

# Abschlussbericht

## **Verbundprojekt:**

Leichtbaukonzepte für Gussstrukturbauteile von Windenergieanlagen

## **Teilprojekt:**

Gießsimulation (LeKoGussWEA)

## **Akronym/Kurzbezeichnung:**

LeKoGussWEA



Förderkennzeichen: 0324279D

Laufzeit des Vorhabens: 01. Januar 2020 – 31. Dezember 2023

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Verbundvorhaben wurde dankenswerterweise mit Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) begleitet.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Aachen, 25.07.2024

**Berichtsblatt**

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht	
3. Titel LeKoGussWEA – Leichtbaukonzepte für Gussstrukturbauteile von Windenergieanlagen		
4. Autor(en) Dipl.-Ing. Mathias Bodenbug		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023
		6. Veröffentlichungsdatum 25.07.2024
		7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• MAGMA GmbH, Aachen</li> <li>• IWM –Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau, Aachen</li> <li>• CWD – Chair for Wind Power Drives, Aachen</li> <li>• SLA – Institut für Strukturmechanik und Leichtbau, Aachen</li> <li>• Access, Aachen</li> <li>•</li> </ul>		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 0324279D
		11. Seitenzahl: 32
		13. Literaturangaben
16. Zusätzliche Angaben		14. Tabellen
		15. Abbildungen
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger PTJ, Jülich, 25.07.2024		
18. Kurzfassung Auf Grund der vielseitigen Probleme, die die kontinuierliche Leistungssteigerung von Windenergieanlagen und der damit einhergehende Zuwachs des Gondelgewichts zur Folge haben, ist das Ziel des hier skizzierten Forschungsvorhabens, das Gewicht der dort verbauten Gussstrukturbauteile um 20 % – bezogen auf den derzeitigen Stand der Technik – zu reduzieren und darüber eine wirtschaftliche Gesamtoptimierung zu erreichen. Die Gießprozesssimulation soll dabei Vorhersagen zur Gießbarkeit der Bauteile sowie zu den Gussgefügen und den damit verbundenen Eigenschaften machen und mit der Betriebsfestigkeitsberechnung verknüpft werden.		
19. Schlagwörter: Betriebsfestigkeit, Gusseisen, Gefügesimulation, Prozesskette		
20. Verlag	21. Preis	

## **Inhalt**

1. Aufgabenstellung
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens
3. Planung und Ablauf des Vorhabens
  - 3.1. Anpassung der Gießsimulation für Si-GJS
    - 3.1.1. Optimierter Speisungsalgorithmus
    - 3.1.2. Ermittlung von Korrelationen zwischen Gefüge und Werkstoffeigenschaften
  - 3.2. Abgleich der Simulation mit einem realen Gussteil
  - 3.3. Vorhersage der Dauerfestigkeit von GJS 500-14
  - 3.4. Kopplung von Gefüge und Eigenschaften für ADI Bauteile
  - 3.5. Vorhersage der Dauerfestigkeit von ADI
  - 3.6. Integration der Gießprozesssimulation in die Topologieoptimierung
4. Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes
6. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen
7. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate
8. Literatur

## 1. Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Gewicht von in Windenergieanlagen verbauten Gussstrukturbauteilen um 20% - bezogen auf den derzeitigen Stand der Technik - zu reduzieren und darüber hinaus eine wirtschaftliche Gesamtoptimierung zu erreichen. Zur Erreichung des Gesamtziels wird MAGMA mit Hilfe der numerischen Simulation die Prozesskette zwischen Gefügesimulation, Eigenschaftsvorhersage und Betriebsfestigkeitsberechnung schließen. Hierzu sind entsprechende Entwicklungsarbeiten geplant:

- I. Entwicklung numerischer Modelle zur Vorhersage lokaler gefügeabhängiger Werkstoffeigenschaften
  - Anpassung der Gießsimulation für Si-GJS
  - Ermittlung von Korrelationen zwischen Gefüge und Werkstoffeigenschaften
  - Kopplung von Gefüge und Eigenschaften für ADI Bauteile
- II. Kopplung der Gießsimulation mit der Simulation der Bauteilbeanspruchbarkeit
- III. Integration der Gießprozesssimulation in die Topologieoptimierung

## 2. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Unterschiede in der Mikrostruktur beeinflussen bei Gusseisen wesentlich die mechanischen Eigenschaften. Gefüge und lokale Fehlstellen im Gussbauteil werden bei konventioneller Auslegung der Lebensdauer nicht berücksichtigt. In der Regel führt die Annahme homogener Eigenschaften unter Verwendung eines einzigen Werkstoffdatensatzes bei der Berechnung der Betriebsfestigkeit zu Fehleinschätzungen in der Beurteilung von lokalen Risiken. Gleichzeitig werden Chancen im Werkstoffpotenzial nicht genutzt. Sicherheitszuschläge sorgen für ein unnötig hohes Bauteilgewicht und erhöhen die Kosten. Der Konstrukteur kann nur dann in hohem Maße vom Potenzial des Werkstoffs Gusseisen profitieren, wenn die tatsächliche Bandbreite der lokalen Werkstoffeigenschaften bei der Lastfallberechnung Berücksichtigung findet.

Die Verknüpfung der Gießprozesssimulation mit zyklischen Werkstoffkennwerten wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsprojektes MABIFF erstmalig für verschiedene Gusseisenwerkstoffe realisiert. Gefügeabhängige Wöhlerkurven schließen die vorhandene Lücke zwischen Gießprozesssimulation und Lastfallanalyse. Damit gelang die Übertragung der Eigenschaften aus dem Herstellungsprozess in die Betriebsfestigkeitsberechnung.

Diese innovative Vorgehensweise führte sowohl quantitativ als auch qualitativ zu Verbesserungen bei der Lebensdauervorhersage, da sowohl Lastspielzahlen erhöht werden konnten als auch lokale Anrissorte korrekt vorhergesagt wurden, was im Vergleich zur konventionellen Auslegung von Gussbauteilen eine enorme Verbesserung darstellt.

Im Rahmen des oben genannten MABIFF Projektes wurden ein GJS 400 und ein GJV 450 untersucht. In einem weiteren BMBF Forschungsvorhaben (LEA) wurde die Werkstoffgruppe ADI näher untersucht.

ADI Werkstoffe (Austempered Ductile Iron) sind eine Werkstoffgruppe, die aufgrund ihrer Eigenschaftskombinationen anspruchsvolle Anwendungsmöglichkeiten bieten. Die große Abhängigkeit von Prozessgestaltung und Werkstoffeigenschaften führen jedoch zu einer unbefriedigenden Akzeptanz bei den Konstrukteuren und damit zu einem geringen Anwendungsgrad. Grundlage für eine substanzielle Verbreiterung des Einsatzes von ADI ist daher eine vorhersagbare Prozessgestaltung.

Das Gesamtziel des Vorhabens LEA war daher die konsequente Ausnutzung des Leichtbaupotenzials von ADI Bauteilen durch die Entwicklung von virtuellen Werkzeugen zur gezielten Einstellung der ADI Werkstoffeigenschaften und einer vorhersagbaren Prozessgestaltung inklusive des Betriebsverhaltens.

Lokal unterschiedliche Abkühlverhältnisse und Keimdichten beeinflussen die Unterkühlung der Schmelze und bestimmen, ob Grau- oder Weißerstarrung auftreten. Flüssig-schwindung, Austenitschwindung und Graphitexpansion sind ebenfalls abhängig von Legierung, Metallurgie und Abkühlung und beeinflussen lokal die Speisung eines Gussteils. Lokale Seigerungsprofile und Abkühlverhältnisse bestimmen schließlich bei der Festkörperumwandlung die Gefügeanteile und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften.

MAGMA bietet mit der Software MAGMAiron eine Möglichkeit, diese komplexen Zusammenhänge durch umfassende physikalische Modelle für Siliziumgehalte von 1,5 bis 4,5 Gew.-% sowie Legierungsgehalte aller wichtigen Elemente bis 2 Gew.-% zu berücksichtigen.

Die Software berechnet dabei Speisung, Gefüge und resultierende Eigenschaften anhand der lokalen Erstarrungsabläufe und weiteren Abkühlung im Gussteil. Die folgenden Qualitätskriterien stehen für GJS Werkstoffe zur Verfügung:

- Vorhersage von Makrolunkern und Mikroporosität im Gussteil
- Menge an Primärgraphit und lokale Sphärolitendichte
- Primäraustenit und Anteil eutektischer Phase
- Anteil und Verteilung der Weißeinstrahlung
- Verteilung und Anteile von Ferrit und Perlit
- Lokale Vorhersage von Brinell-Härte (HB), Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Elastizitätsmodul

Die Software bietet zudem Möglichkeiten zur virtuellen Versuchsplanung und Optimierung. Damit können über die Optimierung der Gießtechnik hinaus beispielhaft die nachfolgenden modulspezifischen Fertigungsbedingungen als Variablen zur Einstellung robuster Prozess und optimierter Fertigungsbedingungen definiert werden:

- Optimale Größe und Position von Speisern
- Einstellung der geforderten mechanischen Eigenschaften durch Optimierung der Eisenzusammensetzung und der verwendeten Schmelzebehandlung
- Ermittlung der optimalen Eisenzusammensetzung zur Reduzierung der Porositätsneigung
- Untersuchung des Einflusses von Fertigungsschwankungen wie Gießtemperatur und Eisenzusammensetzung auf die Gussteilqualität.

Darüber hinaus können auch die Wärmebehandlungsprozesse Perlitisieren und Ausferritisieren (ADI) für Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) legierungsabhängig berechnet werden. Die Prozessschritte Austenitisieren, Abschrecken und Auslagern können einzeln oder kombiniert definiert werden. Dabei wird das Grundgefüge im Gusszustand (Legierungszusammensetzung, Sphärolitendichte, Ferrit-/Perlitverteilung) berücksichtigt. Die Berechnung der Diffusion beim Austenitisieren, die Vorhersage von Phasenbildung als Funktion der lokalen Abkühlgeschwindigkeit und die isotherme Ausscheidung von Ferrit aus dem Austenit ermöglichen die Prozessoptimierung und Gefügevorschau anhand folgender Ergebnisse:

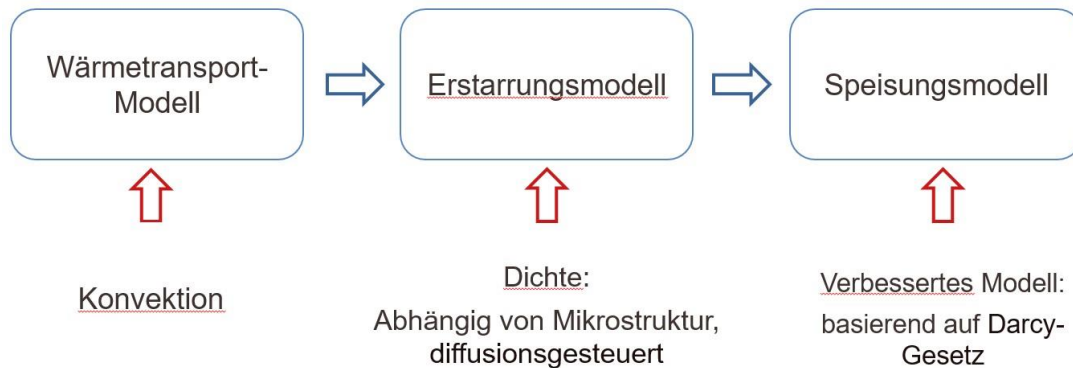
- Lokale Austenitisierungszeiten und Ausferritisierungszeiten
- Verteilung von Ferrit und Perlit nach dem Abschrecken
- Verteilung und Anteile von Ausferrit nach dem Auslagern
- Lokaler Ferritanteil im Ausferrit

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

#### 3.1. Anpassung der Gießsimulation für Si-GJS (AP B18)

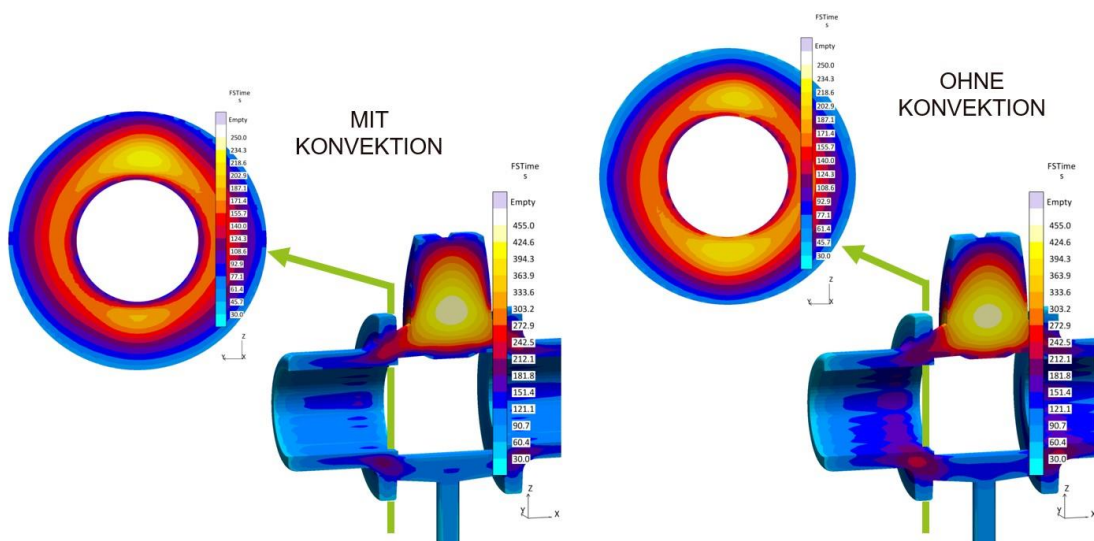
Zur Simulation des Erstarrungsverhaltens von hochsiliziumhaltigen GJS500 werden die bestehenden Modelle in der Simulation erweitert. Hierzu zählt u.a. die Anpassung des bestehenden Speisungsalgorithmus' unter Berücksichtigung der natürlichen Konvektion während der Erstarrung.

##### 3.1.1. Optimierter Speisungsalgorithmus



**Bild 1: Modelle für die Porositätsberechnung**

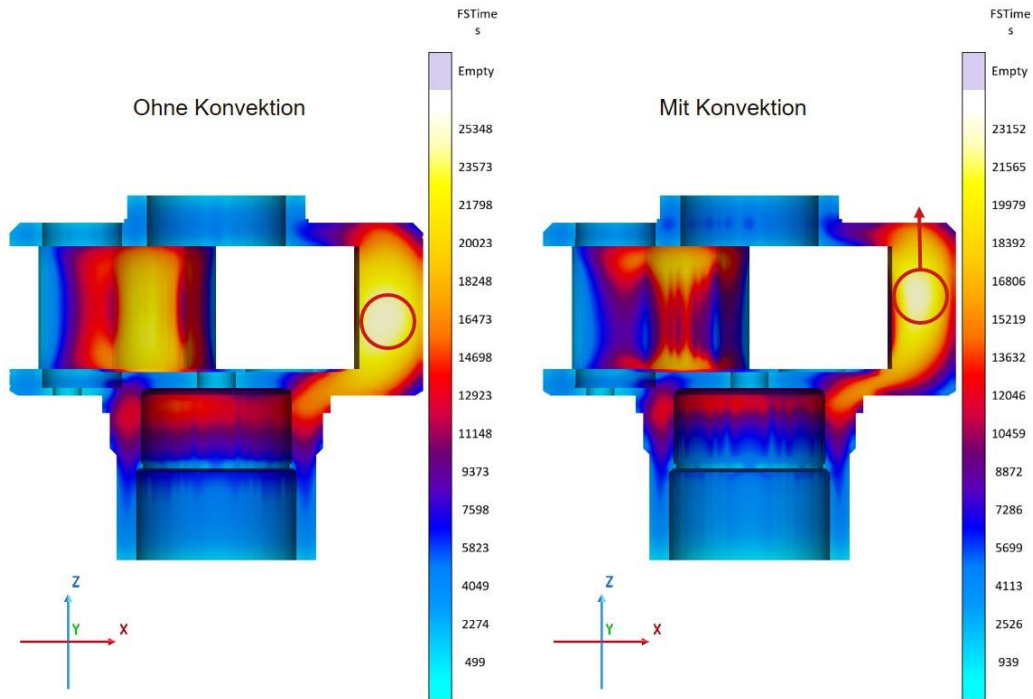
Bild 1 illustriert die unterschiedlichen, modellseitigen Schritte, die notwendig sind, um Porositäten zu berechnen. Die Grundlage bildet das *Wärmetransportmodell*. Entsprechend diesem Modell werden die Temperaturfelder u.a. unter Berücksichtigung der thermophysikalischen Daten der beteiligten Materialien simuliert. Einen wesentlichen Anteil am Wärmetransport, besonders bei großen Gussteilen, hat die natürliche Konvektion. Wärmere, spezifisch leichtere Schmelze strömt nach oben, kältere, spezifisch schwerere nach unten. Diese Konvektionsströmung beeinflusst die Temperaturverteilung während der Erstarrung. Bild 2 zeigt die Unterschiede, links mit Berücksichtigung der Konvektion, rechts ohne.



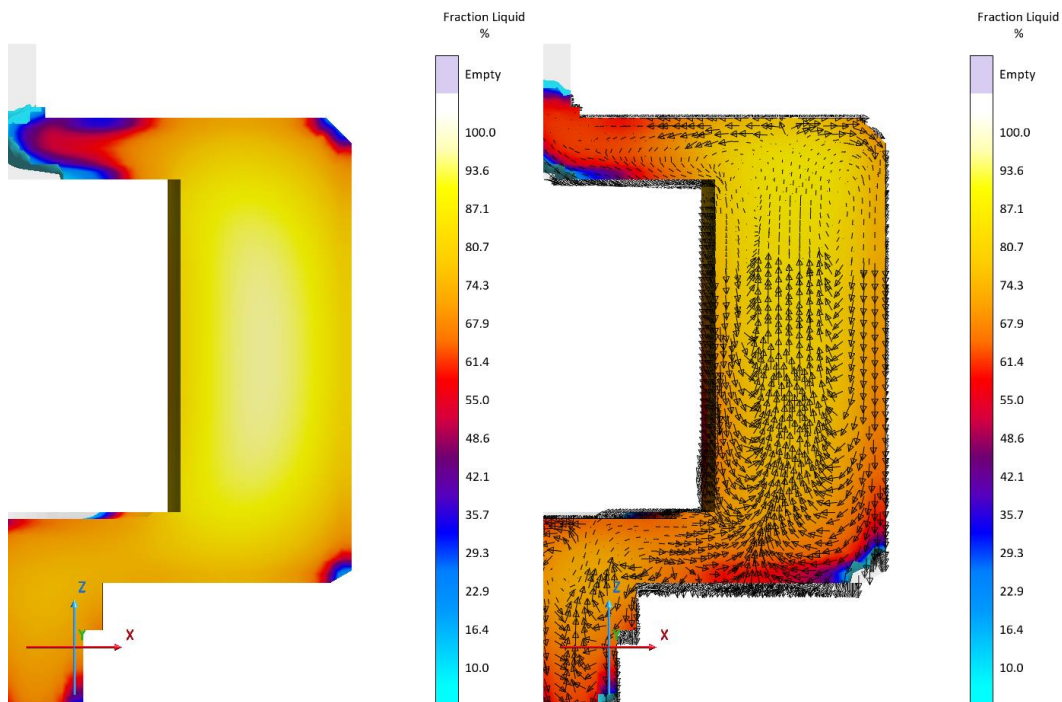
**Bild 2: Temperaturverteilung mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransports**

Der untere Bereich der Nabe (Anschnittbereich) zeigt beim Modell ohne Berücksichtigung der Konvektion eine längere Erstarrungszeit als der obere (Speiserhalsbereich). Beim Modell mit Berücksichtigung der Konvektion hingegen ist der Speiserhalsbereich länger flüssig.

Bild 3 zeigt ebenfalls die Verschiebung des thermischen Zentrums durch die Berücksichtigung der Konvektion am Beispiel des Planetenträgers. In Bild 4 erkennt man die Strömung der Restschmelze während der Erstarrung.

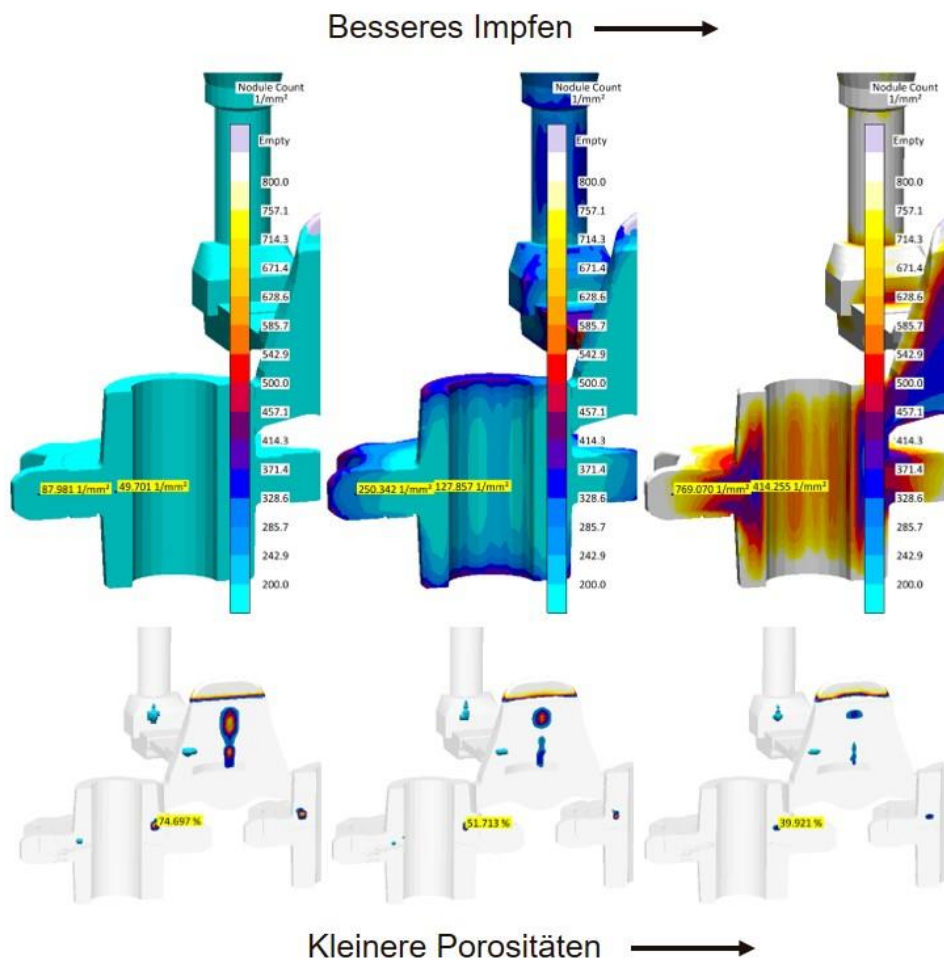


**Bild 3: Lage des thermischen Zentrums unter Berücksichtigung der Konvektion**



**Bild 4: Geschwindigkeitsverteilung während der Erstarrung**

Aufbauend auf der Temperaturverteilung (*Wärmetransportmodell*) wird die Dichte der beteiligten Materialien berechnet (*Erstarrungsmodell*). Im Gegensatz zu anderen Legierungen zeigt Gusseisen eine Besonderheit: Es kann bei der eutektischen Erstarrung unter bestimmten Voraussetzungen zu einer Expansion kommen. Im Allgemeinen geht die Erstarrung immer mit einer Kontraktion einher. Der sich in Form von Graphit ausscheidende Kohlenstoff führt zu dieser Expansion, insofern er die Schwindung der Restschmelze und der anderen eutektischen Phase, Austenit, überkompensieren kann. Das Wachstum des Graphits ist diffusionsgesteuert und hängt u.a. von der Sphärolithendichte (Graphitkugeln pro  $\text{mm}^3$  bzw.  $\text{mm}^2$ ) ab. Die Kugelzahl (Sphärolithendichte) ihrerseits wird im Wesentlichen durch die Impfwirksamkeit und die lokale Abkühlgeschwindigkeit bestimmt, die wiederum ebenfalls das diffusionsgesteuerte Wachstum beeinflusst. Bild 5 zeigt den Zusammenhang zwischen Impfen und Porosität.

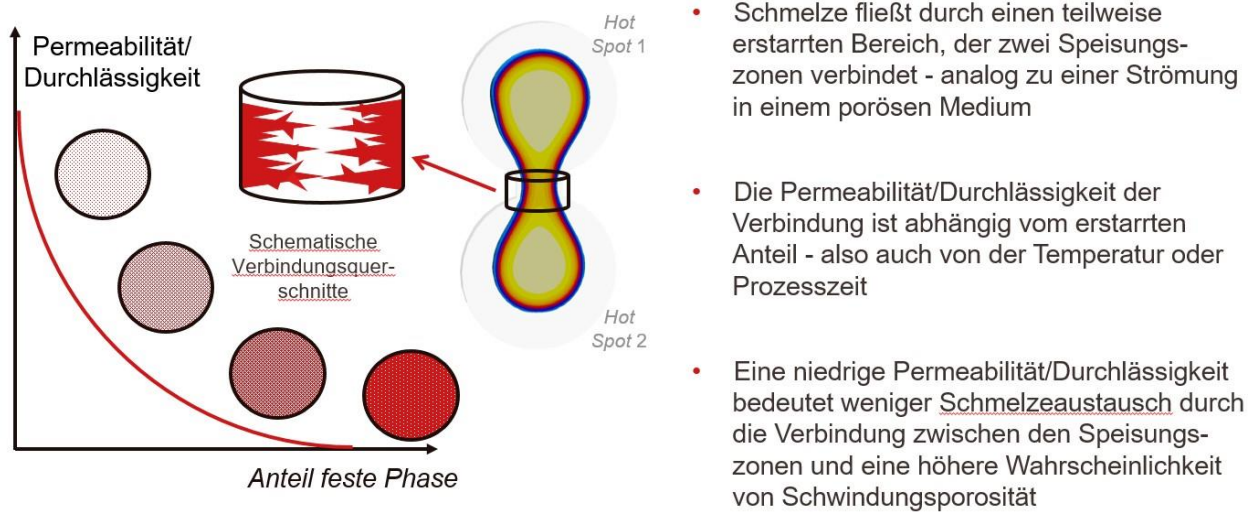


**Bild 5: Einfluss des Impfens auf die Porosität**

Neben der Implementierung der Konvektion in das *Wärmetransportmodell* und der verbesserten Berücksichtigung der Graphitexpansion in Abhängigkeit der Impfwirksamkeit (*Erstarrungsmodell*) ist das neue *Speisungsmodell* das Herz der optimierten Porositätsvorhersage.

Kommt es bei der Erstarrung zu einem Volumendefizit in Bereichen des Gussteils, so muss dieses durch Speisung (Materialtransport) ausgeglichen werden, sonst entstehen Porositäten. Dabei fließt noch flüssiges oder teilflüssiges Material aus höhergelegenen Bereichen in die Zone der Schwindung. Der neue Speisungsalgorithmus berücksichtigt diesen Materialtransport in Abhängigkeit des metallostatistischen und atmosphärischen

Druckes und der „Permeabilität“/„Durchlässigkeit“ der Speisungswege. Bild 6 zeigt dies schematisch.



**Bild 6: Materialtransport (Speisung) während der Erstarrung**

### 3.1.2. Ermittlung von Korrelationen zwischen Gefüge und Werkstoffeigenschaften

Um die Gefügevorschau zu optimieren, werden die Randbedingungen für die Formfüllung und Erstarrung angepasst, damit die Temperaturverläufe möglichst nahe an der Realität liegen. Erst dann kann eine Modifizierung der Simulationsparameter für die Gefügevorschau erfolgen. Die dafür verwendete Modellplatte mit den Würfelproben besteht aus 7 Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm, 2 Würfeln mit einer Kantenlänge von 300 mm und einem Würfel mit einer Kantenlänge von 500 mm. Das entspricht folgenden Modulen (geometrischen Modulen):

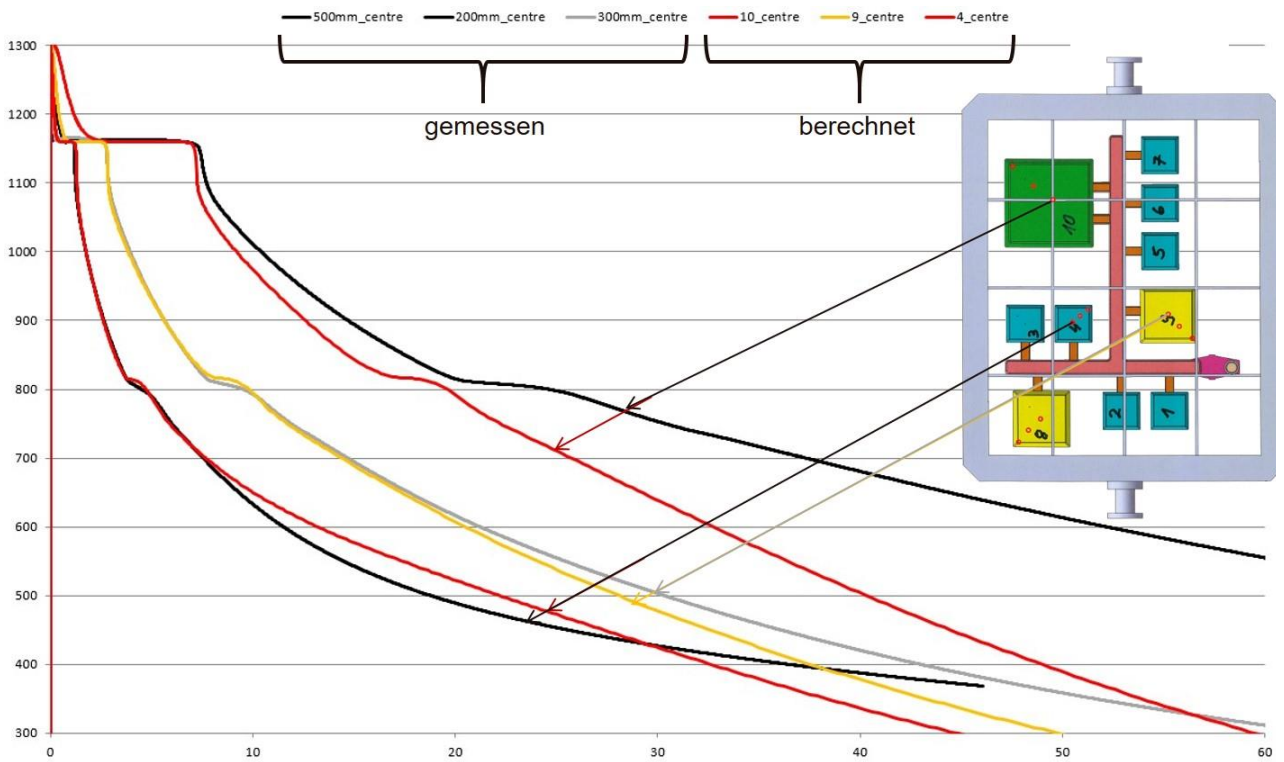
- 200 mm	3,3 cm
- 300 mm	5 cm
- 500 mm	8,3 cm

Die Bilder 7 und 8 zeigen die gemessenen und simulierten Temperaturverläufe der Würfelproben.

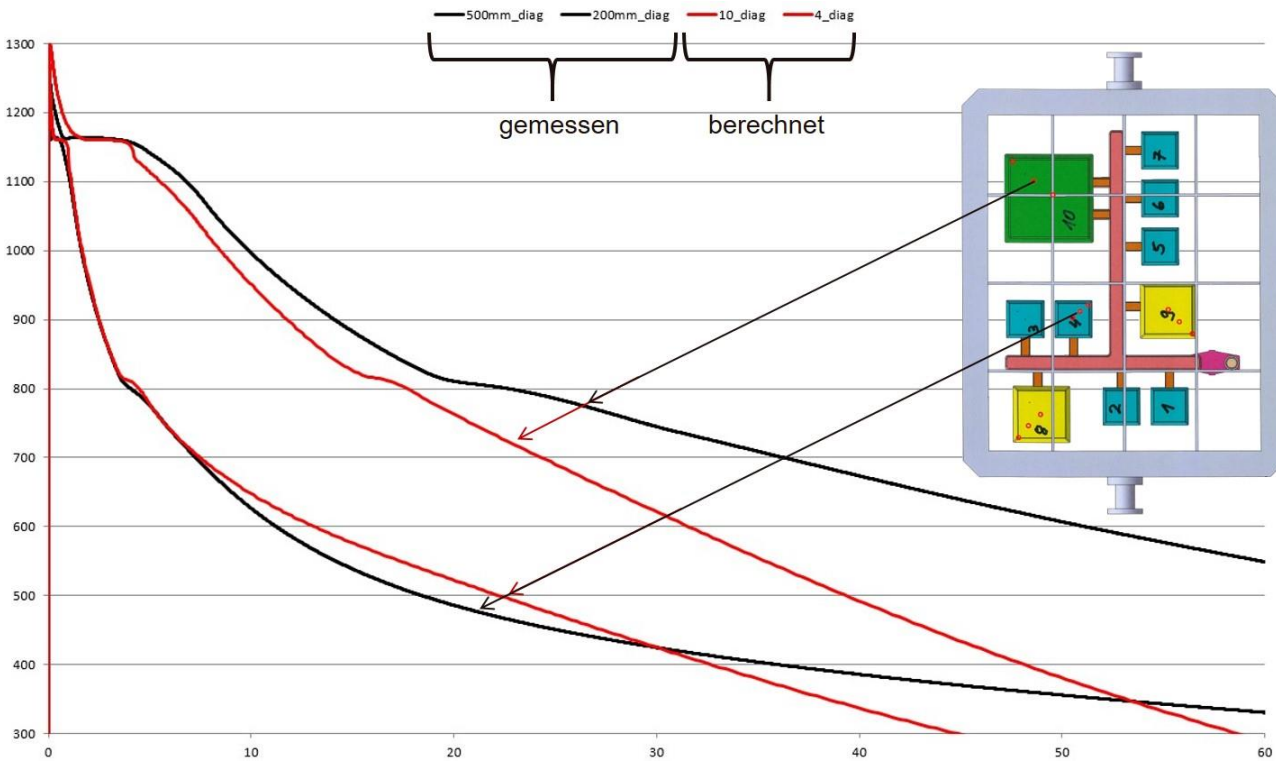
Die Übereinstimmung der simulierten Kurven mit den gemessenen ist beim 200er und 300er Würfel sehr gut. Beim großen Würfel (500er) laufen die Kurven nach der Erstarrung mit fallender Temperatur auseinander. Da dies für die Mitte als auch den Punkt auf dem  $\frac{1}{4}$  der Raumdiagonalen zutrifft, liegt die Vermutung nahe, dass beim Fixieren der Thermoelemente die geplante Position nicht ganz erreicht wurde.

In einem zweiten Schritt werden die Impfparameter in der Simulation der realen Situation angepasst. Das Gussgefüge (bei stabiler Erstarrung, Grauerstarrung) ist im Wesentlichen charakterisiert durch Austenit und in ihm eingelagerten Graphit in kugelförmiger Form. Die Anzahl der Graphitkugeln hängt in erster Linie vom Impfen und den lokalen Abkühlgeschwindigkeiten ab. Bild 9 zeigt den Vergleich simulierter mit gemessenen Sphärolithendichten.

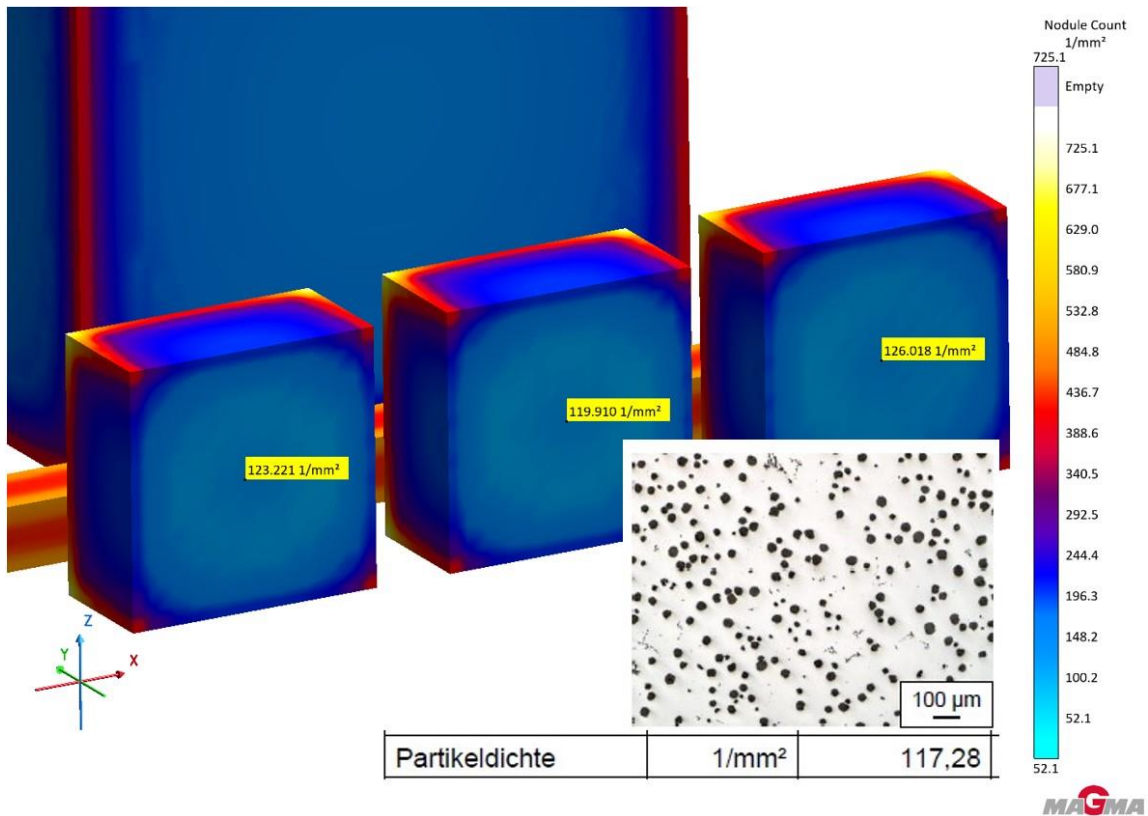
Die Simulation der mechanischen Eigenschaften erfolgt dann basierend auf den zuvor ermittelten Randbedingungen unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung des GJS 500-14.



**Bild 7: Gemessene und simulierte Temperaturverläufe im Zentrum der Würfelproben**

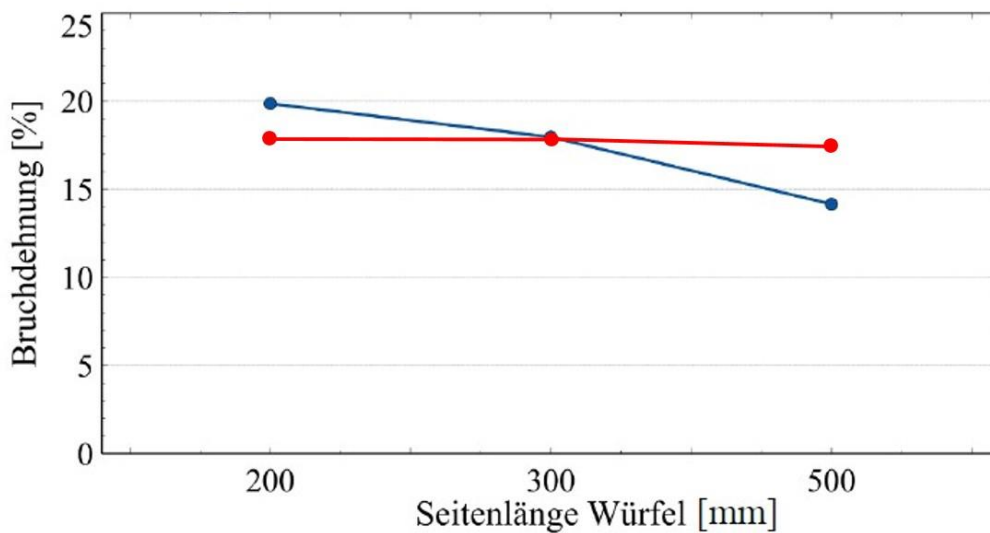


**Bild 8: Gemessene und simulierte Temperaturverläufe im 1/4 der Raumdiagonalen der Würfelproben**

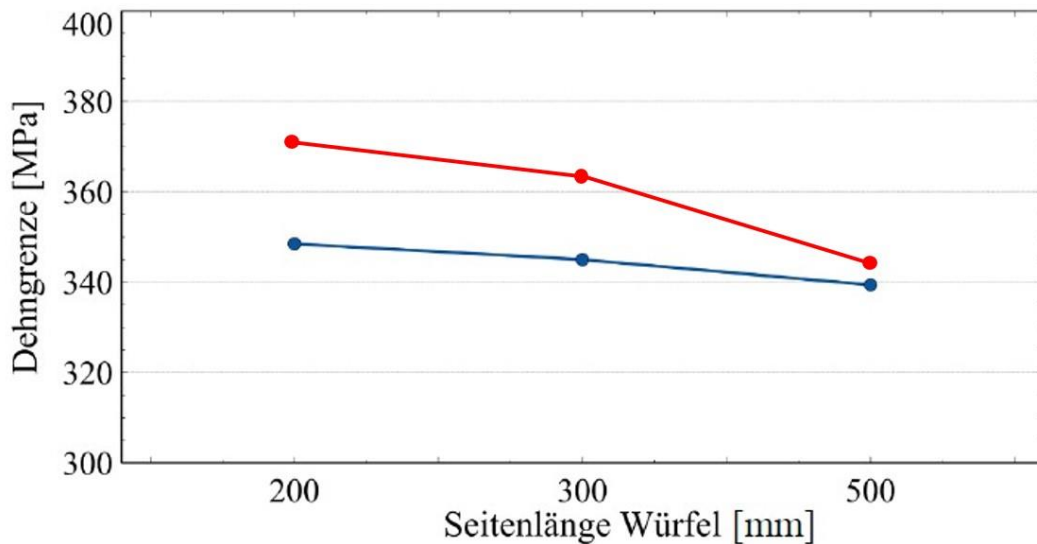


**Bild 9: Vergleich simulierter mit gemessenen Kugelzahlen**

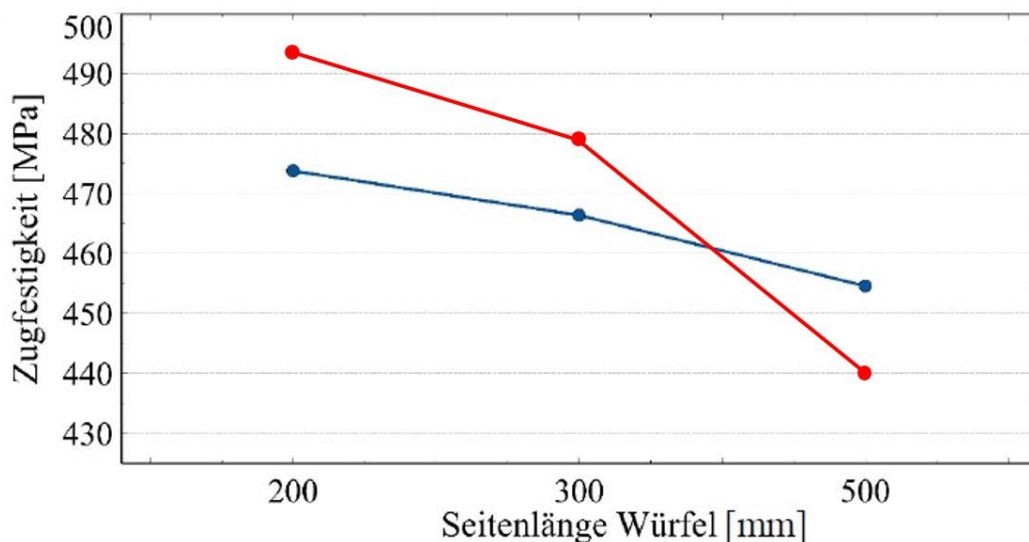
Die Bilder 10 bis 12 zeigen den Vergleich der simulierten mit den gemessenen mechanischen Eigenschaften.



**Bild 10: Simulierte (rot) und gemessene (blau) Bruchdehnungen**



**Bild 11: Simulierte (rot) und gemessene (blau) Dehngrenzen**



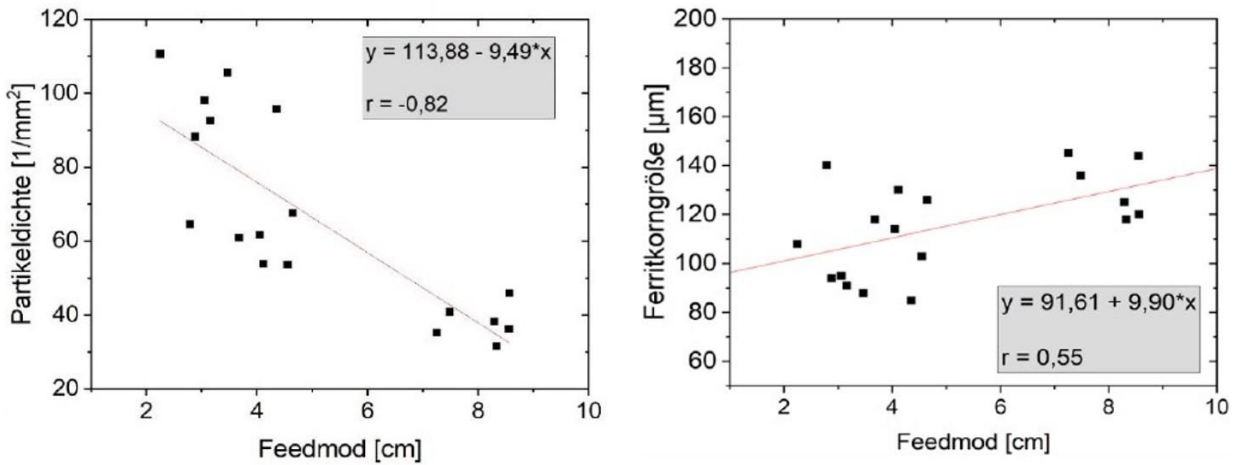
**Bild 12: Simulierte (rot) und gemessene (blau) Zugfestigkeiten**

Nach Donelan-Frenz sind die Zugfestigkeit und Streckgrenze u.a. von der Ferritkorngröße abhängig. Die Untersuchungen an den Würfelproben ergaben einen Zusammenhang zwischen dem thermischen Modul (Feedmod) und der Graphitkugeldichte sowie der Ferritkorngröße (Bild 13). Des Weiteren hängt die Ferritkorngröße  $d_{ferrite}$  von der lokalen Abkühlgeschwindigkeit bei der Umwandlung des Austenits in Ferrit ab, die wiederum in erster Näherung gut durch die Zeit bis zum Erreichen von 780 °C beschrieben werden kann. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$d_{ferrite} = 132.99\mu m + 0.000197 t_{cool} - 0.379 n_{pc}$$

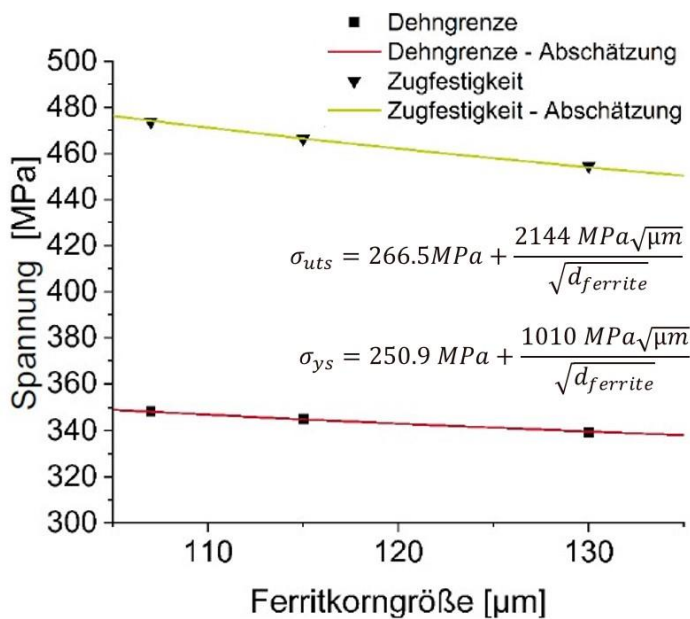
mit

$t_{cool}$ , Abkühlzeit bis zum Erreichen von 780 °C  
 $n_{pc}$ , Sphärolithendichte (Graphitkugeln pro mm<sup>2</sup>)



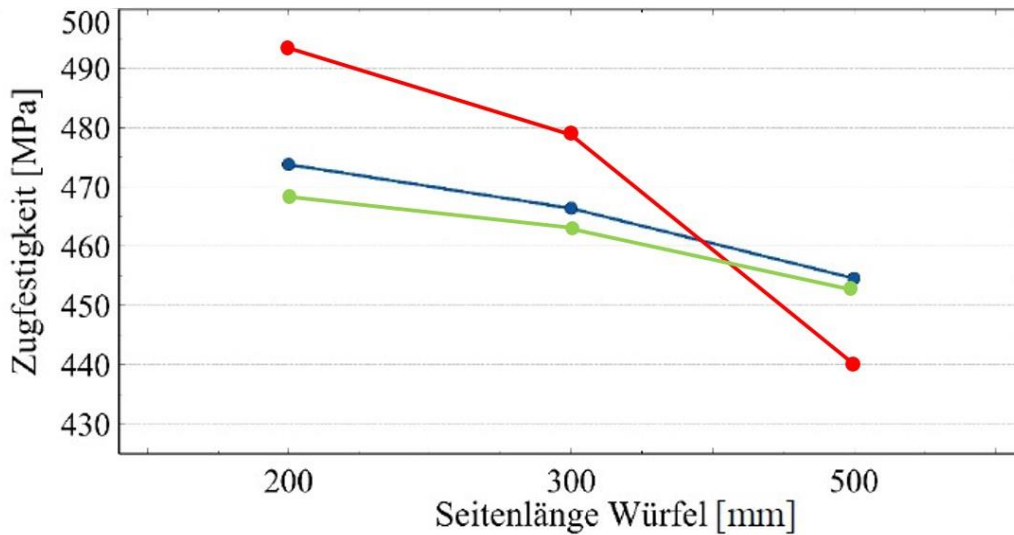
**Bild 13: Zusammenhang zwischen Kugelanzahl, Ferritkorngröße und thermischer Modul**

Die experimentell ermittelten mechanischen Eigenschaften und Ferritkorngrößen in den Würfelmitten sind in Bild 14 dargestellt. Über die durch die Simulation verfügbaren Größen „Abkühlzeit bis 780 °C“ und „Graphitkugelzahl“ können jetzt die mechanischen Eigenschaften berechnet werden.

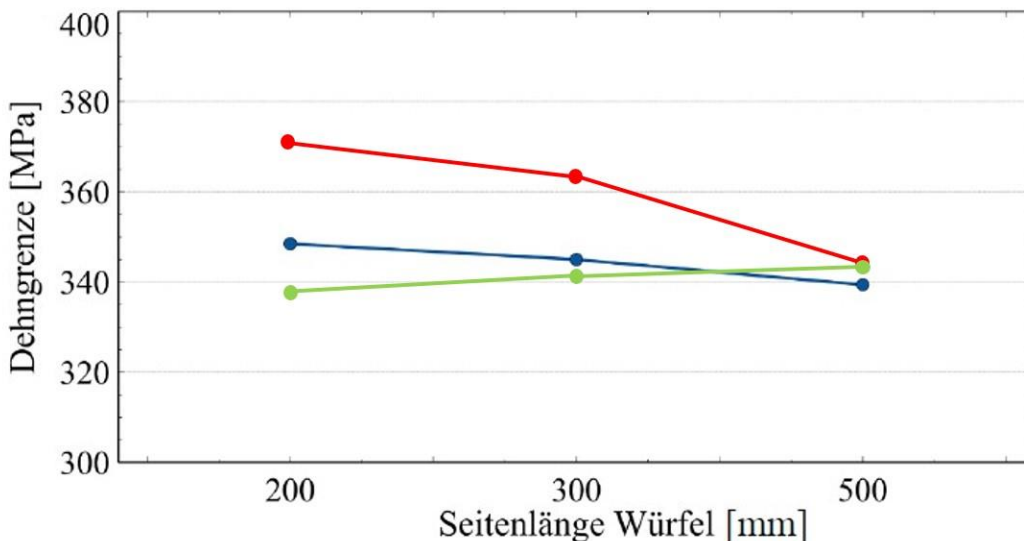


**Bild 14: Mechanische Eigenschaften und Ferritkorngröße**

Die simulierten Eigenschaften sind in den Bildern 15 und 16 dargestellt. Die grünen Kurven zeigen die Ergebnisse aus den zuvor beschriebenen Erkenntnissen.



**Bild 15: Simulierte (rot und grün) und gemessene (blau) Zugfestigkeiten**



**Bild 16: Simulierte (rot und grün) und gemessene (blau) Dehngrenzen**

### 3.2. Abgleich der Simulation mit einem realen Gussteil (AP D4)

Die optimierte Eigenschaftsvorhersage soll an einem realen Bauteil überprüft werden. Dazu wird eine in der Höhe reduzierte Rotorhohlwelle abgegossen. Bild 17 zeigt die Probenentnahmestelle. Der Vergleich der simulierten mit den gemessenen Sphärolithendichten (Graphitkugelzahlen) zeigt eine gute Übereinstimmung (Bild 18).

Bild 19 zeigt die gemessenen Werte für Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung. Die mittleren Werte für die Zugfestigkeit betragen:

486 MPa kokillenseitig, 477 MPa in der Mitte und 456 MPa kernseitig

Und für die Streckgrenze:

375 MPa kokillenseitig, 374 MPa in der Mitte und 372 MPa kernseitig

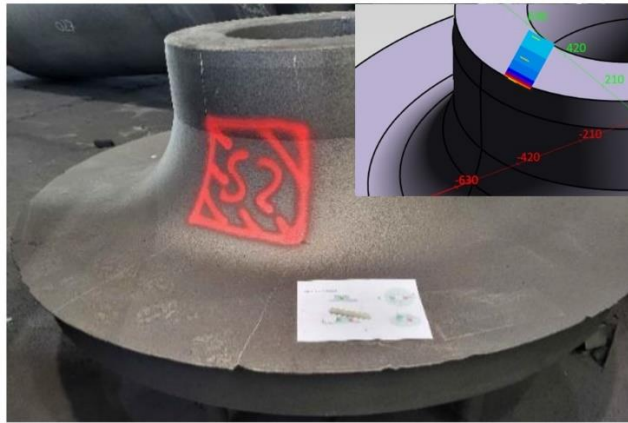


Bild 17: Probenentnahmestelle an der Rotorhohlwelle

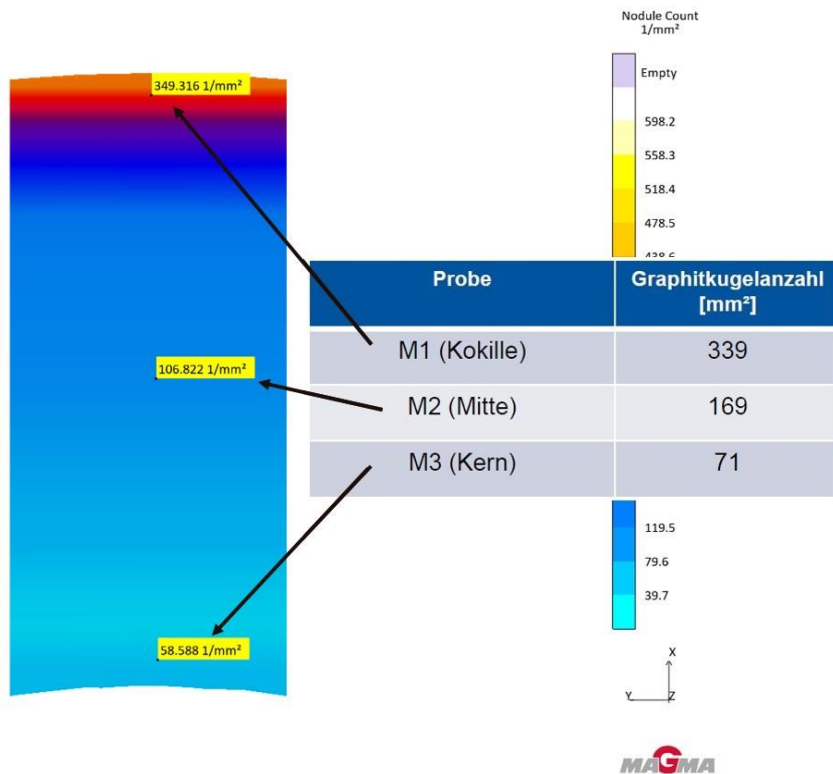


Bild 18: Vergleich der simulierten mit den gemessenen Kugelzahlen

	Probennummer	Rp 0.2 [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	At [%]
Kokille	31	379,84	489,53	20,79
	32	372,02	487,88	19,55
	33	367,53	478,47	20,14
	34	380,59	489,64	21,67
	35	376,23	487,6	19,54
Mitte	21	375,02	478,83	17,94
	22	375,87	481,14	16,81
	23	364,44	467,11	14,91
	24	374,82	479,26	17,05
	25	377,66	480,99	16,98
Kern	11	377,74	468,8	9,96
	12	364,75	380,74	1,38
	13	370,65	432,32	5,82
	14	371,09	459,79	13,05
	15	372,73	464,08	11,97

Bild 19: Gemessene Werte für Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung

Bild 20 zeigt die simulierten Werte für Zugfestigkeit und Streckgrenze.

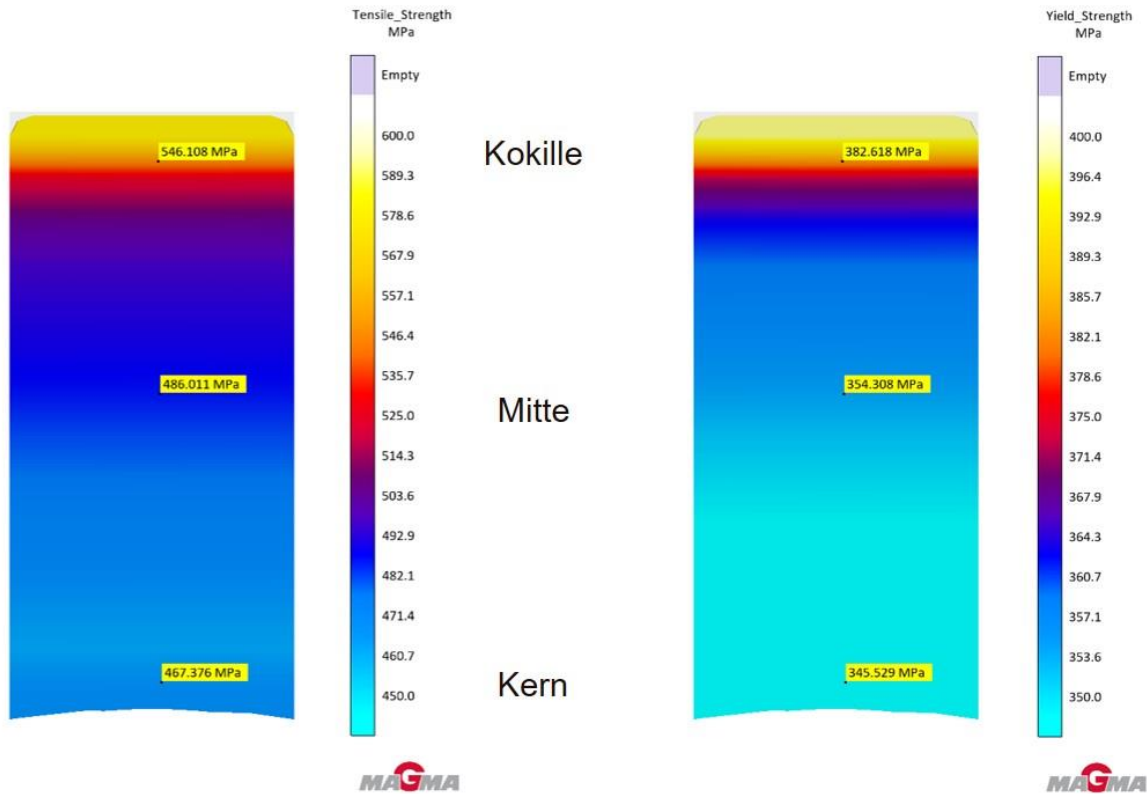


Bild 20: Simulierte Werte für Zugfestigkeit (links) und Streckgrenze (rechts)

### 3.3. Vorhersage der Dauerfestigkeit von GJS 500-14 (AP C23)

Die Bilder 21 bis 23 zeigen die ermittelten Wöhlerkurven für den GJS 500-14.

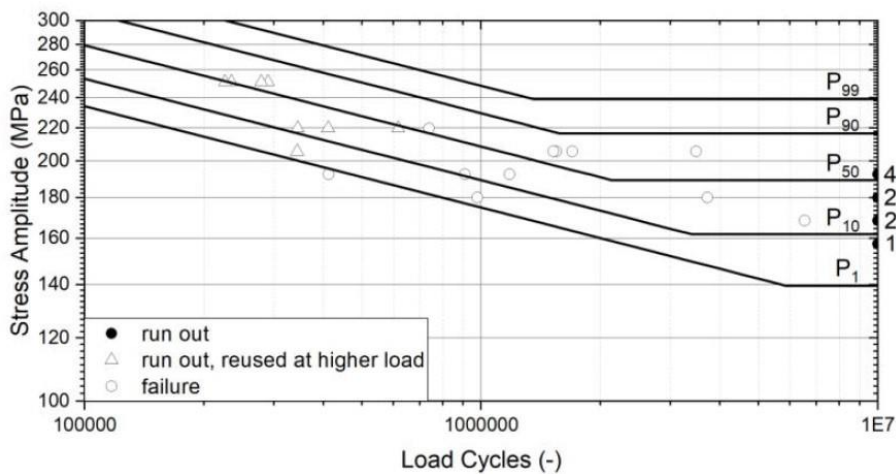
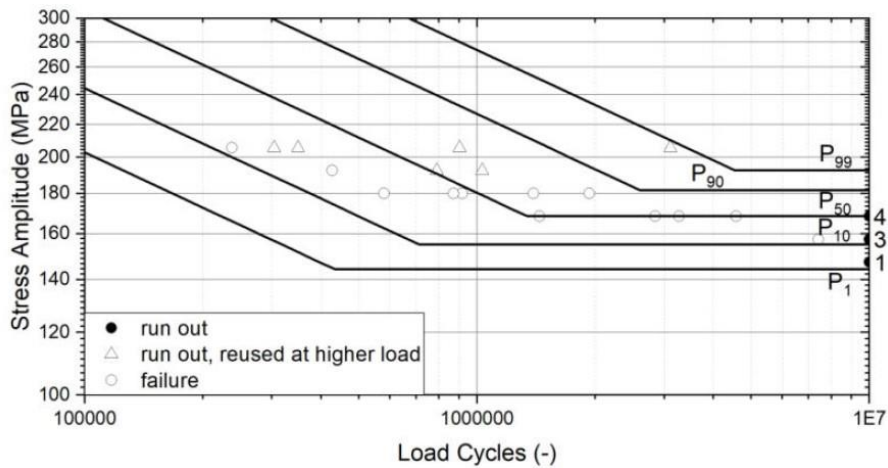
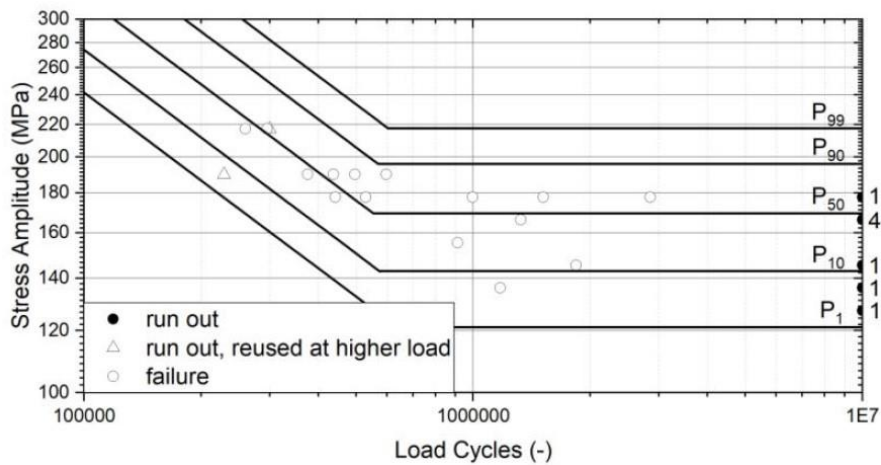


Bild 21: Wöhlerdiagramm (R=-1, Kerbformzahl ~ 1,0) für GJS 500-14 mit Proben aus dem Würfel mit Gießmodul 3,3 cm



**Bild 22: Wöhlerdiagramm (R=-1, Kerbformzahl ~ 1,0) für GJS 500-14 mit Proben aus dem Würfel mit Gießmodul 5,0 cm**



**Bild 23: Wöhlerdiagramm (R=-1, Kerbformzahl ~ 1,0) für GJS 500-14 mit Proben aus dem Würfel mit Gießmodul 8,3 cm**

Bild 24 zeigt die daraus ermittelten Dauerfestigkeiten für die unterschiedlichen Wandstärken.

Güte	Gießmodul	R = -1
		K <sub>t</sub> = 1,0
EN-GJS-500-14	3,3 cm	189 MPa
	5,0 cm	168 MPa
	8,3 cm	169 MPa

**Bild 24: Dauerfestigkeiten für unterschiedliche Wandstärken für GJS 500-14 bei 50% Bruchwahrscheinlichkeit**

Diese Information (modulabhängige Dauerfestigkeit) wird in MAGMAIron implementiert. Die Bilder 25 und 26 zeigen exemplarisch die lokalen Dauerfestigkeiten für die Drehmomentstütze und die Rotorhohlwelle.

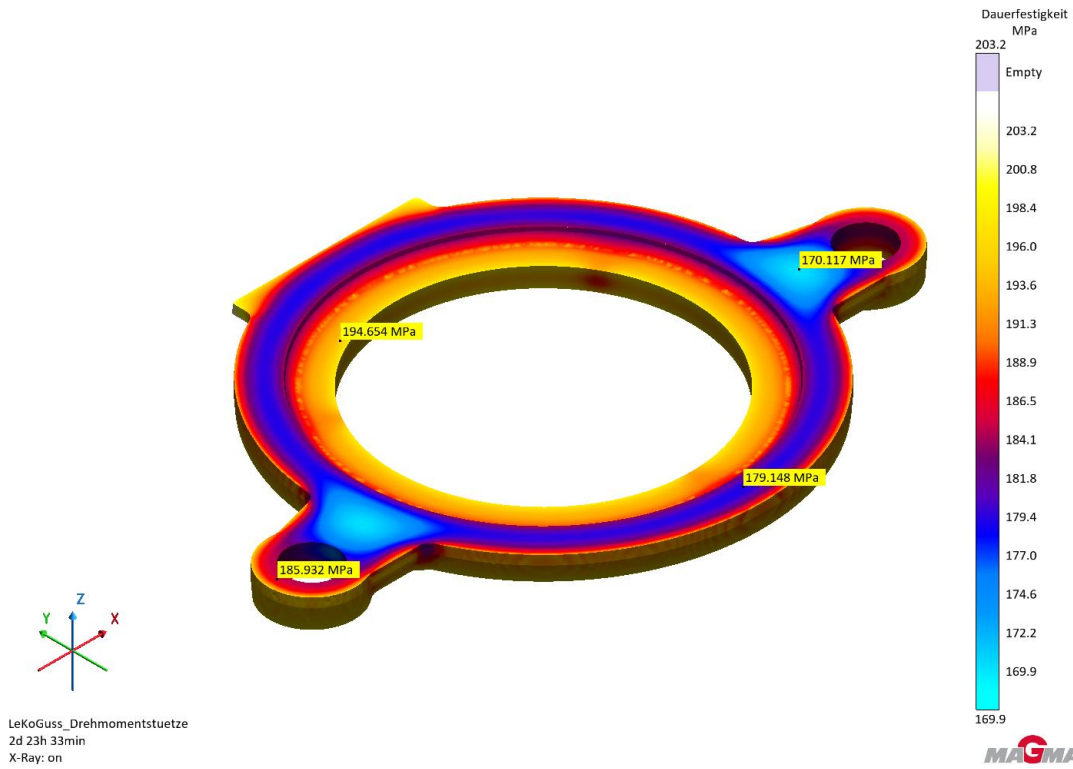


Bild 25: Lokale Dauerfestigkeiten

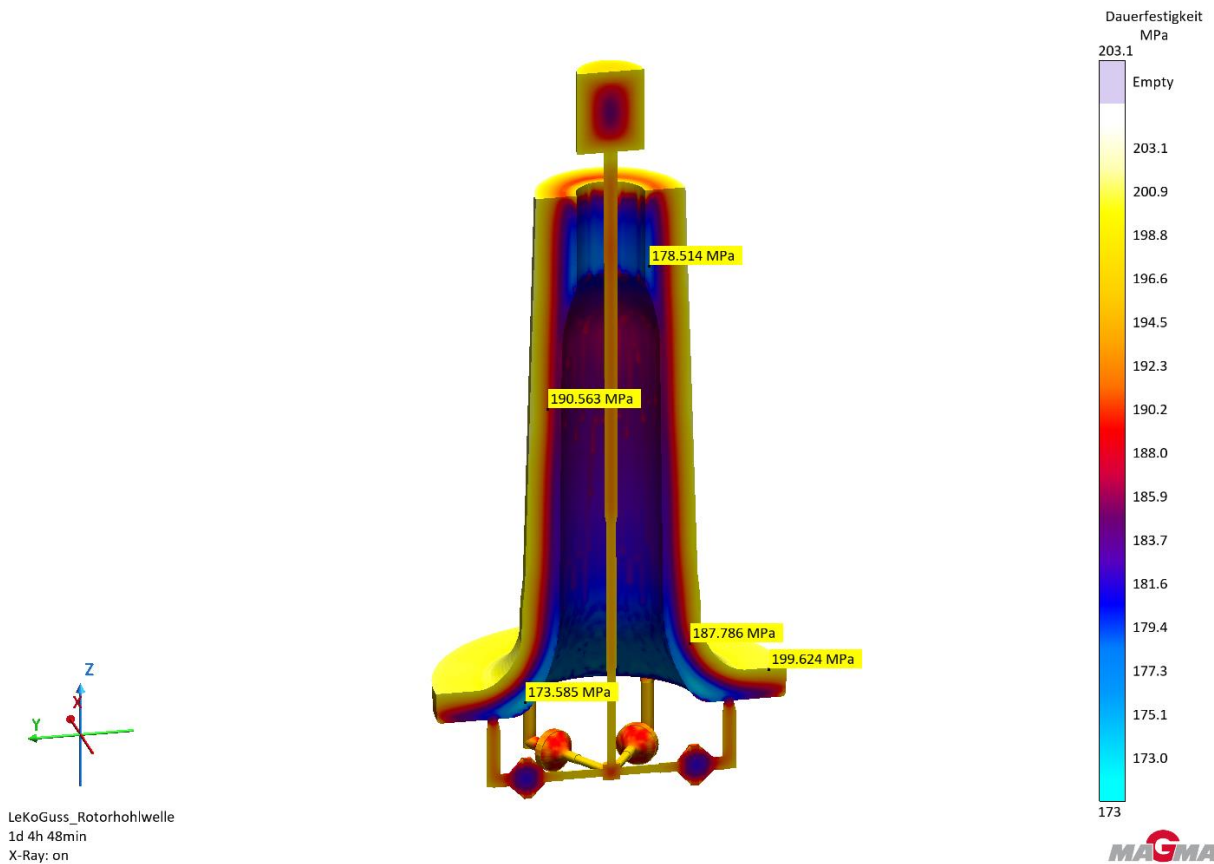


Bild 26: Lokale Dauerfestigkeiten

### 3.4. Kopplung von Gefüge und Eigenschaften für ADI Bauteile

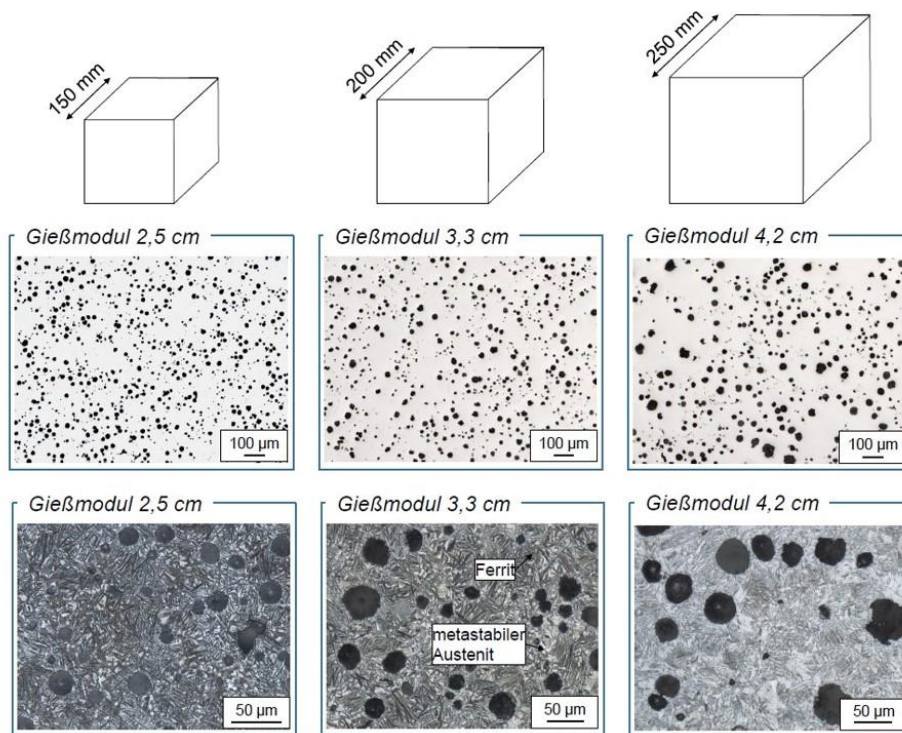
Die wesentliche Aufgabe in diesem Arbeitspaket besteht in der Korrelation der Ergebnisse aus der Simulation der Wärmebehandlung mit mechanischen (statisch und dynamisch) Bauteileigenschaften. Hierzu müssen lokale Eigenschaften nach der Wärmebehandlung für die ausgewählten ADI Qualitäten gemessen werden.

Bild 27 zeigt die Gefüge nach einer ADI-Wärmebehandlung eines GJS 1050-6 für unterschiedliche Probengrößen bei folgender Analyse:

C = 3,2%  
 Si = 2,0%  
 Mn = 0,32%  
 Cu = 0,8%  
 Ni = 1,99%  
 Mo = 0,34%

Die Austenitisierungstemperatur betrug 880 °C und die Auslagerungs-, Ausferritierungstemperatur 320 °C. Die sich ergebenden Eigenschaften sind in Bild 28 zu sehen.

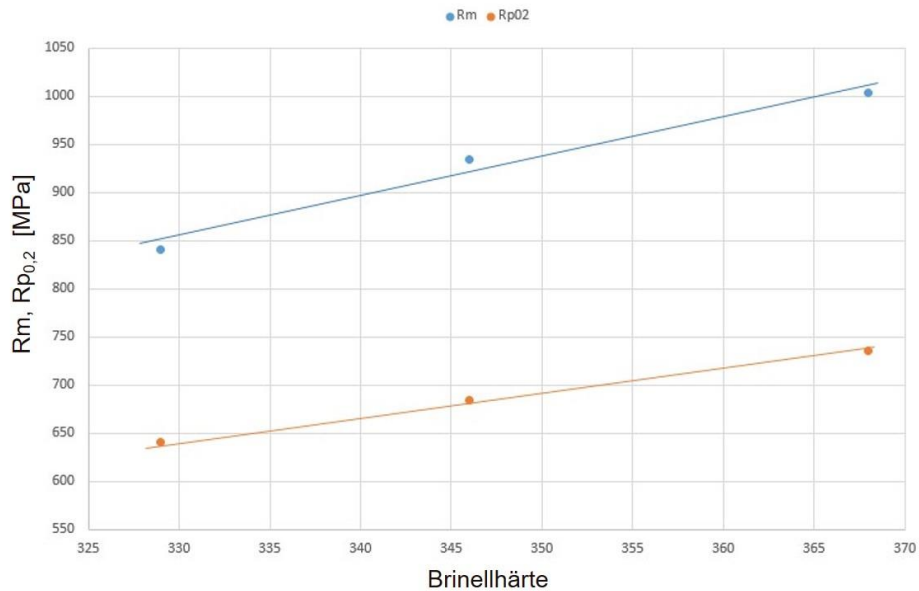
Trägt man die Zugfestigkeit und die Streckgrenze über der Härte auf, dann ergibt sich annähernd ein linearer Zusammenhang (Bild 29).



**Bild 27: Gefüge nach der Wärmebehandlung für unterschiedliche Probengrößen**

	Gießmodul		
	2,5	3,3	4,2
Rm	1003	934	840
Rp <sub>0,2</sub>	736	684	641
HB	368	346	329

**Bild 28: Mechanische Eigenschaften nach der Wärmebehandlung**



**Bild 29: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit, Streckgrenze und Härte**

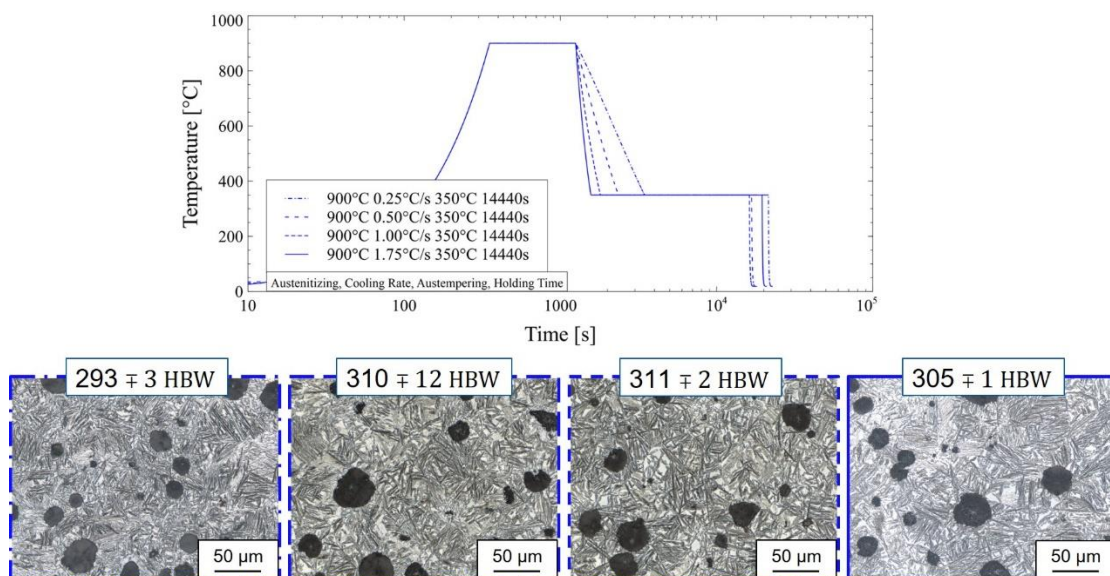
Die Zugfestigkeit und die Streckgrenze lassen sich in guter Näherung durch folgende Formeln beschreiben:

$$R_m = -478,25 + (4,05 * HB)$$

$$R_{p0,2} = -226,95 + (2,63 * HB)$$

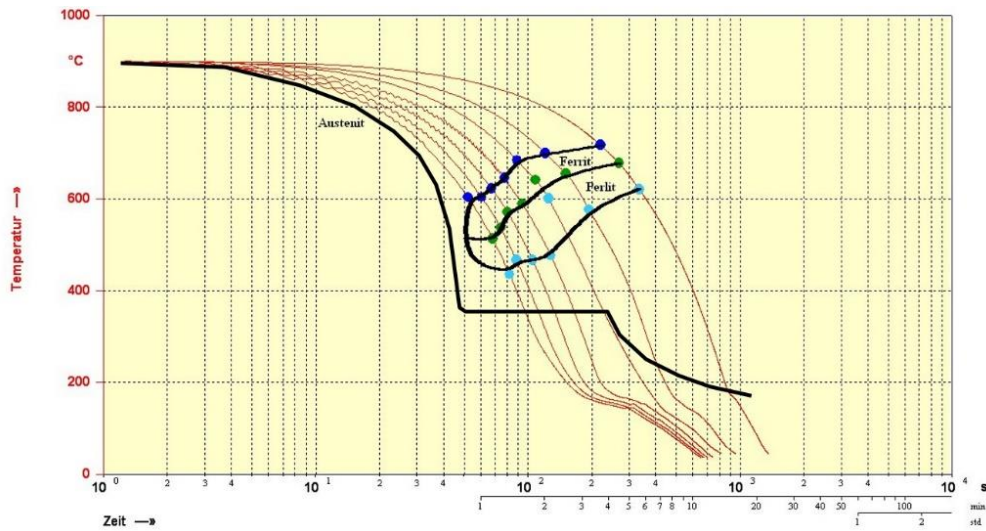
Der Einfluss verschiedener Parameter der Wärmebehandlung auf Gefüge und Eigenschaften (Härte) wurde systematisch untersucht. Das Probenmaterial wurde jeweils aus der Mitte des 200 mm Würfels genommen.

Zuerst wird die Abschreckgeschwindigkeit geändert. Bild 30 zeigt die unterschiedlichen Gefüge und die dazugehörigen Messwerte der Härte.



**Bild 30: Gefüge und mech. Eigenschaften (Härte) für unterschiedliche Abschreckgeschwindigkeiten**

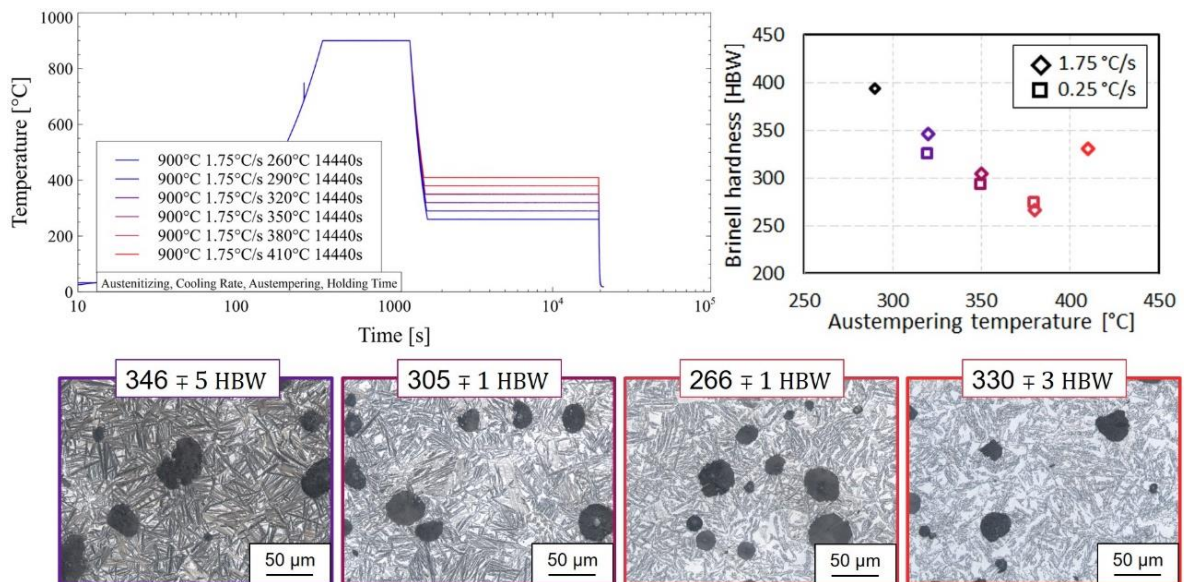
Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Auch die kleinste Abkühlgeschwindigkeit (0,25 °C/s) führt an der Perlitnase vorbei und es wird kein, oder nur sehr wenig, Perlit oder/und Ferrit ausgeschieden. D.h. der gesamte metastabile Austenit steht für die Ausferritierung zur Verfügung (Bild 31).



**Bild 31: Abkühlkurve bei der Wärmebehandlung (schematisch)**

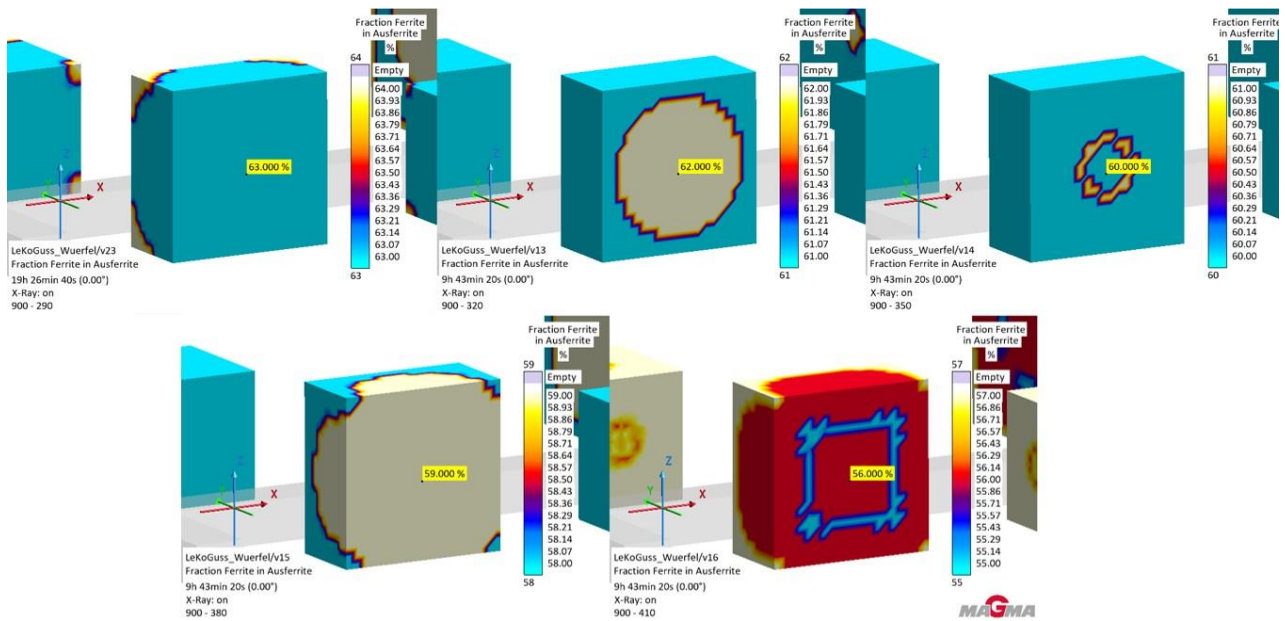
In einem zweiten Versuch wird die Ausferritierungstemperatur bei ansonsten gleichbleibenden Parametern verändert.

Hier erkennt man deutliche Unterschiede, sowohl im Gefüge als auch in den Härtewerten (Bild 32). Der Anteil an nadeligem Ferrit sinkt mit steigender Temperatur.



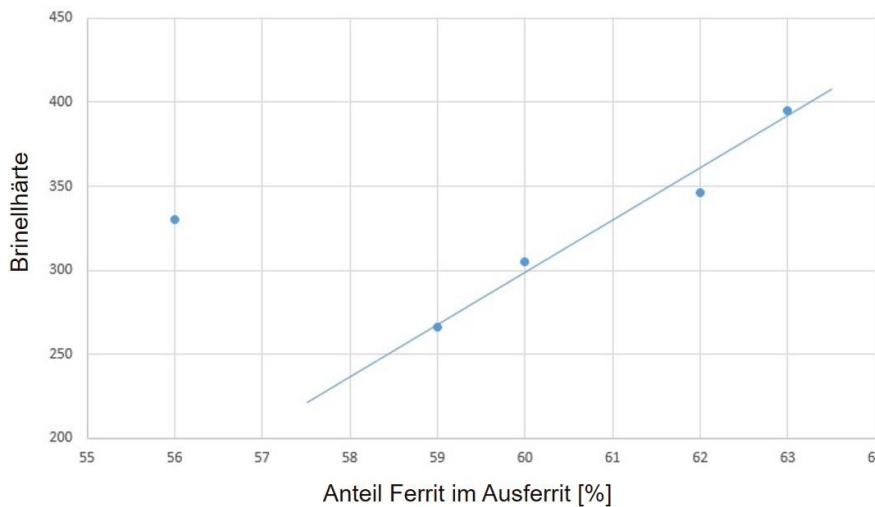
**Bild 32: Gefüge und mech. Eigenschaften (Härte) für unterschiedliche Ausferritierungstemperaturen**

Auch in der Simulation wird dies abgebildet (Bild 33).



**Bild 33: Anteil an Ferrit im Ausferrit für unterschiedliche Ausferritisierungstemperaturen (290, 320, 350, 380 und 410 °C)**

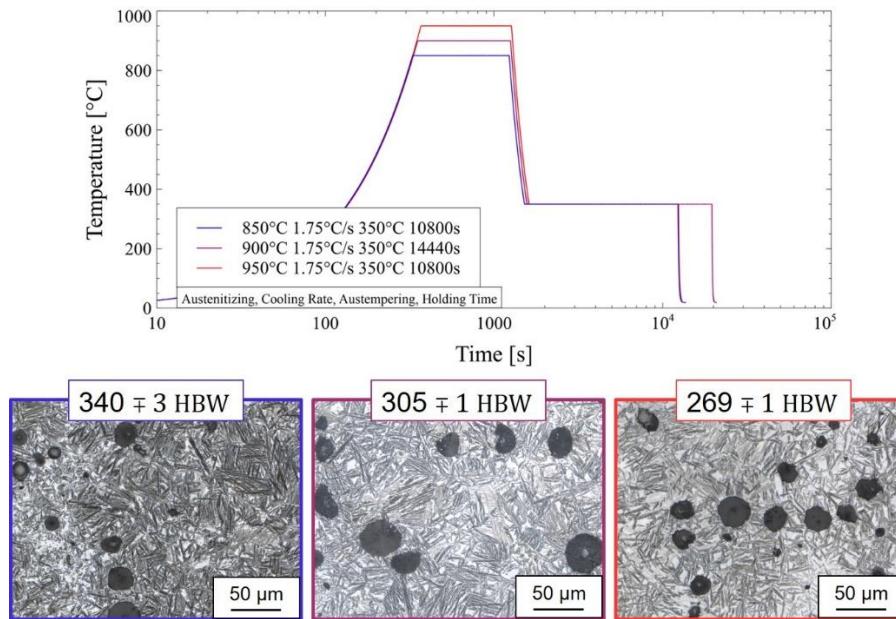
Erstaunlich ist die gemessene Härte für die Probe mit 410 °C Ausferritisierungstemperatur. Obwohl auch der Ferrit selber nicht so nadelig erscheint und der Anteil geringer ist, ist sie höher als bei z.B. 350 oder 380 °C! Ein möglicher Grund für den starken und auch relativ abrupten Anstieg der Härte konnte nicht gefunden werden.



**Bild 34: Brinellhärte über Anteil Ferrit im Ausferrit für unterschiedliche Ausferritisierungstemperaturen**

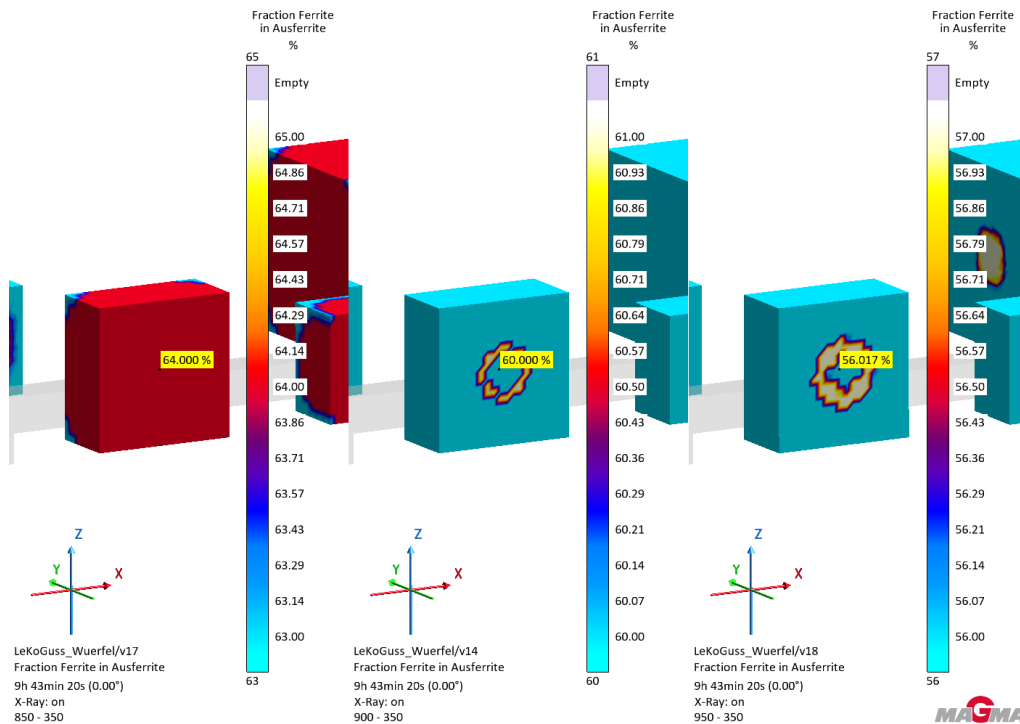
Bis zu einer Ausferritisierungstemperatur von 380 °C folgen die Werte einem linearen Zusammenhang (Bild 34).

In einem weiteren Versuch wird die Austenitierungstemperatur verändert. Bild 35 zeigt die jeweiligen Gefüge und Härtewerte für Austenitierungstemperaturen von 850, 900 und 950 °C.

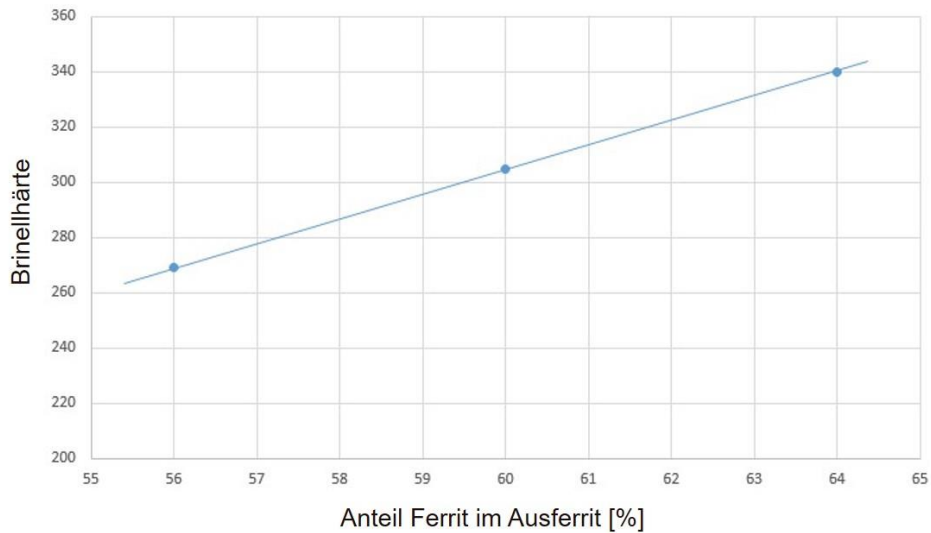


**Bild 35: Gefüge und mech. Eigenschaften (Härte) für unterschiedliche Austenitisierungstemperaturen**

Die dazugehörigen, simulierten Anteile an Ferrit zeigt Bild 36. Auch hier gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen Anteil Ferrit und der Brinellhärte (Bild 37).

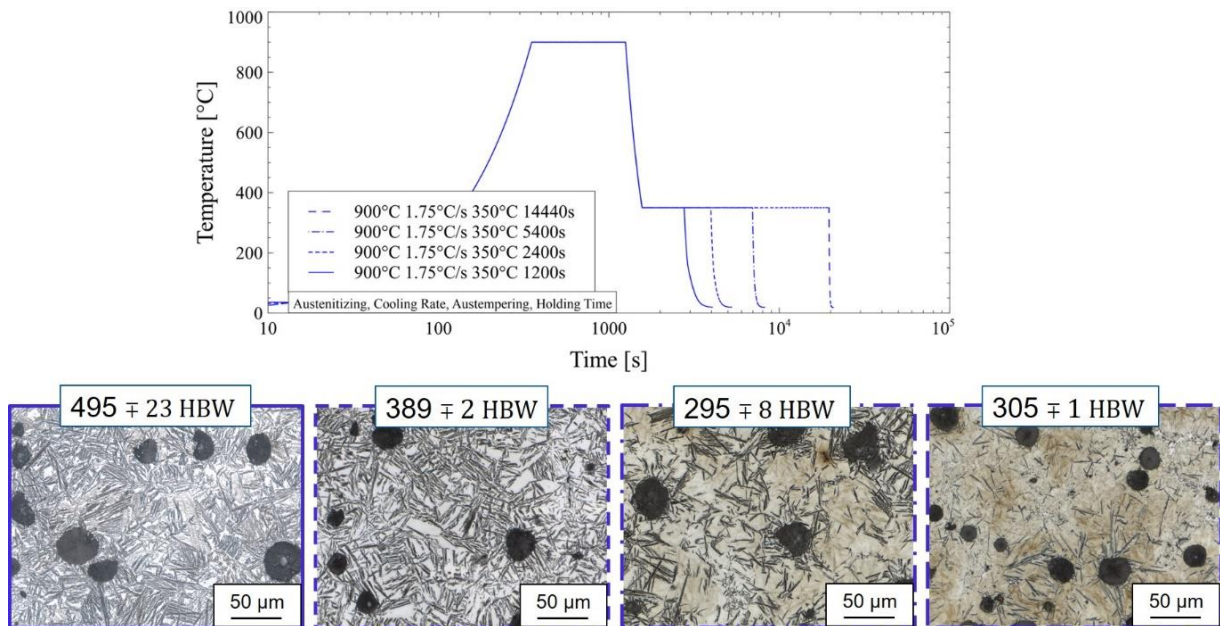


**Bild 36: Anteil an Ferrit im Ausferrit für unterschiedliche Austenitisierungstemperaturen (850, 900 und 950 °C)**

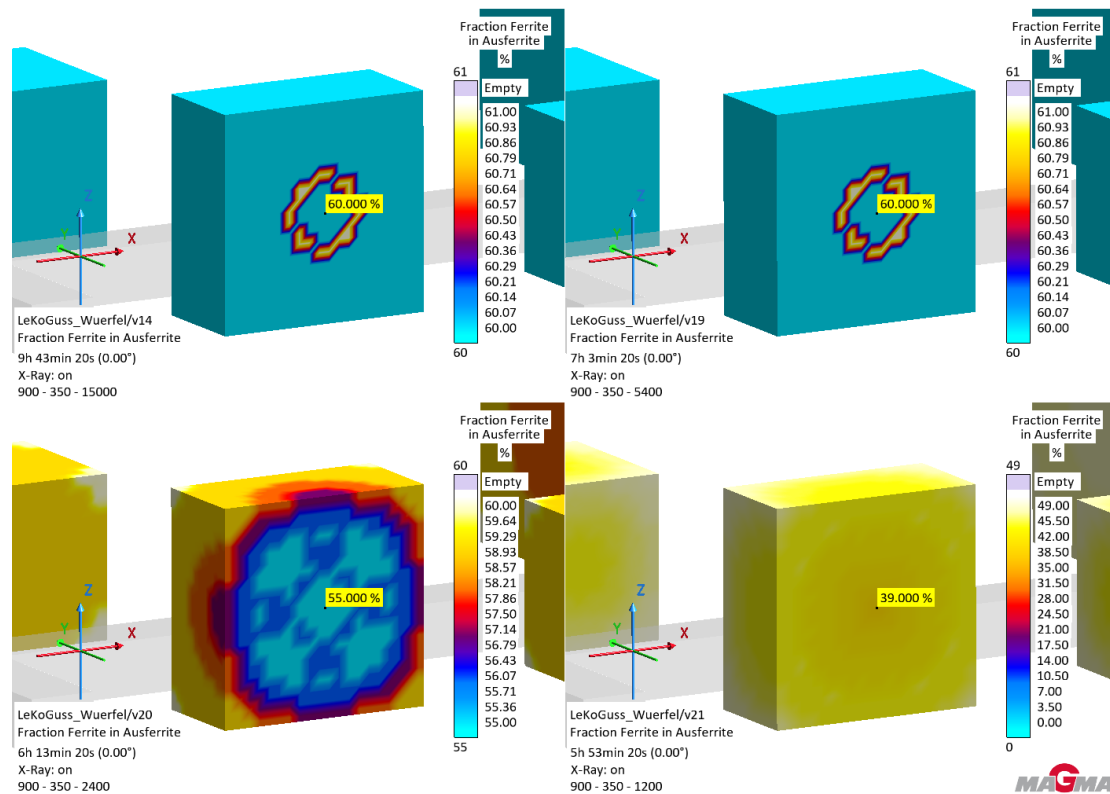


**Bild 37: Brinellhärte über Anteil Ferrit im Ausferrit für unterschiedliche Austenitierungstemperaturen**

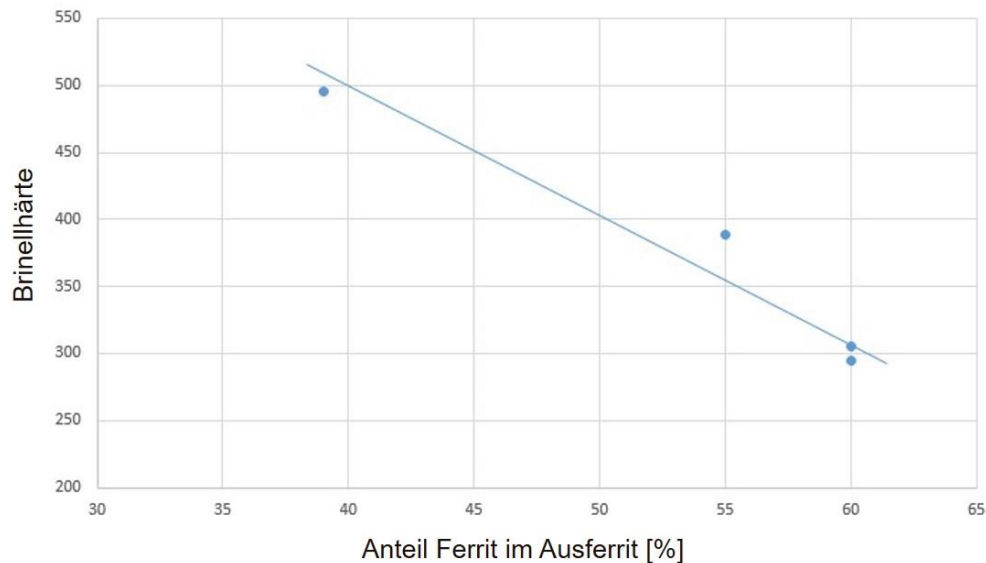
Als letzter Parameter wird die Ausferritisierungszeit untersucht. Dabei ergeben sich folgende Zusammenhänge (Bild 38). Mit steigender Ausferritisierungszeit fällt die Härte stark ab und ist bei 5400 s und 14400 s auf einem annähernd gleichen Wert. Mit steigender Ausferritisierungszeit nimmt der Anteil an Ferrit im Ausferrit zu und ist auch hier bei 5400 s und 14400 s gleich (Bild 39). Bild 40 zeigt die Brinellhärte über dem Anteil Ferrit. Es ergibt sich ein umgekehrter Zusammenhang, mit steigendem Ferritanteil sinkt die Härte.



**Bild 38: Gefüge und mech. Eigenschaften (Härte) für unterschiedliche Ausferritisierungszeiten**

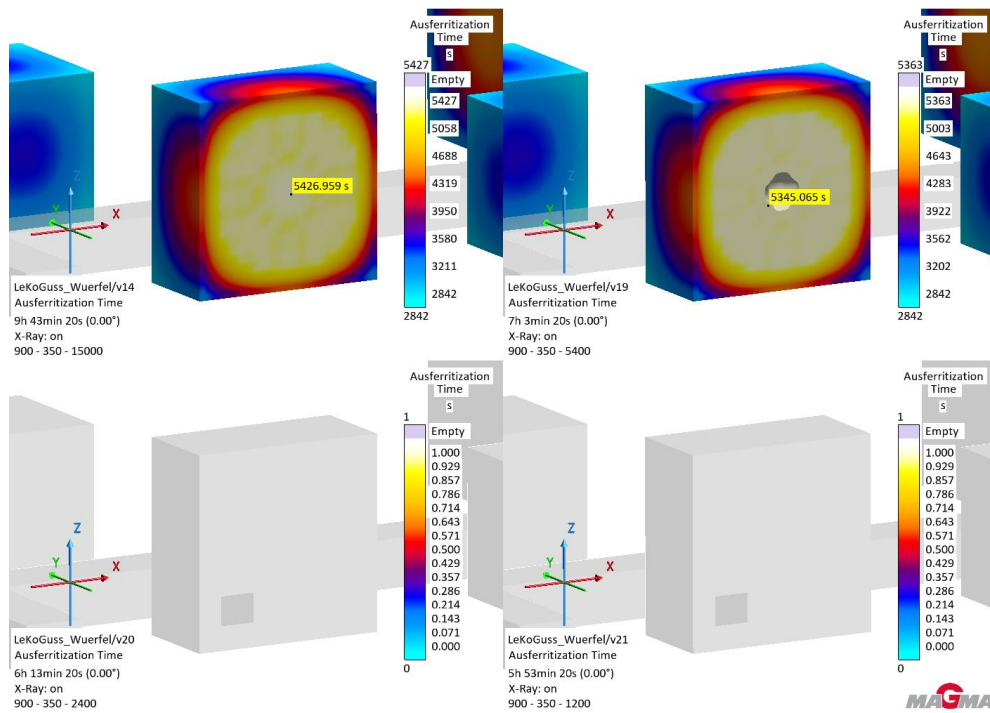


**Bild 39: Anteil an Ferrit im Ausferrit für unterschiedliche Ausferritisierungszeiten (1200, 2400, 5400 und 15000 s)**



**Bild 40: Brinellhärte über Anteil Ferrit im Ausferrit für unterschiedliche Ausferritisierungszeiten**

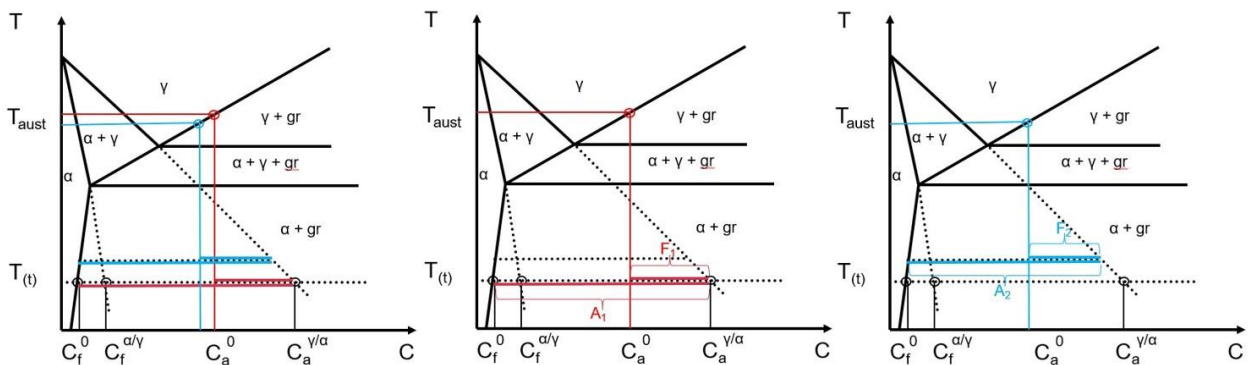
Bild 41 verdeutlicht, dass die simulierte Ausferritisierungszeit, also die Zeit, nach der der metastabile Austenit an Kohlenstoff gesättigt ist (stabil ist) und sich kein nadeliger Ferrit mehr ausscheidet, bei ca. 5400 s liegt. Wird die Ausferritisierung abgebrochen bevor diese Zeit erreicht ist, wandelt sich der metastabile Austenit im weiteren Verlauf der Abkühlung in Bainit oder sogar Martensit um. Das erklärt die hohen Härtewerte besonders bei 1200 s.



**Bild 41: Ausferritierungszeit**

Das Gefüge und die Härte hängen vom Anteil Ferrit im Ausferrit ab. Allerdings ist der Volumenanteil nicht der einzige Parameter, der die Härte beeinflusst. Vergleicht man die Härtewerte bei einem Ferritanteil von 56% in Bild 34 und 37, so existieren große Unterschiede, unabhängig davon ob man den gemessenen oder den extrapolierten Wert in Bild 34 zum Vergleich heranzieht. Das liegt an den unterschiedlichen Wachstumstemperaturen des nadeligen Ferrits und den damit verbundenen unterschiedlichen Gehalten an Legierungselementen.

Bild 42 zeigt das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm mit den Linien für zwei unterschiedliche Austenitisierungs- und Ausferritierungstemperaturen (links) und die jeweiligen Hebel/An-teile (mitte, rechts). Der Anteil an nadeligem Ferrit ist in beiden Fällen gleich, da die Quotienten  $F/A$  gleich sind.



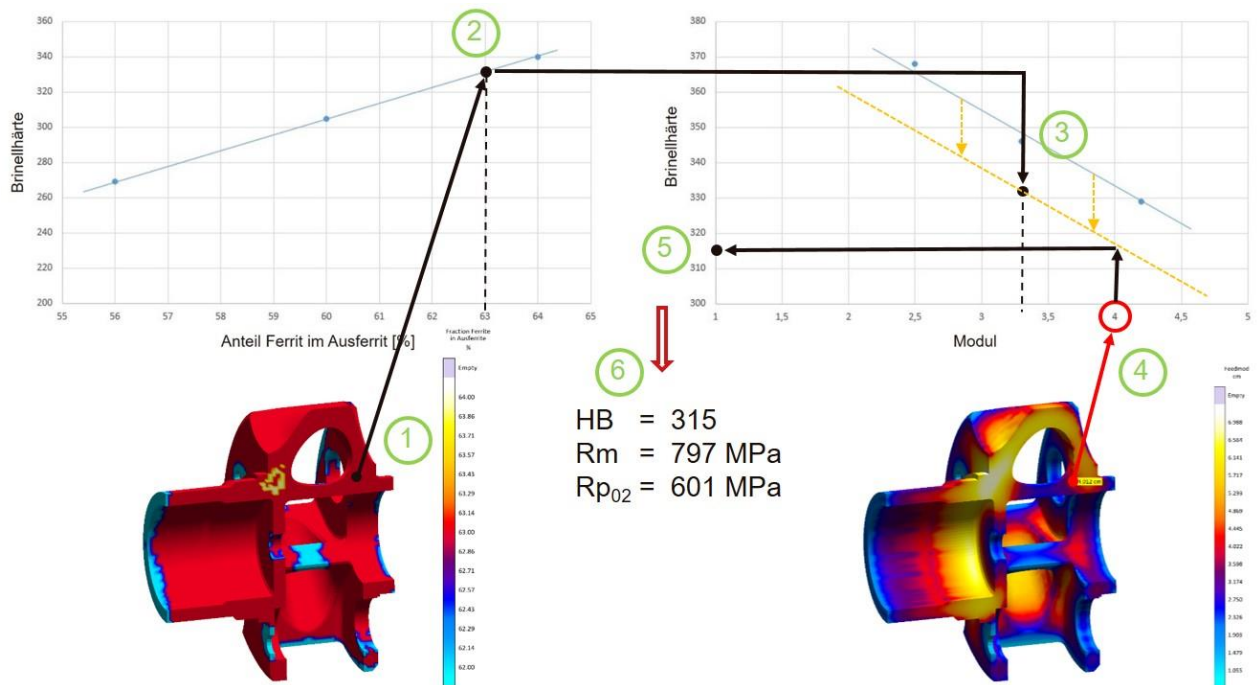
**Bild 42: Anteile an nadeligem Ferrit für zwei unterschiedliche Austenitisierungs- und Ausferritierungstemperaturen**

Eine weitere Einflussgröße ist die Struktur der Ferritnadeln (grob/fein), die u.a. von der lokalen Abkühlgeschwindigkeit des Gussteils beim Erstarren und vom daraus resultierenden Gussgefüge abhängt (z.B. Anzahl eutektische Zellen).

Um eine Vorhersage zum Gefüge (Anteil nadeliger Ferrit) und zu den mechanischen Eigenschaften (HB, Rm, Rp02) zu treffen, kann wie folgt vorgegangen werden. Voraussetzung ist die vollständige Unterdrückung von Perlit und/oder Ferrit beim Abschrecken, also eine vollständig austenitische Matrix beim Auslagern/Ausferritisieren sowie eine ausreichend lange Ausferritisierungszeit, um den Austenit an Kohlenstoff zu sättigen und zu stabilisieren:

Unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung und der Wärmebehandlungsparameter, wird der Anteil an nadeligem Ferrit mit Hilfe der Simulation berechnet. Mit dieser Information kann, entsprechend der vorliegenden Untersuchung, auf die Härte in einem 200 mm Würfel (Modul 3,3 cm) geschlossen werden (z.B. Bild 37). Über die Abhängigkeit der Härte vom Modul kann nun die entsprechende Härte für eine beliebige Stelle im Gussteil (entsprechend des lokalen Moduls) bestimmt werden. Bild 43 zeigt schematisch die Vorgehensweise.

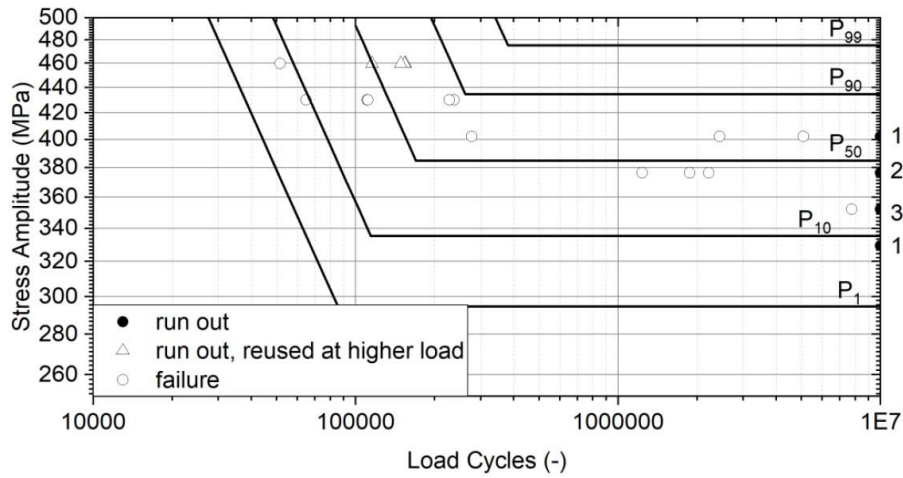
Ist die Härte für die entsprechende Gussteilpartie unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung und der Wärmebehandlungsparameter bestimmt, kann gemäß Bild 29 mit den daraus folgenden Formeln die Zugfestigkeit und Streckgrenze berechnet werden.



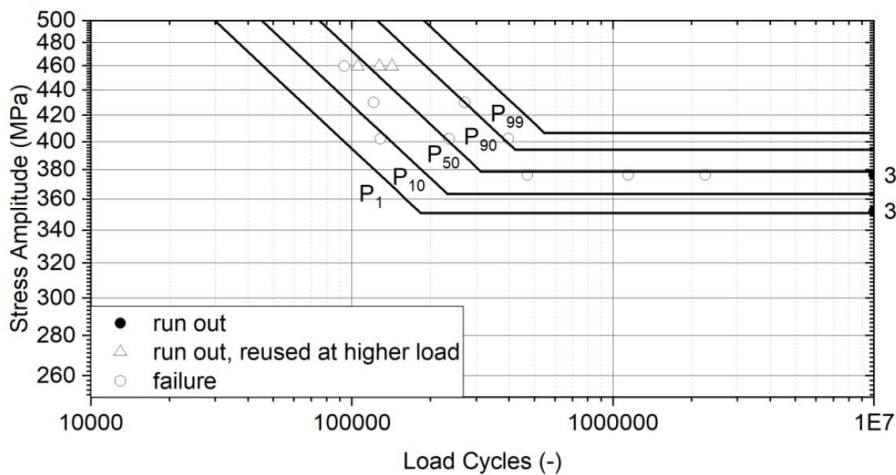
**Bild 43: Berechnung von Gefüge und Eigenschaften unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung und Wärmebehandlungsparameter**

### 3.5. Vorhersage der Dauerfestigkeit von ADI (AP C23)

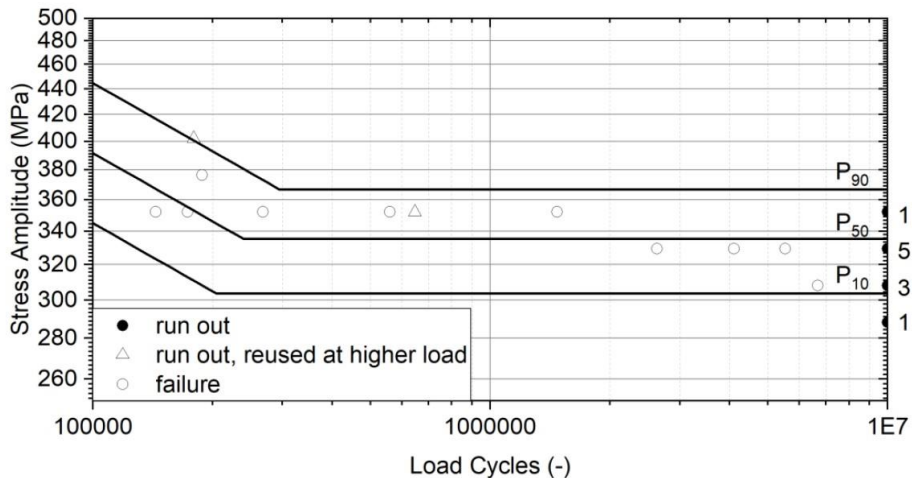
Die Bilder 44 bis 46 zeigen die ermittelten Wöhlerkurven für den GJS 1050-6.



**Bild 44: Wöhlerdiagramm (R=-1, Kerbformzahl ~ 1,0) für GJS 1050-6 mit Proben aus dem Würfel mit Gießmodul 2,5 cm**



**Bild 45: Wöhlerdiagramm (R=-1, Kerbformzahl ~ 1,0) für GJS 1050-6 mit Proben aus dem Würfel mit Gießmodul 3,3 cm**



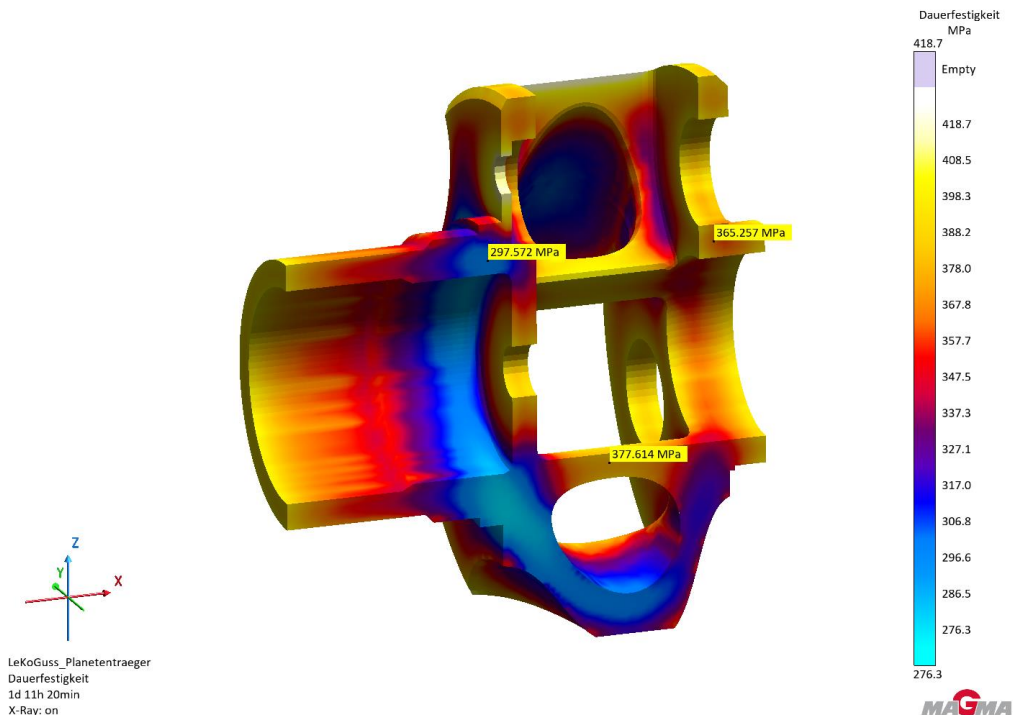
**Bild 46: Wöhlerdiagramm (R=-1, Kerbformzahl ~ 1,0) für GJS 1050-6 mit Proben aus dem Würfel mit Gießmodul 4,2 cm**

Bild 47 zeigt die daraus ermittelten Dauerfestigkeiten für die unterschiedlichen Wandstärken.

Güte	Gießmodul	R = -1
		K <sub>t</sub> = 1,0
EN-GJS-1050-6	2,5 cm	384 MPa
	3,3 cm	379 MPa
	4,2 cm	335 MPa

**Bild 47: Dauerfestigkeiten für unterschiedliche Wandstärken für GJS 1050-6 bei 50% Bruchwahrscheinlichkeit**

Diese Information (modulabhängige Dauerfestigkeit) wird in MAGMAiron implementiert. Bild 48 zeigt exemplarisch die lokalen Dauerfestigkeiten für den Planetenträger.



**Bild 48: Lokale Dauerfestigkeiten**

### 3.6. Integration der Gießprozesssimulation in die Topologieoptimierung (AP C5, C15, C17, C20, C22)

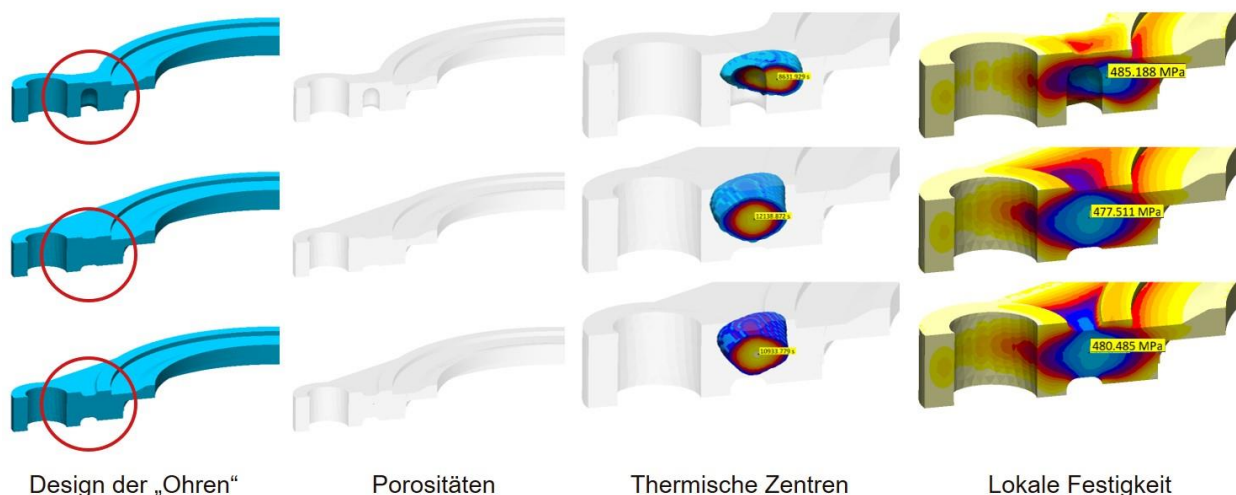
Ziel ist die Kopplung der Topologieoptimierung mit der Gießprozesssimulation, wenn möglich automatisiert. Bei der klassischen Auslegung von Bauteilen werden durch den Fertigungsprozess entstandene lokale Unterschiede in den Materialeigenschaften und/oder Eigenspannungen nicht berücksichtigt. Des Weiteren gilt es zu berücksichtigen, dass topologieoptimierte Designs oftmals gießtechnisch nicht darzustellen sind und deshalb einer Überarbeitung bedürfen.

Ein erster Ansatz besteht darin, das topologieoptimierte Gussteil zu simulieren und die berechneten lokalen Festigkeiten in das gießbare Redesign einfließen zu lassen. Bild 49 zeigt beispielhaft an der Drehmomentstütze diese Vorgehensweise.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die wirtschaftliche Herstellbarkeit des Gussteils. Die Materialreduzierung an den „Ohren“ ist technisch möglich, kann aber nur mit erheblichem Mehraufwand realisiert werden, da das Schleifen in diesen Bereichen dann sehr schwierig ist. In allen drei Varianten ergeben sich keine substantziellen Risiken für Porositäten.

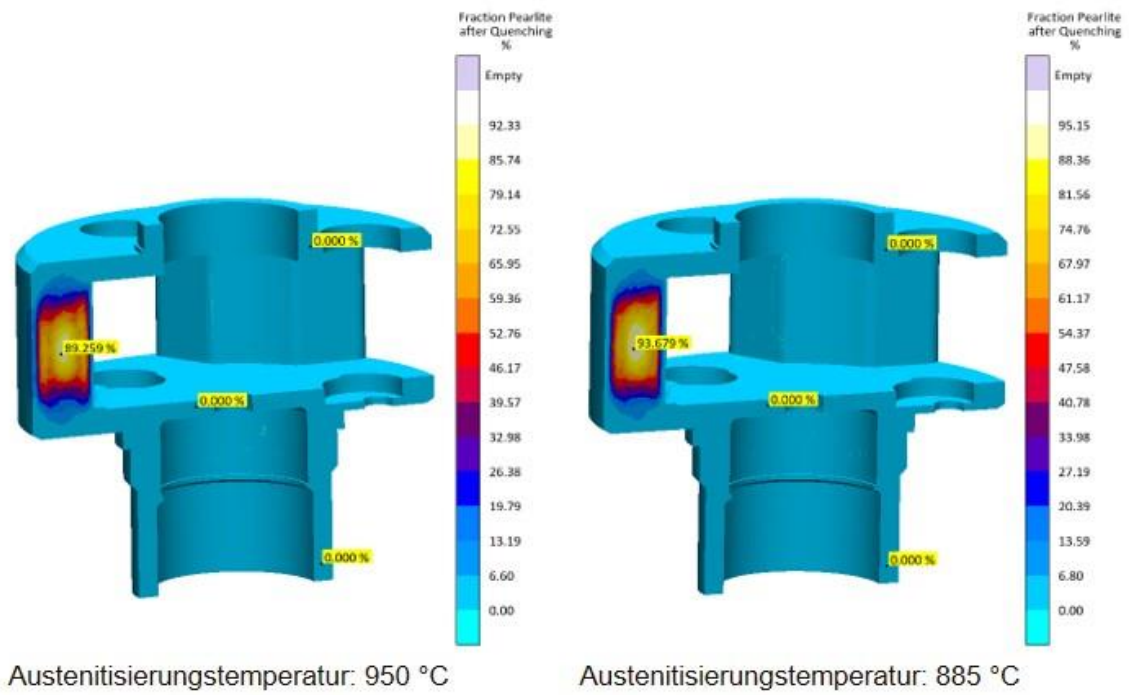
Während gießtechnische Anforderungen wie Ausformbarkeit etc. durchaus berücksichtigt werden können, ist es sehr schwierig, andere fertigungsbedingte Randbedingungen (z.B. erhöhter Aufwand bei der Kernlagerung oder beim Putzen/Schleifen) automatisch zu erfassen.

Ein weiteres Hindernis für eine automatisierte Kopplung der Topologieoptimierung mit der Gießprozesssimulation ist die Tatsache, dass kommerzielle Programme zur Topologieoptimierung keine lokal unterschiedlichen Eigenschaften berücksichtigen können. Die Prozesskette funktioniert also nur „manuell“. Ein optimierter Entwurf wird mit Hilfe der Gießprozesssimulation auf lokale Eigenschaften untersucht und dann mit der Belastungssimulation (FE) abgeglichen.

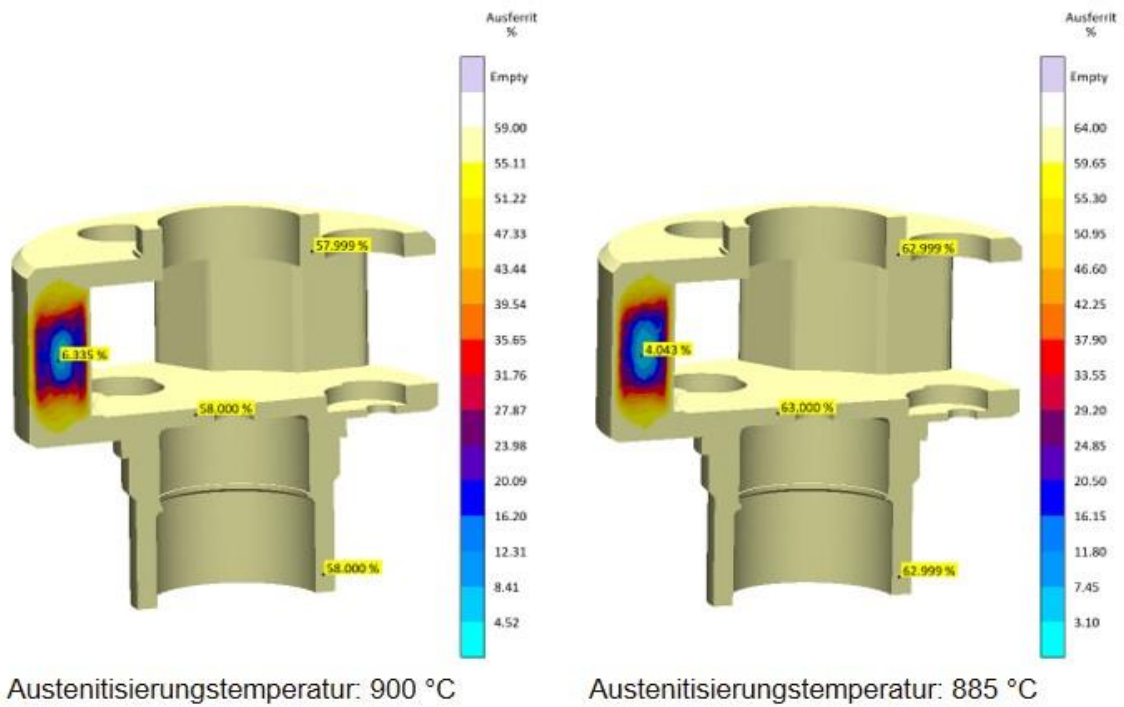


**Bild 49: Porositäten und Festigkeiten für unterschiedliche Designs der Drehmomentstütze**

Beim Planetenträger ist eine fertigungsbedingte Herausforderung das Wärmebehandlungsgefüge in den Stegen. Die Simulation der Wärmebehandlung zeigt, dass die massiven Stege nicht „durchgehärtet“ werden können. Die Abkühlgeschwindigkeit in diesen Bereichen ist zu klein, so dass beim Abschrecken/Auslagern im Salzbad substantzielle Anteile an Perlit gebildet werden, die beim isothermen Halten nicht den gewünschten nadeligen Ferrit ausscheiden können (Bild 50). Eine Erhöhung der Austenitisierungstemperatur (von 885 auf 950 °C) verringert zwar die Perlitanteile nach dem Abschrecken in den Stegen (-> tendenziell lokal höhere Festigkeit nach der Wärmebehandlung), verringert aber auch den Anteil an nadeligem Ferrit im Bauteil (-> global geringere Festigkeit des wärmebehandelten Gefüges (Bild 51).

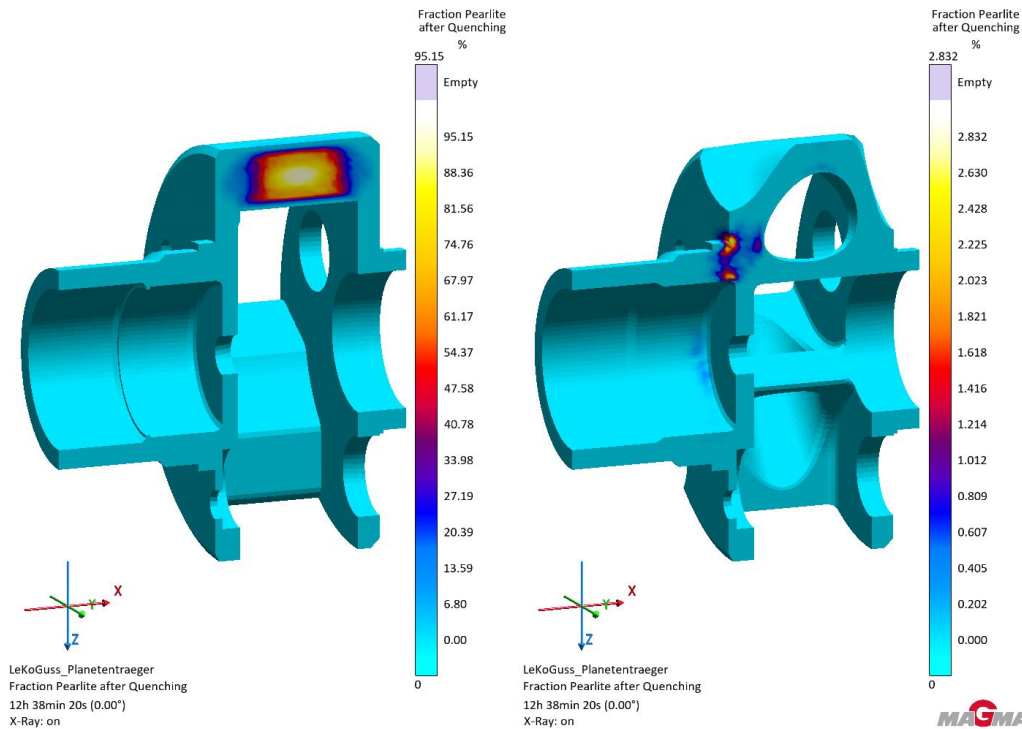


**Bild 50: Anteil an Perlit nach dem Abschrecken**



**Bild 51: Anteil an nadeligem Ferrit**

Bei der optimierten Geometrie lässt sich das gewünschte Gefüge viel leichter einstellen (Bild 52).



**Bild 52: Vergleich der Originalgeometrie mit der optimierten Geometrie**

#### **4. Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

MAGMA wird die Ergebnisse des Vorhabens in die vorhandenen Produkte aus der MAGMASOFT® Familie implementieren. Hierzu zählt insbesondere das Add-on Modul MAGMAiron zur Gefügesimulation von Gusseisenwerkstoffen. Bestehenden Kunden der MAGMA werden diese neuen Möglichkeiten mit einer neuen Version zur Verfügung gestellt. Schulungsmaßnahmen, Unterstützung bei der Implementierung vor Ort und die Abwicklung von Dienstleistungsprojekten mit dem Programm gehören ebenfalls zum Leistungsumfang der MAGMA. MAGMA wird auch die Pflege und anwenderorientierte Verbesserung nach Ablauf des Vorhabens für die Anwendungen im Gießereiumfeld übernehmen. Selbstverständlich wird durch die Entwicklungen das MAGMASOFT® Programm noch leistungsfähiger und attraktiver für Kunden aber auch für potentielle neue Anwender. MAGMA wird weiterhin durch kostenfreie Seminare, Anwendertreffen und Veröffentlichungen auf die erweiterten Möglichkeiten aufmerksam machen.

#### **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes**

Es fand während der Projektlaufzeit keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Konsortiums statt.

#### **6. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Es liegen keine Erkenntnisse über den Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen vor.

#### **7. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate**

Im Rahmen des Vorhabens hat MAGMA mehrfach auf deutschsprachigen und auf internationalen Anwendertreffen über die Ergebnisse des Projektes berichtet. Schwerpunkte dabei waren u.a. das neue Speisungsmodell, die Berechnung von Gefügen bei ADI-

Gussteilen und die Berücksichtigung der thermischen Konvektion für dickwandigere GJS Bauteile.

## 8. Literatur

- [1] BMWi-Projekt 0325799: FVA-Gondel - Belastungen an den Antriebskomponenten von Windenergieanlagen (Laufzeit: 2015-2017).
- [2] VDMA 23902: Leitlinie für den bruchmechanischen Nachweis von Planetenträgern aus EN-GJS-700-2 für Getriebe von Windenergieanlagen 21.200 (2014). Berlin.
- [3] BMWi-Projekt 0325618: DiWaGussGJS-A - Numerische und experimentelle Untersuchung des Erstarrungsvorgangs in dickwandigen Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit für Windkraftanlagen (Laufzeit: 2013-2016).
- [4] BMWF-Projekt 03X3013: LEA - Leichtbau mit gegossenen ADI Bauteilen (2010 abgeschlossen).
- [5] P. Donelan: Modelling microstructural and mechanical properties of ferritic ductile cast iron, Materials Science and Technology, March 2000, Vol. 16, p. 261-269