der statischen und dynamischen Prüflasten im 1-Komponenten-Versuch

	Statische Last	Amplitude
	[%]	[%]
niedriges Lastniveau S_{a1}	100,0	90,9
hohes Lastniveau S_{a2}	131,6	119,6

Während der Kammerofen eine Neigung von 4,44 bei linearer Regression erreicht, fällt der Wert zum Drehherdofen um 22,3 % auf 3,42 ab. Eine weitere Reduzierung ist zum Durchlaufofen hin zu beobachten. Mit 2,64 ist die Neigung 40% geringer als beim Kammerofen. Dieses Ergebnis korreliert auf den ersten Blick nicht mit den erreichten mechanischen Eigenschaften. Vielmehr wirft es Fragen nach Ursache und Wirkprinzip auf.

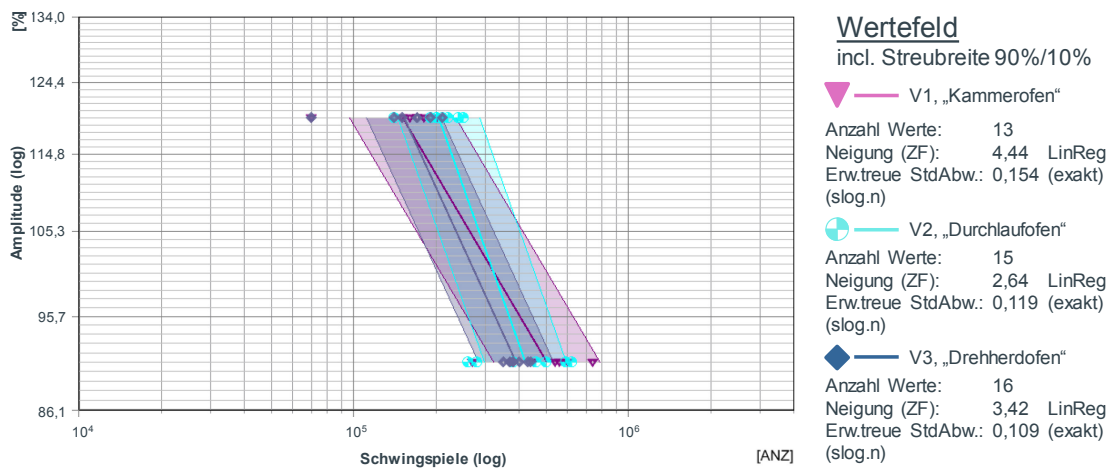


Abbildung 5-6: Wöhleranalyse im Zeitfestigkeitsbereich des Ofenabgleichs – Vergleich von Kammer-, Durchlauf- und Drehherdofen

Als erstes sind Fehler am Prüfaufbau, die durch Schraubenlösen oder Verschleiß einzelner Zylinder oder Lager entstehen, zu vermuten. Dem wurde im Vorfeld bereits durch Kraft-Weg-Überwachung der Zylinder und regelmäßiges Ersetzen von Lagern

vorgebeugt. Auch wurden die Schrauben während der Prüfläufe mehrfach geprüft. Hierbei konnten keine Schraubenlöser detektiert werden.

Weiterhin sind fehlerbehaftete Teile zu vermuten. Dies konnte nicht bestätigt werden. Hierzu ist eine Auswahl von Teilen mit langer wie kurzer Laufleistung laborseitig untersucht worden. Zunächst wurde der Schadensort geöffnet, sodass die Rissflächen stereomikroskopisch untersucht werden konnten. Weder Einschlüsse noch Oxide konnten dabei detektiert werden. Anschließend erfolgte die Gefügeuntersuchung im Ausfallbereich. Abbildung 5-7 zeigt exemplarisch den Gefügevergleich eines Bauteils mit hoher sowie eines Bauteils mit geringer Laufleistung, welches dabei 38 % der Laufzeit des Bauteils mit hoher Laufleistung erreichte. Die mikroskopische Analyse zeigt keine Auffälligkeiten. Weder Ungenzen noch unerwünschte Gefügephasen werden detektiert, die für ein frühzeitiges Versagen ursächlich sein können.

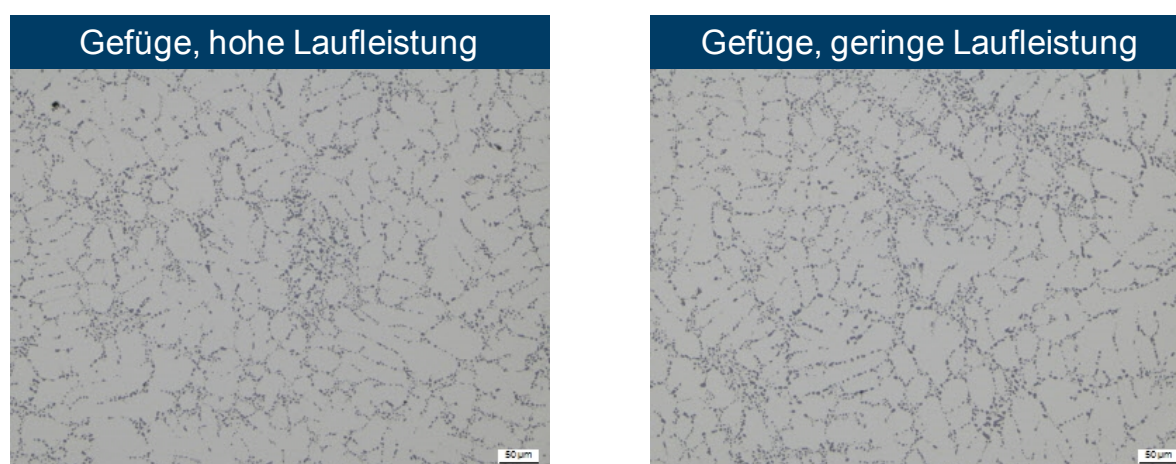


Abbildung 5-7: Gefügevergleich von Bauteilen mit hoher (links) und niedriger (rechts) Laufleistung, Legierung AlSi7Mg0,3

Da aus werkstofflicher Sicht das Phänomen nicht erklärt werden kann, stellt sich die Frage, welche weiteren Ursachen zu einem entsprechenden Versagen führen.

Berücksichtigt man nun die zuvor ermittelten mechanischen Kennwerte der Zugstabprüfung, die stark vergleichbare Ergebnisse aufweisen, liegt es nahe, dass Eigenspannungen die anzutreffenden Phänomene verursachen. Die Eigenspannungen werden durch die Entnahme der Zugstäbe gelöst und

beeinflussen folglich nicht die Zugprüfung. Es ist zu vermuten, dass diese in Verbindung mit der einerseits teilweise unterschiedlichen Bauteillage während der Wärmebehandlung und andererseits mit der unterschiedlich schnellen und starken Wasserabschreckung in Verbindung stehen.

Da in den dynamischen Erprobungen – hier ist insbesondere die Wöhlerneigung interessant – keine direkte Korrelation einzelner Anlagenparameter identifizierbar ist, muss von einer starken Wechselwirkung einzelner Parameter ausgegangen werden. Dies sind insbesondere die abweichende Bauteillage im Wärmebehandlungsgestell und die Eintauchbewegung der Bauteile, sowie die Zeit vom Ofen bis ins Wasserbad und das unterschiedliche Masseverhältnis von Wasser zu Chargenvolumen.

Bei kleinerem Verhältnis, also im Vergleich zum Bauteilvolumen weniger Wasser, wird dieses schnell erhitzt und kann so das Wasservolumen im Abschreckbecken schneller zum Blasensieden überführen. Dadurch kann ein weitgehend homogener Wärmeabtrag über alle Bauteilbereiche und damit über alle Wandstärken erreicht werden. Gleichzeitig entsteht eine starke Badbewegung. Der Temperaturaustrag ist hoch. Bei hohem Verhältnis von Wasser zu Bauteil-Volumen wird das Gesamtvolumen hingegen etwas langsamer erhitzt. Wandstärkenabhängig muss lokal in dickwandigen Bereichen mehr bzw. bei dünnwandigen Bereichen weniger Wärme abgegeben werden. Gleichzeitig beeinflussen Lage und Bewegung der Bauteile den sich zunächst bildenden Dampffilm, sodass dieser in unterschiedlicher Weise abgeführt oder aber lokal angereichert wird.

Es ist also erforderlich, sich zunächst den Abschreckvorgang genauer anzuschauen. Ausgehend von einer homogenen Temperaturverteilung über das gesamte Wärmebehandlungsgestell bzw. Bauteil zum Ende des Lösungsglühvorgangs, erfolgt nach Eintritt in das Wasserbad ein schneller Wärmeaustrag. Die Wärmestromdichte \dot{q} ist dabei von der Wärmeaustauschfläche A und der Wärmeleitfähigkeit λ abhängig.

Wärmestromdichte

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial s}$$

Formel 5-10

s... Flächennormale

Wärmestrom

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

Formel 5-11

An der heißen Bauteiloberfläche erfolgt durch die hohe Erhitzung des Wassers über die Siedetemperatur hinaus der Phasenübergang von flüssig zu dampfförmig. Dieser entstehende Dampf Film reduziert zunehmend die Wärmeübertragung aus dem Bauteil an das Abschreckmedium. Die Wärmestromdichte sinkt zunehmend ab, bis die ortsvariante Leidenfrost-Temperatur erreicht ist. An diesem Punkt geht das stabile Filmsieden im Zuge zunehmender Dampfmenge zum instabilen Filmsieden über, bei dem turbulent große Dampfblasen aufsteigen. Die Wärmestromdichte nimmt wie auch die Anzahl aufsteigender Dampfblasen zu, bis ein Maximum erreicht ist. Mit zunehmender Abkühlung der Wärmebehandlungscharge und damit abnehmender Übertemperatur geht das Filmsieden in das Blasensieden über. Im Zuge weiterer Abkühlung reduzieren sich aufsteigende Dampfblasen bis das Konvektionssieden erreicht ist. Dieser Vorgang lässt sich mittels der Nukijama-Kurve gemäß Abbildung 5-8 veranschaulichen.

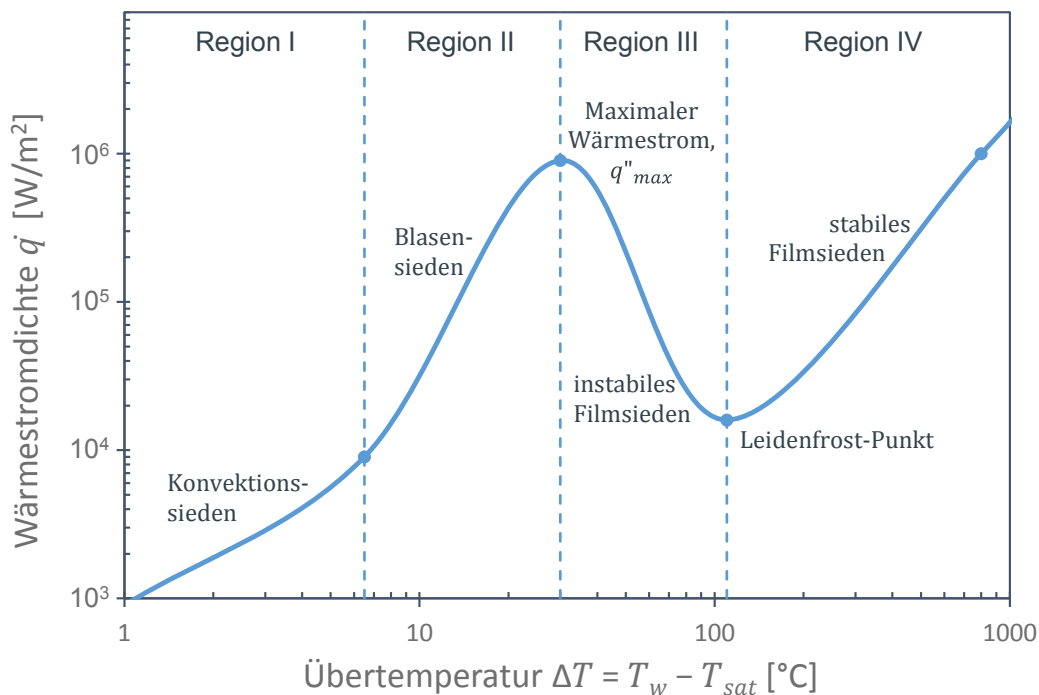


Abbildung 5-8: Nukijama-Kurve – Abhängigkeit der Wärmestromdichte von der Überhitzung beim Behältersieden in Anlehnung an [222, 223]

Formgebung und geometriebedingte Wandstärkenunterschiede am Gussteil führen zu lokal unterschiedlichen Masseverhältnissen bezogen auf die zugehörige lokale Oberfläche. Damit variiert die lokale Wärmemenge, die beim Abschreckvorgang abgeführt werden soll. Zwar erfolgt ein Wärmeaustausch innerhalb der Geometrie, dennoch entsteht eine Disbalance im Wärmehaushalt. Dünnwandige Bereiche kühlen als Folge schneller ab als dickwandige Bereiche. Verstärkt wird dieser Effekt durch Wasserbadtemperatur und Badbewegung und der damit variierenden Wärmestromdichte.

Dadurch wird die Gleichmäßigkeit der temperaturabhängigen Volumenkontraktion beeinflusst. Während die dünneren Bereiche schneller schrumpfen, können Eigenspannungen entstehen.

Die Wechselwirkung aus Bauteilgeometrie, Bauteillage, Temperaturgradient beim Abschrecken und Badumwälzung bestimmen maßgebend die Entstehung und Höhe der Eigenspannungen. Deren Art, also Zug- bzw. Druckeigenspannungen, wird von der Geometrie bestimmt.

Zur Verifizierung der Eigenspannungsthese werden weder die Röntgendiffraktometrie noch die Bohrlochmethode genutzt, da diese nur zur oberflächennahen Detektion von Eigenspannungen dienen. Tieferliegende Eigenspannungen können beispielsweise mittels hochenergetischer Synchrotronstrahlung ermittelt werden. [224] Dieses Verfahren fand aus Zeit- und Kostengründen jedoch keine Anwendung.

Dementsprechend soll mit Hilfe der Eigenspannungssimulation der rechnerische Nachweis erfolgen, dass basierend auf den gegebenen unterschiedlichen Abschreckbedingungen unterschiedliche Eigenspannungen vorliegen. Dazu sind im ersten Schritt Messungen des lokalen Abschreckverhaltens am Bauteil erforderlich, um das Berechnungsmodell validieren zu können.

Hierzu wird der Radträger gemäß Abbildung 5-9 an neun Messstellen unterschiedlicher Tiefe mit Thermoelementen bestückt. Ein weiterer Sensor in der Nähe dient zur Aufnahme der Umgebungstemperatur. Alle Thermoelemente sind an

ein Temperaturprofilmessgerät mit Datenloggerfunktion angeschlossen, welches jede halbe Sekunde für jeden Kanal eine Messung durchführt. Damit alle Prozessschritte und insbesondere auch das Abschrecken erfasst werden können, ist dieser Datenlogger in ein hitzebeständiges und wasserdichtes Gehäuse eingebettet. Während für Kammer- und Durchlauföfen eine Messfahrt durchgeführt werden kann, sind die Segmente des Drehherdofens zu klein, um das Messequipment aufzunehmen. Daher kann hier kein Versuch durchgeführt werden.

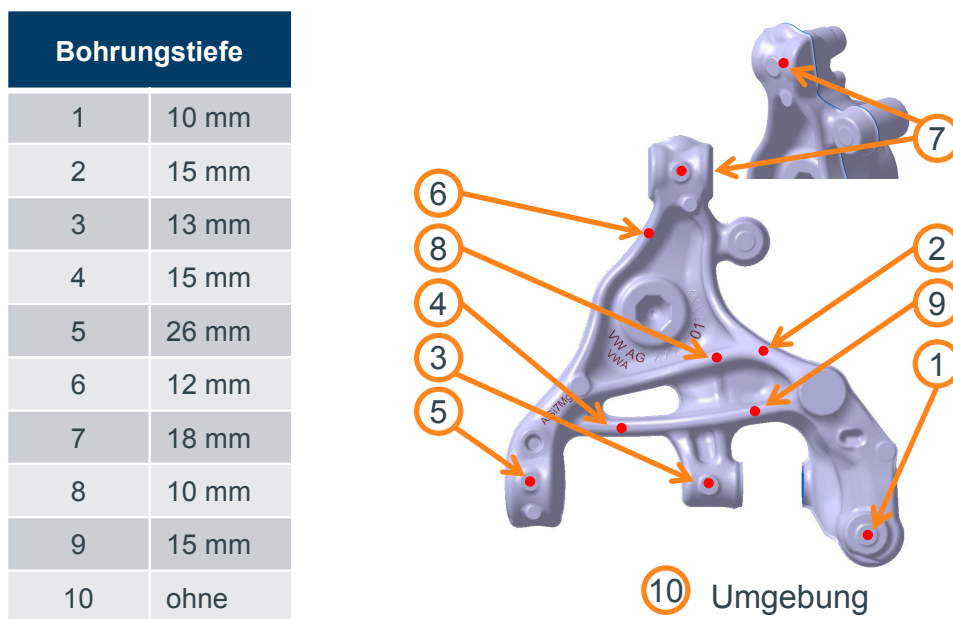


Abbildung 5-9: Tiefe und Verteilung der Messstellen am untersuchten Aluminium-Radträger

In Abbildung 5-10 sind die Temperaturkurven der neun Messfühler im Bauteil sowie des Messfühlers an Umgebungsluft für den Kammerofen dargestellt. Gezeigt wird der Zeitraum des Abschreckens vom Ende des Lösungsglühens bis zum Abkühlen des Bauteils auf Umgebungstemperatur. Tabelle 5-6 fasst die Ergebnisse zusammen. Ausgehend von der Öffnung des Ofens ist zu erkennen, dass das betrachtete Bauteil im Kammerofen nach 41 Sekunden vollständig unter Wasser eingetaucht ist. Während der Ofenöffnung und des Handlingsprozesses bis zum Eintauchen verliert das Bauteil dabei etwa 11 K. Während des Abschreckprozesses sind die Messbereiche nach 8 bis 13,5 Sekunden auf unter 200°C und nach 10,5 bis 20 Sekunden auf unter 100°C abgekühlt. Die Abschreckgeschwindigkeit $v_{T1,K0}$ im relevanten Temperaturbereich bis 200°C liegt dabei im Mittel bei 36 K/s. Die

Schwankungsbreite reicht von 26 bis 43,8 K/s. Hohe Abschreckraten sind hierbei in dünnen (Position 4, 6 und 8) sowie zuerst eintauchenden und somit exponierten Bereichen (Position 1 und 3) erwartungsgemäß festzustellen. Dickwandigere Bereiche (Positionen 2, 5, 7 und 9) sind durch niedrigere Abschreckraten gekennzeichnet.

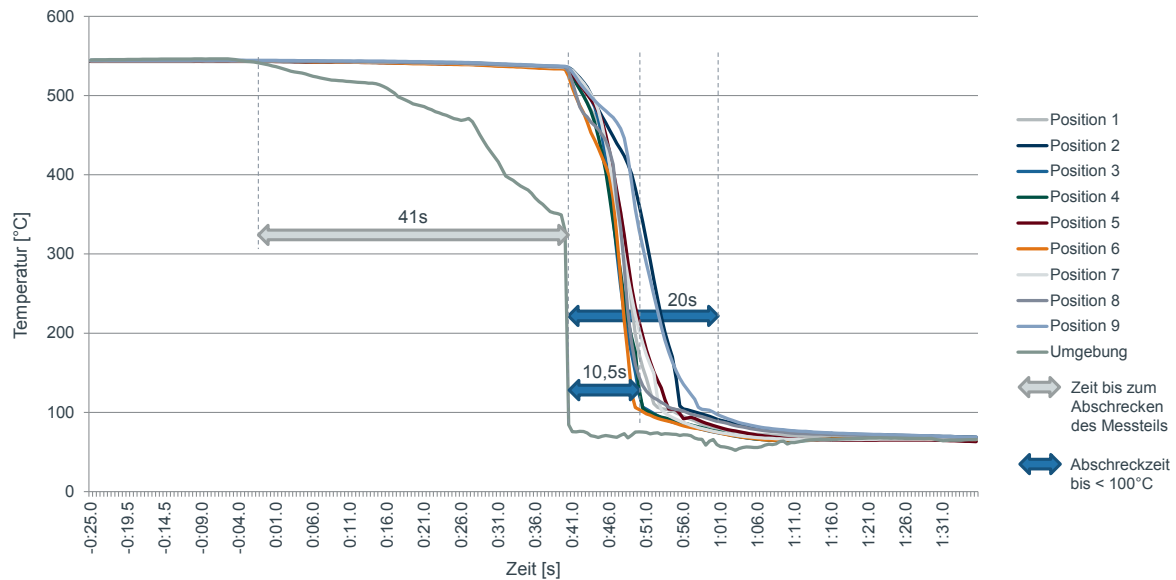


Abbildung 5-10: Temperaturkurven, Auszug der Messfahrt im Kammerofen, Teilbereich des Abschreckvorgangs, Messteil mit Positionen 1-9 sowie Umgebungstemperatur

Das weitere Abkühlverhalten auf unter 100°C flacht zu tieferen Temperaturen etwas ab, sodass die Abschreckgeschwindigkeit $v_{T2,KO}$ ausgehend von der Eintauchtemperatur $T_{E,KO}$ auf im Mittel 31,5 K/s abfällt.

Betrachtet man das in Abbildung 5-11 visualisierte Abschreckverhalten des Bauteils im Durchlaufofen, sind Abweichungen festzustellen. Trotz gleicher Bauteillage sind signifikante Differenzen im Abschreckverhalten, wie aus Tabelle 5-8 hervorgeht, auszumachen. Die Zeit von der Ofenöffnung bis zum Eintritt ins Wasserbad ist mit 39 Sekunden nahezu identisch. Der dabei zu verzeichnende Temperaturabfall ist mit 15 K allerdings höher als im Kammerofen, bei dem nur ein Abfall von 11 K festgehalten werden kann. Die Messbereiche sind bereits nach 3 bis 8,5 Sekunden auf unter 200°C bzw. nach 6 bis 12 Sekunden auf unter 100°C abgekühlt. Für das im Durchlaufofen untersuchte Bauteil ergibt sich eine Abschreckgeschwindigkeit $V_{T1,DLO}$

von im Mittel 68,7 K/s bei einer Schwankungsbreite von 39,8 bis 105,3 K/s. Die Abschreckgeschwindigkeit ist damit gegenüber dem Kammerofen im Mittel fast doppelt so hoch. Bereichsbezogen ist das Abschreckverhalten vergleichbar mit dem Kammerofen. Dickwandige Bereiche kühlen erwartungsgemäß langsamer ab, als dünnwandige Bereiche.

Tabelle 5-6: Temperaturen, Abschreckzeiten und -geschwindigkeiten bei der Wärmebehandlung im Kammerofen

Kammerofen		Position der Messfühler									Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$T_{E, KO}$	[°C]	535,2	535,3	533,1	531,3	531,2	524,1	533,9	529,7	535,6	532,2
$T_1 (< 200^\circ\text{C})$	[°C]	198,3	184,5	195,7	194,2	196,3	173,6	186,9	187,0	191,1	189,7
ΔT_1	[K]	336,9	350,8	337,4	337,1	334,9	350,5	347,0	342,7	344,5	342,4
$T_2 (< 100^\circ\text{C})$	[°C]	99,2	99,2	98,5	99,4	98,4	98,2	99,2	99,7	97,6	98,8
ΔT_2	[K]	436,0	436,1	434,6	431,9	432,8	425,9	434,7	430,0	438,0	433,3
$t_1 (< 200^\circ\text{C})$	[sec]	9,0	13,5	8,0	8,5	10,0	8,0	10,0	8,5	13,0	9,8
$t_2 (< 100^\circ\text{C})$	[sec]	14,5	17,5	11,5	11,0	15,0	10,5	13,0	16,0	20,0	14,3
$v_{T1, KO}$	[K/sec]	37,4	26,0	42,2	39,7	33,5	43,8	34,7	40,3	26,5	36,0
$v_{T2, KO}$	[K/sec]	30,1	24,9	37,8	39,3	28,9	40,6	33,4	26,9	21,9	31,5

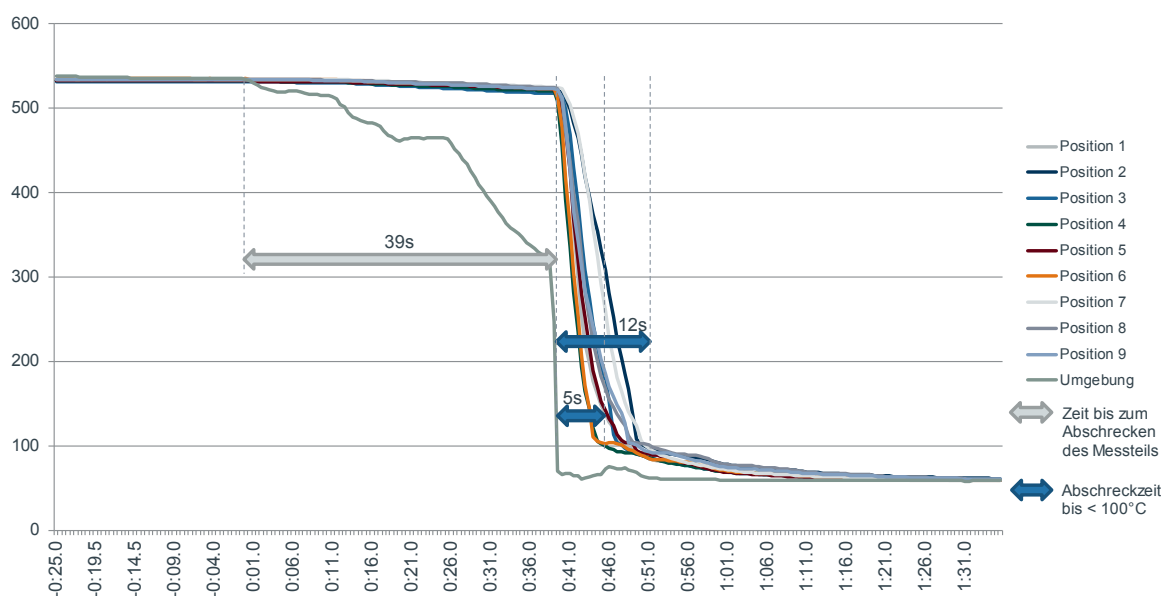


Abbildung 5-11: Temperaturkurven, Auszug der Messfahrt im Durchlaufofen, Teilbereich des Abschreckvorgangs, Messteil mit Positionen 1-9 sowie Umgebungstemperatur

Auch hier ist das weitere Abkühlverhalten auf unter 100°C zu tieferen Temperaturen hin durch eine Abflachung gekennzeichnet, sodass die Abschreckgeschwindigkeit $v_{T_2, DLO}$ ausgehend von der Eintauchtemperatur $T_{E, DLO}$ auf im Mittel 44,6 K/s abfällt.

Tabelle 5-7: Temperaturen, Abschreckzeiten und -geschwindigkeiten bei der Wärmebehandlung im Durchlaufofen

Durchlaufofen		Position der Messfühler									Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$T_{E, DLO}$	[°C]	518,3	522,9	517,7	509,1	515,3	512,2	524,7	523,9	521,9	518,4
$T_1 (< 200^\circ\text{C})$	[°C]	197,3	184,4	195,7	193,2	189,3	170,8	180,9	182,5	184,5	186,5
ΔT_1	[K]	321,0	338,5	322,0	315,9	326,0	341,4	343,8	341,4	337,4	331,9
$T_2 (< 100^\circ\text{C})$	[°C]	98,4	99,3	97,1	97,6	94,3	98,4	97,4	98,8	97,2	97,6
ΔT_2	[K]	419,9	423,6	420,6	411,5	421,0	413,8	427,3	425,1	424,7	420,8
$t_1 (< 200^\circ\text{C})$	[sec]	4,0	8,5	5,5	3,0	4,5	3,5	7,5	5,5	6,0	5,3
$t_2 (< 100^\circ\text{C})$	[sec]	9,0	11,0	8,5	6,5	10,0	8,5	11,5	12,0	10,5	9,7
$v_{T_1, DLO}$	[K/sec]	80,3	39,8	58,5	105,3	72,4	97,5	45,8	62,1	56,2	68,7
$v_{T_2, DLO}$	[K/sec]	46,7	38,5	49,5	63,3	42,1	48,7	37,2	35,4	40,4	44,6

Für die einzelnen Bereiche vergleicht Tabelle 5-8 die einzelnen Bereiche für Kammer- und Durchlaufofen.

Tabelle 5-8: Lokale Abschreckzeiten des Radträgers von Eintritt in das Abschreckbecken bis unter 200°C bei Kammer- und Durchlaufofen

Position		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1 (< 200^\circ\text{C})$ [sec]	KO	9,0	13,5	8,0	8,5	10,0	8,0	10,0	8,5	13,0
	DLO	4,0	8,5	5,5	3,0	4,5	3,5	7,5	5,5	6,0
Differenz		5,0	5,0	2,5	5,5	5,5	4,5	2,5	3,0	7,0

Veranschaulicht man die sich ergebenden Abschreckgeschwindigkeiten vergleichend für die beiden Öfen, wie in Abbildung 5-12 zu sehen, ist festzuhalten, dass für den Kammerofen über das Bauteil gesehen geringe Abweichungen an den Messorten festzustellen sind. Damit ist das Abschreckverhalten deutlich homogener, als im Durchlaufofen, welcher eine deutlich höhere Schwankung zeigt. Von der niedrigsten

zur höchsten lokalen Abschreckgeschwindigkeit ist ein Faktor von 2,64 zu verzeichnen. Dieser liegt gegenüber einem Faktor 1,68, der für den Kammerofen errechnet wird, um 57 % höher.

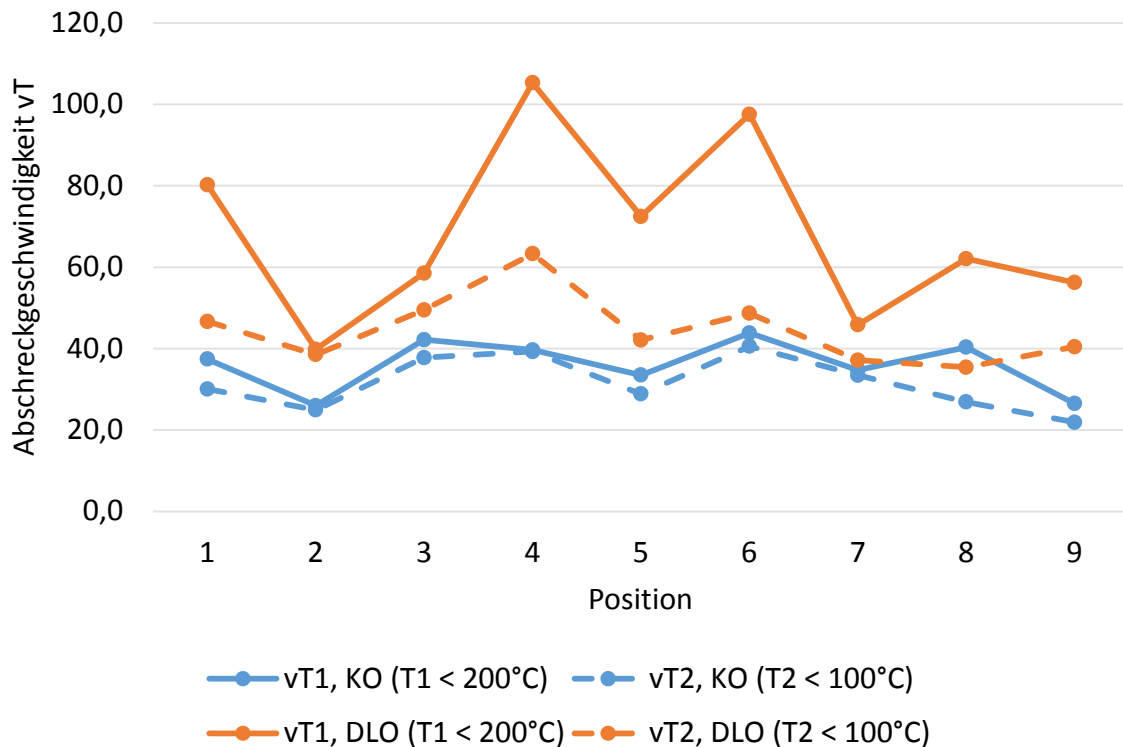


Abbildung 5-12: Vergleich der Abschreckgeschwindigkeiten für Kammerofen (KO) und Durchlauföfen (DLO) im Radträger

Dieses Verhalten ist offenbar auf die unterschiedliche Chargengröße und das unterschiedliche Wasservolumen des Abschreckbeckens gemäß Tabelle 5-2 zurückzuführen. Insbesondere die lokal größeren Abweichungen der Abschreckgeschwindigkeit, die für den Durchlauföfen zu verzeichnen sind, ergeben folglich ein höheres Potenzial, Eigenspannungen auszubilden. Dies beeinflusst in der Folge das dynamische Bauteilverhalten.

Simulation des Abschreckverhaltens

Aus den ermittelten Messwerten kann nun die Ableitung eines validierten Modells zur Berechnung des Abschreckverhaltens erfolgen. Hierzu wird die CFD-Software Star CCM+ der Firma CD-Adapco [225] genutzt. Durch lokale Modellierung gelingt es, wie

aus Abbildung 5-13 am Beispiel des Vergleichs der Kurven für die Messung im Kammerofen und der zugehörigen Simulation ersichtlich, dem realen Abkühlverlauf nahe zu kommen.

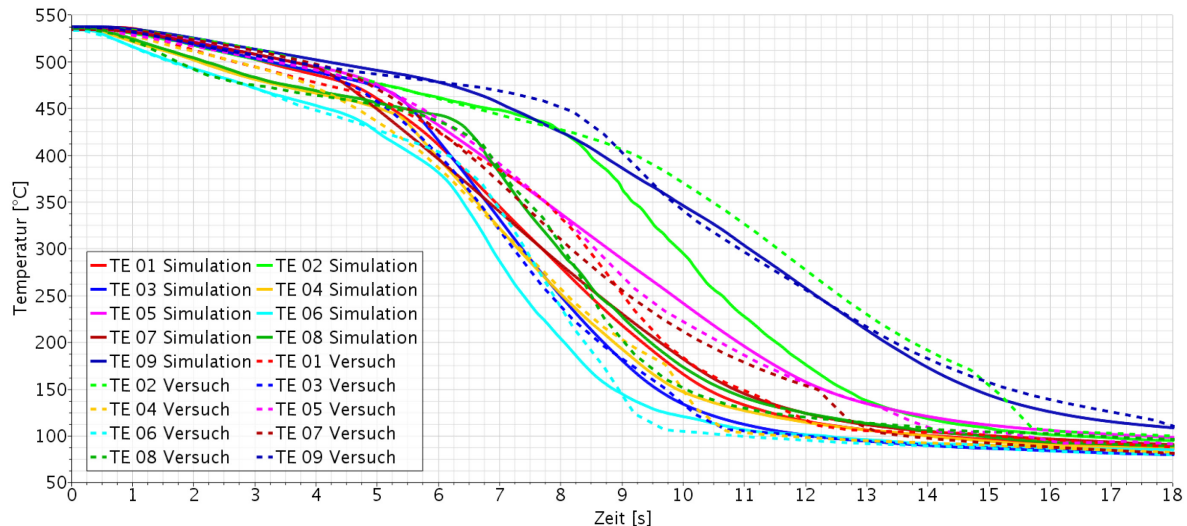


Abbildung 5-13: Simulationsgüte, Vergleich des Temperaturverlaufs von Versuch und Simulation während des Abschreckvorgangs am Beispiel des Kammerofens

Während in der CFD-Simulation das Rohteil betrachtet werden muss, wird für die Betriebslasten- und Lebensdauerberechnung das Fertigteil benötigt. Hierfür ist es erforderlich, das zeitabhängige Temperaturfeld der CFD-Berechnung über saubere Schnittstellen der Netze von Roh- und Fertigteil zu übertragen. Dazu wird zu Beginn der Modellierung das Fertigteil, wie in Abbildung 5-14 veranschaulicht, um seine Fertigungserfordernisse, also aller Materialzugaben, die in der späteren mechanischen Bearbeitung entfernt werden, ergänzt. Diese zusammengehörigen Geometrien werden unter Berücksichtigung der gemeinsamen Anlagebereiche vernetzt. Die Kunden-Geometrie dient dabei als Basis für das Fertigteil-Netz. Die Fertigungserfordernisse werden zur Erstellung des Ergänzungsnetzes verwendet. Zusammengenommen bilden sie das Rohteil ab. Dieses wird in der CFD-Simulation genutzt. An den FEM-Solver wird nach der Simulation des Abschreckvorgangs das zusammengesetzte Netz mit den knotenzugehörigen Informationen übergeben.

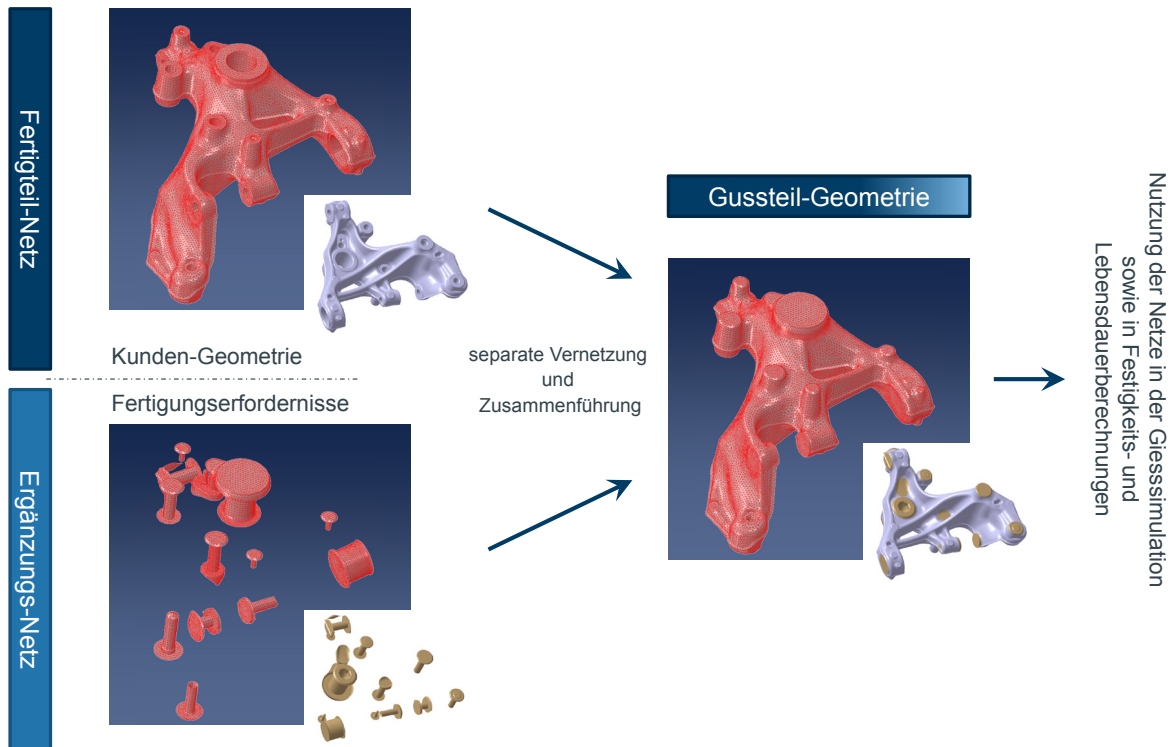


Abbildung 5-14: Knotenkonformes FEM-Netz für die Berücksichtigung von Roh- und Fertigteilgeometrie

Diese Informationen bilden das lokale Abschreckverhalten ab. Daraus können unter Berücksichtigung des Materialverhaltens bei unterschiedlich starker Kontraktion vorliegende Spannungen berechnet werden. Zur Berechnung dieser Eigenspannungen sowie im Weiteren der Betriebslasten- und Lebensdauerrechnungen wird der FEM-Solver ABAQUS [226] verwendet.

Die ermittelten Eigenspannungen liegen in Form einer Vorlast knotenbezogen vor, wie Abbildung 5-15 schematisch darstellt. Die Informationen werden als statische Eingangsgröße für die nachgelagerten Berechnungen genutzt. Dies sind neben der Berechnung der Betriebslastfälle auch die Missbrauch- und Sonderereignislastfälle. Für die Betriebslastfälle ergänzen die Eigenspannungen unter Berücksichtigung der Art (Zug/Druck) die durch die statischen Ersatzlastfälle verursachten Spannungen. Der Ablauf entspricht dabei dem Schema gemäß Abbildung 5-16. Darüber hinaus kann auch die Prüfstandsbelastung eines ein- oder mehrkomponentigem Prüfstandes nachgebildet werden. Für den vorliegenden Fall ist die Simulation des Einkomponenten-Prüfstands von besonderem Interesse.

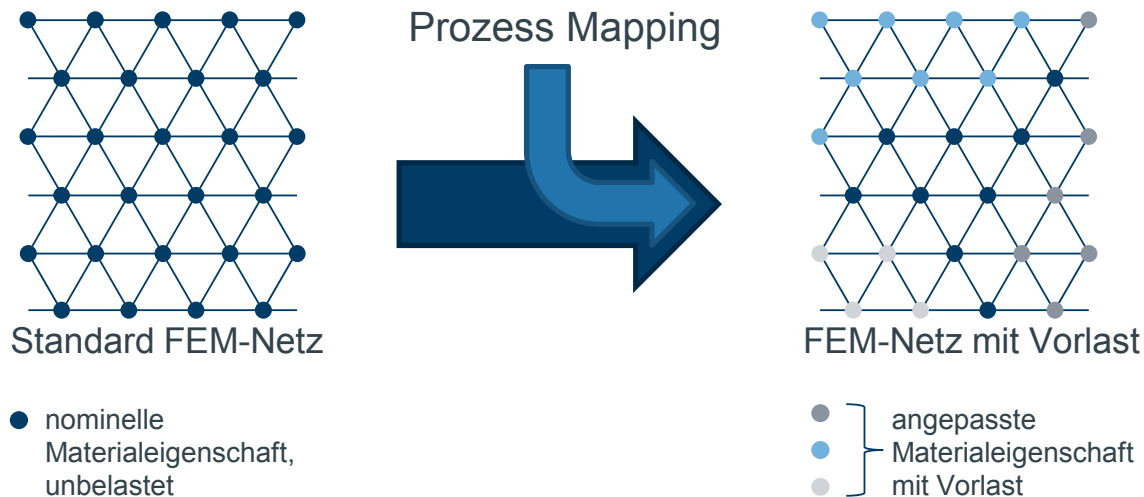


Abbildung 5-15: Schematische Darstellung der Eigenspannungen durch Überführung der abschreckbedingten Temperaturvarianzen

Hierzu wird der Aufbau in Abaqus nachgebildet und eine Modellierung für beide Lastniveaus gemäß dem in Abbildung 5-17 visualisiertem Vorgehen erstellt. Hierbei wirkt nur ein dynamischer Kanal mit sechs Komponenten auf das Bauteil ein, die sich auf drei Kräfte (F_x , F_y und F_z) sowie drei Momente (M_x , M_y und M_z) aufteilen.

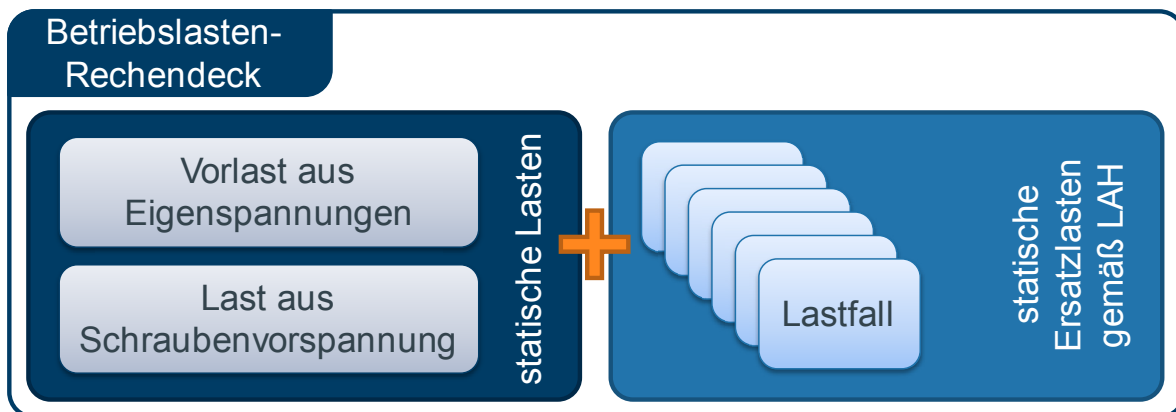


Abbildung 5-16: schematische Darstellung des Aufbaus eines Betriebslasten-Rechendecks unter Berücksichtigung von Eigenspannungen

Durch die konstanten Vorlasten aus Schraubenvorspannung und Eigenspannungssituation wird die aus der dynamischen Belastung resultierende Mittelspannung lokal verändert und das Schädigungsverhalten beeinflusst.

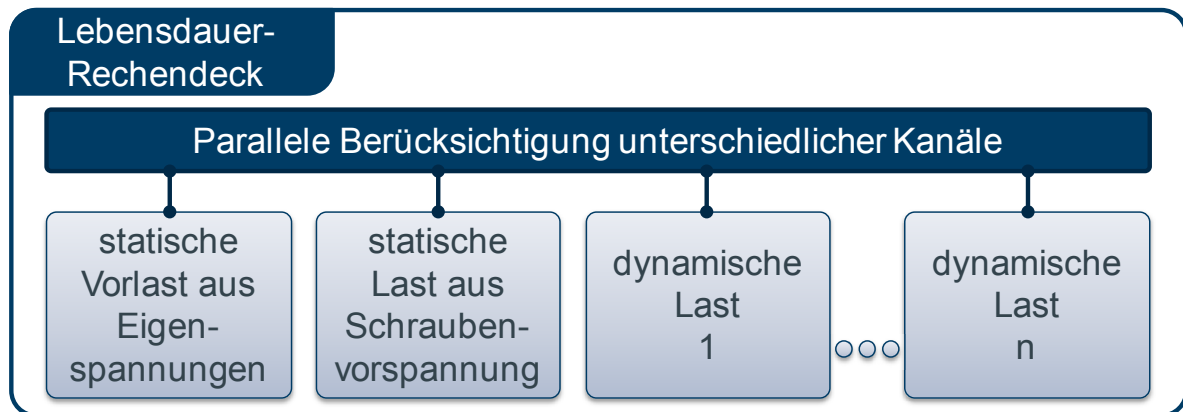


Abbildung 5-17: schematische Darstellung des Aufbaus eines Lebensdauer-Rechendecks unter Berücksichtigung von Eigenspannungen

Bei der Berücksichtigung der Eigenspannungen wird das bis auf Raumtemperatur abgekühlte Rohteil einem Modelchange unterzogen. Dadurch wird das Netz der Fertigungserfordernisse entfernt. Durch diese Vorgehensweise wird die lokale Spannungsänderung durch die mechanische Bearbeitung simuliert. Zumeist erfolgt hierdurch insbesondere bei Druckbelastung eine leichte Entspannung. Dieses Prozess Mapping ist in Abbildung 5-18 exemplarisch für die Wärmebehandlung im Kammerofen nach Basisrezeptur A dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Großteil des Bauteils mit Druckeigenspannungen behaftet ist. Nur lokale Bereiche weisen eine Zugbelastung auf.

In der Lebensdauerrechnung für den Einkomponenten-Versuch findet folglich eine Beeinflussung der Mittelspannung vorzugsweise zu niedrigen Werten hin statt, was eine höhere Lebensdauer zur Folge hat. Bereiche, in denen sich Zugeigenspannungen mit dynamischen Zugkomponenten überlagern, führen zu einem früheren Versagen des Bauteils.

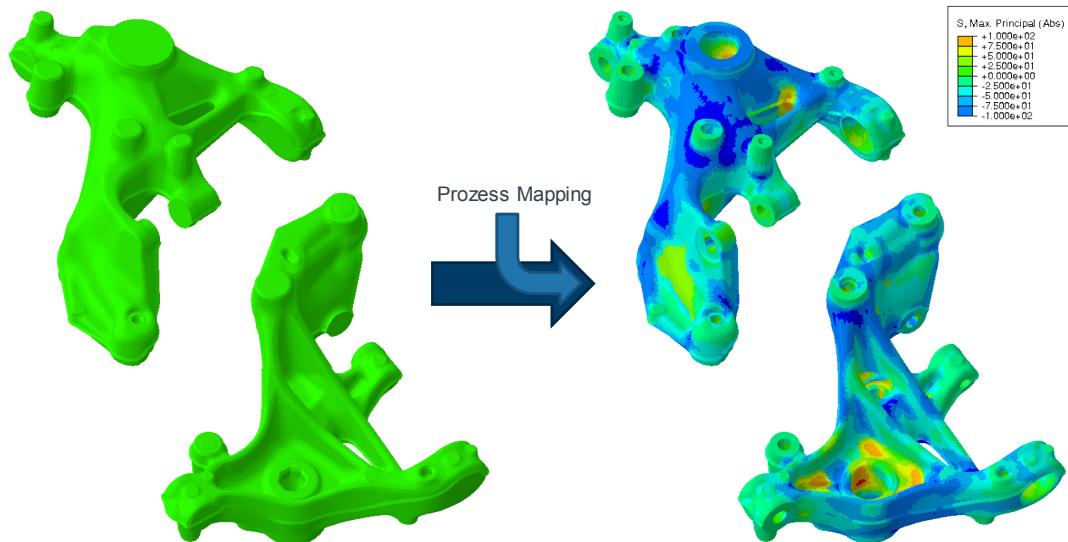


Abbildung 5-18: Vergleich der Bauteilbelastung durch Berücksichtigung des Abschreckvorgangs der Wärmebehandlung nach Basisrezeptur A. Links: konventionell ohne Vorlast; rechts: Berücksichtigung der durch das Abschrecken entstandenen Eigenspannungen; blau: Druckeigenspannungen, orange: Zugeigenspannungen

Die vergleichende Berechnung gemäß Abbildung 5-19 zeigt Unterschiede.

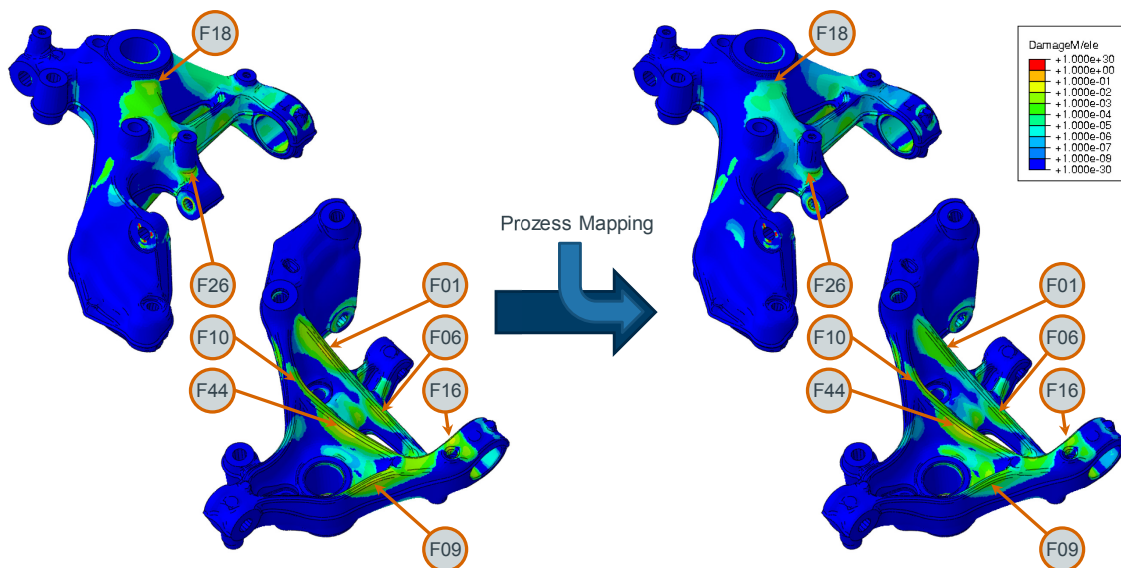


Abbildung 5-19: Vergleich der Belastung auf dem Einkomponenten-Prüfstand am Beispiel des niedrigen Lastniveaus, links: konventionell; rechts: Berücksichtigung der Eigenspannung als Vorlast mit Wärmebehandlung nach Basisrezeptur A

Wie im Schädigungsvergleich aus Tabelle 5-9 erkennbar, wird die vorliegende Druckeigenspannung in den exemplarisch herausgegriffenen Bereichen F01, F09, F18 und F26 nahezu vollständig eliminiert. Die angegebenen Schädigungswerte stellen dabei den reziproken Wert an Durchläufen durch das zu Grunde liegende Prüfband dar. Je niedriger der Schädigungswert ist, desto höher ist die zu erwartende lokale Lebensdauer. Für die ebenfalls durch Druckeigenspannungen entlasteten Bereiche F06, F16 und F44 ist eine signifikante Reduzierung des Schädigungspotenzials zu erkennen. Der Schadensort F10 zeigt durch Zugeigenspannungen dagegen eine geringere Lebensdauer, da diese eine erhöhte Mittellast verursachen.

Tabelle 5-9: Schädigungsvergleich für die 1K-Prüfung am Beispiel des niedrigen Lastniveaus eines Bauteils aus dem Kammerofen bei konventioneller Berechnung und unter Berücksichtigung der Eigenspannungen

Ort	Schädigung			Art
	konventionell	Berücksichtigung der Eigenspannungen		
F01	0,0179	0,0005	- 97,2 %	Druck
F06	0,0064	0,0022	- 65,6 %	Druck
F09	0,0142	0,0004	- 97,2 %	Druck
F10	0,0448	0,0679	51,6 %	Zug
F16	0,1510	0,0390	- 74,2 %	Druck
F18	0,0040	0,0001	- 97,5 %	Druck
F26	0,0285	0,0006	- 97,9 %	Druck
F44	0,0372	0,0152	- 59,1 %	Druck

Vergleicht man nun unterschiedlich schroffes Abschrecken miteinander, wie es im Vergleich von Kammer- und Durchlaufofen vorkommt, ergibt sich das Bild gemäß Abbildung 5-20.

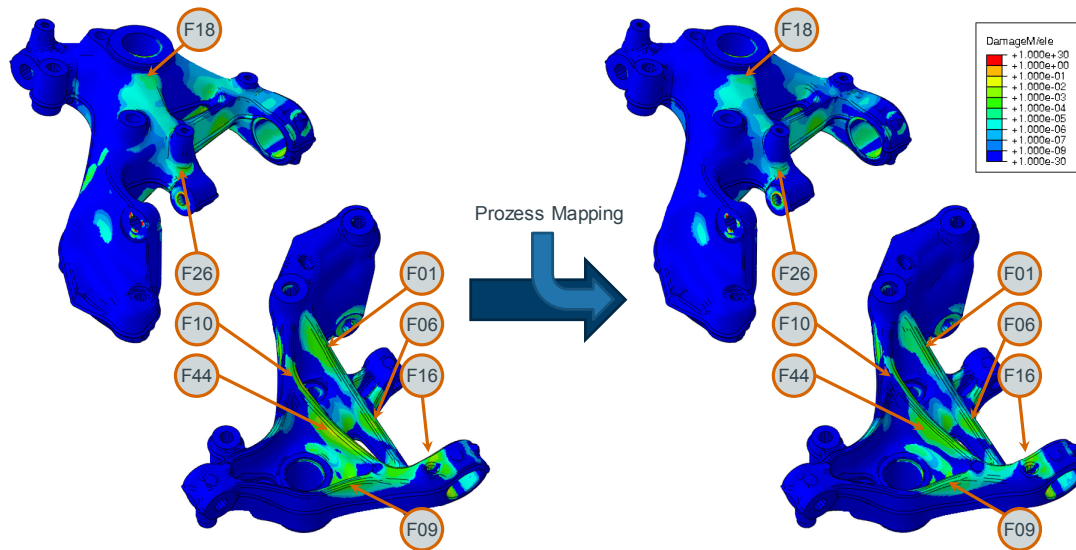


Abbildung 5-20: Vergleich der Lebensdauer auf dem Einkomponenten-Prüfstand für Bauteile aus dem Kammerofen (links) und schoffer abgeschreckter Bauteile, wie sie im Durchlaufofen anfallen (rechts), exemplarisch am niedrigen Lastniveau

Wie aus Tabelle 5-10 erkennbar ist, werden Druck- und Zugeigenspannungen verändert. Dies kann zu einem unterschiedlichen Ausfallverhalten führen.

Tabelle 5-10: Schädigungsvergleich für die 1K-Prüfung am Beispiel des niedrigen Lastniveaus eines Bauteils unter Berücksichtigung von Eigenspannungen resultierend aus niedrigen bzw. hohen Abschreckgeschwindigkeiten

Ort	Schädigung			Art
	Eigenspannungen bei niedrigen Abschreckgeschwindigkeiten	Eigenspannungen bei hohen Abschreckgeschwindigkeiten	Differenz im Schädigungsverhalten	
F01	0,0005	0,0008	+ 60,0 %	Druck
F06	0,0022	0,0018	- 18,2 %	Druck
F09	0,0004	0,0004	0,0 %	Druck
F10	0,0679	0,0596	- 12,2 %	Zug
F16	0,0390	0,0432	+ 10,8 %	Druck
F18	0,0001	0,0001	0,0 %	Druck
F26	0,0006	0,0019	+216,7 %	Druck
F44	0,0152	0,0119	- 21,7 %	Druck

Mit den vorliegenden Ergebnissen konnte nachgewiesen werden, dass in den unterschiedlichen Ofenkonzepten trotz gleicher Grundparametrierung unterschiedliche Eigenspannungen induziert werden können. Diese erklären die identifizierten Unterschiede im dynamischen Bauteilverhalten und die geringen Abweichungen in den mechanischen Kennwerten der untersuchten Zugstäbe.

5.1.2 Einfluss der einzelnen Prozessschritte der Wärmebehandlung

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der einzelnen Wärmebehandlungsparameter auf das dynamische Bauteilverhalten näher untersucht. Hierfür wird wiederum auf Teile, die aus einer Gusscharge stammen, zurückgegriffen. Wie in den vorherigen Untersuchungen werden auch hier, wie aus Abbildung 5-21 hervorgeht, aus jeweils Anfang, Mitte und Ende des Gießens stammende Gussteile für die jeweiligen Versuche zugesteuert.

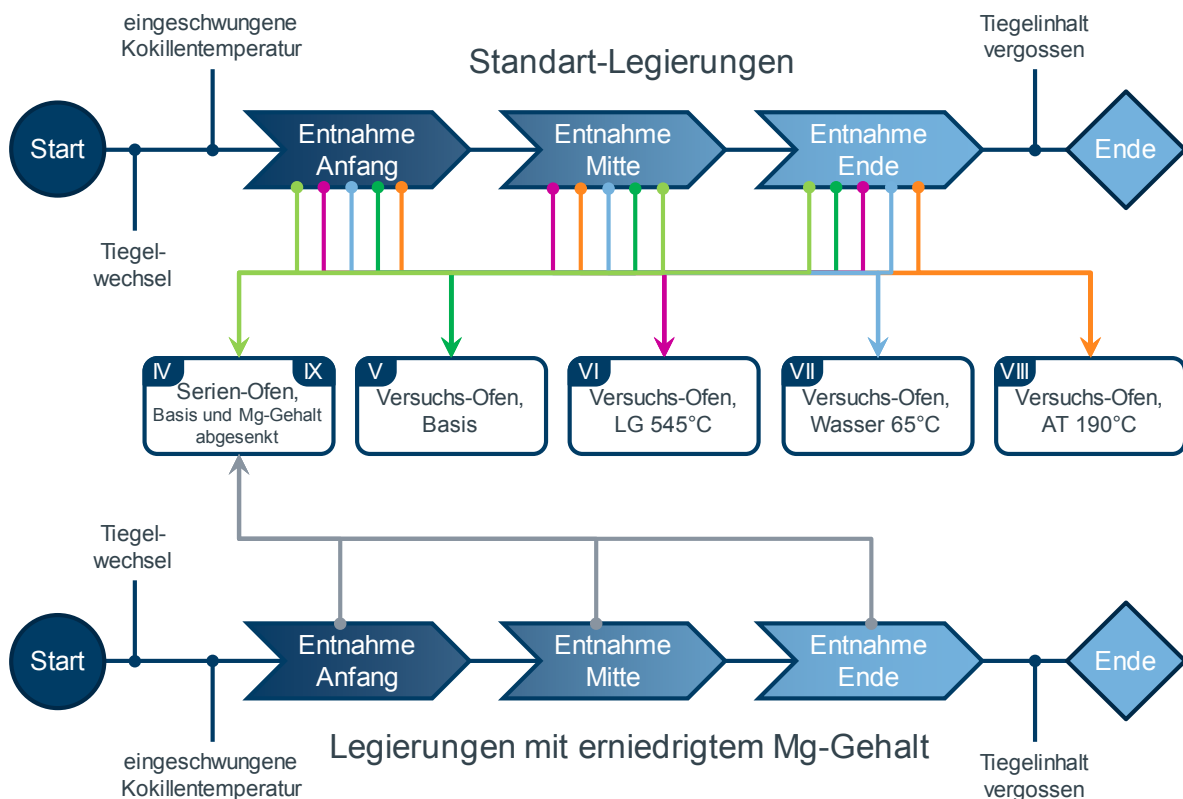


Abbildung 5-21: Aufteilung der Gusscharge für den Parametervergleich

Die Versuche erfolgen sowohl im Durchlauf- als auch im Versuchsofen. Letzterer wird aufgrund größerer Flexibilität eingesetzt. Zunächst erfolgt ein Abgleich der beiden Öfen unter Verwendung der Basisrezeptur B. Zu dieser Wärmebehandlungscharge werden auch Bauteile mit erniedrigtem Magnesiumgehalt aus einer zweiten Gusscharge gegeben. Die zugehörigen Untersuchungen werden in Abschnitt 5.2 näher erläutert.

Der Abgleich beider Öfen ist erforderlich, um die Übertragbarkeit der Parametervariation zu bestimmen. Anschließend wird das Zeit-Temperatur-Regime für die Schritte Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern variiert. Wie aus Tabelle 5-11 hervorgeht, lehnt sich die Rezepturvariation an die Basisrezeptur A an. Die geringen Abweichungen begründen sich durch Berücksichtigung möglicher Durchlaufzeiten und Anlagentechnik in einer späteren Serie. Die Basis bildet auch hier die verkürzte Wärmebehandlung gemäß Kapitel 4.2, Tabelle 4-4. Ausgangspunkt ist die Auslagerungszeit der Basisrezeptur A. Alle anderen Zeiten für Lösungsglühen und Auslagern beziehen sich hierauf.

Tabelle 5-11: Übersicht der Wärmebehandlungsrezepturen für die Parametervariation

Rezeptur	Lösungsglühen		Abschrecken		Auslagern	
	Temperatur [°C]	Zeit [%]	Temperatur [°C]	Zeit [sec]	Temperatur [°C]	Zeit [%]
Basisrezeptur A	542	100	65	< 40	190	57
Basisrezeptur B	535	186	35	< 40	172	171
Variation Lösungsglühen	545	100	25	< 40	172	171
Variation Wasserbadtemperatur	535	186	65	< 40	172	171
Variation Auslagerungstemperatur	535	186	25	< 40	190	67

Bevor die Bauteile der dynamischen Erprobung zugesteuert werden, erfolgt auch hier die Analyse der statischen, mechanischen Kennwerte anhand der Zugprobe. An zwei bis vier Bauteilen sind wiederum jeweils vier Zugstäbe entnommen worden. Tabelle 5-12 gibt einen Überblick der erreichten Mittelwerte. Auffällig ist, dass trotz deutlicher Abweichungen im Zeit-Temperatur-Regime kaum signifikante Abweichungen in den mechanischen Kennwerten zu verzeichnen sind. Auch sind die Ergebnisse zwischen Durchlauf- und Versuchsofen nahezu identisch. Die Variation der

Lösungsglühtemperatur führt zu einem Festigkeitsanstieg von etwa 2,7 % bei der Zugfestigkeit bzw. 2,6 % bei der Dehngrenze und einem Anstieg der Dehnung um 10,1 % gegenüber der Basis (V5). Die erhöhte Wasserbadtemperatur führt mit einem Abfall um 9,0 % zu einer etwas geringeren Bruchdehnung. Die anderen Abweichungen sind kleiner als ein Prozent. Auch sind die ermittelten mechanischen Kennwerte der veränderten Auslagerungsrezeptur sehr dicht an denen der Basisrezeptur. Die Abweichungen betragen maximal 1,5 %. Die Dehnwerte sind sogar identisch. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung sind die Ergebnisse für Zugfestigkeit und Dehngrenze über alle Versuche vergleichbar. In der Bruchdehnung gibt es leichte Abweichungen hin zu höheren Werten bei veränderten Lösungsglühparametern.

Tabelle 5-12: Vergleich der erreichten mechanischen Kennwerte für die betrachteten Versuchsreihen

Mittelwert n = 7-16	Zugfestigkeit Rm		Dehngrenze Rp0,2		Bruchdehnung A5		Rm/Rp0,2
	[N/mm ²]	Stabw.	[N/mm ²]	Stabw.	[%]	Stabw.	
V4 – Basis, DLO 2	335	6,0	275	5,0	8,7	1,4	1,22
V5 – Basis, VO	331	5,7	271	7,4	8,9	1,2	1,22
V6 – VO, LG 545°C	340	3,5	278	4,2	9,8	0,7	1,22
V7 – VO, Wasser 65°C	333	6,6	269	5,0	8,1	1,8	1,24
V8 – VO, AT 190°C	326	4,7	273	6,2	8,9	0,6	1,19

Als Grund für den Abfall bei der Bruchdehnung im Versuch 7 ist die reduzierte Abschreckgeschwindigkeit zu nennen. Das Einfrieren des übersättigten Mischkristalls erfolgt langsamer, zum Lösungsglühn liegt nicht mehr das volle Potenzial in der Legierung vor. Die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften durch die Erhöhung der Lösungsglühtemperatur und –dauer ist einerseits durch die erhöhte Abschreckwirkung begründet. Andererseits haben die Siliziumpartikel theoretisch etwas mehr Zeit zur Eiformung.

Dies kann durch rein visuellen Vergleich des Gefüges, wie aus Abbildung 5-23 hervorgeht, allerdings nicht bestätigt werden. Es ist daher erforderlich, eine Analyse der Partikel durchzuführen. Partikelgröße und deren Eiformgrad können mit Hilfe der Bildanalyse-Software *ImageJ* ausgewertet werden. [227] In Anhang M ist exemplarisch für jede Versuchsreihe ein Analyseergebnis dargestellt. Die

Formbeschreibung erfolgt dabei anhand von vier Parametern. Dies sind die Kreisförmigkeit (circularity), das Seitenverhältnis (aspect ratio), die Rundheit (roundness) sowie die Gestaltbeschaffenheit (solidity). Die Kreisförmigkeit wird durch das Verhältnis von Kreisfläche zu Perimeterfläche, also der Kreisfläche, die sich aus dem Partikelumfang ergibt, beschrieben. Bei einem maximalen Wert von 1,0 ergibt sich ein exakter Kreis. Das Seitenverhältnis beschreibt das Verhältnis der Haupt- und Nebenachsen einer den jeweiligen Partikel exakt umschließenden Ellipse. Bei einem Wert von 1,0 erhält man auch hier einen Kreis. Mit steigendem Wert längt sich die Form zu einer Nadel. Die Rundheit beschreibt das Flächenverhältnis des Partikels zur Kreisfläche, die sich aus der ihn umschließenden Ellipsenhauptachse bildet. Die Gestaltbeschaffenheit ist der Quotient aus der Partikelfläche und der Fläche aus der ihn umgebenden konvexen Hülle.

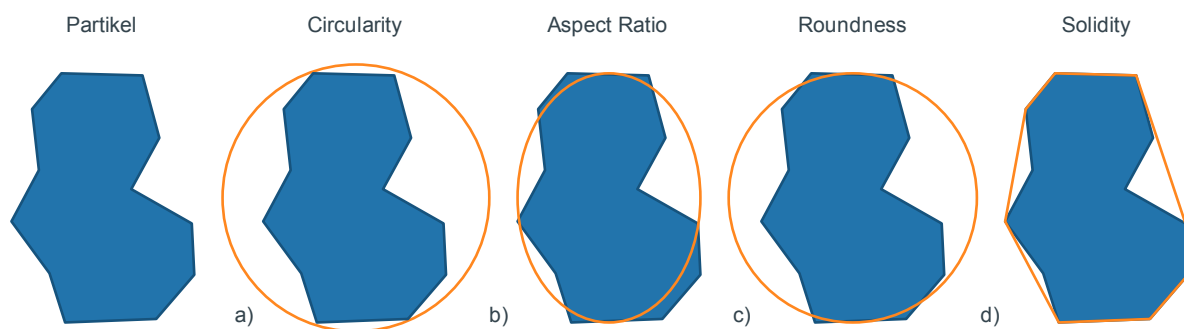


Abbildung 5-22: Methoden zur Analyse der Siliziumpartikelgröße für a) Kreisförmigkeit (circularity), b) Seitenverhältnis (aspect ratio), c) Rundheit (roundness) sowie d) Gestaltbeschaffenheit (solidity)

In der durchgeführten Analyse von Zugstäben, die aus Bauteilen im Bereich der Messposition 9 entnommen wurden und aus den vier Wärmebehandlungsversuchen im Versuchsofen stammen, sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-13 dargestellt.

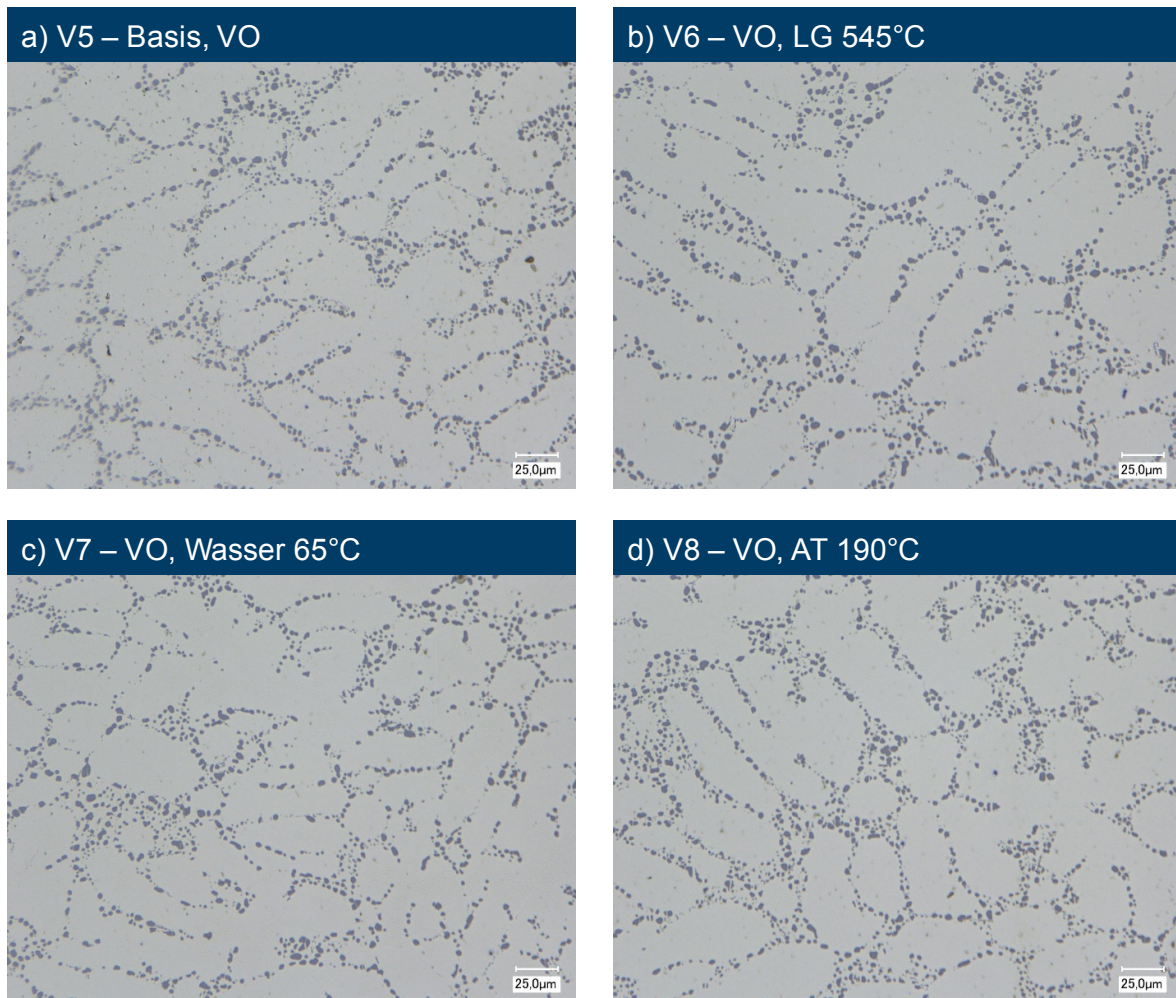


Abbildung 5-23: Gefügevergleich der Versuche der Parametervariation, oben links: V5, Basis Versuchsofen; oben rechts: V6 – VO, LG 545°C; unten links: V7 – VO, Wasser 65°C; unten rechts: V8 – VO, AT 190°C

Während die mittlere Partikelgröße einer sehr großen Streuung unterliegt, welche die mittlere Flächengröße übersteigt und somit nicht sicher vergleichend gewertet werden kann, sind die formdefinierenden Parameter geringerer Streuung unterworfen. Für die unterschiedlichen Wärmebehandlungsversuche weisen alle vier Parameter jeweils nahezu identische Werte auf. Die Abweichungen zueinander liegen zwischen einem und ca. 4 %, wohingegen die Streuung zwischen 9 % (solidity) und 36 % (aspect ratio) liegt. Ein Zusammenhang zu den zugehörigen mechanischen Kennwerten ist dabei nicht nachzuweisen.

Tabelle 5-13: Siliziumpartikel-Analyse für die unterschiedlichen Wärmebehandlungsversuche

	average Area	StabW	Circularity	StabW	Aspect Ratio	StabW	Roundness	StabW	Solidity	StabW
V5 – Basis, VO	80,4	108,8	0,852	0,174	1,560	0,506	0,693	0,174	0,873	0,080
V6 – VO, LG 545°C	126,7	164,3	0,850	0,167	1,537	0,519	0,704	0,173	0,880	0,075
V7 – VO, Wasser 65°C	105,9	131,7	0,838	0,175	1,593	0,543	0,683	0,176	0,872	0,078
V8 – VO, AT 190°C	118,1	145,7	0,835	0,188	1,552	0,517	0,699	0,177	0,873	0,078

Im Weiteren wurden längs der geprüften Zugstäbe sDAS-Messungen für die jeweiligen Versuche durchgeführt. Die Auswertung bestätigt das Vorliegen gleichmäßigen und vergleichbaren Gefüges. Zur Analyse wurden dabei mehrere zusammenhängende Gefügaufnahmen mittels der Stitching-Funktion zu einem großflächigen Bild zusammengefügt. Dadurch wird der Auswertebereich vergrößert und das Ergebnis aufgrund einer Vielzahl erfasster Dendriten vertrauenswürdiger. Ausgewertet wurden je Versuch und Ort mindestens drei Stitching-Aufnahmen. Abbildung 5-24 zeigt exemplarisch das Gefüge und die sDAS-Messung der Proben aus Versuch 11. Die sDAS-Messungen sind mit Hilfe des Programms *DAS Professional* der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. [228] durchgeführt worden.

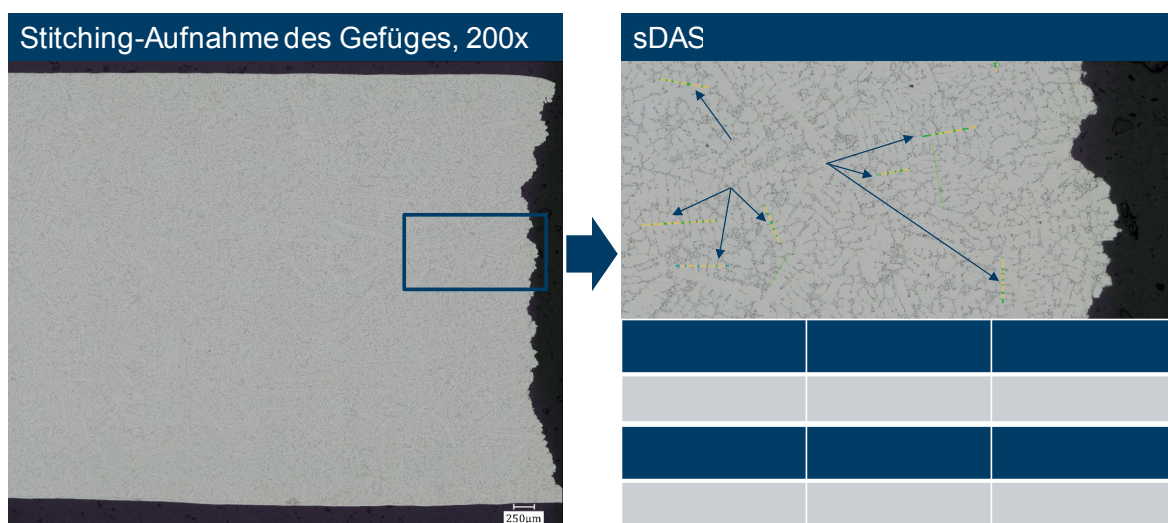


Abbildung 5-24: Auszug aus der Auswertung der sekundären Dendritenarmabstände (sDAS) exemplarisch für eine Probe aus Versuch 7

Die Ergebnisse der Messungen sind als Mittelwerte für jeweils zwei untersuchte Stäbe aus dem Messbereich 2 (Stab A) und dem Messbereich 4 (Stab B) in Tabelle 5-14 wiedergegeben. Die Ergebnisse liegen mit im Mittel 24,8 bis 26,9 μm für den Bereich 2 bzw. 31,2 bis 34,6 μm für den Bereich 4 bereichsbezogen eng beieinander. Die Standardabweichung liegt bei gut 4 bis 10 %. Daher sind die Ergebnisse bereichsbezogen als vergleichbar einzustufen. Die Abweichungen der Bereiche zueinander lassen sich auf unterschiedliche Erstarrungsgeschwindigkeiten zurückführen.

Tabelle 5-14: Ergebnisse der sDAS-Messung an Probestäben im Bereich der Messstellen 2 (Stab A) und 4 (Stab B)

Versuch	sDAS (sekundärer Dendritenarmabstand)			
	Stab A, MW [μm]	StabW	Stab B, MW [μm]	StabW
V5 – VO, Basis	26,9	2,7	31,2	4,0
V6 – VO, LG 545°C	25,4	2,1	34,6	3,0
V7 – VO, Wasser 65°C	24,8	1,1	32,3	1,0
V8 – VO, AT 190°C	26,4	2,1	32,5	3,8

Auf Basis der vorliegenden vergleichbaren Ergebnisse aus der Analyse von Siliziumpartikeln und der sDAS-Messung sowie den ebenfalls vergleichbaren mechanischen Eigenschaften stellt sich die Frage, wie sich die bisher erzielten Ergebnisse auf das dynamische Bauteilverhalten auswirken. Auch ist von Interesse, ob die geringen Abweichungen in der Bruchdehnung für die Versuche 6 und 7 signifikante Auswirkungen haben.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung sind wiederum einkanalige Schwingprüfungen durchgeführt worden. Hierzu sind je Lastniveau 8 Teile geprüft worden. Begonnen wurde dabei mit dem Abgleich von Durchlauf- und Versuchsofen. Wie aus Abbildung 5-25 ersichtlich ist, führen beide Öfen erwartungsgemäß zu vergleichbaren Schwingspielen und vergleichbarer Wöhlerneigung.

Damit kann aus allen weiteren Ergebnissen für das Bauteilverhalten vom Versuchsauf den Durchlaufofen zurückgeschlossen werden. In den folgenden Untersuchungen wird der Vergleich zur Basisrezeptur im Versuchsofen durchgeführt.

Die hier erreichten Schwingspielzahlen werden als Basis genutzt und für den Vergleich als 100% für das jeweilige Lastniveau gesetzt.

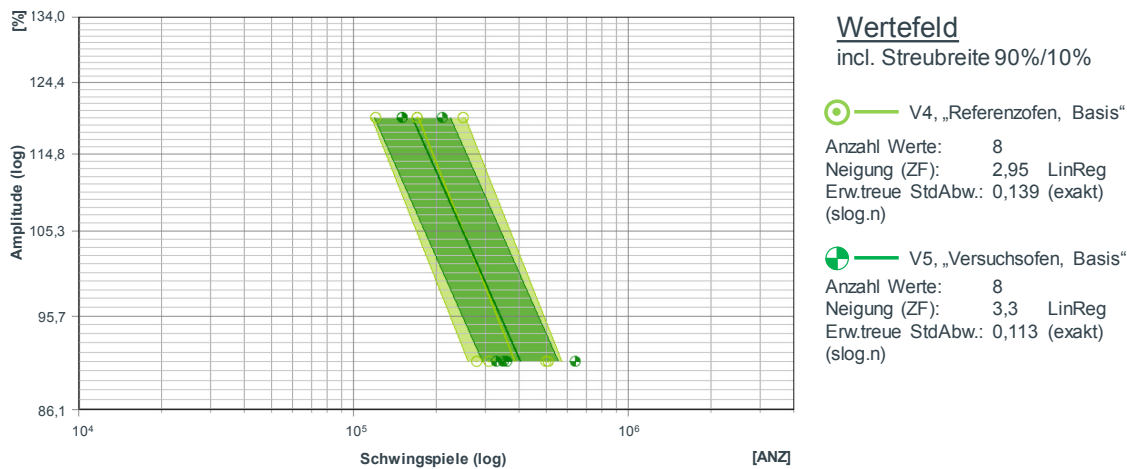


Abbildung 5-25: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Serien-Ofen vs. Versuchsofen, Basisrezeptur

Schaut man sich die erzielten Schwingspiele bei erhöhter Auslagerungstemperatur gemäß Versuch 6, wie sie in Abbildung 5-26 vorzufinden sind, an, kann eine deutliche Steigerung der erzielten Schwingspiele auf niedrigem Lastniveau beobachtet werden. Auf hohem Lastniveau sind die erzielten Schwingspiele nahezu unverändert. Die Neigung der Wöhlerkurve steigt um 41,3 % von 3,3 auf 4,68. Die Streuung der Ergebnisse ist dabei vergleichbar.

Betrachtet man nun die Ergebnisse der Erhöhung der Wasserbadtemperatur gemäß Abbildung 5-27, ist eine nahezu Parallelverschiebung hin zu höheren Lastwechselzahlen zu beobachten. Das hohe Lastniveau nimmt um 8,4 % und das niedrige um 18,9 % zu. Die Steigung erhöht sich leicht auf 3,64, was aber nicht als signifikant zu werten ist. Die Streuung liegt deutlich unterhalb der maximalen Vorgabe auf identischen Niveau. Der leichte Abfall in den zugehörigen Dehnwerten zeigt hier keine Auswirkungen.

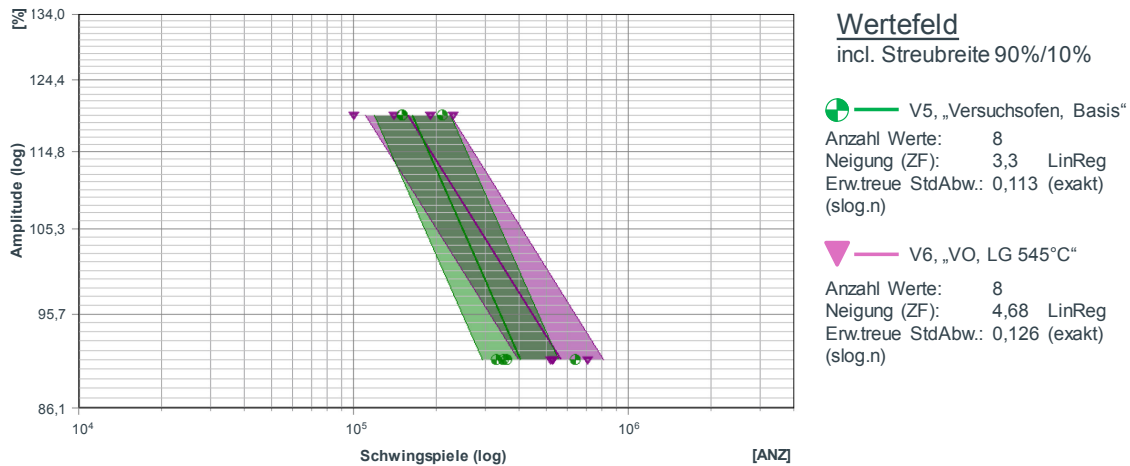


Abbildung 5-26: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur vs. erhöhte Lösungsglühtemperatur

Im Vergleich der Untersuchungen bei erhöhter Auslagerungstemperatur zur Basiswärmebehandlung ist eine deutliche Erhöhung der erreichten Schwingspielzahlen sowohl für hohes als auch niedriges Lastniveau auffällig. Dargestellt sind die Ergebnisse in Abbildung 5-28. Während für das hohe Lastniveau ein Zuwachs in Höhe von 35,6 % gegenüber der Basis erreicht wird, verbessert sich das untere Lastniveau sogar um 82,3 %. Damit stellt sich eine flachere Neigung von 4,38 ein. Gleichzeitig ist eine geringere Streuung der Ergebnisse im Vergleich zur Basiswärmebehandlung zu beobachten.

Eine Korrelation mit den zugehörigen mechanischen Kennwerten ist nicht gegeben. Diese sind für beide Versuche nahezu identisch. Ebenfalls sind Partikelmorphologie und sDAS-Werte nahezu identisch.

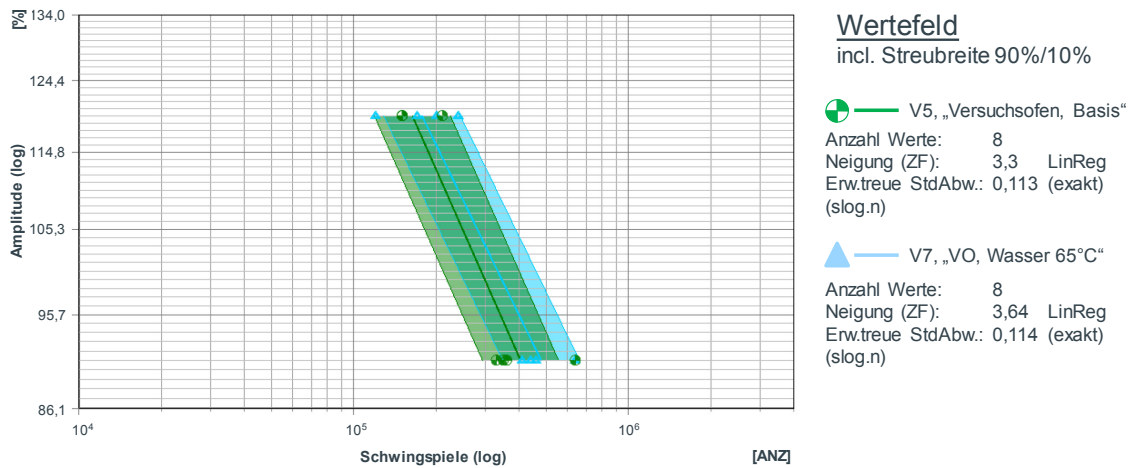


Abbildung 5-27: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur vs. erhöhte Wasserbadtemperatur

Folglich sind andere Phänomene für die sichtbaren Abweichungen in der dynamischen Erprobung der Grund.

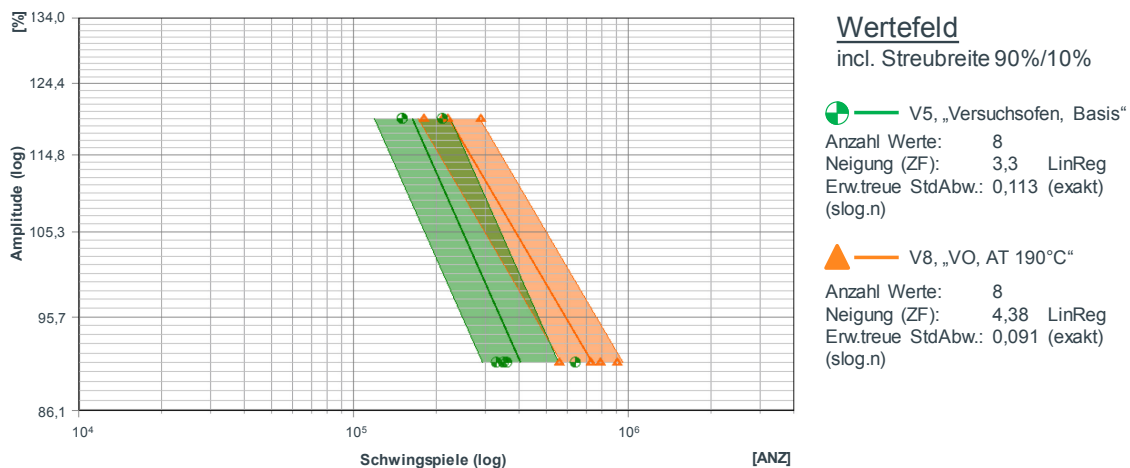


Abbildung 5-28: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur vs. erhöhte Auslagerungstemperatur

Vergleicht man die einzelnen Ergebnisse untereinander, ist im Vergleich von erhöhter Wasserbadtemperatur und erhöhter Lösungsglühentemperatur, wie aus Abbildung 5-29 hervorgeht, ein Vorteil der Wöhlerneigung für das Lösungsglügen zu verzeichnen.

5.1 Einflüsse der Wärmebehandlung

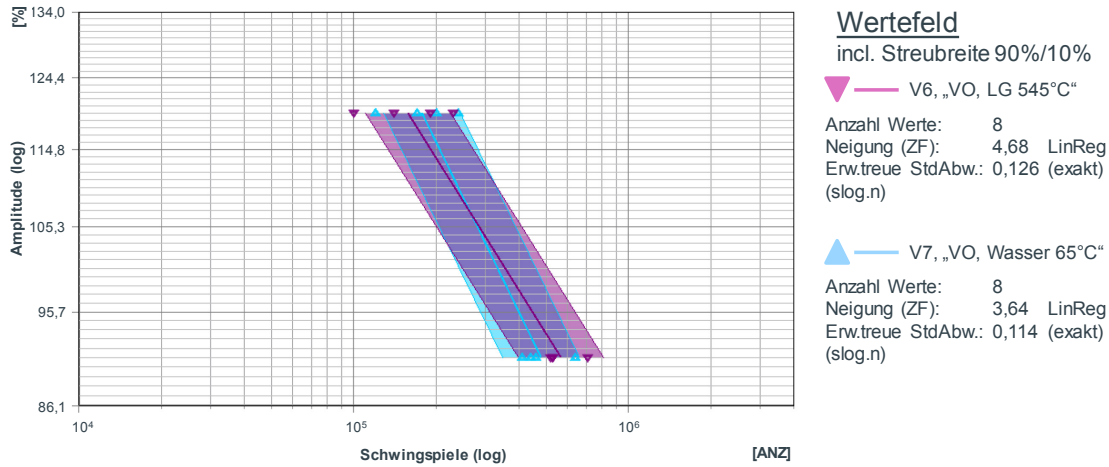


Abbildung 5-29: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, erhöhte Wasserbadtemperatur vs. erhöhte Lösungsglühtemperatur

Bei einer in diesem Vergleich um 12,5 % höheren Schwingspielzahl auf hohem Lastniveau für das wärmere Wasserbad im Vergleich zum variierten Lösungsglühn ist auf niedrigem Lastniveau ein Abfall der Schwingspiele um 15,5 % zu verzeichnen.

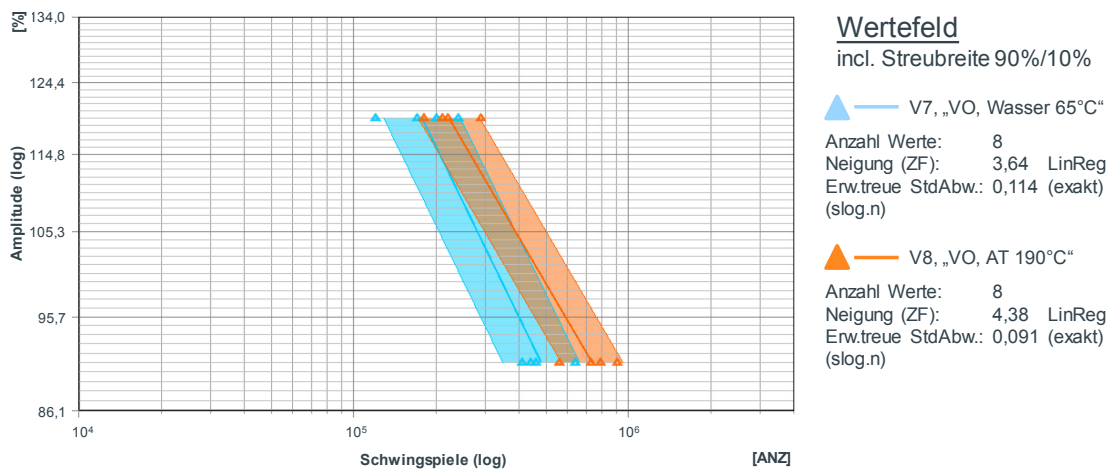


Abbildung 5-30: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, erhöhte Wasserbadtemperatur vs. erhöhte Auslagerungstemperatur

Ein anderes Bild ergibt sich im Vergleich von Wasserbadvariation und Veränderung des Lösungsglühens gemäß Abbildung 5-30. Hier fällt das erreichte Schwingspielniveau für das wärmere Wasserbad auf beiden Lastniveaus ab. Dabei

Überwiegt der Abfall auf niedrigem Niveau mit 34,8 %, während auf hohem Niveau der Einbruch 20,2 % beträgt.

Im letzten Vergleich von Variation des Lösungsglühens mit den veränderten Auslagerungsparametern kann eine angenäherte Parallelverschiebung der Wöhlerlinie beobachtet werden. Nimmt man die Variation des Lösungsglühens als Basis, ergibt sich eine Steigerung von 40,9 % der erreichten Schwingspiele für das hohe Lastniveau und eine Steigerung von 29,7 % für das niedrige Lastniveau. Dies ist in Abbildung 5-31 veranschaulicht.

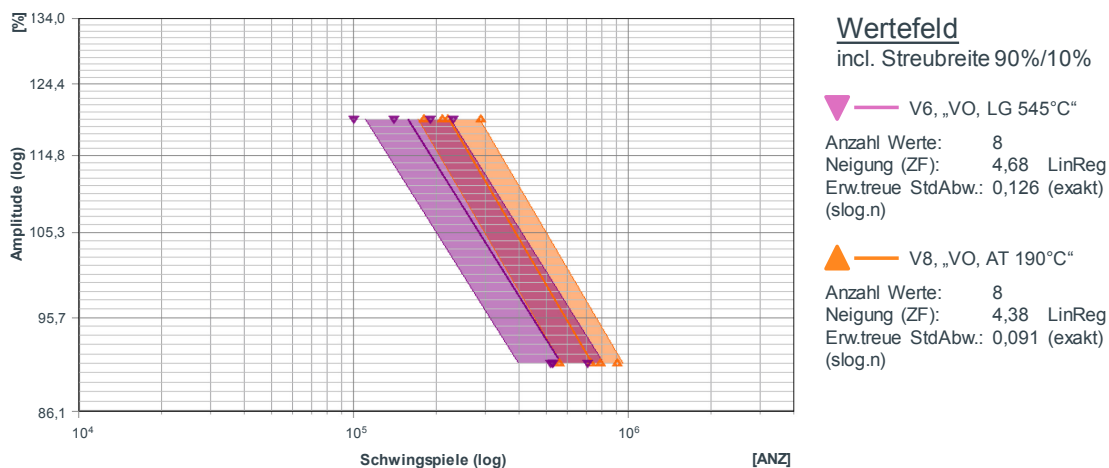


Abbildung 5-31: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, erhöhte Auslagerungstemperatur vs. erhöhte Lösungsglühetemperatur

Zusammenfassend sind größere Abweichungen bei den unterschiedlichen Variationen der Wärmebehandlungsrezeptur zu verzeichnen, als es die Abweichungen der mechanischen Kennwerte gemäß Tabelle 5-12 erwarten lassen würden. Abbildung 5-32 verdeutlicht dies in der Visualisierung aller erreichten Schwingspiele und den zugehörigen Wöhlerlinien der verschiedenen Versuchsreihen.

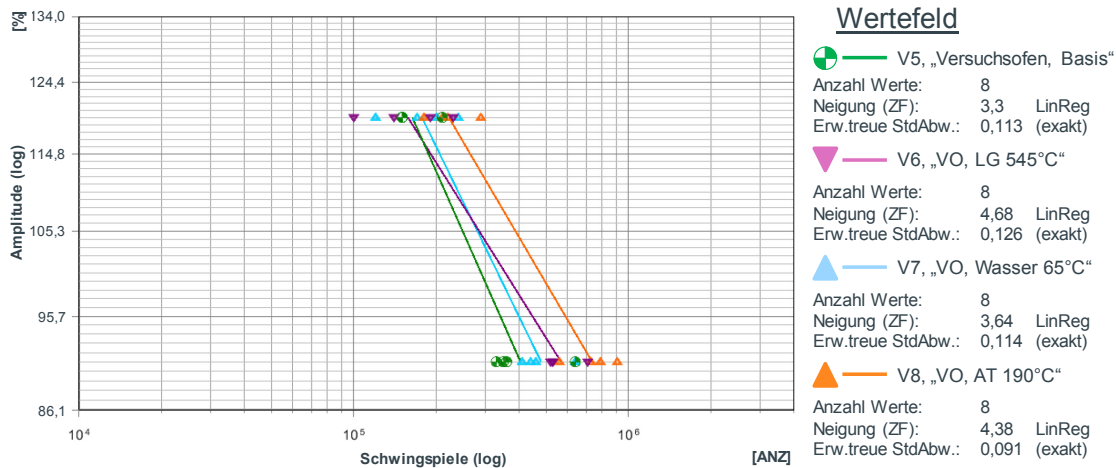


Abbildung 5-32: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Übersicht der Parametervariation im Versuchsofen

Während im Vergleich von Basisrezeptur gemäß Versuch 5 und der Variation der Auslagerungsparametrierung gemäß Versuch 7 nahezu identische mechanische Kennwerte erreicht werden, ist hier der größte Unterschied in den erreichbaren Schwingspielen unter dynamischer Last festzustellen. Auch ist eine Erhöhung der Schwingspielzahlen trotz geringerer Dehnwerte im Vergleich höherer Wasserbadtemperatur zur Basisrezeptur festzuhalten. Im Weiteren ist auf den Vergleich von Basisrezeptur zu veränderten Lösungsglühparametern einzugehen. Hier äußern sich bei höheren mechanischen Kennwerten die Effekte in einer Abflachung der Wöhlerneigung durch gestiegene Schwingspielwerte auf niedrigem Lastniveau.

Eine direkte Korrelation von statischen und mechanischen Kennwerten ist folglich nicht gegeben.

5.2 Einfluss durch Variation des Magnesium-Gehaltes

In einem weiteren Versuch ist der Magnesiumgehalt der Schmelze variiert worden und im Bezug zur Basisschmelze um 15 % abgesenkt worden. Die abgegossenen Teile sind mit den Bauteilen aus Versuch 4 in einer gemeinsamen Charge im Durchlaufofen 2 wärmebehandelt worden. Anschließend wurden auch hier wie zuvor beschrieben Zugstäbe entnommen und geprüft.

Tabelle 5-15: Vergleich der erreichten mechanischen Kennwerte bei Variation des Magnesiumgehaltes

Mittelwert n = 7-16	Zugfestigkeit Rm		Dehngrenze Rp0,2		Bruchdehnung A5		Rm/Rp0,2
	[N/mm ²]	Stabw.	[N/mm ²]	Stabw.	[%]	Stabw.	
V4 - DLO 2	335	6,0	275	5,0	8,7	1,4	1,22
V9 - DLO 2, Mg abgesenkt	307	4,3	236	8,5	11,0	0,7	1,30

Die erreichten mechanischen Kennwerte gemäß Tabelle 5-15 weichen dabei erwartungsgemäß von der Basisschmelze ab. Während die Zugfestigkeit um 8,3 % und die Dehngrenze um 14,2 % abfällt, steigt die Bruchdehnung um 26,4 % an.

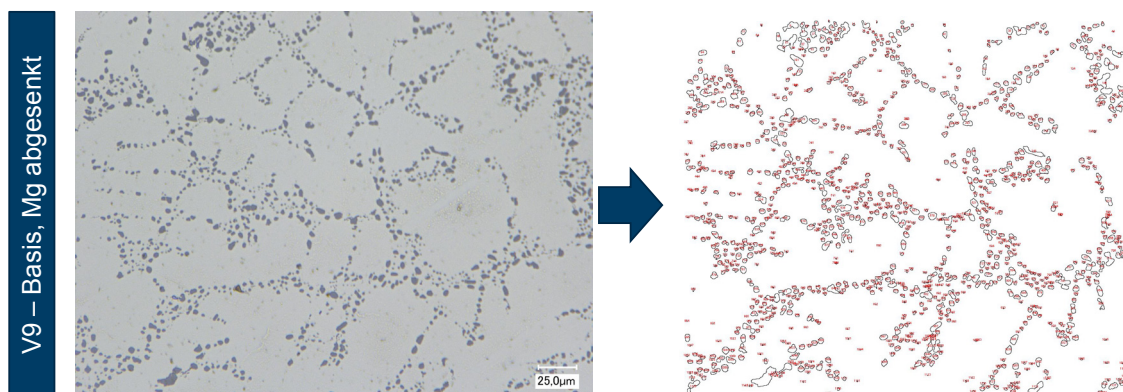


Abbildung 5-33: Gefügevergleich des Versuches mit abgesenktem Mg-Gehalt, links: Schlichtbild; rechts: Partikelanalyse

Das Schlichtbild entsprechend Abbildung 5-33 zeigt ebenfalls keine signifikanten Abweichungen. Auch ist das Ergebnis der Partikelanalyse gemäß Tabelle 5-16 vergleichbar mit den für diese Wärmebehandlungsrezeptur erzielten Ergebnissen.

Tabelle 5-16: Siliziumpartikel-Analyse für den Wärmebehandlungsversuch mit abgesenktem Magnesium-Gehalt

	average Area	StabW	Circularity	StabW	Aspect Ratio	StabW	Roundness	StabW	Solidity	StabW
V5 – Basis, VO	80,4	108,8	0,852	0,174	1,560	0,506	0,693	0,174	0,873	0,080
V9 – Basis, Mg abgesenkt	110,7	155,4	0,850	0,174	1,556	0,569	0,697	0,175	0,878	0,078

Die Messung des sekundären Dendritenarmabstandes gemäß Tabelle 5-17 zeigt ebenfalls vergleichbare Ergebnisse auf.

Tabelle 5-17: Ergebnisse der sDAS-Messung an Probestäben im Bereich der Messstellen 2 (Stab A) und 4 (Stab B)

Versuch	sDAS (sekundärer Dendritenarmabstand)			
	Stab A, MW [µm]	StabW	Stab B, MW [µm]	StabW
V5 – Basis, VO	26,9	2,7	31,2	4,0
V9 – Basis, Mg abgesenkt	27,0	1,5	32,5	2,3

Im dynamischen Versuch gemäß Abbildung 5-34 werden allerdings nahezu identische Schwingspielzahlen erreicht. Dabei sind auf hohem Lastniveau ein Abfall von 5,4 % und eine Erhöhung von 4,8 % auf niedrigem Lastniveau zu verzeichnen. Unter Berücksichtigung der sehr geringen Streuung für den Versuch mit erniedrigtem Magnesiumgehalt und damit einem Streuband innerhalb desjenigen der Basisuntersuchung, ist das Ergebnis als gleichwertig zu betrachten.

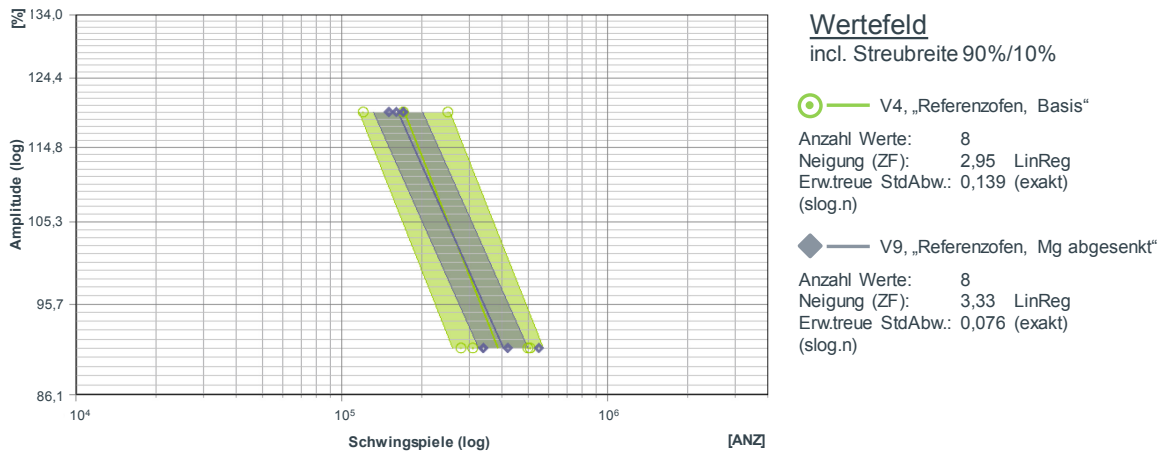


Abbildung 5-34: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur, Einfluss erhöhten Mg-Gehaltes

Auch dieses Ergebnis verdeutlicht, wie wenig statische und dynamische Kennwerte korrelieren. Offenbar liegen diesem Phänomen Mechanismen zu Grunde, die im Rahmen der Untersuchungen nicht identifiziert werden konnten.

6. Diskussion

Vor dem Hintergrund, Leichtbau unter ökonomischen und ökologischen Aspekten umsetzen zu können, sind mehrere Möglichkeiten aufgezeigt worden. Das erste Potenzial bietet sich in der Reduzierung von Wandstärken. Auffällig hierbei ist zunächst der wandstärkenabhängige Abfall der Festigkeit unter zyklischer Belastung. Aus den Ergebnissen ist dabei abzuleiten, dass bei dynamischer Wechsel- oder Zugschwellbelastung Wandstärken kleiner 5 mm in der Bauteilauslegung vermieden werden sollten. Insbesondere der zu verzeichnende Abfall unter zusätzlich korrosiver Belastung verdeutlicht diese Maßnahme. Kritisch anzumerken ist bei der Betrachtung einerseits, dass die Probenoberfläche mechanisch bearbeitet ist. Es fehlt die schützende Gushaut, die insbesondere unter korrosiver Belastung Vorteile bietet. Zudem entsteht bei der Umlaufbiegeprüfung eine Stützwirkung, die mit steigendem Spannungsgradienten über dem Probendurchmesser zunimmt. Dennoch ist unter praxisnahen Gegebenheiten bei exponierten Rippen, die hohe Biege- oder Torsionsbeanspruchung erfahren von einer vergleichbaren Stützwirkung auszugehen. Berücksichtigt man diese Überlegungen, kann an der Aussage festgehalten werden. Dünnere, hochdynamisch auf Zug, Biegung und/oder Torsion belastete Bereiche dürfen daher nur in Ausnahmefällen und unter besonderer Prüfung mit Wandstärken kleiner als 5 mm umgesetzt werden.

Gleichsam gilt diese Aussage für steifigkeitsbeanspruchte Bereiche nicht, da diese typischerweise weniger stark und hochdynamisch beansprucht werden. Eine Reduzierung der Wandstärken ist hier sinnvoll und kann einen erheblichen Beitrag zum Leichtbau leisten. Wie aus der Übertragung der Oberflächenstrukturen F („Lotus“) und K („Haifisch“) ersichtlich, sind bei Einhaltung gegebener Konstruktionsregeln keine Einbußen in der Bauteilperformance gegeben. Unter praxisnahen Bedingungen stellt sich allerdings die Frage der Haltbarkeit der filigranen Strukturen und die Möglichkeit der Reparatur. Hierbei ist zu empfehlen, die Gießwerkzeuge mittels Ultraschall zu reinigen und auf den Einsatz von Strahlgut aus Korund gänzlich zu verzichten. Als Alternative kann mit Trockeneis gestrahlt werden. Dies bietet sich insbesondere für Zwischenreparaturen oder Nachschichten im Fertigungsprozess ohne Abbau der Kokille an. So kann das Verschleißverhalten deutlich minimiert werden. Auswirkungen durch mechanische

Oberflächenbeschädigungen und zugehörige Reparaturmöglichkeiten sind in weiterführenden Untersuchungen zu identifizieren. Empfohlen wird hier, ausgehend von einem Kokillen-seitigen Referenzpunkt-System zu arbeiten. Da im Weiteren insbesondere die Struktur K gegenüber dem bekannten Waffelmuster keine Oberflächenvergrößerung zur Folge hat, ist kein negativer Effekt unter korrosiver Last zu erwarten. Die Struktur F weist eine leichte Vergrößerung auf, die im vorliegenden Fall allerdings nicht auffällig gewesen ist. Insgesamt wird die Strukturierung folglich zur Umsetzung empfohlen. Vorzugsweise ist dabei die fließrichtungsgebundene Struktur K zu verwenden, sofern möglich. Wie der betrachtete Hilfsrahmen zeigt, ergibt sich ein erhebliches Leichtbaupotenzial, das für diese Produktart signifikante Vorteile bietet und neue Designmöglichkeiten eröffnet.

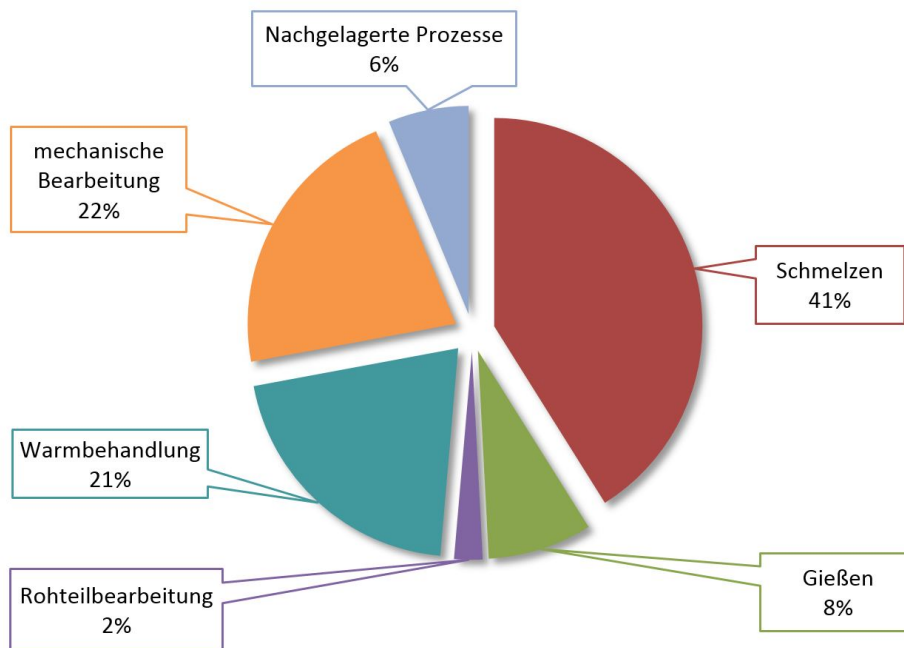


Abbildung 6-1: CO₂-Footprint des Aluminium-Radträgers mit optimierter Wärmebehandlung

Als weiterer Beitrag für nachhaltigen Leichtbau ist das Potenzial aus der Verkürzung der Wärmebehandlung zu sehen. Dieser Prozess ist der Hauptbeitragsleister der primär prozessbedingt entstehenden Emissionen im Herstellprozess des Bauteils. Neben der bauteilbezogenen Energie- und Emissionseinsparung sind weitere ökonomische Vorteile durch den höheren Durchsatz zu sehen. Im gezeigten Beispiel kann die Gesamtprozesszeit um 40 % reduziert werden. Die Erweiterung der

Wärmebehandlungskapazität kann durch die frei werdende Kapazität vermieden werden. Dies zieht weitere sekundäre Einsparungen nach sich, die sich beispielsweise durch den Entfall bereitzustellender Flächen ergeben. Gleichzeitig werden die Gesamtenergiekosten gesenkt, sodass der umweltrelevante Footprint pro Bauteil sinkt.

Für den untersuchten Radträger bedeutet dies bei weiterhin kontinuierlicher Beschickung des Wärmebehandlungsofens durch den erhöhten Durchsatz eine Reduzierung des CO₂-Äquivalents in der Gesamtbilanz um 4,1 % auf 19,59 kg CO₂e je Bauteil. Die Emissionen in der Produktionsphase werden um 11,4 % auf 6,51 kg CO₂e je Bauteil gemindert. Damit verschieben sich die Anteile des Footprints gemäß Abbildung 6-1. Das Schmelzen rückt weiter in den Fokus und die mechanische Bearbeitung übernimmt den zweiten Platz. Eine Optimierungsmöglichkeit stellt einerseits die Umsetzung eines Flüssigmetallverbundes dar. Hierbei würde direkt vom Hüttenwerk Flüssigmetall ohne Umweg über die Masselfertigung angeliefert werden. Ein erneuter Energieeintrag durch das Aufschmelzen dieser Massen wird vermieden und somit ein erheblicher Teil der entstehenden Emissionen im Schmelzprozess eingespart. Die Flexibilität in der Auswahl des Lieferanten wird durch die geforderte örtliche Nähe jedoch erheblich eingeschränkt, sodass finanzielle Aspekte im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden müssen. Andererseits kann in der mechanischen Bearbeitung beispielsweise durch optimierte und harmonisierte Bahnverläufe und Vermeidung von Nebenzeiten bei der CNC-Bearbeitung, aber auch durch reduzierte Materialaufmaße ein Beitrag zur Energie- und Emissionseinsparung geleistet werden.

Tabelle 6-1: Vergleich der Abschreckgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Messpositionen des Radträgers mit Wärmebehandlung im Kammerofen für vier Temperaturintervalle

Kammerofen		Position									MW	Min	Max
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
V _{Tmax-460°C}	[K/sec]	17,9	14,3	15,7	20,8	16,1	23,5	15,8	18,1	11,1	17,0	11,1	23,5
V _{T460°C-300°V}	[K/sec]	50,6	30,0	70,4	57,2	53,5	46,1	55,1	49,6	39,6	50,2	30,0	70,4
V _{T300°C-200°V}	[K/sec]	79,3	43,0	63,7	54,9	47,0	95,4	44,3	96,5	38,8	62,5	38,8	96,5
V _{T200°C-100°V}	[K/sec]	18,0	21,3	27,8	37,9	19,6	30,2	29,2	11,6	13,4	23,2	11,6	37,9

Bei der Rezepturauswahl für den Wärmebehandlungsprozess darf sich allerdings nicht rein auf statische, mechanische Kennwerte verlassen werden. Wichtig ist insbesondere das dynamische Bauteilverhalten vergleichend abzuprüfen. Durch technische Gegebenheiten, wie beispielsweise Chargengröße oder Ofenart, kann das Abschreckverhalten Auswirkungen auf entstehende Eigenspannungen haben. Daher ist es erforderlich, die Abschreckbedingungen durch Optimierung von Bauteillage und Abschreckgeschwindigkeit im frühen Entwicklungsprozess zu bestimmen. Die Simulation dieser Prozessgrößen bietet dabei ein sehr gutes Hilfsmittel, Auswirkungen frühzeitig zu entdecken und Variationen im Prozess zunächst virtuell zu untersuchen. Die Weiterentwicklung der maßgeblichen Modelle ist daher ein wichtiger Schritt.

Tabelle 6-2: Vergleich der Abschreckgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Messpositionen des Radträgers mit Wärmebehandlung im Durchlaufofen für vier Temperaturintervalle

Durchlaufofen		Position									MW	Min	Max
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
$V_{T_{max-460^{\circ}C}}$	[K/sec]	50,5	25,9	32,0	108,2	59,5	94,3	25,6	57,7	64,0	57,5	25,6	108,2
$V_{T_{460^{\circ}C-300^{\circ}V}}$	[K/sec]	143,9	46,8	78,4	114,9	97,3	109,6	62,5	77,4	71,0	89,1	46,8	143,9
$V_{T_{300^{\circ}C-200^{\circ}V}}$	[K/sec]	67,6	48,4	52,0	89,5	60,5	82,7	55,3	50,1	39,8	60,6	39,8	89,5
$V_{T_{200^{\circ}C-100^{\circ}V}}$	[K/sec]	19,8	34,0	32,9	27,3	17,3	14,5	20,9	12,9	19,4	22,1	12,9	34,0

Betrachtet man dazu vergleichend die Abschreckgeschwindigkeiten in den gemäß Tabelle 6-1 für den Kammerofen und gemäß Tabelle 6-2 für den Durchlaufofen genannten vier Temperaturbereichen, ergibt sich der Verlauf gemäß Abbildung 6-2.

Deutlich ist hier der Unterschied zwischen dem Abschrecken der beiden betrachteten Öfen zu erkennen. Die lokale Varianz ist für den Durchlaufofen dabei größer, was auf die geringere Packungsdichte und das größere Wasservolumen zurückzuführen ist. Die höheren Abschreckgeschwindigkeiten werden erreicht, da das Blasensieden hier partiell deutlich früher einsetzt. Beim Kammerofen scheint ein Wärmestau rasches Abschrecken zu verzögern. Dieses Verhalten beeinflusst die Eigenspannungsverteilung im Bauteil.

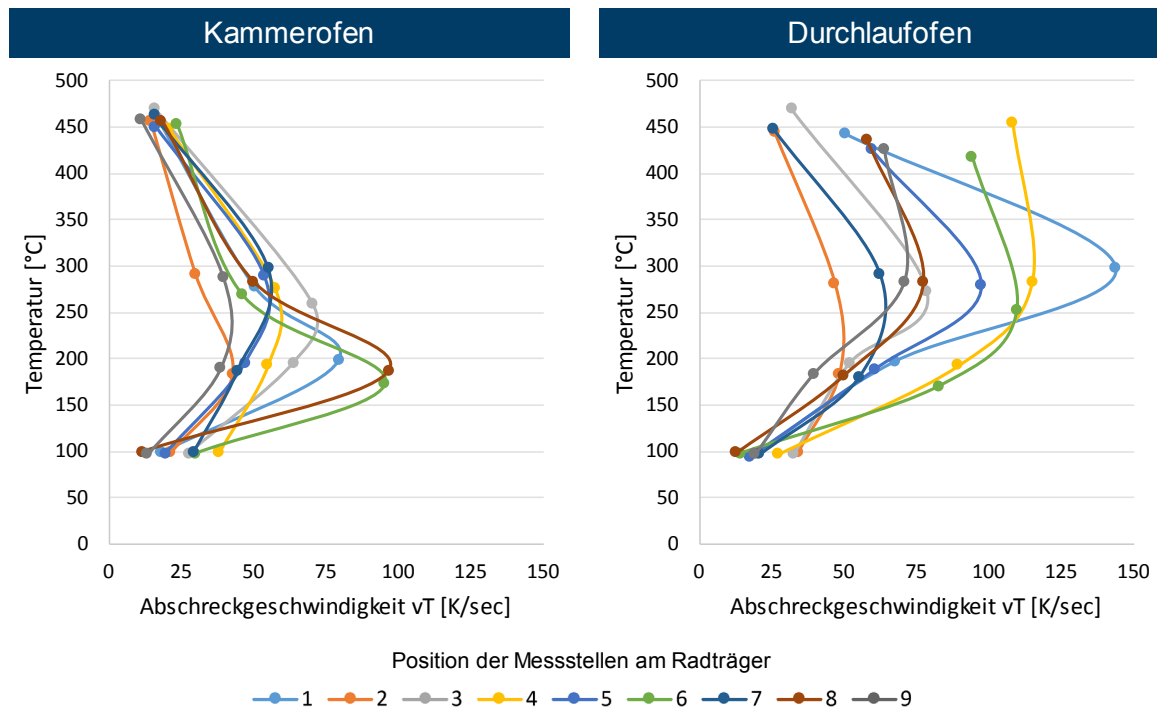


Abbildung 6-2: Varianz der Abschreckgeschwindigkeiten ausgewählter Temperaturintervalle an unterschiedlichen Messpositionen des Radträgers für Kammerofen (links) und Durchlaufofen (rechts)

Gleichzeitig wird auch das Gefüge beeinflusst. Die Übersättigung des Mischkristalls mit zuvor in Lösung gebrachtem Magnesium variiert lokal. Besonders zu betrachten ist dabei die Ausscheidungscharakteristik der Mg_2Si -Phase. Die Bildung der unterschiedlichen Zwischen- und Übergangsphasen ist dabei einerseits stark von der Abschreckgeschwindigkeit andererseits aber auch von der Temperatur-Zeit-Folge des Auslagerns abhängig. Um dies näher untersuchen zu können, wurden Ausscheidungssimulationen mit der Software *JMatPro* [229] durchgeführt. Dabei wurde als Starttemperatur 542°C gewählt. Die im Rahmen der Simulation gewählte Legierungszusammensetzung entspricht derjenigen, die die Bauteile aus den Versuchen aufweisen. Zur Charakterisierung des Abschreckverhaltens bietet sich es an, das Umwandelungsschaubild bei konstanter Abkühlung (Continuous Cooling Transformation) näher zu betrachten. Auslagerungsprozesse können mit Hilfe des Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (Time Temperature Transformation) betrachtet werden.

CCT-Diagramm

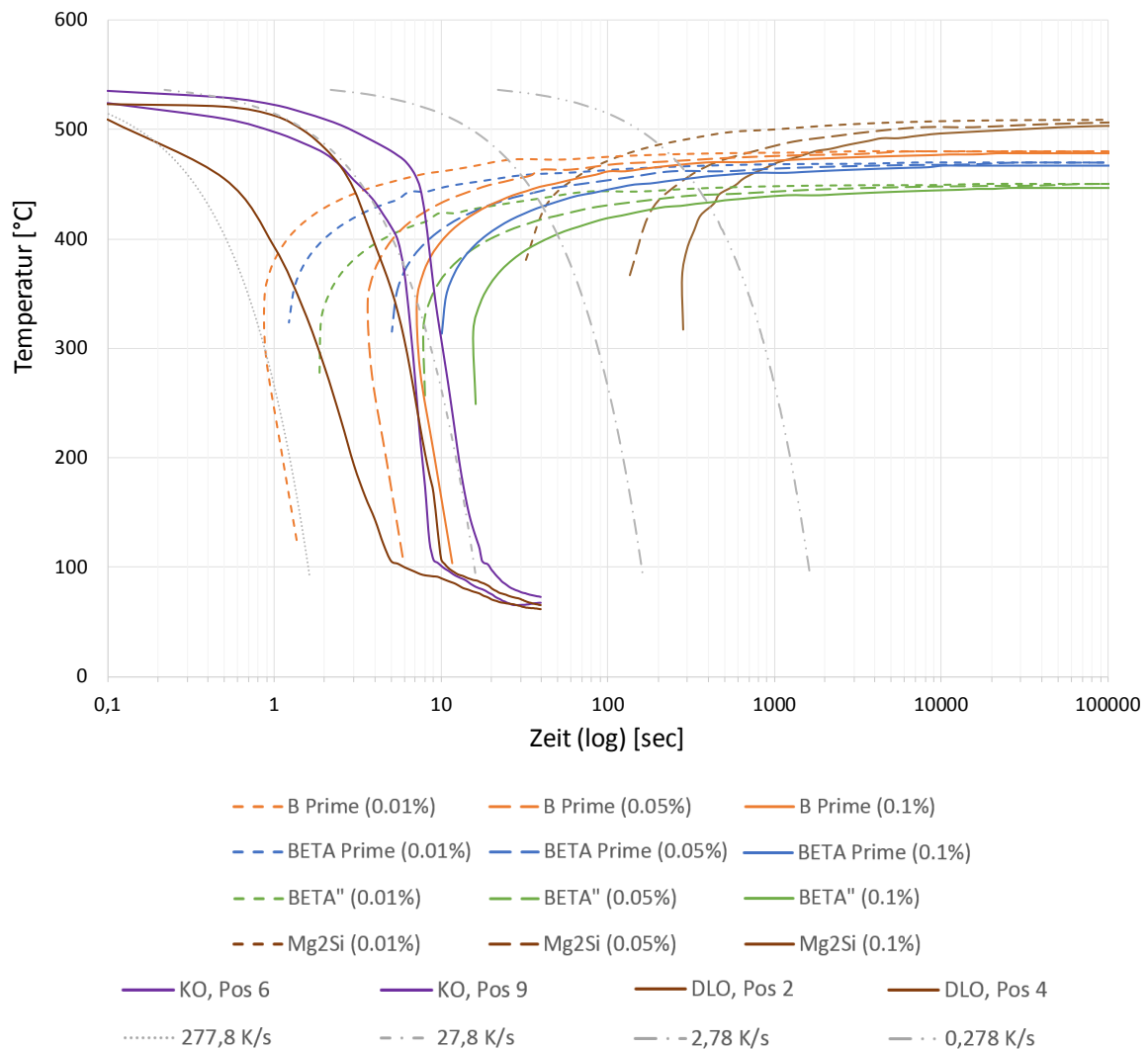


Abbildung 6-3: CCT-Diagramm für die Legierung AlSi7Mg0,3. Darstellung der Bildung von Mg₂Si-Ausscheidungen und der zugehörigen metastabilen Phasen; Einblendung der Abschreckphase der Wärmebehandlung im Kammer- und Durchlaufofen am Beispiel der Positionen für minimale und maximale Abschreckgeschwindigkeit sowie vier ausgewählter konstanter Abschreckraten

Aus dem Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagramm gemäß Abbildung 6-3 geht hervor, dass einerseits mit geringerer Abschreckgeschwindigkeit das Magnesium nicht mehr vollständig in Lösung gehalten werden kann. Andererseits kann man feststellen, dass in Abhängigkeit der erreichten Abschreckgeschwindigkeit Ausscheidungen unterschiedlicher Mg-Si-Phasen gebildet werden. Dies sind die

bekannten Phasen β'' (Beta'', Mg_5Si_6), β' (Beta Prime, $Mg_{1,8}Si$) und B' (B Prime, $Mg_9Al_3Si_7$) (vgl. [230]) hin zu Mg_2Si , die im Auslagerungsprozess gezielt erzeugt bzw. durchlaufen werden.

Im Diagramm sind vier Kurven konstanter Abschreckgeschwindigkeit sowie exemplarisch für Kammer-, als auch Durchlauföfen die Abschreckkurven mit den jeweils kürzesten als auch längsten Abschreckzeiten enthalten. Letztere haben stellenweise geringfügig geringere Starttemperaturen beim Abschrecken, was tendenziell zu minimal abweichendem Ausscheidungsverhalten führt. Zur besseren Übersicht sind diese Aspekte im dargestellten Diagramm nicht berücksichtigt.

Aufgrund der höheren Spreizung im Abschreckverhalten der Bauteile, die im Durchlauföfen wärmebehandelt worden sind, ist ein lokal stark unterschiedliches Gefüge zu erwarten. Während für Bereiche mit sehr kurzer Abschreckzeit das Magnesium überwiegend im übersättigten Mischkristall gelöst bleibt und nur geringe Mengen von kleiner als 0,05% des Gefüges in Form der Phasen B-Prime und Mengen kleiner als 0,01% der Phasen Beta Prime bzw Beta'' zu erwarten sind, ist für Bereiche mit geringerer Abschreckgeschwindigkeit ein deutlich höherer Anteil an vorausgeschiedenen B-Prime, Beta Prime und Beta''-Phasen zu verzeichnen. Erste übersteigt dabei 0,1%, die anderen liegen oberhalb 0,05% Gefügebestandteil. Dies bedeutet, dass lokal unterschiedliche Mengen der unterschiedlichen Phasen vorliegen.

Im Kammerofen hingegen ist ein deutlich schmales Abschreckband vorzufinden, was allerdings zu längeren Zeiten verschoben ist. Im Bauteil ist folglich die Verteilung der einzelnen Phasen und derer Menge weitgehend vergleichbar und deutlich homogener, als beim Abschrecken im Durchlauföfen. Die Phase B Prime stellt etwa 0,1% des Gefüges, Beta Prime und Beta'' sind in Mengen leicht oberhalb 0,05% vertreten.

Für das anschließende Auslagern liegen unterschiedliche Startgefüge vor. Im Time Temperature Transformation (TTT) Diagramm gemäß Abbildung 6-4 sind wie im CCT-Diagramm zuvor unterschiedliche Gehalte der einzelnen Mg-Si-Phasen abgebildet. Im Weiteren sind die Auslagerungskurven für sowohl Kammer-, als auch

Durchlauföfen eingetragen. Beide Kurven haben einen ähnlichen Verlauf, wobei für den Kammerofen ein schnellerer Temperaturanstieg mit leichtem zeitlichen Versatz festzustellen ist.

TTT-Diagramm

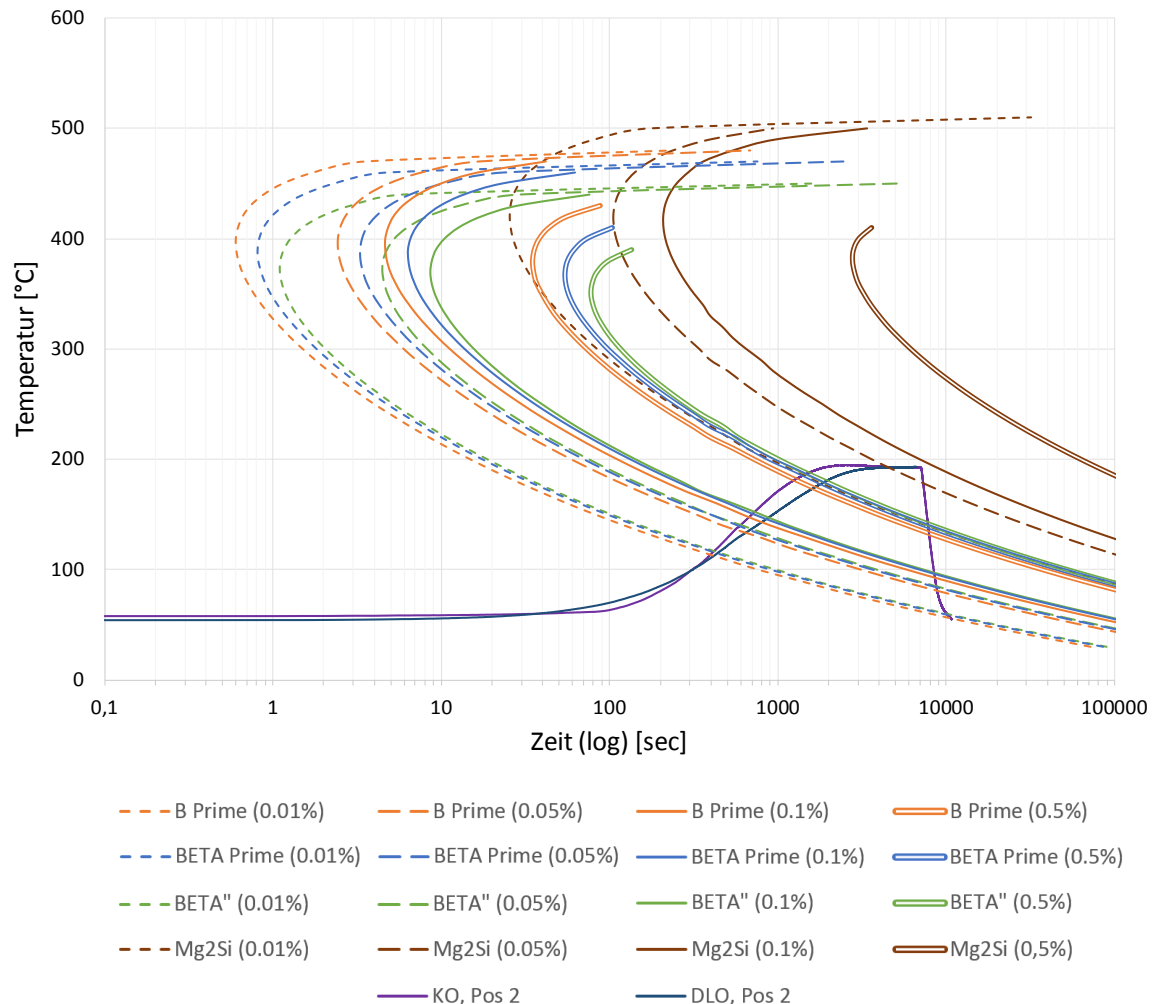


Abbildung 6-4: TTT-Diagramm für die Legierung AlSi7Mg0,3. Darstellung der Bildung von Mg₂Si-Ausscheidungen und der zugehörigen metastabilen Phasen; Einblendung der Auslagerungsphase der Wärmebehandlung im Kammerofen am Beispiel der Position 2

Zum Ende der Auslagerung liegt überwiegend die Phase Beta'' vor. Die Bildung von Mg₂Si-Ausscheidungen hat zu Ende des Auslagerns bereits begonnen. Die Anteile sind mit weniger als 0,05% noch recht gering. Ausgehend vom Startgefüge ist folglich zu vermuten, dass weiterhin eine lokal variierende Phasenverteilung und insbesondere unterschiedliche Größen und Morphologien der ausgeschiedenen

Phasen vorliegt. Die kann dazu führen, dass das Bauteilverhalten unter dynamischer Last je nach (lokaler) Phasentopologie Unterschiede aufweist.

Eine gezielte Kenntnis der Fertigungsbedingungen hilft folglich, ein optimales Zeit-Temperatur-Regime zu erarbeiten und auf die Bauteilanforderungen abzustimmen. Durch Variation einzelner Zeit-Temperatur-Komponenten der Wärmebehandlung kann Einfluss auf das dynamische Bauteilverhalten genommen werden. Vorteile bringen dabei höhere Temperaturen bei vergleichsweise kurzen Verweilzeiten. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen zeigt sich für ein kurzes Auslagern bei 190°C eine sehr flache und damit vorteilhafte Wöhlerneigung. Das Bauteilverhalten kann unter dynamischer Last als sehr duktil beschrieben werden. Dabei ist ein Anstieg der erreichbaren Schwingspiele auf niedrigem Lastniveau zu verzeichnen. Gleichzeitig ist festgestellt worden, dass zwischen dem statischen und dynamischen Bauteilverhalten keine Korrelation besteht. Auch Gefügeuntersuchungen hinsichtlich sDAS oder Partikelgröße und Einformgrad geben keine Hinweise. Eigenspannungen sind für diese Parametervariation als Ursache unwahrscheinlich, da der Abschreckprozess jeweils identisch ausgeführt wurde. Zudem wirken die hohen Temperaturen eher wie ein Spannungsarmglühen. Dementsprechend muss ein Zusammenhang zu den gebildeten Magnesium-Phasen bestehen. Weiterhin wird bei Variation des Mg-Gehaltes gegenüber den mechanischen Kennwerten ein abweichendes Verhalten festgestellt. Während mit reduziertem Mg-Gehalt die mechanischen Kennwerte für Zugfestigkeit und Dehngrenze deutlich nachgeben, bleibt das dynamische Verhalten auf Niveau der Referenz. Daher gilt es in weiterführenden Untersuchungen die zu Grunde liegenden Mechanismen zu identifizieren.

Ein Ansatz bildet die durchgängige Charakterisierung dynamischer Eigenschaften unter Variation der Wärmebehandlungsparameter Zeit und Temperatur. Die Parameterauswahl kann dabei durch Simulation des Werkstoffverhaltens während der Wärmebehandlung unterstützt werden. Der Abgleich zum dynamischen Bauteilverhalten kann dann einerseits durch Untersuchungen des statischen Materialverhaltens gestützt werden. Andererseits ist eine Charakterisierung der Ausscheidungsmorphologie und -topologie der Magnesiumphasen unter Berücksichtigung von Korngrößen, Siliziumform und -verteilung sowie der

Legierungszusammensetzung wichtig. Um den Einfluss durch Eigenspannungen zu minimieren, sollten die Untersuchungen entweder an separat gegossenen Proben, oder an aus dem Bauteil entnommenen Proben durchgeführt werden.

6.1 Bedeutung für die Entwicklung gegossener Fahrwerk-Komponenten

Die gewonnenen Erkenntnisse sind unter dem Gesichtspunkt robusten Leichtbaus zu berücksichtigen. Maßgeblich ist dabei, Fertigungsrandbedingungen bereits im frühen Entwicklungsprozess ganzheitlich zu erfassen. Hierzu zählt insbesondere die Auslegung des Wärmebehandlungsprozesses für Fahrwerk-Komponenten aus Aluminium-Guss. Kenntnisse über Ausscheidungskinetik und -morphologie sind dabei wichtige Kriterien, um die Prozessentwicklung voranzutreiben. Mit Hilfe virtueller Produktauslegung in CFD- und FEM-Simulationen kann das Eigenspannungsverhalten vorhergesagt und in die Bauteil实现ung einfließen. Dabei ist es allerdings erforderlich, die Güte der Modellierung weiter zu verbessern, um damit eine höhere Vorhersagegenauigkeit zu erlangen.

Die Gestaltung von Bauteilen unter Leichtbauaspekten hängt von der Belastungsart ab. Wie aufgezeigt wurde, gilt es bei hochdynamisch auf Biegung oder Torsion belasteter exponierter Rippen entsprechende Wandstärken vorzuhalten. Steifigkeitsgetriebene Bereiche können hingegen dünnwandiger ausgeführt werden. Dabei sind im Konstruktionsprozess entsprechende Flächen so zu gestalten, dass eine Applizierung der untersuchten Oberflächenstrukturen ermöglicht wird.

Weiterhin sind frühzeitig geeignete Prüfmethode anzubieten, die insbesondere das dynamische Bauteilverhalten simulieren und charakterisieren. Damit kann gewährleistet werden, dass für das spätere Serienprodukt optimale Prozessparameter eingestellt werden, die in Einklang ökonomischer und ökologischer Belange zu bestmöglichen Eigenschaften führen. Neben den erforderlichen statischen Kennwerten ist es auch erforderlich, die zu erreichenden dynamischen Kennwerte zu Beginn der Bauteil实现ung vorzugeben und festzuhalten.

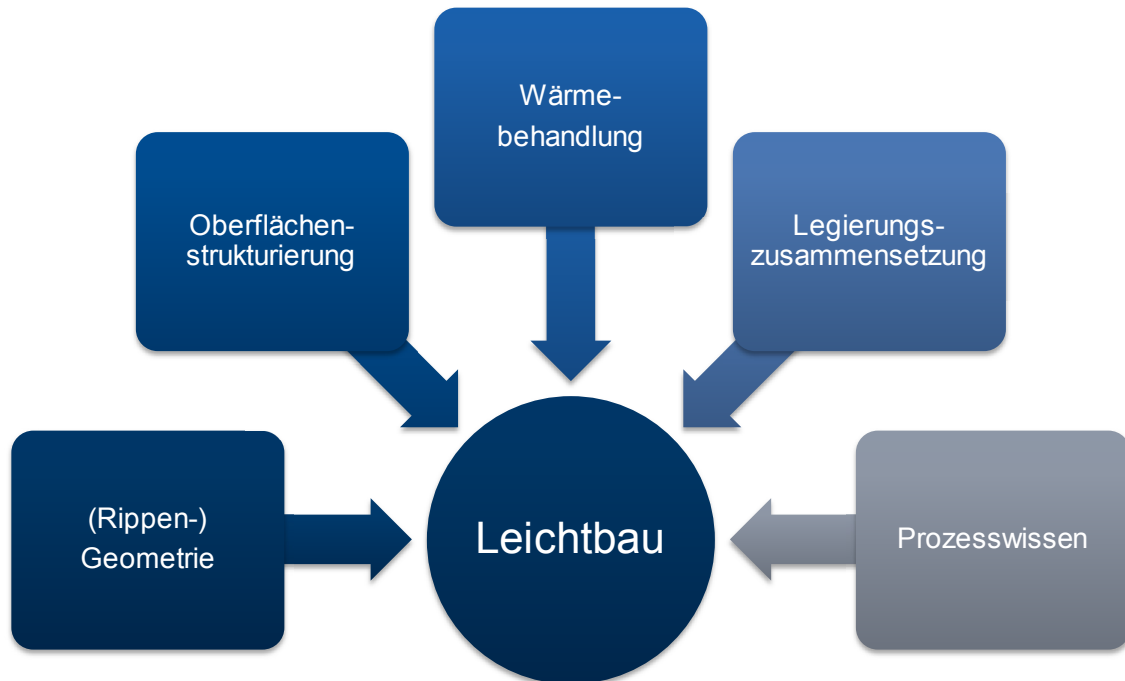


Abbildung 6-5: Beeinflussung des Leichtbaupotenzials von gegossenen Fahrwerk-Komponenten aus Al-Si-Legierungen

Zusammenfassend gilt es im Rahmen der Entwicklung gegossener Fahrwerk-Komponenten aus Al-Si-Legierungen, die Einflussfaktoren gemäß Abbildung 6-5 frühzeitig zu berücksichtigen. Neben dem Produktdesign sind insbesondere die Auslegung der Wärmebehandlung und eine detaillierte Prozesskenntnis entscheidend. Die Legierungszusammensetzung beeinflusst maßgebend das Fließ- und Speisungsvermögen sowie die erreichbaren mechanischen Eigenschaften. Eine gezielte Oberflächenstrukturierung hilft, dünnwandige Geometrien zu realisieren.

6.2 Prozessoptimierung durch Prozesswissen

Leichtbau-Komponenten benötigen robuste Prozesse. Diese können nur erreicht werden, indem durch die Erfassung und Analyse von Prozessdaten beginnend mit früher Prototypenstadien Prozesswissen generiert wird. Diese können dann als Parametersatz zur Serienfertigung bereitgestellt und dort unter den gegebenen Bedingungen weiter optimiert werden. Dabei ist bereits bekannt, dass durch ein optimales Zusammenspiel von Werkstoff, Verfahren und Produktdesign Leichtbau

erreicht werden kann. [231] Die Evolution des Leichtbaus ist dabei aber erst möglich, wenn exakte Prozesskenntnis und umfassendes Prozessverständnis vorliegen. Dadurch können Maßnahmen zur Minimierung von Prozessschwankungen ergriffen und so das Leichtbaupotenzial durch Entfernung nicht benötigten Materials gesteigert werden.

Um dieses Wissen zu erlangen, sind weiterführende Analysen, Interpretationen und die Rückführung von Erkenntnissen aus den gesammelten Daten erforderlich. Einen Lösungsansatz stellt dabei die in Abbildung 6-6 dargestellte „Predictive Analytics“ dar, bei der umfassende, im Prozess anfallende Daten und Informationen („Big Data“) genutzt werden können.

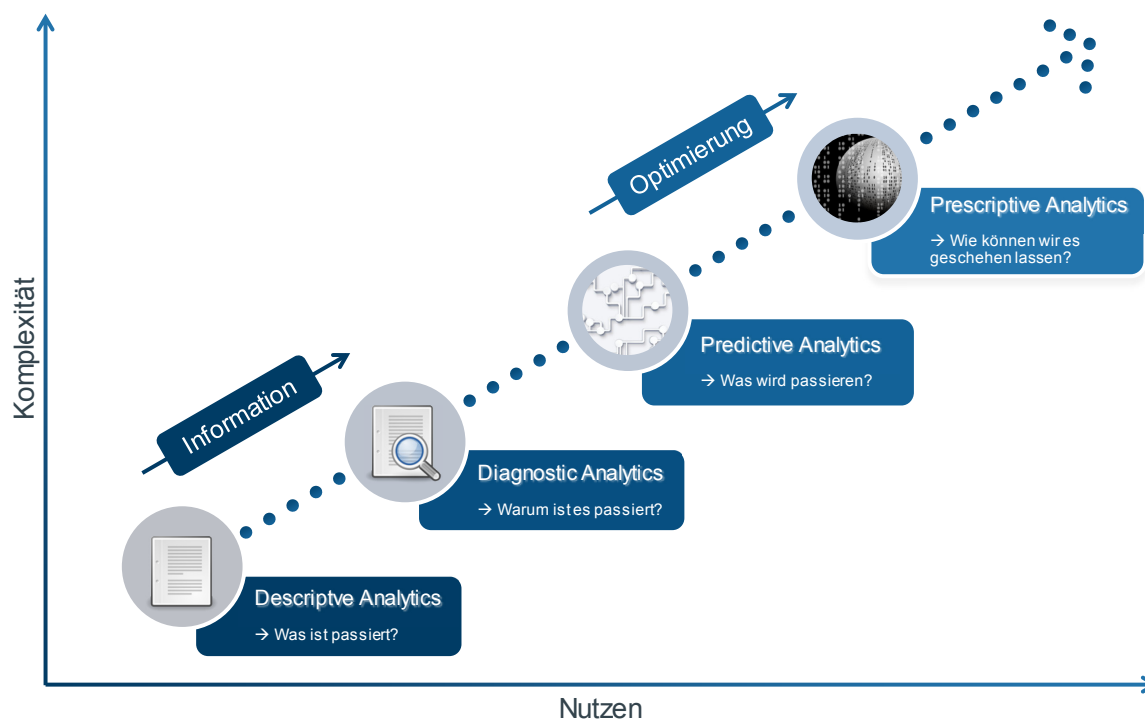


Abbildung 6-6: Reifegrad der Analysemethoden in Anlehnung an [232]

Hierzu ist es zunächst erforderlich, den Anlagenpark zu befähigen, die während der Produktion in den Steuerungen anfallenden Informationen Einzelteil-spezifisch zu sammeln und zentral bereitzustellen. Diese können dann über Algorithmen und Regeln Software-unterstützt analysiert und interpretiert werden. Aus den Ergebnissen können einerseits das Prozesswissen gesteigert sowie andererseits Handlungsempfehlungen und Entscheidungen abgeleitet werden. Diese fließen in

den Prozess in Form von Steuer- und Regelgrößen zurück und optimieren dadurch den Fertigungsablauf und helfen so, enge Prozessfenster, abgesenkte Ausschussquoten und eine erhöhte Ausbringung zu ermöglichen. Abbildung 6-7 veranschaulicht diesen Weg, durch den frühzeitig Abweichungen und Wechselwirkungen festgestellt werden können.

Die Befähigung, die gesammelten Daten dem Einzelteil zuzuordnen, erfolgt idealerweise durch eine maschinenlesbare Signierung des Bauteils in Form eines Data Matrix Codes (DMC). Dieser besitzt gegenüber anderen Lösungen den Vorteil, Redundanzen aufzuweisen, sodass bei einer lokalen Beschädigung des Bauteils trotzdem eine Lesbarkeit gewährleistet ist. Dabei ist es sinnvoll, den Code mit möglichst wenig Informationen auszustatten, um die Lesbarkeit über die gesamten Prozessschritte hinweg zu gewährleisten. Grundsätzlich ist eine eindeutige Seriennummer ausreichend. Alle anderen zugehörigen Informationen können über eine Datenbank zu dieser Seriennummer verknüpft werden. Dies bietet beispielsweise Vorteile im Erkennen vor und nach der Wärmebehandlung, findet hier doch ein Farbumschlag des Gussmaterials sowie eine leichte Verrußung statt. Der Zeitpunkt der Markierung ist dabei so früh wie möglich, idealerweise am noch heißen Produkt unmittelbar nach Bauteilentnahme aus der Kokille durchzuführen. Verfahrenstechnisch bietet sich die Lasermarkierung an.

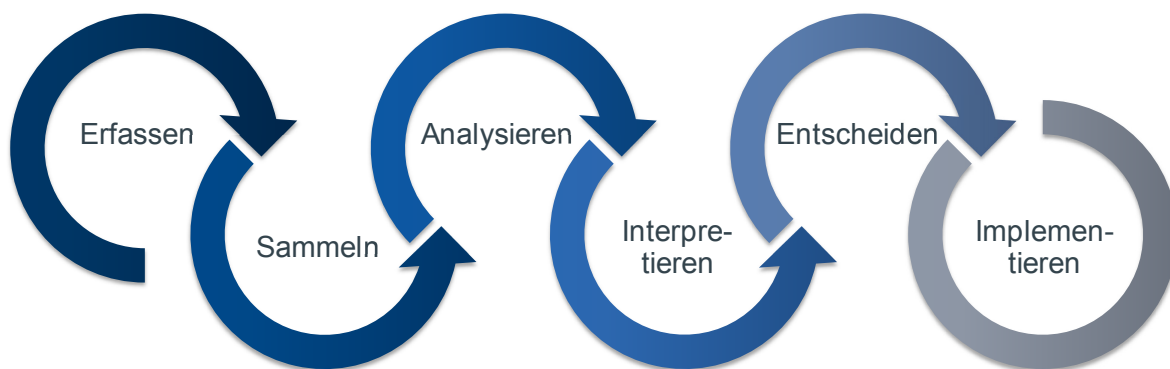


Abbildung 6-7: Der Weg von der Prozessdatenerfassung zum Prozesswissen

Die Informationsverknüpfung zum Bauteil beginnt dabei mit der Zuordnung von Vormaterial, dem Verhältnis von Massel- und Kreislaufmaterial im Schmelzofen und dem Abstich der Schmelze in den Chargiertiegel sowie der zugehörigen Aufbereitung. Die erfassten Chargeninformationen werden vererbt und den mit dieser

Schmelzecharge erzeugten Gussteilen zugeordnet. Die während des Gießens erfassten Parameter werden in die Datenbank übergeben und mit der Taufung des Bauteils, also mit der DMC-Gravierung, mit diesem verknüpft. Insbesondere die nachfolgenden Ergebnisse aus den Qualitätsprüfungen (Röntgen, Sichtprüfen und Rissprüfung) sind ebenfalls ortsbezogen hinsichtlich Art und Größe als Information zu erfassen und dem bauteilspezifischen Datensatz hinzuzufügen. Hierdurch können spätere Analysen detailliert durchgeführt werden. Im Weiteren ist es wichtig, Prozessinformationen aus der Wärmebehandlung inklusive der bauteilbezogenen Parameter eines etwaigen Richtprozesses sowie der abschließenden mechanischen Bearbeitung zu erfassen und in Zusammenhang zu bringen. Abbildung 6-8 veranschaulicht dieses Vorgehen. Sowohl Rückverfolgbarkeit als auch Prozessanalysen sind damit entlang der gesamten Prozesskette möglich. Analysen können ganzheitlich durchgeführt und Zusammenhänge erkannt werden.

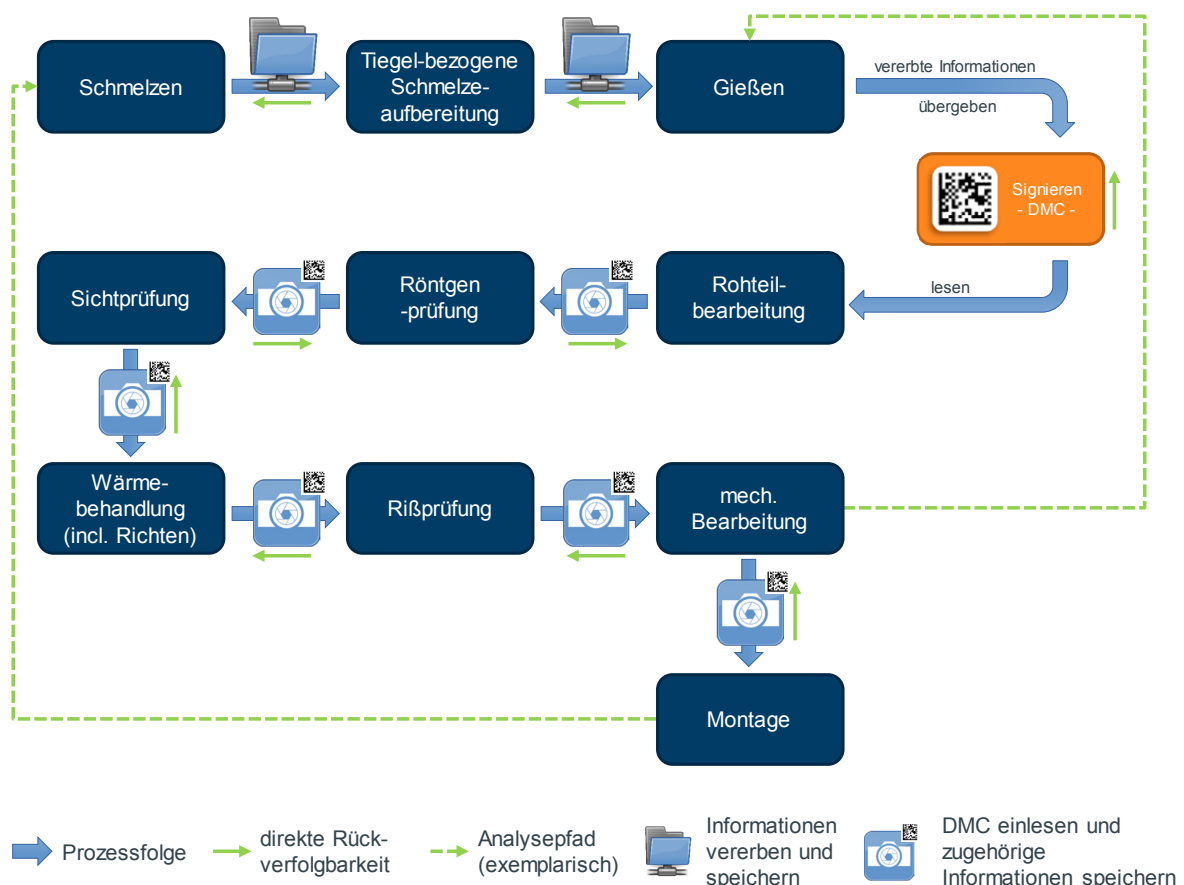


Abbildung 6-8: Prinzip der Prozessrückverfolgbarkeit durch chargenbezogene Informationsvererbung und teilindividuelle Prozessdatenerfassung

Durch dieses Vorgehen können mit Hilfe des „Data Mining“ Korrelationen zwischen Qualitätsmerkmalen und Prozessparametern erkannt werden und Maßnahmen zur Prozessverbesserung hinsichtlich Stabilität, Verfügbarkeit, Produktivität und Qualität abgeleitet werden. Ziel muss dabei nicht sein, Toleranzfenster zu verkleinern, sondern ungünstige Kombination von Toleranzlagen zu vermeiden. Gelingt es so, einen sehr stabilen und vorhersehbaren Prozess zu etablieren, kann dies genutzt werden, um Fahrwerk-Komponenten leichter zu gestalten, ohne dabei Einbußen hinsichtlich der Robustheit in Kauf nehmen zu müssen. Fertigungsbelange, die Prozessschwankungen Rechnung getragen haben, können entfallen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Elektrifizierung, Digitalisierung und automatisiertes sowie autonomes Fahren sind Megatrends in der Automobilindustrie. Gesellschaftlicher Wertewandel und weltweite strenge CO₂-Gesetze sind gleichzeitig treibende Kräfte für ganzheitliche Umweltstrategien im automobilen Umfeld. Neben intelligenten Antriebskonzepten, Minimierung von Rollwiderständen und verbesserter Aerodynamik spielt der Leichtbau im Fahrzeug eine zentrale Rolle auf dem Weg zu sauberer Mobilität.

Basierend auf einem umfangreichen Überblick nachhaltiger Schlüsseltechnologien wird gezeigt, wie den aktuellen Herausforderungen im Automobilbau unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Ziele für Produkt und Prozess entgegnet wird. Konsequenter Leichtbau dient dabei als zentrales Element, neben der Erreichung übergeordneter Ziele zur Emissionsreduzierung auch das Mehrgewicht aus Elektrifizierung, integraler Sicherheitssysteme und Komfortfeatures zu kompensieren und die Gewichtsspirale umzukehren.

Ausgehend vom Leichtbaugedanken im Fahrwerk ergibt sich die Fragestellung, welche Werkstoff- und Prozessgrenzen Leichtbaupotenziale beschränken und wie diese zu durchbrechen sind. Zentraler Bestandteil der Betrachtungen ist dabei der Aluminiumguss von Fahrwerk-Komponenten im Schwerkraft-Kokillenguss sowie im Gegendruck-Gießen (CPC). Mit Hilfe der LifeCycle-Analyse werden zunächst Kostentreiber und ökologische Potenziale für den Bereich des Aluminium-Gusses identifiziert. Als optimierungsfähige Hauptbeitragsleister werden das Bauteilgewicht sowie der Wärmebehandlungsprozess identifiziert. Beide Faktoren sind unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten nachhaltig wirksam.

Insbesondere im Schwerkraft-Kokillenguss übersteigen heute prozessbedingt erforderliche Mindestwandstärken häufig die strukturmechanisch erforderliche Wandstärke. Die Reduzierung des Bauteilgewichtes ist damit trotz des Einsatzes der Topologieoptimierung begrenzt. Anhand von Umlaufbiegeprüfungen wird zunächst gezeigt, dass bei querschnittsbezogen gleicher Spannung hochdynamisch zyklisch auf Biegung beanspruchte Geometrien bei Wandstärken unterhalb von 5 mm geringere Festigkeiten aufweisen. Dies gilt sowohl für das dynamische Verhalten an

Luft als auch unter korrosiver Umgebung. Dieses Ergebnis kann auf Bauteile, die dynamisch auf Torsion beansprucht sind, übertragen werden, nicht aber auf steifigkeitsgetriebene Geometrien, da hier keine hochdynamische Wechselbelastung vorliegt. Folglich können hier weitere Wandstärken-Reduzierungen umgesetzt werden. Dies gelingt durch Übertragung von Erkenntnissen aus dem Bereich der Oberflächenstrukturierung von Gießwerkzeugen bei gleichzeitiger Ableitung von Konstruktionsregeln. Durch den Einsatz fließrichtungsgebundener und fließrichtungsunabhängiger Strukturen wird das Formfüllverhalten signifikant verbessert, was aufgrund gleicher erforderlicher Fließlängen zur Reduzierung von Wandstärken genutzt wird. Unter Großserienbedingungen gelingt es am Beispiel eines Aluminium-Hilfsrahmens, großflächige Bereiche mit Wandstärken von 3,5 mm zu vergießen. Dies entspricht einer Reduzierung von 35 % gegenüber den Wandstärken des Referenzstandes. Dadurch kann am untersuchten Hilfsrahmen ohne Einbußen bei der Bauteilperformance eine Gewichtsersparnis von 6 % ausgewiesen werden.

Als weiterer Faktor werden die Prozessparameter der Wärmebehandlung untersucht. Primäres Ziel ist dabei die Reduzierung der Gesamtprozesszeit. Auf Basis von Untersuchungen unterschiedlicher T64-Rezepturen für eine AlSi7Mg-Legierung gelingt es dabei, eine um 40 % geringere Prozesszeit zu identifizieren, die vergleichbare statische mechanische Kennwerte liefert und für neue Produkte zur Umsetzung empfohlen wird. Da bei der Untersuchung der dynamischen Eigenschaften leichte Abweichungen festgestellt worden sind, wird dies zum Anlass genommen, verstärkt den Abgleich von statischen mechanischen Kennwerten und dem dynamischen Bauteilverhalten durchzuführen und auch unterschiedliche Ofenkonzepte miteinander zu vergleichen.

Es kann zunächst gezeigt werden, dass Bauteile, die trotz gleicher Grundrezeptur der Wärmebehandlung, aufgrund der Prozessrandbedingungen unterschiedlicher Ofenkonzepte geringen Abweichungen ausgesetzt sind. Diese Abweichungen entstehen aufgrund unterschiedlicher Chargengröße bzw. dem Masseverhältnis von Wasser zu Chargen. Es ergibt sich ein unterschiedliches Abschreckverhalten im Wasserbad. Durch diese Unterschiede entstehen Eigenspannungen, die das dynamische Bauteilverhalten beeinflussen können.

Weitere Untersuchungen durch Variation der einzelnen Parameter Lösungsglügen, Abschrecken und Auslagerung zeigen, dass trotz vergleichbarer mechanischer Eigenschaften es signifikante Abweichungen im dynamischen Bauteilverhalten geben kann. Die Gesamtlänge der Prozessführung hat dabei keine Aussagekraft. In den Untersuchungen zeigt beispielsweise ein kurzes Auslagern bei hoher Temperatur hohes dynamisches Potenzial. Dagegen ergibt eine lange Auslagerungszeit bei moderaten Temperaturen eine geringere Wöhlerneigung. Die Änderung der Legierungszusammensetzung einer AlSi7Mg-Legierung durch verringerte Zugabe von Magnesium führt in weiteren Untersuchungen zu einem erwartungsgemäßen Abfall der statischen mechanischen Eigenschaften. Die erreichten Schwingspielzahlen im dynamischen Versuch sind dennoch gleichwertig zur Basiszusammensetzung. Untersuchungen des Gefüges führten in keinem der Fälle zu einem aufschlussreichen Ergebnis. Während der sDAS aufgrund gleicher Gießrandbedingungen erwartungsgemäß vergleichbar ist, kann für die unterschiedlichen Parametervariationen der Wärmebehandlung weder im Bereich der Partikelgröße des eutektischen Siliziums noch in der Einförmigkeit der Partikel eine Korrelation zum dynamischen Bauteilverhalten aufgezeigt werden.

Ausblickend ist es folglich erforderlich, den Abgleich statischer und dynamischer Eigenschaften verstärkt zu betrachten und die verursachenden Mechanismen zu identifizieren und zu verstehen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist eine Abhängigkeit zur Morphologie, Topographie und der Zusammensetzung der ausgeschiedenen Mg_2Si -Phasen zu erwarten. Auch werden Bauteil-Eigenspannungen in Wechselwirkung treten. Gleichzeitig gilt es, Prozesse und Prozessänderungen sowohl über statische als auch dynamische Untersuchungen zu verifizieren und freizugeben. Hierzu können vereinfachte Untersuchungsmethoden entwickelt werden. Eine Hilfestellung zur Vorauswahl von Zeit-Temperatur-Folgen der Wärmebehandlung können CCT- und TTT-Schaubilder geben.

Bei der Entwicklung zukünftiger Leichtbau-Produkte gilt es, Prozess- und Fertigungsrandbedingungen umfänglich bei der Auslegung zu berücksichtigen. Dazu ist die Weiterentwicklung der Modellierung des Abschreckverhaltens in der CFD-Simulation erforderlich, um Eigenspannungen genauer vorhersagen zu können. Zudem ist auf Basis des Ausscheidungsverhaltens der unterschiedlichen Mg-Si-

Phasen das dynamische Werkstoffverhalten zu charakterisieren und in Korrelation zu bringen. Dazu sind Kristallstrukturanalysen mit Hilfe der (hochauflösenden) Transmissionselektronenmikroskopie (TEM bzw. HRTEM) erforderlich.

Die Weiterentwicklung von Fertigungsprozessen ist unter ökonomischen und ökologischen Aspekten möglich. Eine Senkung der Ressourcenverbräuche ist kostenneutral oder gar gewinnbringend durchführbar. Der Abgleich des dynamischen Bauteilverhaltens unter Leichtbauaspekten ist dabei zwingend erforderlich. Auch ist verstärkt auf eine stabile Prozessführung zu achten. Schlüssel hierzu ist eine durchgängige teilbezogene Prozessdatenerfassung mit nachgelagerter Analyse von Qualitätsmerkmalen und Prozessparametern durch Data-Mining-Methoden.

Mit der vorliegenden Arbeit kann so ein Beitrag auf dem Weg zur sauberen Mobilität durch neue Ansätze im Leichtbau und der Etablierung energieeffizienter, auf die Bauteilerfordernisse abgestimmter Prozesse getätigt werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: CO ₂ -Emissionen und Technologiekosten in Abhängigkeit des Technologiepfades im Jahre 2030 in Anlehnung an [19]	6
Abbildung 1-2: Gewichtsspirale [20].....	7
Abbildung 1-3: Anteile am Gesamtgewicht bzw. Gesamtverbrauch eines typischen PKWs der Kompaktklasse nach [29].....	8
Abbildung 1-4: Umkehr der Gewichtsspirale [20]	9
Abbildung 1-5: Intelligenter Leichtbau im Fahrwerk, Darstellung wichtiger Einflussfaktoren	11
Abbildung 1-6: LifeCycle Engineering und intelligenter Leichtbau [20].....	11
Abbildung 1-7: Vergleich Fahrwerk Volkswagen Golf und Audi S3 [48].....	12
Abbildung 1-8: Leichtbau-Bremsscheiben und –Sättel (oben links: Leichtbaubremsscheibe Mercedes S-Klasse [57], unten links: C/SiC Bremsscheibe SGL Group [53], rechts: Brembo Bremssattel für Ferrari [58]).....	13
Abbildung 2-1: Bestandteile eines modernen Fahrzeugs im Gesamtfahrzeug-Kontext in Anlehnung an [73]	17
Abbildung 2-2: Volkswagen Golf 7 - Fahrwerk	18
Abbildung 2-3: Anforderungen an das Fahrwerk nach [73]	19
Abbildung 2-4: Der Produktentstehungsprozess, schematische Darstellung mit den wichtigsten Phasen und Meilensteinen	20
Abbildung 2-5: Interdisziplinäre Entwicklung gegossener Fahrwerk-Komponenten, (Hintergrundgrafik: Scientific Animations [84])	21
Abbildung 2-6: Arbeitsweise des Deltaoptimierers (Volkswagen-Topologieoptimierung) [109].....	23
Abbildung 2-7: Integration von Konstruktionsregeln in die Optimierung [111].....	24
Abbildung 2-8: Integration von Prinzipien zur Verbesserung der Formfüllung in die Optimierung [111].....	25
Abbildung 2-9: Integration der Gießsimulation in der Topologieoptimierung als erweiterte Optimierungsschleife [111].....	25
Abbildung 2-10: Konzept der fertigungsgerechten Topologieoptimierung in Anlehnung an [111].....	26
Abbildung 2-11: Wichtige Möglichkeiten und Einsatzgebiete der Gießsimulation bei der Herstellung von gegossenen Fahrwerk-Komponenten aus Aluminium	27

Abbildung 2-12: Gefügeberechnung während der Erstarrung nach [115]	28
Abbildung 2-13: V-Modell der Systementwicklung nach [122, 124, 125].....	30
Abbildung 2-14: Betriebsfestigkeitsprüfung von Fahrwerk-Komponenten – Übersicht über typische Erprobungsarten	31
Abbildung 2-15: Schwenklager-Kokille für Schwerkraft-Kokillenguss.....	34
Abbildung 2-16: Die CPC-Gießmaschine. Links: aufgebaute Maschine im geöffneten Zustand; rechts: schematische Darstellung, (Graphik: KSM Castings, Hildesheim)	36
Abbildung 2-17: CPC-Guss – Druckkurve, in Anlehnung an [140]	37
Abbildung 2-18: Das Zustandsdiagramm Aluminium-Silizium (aluminiumreiche Seite) in Anlehnung an [148, 149].....	40
Abbildung 2-19: Gegenüberstellung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Aushärtungszustandes bei den Wärmebehandlungszuständen T6 und T7 nach [163]	44
Abbildung 2-20: Prinzipieller Verlauf einer T6-Wärmebehandlung für Aluminiumgussteile	45
Abbildung 2-21: quasibinäres Al-Mg ₂ Si-Phasendiagramm nach [168, 169]	46
Abbildung 2-22: Gefügevergleich des eutektischen Siliziums vor und nach dem Lösungsglühen am Beispiel einer im CPC-Verfahren vergossenen AlSi7Mg0,3, Vergrößerung 1000x	47
Abbildung 2-23: Theorie der Zwillingsbildung von Siliziumkristallen durch Adsorption von Veredelungselementen an Wachstumsstufen [175]	47
Abbildung 2-24: a) atomar aufgelöste mikroskopische Aufnahme einer teilkohärenten β' -Mg ₂ Si Ausscheidung mit einer Abweichung von etwa 10° gegenüber des {001}-Gitters der Aluminium-Matrix	50
Abbildung 3-1: Schematischer Fertigungsprozess einer Fahrwerk-Komponente aus Aluminium-Guss.....	53
Abbildung 3-2: Ishikawa-Diagramm – Auswahl wichtiger Einflussfaktoren auf den Gießprozess	54
Abbildung 3-3: Phasen einer Ökobilanz (Stages of an LifeCycle-Assessment) [188]	55
Abbildung 3-4: CO ₂ -Footprint eines Aluminium-Radträgers aus Beschaffungsphase (Masselproduktion) und aufgeschlüsselter Produktionsphase	60

Abbildung 3-5: CO ₂ -Footprint der Produktionsphase eines Aluminium-Radträgers ..	62
Abbildung 4-1: Auswahl wichtiger prozessbedingter Einflussfaktoren auf den Leichtbau gegossener Aluminium-Komponenten.....	64
Abbildung 4-2: Vergleich der Korngrößen dick- (links, 597 µm) und dünnwandigen (rechts, 545 µm) Gefüges, Linienschnittverfahren nach ASTM E112, Ätzung nach Barker, Legierung AlSi7Mg, CPC gegossen	67
Abbildung 4-3: Umlaufbiegeprobe nach DIN 50113 [204], CAD-Darstellung der einzelnen Probengeometrien (links) und Bemaßung (rechts) am Beispiel für einen Prüfquerschnitt von 3 mm.....	68
Abbildung 4-4: Wandstärkenabhängigkeit dynamischer Belastung der Legierung AlSi7Mg, Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung an Luft für die Lasthorizonte 230 MPa und 210 MPa auf der Primär- sowie für 180 MPa und 150 MPa auf der Sekundärachse	70
Abbildung 4-5: Wandstärkenabhängigkeit dynamischer Belastung der Legierung AlSi7Mg, Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung in korrosiver Umgebung für die Lasthorizonte 230 MPa und 210 MPa auf der Primär- sowie für 180 MPa, 150 MPa und 150 MPa auf der Sekundärachse.....	70
Abbildung 4-6: Wöhlerkurve für die Ergebnisse der Umlaufbiegeprüfung an Luft (durchgezogene Linie) und in korrosiver Umgebung (gestrichelte Linie) für die Legierung AlSi7Mg.....	71
Abbildung 4-7: „Waffelmuster“ und „Krähenfüße“ als Gießhilfe, Darstellung des Gussteils	73
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Elementarzelle.....	74
Abbildung 4-9: modulare Versuchskokille, CAD-Darstellung mit Kennzeichnung von Untersuchungsseite (U) und Referenzseite (R); Transparent: Formoberteil der Untersuchungsseite, Modulplatte als Einsatz für beide Seiten des Formober- und Formunterteils	75
Abbildung 4-10: Formfülllänge [%] in Abhängigkeit von der Strukturierung, ohne (links) und mit (rechts) Verwendung hochisolierender Schlichte [48].....	76
Abbildung 4-11: Formfülllänge [%] in Abhängigkeit von Strukturierung und Wandstärke, Untersuchung in schlichtefreier Kokille [48].....	76

Abbildung 4-12: Konstruktionsrichtlinie – Vergleich günstiger und ungünstiger Ausführung der Oberflächenstrukturierung unter Berücksichtigung mechanischer Bearbeitung, Darstellung des Bauteils	78
Abbildung 4-13: Konstruktionsrichtlinie – Vergleich günstiger und ungünstiger Ausführung der Oberflächenstrukturierung unter Berücksichtigung von Kantenaus- und Rippeneinlauf, Darstellung des Bauteils.....	78
Abbildung 4-14: Konstruktionsrichtlinie – Vergleich günstiger und ungünstiger Ausführung der Oberflächenstrukturierung, Darstellung des Bauteils.....	79
Abbildung 4-15: Gewichtsbilanz für den Hilfsrahmen im Vergleich zu den Serien-Lösungen	80
Abbildung 4-16: Gießsimulation eines Hilfsrahmens im Schwerkraft-Kokillenguss, Temperaturverteilung, Fließgeschwindigkeit und Schmelzehistorie als Faktoren zur Auswahl geeigneter Oberflächenstrukturierungen	81
Abbildung 4-17: Darstellung der strukturierten Bereiche des Hilfsrahmens am Beispiel der Bauteiloberseite.....	81
Abbildung 4-18: „Haifisch“ und „Lotus“ als innovative Gießhilfen, Darstellung des Gussteils	82
Abbildung 4-19: Potenzial der Wandstärkenreduzierung am Beispiel des Aluminium-Vorderachs-Hilfsrahmens; links: Bauteil, rechts: Schnittdarstellung im Vergleich zur bisherigen Lösung.....	83
Abbildung 4-20: Laufleistungsvergleich auf dem Mehrkomponenten-Prüfstand unter Korrosion	84
Abbildung 4-21: Vergleich prozess- und strukturbedingter Wandstärke.....	84
Abbildung 4-22: Gefügevergleich für konventionelle und verkürzte Wärmebehandlung, Legierung AlSi7Mg0,3, CPC-Guss.....	88
Abbildung 4-23: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung für konventionelle, mittellange und verkürzte Wärmebehandlung.....	89
Abbildung 4-24: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Zusammenfassung der Ergebnisse für konventionelle, mittellange und verkürzte Wärmebehandlung ...	90
Abbildung 4-25: Schematischer Vergleich der Gesamtprozesszeit konventioneller und verkürzter Wärmebehandlung	90
Abbildung 5-1: Grundsätzlicher Ablauf der Herstellung von Gussteilen für die Erprobung	96

Abbildung 5-2: Schematischer Aufbau eines Kammerofens	97
Abbildung 5-3: Schematischer Aufbau eines Durchlaufofens.....	98
Abbildung 5-4: Schematischer Aufbau eines Drehherdofens	99
Abbildung 5-5: Aufteilung der Gusscharge für den Ofenabgleich.....	101
Abbildung 5-6: Wöhleranalyse im Zeitfestigkeitsbereich des Ofenabgleichs – Vergleich von Kammer-, Durchlauf- und Drehherdofen	103
Abbildung 5-7: Gefügevergleich von Bauteilen mit hoher (links) und niedriger (rechts) Laufleistung, Legierung AlSi7Mg0,3.....	104
Abbildung 5-8: Nukijama-Kurve – Abhängigkeit der Wärmestromdichte von der Überhitzung beim Behältersieden in Anlehnung an [222, 223].....	106
Abbildung 5-9: Tiefe und Verteilung der Messstellen am untersuchten Aluminium- Radträger	108
Abbildung 5-10: Temperaturkurven, Auszug der Messfahrt im Kammerofen, Teilbereich des Abschreckvorgangs, Messteil mit Positionen 1-9 sowie Umgebungstemperatur.....	109
Abbildung 5-11: Temperaturkurven, Auszug der Messfahrt im Durchlaufofen, Teilbereich des Abschreckvorgangs, Messteil mit Positionen 1-9 sowie Umgebungstemperatur.....	110
Abbildung 5-12: Vergleich der Abschreckgeschwindigkeiten für Kammerofen (KO) und Durchlaufofen (DLO) im Radträger.....	112
Abbildung 5-13: Simulationsgüte, Vergleich des Temperaturverlaufs von Versuch und Simulation während des Abschreckvorgangs am Beispiel des Kammerofens	113
Abbildung 5-14: Knotenkonformes FEM-Netz für die Berücksichtigung von Roh- und Fertigteilgeometrie	114
Abbildung 5-15: Schematische Darstellung der Eigenspannungen durch Überführung der abschreckbedingten Temperaturvarianzen	115
Abbildung 5-16: schematische Darstellung des Aufbaus eines Betriebslasten- Rechendecks unter Berücksichtigung von Eigenspannungen.....	115
Abbildung 5-17: schematische Darstellung des Aufbaus eines Lebensdauer- Rechendecks unter Berücksichtigung von Eigenspannungen.....	116
Abbildung 5-18: Vergleich der Bauteilbelastung durch Berücksichtigung des Abschreckvorgangs der Wärmebehandlung nach Basisrezeptur A. Links: konventionell ohne Vorlast; rechts: Berücksichtigung der durch das Abschrecken	

entstandenen Eigenspannungen; blau: Druckeigenspannungen, orange: Zugeigenspannungen	117
Abbildung 5-19: Vergleich der Belastung auf dem Einkomponenten-Prüfstand am Beispiel des niedrigen Lastniveaus, links: konventionell; rechts: Berücksichtigung der Eigenspannung als Vorlast mit Wärmebehandlung nach Basisrezeptur A.	117
Abbildung 5-20: Vergleich der Lebensdauer auf dem Einkomponenten-Prüfstand für Bauteile aus dem Kammerofen (links) und schroffer abgeschreckter Bauteile, wie sie im Durchlaufofen anfallen (rechts), exemplarisch am niedrigen Lastniveau	119
Abbildung 5-21: Aufteilung der Gusscharge für den Parametervergleich.....	120
Abbildung 5-22: Methoden zur Analyse der Siliziumpartikelgröße für a) Kreisförmigkeit (circularity), b) Seitenverhältnis (aspect ratio), c) Rundheit (roundness) sowie d) Gestaltbeschaffenheit (solidity).....	123
Abbildung 5-23: Gefügevergleich der Versuche der Parametervariation, oben links: V5, Basis Versuchsofen; oben rechts: V6 – VO, LG 545°C; unten links: V7 – VO, Wasser 65°C; unten rechts: V8 – VO, AT 190°C	124
Abbildung 5-24: Auszug aus der Auswertung der sekundären Dendritenarmabstände (sDAS) exemplarisch für eine Probe aus Versuch 7 ...	125
Abbildung 5-25: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Serien-Ofen vs. Versuchsofen, Basisrezeptur	127
Abbildung 5-26: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur vs. erhöhte Lösungsglühtemperatur	128
Abbildung 5-27: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur vs. erhöhte Wasserbadtemperatur	129
Abbildung 5-28: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur vs. erhöhte Auslagerungstemperatur.....	129
Abbildung 5-29: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, erhöhte Wasserbadtemperatur vs. erhöhte Lösungsglühtemperatur.....	130
Abbildung 5-30: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, erhöhte Wasserbadtemperatur vs. erhöhte Auslagerungstemperatur.....	130
Abbildung 5-31: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, erhöhte Auslagerungstemperatur vs. erhöhte Lösungsglühtemperatur.....	131

Abbildung 5-32: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Übersicht der Parametervariation im Versuchsofen.....	132
Abbildung 5-33: Gefügevergleich des Versuches mit abgesenktem Mg-Gehalt, links: Schliffbild; rechts: Partikelanalyse.....	133
Abbildung 5-34: Wöhlerdiagramm, Zeitfestigkeitsbereich, Vergleich der Wärmebehandlung, Basis-Rezeptur, Einfluss erhöhten Mg-Gehaltes	135
Abbildung 6-1: CO ₂ -Footprint des Aluminium-Radträgers mit optimierter Wärmebehandlung.....	137
Abbildung 6-2: Varianz der Abschreckgeschwindigkeiten ausgewählter Temperaturintervalle an unterschiedlichen Messpositionen des Radträgers für Kammerofen (links) und Durchlauföfen (rechts).....	140
Abbildung 6-3: CCT-Diagramm für die Legierung AlSi7Mg0,3. Darstellung der Bildung von Mg ₂ Si-Ausscheidungen und der zugehörigen metastabilen Phasen; Einblendung der Abschreckphase der Wärmebehandlung im Kammer- und Durchlauföfen am Beispiel der Positionen für minimale und maximale Abschreckgeschwindigkeit sowie vier ausgewählter konstanter Abschreckraten .	141
Abbildung 6-4: TTT-Diagramm für die Legierung AlSi7Mg0,3. Darstellung der Bildung von Mg ₂ Si-Ausscheidungen und der zugehörigen metastabilen Phasen; Einblendung der Auslagerungsphase der Wärmebehandlung im Kammerofen am Beispiel der Position 2.....	143
Abbildung 6-5: Beeinflussung des Leichtbaupotenzials von gegossenen Fahrwerk-Komponenten aus Al-Si-Legierungen	146
Abbildung 6-6: Reifegrad der Analysemethoden in Anlehnung an [232].....	147
Abbildung 6-7: Der Weg von der Prozessdatenerfassung zum Prozesswissen..	148
Abbildung 6-8: Prinzip der Prozessrückverfolgbarkeit durch chargenbezogene Informationsvererbung und teilindividuelle Prozessdatenerfassung.....	149
Abbildung 0-1: Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie des schmelzflüssigen (G _f) und des kristallinen Zustandes (G _k) in der Nähe des Schmelzpunktes in Anlehnung an [153].....	XIII
Abbildung 0-2: Heterogene Keimbildung (γ_{kf} – spez. Grenzflächenenergie Kristall–Flüssigkeit; γ_{kk} – spez. Grenzflächenenergie Kristall–Fremdkristall) [155].....	XIII
Abbildung 0-3: Vergleich von homogener (a) und heterogener (b) Keimbildung [156]	XIV

Abbildung 0-4: Abhängigkeit der freien Enthalpie für die Keimbildung vom Keimradius in Anlehnung an [154]	XV
Abbildung 0-5: Korngröße bei der Erstarrung [154].....	XVI
Abbildung 0-6: Morphologische Erstarrungstypen [150].....	XVII
Abbildung 0-7: Schematisches Zustandsdiagramm (links) des Al-Mg ₂ Si-Systems mit den metastabilen Phasengebieten und dem zugehörigen Zeit-Temperatur-Ausscheidungsdiagramm (rechts), nach Huppert-Schemme [236, 160]	XIX
Abbildung 0-8: Verschiedene Zustände einer aushärtbaren Legierung, schematische Darstellung in Anlehnung an [237, 158]	XX
Abbildung 0-9: Wechselwirkung von Versetzungen [237]	XXI
Abbildung 0-10: Kritische Schubspannung τ in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser d (ΔT_u = Umgehung der Teilchen, ΔT_s = Schneiden der Teilchen) in Anlehnung an [238].....	XXII
Abbildung 0-11: Schematischer Aufbau der Oxidschicht des Aluminiums [160]	XXVII
Abbildung 0-12: links: Pourbaix-Diagramm (vereinfacht) für das System Al/H ₂ O (10 ⁻⁶ mol/l Al ³⁺ -Ionen) nach [243]; rechts: Beständigkeit der Aluminiumoxidschicht gegenüber Säuren und Laugen in Abhängigkeit des pH-Werten nach [242]	XXVIII
Abbildung 0-13: Elektrochemischer Korrosionsmechanismus bei Aluminium [160]	XXIX
Abbildung 0-14: schematische Darstellung der Flächenkorrosion, gleichmäßig (G) und muldenförmig (M) [244]	XXXI
Abbildung 0-15: schematische Darstellung der Lochkorrosion, links: kraterförmig, mittig: nadelstichartig, rechts: unterhöhlt [244]	XXXII
Abbildung 0-16: Beispiel für interkristalline Korrosion bei AlMg _{4,5} Mn _{0,7} nach Sensibilisierung durch Glühen bei 450°C, 30 Min, Abschrecken in Wasser und nachfolgende 3-monatige Lagerung bei 100 °C. Längsschliff, geätzt in 10%-ige H ₃ PO ₄ [160]	XXXIV
Abbildung 0-17: Mechanismus der Spannungsrissskorrosion, schematisch [249].....	XXXV

Symbole und Abkürzungen

APG	Antiphasengrenze
AT	Auslagerungs-Temperatur
BESO	Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization
BMG	Baumustergenehmigung
CAD	Computer Aided Design
CCT	Continuous Cooling Transformation (Umwandlung bei konstanter Abkühlung)
CFD	computational fluid dynamics
CFK	Carbonfaser verstärkte Kunststoffe
CPC	Counter Pressure Casting
DAS	Dendritenarmabstand
sDAS	sekundärer Dendritenarmabstand
DHO	Drehherdofen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLO	Durchlaufofen
DMC	Data Matrix Code
EPA	Environmental Protection Agency
fcc	kubisch flächenzentriert
FEM	Finite Elemente Methode
FRV	Fuel Reduction Value
FSM	front rear suspension modul (Vorderachs-Hilfsrahmen)
GP-Zone	Guiner-Preson-Zone
GFK	Glasfaser verstärkte Kunststoffe
GKE	gesättigte Kalometerelektrode
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
hcp	hexagonal dichteste Packung
HRTEM	high resolution transmission electron microscopy
HTO	Hochtemperaturofen
ISO	International Organization for Standardization
KO	Kammerofen
LCA	LifeCycle-Assessment (Umweltbilanzierung)
LG	Lösungsglüh-Temperatur

MKS	Mehrkörpersimulation
MQB	Modularer Querbaukasten
MW	Mittelwert
NHE	Normal-Wasserstoff-Elektrode
NTO	Niedertemperaturofen
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
PKW	Personenkraftwagen
RSM	rear suspension modul (Hinterachs-Hilfsrahmen)
StabW	Standardabweichung
SIMP	Solid Isotropic Microstructure With Penalization
TEM	Transmissionselektronen-Mikroskopie
TTT	Time Temperature Transformation (Zeit-Temperatur-Umwandlung)
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
A	Wärmeaustauschfläche
A_5	Bruchdehnung
G_f	Enthalpie des schmelzflüssigen Zustandes
G_k	Enthalpie des kristallinen Zustandes
δG	freie Enthalpie
Δg_v	volumenbezogene Änderung der freien Enthalpie
i	Laufindex der Proben pro Lasthorizont
j	Laufindex für alle Proben
k	Neigung der Wöhlerlinie
λ	Wärmeleitfähigkeit
n	Anzahl der Versuchsergebnisse
$N_{50\%}^*$	Mittelwert der Schwingspiele auf einem gemeinsamen Lasthorizont
N_i^*	Schwingspielzahl der Probe „i“ auf einem gemeinsamen Lasthorizont
n_1	Anzahl der Versuchsergebnisse auf Lasthorizont 1
n_2	Anzahl der Versuchsergebnisse auf Lasthorizont 2
$N_{50\%}$	Allgemeiner Mittelwert der Schwingspielzahlen
$N_{50\%, 1}$	Mittelwert der Schwingspielzahlen auf Lasthorizont 1
$N_{50\%, 2}$	Mittelwert der Schwingspielzahlen auf Lasthorizont 2
N_i	Schwingspielzahl der Probe „i“ auf einem Lasthorizont

$N_{i,1}$	Schwingspielzahl der Probe „i“ auf Lasthorizont 1
$N_{i,2}$	Schwingspielzahl der Probe „i“ auf Lasthorizont 2
N_j	Schwingspielzahl der Probe „j“
$P_{\text{Kok,max}}$	maximaler Gegendruck im Kokillenraum
Δp_{feed}	Speisungsdruck
Δp_{fill}	Differenz-Fülldruck
\dot{Q}	Wärmestrom
\dot{q}	Wärmestromdichte
R_m	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	Dehngrenze
r_c	Keimradius
T	Temperatur
$T_{E,KO}$	Eintauchtemperatur
ΔT	Unterkühlung
$t_{1\dots n}$	Zeitpunkt
t_E	Ende der Erstarrung
τ	Schubspannung
S_a^*	Amplitude für den gemeinsamen Lasthorizont
S_a	Amplitude
$S_{a,1}$	Amplitude für Lasthorizont 1
$S_{a,2}$	Amplitude für Lasthorizont 2
$S_{a,i}$	Amplitude der Probe „i“
$S_{a,j}$	Amplitude der Probe „j“
$s_{\log N,1}$	logarithmische Varianz auf Lasthorizont 1
$s_{\log N,2}$	logarithmische Varianz auf Lasthorizont 2
$s_{\log N,\text{korr}1D}$	1D korrigierte logarithmische Standardabweichung
$s_{\log N,\text{korr}2D}$	2D korrigierte logarithmische Standardabweichung
S_m	Mittellast
ΔS_E	Erstarrungsentropie
V_m	Molvolumen
$v_{T1\dots n}$	Abschreckgeschwindigkeit
γ_{kf}	spez. Grenzflächenenergie Kristall–Flüssigkeit;
$\gamma_{kk'}$	spez. Grenzflächenenergie Kristall–Fremdkristall



Literaturverzeichnis

- [1] Volkswagen AG, „Konzern Nachhaltigkeitsbericht 2014, Seite 12,“ Volkswagen AG, 2014. [Online].
Available:
http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/nachhaltigkeitsberichte/konzern-nachhaltigkeitsbericht-2014-_jcr_content/renditions/rendition.file/volkswagen_nachhaltigkeitsbericht_2014.pdf.
[Zugriff am 26. Oktober 2015].
- [2] H.-D. Pötsch und M. Müller, „Wolfsburg, Pressekonferenz mit Herrn Hans Dieter Pötsch und Herrn Matthias Müller: Der Volkswagen Konzern kommt voran: Aufklärung, Kundenlösungen, Neuausrichtung,“ 11.12.2015. [Online].
Available:
http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/talks_and_presentations/2015/12/Presentation_MUE_POE.bin.html/binarystorageitem/file/2015_12_10_Pr%C3%A4sentation+PK_final_DE.pdf.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [3] H.-D. Zetsche et al., „Daimler Unternehmensprofil 2015,“ Daimler AG, 2015. [Online].
Available: <http://www.daimler.com/dokumente/konzern/sonstiges/daimler-unternehmensprofil-de-2015.pdf>.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [4] H.-D. Zetsche, C. Hohmann-Dennhardt und T. Weber, „Daimler Nachhaltigkeitsbereich 2014,“ Daimler AG, 16.03.2015. [Online]. Available:
<http://www.daimler.com/dokumente/nachhaltigkeit/sonstiges/daimler-nachhaltigkeitsbericht-2014.pdf>.
[Zugriff am 23.12.2015].
- [5] N. Reithofer et al., „Sustainable Value Report 2014, BMW Group,“ BMW Group, 17. März 2015. [Online].
Available:
http://www.bmwgroup.com/com/de/_common/pdf/BMW_Group_SVR2014_D

- E.pdf.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [6] N. Reithofer et al., „BMW Group Geschäftsbericht 2014,“ BMW Group, 12 03 2015. [Online].
Available:
<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/download.html?textId=252220&textAttachmentId=301004>.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [7] „General Motors Company - 2014 Annual Report,“ 24 04 2015. [Online].
Available:
http://www.gm.com/content/dam/gmcom/COMPANY/Investors/Stockholder_Information/PDFs/2014_GM_Annual_Report.pdf.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [8] „Ford Motor Company - 2014 Annual Report - Delivering growth for all,“ 23 03 2015. [Online].
Available:
http://corporate.ford.com/annual-reports/annual-report-2014/files/201_Ford_Annual_Report_sm.pdf.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [9] „Hyundai Motor Company - Annual Report 2014,“ 09 07 2015. [Online].
Available:
<http://worldwide.hyundai.com/wcm/idc/groups/ssgeneralcontent/@hmc/documents/sitecontent/mdaw/mtaz/~edisp/hw103155.pdf>.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [10] „Kia Motors - Annual Report 2014,“ 30 04 2015. [Online].
Available: http://pr.kia.com/file/downloadBlb.do?fil_sn=F200002211.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [11] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: "Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO2-Emmisionen von Personenkraftwagen",“ 01 04 2009. [Online].
Available: www.bmub.bund.de/N43842/.
[Zugriff am 26. Oktober 2015].

- [12] „Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von PKW und leichten NFZ,“ 23 04 2009. [Online].
Available:
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0443&from=en>.
[Zugriff am 25. Dezember 2015].
- [13] „Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraft,“ 11 03 2014. [Online].
Available:
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0333&from=EN>.
[Zugriff am 25. Dezember 2015].
- [14] „Federal Register / Vol. 75, No. 88 / 40 CFR Parts 85, 86, and 600; 49 CFR Parts 531, 533, 536, et al (2012-2016), pages 25323ff,“ 07 05 2010. [Online].
Available:
<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-05-07/pdf/FR-2010-05-07.pdf>.
[Zugriff am 25. Dezember 2015].
- [15] „Federal Register / Vol. 77, No. 199 / 40 CFR Parts 85, 86, and 600; 49 CFR Parts 523, 531, 533, et al (2017ff), pages 62623ff,“ 15 10 2012. [Online].
Available:
<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2012-10-15/pdf/2012-21972.pdf>.
[Zugriff am 25. Dezember 2015].
- [16] „ICCT - The International Council On Clean Transportation - Global passenger vehicle standards,“ [Online].
Available:
<http://www.theicct.org/info-tools/global-passenger-vehicle-standards>.
[Zugriff am 25. Dezember 2015].
- [17] „CO₂-Emissionen von Neuwagen: 130 Gramm CO₂ pro Kilometer im Jahr

- 2015, Plenartagung des Europäischen Parlaments,“ 15.-18. Dezember 2008. [Online].
Available:
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20081208BRI43933+ITEM-002-DE+DOC+XML+V0//DE&language=DE>.
[Zugriff am 12. August 2015].
- [18] C.-S. Ernst, L. Eckstein und I. Olschewski, „CO₂-Reduzierungspotenziale bei PKW bis 2020, RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge, Strategie und Beratung, Abschlussbericht 113510 zur Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie,“ 12 2012. [Online].
Available:
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/co2-reduzierungspotenziale-bei-pkw-bis-2020-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
[Zugriff am 10. Dezember 2015].
- [19] C.-S. Ernst, L. Eckstein und I. Olschewski, „CO₂-Emissionsreduktion bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020, RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge, Strategie und Beratung, Abschlussbericht 123320 zur Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie,“ 08 2014. [Online].
Available:
<https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/co2-emissionsreduktion-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen-nach-2020-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
[Zugriff am 10. Dezember 2015].
- [20] J. Lehold, „Automobile Zukunft im Volkswagen Konzern,“ Autouni, 29 April 2015. [Online].
Available:
https://www.autouni.de/content/master/de/home/Veranstaltungen/institute/institut-fuer-produktion/veranstaltungen-produktion/Automobilproduktion_der_Zukunft_2015/jcr%3Acontent/container/eventdownload_2/file.res/2015-04-

- 29_Automobile%20Zukunft%20im%20Volksw.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [21] „Öko-Innovation – Schlüssel zur künftigen Wettbewerbsfähigkeit Europas,“ Europäische Kommission, 2012. [Online].
Available:
<http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/ecoinnovation/de.pdf>.
[Zugriff am 26. Dezember 2015].
- [22] H. Scherer, „9-Gang-Automatgetriebe für Front-Quer Anwendungen,“ ZF Friedrichshafen AG, 2013. [Online].
Available:
http://www.zf.com/media/media/de/document/corporate_2/press_3/press_kits_1/2013_int_fachpressekonferenz/ENG_9HP_Presseworkshop_9HP_Fach_PK_2013.pdf.
[Zugriff am 08 12 2015].
- [23] T. Kautz, E. Weissenbek und W. Blümlhuber, „Anorganische Sandkernfertigung: ein Verfahren mit Geschichte,“ *Giesserei* 97, pp. 76-79, September 2010.
- [24] K. Löchte und R. Boehm, „CORDIS - Das anorganische Bindersystem - Eigenschaften und Erfahrungen,“ *Giesserei-Rundschau* 52, pp. 68-70, 2005.
- [25] R. Boehm, J. Asal und B. Munker, „Der Weg zu einer wirtschaftlichen und emissionsfreien Giesserei,“ *Giesserei-Rundschau* 60, Heft 3/4, pp. 75-77, 2013.
- [26] P. Voigt, Untersuchungen zum Einsatz anorganischer Formstoffbinder zur Großserienproduktion komplexer Aluminium-Zylinderköpfe, Freiberg, 2007.
- [27] Volkswagen AG, „20 Jahre Audi Space Frame – Siegeszug begann auf der IAA,“ 03 09 2013. [Online].
Available:
http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/news/2013/09/Audi_Space_Frame.bin.html/pdfFile/20_jahre_audi_spaceframesiegeszugbegannaufderiaa.pdf.
[Zugriff am 26. Dezember 2015].

- [28] E. Karbe, „Leichtbau im Automobilbau,“ Mercedes-Benz, 03.12.2013. [Online].
Available: http://www.i2b.de/fileadmin/Media/Veranstaltung/pdf/2013-12-03_Leichtbau/Vortrag_Leichtbauentwicklung_von_Dr.-Ing._Eberhard_Karbe_03.12.2013.pdf.
[Zugriff am 23. Dezember 2015].
- [29] O. Täger und A. Plath, „Bedeutung des Leichtbaus für die Automobilindustrie,“ Volkswagen AG, 28.08.2013. [Online].
Available:
http://www.thermopre.de/downloads/Taeger_VW.pdf.
[Zugriff am 14. September 2014].
- [30] T. Trautwein, S. Henn und K. Rother, „Gewichtsspirale - Stellhebel in der Fahrzeugauslegung,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 390-395, Mai 2011.
- [31] K. Rohde-Brandenburger und J. Obernolte, „CO₂-potential of lightweight designed cars,“ in *DVM-Tag 2008, Leichtbaustrategien, ein wesentlicher Beitrag zur Klimadebatte*, Berlin, 23.-25. April 2008.
- [32] K. Rohde-Brandenburger und J. Obernolte, „CO₂-Potenzial durch Leichtbau beim PKW,“ *Materials Testing*, Bd. 51, Nr. 1-2, pp. 55-63, 2009.
- [33] S. Maurer, B. Wittner, S. Sikorski, D. Fuchs, D. Brand und Hug, Thomas, „Der Wunsch nach weniger,“ *ATZextra - Die neue C-Klasse von Mercedes-Benz*, pp. 62-67, August 2014.
- [34] M. Winterkorn und H.-D. Pötsch, „Volkswagen Golf VII: Launch of a new era,“ Volkswagen AG, 08. Oktober 2012. [Online].
Available:
http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/talks_and_presentations/2012/10/Volkswagen_Golf7_Launch.bin.html/binarystorageitem/file/2012-10-08+Golf+VII_Presentation_Website.pdf.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [35] „Der Passat in achter Generation,“ Volkswagen AG, Viavision, Oktober 2014. [Online].
Available: <http://www.viavision.org/ftp/1661.pdf>.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].

- [36] „Lifecycle - Umwelt-Zertifikat für die Mercedes-Benz C-Klasse,“ Daimler AG, 01. September 2015. [Online].
Available:
<https://www.daimler.com/bilder/nachhaltigkeit/produkt/umweltzertifikate/2685374-rz-update-uz-c-kl-dt-09-2015.pdf>.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [37] „Voll Hightech – die neuen Audi A4 und A4 Avant,“ Audi A4, 09 Oktober 2015. [Online].
Available:
https://audimediacenter-a.akamaihd.net/system/production/attachment_items/406011/file_upload_de/d086301df44249255c9b8cad2ca174b0ddfec0f2/Basisinfo_FV_A4_Avant_docx.pdf?1445354374.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [38] „Leichter, effizienter und voller Hightech – der neue Audi Q7,“ Audi AG, 08 Mai 2015. [Online].
Available:
<https://www.audi-mediacycenter.com/de/leichter-effizienter-und-voller-hightech-der-neue-audi-q7-2486>.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [39] „EuroCarBody Award 2015 für die Karosserie mit Carbon Core der neuen BMW 7er Reihe,“ BMW Group, 12 November 2015. [Online].
Available:
https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=eurocarbody-award-2015-f%C3%Bcr-die-karosserie-mit-carbon-core-der-neuen-bmw-7er-reihe&outputChannelId=7&id=T0242642DE&left_menu_item=node__4312.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [40] „Die Elektrifizierung des Passat - Der GTE,“ Viavision, Volkswagen AG, Juli 2015. [Online].
Available:
http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2015/07/Viavision04.bin.html/binarystorageitem/file/VIIVISION_D.pdf.

- [Zugriff am 20. Oktober 2015].
- [41] Früh, Christian, Hermann, Jochen, Tietke, Michael, Niestegge, Michael und u.a., „Komfort bei erlebbarer Dynamik und Agilität,“ *ATZextra - Die neue E-Klasse von Mercedes-Benz*, pp. 128-143, Januar 2009.
- [42] M. Reichenbach und M. Dr. Harrer, „Maximale Spreizung zwischen Performance und Fahrkomfort, Interview,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 22-25, Juni 2015.
- [43] H. Glaser und J. Starr, „Das Fahrwerk,“ *ATZextra - Der neue Audi A6*, pp. 92-93, November 2010.
- [44] P. E. Pfeffer, „Active Chassis Systems,“ *Autotech Review*, pp. 26-31, Juli 2012.
- [45] P. Schäfer, G. Wahl und M. Harrer, „Das Fahrwerk des Porsche 911,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 460-465, Juni 2012.
- [46] Weist, Udo, Missel, Joachim, Stefan, Cytrynski und u.a., „Fahrkomfort der extraklasse,“ *ATZextra - Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz*, pp. 127-128, Mai 2013.
- [47] H. E. Friedrich und S. K. Krishnamoorth, „Leichtbau als Treiber von Innovationen,“ in *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, Stuttgart, Springer Vieweg, 2013, pp. 1-30.
- [48] T. Beganovic und S. Gierth, „Innovation im Leichtmetallguss durch gießoptimierte Oberflächenstrukturierung,“ *2. VDI-Tagung - Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten 2016*, 17.-18. Februar 2016.
- [49] Pudenz, Katrin, „Murciélago-Nachfolger: V12-Supersportwagen mit Leichtbau-Fahrwerk,“ 25 Januar 2011. [Online].
Available:
<http://www.springerprofessional.de/murcielago-nachfolger-v12-supersportwagen-mit-leichtbau-fahrwerk-13161/3949570.html>.
[Zugriff am 29 12 2015].
- [50] Moers, Tobias, „Die Gewichtsschraube stoppen,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 262-265, April 2011.

- [51] M. Kelz, M. Ebner, T. Dr. Schmahlis, J. Bruckner und R. Dr. Lallement, „Leichter, komfortabler, sicherer,“ *ATZextra - Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz*, pp. 40-47, Mai 2013.
- [52] B. Pletschen, M. Gross, M. Löchle, H. Ruppert, G. Steller und S. Stelzer, „Komfort und Sportlichkeit,“ *ATZextra - Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz*, pp. 116-123, Mai 2013.
- [53] „Carbon-Keramik-Bremsscheibe,“ SGL Group, [Online].
Available:
http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/cc/carbon-ceramic-brake-disks/index.html?__locale=de.
[Zugriff am 13. Dezember 2015].
- [54] „Ästhetik und Leistung auf höchstem Niveau: Brembo präsentiert den Bremssattel “Extrema”,“ 05 März 2013. [Online].
Available:
http://www2.brembo.com/deu/presse/Documents/Pressemitteilung_%20Brembo%20präsentiert%20neuen%20Extrema%20Bremssattel_DE.pdf.
[Zugriff am 31. Dezember 2015].
- [55] „Ferrari LaFerrari - Innovationen - Fahrzeugdynamik,“ [Online].
Available:
http://auto.ferrari.com/de_DE/sportwagenmodelle/modellpalette/laFerrari/#innovationen-dynamics-5.
[Zugriff am 31. Dezember 2015].
- [56] „Brembo - Der Bremssattel “Extrema” ist im neuen Ferrari 458 Speciale A verbaut,“ 01 Oktober 2014. [Online].
Available:
<http://www2.brembo.com/deu/News/Pages/ferrari458.aspx>.
[Zugriff am 31. Dezember 2015].
- [57] „Brembo: Neues Leichtbau-Konzept für Bremsscheiben,“ [Online].
Available: <http://www2.brembo.com/deu/News/Pages/IAA2013.aspx>.
[Zugriff am 31. Dezember 2015].
- [58] „Brembo Brakes Introduces the New “Extrema” Caliper for High-Performance Sports Cars,“ [Online].
Available:

- <http://www.sub5zero.com/brembo-brakes-introduces-the-new-extrema-caliper/>.
[Zugriff am 31. Dezember 2015].
- [59] F. Severin, „Massiver Leichtbau - Potenziale massivumgeformter Komponenten,“ April 2014. [Online].
Available:
http://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/6_Presse_und_Medien/Veroeffentlichungen/Extra-Info/EXTRA-Info_Massiver_Leichtbau.pdf.
[Zugriff am 18. Oktober 2015].
- [60] Leiber Group, „Stahluminium,“ [Online].
Available:
http://www.leiber.com/fileadmin/leiber-group.com/assets/de/downloads/Broschuere_Hybridschmieden_02.pdf.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [61] Leiber Group, „Leiber Hybridschmieden,“ [Online].
Available: <http://www.leiber.com/Hybridschmieden.46.0.html>.
[Zugriff am 27. Dezember 2015].
- [62] A. Kroner, „Ritterschlag für die Hybridschmiede,“ *Industrieanzeiger*, Nr. 15.15, pp. 38-40, 22 Juni 2015.
- [63] S. Prukner und W. Menk, „Neue Perspektiven für Gusseisen mit Kugelgraphit - Gegossene Bauteile als Alternative zu geschmiedeten,“ *Giesserei-Rundschau*, Bd. Heft 9/10, pp. 170-173, 2007.
- [64] „Leichtbau im Fahrwerk von Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen - Trend zu Aluminium oder auch weiterhin Chancen für Gusseisen?,“ *Giesserei-Rundschau*, Bd. 49, Nr. 5/6, pp. 76-80, 2002.
- [65] Decking, Klaus, „Leichtbau mit bionischem Guss,“ *Giesserei*, Nr. 100, pp. 74-75, September 2013.
- [66] M. Nolte, „Audi bringt GFK-Feder noch in diesem Jahr in einem Serienmodell,“ 30 Juni 2014. [Online].
Available:
<http://automotive-technology.de/audi-bringt-gfk-feder-noch-in-diesem-jahr-in-einem-serienmodell/>. [Zugriff am 23. Februar 2015].

- [67] „Coil Springs - Blattfedern und Zubehör,“ 2015/2016. [Online].
Available:
http://www.coil-springs.de/wp-content/uploads/2014/09/coilsprings_Blattfedern-Katalog_2015-16.pdf.
[Zugriff am 31. Dezember 2015].
- [68] Fruhmann, Gabriele, Stretz, Klaus und Dr. Elbers, Christoph, „Leichtbau im Fahrwerk,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, pp. 394-399, Juni 2010.
- [69] K. Stretz, „Ultraleichtes Federbein für PKW,“ *Lightweight Design*, pp. 18-23, Februar 2011.
- [70] Fraunhofer LBF, „Schichtarbeit: leichter Querlenker aus Faserverbunden integriert mehrere Funktionen,“ 16 Dezember 2014. [Online].
Available:
http://www.lbf.fraunhofer.de/content/dam/lbf/de/documents/presse/Fraunhofer%20LBF_Leichtbauquerlenker.pdf.
[Zugriff am 02. Januar 2016].
- [71] „Volkswagen Braunschweig startet Leichtbau-Offensive im Bereich Fahrwerk,“ Volkswagen AG, 16 April 2015. [Online].
Available:
http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/news/2015/04/fahrwerk.bin.html/pdfFile/volkswagen_braunschweigstartetleichtbau-offensiveimbereichfahrwe.pdf.
[Zugriff am 20. April 2015].
- [72] H.-H. Braess und Seiffert, Ulrich, „Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik,“ 7. Auflage Hrsg., Springer Vieweg, 2013, p. 632ff.
- [73] B. Heißing und M. Ersoy, „Fahrwerkhandbuch - Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven,“ 2 Hrsg., Vieweg + Teuber, 2008.
- [74] H. Krimmel, Deiss, Harald, Runge, Wolfgang und H. Schürr, „Elektronische Vernetzung von Antriebsstrang und Fahrwerk,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 108, Nr. 5, pp. 368-375, Mai 2006.

- [75] C. Hilgers, J. Brandes, H. Ilias, H. Oldenettel, A. Stiller und C. Treder, „Aktives Luftfederfahrwerk für eine größere Bandbreite zwischen Komfort- und Dynamik-Abstimmung,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 111, Nr. 9, pp. 600-609, September 2009.
- [76] R. Streiter, „ABC Pre-Scan im F700 - Das vorausschauende aktive Fahrwerk von MercedesBenz,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 110, Nr. 5, pp. 388-397, Mai 2008.
- [77] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 9001 - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, November 2015.
- [78] IATF - International Automotive Task Force, ISO/TS 16949 - Qualitätsmanagementsysteme - Besondere Anforderung bei Anwendung von ISO 9001:2008 für die Serein- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie, Genf: ISO copyright office, Juni 2006.
- [79] Verband der Automobilindustrie e.V., VDA-Band 6.0 - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Grundlagen für Qualitätsaudits, 5. Auflage Hrsg., Frankfurt am Main: Henrich Druck+Medien GmbH, September 2008.
- [80] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, „VDI-Richtlinie 2519 - Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften,“ VDI, Düsseldorf, Dezember 2001.
- [81] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 69901-2 - Projektmanagement - Projektmanagementsysteme, Teil 2: Prozesse, Prozessmodell,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2009.
- [82] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 69901-5 - Projektmanagement - Projektmanagementsysteme, Teil 5: Begriffe,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2009.
- [83] Verband der Automobilindustrie e.V., Produktentstehung, Reifegradabsicherung - Automotive VDA-Standardstruktur Komponentenlastenheft, Vorlage zur Spezifikation von Systemen, Modulen, Komponenten und Einzelteilen, 1. Auflage Hrsg., Frankfurt am Main: Henrich Druck + Medien, November 2007.

- [84] Scientific Animations, „Neurons in Neural Network,“ Oktober 2014. [Online].
Available:
<http://www.scientificanimations.com/wp-content/uploads/2014/10/Neuron-Network-IOW9.jpg>.
[Zugriff am 05. November 2015].
- [85] „Catia,“ Dassault Systèmes, [Online].
Available:
<http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [86] „PTC Creo Parametric,“ PTC Inc., [Online].
Available:
<http://de.ptc.com/product/creo/3d-cad/parametric>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [87] „Solid Edge,“ Siemens Industry Software GmbH, [Online].
Available:
http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/solid-edge/index.shtml.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [88] „SIMULIA Tosca Structure,“ Dassault Systèmes, [Online].
Available:
<http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/tosca/structure/>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [89] „Altair OptiStruct,“ Altair Engineering, Inc., [Online].
Available:
<http://www.altairhyperworks.de/Product,19,OptiStruct.aspx>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [90] „Magma,“ MAGMA Gießereitechnologie GmbH, [Online].
Available:
<http://www.magma-soft.de/de/>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [91] „Flow3d,“ Flow Science Deutschland GmbH, [Online].
Available: <http://www.flow3d.de/>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].

- [92] M. P. Bendsøe und N. Kikuchi, „Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method,“ *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Bd. 71, Nr. 2, pp. 197-224, 1988.
- [93] M. P. Bendsøe, „Optimal shape design as a material distribution problem,“ *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Bd. 1, Nr. 4, pp. 193-202, 1989.
- [94] M. Zhou und G. I. N. Rozvany, „The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization,“ *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Bd. 89, Nr. 1-3, pp. 309-336, 1991.
- [95] G. I. N. Z. M. Rozvany und T. Birker, „Generalized shape optimization without homogenization,“ *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Bd. 4, Nr. 3, pp. 250-252, 1992.
- [96] O. M. Querin, G. Steven und Y. M. Xie, „Evolutionary structural optimization (ESO) using a bi-directional algorithm,“ *Engineering Computations*, Bd. 15, Nr. 8, pp. 1031-1048.
- [97] X. Y. Yang, Y. M. Xie, G. P. Steven und O. M. Querin, „Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization,“ *AIAA Journal*, Bd. 37, Nr. 11, pp. 1483-1488, 1999.
- [98] C. Mattheck, *Design in der Natur*, Freiburg im Breisgau: Rombach Verlag, 1997.
- [99] J. A. Sethian und A. Wiegmann, „Structural Boundary Design Via Level Set And Immersed Interface Methods,“ *Journal of Computational Physics*, Bd. 163, Nr. 2, pp. 489-528, 2000.
- [100] H. Eschenauer und N. Olhoff, „Topology optimization of continuum structures: A review,“ *Applied Mechanics Reviews*, Bd. 54, Nr. 4, pp. 331-390, 2001.
- [101] R. Cazacu und L. Grama, „Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structures,“ *Annals of the University of Oradea - Fascicle of Management and Technological Engineering*, Nr. 3, pp. 17-22, Dezember 2014.

- [102] L. Harzheim und G. Graf, „A review of optimization of cast parts using topology optimization - I - Topology optimization without manufacturing constraints,“ *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Bd. 30, Nr. 6, pp. 491-497, Juli 2005.
- [103] M. Zhou, R. Fleury, S. Patten, N. Stannard, D. Mylett und S. Gardner, „Topology Optimization - Practical Aspects for Industrial Applications,“ in *9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Shizuoka, Japan, 2011.
- [104] M. Frisch, A. Dörnhöfer, F. Nützel und F. Rieg, „Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung,“ in *9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011*, Bayreuth, 2011.
- [105] L. Harzheim und G. Graf, „A review of optimization of cast parts using topology optimization - II-Topology optimization with manufacturing constraints,“ *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Bd. 31, Nr. 5, pp. 388-399, 2006.
- [106] Q. Xia, T. Shi, M. Y. Wang und S. Liu, „Simultaneous optimization of cast part and parting direction using level set method,“ *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Nr. 6, pp. 751-759, Juli 2011.
- [107] Q. Xia, T. Shi, M. Y. Wang und S. Liu, „A Level Set Based Method for the Optimization of Cast Part,“ in *6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, Kyoto, Japan, 2010.
- [108] G. Allaire, F. Jouve, Michailidis und Georgios, „Molding direction constraints in structural optimization via a level-set method,“ 14 Dezember 2015. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01242945/document>. [Zugriff am 16. Januar 2016].
- [109] S. Fiebig, Form- und Topologieoptimierung mittels Evolutionärer Algorithmen und heuristischer Strategien, Dissertation, Braunschweig: Institut für Konstruktionstechnik, TU Braunschweig, 2016.
- [110] S. Fiebig, „Einsatz von nichtlinearer Optimierung für mechanisch belastete Bauteile,“ *Geodätische Schriftenreihe - Theorie und Anwendung lernender Algorithmen in den Ingenieurs- und naturwissenschaften an der TU Braunschweig*, Nr. 25, pp. 33-37, 2010.

- [111] T. Franke, „Fertigungsgerechte Bauteilgestaltung in der Topologieoptimierung auf Grundlage einer integrierten Gießsimulation,“ in *Wissenschaftssymposium der Komponente, Autouni, Wolfsburg, Braunschweig, 2015*.
- [112] S. Fiebig und J. K. Axmann, „Combining nonlinear FEA simulations and manufacturing restrictions in a new discrete Topology Optimization method,“ in *9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Shizuoka, Japan, June 13 -17, 2011.
- [113] S. Fiebig, J. Sellschopp, H. Manz, T. Vietor, J. K. Axmann und A. Schumacher, „Future challenges for topology optimization for the usage in automotive lightweight design technologies,“ in *11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation*, Sydney, Australia, 7.-12. Juni 2015.
- [114] M. Weber, „Leichtbau und Gießsimulation: ein gemeinsamer Weg,“ *Giesserei-Rundschau*, Bd. 56, Nr. Heft 9/10, pp. 154-157, 2009.
- [115] M. Schneider, „Modellierung von Gefüge und mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gusslegierungen während des Gießens und der Wärmebehandlung,“ in *Gießtechnik im Motorenbau 2011*, Magdeburg, Februar 2011.
- [116] M. Wessén, I. L. Svensson, S. Seifeddine, J. Olsson und W. Schäfer, „Simulation of cooling curves, microstructures and mechanical properties in cast Al-Si-Based alloys,“ in *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes*, Opio, France, 2006.
- [117] K. Carlson, Z. Lin und C. Beckermann, „Modeling the Effect of Finite-Rate Hydrogen Diffusion on Porosity Formation in Aluminum Alloys,“ *Metallurgical and Materials Transactions*, Bd. 38B, pp. 541-555, August 2007.
- [118] A. Egner-Walter, „Gießsimulation als Werkzeug zur Vorhersage lokaler Bauteileigenschaften,“ in *FEMFAT User Meeting*, Steyr, Österreich, 2009, 6.-8. Mai.
- [119] Flow Science Deutschland GmbH, „FLOW-3D - Die Simulationssoftware,“ [Online].
Available: <http://www.flow3d.de/flow3d-software.html>.
[Zugriff am 14. Januar 2016].

- [120] ESI GmbH, „Casting Simulation Suite - ProCAST / QuikCAST,“ [Online]. Available: <https://www.esi-group.com/de/software-loesungen/virtual-manufacturing/casting-simulation-suite>. [Zugriff am 14. Januar 2016].
- [121] RWP GmbH, „WinCast expert,“ [Online]. Available: <http://www.rwp-simtec.de/home.html>. [Zugriff am 14. Januar 2016].
- [122] J. Ungermann, „Zuverlässigkeitsnachweis und Zuverlässigkeitserprobung in der Gesamtfahrzeugentwicklung, Dissertation,“ ETH, Zürich, 2009.
- [123] BMW AG, „Betriebsfestigkeit bei der BMW Group. Sicher auf allen Straßen der Welt,“ Januar 2007. [Online]. Available: http://www.bmwgroup.com/publikationen/d/2007/pdf/alex_betriebsfestigkeit_final.pdf. [Zugriff am 10. Januar 2016].
- [124] U. Guddat, „Automatisierte Tests von Telematiksystemen im Automobil, Dissertation,“ Sindelfingen, 2003.
- [125] IABG, „Das V-Modell XT,“ Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, 13 Juni 2012. [Online]. Available: <http://v-modell.iabg.de/index.php>. [Zugriff am 10. Januar 2016].
- [126] IABG, „Betriebsfestigkeit - Beanspruchung und Beanspruchbarkeit,“ 21 September 2009. [Online]. Available: https://www.iabg.de/fileadmin/media/Geschaeftsfelder/Presse/Mediathek/PDF/Deutsch/IABG_Bro_GF01-C_Betriebsfestigkeit_de.pdf. [Zugriff am 10. Januar 2016].
- [127] M. Frost, Betriebsfest Auslegung von PKW-Aggregatlagerungen, Dissertation, Technischen Universität Dresden, 2009.
- [128] S. Engelmann, „Simulation von fahrwerkdominierten Misuse–Lastfällen zur Unterstützung der virtuellen Crashsensorik, Dissertation,“ Helmut Schmidt Universität, Hamburg, 2013.

- [129] J. Ungermann, B. Hammer und R. Siegwart, „Entwicklung eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung unter Einbeziehung von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten,“ *ATZextra - SIMULATION Erprobung Würzburg*, Bd. Volume 15, Nr. Issue 2, pp. 40-47, April 2010.
- [130] M. Grefe, „Systematische und qualitative Betrachtung des Kippgießverfahrens zur Herstellung von Zylinderköpfen, Diplomarbeit,“ Fachhochschule Hannover , 2007.
- [131] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe und Einteilung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [132] P. Schneider, *Kokillen für Leichtmetallguss*, Düsseldorf : Gießerei-Verlag, 1986.
- [133] „Fertigungsverfahren - Kokillenguss,“ in *Taschenbuch der Gießerei-Praxis*, Berlin, Schiele & Schön, 2015, pp. 151-157.
- [134] D. Altenpohl, *Aluminium von innen*, 5. Auflage Hrsg., Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1994.
- [135] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie Redaktion kug.bdguss.de, „Kokillengießen von NE-Metallen,“ Februar 2011. [Online]. Available:
http://www.kug.bdguss.de/fileadmin/content/verfahren/Kokillenguss_NE/Kokillenguessen_NE.pdf.
[Zugriff am 22. Dezember 2015].
- [136] R. Roller, *Fachkunde für gießereitechnische Berufe*, Haan-Gruiten : Europa-Lehrmittel, 2001.
- [137] A. Balevsky, E. Momchilov, D. Nenov und I. Nikolov, „Machine for casting under pressure“. United States Patent US 3788790 A, 29 Januar 1974.
- [138] A. T. Balevski und I. D. Nikolov, „Method and apparatus for casting utilizing fluid pressure differentials“. United States Patent US 3532154 A, 06 Oktober 1970.
- [139] A. T. Balevski, I. D. Nikolov und A. M. Antonov, „Low-pressure or counterpressure casting apparatus“. United States Patent US 4153100, 08 Mai 1979.

- [140] L. Würkner und T. Zeuner, „The CPC process in the production of aluminum chassis parts,“ *ThyssenKrupp - techforum*, pp. 40-45, Juli 2004.
- [141] Metal Technology Group, „Counter pressure die casting,“ Oktober 2014. [Online].
Available:
http://bg.mtgbg.com/uploads/documents/page/2/Counter_pressure_die_casting.pdf.
[Zugriff am 22. Dezember 2015].
- [142] D. Altenpohl, „Gleichgewicht Aluminium-Wasserstoff. Wasserstoffgehalt des flüssigen und festen Aluminiums,“ in *Aluminium und Aluminiumlegierungen*, Berlin, Springer-Verlag, 1965, pp. 58-63.
- [143] S. Kohla, C. Rehse, K. Dr. Greven und R. Prof. Dr. Bähr, „Einfluss der Druckvariation auf die Porositätsausprägung im CPC-Verfahren,“ *Giesserei*, Nr. 102, pp. 48-56, März 2015.
- [144] L. Hartmann, „Kurtz News - Special Edition: Foundry Machines - Low Pressure Casting – a process which pays off,“ März 2008. [Online].
Available:
http://www.kurtz.ru/media/pdf/broschueren/kurtz_gesagt_sonderdruck_03-2008_web_eng.pdf.
[Zugriff am 22. Dezember 2015].
- [145] F. J. Feikus, „Optimierung von Aluminium-Silicium-Gusslegierungen für Zylinderköpfe,“ *Gießerei-Praxis*, Nr. 2, pp. 50-57, 1999.
- [146] O. Liensenberg und G. Drossel, *Aluminium-Taschenbuch 2*, 16. Auflage Hrsg., Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2012.
- [147] P. S. A. M. S. F. H. Ouellet, „Zusammenhang zwischen Gefügebau und Kenngrößen der thermischen Analyse bei der Legierung AlSi6Cu4 mit Mg und Sr,“ *Giesserei-Praxis*, Nr. 12, p. 503ff, 2000.
- [148] T. Massalski, *Binary Alloy Phase Diagrams*, Bd. Vol. 1 and 2, Metals Park, Ohio, USA: ASM American Society for Metals, 1986.
- [149] J. L. Murray und M. A.J., „The Al-Si (Aluminum-Silicon) system,“ *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, Bd. Volume 5, Nr. Issue 1, pp. 74-84, Februar 1984.

- [150] VDS Vereinigung Deutscher Schmelzhütten, Aluminium Gusslegierungen, Düsseldorf : Gießerei-Verlag GmbH, 1988.
- [151] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 1706 - Aluminium und Aluminiumlegierungen; Gußstücke; Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, Berlin: Beuth Verlag GmbH, Juni 1998.
- [152] W. Hesse, Aluminium-Werkstoff-Datenblätter / Aluminium Material Data Sheets, 6. Auflage Hrsg., D. D. I. f. N. e.V., Hrsg., Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [153] H. Schumann und H. Oettel, Metallografie, 14. Auflage Hrsg., Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [154] W. Weisbach, Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, 16. Auflage Hrsg., Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [155] E. Hornbogen und H. Warlimont, Metalle – Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, 5.Auflage Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [156] G. Gottstein, Physikalische Grundlagen der Materialkunde, 3. Auflage Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [157] W. Schatt, Einführung in die Werkstoffwissenschaft, Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1981.
- [158] A. G. Guy, Metallkunde für Ingenieure, Frankfurt a. M.: Akademische Verlagsgesellschaft, 1970, p. 385 ff..
- [159] D. R. Askeland, Materialwissenschaften, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996, p. 290.
- [160] F. Ostermann, Anwendungstechnologie Aluminium, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007 .
- [161] D. R. Askeland und P. P. Phulé, The science and engineering of materials, 4th edition Hrsg., Learning: Brooks/Cole-Thomson, 2003.
- [162] S. Z. Lu und A. Hellawell, „Modifikation of Al-Si alloys: Mikrostruktur, thermal analysis and mechanisms,“ *JOM – The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Bd. Band 47, Nr. Heft 2, pp. S. 38-40, 1995.

- [163] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 515 - Aluminium und Aluminiumlegierungen; Halbzeug; Bezeichnung der Werkstoffzustände, Berlin: Beuth Verlag GmbH, Dezember 1993.
- [164] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 65582 - Luft- und Raumfahrt; Wärmebehandlung von Gußstücken aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, Dezember 1990.
- [165] G. Dambauer, T. Pabel, P. Schumacher und C. Kneissl, „Wärmebehandlung von untereutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen,“ *Giesserei*, Nr. 98, pp. 26-33, April 2011.
- [166] RHEINFELDEN ALLOYS GmbH & Co. KG, „Warmmaushärtung – Wärmebehandlung – Selbstaushärtung,“ in *Hüttenaluminium-Gusslegierungen*, Ausgabe 7 Hrsg., 2010, pp. 104-109.
- [167] C. Kammer, Aluminium Taschenbuch 1 - Grundlagen und Werkstoffe, Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [168] J. Zhang, Z. Fan, Y. Wang und B. Zhou, „Equilibrium pseudobinary Al-Mg₂Si phase diagram,“ *Materials Science and Technology*, Nr. Volume 17, pp. 494-496, Mai 2001.
- [169] L. Mondolfo, Aluminium alloys – Structure and properties, London, Boston: Butterworth, 1976.
- [170] D. Apelian, S. Shivkumar und G. Sifworth, „Grundlegende Aspekte der Wärmebehandlung von Al-Si-Mg Gußlegierungen,“ *Giesserei-Praxis*, pp. 29-44, März 1991.
- [171] P. Y. Zhu, Q. Y. Liu und T. X. Hou, „Spheroidization of Eutectic Silicon in Aluminum-Silicon Alloys,“ *AFS Transactions*, Nr. 93, pp. 609-614, 1985.
- [172] A. Mohamed und F. Samuel, „A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys,“ in *Heat Treatment – Conventional and Novel Applications*, InTech, 2012, pp. 55-72.
- [173] S. Heugenhauser, B. Stauder, M. Djurdjevic und P. Schumacher, „Bildanalytische Methode zur Charakterisierung des Veredelungsgrades von Aluminium-Silizium Gusslegierungen,“ *Fortschritte in der Metallographie - Sonderbände der Praktischen Metallographie*, Bd. 44, pp. 231-236, 2012.
- [174] J. E. Gruzleski und B. M. Closset, The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon

- Alloys, Illinois, USA: Des Plaines, 1990.
- [175] L. Bäckerud, G. Chai und J. Tamminen, Solidification Characteristics of Aluminium Alloys - Volume 2, Stockholm, Schweden: AFS, Skanaluminium, 1986.
- [176] A. Saigal, Finite element modeling of two-phase microstructures, Dissertation, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, 1983.
- [177] B. Chamberlain und V. Zabek, „Reappraisal of Tensile Properties of Al-Si-Mg Casting Alloys,“ *AFS Transactions*, Nr. 81, pp. 322-327, 1973.
- [178] K. & J. P. Eigenfeld, „Metallurgische und verfahrensbedingte Aspekte bei der Fertigung hochwertiger Aluminium-Gußstücke,“ *Aluminium*, Nr. 64, p. 60–68, 1988.
- [179] D. Zhang, L. Zheng und S. D.H., „Effect of a short solution treatment time on microstructure and mechanical properties of modified Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg alloy,“ *Journal of Light Metals*, Nr. 2, pp. 27-36, 2002.
- [180] E. Ogris, A. Wahlen, H. Lüchinger und P. Uggowitzer, „On the silicon spheroidization in Al-Si alloys,“ *Journal of Light Metals*, Nr. 2, pp. 263-269, 2002.
- [181] B. Milkereit, H. Fröck, C. Schick und O. Kessler, „Continuous cooling precipitation diagram of cast aluminium alloy Al-7Si-0.3Mg,“ *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Bd. Volume 24, Nr. Issue 7, p. 2025–2033, July 2014.
- [182] S. Andersen, H. Zandbergen, J. Jansen, C. Træholt, U. Tundal und O. Reiso, „The crystal structure of the β phase in Al-Mg-Si alloys,“ *Acta Materialia*, Bd. Volume 46, Nr. Issue 9, pp. 3283-3298, 22 Mai 1998.
- [183] S. Pogatscher, H. Antrekowitsch, H. Leitner, T. Ebner und P. Uggowitzer, „Mechanisms controlling the artificial aging of Al-Mg-Si Alloys,“ *Acta Materialia*, Bd. Volume 55, Nr. Issue 9, p. 3352–3363, Mai 2011.
- [184] M. A. van Huis, J. H. S. M. H. F. Chen und H. W. Zandbergen, „Phase stability and structural features of matrix-embedded hardening precipitates in Al-Mg-Si alloys in the early stages of evolution,“ *Acta Materialia*, Bd. Volume 55, Nr. Issue 6, pp. 2183-2199, April 2007.

- [185] C. D. Marioara, S. J. Andersen, J. Jansen und H. W. Zandbergen, „The influence of temperature and storage time at RT on nucleation of the β phase in a 6082 Al–Mg–Si alloy,“ *Acta Materialia*, Bd. Volume 51, Nr. Issue 3, pp. 789-796, Februar 2003.
- [186] C. D. Marioara, S. J. Andersen, J. Jansen und H. W. Zandbergen, „Atomic model for GP-Zones in a 6082 Al-Mg-Si system,“ *Acta Materialia*, Bd. Volume 49, Nr. Issue 2, pp. 321-328, Januar 2001.
- [187] X. Larrayoz Izcara, A. Guirao Blank, F. Pyczak, P. Staron, S. Schumann und N. Huber, „Characterization and modeling of the influence of artificial aging on the microstructural evolution of age-hardenable AlSi10Mg(Cu) aluminum alloys,“ *Materials Science and Engineering: A*, Bd. 610, pp. 46-53, 29 July 2014.
- [188] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 14040 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, November 2009.
- [189] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 14044 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, Oktober 2006.
- [190] D. Wessels, W. Walk und M. Gernuks, Volkswagen Konzernhandbuch Umweltbilanzen (internes Dokument), 2015.
- [191] N. Meyn, „Untersuchung der Energie- und Stoffströme in der Automobilproduktion am Beispiel der Prozesskette zur Herstellung von Fahrwerkskomponenten aus Aluminium,“ Studienarbeit; Betreuer: Winter, M., TU Braunschweig; Beganovic, T., Volkswagen AG, Braunschweig, 2012.
- [192] J. Lanser, „Energetische Bewertung der Warmbehandlung von Aluminium-Gussbauteilen,“ Bachelor-Thesis; Betreuer: Schmidt, J., Ostfalia - Hochschule für angewandte Wissenschaften; Beganovic, T., Volkswagen AG, Wolfsburg, Braunschweig, 2012.
- [193] S. Gellrich und T. Beganovic, „[Internes Dokument] Methodische Kurzübersicht: Life Cycle Assessment (LCA) für gegossene Fahrwerk-Komponenten,“ Volkswagen AG, Braunschweig, 2015.
- [194] M. Theissing, „Primärenergiefaktoren und Emissionsfaktoren von Energieträgern,“ in *Fernwärmetage 2010*, Villach: 18.3.2010, 2010.

- [195] Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie e.V., „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.94,“ [Online]. Available:
<http://www.gemis.de>.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [196] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe, Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009.
- [197] H. Bacht, „Optimierung der Life Cycle Costs von Druckluftanlagen. Kosten der Druckluft,“ 07 November 2011. [Online]. Available:
http://p31726.typo3server.info/fileadmin/redakteure/energie_arena/Vortraege/Vortraege_2012/i2012-11-07__Helmut_Bacht_Atlas_Copco_Optimierung_Life_Cycle_Costs.pdf.
[Zugriff am 25. August 2015].
- [198] G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. La-Marque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura und H. Zhang, „Anthropogenic and Natural Radiative Forcing,“ *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013.
- [199] S. Krinke, C. Koffler, G. Deinzer und U. Heil, „Automobiler Leichtbau unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus,“ *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 112, Nr. 6, pp. 438-445, 2010.
- [200] European Aluminium Association EAA, „Aluminium Recycling in LCA,“ September 2013. [Online]. Available:
<http://www.european-aluminium.eu/aluminium-recycling-in-lca/>. [Zugriff am 25. August 2015].
- [201] Trimet Aluminium SE, „Trimet-Produkte leisten positiven Klimabeitrag. Carbon Footprint,“ *Aluminium – Internationale Fachzeitschrift für Industrie, Forschung und Praxis*, Nr. 12, pp. 44-46, 2009.

- [202] H. E. Friedrich, in *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013, pp. 736-739.
- [203] KSM Castings Group GmbH, „Tensal - Fester. Leichter. Besser.“ 2013. [Online].
Available:
http://www.ksmcastings.com/sites/default/files/content/downloads/KSM_Flyer_Tensal_13-12-13_Web.pdf.
[Zugriff am 08. Dezember 2015].
- [204] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 50113 - Prüfung metallischer Werkstoffe - Umlaufbiegeversuch, Berlin: Beuth Verlag GmbH, März 1982.
- [205] ASTM E112-12 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [206] O. Polianska, „Technologische Erfordernisse beim Aluminium-Dünnwand-Kokillengießen, Dissertation,“ Otto-von-Guericke-Universität , Magdeburg, 2010.
- [207] G. Lang, „Giesseigenschaften und Oberflächenspannung von Aluminium und binären Aluminiumlegierungen,“ *Aluminium*, Bd. 48, Nr. 10, pp. 664-672, 1972.
- [208] E. Taghaddos, M. M. Heiazi, R. Taghiabadi und S. Shabestari, „Effect of iron-intermetallics on the fluidity of 413 aluminium alloy,“ *Journal of alloys and compounds*, Bd. 468, Nr. 1, pp. 539-545, 2009.
- [209] B. Kotte, „Strontium modification gives critical melt control,“ *Modern Casting*, pp. 33-35, 1985.
- [210] E. Niyama, K. Anzai, T. Rjnakubo und S. Hiratsuka, „Some basic research for thin-wall casting technology,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Nr. 63, pp. 779-783, 1997.
- [211] M. Di Sabatino und L. Arnberg, „A Review on the fluidity of Al based alloys,“ *Metallurgical Science and Technology*, Bd. 22, Nr. 1, pp. 9-15, 2013.
- [212] N. Eisuke, A. Koichi, F. Tatsuya und H. Sadato, „Some basic research for thin-wall casting technology,“ *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 63, Nr. 1-3, pp. 779-783, 1997.

- [213] S. Knorr, S. Gierth, S. Findeisen und T. Beganovic, „Schwerkraftkokillengießen mit strukturierten Oberflächen, Teil 1: Stand der Technik,“ *Giesserei*, Nr. 102, pp. 42-49, 2015.
- [214] T. Beganovic, C. Demmer, S. Gierth, S. Findeisen, S. Knorr und R. Kucharski, „Gießwerkzeug mit zumindest einer Kavität zur Herstellung zumindest eines Gussteiles“. Patent DE 10 2014 221 852 A1, 2014.
- [215] S. Gierth, Einfluss von Prozessparametern und strukturierten Werkzeugoberflächen auf das Fließverhalten von Aluminiumlegierungen im Schwerkraftkokillengießen, Dissertation, RWTH Aachen, [noch nicht veröffentlicht]
- [216] DMG Mori, „LASERTEC Shape – Baureihe - Designoffensive für anspruchsvolle Oberflächentexturen in Spritzgussformen,“ 2014. [Online]. Available:
<http://de.dmgmori.com/blob/120156/816d17f8594a6787ae06c82d29adc746/p11de14-lasertec-shape-baureihe-pdf-data.pdf>.
[Zugriff am 10. Oktober 2015].
- [217] A. Kuhlmann, „Einfluss der Wärmebehandlung auf die Ermüdungsfestigkeit der Legierung AlSi7Mg,“ Diplomarbeit; Betreuer: Eigenfeld, K., TU Freiberg; Beganovic, T., Volkswagen AG, Braunschweig, 2011.
- [218] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 50125 - Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben, Berlin: Beuth Verlag, Juli 2009.
- [219] TechGraf GmbH, „TechGraf Wöhleranalyse,“ [Online]. Available: <http://www.techgraf.de/index.php>.
[Zugriff am 24. Januar 2016].
- [220] A. Martin, K. Hinkelmann und A. Esderts, „Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich, Teil 1: Wie zuverlässig können 50 %-Wöhlerlinien aus experimentellen Daten geschätzt werden?,“ *Materials Testing*, Nr. 53, pp. 502-512, September 2011.
- [221] A. Martin, K. Hinkelmann und A. Esderts, „Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich, Teil 2: Wie zuverlässig kann die Standardabweichung aus experimentellen Daten geschätzt werden?,“ *Materials Testing*, Nr. 53, pp. 513-521, September 2011.

- [222] S. Nukiyama, „The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure,“ *International Journal of Heat Mass Transfer*, Bd. Vol. 9, Nr. No. 12, pp. 1419-1433, 1966.
- [223] F. Mayinger, „Blasenbildung und Wärmeübergang beim Sieden in freier und erzwungener Konvektion,“ *Chemie-Ingenieur-Technik - Zeitschrift für Verfahrenstechnik, Technische Chemie und Apparatewesen*, Bd. 47. Jahrgang, Nr. Heft 18, pp. 737-748, 1975.
- [224] M. Thiry, P. Staron und A. Guirao-Blank, „Eigenspannungsmessungen mittels hochenergetischer Synchrotronstrahlung,“ *Lightweight Design*, Bd. 8, Nr. 4, pp. 38-43, August 2015.
- [225] CD-Adapco, Analysis & Design Application Co., Ltd., „STAR-CCM+ - The world's most comprehensive engineering simulation inside a single integrated package,“ 2016. [Online].
Available:
<http://www.cd-adapco.com/products/star-ccm%C2%AE>.
[Zugriff am 28. Januar 2016].
- [226] Dassault Systèmes, „ABAQUS Unified FEA - Komplettlösungen für realistische Simulationen,“ 2016. [Online].
Available:
<http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/abaqus/>.
[Zugriff am 28. Januar 2016].
- [227] National Institutes of Health, „ImageJ - Image Processing and Analysis in Java,“ Februar 2016. [Online].
Available:
<http://imagej.nih.gov/ij/index.html>.
[Zugriff am 20. Februar 2016].
- [228] Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., „Bildverarbeitung / Industrielle Anwendungen - Dendritenarmabstand,“ GFai, 2013. [Online].
Available:
<http://www.gfai.de/deutsch/produkte/bildverarbeitung-industrielle-anwendungen-produkte/dendritenarmabstand.html>.
[Zugriff am 05. Februar 2016].

- [229] Sente Software Ltd. , „JMatPro,“ 2014. [Online].
Available:
<http://www.sentesoftware.co.uk/jmatpro.aspx>.
[Zugriff am 24. Februar 2016].
- [230] S. J. Andersena, C. D. Marioara, R. Vissers, A. Froseth und H. W. Zandbergen, „The structural relation between precipitates in Al–Mg–Si alloys, the Al-matrix and diamond silicon, with emphasis on the trigonal phase U1-MgAl₂Si₂,“ *Materials Science and Engineering: A*, Bd. Volume 444, Nr. Issues 1-2, pp. 157-169, 25 Januar 2007.
- [231] K. Greven und T. Buschjohann, „KSM Castings GmbH - Entwicklung 2.0 - Vernetzung von Produkt und Prozeß,“ 2011. [Online].
Available:
<http://alumag.cc/wp-content/uploads/2013/11/RSAL10.2011KSMlecture.pdf>.
[Zugriff am 08. November 2015].
- [232] Gartner, Inc. , „Predictive Analytics,“ November 2012. [Online].
Available:
<http://www.gartner.com/it-glossary/predictive-analytics>.
[Zugriff am 16. Januar 2016].
- [233] „Gruppen und Untergruppen des Urformens nach DIN 8580,“ *Gießerei*, Bd. 46, Nr. 22, pp. 687-694, 1959.
- [234] S. Z. Lu und A. Hellawell, „Modifikation of Al-Si alloys: Mikrostrukture, thermal analysis and mechanisms,“ *JOM – The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Bd. 47, Nr. Heft 2, pp. 38-40, 1995.
- [235] K. E. Höner und J. Groß, „Mechanische Eigenschaften und Bruchverhalten von Aluminium-Silicium-Gußlegierungen,“ *Gießerei*, Bd. 78, Nr. 18, pp. 655-661, 1991.
- [236] G. Huppert-Schemme, AlMgSi-Bleche für den Fahrzeugbau – Metallkunde und Fertigungstechnik, Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1997.
- [237] S. Klan, Beitrag zur Evolution von Aluminium-Gusslegierungen, Dissertation, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, TU Bergakademie Freiberg, 2004.
- [238] E. Hornbogen und H. Warlimont, Metallkunde, 4. Auflage Hrsg., Berlin: Springer-Verlag, 2001, p. S. 251ff.

- [239] S. Pruckner, Untersuchung zum Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Eigenschaften von AlMg-Legierungen, Studienarbeit, Gießerei-Institut der TU Bergakademie Freiberg, 2003.
- [240] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 8044 - Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe und Definitionen, Berlin, November 1999.
- [241] W. Huppertz, „Grundlagen des Korrosionsschutzes für Aluminium als Konstruktionswerkstoff, Teil 1,“ *Metall*, Bd. 49, Nr. 6, pp. 401-408, 1995.
- [242] E. Hollingsworth, H. Hunsicker und P. Schweitzer, „Aluminum alloys,“ in *Corrosion and corrosion protection handbook*, 2bd ed. Hrsg., New York, Marcel Dekker, Inc., 1989.
- [243] M. Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Houston, Texas, USA: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- [244] H.-J. Bargel und G. Schulze, Werkstoffkunde, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [245] W. Huppertz und H. Krajewski, „Untersuchungen zur Korrosionsresistenz von einigen gebräuchlichen Aluminiumwerkstoffen in Meerwasser,“ *Werkstoffe und Korrosion*, Bd. 30, Nr. 10, pp. 673-684, Oktober 1979.
- [246] J. Elze, „Spannungsreihe der Metalle im praktischen Korrosionsmittel,“ *Werkstoffe*, Nr. 10, pp. 737-738, 1959.
- [247] J. Galvele, D. Micheli und S.M., „Mechanism of Intergranular Corrosion of Al-Cu Alloys,“ *Corrosion Science*, Bd. Volume 10, Nr. Issue 11, pp. 795-807, 1970.
- [248] I. Muller und J. Galvele, „Pitting potential of high purity binary aluminium alloys - II. Al-Mg and Al-Zn alloys,“ *Corrosion Science*, Bd. Volume 17, Nr. Issue 12, pp. 995-1007, 1977.
- [249] E. Roos und K. Maille, Werkstoffkunde für Ingenieure, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [250] K.-H. Tostmann, Korrosion - Ursachen und Vermeidung, 1. Auflage Hrsg., Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2001.

- [251] European Aluminium Association EAA, „Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry – data for the year 2010,“ 2013. [Online]. Available:
<http://www.european-aluminium.eu/sustainability/life-cycle-assessment/>.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [252] Hydro, „Aluminium, Environment and Society. Oslo,“ 2012. [Online]. Available:
http://www.hydro.com/upload/Documents/downloadcenter/About%20aluminium/Aluminium_environment-and-society.pdf.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [253] Foseco / Vesuvius GmbH, „Herstellerinformation zu Foseco MTS 1500“.
- [254] FRYKA-Kältetechnik GmbH, „Tauchkühler TK,“ [Online]. Available:
<http://www.fryka.de/de/seriengerate/tauchkuehler/>.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [255] Automationspraxis , „In der Wartezeit liegt großes Potenzial zur Energieeinsparung, Kuka Roboter GmbH,“ 29 April 2011. [Online]. Available:
http://www.automationspraxis.de/home/-/article/33568397/35136375/In-der-Wartezeit-liegt-gro%C3%9Fes-Potenzial-zur-Energieeinsparung/art_co_INSTANCE_0000/maximized/.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [256] Neotechnik GmbH Entstaubungsanlagen, „Industrielle Entstaubungsanlagen. Aktuelle Beispielprojekte. Doppelreihenfilter für Stahlwerk in Russland,“ Mai 2014. [Online]. Available:
<http://www.neotechnik.com/de/downloads>. [Zugriff am 24. August 2015].
- [257] Neotechnik GmbH Entstaubungsanlagen, „Komplette Entstaubung einer Gießerei in China,“ 30 Januar 2015. [Online]. Available:
http://www.gifa.de/cipp/md_gmtn/custom/pub/content,oid,119586/lang,1/ticket,g_u_e_s_t/local_lang,1.
[Zugriff am 24. August 2015].

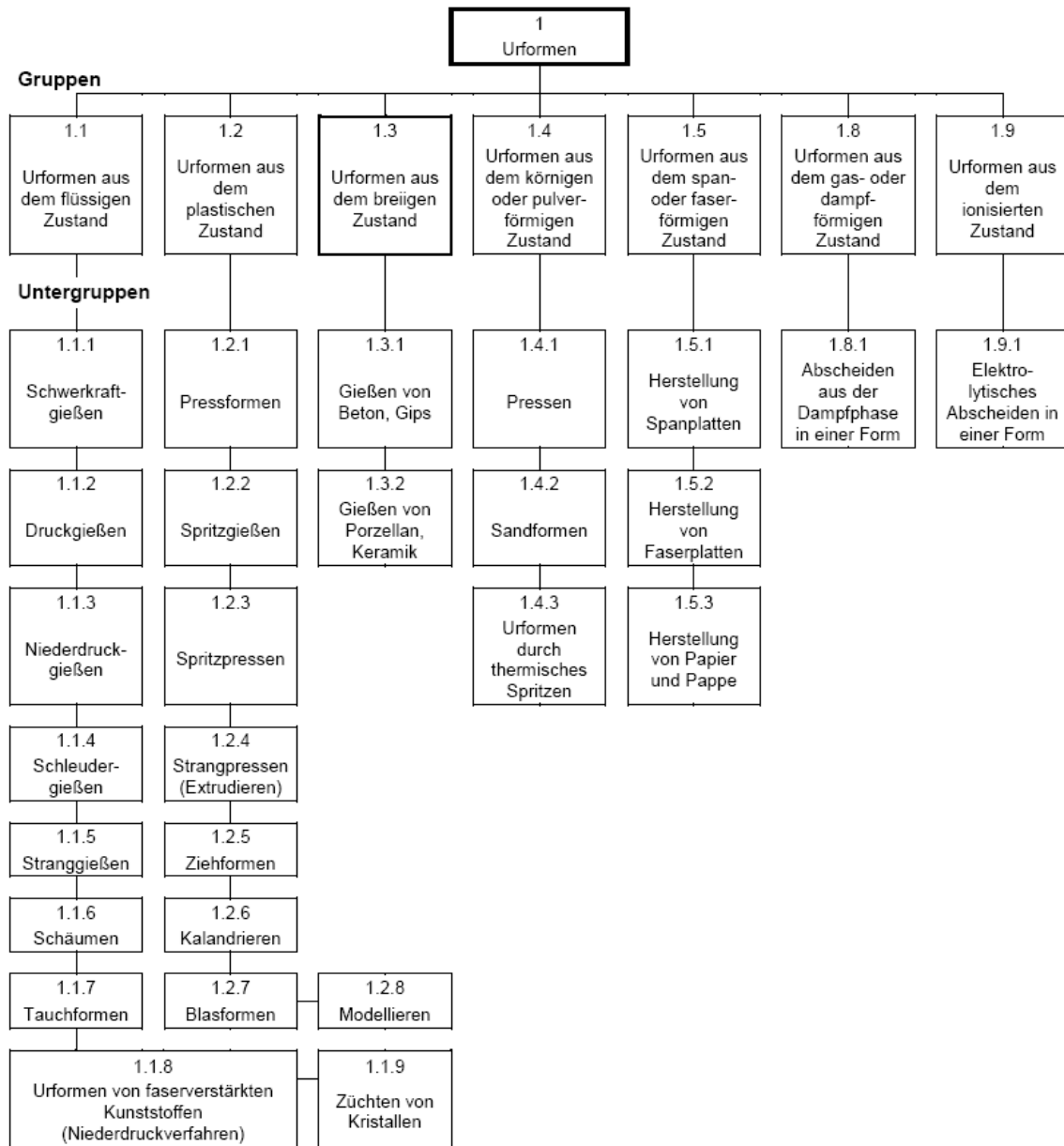
- [258] Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH (IVE mbH), „EcoTransIT,“ [Online].
Available:
<http://www.ecotransit.org/index.de.html>.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [259] Network for Transport Measures NTM, „NTMCalc,“ [Online].
Available:
<http://www.transportmeasures.org/en/>.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [260] Linde Material Handling GmbH, „Das Ganze sehen,“ [Online].
Available:
http://www.staplerkosten-sparen.de/media/staplerkosten/broschuere_das_ganze_sehen.pdf.
[Zugriff am 24. August 2015].
- [261] H. Hottenroth, B. Joa und M. Schmidt, Carbon Footprints für Produkte. Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen, Pforzheim: Institut für Industrial Ecology, 2013.
- [262] „Think Blue.,“ Volkswagen, [Online].
Available: <http://thinkblue.volkswagen.com/de/de/start>.
[Zugriff am 18. Juni 2015].



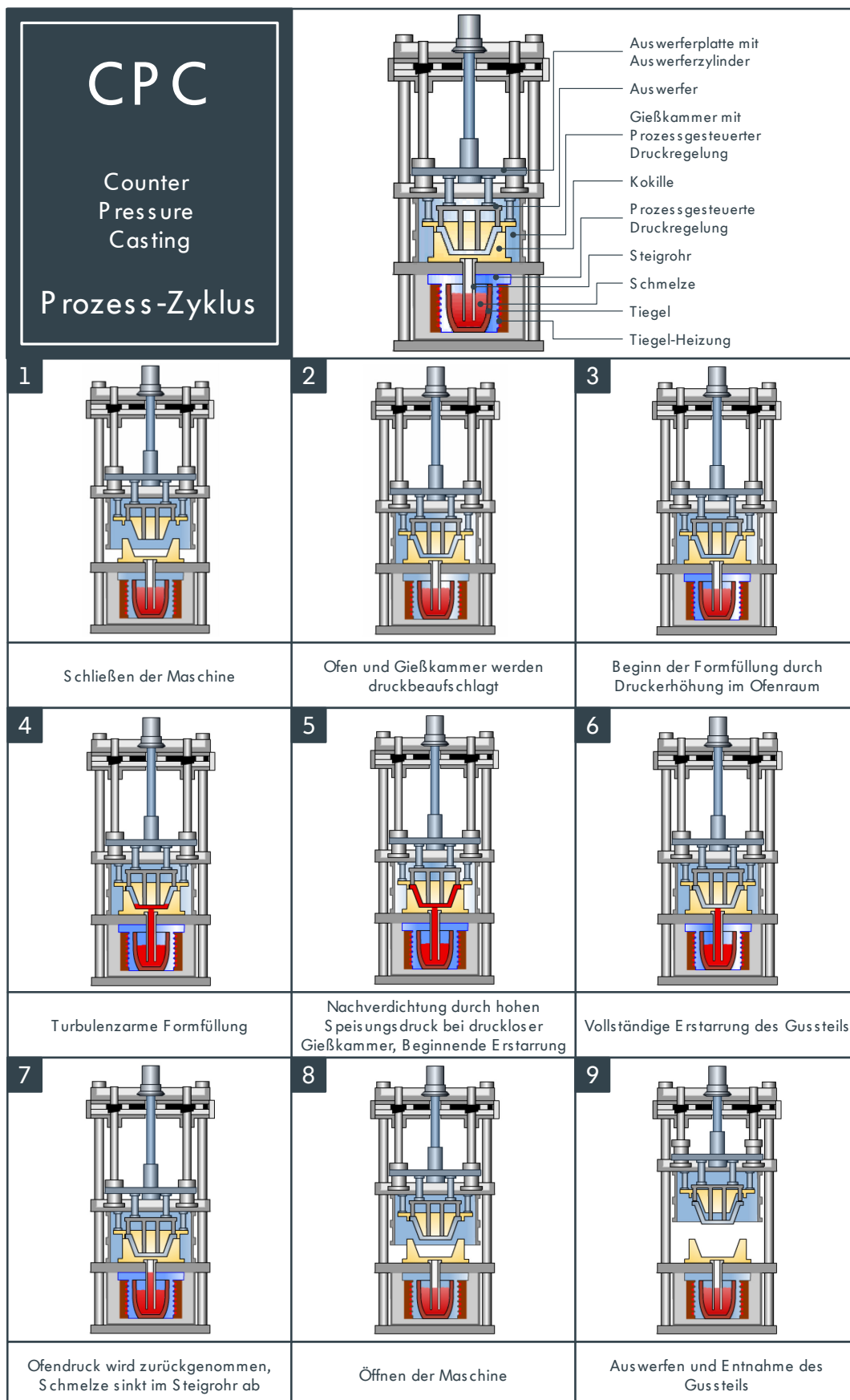
Anhang

Anhang A: Gruppen und Untergruppen des Urformens nach DIN 8580 [248].....	X
Anhang B: Der Prozess-Zyklus des CPC-Gießens	XI
Anhang C: Metallkundliche Grundlagen	XII
Kristallisation.....	XII
Erstarrung und Erstarrungsmorphologie	XVI
Härtungsmechanismen	XVIII
Anhang D: Gießtechnologischer Eigenschaften	XXIII
Anhang E: Korrosion von Aluminium-Gusslegierungen.....	XXVI
Korrosionsmechanismen.....	XXIX
Erscheinungsformen	XXX
Flächenkorrosion	XXXI
Lochkorrosion	XXXI
Kontaktkorrosion	XXXII
Interkristalline Korrosion.....	XXXIII
Spannungsrissskorrosion.....	XXXIV
Schwingungsrissskorrosion	XXXV
Anhang F: Annahmen der Sachbilanz für einen Aluminium-Radträger	XXXVII
Anhang G: Emissionsfaktoren	XXXVIII
Anhang H: Anteile am CO ₂ -Ausstoß bei der Masselerstellung von Primäraluminium für einen Radträger.....	XXXIX
Anhang I: Versuchsaufbau zur vereinfachten dynamischen Erprobung eines Radträgers, Aufspannplatte und Bauteil, Pfeil: Krafteinleitung	XL
Anhang J: 1-kanaliger Prüfaufbau für Radträger-Erprobungen	XLI
Anhang K: Übersicht der 1K-Ergebnisse des Ofenvergleichs	XLII
Anhang L: Übersicht der 1K-Ergebnisse aus dem Parametervergleich	XLIII
Anhang M: Partikelanalyse Parameterabgleich	XLIV

Anhang A: Gruppen und Untergruppen des Urformens nach DIN 8580 [233]



Anhang B: Der Prozess-Zyklus des CPC-Gießens
(Grafiken: KSM Castings, Hildesheim)



Anhang C: Metallkundliche Grundlagen

Zur Einordnung der Gießcharakteristika und weiterer Eigenschaften der betrachteten Legierungen ist es erforderlich, metallkundliche Grundlagen zu betrachten. Hierzu gehören die Bereiche Kristallisation, Erstarrung und Erstarrungsmorphologie sowie die Härtungsmechanismen, die nachfolgend erläutert werden.

Kristallisation

Allgemein kann die Kristallisation in die Teilprozesse Keimbildung und Kristallwachstum untergliedert werden. Die Schmelze erstarrt während ihrer Abkühlung nicht gleichmäßig. Vielmehr beginnt die Erstarrung mit der Bildung von Keimen. Dabei handelt es sich um submikroskopische Kristallgebilde, die gegenüber der Schmelze eine Grenzfläche aufbauen. Sie können durch Anlagerung weiterer Atome aus der Schmelze nach und nach zu makroskopischen Kristallgebilden heranwachsen. Bei unterkritischer Größe – man spricht dann von Embryonen – können diese Kristallbereiche wieder aufschmelzen oder weiter zu einem Keim heranwachsen. Für die Bildung solch geordneter Bereiche in der Schmelze ist der Aufbau einer Grenzfläche notwendig. Die benötigte Grenzflächenenergie γ kann dabei nur von unterkühlten Schmelzen aufgebracht werden, da hier eine Differenz von freier Enthalpie der Schmelze und derjenigen des kristallinen Zustandes vorliegt (Abbildung 0-1). Bei Schmelztemperatur T_s liegen die freien Enthalpien im Gleichgewicht. Voraussetzung für die Keimbildung ist also eine Unterkühlung der Schmelze. [153]

Keime lassen sich in Eigenkeime und Fremdkeime unterscheiden. Eigenkeime sind dabei noch nicht aufgeschmolzene Kristallitreste, die überwiegend in nicht überhitzten Schmelzen vorkommen. Ihre Bildung erfolgt nahe der Erstarrungstemperatur. Fremdkeime (Kristallisatoren) sind Schmelzezusätze oder Phasen in Form kleinster, oft höherschmelzender Partikel oder Schlackenteilchen. [154]

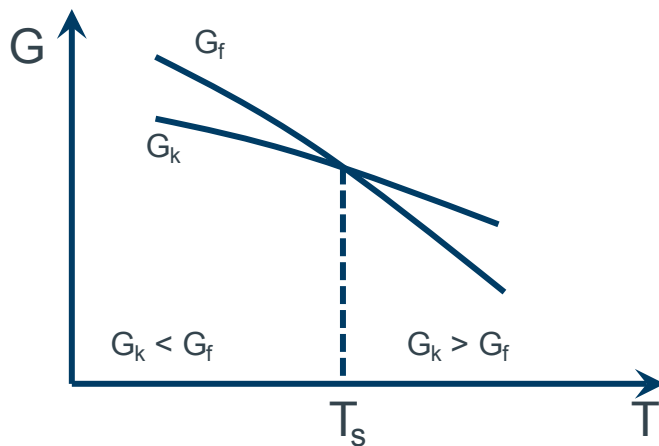


Abbildung 0-1: Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie des schmelzflüssigen (G_f) und des kristallinen Zustandes (G_k) in der Nähe des Schmelzpunktes in Anlehnung an [153]

Erfolgt die Keimbildung unter Mitwirkung von Tiegel- und Formwand, sowie unter Einbeziehung der in der Schmelze vorliegenden Fremdkeime, spricht man von heterogener Keimbildung. Abbildung 0-2 zeigt diese für Gefäßwand und Fremdkristall.

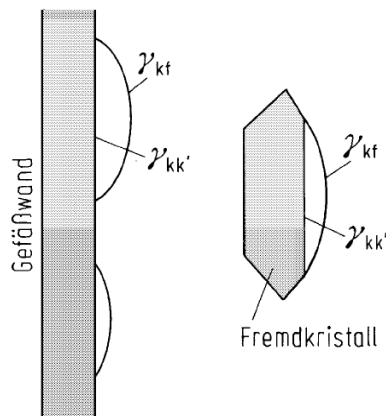


Abbildung 0-2: Heterogene Keimbildung (γ'_{kf} – spez. Grenzflächenenergie Kristall–Flüssigkeit; $\gamma_{kk'}$ – spez. Grenzflächenenergie Kristall–Fremdkristall) [155]

Homogene Keimbildung tritt bei ideal einphasigen, homogenen Schmelzen gleichmäßig im Volumen auf. Abbildung 0-3 zeigt schematisch den Vergleich von homogener und heterogener Keimbildung.

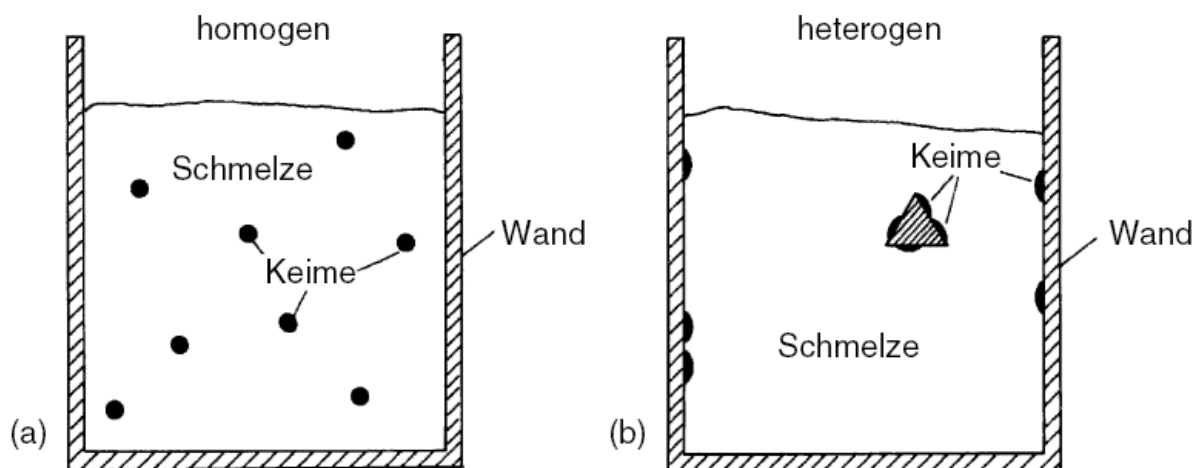


Abbildung 0-3: Vergleich von homogener (a) und heterogener (b) Keimbildung [156]

Die benötigte freie Enthalpie δG für die Keimbildung setzt sich aus einem volumenbestimmten Term, der die Überführung vom schmelzflüssigen in den festen Zustand beschreibt und einem grenzflächenbestimmten Term, der die Bildung der Grenzfläche zwischen Keim und Schmelze widerspiegelt, zusammen:

$$\delta G = -\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \Delta g_v + 4\pi \cdot r^2 \cdot \gamma \quad \text{Formel 0-1}$$

Dabei ist Δg_v die volumenbezogene Änderung der freien Enthalpie bei der Bildung des festen Zustandes für eine gegebene Unterkühlung und setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Delta g_v = V - \frac{\Delta T \cdot \Delta S_E}{V_m} \quad \text{Formel 0-2}$$

ΔT – Unterkühlung

ΔS_E – Erstarrungsentropie

V_m – Molvolumen

Veranschaulicht man die Formel 0-1 entsprechend Abbildung 0-4 grafisch, ist ein Durchlaufen eines Maximums für die freie Enthalpie bei wachsendem Keimradius zu erkennen. Der hierzu gehörende Keimradius r_c wird als kritischer Keimradius bezeichnet. Nur Keime, für die die Beziehung $r > r_c$ gilt, sind wachstumsfähig, da

hierdurch eine Verringerung der freien Enthalpie erfolgt. Kleinere Keime lösen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf.

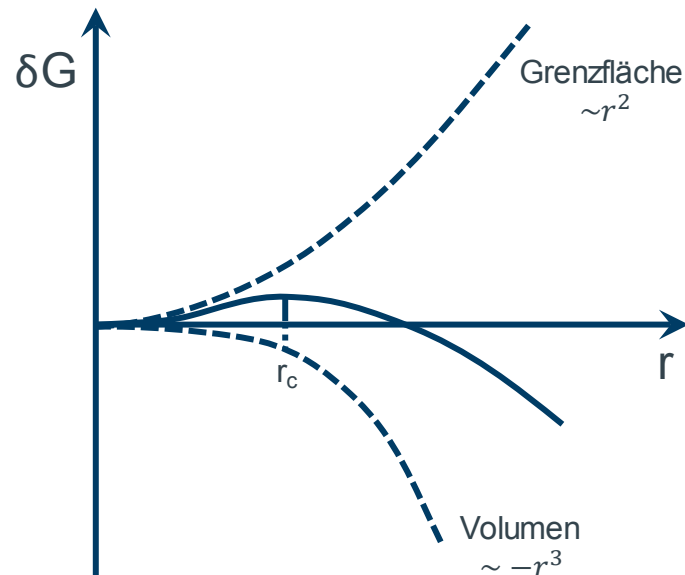


Abbildung 0-4: Abhängigkeit der freien Enthalpie für die Keimbildung vom Keimradius in Anlehnung an [154]

Der kritische Keimradius wird umso kleiner, je größer die Unterkühlung und die Schmelzenthalpie sind. Liegen viele kleine kritische Keime vor, aus denen eine entsprechend hohe Anzahl wachstumsfähiger, überkritischer Keime hervorgeht, entsteht bei zunehmender Abkühlung ein feinkörniges Gefüge. Nimmt die Anzahl an Keimen ab, wird das Gefüge gröber. Eine schematische Gegenüberstellung von Grob- und Feinkorn ist in Abbildung 0-5 gegeben. [154, 157]

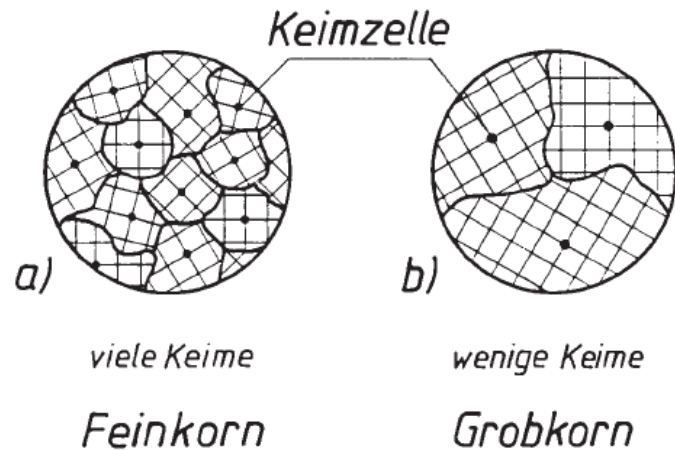


Abbildung 0-5: Korngröße bei der Erstarrung [154]

Die Bildung kritischer Keime nimmt mit steigender Unterkühlung zu. Je stärker die Unterkühlung ist, desto mehr und desto schneller werden kritische Keime gebildet. Die erforderliche Unterkühlung ist für die heterogene Keimbildung deutlich geringer als für die homogene Keimbildung. Ist die Unterkühlung zu groß, können an den Keim angelagerte Atome wieder abgelöst und in die Schmelze zurückgegeben werden. Die Keimbildungsrate läuft folglich über ein Maximum.

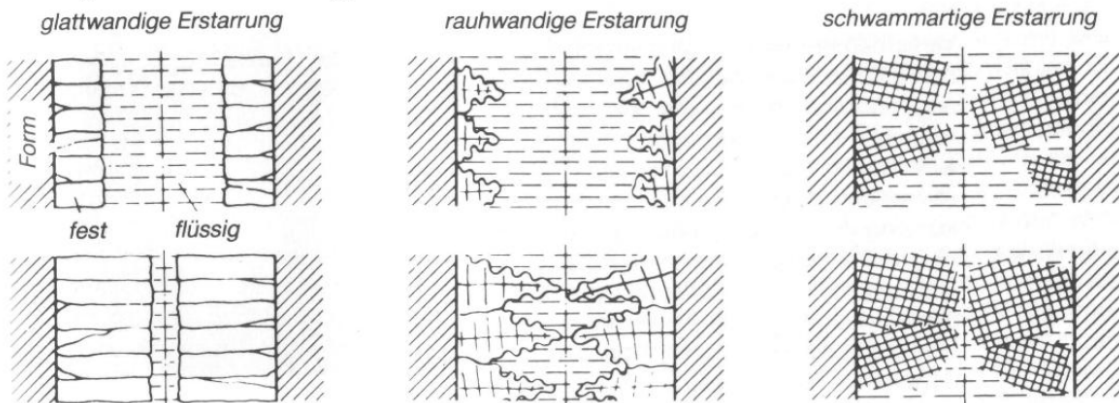
Erstarrung und Erstarrungsmorphologie

Ausgehend von den Keimen erfolgt die Erstarrung. Die hierbei freiwerdende Kristallisationswärme ist abzuführen. Unter ungünstigen Bedingungen kann sie zum Aufschmelzen einzelner Keimbereiche führen. Die Kristallwachstumsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der sich die Kristallisationsfront in die Schmelze hinein bewegt, bestimmt zusammen mit der Keimbildungsrate die Erstarrungsgeschwindigkeit. [153]

Je nach Abkühlungsgeschwindigkeit variiert die Erstarrungsmorphologie. Geringe Erstarrungsgeschwindigkeiten führen dabei zu einem gröberen Gefüge, hohe Geschwindigkeiten haben ein Feinkorn zur Folge. Eine Kornfeinung kann auch durch weitere Legierungsbestandteile erfolgen. So erfolgt bei Zugabe von Erdalkalimetallen (Na, Sr) oder Seltenerdmetallen (La, Ce, Pr, Yb) zur Schmelze ein Ausscheiden des

Siliziums in Form fein verzweigter, korallenartiger Fasern. Bei Zugabe von P werden vor allem in übereutektischen AlSi-Legierungen die primären Si-Partikel feiner. [234]

Exogene Erstarrung



Endogene Erstarrung

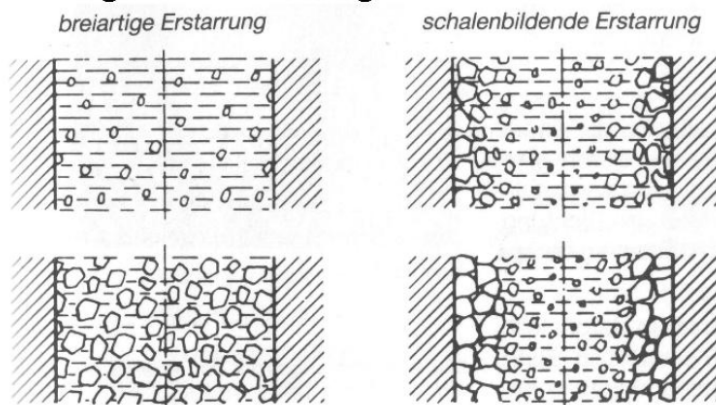


Abbildung 0-6: Morphologische Erstarrungstypen [150]

Darüber hinaus kann über die Gestalt der in der Schmelze wachsenden Kristalle die Morphologie differenziert werden. Setzt das Wachstum an der Grenzfläche von Metall und Form ein, liegt eine exogene Erstarrung vor. Werden Kristalle im Inneren der Schmelze gebildet, spricht man von endogener Erstarrung. Das Wachstum beider Kristallisationsvarianten kann kompakt (polyedrisch) oder verzweigt (dendritisch) erfolgen, sodass sich die in Abbildung 0-6 dargestellten Erstarrungstypen ergeben.

Durch steigenden Siliziumgehalt erhöht sich die Festigkeit der untereutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen. Eine Veredelung (z. B. mit Natrium oder Strontium) führt im Gusszustand zu noch günstigeren Festigkeitseigenschaften, insbesondere

der Bruchdehnung, was durch die Morphologieänderung des Siliziums von lamellar zu korallenartig erklärbar ist. [235]

Härtungsmechanismen

Struktur- und Gefügeänderungen sind bei einer Vielzahl technischer Prozesse notwendig, aber nicht immer erwünscht. Hierzu gehören zum Beispiel plastische Verformungen, die zu einem frühzeitigen Bauteilversagen führen können.

Träger plastischer Verformung sind Versetzungen, also linienhafte Störungen im Metallgitter, die auf einer Gleitebene des Festkörpers den bereits abgeglittenen vom nicht abgeglittenen Bereich trennen. Durch Behinderung der Versetzungsbewegung wird das Metall verfestigt. Dies kann durch eine feinkörnige Struktur, durch das Einbringen von Fremdatomen (Mischkristallhärtung) oder durch Ausscheiden von Phasen erreicht werden. [153] [158]

Voraussetzungen zur Ausscheidungshärtung einer Legierung sind nach Askeland [159]:

- eine mit der Temperatur abnehmende Löslichkeit des Legierungselementes im festen Grundmaterial,
- eine möglichst duktile Matrix (mit möglichst harten und spröden Ausscheidungen),
- die Abschreckbarkeit der Legierung und
- die Kohärenz der Ausscheidungen.

Ausscheidungsvorgänge beginnen häufig mit der Bildung metastabiler Phasen, die aufgrund ihrer (Teil-)Kohärenz mit der Matrix eine geringe Grenzflächenenergie aufweisen. Für Legierungen aus dem Bereich Al-Cu ist je nach Höhe der Unterkühlung der Schmelze eine Kette von metastabilen Phasen vom Typ Al_2Cu in Form der Guiner-Preston-Zonen (GP) bekannt. [153]

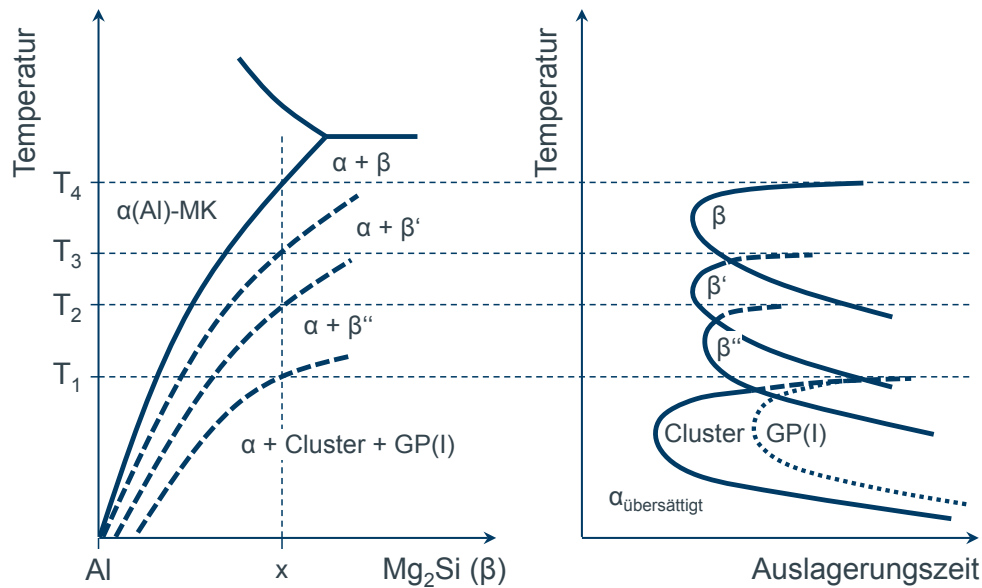


Abbildung 0-7: Schematisches Zustandsdiagramm (links) des Al-Mg₂Si-Systems mit den metastabilen Phasengebieten und dem zugehörigen Zeit-Temperatur-Ausscheidungsdiagramm (rechts), nach Huppert-Schemme [236, 160]

Die Aushärtungsvorgänge lassen sich am ehesten über die Gitterkohärenz veranschaulichen. Zunächst ist infolge statistischer Schwankungen eine einphasige Entmischung zu beobachten, bei der sich in fester Lösung Atome des im Grundgitter gelösten Elementes ansammeln. (Abbildung 0-8a) Gebiete, in denen solche Fremdatome angereichert sind, werden Entmischungszonen oder auch Guinier-Preston-Zonen genannt. Sie sind mit dem Gitter des Mischkristalls nach allen Seiten hin kohärent verbunden. Daraus ergibt sich eine Gitterverzerrung über die Netzebenen. (Abbildung 0-8b) Um sich dem Gleichgewichtszustand wieder anzunähern, erfolgt die Ausscheidung einer zweiten Phase. (Abbildung 0-8c) [237]

Die Ausscheidungsvorgänge aus dem übersättigten Mischkristall können in kontinuierliche und diskontinuierliche Vorgänge untergliedert werden. Bei der kontinuierlichen Ausscheidung entstehen in den Gefügekörnern gleichmäßig feinverteilte Teilchen. Diese wachsen mit zunehmender Auslagerungsdauer. Bei der diskontinuierlichen Ausscheidung startet der Zerfall gemeinhin an den Korngrenzen und ergreift allmählich das gesamte Kornvolumen.

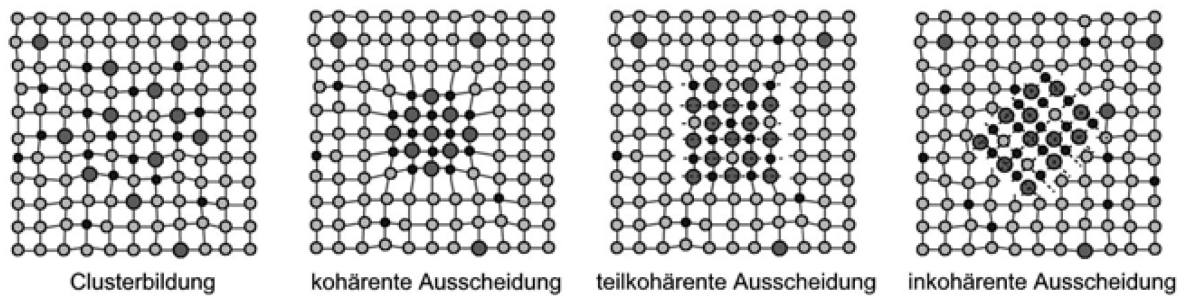


Abbildung 0-8: Verschiedene Zustände einer aushärtbaren Legierung, schematische Darstellung in Anlehnung an [237, 158]

- a) eine übersättigte feste Lösung
- b) mit dem Matrixgitter kohärente Entmischungszone
- c) aus der festen Lösung ausgeschiedene zweite Phase (inkohärente Gleichgewichtsausscheidung)

Beide Varianten können vergesellschaftet vorkommen. Die Kenntnis von Größe, Verteilung, Form und Kristalleigenschaften der Teilchen sowie das Verzerrungsfeld in ihrer Umgebung, aber auch die Art der Wechselwirkung von Versetzungen mit diesen Teilchen ist zur quantitativen Deutung der Aushärtung erforderlich. [237]

Als Wechselwirkungen sind, wie in Abbildung 0-9 veranschaulicht, zwei grundsätzlich verschiedene Mechanismen zu nennen:

1. Ausscheidungshärtung (Mott-Naborro-Mechanismus): Versetzungen sind bei kohärenten bzw. teilkohärenten Ausscheidungen in der Lage, diese Teilchen zu schneiden. (Abbildung 0-9a)
2. Dispersionshärtung (Orowan-Mechanismus): Die Versetzungen können sich nur im Grundgitter bewegen. Die Partikel stellen ein Hindernis für sie dar. Sie müssen sich zwischen ihnen unter Wirkung einer Schubspannung auswölben, bis sich antiparallele Versetzungsteile hinter den Teilchen berühren. Eine freie Versetzung löst sich nun von den Teilchen ab. Zurück bleiben Versetzungsringe um die jeweiligen Partikel. (Abbildung 0-9b)

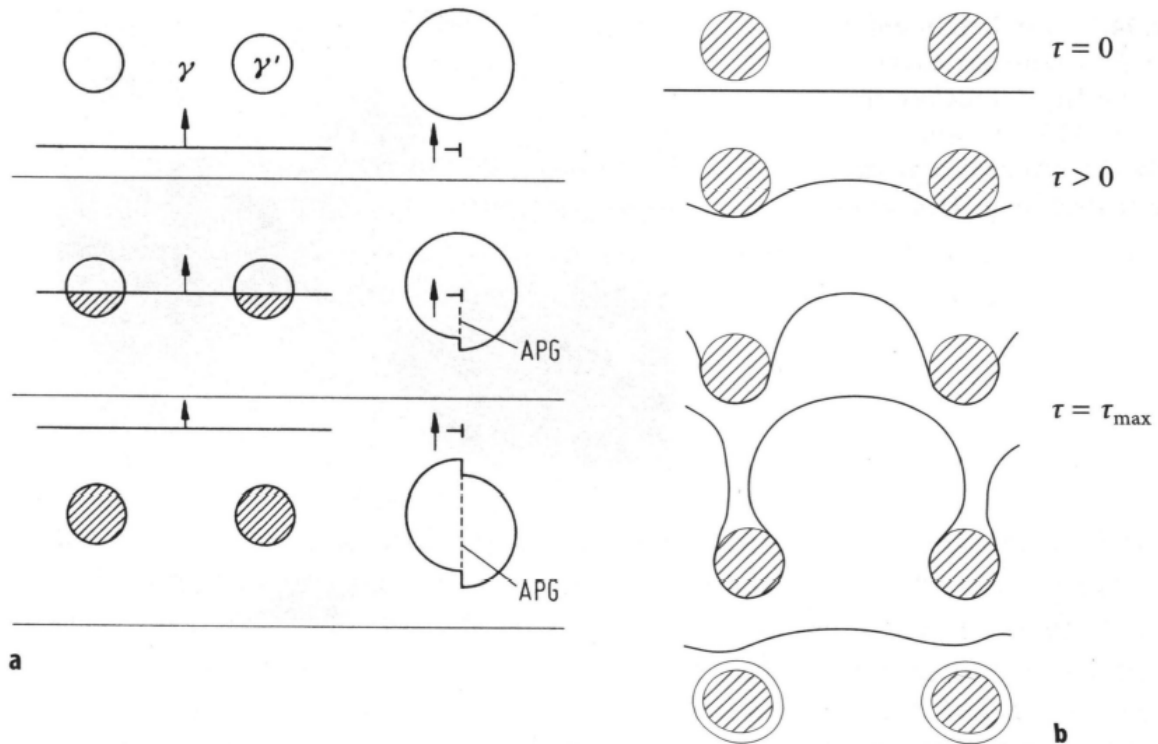


Abbildung 0-9: Wechselwirkung von Versetzungen [237]

- a) Mott-Naborro-Mechanismus: Kohärente Teilchen werden durch eine Versetzung geschnitten. Im Teilchen wird eine Antiphasengrenze (APG) erzeugt.
- b) Orowan-Mechanismus: Harte inkohärente Teilchen können durch flexible Versetzungen umgangen werden. (τ – Schubspannung)

Inkohärente Phasengrenzen wirken auf Versetzungen wie Korngrenzen. Sie sind unüberwindbare Hindernisse. Aber Versetzungen können die Phasengrenzen mit Hilfe des Orowan-Mechanismus umgehen. Inkohärente Ausscheidungen haben daher die gleichen Auswirkungen auf die Festigkeit wie Partikel. [156]

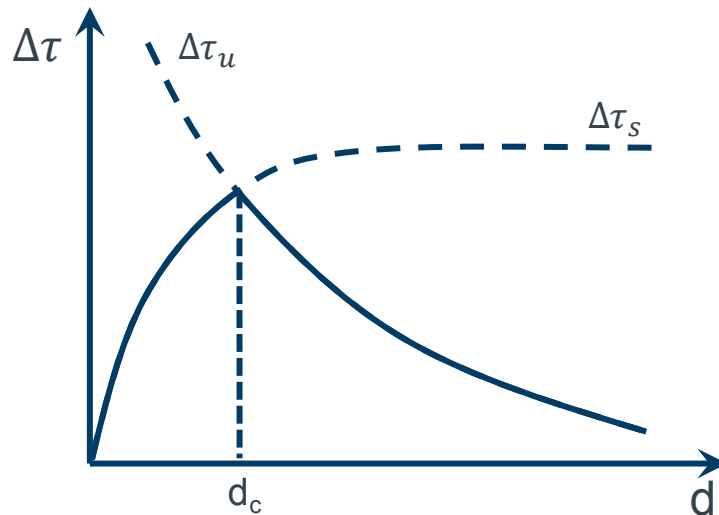


Abbildung 0-10: Kritische Schubspannung τ in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser d ($\Delta\tau_u$ = Umgehung der Teilchen, $\Delta\tau_s$ = Schneiden der Teilchen) in Anlehnung an [238]

Das Maximum der Streckgrenze ist beim kritischen Teilchendurchmesser d_c zu erwarten. Wie Abbildung 0-10 veranschaulicht, gilt für Teilchen kleiner als d_c , dass es für die Versetzung energetisch günstiger ist, das Teilchen zu schneiden. Bei größeren Teilchen reicht die Spannung der Versetzung zum Schneiden nicht aus. In der Folge setzt der Orowan-Mechanismus ein. Je nach Legierung können sich folgende Ausscheidungen bilden: Al_2Cu , Mg_2Si , Al_3Fe , Al_6Mn , Al_3Ni , Al_7Cr , Al_3Zr , Al_3Li , Al_3Sc . [237]

Anhang D: Gießtechnologischer Eigenschaften

Die gießtechnologischer Eigenschaften beschreiben das Werkstoffverhalten während des Formfüllungs- und Erstarrungsprozesses, wodurch insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Gussteils beeinflusst werden.

Um eine hochwertige Gussteilqualität zu erreichen, ist neben einer fachgerechten Schmelzebehandlung eine optimale gießgerechte Gestaltung erforderlich. Hierdurch kann wunschgemäß ein gleichmäßiges, möglichst feinkörniges und dichtes Gefüge erzeugt werden, welches keine Fehler wie Lunker, oxidische Einschlüsse, Gasporosität oder erstarrungsbedingte Risse aufweist. Eine Optimierung der Gießeigenschaften, die wesentlich durch den Legierungstyp und die Beimengungen bestimmt werden, wird in einem gewissen Bereich durch angepasste Gehalte sowie Zusätze erreicht. Zu den Gießeigenschaften gehören das Fließvermögen, das Formfüllungs- und Speisungsvermögen, das Lunkerverhalten sowie das Warmrissverhalten.

Das Fließvermögen beschreibt dabei die Fähigkeit einer Schmelze, einen waagerechten Kanal so weit zu füllen, bis sie durch die fortschreitende Erstarrung daran gehindert wird. Die Auslauflänge in einer Prüfform gilt als Eigenschaftskenngröße. Wichtige Einflussfaktoren auf das Fließvermögen sind die Zusammensetzung und damit die Erstarrungsmorphologie, wie in Abbildung 0-6 vorgestellt aber auch der Wärmeinhalt der Schmelze. Daneben ist das Fließvermögen von der Intensität der Wärmeabführung an die Form und von der kinetischen Energie der strömenden Schmelze abhängig. Erhöhte Gießtemperaturen, höhere Fließgeschwindigkeiten und eine verminderte Wärmeabfuhr durch stärkere Isolierung verbessern in der Praxis das Fließvermögen. [150]

Das Formfüllungsvermögen beschreibt die naturgetreue Konturenwiedergabe der Kavität durch die Schmelze. Als Einflussfaktoren sind neben der Oberflächenspannung der Schmelze, ihre Dichte, die Erstarrungsmorphologie, die Abkühlgeschwindigkeit sowie die metallostatistische Druckhöhe zu nennen. Ein Herabsetzen der Oberflächenspannung durch Legierungselemente (wie z.B. Na, Sr),

aber auch eine zunehmende Dichte und größere Druckhöhe verbessern das Formfüllungsvermögen. Fließ- und Formfüllungsvermögen von AlSi-Legierungen sind vor allem für die naheutektische Legierungen AlSi11 sehr gut. [150]

Die Speisung von Gussstücken dient dem Ausgleich von Volumendefiziten, die beim Erstarren und Abkühlen auftreten. Voraussetzung hierbei ist der Transport von flüssigen Phasen im erstarrenden Gussteil. Zur Sicherung ausreichender Speisungsbedingungen, und somit zur Herstellung dichter, homogener Gussstücke, sind Maßnahmen zu einer gezielten Lenkung der Erstarrung notwendig. Das relative Speisungsvermögen wird aus dem Verhältnis Stockzeitpunkt zur Erstarrungszeit einer Legierung ermittelt. Al-Si-Legierungen mit einem Siliziumgehalt zwischen 4% und 10% weisen aufgrund der zunehmend schwamm- bis breiartigen Erstarrung ein Minimum im Speisungsvermögen auf. Zu höheren Si-Gehalten verbessert sich dies jedoch. [150]

Lunker sind Volumendefizite im oder am Gussteil, deren Ursache in der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens der Werkstoffe liegt. Die Folgen unzureichender Nachspeisung von flüssigem Metall sind Volumenfehler, die als Makrolunker, Mikrolunker, Einfallstellen, kubische Schwindung und als Innenporositäten am oder im Gussstück auftreten. Die Ausbildung und Verteilung des Volumendefizits hängt in der Hauptsache vom Erstarrungsablauf ab. Eine gezielte Beeinflussung der Erstarrungsmorphologie, um einen dichten und fehlerfreien Guss zu erzeugen, ist Stand der Technik. Die Speisergröße wird von der Erstarrungszeit und die Speiserposition vom Speisungsvermögen bestimmt, woraus die Sättigungsweite resultiert. Weiterhin werden konstruktive und technologische Maßnahmen zu einer gezielten Lenkung der Erstarrung realisiert, wie z.B. durch systematische Vergrößerung von Wanddicken in Richtung der Speiserposition, der Formstoffauswahl, dem Einsatz von Kühlkörpern und der Dimensionierung des Speisersystems. [150]

Warmrisse sind interkristalline Materialtrennungen. Sie entstehen in der Endphase der Erstarrung. Volumenkontraktion und die daraus resultierenden Gusskörperspannungen sind als Ursachen zu nennen. Diese Spannungen können durch plastische Verformungen abgebaut oder durch die Festigkeit des Materials

aufgenommen werden. Ein Nachfließen von Restschmelze in die geschädigten Bereiche kann diese ausheilen. Bleibende Warmrisse, die vorwiegend in Bereichen unterschiedlicher Abkühlbedingungen mit behinderter Gussstückschwindung auftreten, bilden sich erst, wenn neben einem schlechten Ausheilvermögen ein geringer Warmrisswiderstand vorliegt, der zu einer Trennung des Kristallverbandes führt. Warmrissempfindlich sind vor allem jene Legierungen, die ein großes Erstarrungsintervall aufweisen oder Beimengungen enthalten, die niedrigschmelzende Phasen bilden. Dazu gehören im Besonderen AlMg-, AlZnMg- und AlCu-Legierungen. AlSi-Legierungen sind dagegen wenig warmrissempfindlich. [150, 239, 237]

Anhang E: Korrosion von Aluminium-Gusslegierungen

Korrosion ist gemäß DIN EN ISO 8044 als physikochemische Wechselwirkung zwischen Metall und seiner Umgebung definiert. Unter Eigenschaftsveränderung des Metalls entsteht eine Funktionsbeeinträchtigung des Metalls, seiner Umgebung und/oder des technischen Systems, zu dem es gehört, wobei die Wechselwirkung oft elektrochemischer Natur ist. Sie findet dabei im Allgemeinen als örtlicher oder flächenhafter Angriff am Bauteil statt, welches sich in aggressiver, feuchter Umgebung bzw. in wässrigen Medien befindet. Da ein korrosiver Angriff bei gegebenen Umweltbedingungen häufig nicht zu vermeiden ist, gilt es, das Bauteil vor einem Korrosionsschaden zu schützen. Durch Kenntnis über das Korrosionsverhalten des Werkstoffes bzw. Bauteils innerhalb seines Anwendungsbereiches und der Gebrauchsdauer kann durch Ableitung entsprechender Maßnahmen hinsichtlich Werkstoffauswahl, Auslegung und Behandlung ein ausreichender Korrosionsschutz gewährleistet werden. [240, 160]

Die Korrosionsbeständigkeit wird von unterschiedlichsten Einflussfaktoren bestimmt. Diese lassen sich nach Ostermann [160] in umgebungsbedingte, werkstoffseitige sowie konstruktive und fertigungsbedingte Faktoren einteilen. Das elektrochemische bzw. das Korrosionsverhalten ist dabei als Systemeigenschaft zu verstehen. [241]

Aluminium gehört mit einem elektrochemischen Potenzial von $-1,66\text{ V}$ zu den unedlen Metallen. [167] Dennoch erweisen sich Aluminium und Aluminiumlegierungen unter Gebrauch als korrosionsbeständige, mitunter seewassertaugliche Werkstoffe. Dies ist auf die sich unmittelbar bei Kontakt mit (Luft-)Sauerstoff ausbildende Oxidschicht auf dem blanken Metall zurückzuführen. Diese dünne, festhaftende und dichte Schicht ist durch sehr geringe Elektronen- und Ionen-Leitfähigkeit charakterisiert. Dies führt zu einer Passivierung der Oberfläche und damit zu der guten Korrosionsbeständigkeit.

Tabelle 0-1: Einflussfaktoren auf die Korrosionsbeständigkeit

Korrosionsbedingungen	Werkstoffseitige Faktoren	Konstruktive und fertigungstechnische Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Art des Korrosionsmediums ▪ pH-Wert ▪ Sauerstoffgehalt des Korrosionsmediums ▪ Dauer der Einwirkung ▪ Trockenphasen ▪ Temperatur ▪ Bewegung des Korrosionsmediums ▪ Erosion, Kavitation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Passiv- bzw. Oxidschicht ▪ Beständigkeit, ▪ Leitfähigkeit ▪ Legierungselemente ▪ Gefüge ▪ Ausscheidungszustand ▪ Kaltumformgrad ▪ Oberflächenbeschaffenheit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spalte ▪ Hohlräume ▪ „Wannen“ ohne Drainage ▪ Kontakt mit Fremdmetallen ▪ Mechanische Verbindungen ▪ Schweißverbindungen ▪ mechanische Bearbeitung ▪ Überzüge ▪ Beschichtungen

Die Oxidschicht besteht dabei aus einer weitgehend porenfreien Sperrschicht und einer wasserhaltigen, porösen Deckschicht. Abbildung 0-11 stellt dies für eine an feuchter Luft bei Raumtemperatur gebildeten Oxidschicht dar. [160]

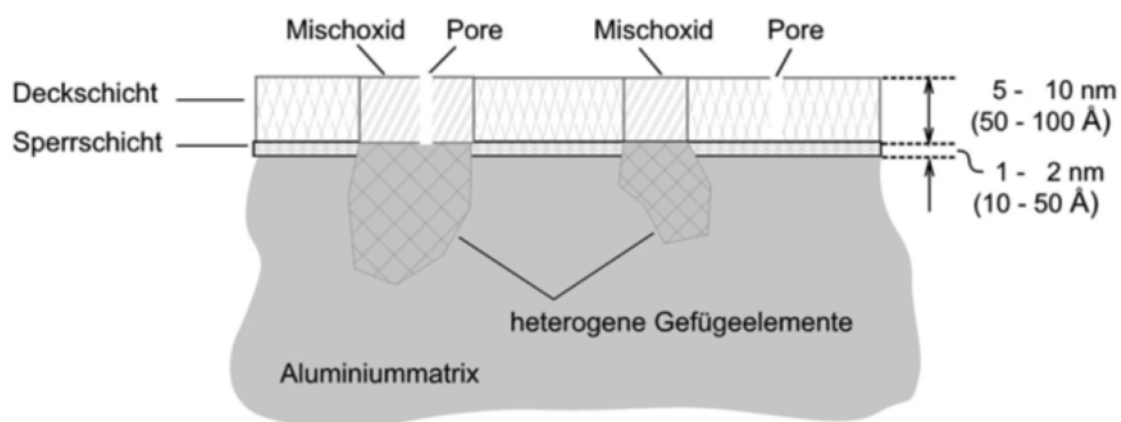


Abbildung 0-11: Schematischer Aufbau der Oxidschicht des Aluminiums [160]

Temperatur- und Umgebungseinflüsse, aber auch Legierungselemente haben dabei Einfluss auf die Dicke der Schicht. Eine Wärmebehandlung führt zu einem Schichtwachstum, was für die spätere Korrosionsbeständigkeit vorteilhaft ist. Bei höheren Temperaturen ab 500°C erfolgt das Wachstum zunehmend kristallin statt amorph, wodurch die chemischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften verändert werden. Lokale Beschädigungen der Oxidschicht durch mechanische oder chemische Einwirkungen führen zu keiner Beeinträchtigung der Korrosionsbeständigkeit, sofern die Betriebsbedingungen eine erneute Bildung der schützenden Oxidschicht zulassen. [160]

Die Korrosionsbeständigkeit der Oxidschicht erstreckt sich auf den schwach sauren bis leicht alkalischen Bereich wie das Pourbaix-Diagramm in Abbildung 0-12 links zeigt. Kontakt mit starken Säuren wie Fluß- oder Phosphorsäure, aber auch stark basischen Medien wie Natriumcarbonat und Natriumhydroxid führen zur Korrosion und damit zu Materialabtrag. Für unterschiedliche Medien ist dies Verhalten in Abbildung 0-12 rechts veranschaulicht. [242, 243]

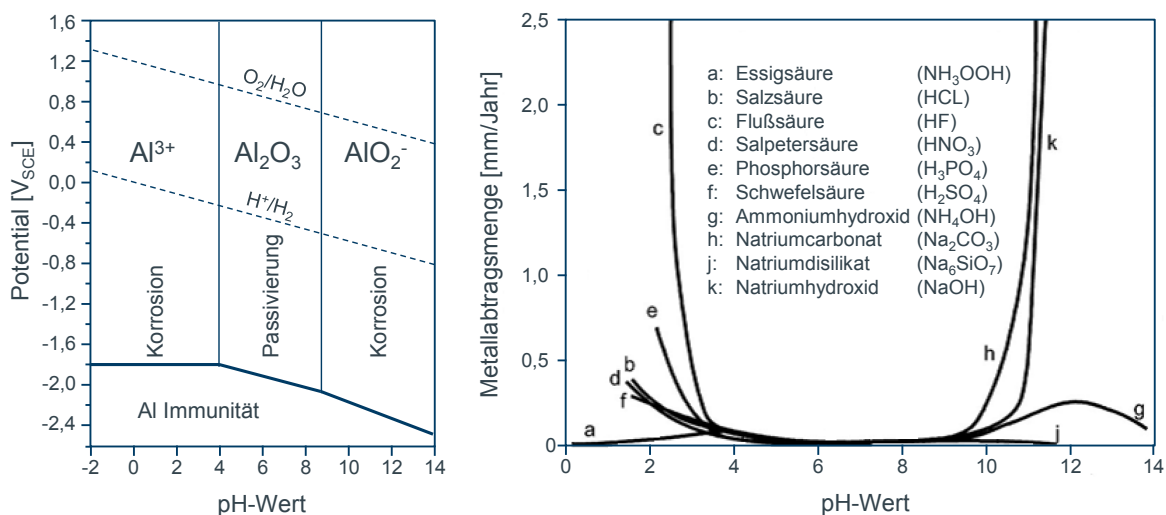


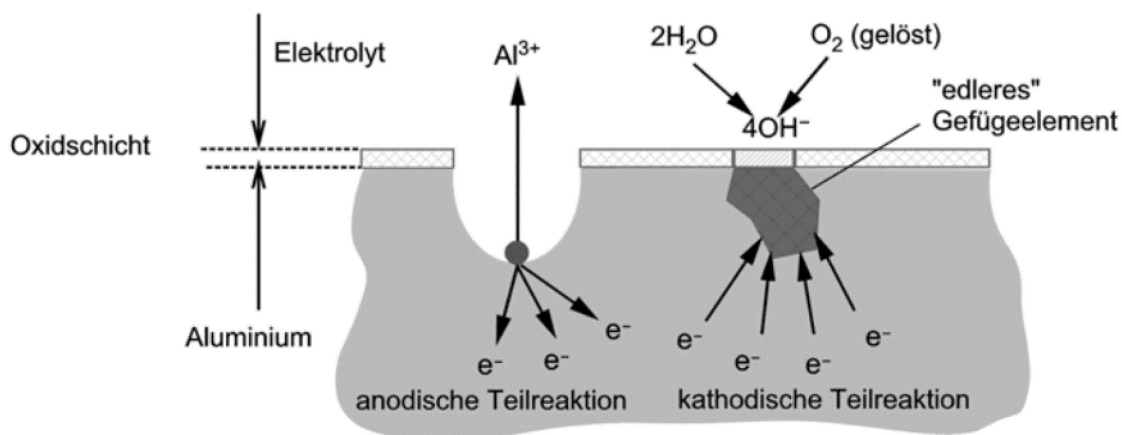
Abbildung 0-12: links: Pourbaix-Diagramm (vereinfacht) für das System Al/H₂O (10⁻⁶ mol/l Al³⁺-Ionen) nach [243];
rechts: Beständigkeit der Aluminiumoxidschicht gegenüber Säuren und Laugen in Abhängigkeit des pH-Werten nach [242]

Im Passivbereich können durch elektrochemische Prozesse allerdings lokale Korrosionserscheinungen wie die Lochkorrosion durch Verschiebung des anodischen

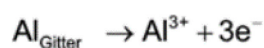
Ruhepotentials entstehen. Auslöser können neben jeweils elektropositiveren im Mischkristall gelösten Legierungselementen oder heterogenen Gefügebestandteilen an der Oberfläche auch metallische Fremdpartikel wie Bremsstaub sein. [160]

Korrosionsmechanismen

Ursache von Korrosionsschäden sind überwiegend elektrochemische Vorgänge unter Anwesenheit eines Elektrolyts. Diese Vorgänge lassen sich im Wesentlichen in zwei Teilreaktionen gliedern: Die anodische Oxidationsreaktion sowie die kathodische Reduktionsreaktion wie in Abbildung 0-13 dargestellt.



anodische Teilreaktion (Oxidationsschritt):



kathodische Teilreaktion (Reduktionsschritt):

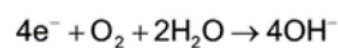


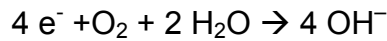
Abbildung 0-13: Elektrochemischer Korrosionsmechanismus bei Aluminium [160]

Bei der anodischen Reaktion wird durch Elektrolyteinfluss ein Aluminiumatom herausgelöst, welches seine Valenzelektronen gemäß Formel 0-3 hinterlässt.



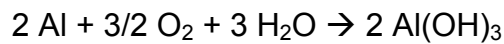
Formel 0-3

Ein sich einstellender Gleichgewichtszustand kann dabei durch die kathodische Reaktion gemäß Formel 0-4, bei der Elektronen durch das Metall aufgenommen werden, verhindert werden. Verantwortlich kann die Reduktion gelösten Sauerstoffs bei Anwesenheit neutraler, sauerstoffhaltiger Elektrolyte sein.



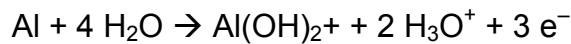
Formel 0-4

Diese Reaktion läuft bei Aluminiumlegierungen meist unter Wechselwirkung mit oberflächlichen, elektropositiveren intermetallischen Phasen und Gefügebestandteilen wie Al_3Fe , Silizium oder Al_2Cu ab. Die Geschwindigkeit hängt dabei weitgehend vom Sauerstoffangebot ab. Nun kann das positiv geladene Aluminiumatom mit dem negativen Hydroxidion unter Bildung des schwerlöslichen Aluminiumhydroxids reagieren:

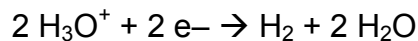


Formel 0-5

Bei saueren Medien gelten die Reaktionsschritte.

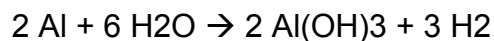


Formel 0-6



Formel 0-7

Hierbei wird neben der Bildung von Aluminiumhydroxid Wasserstoff freigesetzt.



Formel 0-8

Die beiden Teilreaktionen können an unterschiedlichen Bereichen der Oberfläche stattfinden, wodurch unterschiedliche Erscheinungsformen der Korrosion zu beobachten sind. [160]

Erscheinungsformen

Gemäß DIN EN ISO 8044 [240] wird eine Vielzahl an Korrosionsformen beschrieben. Für Fahrwerk-Komponenten aus Aluminiumlegierungen sind folgende dabei von besonderer Bedeutung:

- Flächenkorrosion
- Lochkorrosion

- Kontaktkorrosion
- Interkristalline Korrosion
- Spannungsrissskorrosion
- Schwingungsrissskorrosion

Flächenkorrosion

Flächenkorrosion findet in Medien außerhalb des pH-Wertebereichs 4,5 bis 8,5 statt. Ihre Ausprägung ist gleichmäßig bis muldenförmig. Die Abtragsgeschwindigkeit ist hier im Allgemeinen gering, aber auch temperaturabhängig. [167, 244]

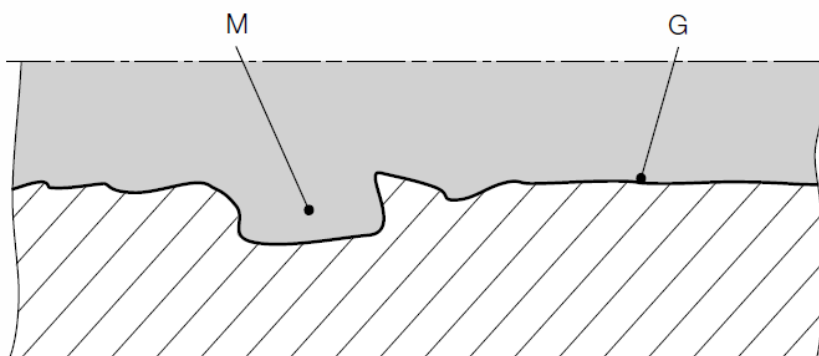


Abbildung 0-14: schematische Darstellung der Flächenkorrosion, gleichmäßig (G) und muldenförmig (M) [244]

Lochkorrosion

Die Lochkorrosion ist durch örtlich begrenzte, kraterförmige bis nadelstichartige Vertiefungen oder oberflächennahe Unterhöhlungen gekennzeichnet und wird auch als Lochfraß bezeichnet. Sie entsteht in Bereichen oberflächlicher, örtlicher Werkstoffinhomogenitäten bzw. Störstellen oder durch örtliche Verletzung der schützenden (Oxid-)Schicht. [154, 244]

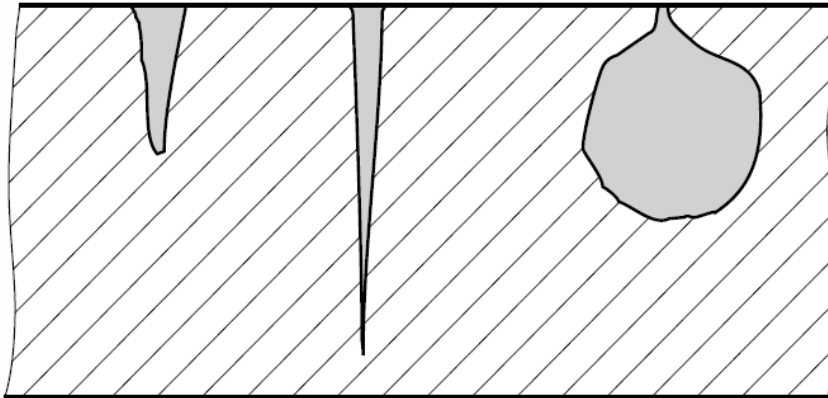


Abbildung 0-15: schematische Darstellung der Lochkorrosion, links: kraterförmig, mittig: nadelstichartig, rechts: unterhöhlt [244]

Die restliche Oberfläche weist häufig keine weiteren Formen der Schädigung auf. An Korngrenzen liegende, ausgeschiedene intermetallische Phasen wirken sich ungünstig auf den Widerstand gegen Lochkorrosion aus. Schwermetallniederschläge oder Eisenpartikel, wie beispielsweise Bremsstaub, gelten in der Praxis als Auslöser für Lochkorrosion bei Aluminiumbauteilen. Hemmende Wirkung auf Lochwachstumsgeschwindigkeit hat die zunehmende Bildung und Ablagerung von wasserunlöslichen Korrosionsprodukten, wie beispielsweise $\text{Al}(\text{OH})_3$. Das Lochfraßpotenzial dient zur Einordnung des Verhaltens des Werkstoffes. Aluminium und Al-Mg, aber auch Al-Si-Mg-Legierungen weisen unter Meerwasser vergleichbare Potenziale im Bereich von $U_H = -510$ bis -460 mV NHE bzw. $U_L = -750$ bis -700 mV GKE auf. Bei NHE sind die Potenzialwerte auf die Normal-Wasserstoff-Elektrode bezogen, bei GKE auf die gesättigte Kalomelerelektrode. [245, 167]

Kontaktkorrosion

Die Kontaktkorrosion wird auch als galvanische Korrosion bezeichnet und tritt in Anwesenheit eines Elektrolyten bei Kontakt zweier Werkstoffe mit hoher Potenzialdifferenz auf. Hierbei löst sich das unedlere Metall auf. Unter praktischen Bedingungen haben vielfältige Faktoren Einfluss auf die sich einstellenden Potenzialdifferenzen:

- Sauerstoffgehalt des Elektrolyten
- Zusammensetzung, Konzentration sowie pH-Wert des Elektrolyten
- Flächenverhältnis zwischen Anode und Kathode
- Belüftung des Elektrolyten und der Elektroden
- Temperatur

Unter Berücksichtigung von Passivierungsschicht und typischen Umgebungsmedien wie chloridfreiem, leicht saurem Regenwasser oder neutralem Meerwasser stellt sich dabei die sogenannte praktische Spannungsreihe ein, die insbesondere für Werkstoffpaarungen mit Aluminium ein wesentlich gutmütigeres Verhalten offenbart. So reduziert sich nach Elze das Potenzial für Aluminium ausgehend vom Normalspannungsreihenwert -1660 mV auf -214 mV für Wasser mit einem pH-Wert von 6 bzw. auf -712 mV für Meerwasser mit einem pH-Wert von 7,5, wobei die Passivierungsschicht Berücksichtigung findet. Insbesondere die Paarung mit Stahl profitiert von diesem Verhalten. [160, 246]

Interkristalline Korrosion

Diese Korrosionsform ist selektiver Natur und an Korngrenzen bzw. in ihrer Nähe anzutreffen. Grund hierfür ist die Anwesenheit von Ausscheidungsphasen (z.B. Al-Cu-Phasen, Al-Zn-Phasen oder Al-Mg-Phasen), die bei Benetzung mit einem Elektrolyten zur selektiven Korrosion der unedleren Gefügebestandteile führt. Die Folge ist ein Verlust des Zusammenhangs einzelner Kristallkörner und somit eine reduzierte Festigkeit. [167]

Insbesondere kupferhaltige Legierungen neigen zu interkristalliner Korrosion. Untersuchungen zeigen, dass hier insbesondere mikrostrukturelle Unterschiede zwischen Kornfläche und Korngrenzengebiet zu einer elektrochemischen Änderung führen. Grund hierfür sind diffusionsbedingte, Cu-reiche Ausscheidungen, die sich an Cu-armen und energetisch günstigen Säumen der Korngrenzen bilden. Durch lokal unterschiedliche Potentialbereiche zwischen Matrix, Kornfläche, Cu-armen Säumen und Cu-haltigen Ausscheidungen entsteht Lochfraß. [247, 248]

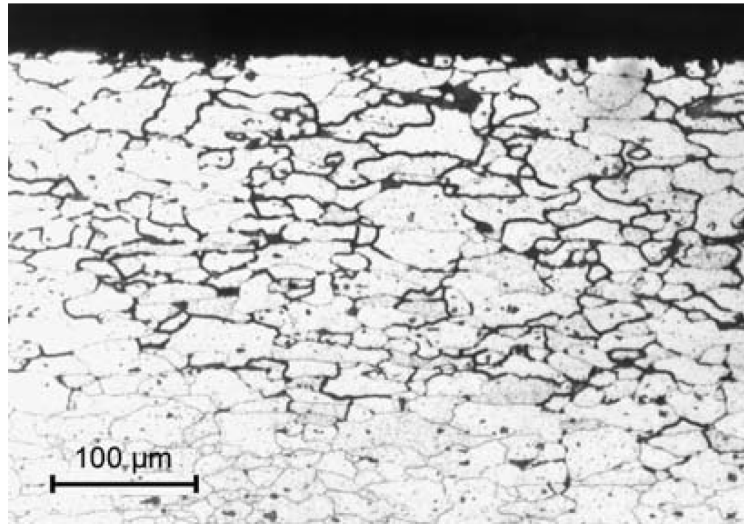


Abbildung 0-16: Beispiel für interkristalline Korrosion bei AlMg_{4,5}Mn_{0,7} nach Sensibilisierung durch Glühen bei 450°C, 30 Min, Abschrecken in Wasser und nachfolgende 3-monatige Lagerung bei 100 °C. Längsschliff, geätzt in 10%-ige H₃PO₄ [160]

Spannungsrisskorrosion

Die Spannungsrisskorrosion gehört zu den Korrosionsformen, die unter mechanischer Beanspruchung auftritt und entsteht bei gleichzeitigem Einwirken von wässrigem, korrosiven Medium und statischer Zugbelastung, die auch in Form von Eigenspannungen vorliegen kann. Es wird dabei in Abhängigkeit des Rissverlaufs zwischen interkristalliner und transkristalliner Spannungsrisskorrosion unterschieden. Während sich die Rissfront bei transkristalliner Art quer durch die Körner bewegt, folgt die interkristalline Form den Korngrenzen. [167]

Die anliegende mechanische Zugbelastung führt zu Schäden an der Oxidschicht, sodass an diesen Stellen an der metallisch blanken Oberfläche die Korrosion beginnt. In Folge der anliegenden mechanischen Belastung entsteht eine Plastifizierung. Kann gleichzeitig die Regeneration der Oxidschicht durch z.B. Abwesenheit von Luftsauerstoff oder hohe Plastifizierungsgeschwindigkeit im Kerbgrund bzw. an den Rissflanken nicht erfolgen, schreitet die Korrosion, wie in Abbildung 0-17 dargestellt, im Kerbgrund fort. Zusätzlich kommt es zu einer Wasserstoffversprödung im angrenzenden Korngrenzenbereich, die durch

eindiffundierenden atomaren Wasserstoff aus der Korrosionsreaktion resultiert. [155, 160, 249]

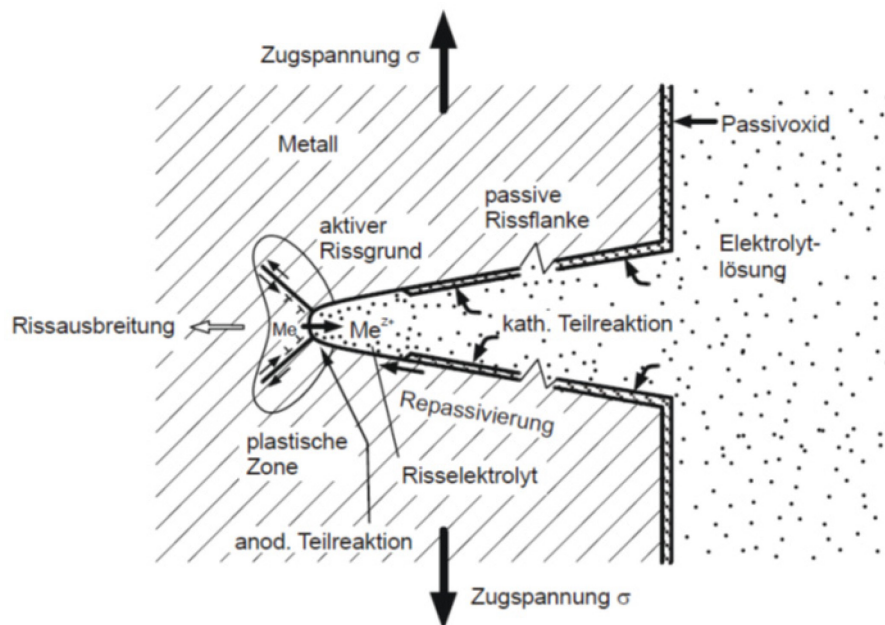


Abbildung 0-17: Mechanismus der Spannungsrissskorrosion, schematisch [249]

Bei ausscheidungshärtenden Aluminium-Legierungen überwiegt eine spannungsbeschleunigte interkristalline Korrosion. Unter Einfluss wässriger Salze beginnt die Korrosion oberflächlich in ihrer interkristallinen Form und geht mit zunehmender Materialauflösung in die Spannungsrissskorrosion über. [250]

Schwingungsrissskorrosion

In der Wechselwirkung von mechanischer Wechselbeanspruchung und Korrosion erfolgt eine verformungsarme, in der Regel transkristalline Rissausbildung, die als Schwingungsrissskorrosion bezeichnet wird. Der Schädigungsgrad ist von der Aggressivität des korrosiv wirksamen Mediums, der Einwirkdauer und damit der Schwingfrequenz sowie der Größe der geöffneten Rissflanke abhängig. Von besonderer Bedeutung ist die wirksame Mittelspannung. Je höher dieser Wert ist, desto länger sind Rissöffnung und Korrosionsangriff im Kerbgrund. Wie auch bei der Spannungsrissskorrosion erfolgen unter Einwirkung einer NaCl-Lösung eine

gleichzeitige Reaktion der Chloridionen und eine Wasserstoffreduktion an der frischen Rissfläche. Durch die Wasserstoffdiffusion in saurer Umgebung versprödet das Material an der Rissspitze und beeinflusst die Rissfortschrittsgeschwindigkeit. Unter Berücksichtigung der Regenerationsgeschwindigkeit der schützenden Oxidschicht und der Bildungsgeschwindigkeit der kritischen Wasserstoffkonzentration an der Rissspitze reduzieren für NaCl-Lösungen Lastwechselfrequenzen über 50 Hz den Korrosionsangriff. [167, 160]

Anhang F: Annahmen der Sachbilanz für einen Aluminium-Radträger

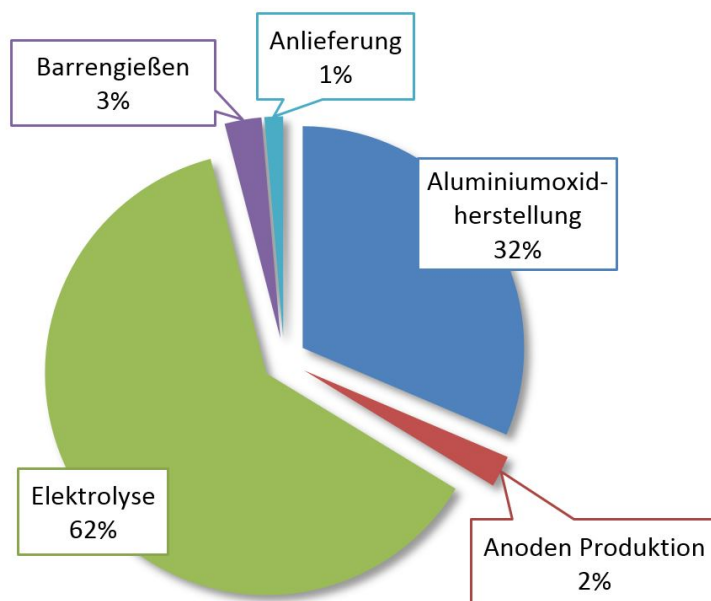
Eigenschaft/Prozessstufe	Aluminium-Radträger
Beschaffung Primärmaterial	European Aluminium Association 2013; angepasst mit Energiemix der Norsk Hydro SE [251]
zugrundeliegender Energiemix der Primärmaterialherstellung	68 % Wasserkraft, 20 % Erdgas, 7 % Kohle, 4 % Kernenergie [252]
Schmelzen	Daten gemäß studentischer Zuarbeit [191]
Schmelzebehandlung	Datenbasis gemäß Herstellerinformation zu MTS1500 Dauer: 10 Minuten; 0,42kWh/t [253]
Gießen, Entgraten, Sägen, Röntgen, Rissprüfen, mech. Bearbeitung, Waschen	Daten gemäß studentischer Zuarbeit [191]
Kühlen	Tauchkühler: 644W _{el} [254] Roboterhandlung: 0,006 m ³ /to (Druckluft); 0,06 kWh _{el} /to [255]
Wärmebehandlung	Daten gemäß studentischer Zuarbeit [191] Daten gemäß studentischer Zuarbeit [192]
Verpacken	Roboterhandlung: 0,006 m ³ /to (Druckluft); 0,06 kWh _{el} /to [255]
Entstauben	0,003 kW _{el} /(Bm ³ /h) [256] 33.000 Bm ³ /h für einen Ofen [257]
Ausschuss	Berücksichtigt über Produktionsfaktoren
Bauteilgewicht	Konstantes Rohteilgewicht bis zur mechanischen Bearbeitung; Fertigteilgewicht für die der mechanischen Bearbeitung nachgelagerte Prozesse
Transport	Transportrouten: Interne Dokumente Emissionsberechnung mittels: EcoTransIT [258]; NTMCalc [259]
Interne Logistik	Verbrauch pro Palette: 0,0324 l [260]
Transport zwischen Werken	Emissionen Lkw (Diesel): 2,94 kgCO ₂ e/l [261] Verbrauch Lkw (Diesel): 0,027 l/tkm

Anhang G: Emissionsfaktoren

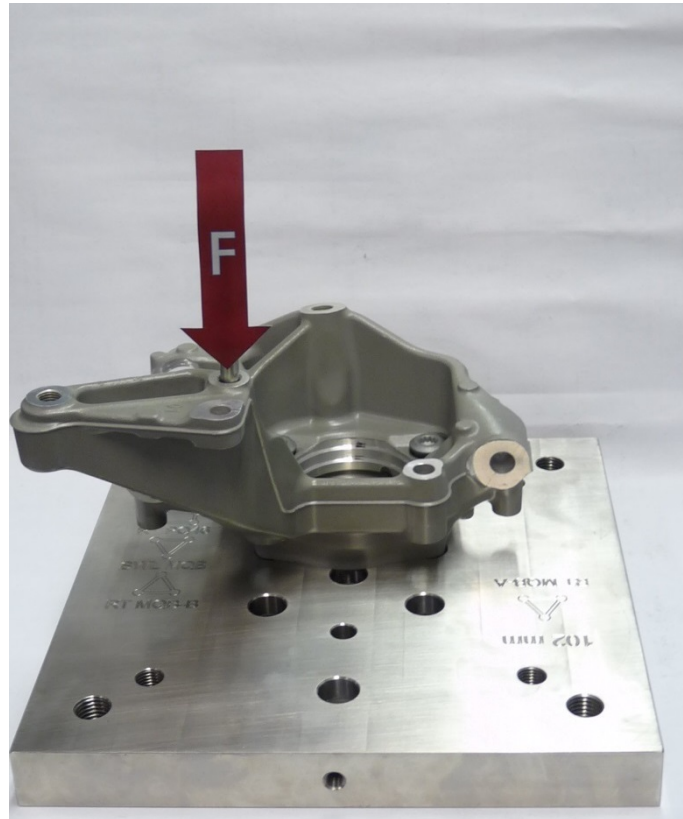
Emissionsfaktoren		Gesamt-emissionsfaktor	direkte Emissionen	indirekte Emissionen		
Energieträger	Einheit	CO ₂ e	CO ₂	NO _x e	CH ₄ e	CO ₂
Strom	kg/kWh	0,514	0,000	0,009	0,016	0,488
Erdgas	kg/m ³	2,332	2,010	0,002	0,124	0,196

Daten gemäß GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme), Version 4.94 – Stand: März 2015 [195]

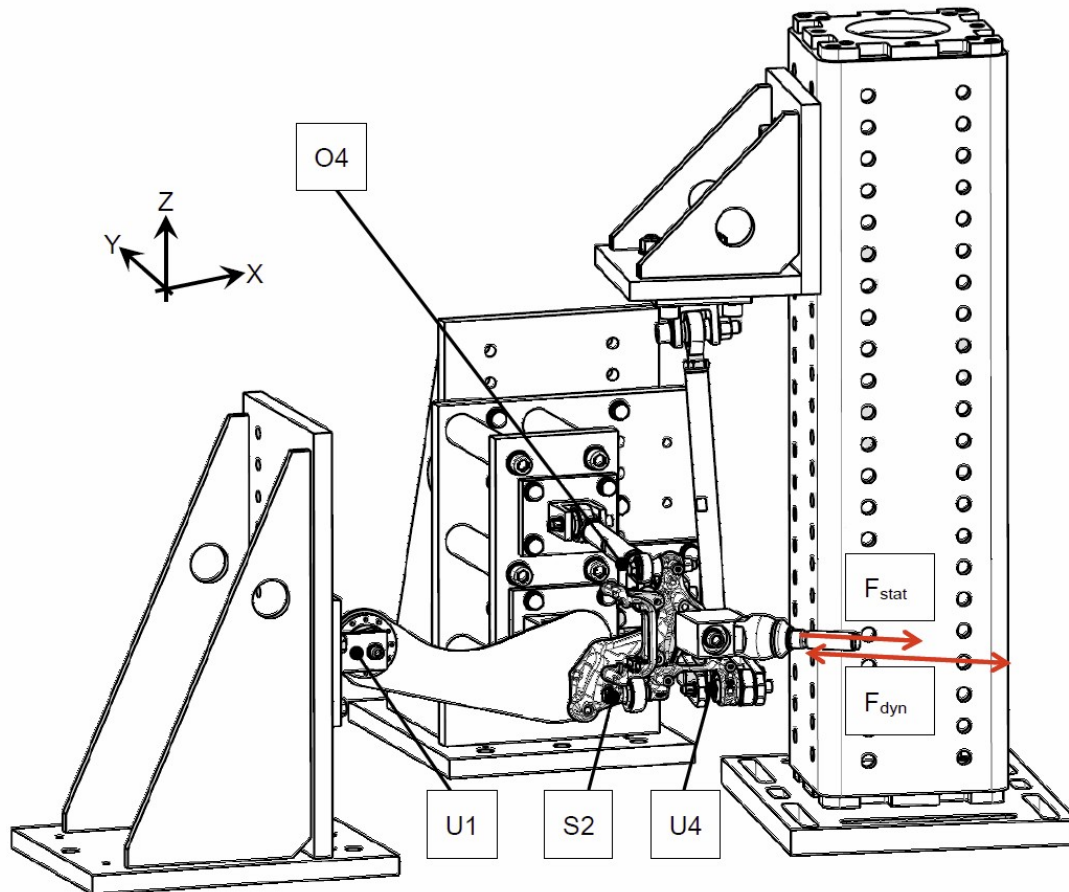
Anhang H: Anteile am CO₂-Ausstoß bei der Masselerstellung von Primäraluminium für einen Radträger



Anhang I: Versuchsaufbau zur vereinfachten dynamischen Erprobung eines Radträgers, Aufspannplatte und Bauteil, Pfeil: Krafteinleitung



Anhang J: 1-kanaliger Prüfaufbau für Radträger-Erprobungen

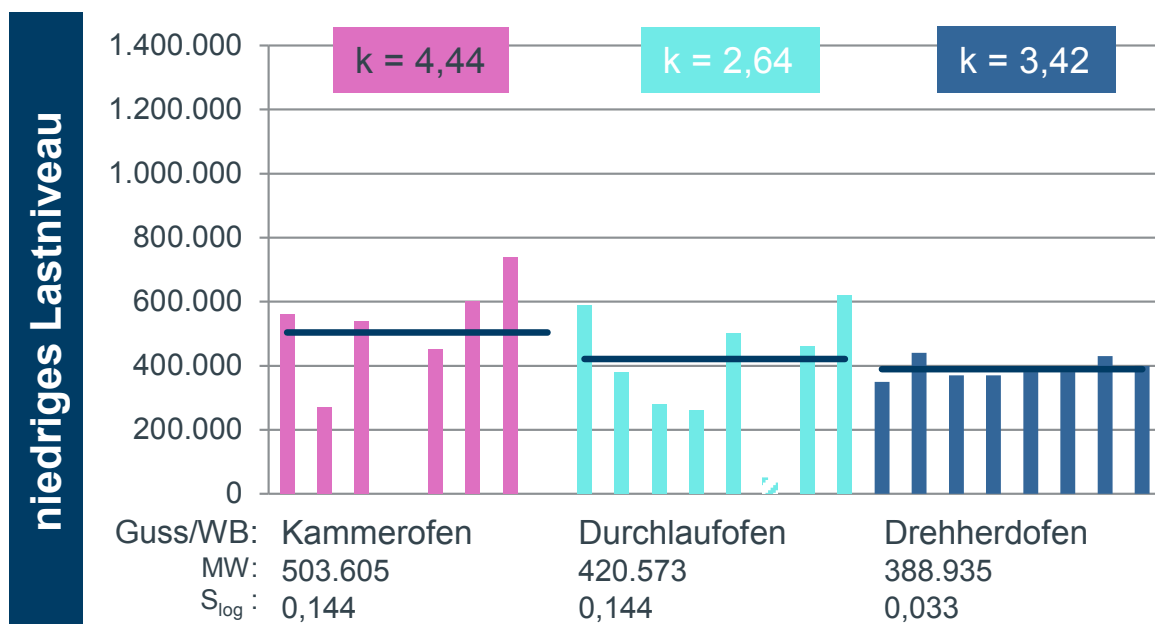
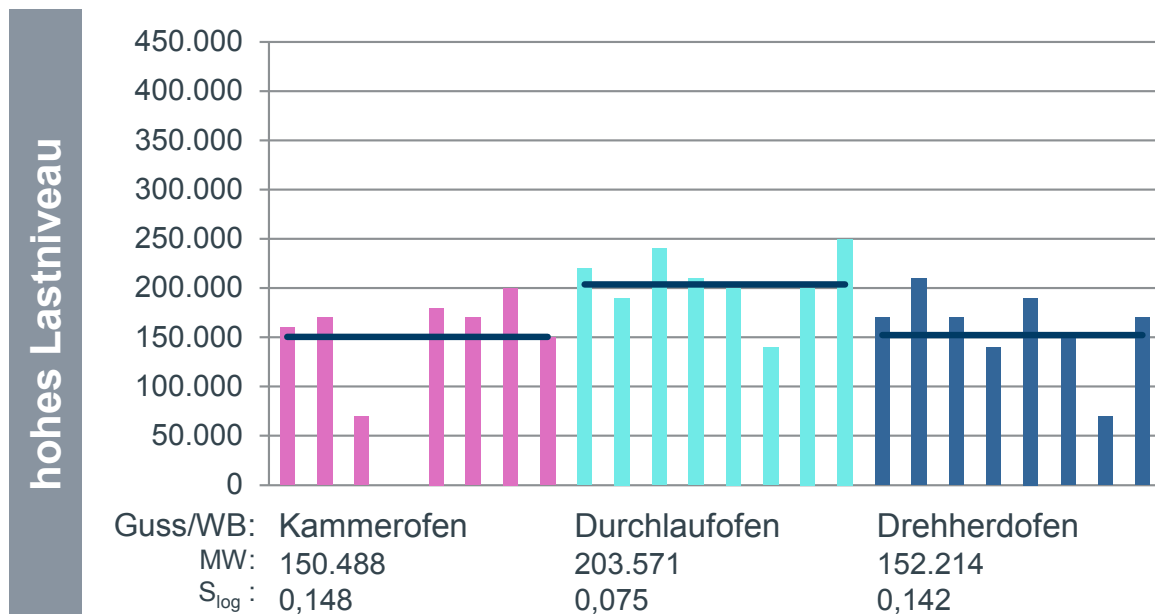


F_{stat} – statische Last

F_{dyn} – dynamische Last

O2, S2, U1, U4 – Anbindungspunkte

Anhang K: Übersicht der 1K-Ergebnisse des Ofenvergleichs

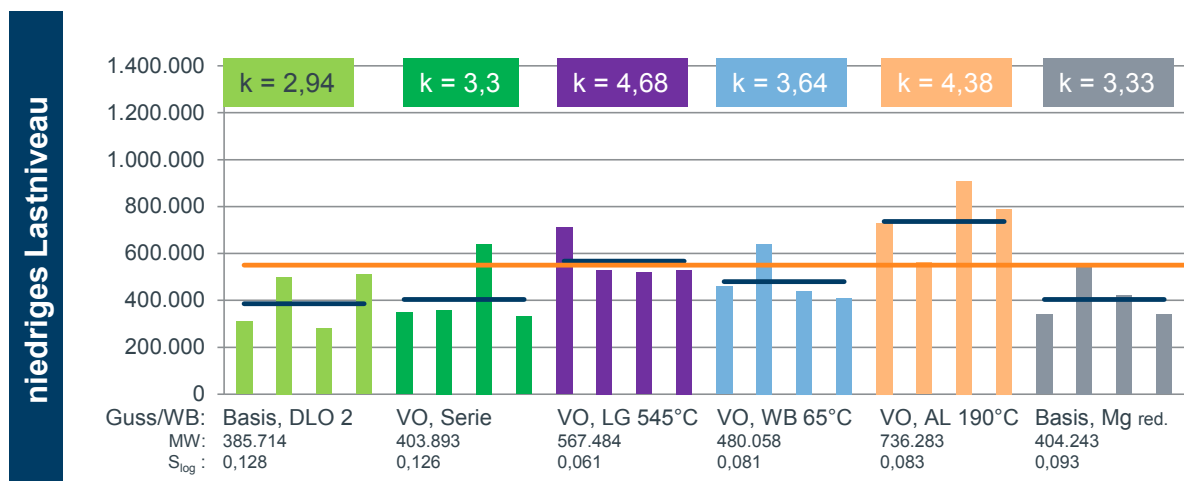
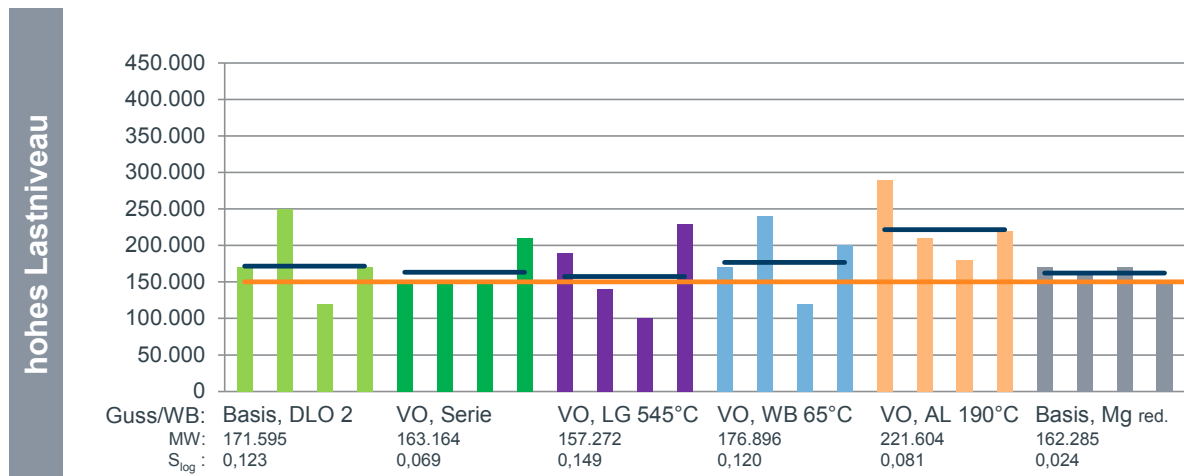


k - Steigung

MW - Mittelwert

S_{log} - erwartungstreue Standardabweichung

Anhang L: Übersicht der 1K-Ergebnisse aus dem Parametervergleich



k - Steigung

MW - Mittelwert

S_{log} - erwartungstreue Standardabweichung

Anhang M: Partikelanalyse Parameterabgleich

