

# FAT 277



Modellierung der Einflüsse  
von Porenmorphologie auf  
das Versagensverhalten  
von Al-Druckgussteilen mit  
stochastischem Aspekt für  
durchgängige Simulation von  
Gießen bis Crash



# **Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash**

Forschungsstelle 1: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM)

Ansprechpartner: Dr. Dong-Zhi Sun

Forschungsstelle 2: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung (IFAM)

Ansprechpartner: Andreas Burblies

Beteiligte Mitarbeiter der Forschungsstellen:

IWM: Dr. Florence Andrieux, Clemens Fehrenbach, Yingsong Ma, Dr.  
Johannes Preußner, Dr. Dong-Zhi Sun

IFAM: Andreas Burblies, Natalia Voßmeyer

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

*Das IGF-Vorhaben 412 ZN der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.*

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung und Ziel des Projekts</b>	<b>6</b>
2.1	Einleitung	6
2.2	Ziel des Projekts	7
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>9</b>
3.1	Simulation von Gießprozessen	9
3.2	Stochastische Methoden zur Analyse von Porositätsverteilungen	10
3.3	Versagensmechanismen in Aluminiumdruckgusswerkstoffen	11
3.4	Modellierung der Verformung und des Versagens	13
3.5	Kopplung zwischen Gieß- und Crashsimulation	14
<b>4</b>	<b>Untersuchungsprogramm</b>	<b>16</b>
4.1	Vorgehensweise	16
4.2	Werkstoff und Demonstratoren	17
<b>5</b>	<b>Spezifikation, Herstellung und Röntgenprüfung von Demonstrationskomponenten (IFAM)</b>	<b>18</b>
5.1	Castasil®-37	18
5.2	Y-Box (Gießversuche bei Gießerei-Institut der RWTH Aachen)	19
5.3	Karosserieknoten (Werkzeugmodifikation, Gießversuche bei IFAM Bremen)	20
5.4	Röntgenprüfung Y-Box (Gießerei-Institut der RWTH Aachen)	22
5.5	Röntgen-CT Y-Box (Ford)	22
5.6	Röntgen Mikro-CT Y-Box (IIS/EZRT)	23
5.7	Röntgenprüfung des Karosserieknotens (IFAM)	24
<b>6</b>	<b>Gießsimulation der Demonstrationskomponenten (IFAM)</b>	<b>25</b>
6.1	Y-Box (MAGMA, GI)	25
6.2	Karosserieknoten (MAGMA, IFAM)	27
6.3	Karosserieknoten (ProCAST, ESI)	30
<b>7</b>	<b>Entwicklung eines stochastischen Modells zur Beschreibung der Porenmorphologien (IFAM)</b>	<b>34</b>
7.1	Porenmorphologien und Markov-Felder (Ising-Modell)	34
7.2	Äquivalente Porengröße als Morphologiekategorie	36
7.3	Monte-Carlo-Simulation zur Realisation von Porenmorphologien	37
<b>8</b>	<b>Stochastische Charakterisierung der Porenmorphologie und Anwendung auf Demonstrationskomponenten (IFAM)</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Charakterisierung der Einflüsse der Mikrostruktur und des Spannungszustands auf das Versagensverhalten</b>	<b>40</b>
9.1	Y-Box	41
9.1.1	Charakterisierung der Ortsabhängigkeit mechanischer Eigenschaften	41



9.1.2	Charakterisierung des Einflusses des Spannungszustands	44
9.2	Karosserieknoten	57
<b>10</b>	<b>Metallographische Untersuchungen und mikromechanische Modellierung von Bruchmechanismen (IWM)</b>	<b>59</b>
10.1	Bruchflächen und Schlifffbilder von Glattzugproben	59
10.2	Bruchflächen von Kerbzug- und Scherzugproben	63
10.3	Zellmodellrechnungen	66
10.3.1	Makro-mechanisches Werkstoffmodell des Matrixwerkstoffs	66
10.3.2	RVE mit einer Pore	67
10.3.3	RVE mit Mehrporen	72
<b>11</b>	<b>Entwicklung eines makroskopischen Versagensmodells (IWM)</b>	<b>77</b>
11.1	Werkstoffmodell mit Berücksichtigung der Porositätseinflüsse	77
11.2	Vorgehensweise für die Probensimulation mit Modellierung des Einflusses der Porenmorphologie	80
<b>12</b>	<b>Komponentenversuche Biegung/Stauchung (IWM)</b>	<b>85</b>
12.1	Stauchversuche	85
12.2	Biegeversuche	87
<b>13</b>	<b>Komponentensimulation (IWM)</b>	<b>89</b>
13.1	Simulation der Stauchversuche	89
13.2	Simulation der Biegeversuche	93
<b>14</b>	<b>Kopplung zwischen Gieß- und Crash-Simulation (IFAM, IWM)</b>	<b>97</b>
14.1	Homogenisierungsverfahren zur Kopplung der Porenmorphologie mit FE-Methoden	97
14.2	Anwendung auf Zugproben Y-Box	98
<b>15</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>103</b>
<b>16</b>	<b>Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen</b>	<b>107</b>
<b>17</b>	<b>Ergebnistransfer</b>	<b>108</b>
<b>18</b>	<b>Förderhinweis und Danksagung</b>	<b>110</b>
<b>19</b>	<b>Referenzen</b>	<b>111</b>
<b>20</b>	<b>Anhang</b>	<b>114</b>

# 1 Kurzfassung

Ein großes Problem für die Auslegung und die Bewertung der Crashesicherheit von Gusskomponenten ist die große Streuung mechanischer Eigenschaften. Die Streuung lokaler Eigenschaften in einer Gusskomponente wird durch räumliche Variation der Mikrostruktur, Porosität und Porenmorphologie verursacht, die von Gießprozessen und Komponentengeometrien beeinflusst werden. Die Entstehung der Mikrostruktur und Mikrodefekte ist nicht nur durch deterministische sondern auch stochastische Vorgänge bedingt. Im Rahmen des Projekts wurde eine Methode zur Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie und –verteilung auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit Berücksichtigung stochastischer Effekte entwickelt. Dafür wurde eine durchgängige Simulation von Gießen bis zu Crash durchgeführt und der stochastische Charakter der Mikrostruktur und die daraus resultierenden lokalen Materialeigenschaften wurden auf Basis von Porenmorphologien berücksichtigt.

Als Demonstratoren wurden Y-Boxen und Karosserieknoten aus Castasil-37 mit den optimierten Prozessparametern gegossen. Zur Identifizierung von Porenverteilungen wurden CT-Untersuchungen mit unterschiedlichen Auflösungen zwischen 10 µm und 300 µm durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen den inhomogenen und statistischen Charakter der lokalen Porenverteilung. Gießsimulationen an der Y-Box wurden mit dem Software MAGMA durch das Gießerei-Institut der RWTH Aachen durchgeführt. Für den Karosserieknoten wurden Gießsimulationen mit MAGMA am IFAM und mit ProCAST bei der Firma Calcom ESI durchgeführt. Daraus wurden Temperatur- und Porositätsverteilungen bestimmt. Die berechneten Porositätsverteilungen stimmen mit den Ergebnissen der CT-Untersuchungen qualitativ überein.

Im IWM wurden die Ortsabhängigkeit des Verformungs- und Versagensverhaltens mit Zugproben aus unterschiedlichen Positionen in der Y-Box und im Karosserieknoten charakterisiert. Trotz großer Streuungen kann man erkennen, dass sowohl die Fließspannungen als auch die Bruchdehnungen stark von der Entnahmeposition abhängen. Die Ursachen für die Ortsabhängigkeit liegen wahrscheinlich in unterschiedlichen Verteilungen von Porosität und anderen Ungängen sowie der örtlichen Variation der Matrixeigenschaften. Zur Untersuchung des Einflusses des Spannungszustands auf die Bruchdehnung wurden Zug-, Druck-, Kerbzug-, Scherzug-, Biege- und Biaxialzugversuche für zwei Entnahmeorte (Angussnah und Angussfern) in der Y-Box durchgeführt. Die Dehnungsfelder in den Schädigungszonen wurden mit Hilfe von optischen Dehnungsmessungen (ARAMIS) ermittelt. Metallographische und fraktographische Untersuchungen wurden zur Identifizierung von Mikrodefekten und Mikromechanismen des Versagens sowie zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen Porosität und Mehrachsigkeit durchgeführt.

Zellmodellrechnungen mit einer Pore und mehreren Poren in einem RVE wurden zur Quantifizierung der Einflüsse der Porosität und Porenmorphologie auf Verformung und Versagen durchgeführt. Während die Einflüsse der Porosität auf mechanische Eigenschaften mit analytischen Ansätzen beschrieben wurden, konnten aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Porenmorphologie und

Spannungszustand keine geschlossenen Gleichungen zur Beschreibung der Einflüsse der Porenmorphologie auf das Bruchverhalten abgeleitet werden. Deswegen wurde eine neue Vorgehensweise für die Modellierung des Einflusses der Porenmorphologie auf Verformung und Versagen vorgeschlagen. Im Wesentlichen besteht die Vorgehensweise aus der Erzeugung einer örtlichen Porenverteilung auf einem FE-Modell und Durchführung von Versagenssimulationen mit einem aus Zellmodellrechnungen abgeleiteten makroskopischen Werkstoffmodell mit Berücksichtigung der Porositätseinflüsse.

Die Plausibilität der Vorgehensweise wurde zunächst für gleiche globale Porosität von 5% mit vier unterschiedlichen Porenmorphologien, die durch einen Zufallsgenerator erzeugt wurden, überprüft. Die vier örtlichen Verteilungen der Porosität wurden auf ein Finite-Elemente-Netz definiert und als Anfangsbedingungen für die Festigkeitssimulation benutzt. Zur Variation des Spannungszustands wurden die vier Porenmorphologien auf die Prüfbereich von Glattzug-, Kerbzug-, Scherzug- und Biaxialzugproben übertragen. Die Wechselwirkung von Porenmorphologie und Mehrachsigkeit bzgl. des Bruchverhaltens könnte damit qualitativ wiedergegeben werden.

Um die in einem Gießprozess entstehende Porenmorphologie nachzubilden, wurde ein stochastisches Modell auf Basis des Markov-Felds beim IFAM entwickelt und für die ersten Anwendungen implementiert. Dabei wurde neben der Porosität eine äquivalente Porengröße zur Charakterisierung der Porenmorphologie benutzt. Die Parameter für das Markov-Feld wurden durch Anpassung an die Porenmorphologie aus CT-Untersuchungen bestimmt. Das Modell erzeugt örtliche Variationen der Porosität, die auf ein Finite-Elemente-Netz für eine Crashsimulation übertragen werden können.

Zur Überprüfung dieser Methode wurden jeweils 20 Porenmorphologien für zwei äquivalente Porengrößen erzeugt und mit einem Mapping-Verfahren auf das FE-Modell für Zugversuche übertragen. Anschließend wurden die entsprechenden makroskopischen Spannungs-Dehnungskurven durch die Versagenssimulationen bestimmt. Damit konnten die experimentell ermittelten Streuungen der Bruchdehnung vorausberechnet werden.

Zur Validierung des entwickelten makroskopischen Werkstoffmodells wurden Stauch- und Biegeversuche an der Y-Box konzipiert und durchgeführt. Bei der Komponentensimulation wurden die Einflüsse des Elementtyps und der Elementgröße auf numerische Ergebnisse systematisch untersucht. Das implementierte Versagensmodell mit Berücksichtigung einer Porositätsverteilung wurde angewendet, wobei die Porositätsverteilung durch einen Zufallsgenerator definiert wurde. Die Methode ist in der Lage, die Versagensstellen in der Y-Box richtig vorherzusagen. Für eine bessere Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation müssen die realen Porenmorphologien genau ermittelt und als Anfangsbedingungen benutzt werden. Außerdem ist es notwendig, dass andere Mikrodefekte wie Oxidhäute, Einschlüsse und Kaltfließstellen bei der Modellierung betrachtet werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## 2 Einleitung und Ziel des Projekts

### 2.1 Einleitung

Im Trend zum Leichtbau werden Aluminium-Gusskomponenten aufgrund der Funktionsintegration (Verrippungen und Anbindungsstellen) und der Wirtschaftlichkeit bei hohen Stückzahlen insbesondere bei komplexen Geometrien immer mehr im Fahrzeugbau eingesetzt. Ein großes Problem für die Auslegung und die Bewertung der Crashesicherheit von Gusskomponenten ist die große Streuung mechanischer Eigenschaften. Als Beispiel wurde eine Streuung der Zugfestigkeit um 35% und der Bruchdehnung um 270% innerhalb einer Al-Druckgusskomponente festgestellt [SUN10]. Die Streuung lokaler Eigenschaften in einer Gusskomponente wird durch räumliche Variation der Mikrostruktur, Porosität, Porenform, Porengröße und ihrer topologischen Anordnung verursacht, die von Gießprozessen und Komponentengeometrien beeinflusst werden. Die Entstehung der Mikrostruktur und Mikrodefekte ist nicht nur durch deterministische sondern auch stochastische Vorgänge bedingt.

Bisher wird bei Auslegung und Crashesimulation angenommen, dass die mechanischen Eigenschaften in einer Gusskomponente homogen sind. Deswegen kann diese Auslegung und Bewertung der Funktionalität entweder von großen Unsicherheiten oder möglicher Überdimensionierung begleitet sein. Da die lokale Bruchdehnung in einer Al-Gusskomponente sehr niedrig (z.B. 0,02) sein kann, ist die Auslegung auf Basis der unteren Grenze der Kennwerte aus Sicht des Leichtbaus nicht akzeptierbar.

Eine Lösung zur Steigerung der Konstruktions- und Bewertungssicherheit und zur gezielten Optimierung des Fertigungsprozesses ist die Kopplung zwischen der Gießsimulation mit Mikrostrukturberechnung und der Festigkeitssimulation unter Einsatzbedingungen. Neue Arbeiten über Erstarrungssimulationen [KAP10, FLE05] haben gezeigt, dass ein Teil der Mikrostrukturgrößen wie z. B. sekundärer Dendritenarmabstand und ein Teil der Mikrodefekte wie z.B. Schrumpfungsporosität bereits mit kommerziellen Programmen für Gießsimulation zu berechnen sind. Allerdings sind viele wichtige Mikrostrukturparameter wie Korngröße des  $\alpha$ -Mischkristalls und Größe von Ausscheidungen noch nicht in einer praxisnahen Umgebung modelliert worden. Bei der Berechnung der Porosität wird in der Regel nur die Schrumpfungsporosität aber keine Gasporosität berücksichtigt.

Die verfügbare kommerzielle Software zur numerischen Simulation von Gießprozessen auf Basis physikalischer Modelle für die Formfüllung und Erstarrung führt zurzeit immer zu deterministischen Vorhersagen der Prozess- und Produkteigenschaften. In der Realität sind diese Eigenschaften aber auch statistischer Natur. So kann in hoher Auflösung der genaue Ort des Auftretens einer Pore im gegossenen Bauteil weder real noch mittels Simulation genau vorhergesagt werden. Um dieses Problem zu lösen, kann ein stochastisches Modell eingeführt werden, das die örtliche Verteilung von Porositäten durch Porenwahrscheinlichkeiten über sogenannte Zufallsfelder beschreibt. Mittels des stochastischen Modells kann dann die statistische Variation der Porenmorphologie für Gießprozess und Werkstoff beschrieben und ein Versuchsplan

für Simulationsexperimente, der für bestimmte Gießparameter zufällige Porenmorphologieverteilungen im Gussteil realisiert, ermittelt werden. Damit kann eine Übertragung der Parameter des stochastischen Modells auf die mikromechanischen Parameter des Werkstoffs erfolgen und in nachfolgenden Crashsimulationen verwendet werden. Die Idee des Einsatzes von Zufallsfeldern für Porositätsverteilungen ist völlig neu und einer der Schwerpunkte in diesem Vorhaben. Vorausgehende Untersuchungen wurden im Fraunhofer-internen Projekt CAROD (Computer Aided Robust Design, 2007-2010) durchgeführt.

Bei bisherigen Untersuchungen zur Kopplung zwischen Gieß- und Festigkeitssimulation wurden nur phänomenologische Beziehungen zwischen Prozessparametern und lokalen Eigenschaften [TRE05] oder Einflüsse der Mikrostruktur und Porosität auf das Fließverhalten [KAP10] erfasst. Es wurde in der Arbeit [TRE05] festgestellt, dass die Anwendung phänomenologischer Modelle trotz Berücksichtigung unterschiedlicher Qualitätsbereiche zu einer falschen Vorhersage des Versagensorts in einer Komponente führen kann. Für eine zuverlässige Modellierung der Einflüsse von Gießprozessen auf das Verformungs- und Versagensverhalten von Gusskomponenten ist die Entwicklung einer mikromechanismen-basierten Methode erforderlich. Dabei müssen sowohl die Einflüsse der Mikrostruktur insbesondere der Porenmorphologie als auch der Spannungsmehrachsigkeit z.B. Zug, Druck und Scherung auf das Versagen beschrieben werden. Die mikromechanischen Bruchmechanismen in Al-Druckgusswerkstoffen insbesondere unter Scherung sind noch nicht vollständig geklärt. Es gibt großen Entwicklungsbedarf für neue Simulationmethoden zur Berücksichtigung der Verteilungen von Mikrodefekten (Porosität, Porenform und –abstand) auf die Schädigungsentwicklung in Gusskomponenten.

## **2.2 Ziel des Projekts**

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Methode zur Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie und –verteilung auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit Berücksichtigung stochastischer Effekte. Dadurch soll ein Gießprozess im Hinblick auf Produkteigenschaften virtuell optimiert werden können und die Zuverlässigkeit der Sicherheitsbewertung von komplexen Gusskomponenten wesentlich gesteigert werden.

Bei der Gießsimulation sollen Modelle zur Berechnung von verschiedenen Mikrodefekten (Schrumpf- und Gasporosität, ...) entwickelt und implementiert werden. Dabei wird eine stochastische Methode zur Modellierung mikroskopischer Porositätsverteilungen mit Hilfe von Zufallsfeldern entwickelt, um die Porenmorphologie (Porosität, Porenform, -größe und –abstand) zu beschreiben. Anhand von Experimenten (Gießen von Komponenten, Computertomographie) werden die Einflüsse der Gießparameter auf die Porenmorphologie bestimmt. Die Einflüsse der Porenmorphologie auf das Werkstoffverhalten werden in einem breiten Belastungsbereich durch Scherzug-, Druckzug- und Biaxialzugversuche charakterisiert.

Bei der Crashsimulation sollen bruchmechanismenbasierte Werkstoffmodelle zur makro-mechanischen Modellierung der Einflüsse von inhomogenen Verteilungen von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten entwickelt und in einen Crashcode implementiert werden. Zur Ableitung eines makro-mechanischen Werkstoffmodells

einschließlich des Versagens sollen meso-mechanische Modellierungen mit Variation der Porenmorphologie und Mehrachsigkeit durchgeführt werden. Streuungen des Verformungs- und Versagensverhaltens von Komponenten werden bei der Crashsimulation durch Variation der Verteilungen der Mikrostrukturgrößen, die bei den Gießsimulationen mit der stochastischen Methode erzeugt wurden, berechnet.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Simulation von Gießprozessen

Zur Simulation der Formfüllung wenden kommerzielle Programme Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide (Schmelzen) an. Als Randbedingungen gehen die initialen Strömungsgeschwindigkeiten sowie der zeitabhängige Massefluss oder Druck am Anguss ein. Weiterhin werden Schwer- und Zentrifugalkräfte berücksichtigt. In den meisten Programmen können Lüftungen und ihre Auswirkungen auf das Füllverhalten in die Simulation einbezogen werden. Für den Füllvorgang sind temperaturabhängige Materialeigenschaften der Schmelze z.B. Dichte und Viskosität notwendig. Die Simulation der Formfüllprozesse erfolgt sowohl bei Verwendung der Finite-Elemente-Methode als auch bei der Finite-Volumen-Methode mit den verfügbaren Programmen und bei richtiger Anwendung (Meshing) relativ zuverlässig.

Für die Simulation des Erstarrungsprozesses kommt die Fouriersche Gleichung für Wärmeleitung zur Anwendung. Als Randbedingungen gehen der Wärmeübergang zwischen Schmelze und Form (zeit- und temperaturabhängig), die Wärmestrahlung der Form sowie die zeitliche Formtemperierung ein. Der Erstarrungsprozess läuft parallel zum Formfüllprozess ab. Durch die Kopplung der Differentialgleichungen wird eine korrekte Berücksichtigung der Temperaturen und Temperaturabhängigkeiten gewährleistet. Nach dem Ende des Füllprozesses wird der Navier-Stokes-Anteil der numerischen Berechnung abgeschaltet. Es werden folgende teilweise temperaturabhängige bzw. druckabhängige Eigenschaften des Schmelzmaterials benötigt: Gießtemperatur, Solidus-, Liquidustemperatur, latente Wärme, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität, Erstarrungsfestanteil, Fließgrenztemperatur. Bei der Lösung der Wärmeleichungen müssen insbesondere für die Wärmeübergänge Näherungen eingesetzt werden. So gibt es zum Beispiel durch den bei der Erstarrung auftretenden Schrumpfungsprozess einen zeitabhängigen Spalt zwischen Schmelze und Form, der einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmeübergang hat. Die entsprechende Spaltgröße wird numerisch nicht berechnet, kann aber über empirisch ermittelte zeit- und temperaturabhängige Wärmeübergänge berücksichtigt werden. Insgesamt kann zurzeit die numerische Behandlung der Erstarrung bei Einsatz kommerzieller Software als zuverlässig betrachtet werden [KRA96].

Der bei der Formfüllung und Erstarrung auftretende Schrumpfungsprozess wird in der Regel durch eine entkoppelte Rechnung simuliert. Dabei werden die aus der Formfüll- und Erstarrungssimulation gewonnenen Temperaturverteilungen benutzt, um die thermischen Dehnungen während des gesamten Gießprozesses zu analysieren [HAT05, POK04, VDG03, WEI99].

Wärmebehandlungen können in der Regel durch das Erstarrungsmodul der eingesetzten Gießsoftware simuliert werden. Es gibt aber auch die Möglichkeit, dafür entsprechende kommerzielle Programme (z.B. SYSWELD) einzusetzen. Die Simulation der Wärmebehandlung ist insbesondere dann wichtig, wenn örtlich verteilte

Resteigenspannungen oder Gefügemikrostrukturen weiterverarbeitet werden sollen [YU96].

Bei der Schrumpfungsporosität kommt es im Erstarrungsbereich zu einer verstärkten Volumenkontraktion. Hier werden sog. Kriteriumsfunktionen (teilweise frei definierbar) in Abhängigkeit von Temperaturgradient, Temperatur, Erstarrungszeit und Festphasenwachstumsgeschwindigkeit eingesetzt [LEE90]. Die Ursache von Gasporosität sind mitgerissene bzw. eingewirbelte Luft, bei der Erstarrung entstehende Gasphasen oder bewusst eingeführte Gase (z.B. Wasserstoff). Mit Ausnahme der Gasauscheidungen ist dafür in der Regel eine Zwei-Phasen-Strömungssimulation notwendig, die in kommerziellen Gießsimulationsprogrammen zurzeit noch nicht verfügbar ist. Oxidhäute entstehen bereits im Gießofen und werden bei der Formfüllung eingeschwemmt. Ähnlich wie bei der Gasporosität gibt es zurzeit keine etablierten Simulationsmöglichkeiten. Bei langen Fließwegen kommt es zu einer Erkaltung des Materials, so dass beim Zusammentreffen von Schmelzfronten Kaltfließstellen entstehen. Die Orte von Schmelzfronten und Bindenähten lassen sich durch die Simulation der Formfüllung vorhersagen.

Durch unterschiedliche örtlich verteilte Erstarrungsbedingungen entstehen verschiedene Gefüge- und Mikrostrukturen. Mittels einer gekoppelten Makro-Mikro-Simulation kann ein Zusammenhang zwischen Prozessparametern, Legierungszusammensetzung und Gefügekenngößen ermittelt werden (Dendritenarmabstand DAS, Phasenanteil auf Mikroskala). Die Rückkopplung zur Makrosskala entsteht durch Freisetzung latenter Schmelzwärme, Änderung von Viskosität und Fließverhalten der Schmelze [DOE02, SCH05, BÜH03].

### 3.2 Stochastische Methoden zur Analyse von Porositätsverteilungen

Porositätsverteilungen in Gussbauteilen haben Zufallsgrößencharakter, da bei jeder Realisation (Fertigung) eine andere Porositätsverteilung entsteht, die aber einer bestimmten Statistik für ortsverteilte Größen genügt. Im Gegensatz zu einer Zufallsvariable ist aber bei räumlichen Zufallsfeldern noch eine Information nötig, die die Topologie des Zufallsgrößensystems beschreibt. Markov-Felder haben die Eigenschaft, dass die örtlichen Wahrscheinlichkeiten von den Wahrscheinlichkeiten abhängen, die in der unmittelbaren Umgebung des Ortes auftreten. Diese Abhängigkeiten werden durch ein Wechselwirkungspotenzial unter Einsatz der Gibbs-Verteilung beschrieben. Durch dieses stochastische Modell kann zum Beispiel die statistische Natur von Gefügestrukturen oder Porenmorphologien charakterisiert werden (Bild 1).



Bild 1: Realisation von Markov-Feldern mit unterschiedlichen Pore-Pore Wechselwirkungen. Aus [PER98]



Porosität kann als Wahrscheinlichkeit aufgefasst werden, die angibt, ob bei einer punktweise durchgeführten Prüfung an einem Werkstoff Material vorhanden ist oder nicht. Markov-Felder dieser Art werden auch als Ising-Modelle bezeichnet. In Bild 2 ist der Zusammenhang zwischen stochastischem und Werkstoffmikrostrukturmodell bei einer Porosität von 50% dargestellt. Zu erkennen ist, dass für eine bestimmte Porosität unterschiedliche Lösungen (Realisationen) für Porenmorphologien möglich sind, die durch das stochastische Wechselwirkungsmodell beschrieben werden können.

### Markov-Realisationen (Ising-Modell)

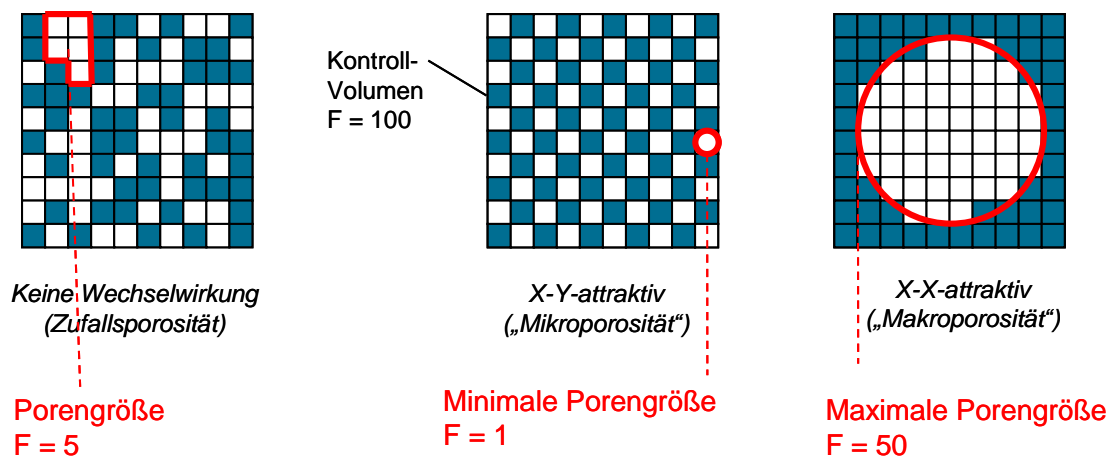


Bild 2: Zusammenhang von stochastischen Modellparametern (Attraktivität) und Mikrostrukturparametern des Werkstoffs (z.B. Porengröße) bei Verwendung eines Ising Modells

Es ist möglich, die stochastischen Modellparameter einer Porenmorphologie (Schrumpfungsporosität) aus Gefügebildern zu bestimmen, um anschließend im Computer für eine vorgegebene Porositätsverteilung (z.B. aus Gießsimulation) entsprechende variierende Morphologieverteilungen zu berechnen. Die Optimierung von Bauteilen und Fertigungsprozessen mit stochastischen Zielgrößen nennt man „Robust Design“ [BUR08].

### 3.3 Versagensmechanismen in Aluminiumdruckgusswerkstoffen

Obwohl eine Reihe von Veröffentlichungen [CAC96, MUG04, WAN03] über die Mikromechanismen des Versagens in Aluminiumgusswerkstoffen vorhanden ist, muss man bei Betrachtung einer bestimmten Legierung aus einem bestimmten Gießverfahren die Bruchmechanismen genau untersuchen. Die Gründe sind, dass die mikroskopischen Vorgänge des Versagens stark von der Zusammensetzung der Legierung, vom Gießverfahren und der Belastungsart abhängig sind.

Die meisten Untersuchungen über Versagensmechanismen in Aluminiumlegierungen wurden unter einachsigen Zug durchgeführt [LEE06, WAN03]. Henn [HEN01] und Treitler [TRE05] haben die Bruchmechanismen in Gusslegierungen bei verschiedenen Belastungen (Scherdruck, Scherzug, einachsigen Zug und Biaxialzug) untersucht. In [TRE05] wurde die wärmebehandelte Legierung AlMg5Si2Mn charakterisiert, die sich im Automobilsektor wegen hoher Festigkeit und gleichzeitiger hoher Bruchdehnung

etabliert hat. Es wurde festgestellt, dass die Rissinitiierung durch das Versagen der spröden lamellenförmigen  $Mg_2Si$ -Ausscheidungen ausgelöst wird (Bild 3 a) und die Mikrorisse sich bevorzugt im spröden Eutektikum und an Grenzflächen zum duktilen  $\alpha$ -Mischkristall ausbreiten (Bild 3 b). Der Einfluss der anwesenden Poren auf die Versagensmechanismen ist je nach Belastungsart unterschiedlich. Bei niedriger Spannungsmehrachsigkeit wie z.B. unter Scherung ist kein Poreneinfluss zu beobachten und der Riss läuft geradlinig in der Scherrichtung durch das Material, obwohl Mikroporen in der näheren Umgebung vorhanden sind (Bild 4 a). Dagegen ist bei hoher Spannungsmehrachsigkeit der Rissverlauf durch Poren gesteuert, was zu einem terrassenförmigen Rissverlauf führt (Bild 4 b). Als Konsequenz wurde bei der Ermittlung der Versagenskurve, die die Bruchdehnung als Funktion der Mehrachsigkeit darstellt, festgestellt, dass eine Zunahme der Porosität zu einer größeren Abnahme der Bruchdehnung bei hoher Mehrachsigkeit als bei niedriger Mehrachsigkeit führt.

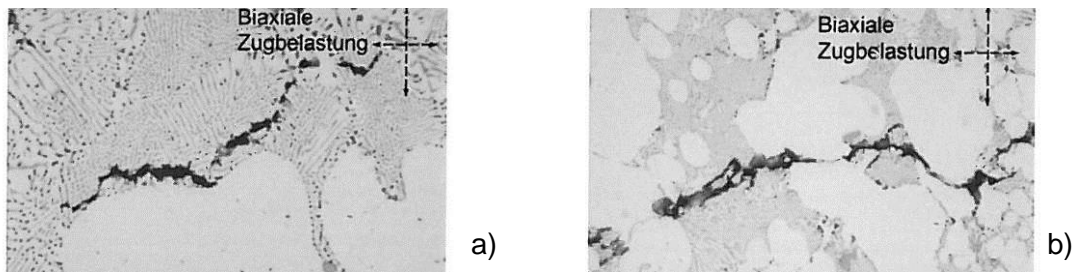


Bild 3: a) Rissinitiierung im spröden Eutektikum und b) Vereinigung der Mikrorisse durch Versagen des duktilen  $\alpha$ -Mischkristalls [TRE05]

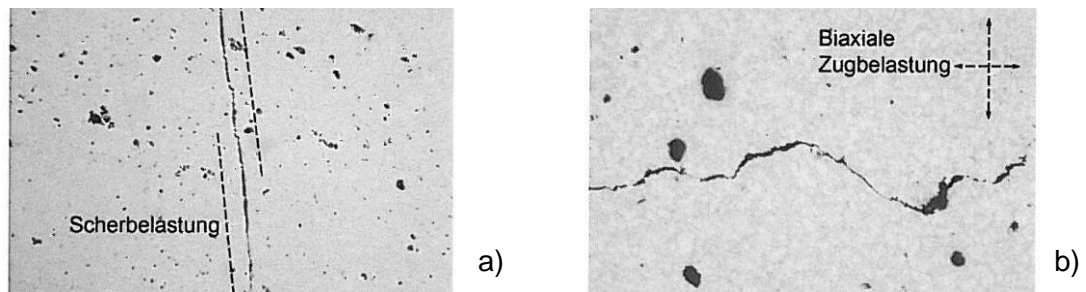


Bild 4: a) Geradliniger Rissverlauf unter Scherung und b) Terrassenförmiger Rissverlauf unter Einfluss der Poren unter Biaxialbelastung [TRE05]

Zum Einfluss der Porenmorphologie auf das Versagen in Aluminiumgusswerkstoffen liegen kaum experimentelle Untersuchungen vor. Das liegt daran, dass die Auswirkungen von Mikro-Defektgrößen wie Porosität, Porenform und Porenabstand auf das Bruchverhalten schwierig auseinander zu halten sind.

Zur Untersuchung des Einflusses der Mehrachsigkeit auf die Bruchvorgänge insbesondere im Scherbereich sind spezielle Versuchstechniken erforderlich. Dafür wurden Scherzugproben [SUN10] und Schmetterlingsproben [TRE05] verwendet. Da die Dehnungsverteilungen in den Proben nicht homogen sind und sich die Mehrachsigkeit mit zunehmender Verformung stark verändert, wurden Torsionsversuche häufig als geeignete Alternative eingesetzt.

### 3.4 Modellierung der Verformung und des Versagens

Zur Beschreibung der Einflüsse der Porosität und Porenmorphologie auf die Schädigungsentwicklung wurden einige analytische Ansätze [GOL93, PAR05] erstellt und zahlreiche Zellmodellrechnungen [BEC87, AND04] durchgeführt. Zum Beispiel wurden in [PAR05] die Porenbildung mit einem auf der maximalen Hauptspannung in Si-Partikeln basierenden Kriterium und das anschließende Wachstum der „penny shape“ Poren und ihre Vereinigung mit einem mikromechanischen Werkstoffmodell modelliert. Dabei wurde der Wechsel der Versagensmechanismen zwischen Scherung und Zug nicht berücksichtigt.

Zur kontinuumsmechanischen Modellierung der Verformung und des Versagens in Aluminiumgusswerkstoffen stehen mikromechanische und phänomenologische Modelle zur Verfügung. Die wesentlichen mikromechanischen Modelle basieren auf der Vorstellung von Porenbildung, -wachstum und -vereinigung. Dafür stehen das Gurson-Modell und seine Erweiterungen [NEE84] mit Betrachtung von kugelförmigen Poren und das Gologanu-Modell [GOL93] mit Beschreibung von elliptischen Poren zur Verfügung. Die Porosität wirkt sich auf das Verformungsverhalten durch eine Reduzierung der Fließspannung aus und dieser Effekt wird mit zunehmender Spannungsmehrachsigkeit (Triaxialität) stärker. Mit den mikromechanischen Ansätzen werden sowohl der Einfluss der Porosität als auch der Einfluss des Spannungszustands beschrieben. Bei phänomenologischen Ansätzen wird normalerweise nur der Einfluss des Spannungszustandes aber nicht der Porosität auf die Verformung berücksichtigt. Eine Kopplung zwischen Fließgrenze und Porosität wurde bei [SUN10] durch empirische Ansätze definiert.

Für die Schädigungsmodellierung wurden die mikromechanischen Modelle mit Einbindung von Versagenskriterien (z.B. Grenzlast von Thomasson [THO90] und geometrisches Kriterium von Brown [BRO73] im Gologanu-Modell) verwendet. Die Einflüsse der Porosität auf das Versagensverhalten sind vom Spannungszustand abhängig. Allerdings ist das Gurson-Modell mit der Annahme des Wachstums einer kugelförmigen Pore nicht in der Lage, das Scherversagen zu beschreiben [AND10]. Das Gurson-Modell und das Gologanu-Modell wurden ansatzweise zur Beschreibung des Scherversagens erweitert [NAH08, AND04]. Es gibt jedoch wenig experimentelle Verifikationsuntersuchungen im Scherbereich.

Phänomenologische Versagensmodelle (z.B. nach Johnson-Cook [JOH85], Bao-Wierzbicki [BAO04] und Jansen [JAN07]) berücksichtigen den Einfluss des Spannungszustands, der mit der Mehrachsigkeit bzw. zusätzlich mit dem Lode-Winkel-Parameter zu charakterisieren ist, auf das Versagen. Diese Modelle können auch um die Berücksichtigung des Porositätseinflusses erweitert werden [SUN10]. Während diese Ansätze, wie mikromechanische Modelle, bei Anwendungen unter hohen Mehrachsigkeiten überprüft wurden, besteht noch großer Entwicklungsbedarf für die Anwendung bei niedriger Mehrachsigkeit.

Eine für das Versagen von Gusswerkstoffen relevante Größe ist das kritisch beanspruchte Volumen. Bei Werkstoffen mit inhomogener Porenverteilung wurde oft festgestellt, dass die Bruchdehnung unter einachsigem Zug eine große Streuung mit sehr niedrigen Werten zeigt (z.B. bei [SUN03, SUN10] bzgl. Aluminiumschäume und Aluminiumgusslegierung und bei [GRE03] bzgl. Magnesiumdruckgusslegierung). Beide

Autoren verweisen auf das kritisch beanspruchte Volumen, welches bei Glattzugproben größer ist als bei gekerbten Zugproben oder Biege- und Scherproben. Mit zunehmendem beanspruchtem Volumen steigt die Wahrscheinlichkeit, einen Mikro-Defekt zu treffen bzw. ein vorzeitiges Versagen auszulösen. Dieser Effekt kann mit Berücksichtigung der Porenverteilung, wie durch die Modellierung der Porenmorphologie mit stochastischem Aspekt, abgebildet werden.

### **3.5 Kopplung zwischen Gieß- und Crashsimulation**

Einige Untersuchungen zur Kopplung zwischen Gieß- und Struktursimulation liegen vor [GRE05, TRE05, KAP10, PYT10, SUN10]. Dabei wurde versucht, die Einflüsse der Mikrostruktur und der Mikro-Defekte auf die mechanischen Eigenschaften mit unterschiedlichen Ansätzen quantitativ zu erfassen. Die festigkeitssteigernden Mechanismen für Aluminiumgusswerkstoffe sind Mischkristall-, Korngrenzen- und Lamellenhärtung. Es wurde bei [TRE05] festgestellt, dass die Streckgrenze hauptsächlich vom Lamellenabstand abhängig ist und Mischkristall- und Korngrenzenhärtung einen jeweils konstanten Beitrag liefern. Zur Berechnung der Streckgrenze wurden bei [TRE05] nicht nur die Abkühlungsgeschwindigkeit sondern auch die Erstarrungszeit aus der Gießsimulation einbezogen und die Voraussage für AlMg5Si2Mn stimmt mit Versuchsergebnissen gut überein. Die Anwendbarkeit des Ansatzes auf andere Legierungen muss noch überprüft werden.

Im Unterschied zur Streckgrenze wird die Bruchdehnung nicht nur vom Erstarrungsprozess sondern auch vom Verlauf der Formfüllung beeinflusst [GRE05]. Die Position und Ausbildung von Poren, Oxidfilmen und Lunkern hängen zum Teil von der turbulenten Formfüllung ab und als Konsequenz zeigt die Bruchdehnung eine deutlich größere Schwankung als die Streckgrenze. Physikalisch basierte Modelle stehen derzeit nur zur Beschreibung der Entstehung von Schrumpfungsporen und durch Wasserstoffdiffusion verursachten Gasporen zur Verfügung [KAP10]. Die Bildung von Oxidfilmen durch Reaktion zwischen Schmelze und Luft in der Kavität kann nur durch empirische Beziehungen beschrieben werden [PYT10].

In den bisherigen Arbeiten zur Kopplung zwischen Gieß- und Struktursimulation wurde die Bruchdehnung unter einachsigem Zug in Abhängigkeit von der Fließlänge [GRE05], oder von der Erstarrungszeit und dem Temperaturgradienten [TRE05] oder von der Schrumpfungsporosität [SUN10] berechnet. Mit Hilfe von Gießsimulation und Minizugversuchen wurden bei [SUN10] die Einflüsse der Schrumpfungsporosität auf die Fließspannung und Bruchdehnung quantifiziert (Bild 5). Die zusätzlichen Einflüsse der Mehrachsigkeit auf das Bruchverhalten wurden in den oben zitierten Arbeiten charakterisiert und modelliert. Bild 6 aus [SUN10] zeigt, dass die Bruchdehnung unter Scherung deutlich niedriger als die aus dem konventionellen Ansatz nach Johnson-Cook [JOH85] ist. Allerdings wurden bisher wegen mangelnder Versuchsdaten keine Wechselwirkungen zwischen Mehrachsigkeit und Mikro-Defekten auf das Bruchverhalten gezielt untersucht. Außerdem wurden bisher die stochastischen Phänomene bei der Entstehung von Mikro-Defekten und die damit verbundenen Schwankungen der Bruchdehnung noch nicht mit theoretischen Modellen behandelt.

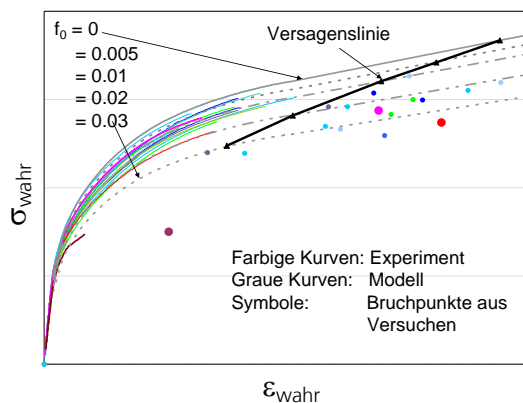


Bild 5: Einfluss der Porosität auf Fließspannung und Bruchdehnung [SUN10]

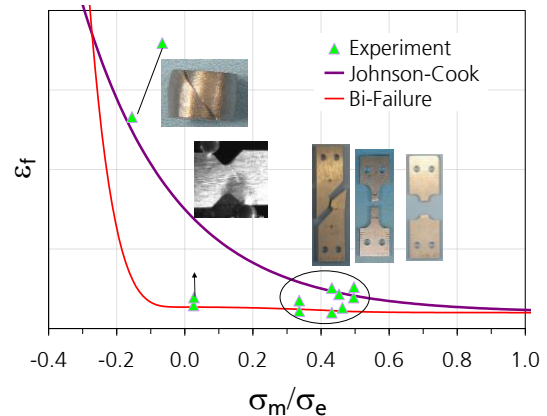


Bild 6: Bruchdehnung als Funktion der Mehrachsigkeit [SUN10]

Eine Kopplung zwischen Gieß- und Struktursimulation auf Basis von relativ einfachen Ansätzen hat in den oben zitierten Arbeiten bereits zu einer Verbesserung der Vorhersage des Komponentenverhaltens geführt. Allerdings haben alle Autoren auf den großen Entwicklungsbedarf z.B. Modellierung der Streuung von Mikrostrukturen und mechanischen Eigenschaften hingewiesen. Bei [TRE05] wurde festgestellt, dass trotz Berücksichtigung unterschiedlicher Qualitätsbereiche ein falscher Rissinitiierungsort in einer Druckgusskomponente von den verwendeten phänomenologischen Modellen prognostiziert wurde.

Da die die Festigkeit verstärkenden Phasen wie  $Mg_2Si$  oder  $Al_2Cu$  und komplexere intermetallische Teilchen am Ende der Erstarrung nicht die optimale Größe besitzen und auch nicht optimal verteilt sind, wird in der Praxis eine Wärmebehandlung im Anschluss an den Gießprozess durchgeführt. In [KAP10] wurde eine Methode zur Modellierung des Lösungsglühens, des Abschreckens und der Alterung im Hinblick auf Änderungen der Mikrostruktur und der Streckgrenze entwickelt. Allerdings gibt es noch keine Information über die Abhängigkeit des Bruchverhaltens von der Wärmebehandlung.

## 4 Untersuchungsprogramm

### 4.1 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise im Projekt ist in Bild 7 schematisch dargestellt.

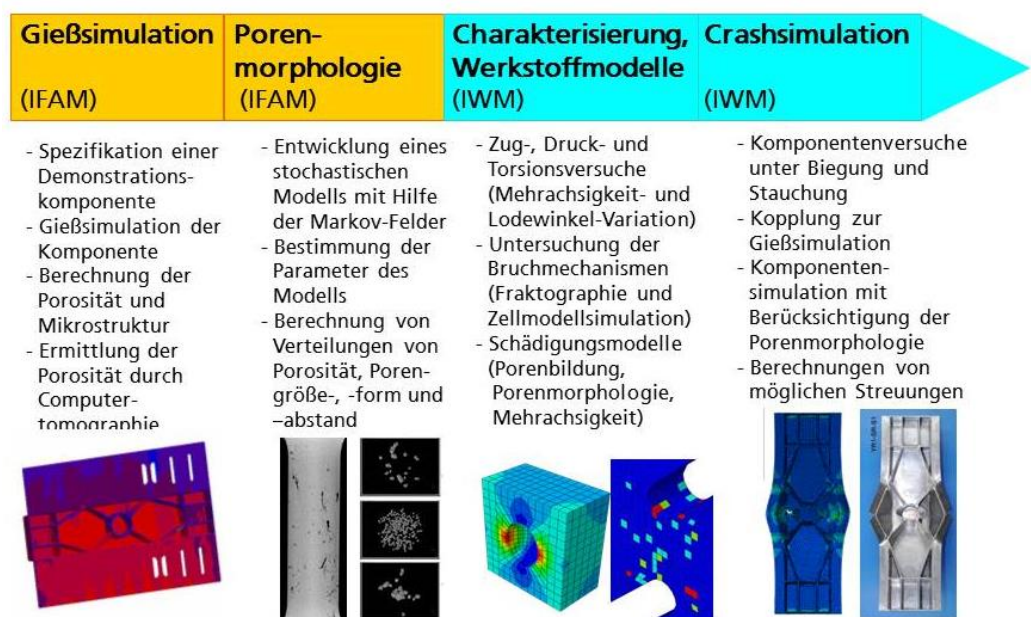


Bild 7: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

#### Arbeitspaket 1: Gießsimulation

- Ausgehend vom derzeitigen Stand bei Legierungsentwicklung, Gießverfahren und Komponentenkonstruktion in der Automobilindustrie werden zwei Aluminium Demonstrationskomponenten ausgewählt und bei Fraunhofer IFAM hergestellt.
- Gießsimulationen werden zur Berechnung von Porosität ohne Berücksichtigung des stochastischen Effekts durchgeführt.

#### Arbeitspaket 2: Porenmorphologie

- Ein stochastisches Modell zur Berechnung von Poren-Morphologie wird mit Hilfe der Markov-Felder entwickelt und verwendet.
- Zur Überprüfung der Gießsimulation und zur Kalibrierung des stochastischen Modells werden Porosität und Porenformen in den Aluminium-Komponenten durch Computertomographie ermittelt.

- Unter Benutzung des stochastischen Modells werden verschiedene Variationen von Porenverteilungen mit Berücksichtigung des stochastischen Effekts berechnet und für die Crashsimulation zur Verfügung gestellt.

#### Arbeitspaket 3: Charakterisierung, Werkstoffmodelle

- Es wird eine gezielte Werkstoffcharakterisierung an aus den Komponenten entnommenen Proben und eine nachfolgende Werkstoffmodellierung mit dem Ziel durchgeführt, die Einflüsse der Mikro-Defekte auf das Verformungs- und Versagensverhalten unter Crashbelastung vollständig zu beschreiben.
- Bruchmikromechanismen unter verschiedenen Mehrachsigkeiten werden durch Fraktographie und Zellmodellsimulationen untersucht.
- Ein Versagensmodell wird zur Beschreibung der Einflüsse der Porosität, Porenmorphologie und Mehrachsigkeit auf das Versagen von Aluminiumgusswerkstoffen entwickelt und in einen Crashcode implementiert.

#### Arbeitspaket 4: Crashsimulation

- Die Einflüsse der Gießprozesse über Mikrostruktur und Porenmorphologie auf das Komponentenverhalten werden anhand von Komponentenversuchen unter Biegung und Stauchung experimentell und numerisch untersucht.
- Die Auswirkungen einer Kopplung zwischen Gieß- und Crashsimulation auf die Voraussagen des Komponentenverhaltens werden durch Vergleich mit Ergebnissen der Simulation, die auf homogen verteilten lokalen Eigenschaften beruht, quantifiziert.
- Am Ende des Projekts wird Industrieanwendern eine Methode für durchgängige Simulation einschließlich des stochastischen Modells zur Berechnung von Porenmorphologie und des Versagensmodells für die Crashsimulation zur Verfügung gestellt.

## 4.2 Werkstoff und Demonstratoren

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde die Legierung Castasil®-37 (AlSi9Mn) für die geplanten Untersuchungen festgelegt. Die chemische Zusammensetzung des Aluminiumwerkstoffs wurde mit einem Vakuum-Emissionsspektrometer geprüft und die Ergebnisse sind im Anhang angegeben.

Als Demonstratoren wurden eine sogenannte Y-Box und ein generischer Karosserieknoten (oder Gussknoten), die bereits in einem EU-Projekt [WEI10, WEI11] verwendet wurden, ausgewählt. Bild 8 und Bild 9 zeigen die beiden gegossenen Demonstratoren.





Bild 8: Demonstrator Y-Box



Bild 9: Demonstrator Karosserieknoten

## 5 Spezifikation, Herstellung und Röntgenprüfung von Demonstrationskomponenten (IFAM)

### 5.1 Castasil®-37

Für das Vorhaben wurden vom IFAM 2000 kg der Aluminiumlegierung Castasil®-37 beschafft. Die Hälfte der Werkstoffmenge wurde dem Gießerei-Institut der RWTH Aachen für das Abgießen der Y-Box zur Verfügung gestellt. Den Rest verwendete das Fraunhofer IFAM zum Abgießen des Karosserieknotens. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs und die physikalischen Eigenschaften aus Literatur sind in Bild 10 dargestellt.

Chemische Zusammensetzung von Castasil-37, AISi9Mn											
[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Mo	Zr	Ti	Sr	andere gesamt
min.	8,5			0,35						0,006	
max.	10,5	0,15	0,05	0,60	0,06	0,07	0,3	0,3	0,15	0,025	0,10

Physikalische Eigenschaften von Castasil-37, AISi9Mn			
		Einheit	Gültigkeitsbereich
Erstarrungsintervall	595 – 550	°C	
Dichte	2,69	kg/dm <sup>3</sup>	20 °C
Elastizitätsmodul	70 – 80	GPa	20 °C
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	21	1/K · 10 <sup>-6</sup>	20 – 200 °C
Thermische Leitfähigkeit	1,39 – 1,68	W/(K · cm)	20 – 200 °C
Elektrische Leitfähigkeit	21 – 26	m/(Ω · mm <sup>2</sup> )	20 °C
Wechselfestigkeit (r = -1) Gusszustand (F)	86	MPa	10 <sup>6</sup> Zyklen
Auswertemethode von 2007			

Bild 10: Chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften Castasil®-37

Die für die Gießsimulation notwendigen Werkstoffparameter lagen für Castasil®-37 in den eingesetzten Simulationsprogrammen (MAGMA, ProCAST) nicht vor. Ersatzweise



wurden die Parameter des ähnlichen Werkstoffs Silafont-36 eingesetzt. Die Eigenschaften sind in Bild 11 dargestellt.

**Chemische Zusammensetzung von Silafont-36, AlSi9MgMn**

[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	andere gesamt
min.	9,5			0,5	0,1		0,04	0,010	
max.	11,5	0,15	0,03	0,8	0,5	0,07	0,15	0,020	0,10

**Physikalische Eigenschaften von Silafont-36, AlSi9MgMn**

		Einheit	Gültigkeitsbereich
Erstarrungsintervall	590 – 550	°C	
Dichte	2,64	kg/dm <sup>3</sup>	20 °C
Elastizitätsmodul	70 – 80	GPa	20 °C
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient	21	1/K · 10 <sup>-6</sup>	20 – 200 °C
Thermische Leitfähigkeit	1,39 – 1,68	W/(K · cm)	20 – 200 °C
Elektrische Leitfähigkeit	21 – 26	m/(Ω · mm <sup>2</sup> )	20 °C
Dauerfestigkeit (r = -1) Gusszustand (F)	89	MPa	10 <sup>6</sup> Zyklen

Bild 11: Chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften Silafont-36

## 5.2 Y-Box (Gießversuche bei Gießerei-Institut der RWTH Aachen)

160 Y-Boxen aus Castasil®-37 wurden im Gießerei-Institut der RWTH Aachen (GI) im Auftrag vom IFAM gegossen, da die Gussform für das IFAM nicht zur Verfügung gestellt werden konnte. Die Gießparameter können aus dem Bild 12 entnommen werden. 20 Gussteile des Parametersatzes 2 wurden für das Projekt wegen zu großer, sichtbarer Defekte nicht verwendet. Versuchsreihen und -parameter sind in Bild 12 angegeben und eine abgegossene Komponente wird in Bild 13 dargestellt.

Versuchsreihe	Gießdatum	Parametersatz	Anzahl Teile	Ort
1	16.10.2012	1	1.1 – 1.60	Alle an IFAM verschickt
2	18.10.2012	2	2.1 – 2.50	20 Teile an Ford; 30 Teile an IFAM verschickt
3	24.10.2012	1	3.1 – 3.65	5 Teile am GI; 60 Teile an IFAM verschickt
4	25.10.2012	1	4.1 – 4.45	Alle an IFAM verschickt

Parameter	Parametersatz 1	Parametersatz 2
Aktive Gießkammerlänge	556 mm	556 mm
Wegepunkt x <sub>1</sub>	260 mm	260 mm
Wegepunkt x <sub>2</sub>	355 mm	355 mm
Wegepunkt x <sub>3</sub>	370 mm	370 mm
Wegepunkt x <sub>4</sub>	506 mm	506 mm
Wegepunkt x <sub>5</sub>	521 mm	521 mm
Wegepunkt x <sub>6</sub>	531 mm	531 mm
Kolbengeschwindigkeit v <sub>1</sub>	0,59 m/s	0,59 m/s
Kolbengeschwindigkeit v <sub>2</sub>	0,59 m/s	0,59 m/s
Kolbengeschwindigkeit v <sub>3</sub>	2,1 m/s	2,1 m/s
Kolbengeschwindigkeit v <sub>4</sub>	2,1 m/s	2,1 m/s
Kolbengeschwindigkeit v <sub>5</sub>	1,0 m/s	1,0 m/s
Kolbengeschwindigkeit v <sub>6</sub>	0 m/s	0 m/s
Nachdruck	350 bar	150 bar
Schmelztemperatur im Ofen	720 °C	720 °C
Gießtemperatur (Temperatur beim Füllen der Gießkammer)	700 °C	700 °C
Temperatur bewegliche Formhälfte (gemessen) vor Gießbeginn	161 °C	215 °C
Temperatur feste Formhälfte (gemessen) vor dem Gießbeginn	156 °C	195 °C
Temperatur beider Formhälften eingestellt am Heiz-/Kühlergerät	200 °C	300 °C
Zykluszeit	138 s	138 s
Dichteindex Schmelze	<3	<3

Bild 12: Versuchsreihen und Gießparameter für die Y-Box

NADIA – Bauteil Oberseite

Folie 2  
Dipl.-Ing. Veronika Grotten  
v.grotten@gi.rwth-aachen.de



NADIA-Bauteilherstellung



NADIA – Bauteil Unterseite

Folie 3  
Dipl.-Ing. Veronika Grotten  
v.grotten@gi.rwth-aachen.de



NADIA-Bauteilherstellung



Bild 13: Demonstrator Y-Box (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

### 5.3 Karosserieknoten (Werkzeugmodifikation, Gießversuche bei IFAM Bremen)

Das Gießwerkzeug für den Karosserieknoten wurde dem IFAM durch die Firma Martinrae/Honsel zur Verfügung gestellt. Danach erfolgte eine Beurteilung der prinzipiellen Adaptierbarkeit auf der verwendeten Bühler SC N/66 Kaltkammermaschine. Dabei ging es insbesondere um Abmaße zwischen den Säulen und die Bestimmung der Gießposition.

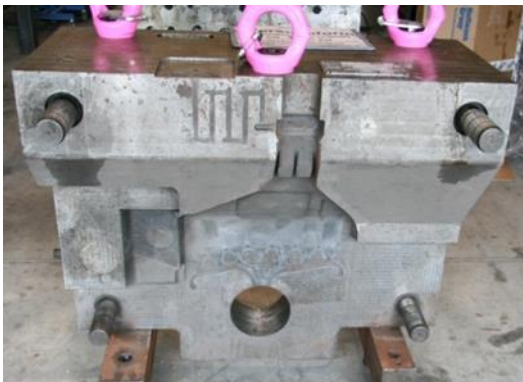


Bild 14: Feste Seite der Unterschale



Bild 15: Bewegliche Seite der Unterschale

Das IFAM führte am Werkzeug folgende Maßnahmen durch:

- Anpassung des Auswerfersystems an das Lochbild 1 unserer Maschine (Gießposition 300)
- Anfertigung der passenden Auswerferstangen
- Erneuerung der Auswerfer
- Einpassung einer beheizbaren Füllbüchse (vom IFAM gestellt)

- Einpassung (Befestigung) eines geeigneten Entlüftungssystems (Chill-Block) (vom IFAM gestellt)

- Reinigung der Kavität

Diese Arbeiten wurden von der Fa. AWEBA Werkzeugbau durchgeführt.

Anschließend wurden 231 Karosserieknoten aus Castasil-37 im IFAM gegossen:

- 20 Teile mit geringer Gießgeschwindigkeit ohne Vakuum
- 87 Teile mit geringer Gießgeschwindigkeit mit Vakuum
- 95 Teile mit hoher Gießgeschwindigkeit mit Vakuum
- 29 Teile mit hoher Gießgeschwindigkeit ohne Vakuum

Versuchsreihen und -parameter sind in Bild 16 und eine abgegossene Komponente ist in Bild 17 dargestellt.

Gießversuche Gussknoten									
Anzahl	Nr.	Geschw. m/s	Druck bar	Schmelze Grad C.	Vakuum	Datum	Variante	Anzahl V.	Bemerkungen
20	31-49	1,5	500	740	nein	04.03.2013	A	20	Kaltläufe
15	56-70	1,5	500	740	ja	04.03.2013	B	87	Kaltläufe
32	72-103	1,5	500	740	ja	07.03.2013	B		
13	105-117	1,5	500	730	ja	12.03.2013	B2		
12	119-130	1,5	500	735	ja	14.03.2013	B3		
15	132-146	1,5	500	744	ja	15.03.2013	B4		
10	150-159	4	400	740	ja	18.03.2013	C	95	Komplette Füllung
12	161-172	4	400	740	ja	19.03.2013	C		
14	174-187	4	400	740	ja	19.03.2013	C		
12	189-200	4	400	740	ja	20.03.2013	C		
9	202-210	4	400	740	ja	20.03.2013	C		
12	212-223	4	400	740	ja	21.03.2013	C		
13	225-237	4	400	740	ja	21.03.2013	C		
13	239-251	4	400	740	ja	22.03.2013	C		
14	253-266	4	400	740	nein	25.03.2013	D	29	Komplette Füllung
15	268-280	4	400	740	nein	25.03.2013	D		
								231	
Werkzeugmangel: Trennfläche im Schrägbereich nicht dicht, starke Gratbildung									

Bild 16: Versuchsreihen und Gießparameter für die Karosserieknoten



Bild 17: Demonstrator für den Karosserieknoten

## 5.4 Röntgenprüfung Y-Box (Gießerei-Institut der RWTH Aachen)

Durch das Gießerei-Institut der RWTH Aachen wurden stichprobenweise Röntgendurchleuchtungen zur Porositätsprüfung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 18 dargestellt. Dabei konnte nur qualitativ Porosität nachgewiesen werden.

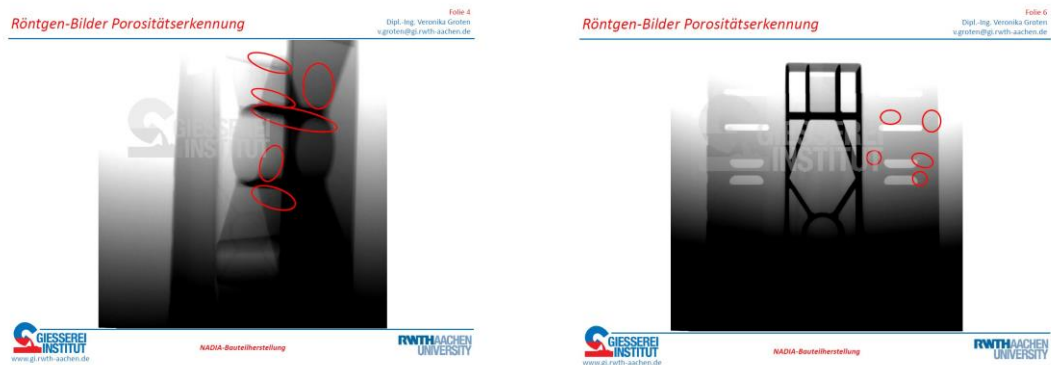


Bild 18: Röntgendurchleuchtung zur Porositätsprüfung Y-Box

## 5.5 Röntgen-CT Y-Box (Ford)

Die Firma FORD beauftragte die TPW Prüfzentrum GmbH in Neuss CT-Scans an 20 ausgewählten Y-Boxen durchzuführen. Dies erfolgte durch eine Phoenix/X-Ray (Bild 20) mit einer Auflösung von ungefähr 300 µm.

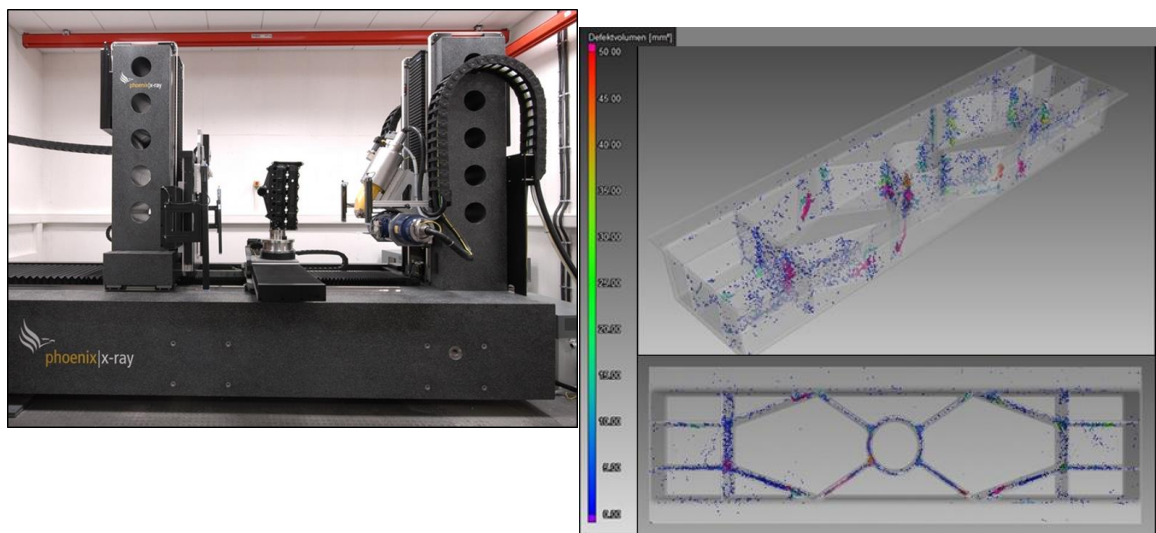


Bild 19: Phoenix/X-Ray-Röntgen-CT-Anlage zur Untersuchung der Y-Box

Bild 20: Defektvolumenverteilung aus Röntgen-CT der Y-Box

Die CT-Bilder zeigen ein großes Defektvolumen in den Rippen der Y-Box (Bild 20).



## 5.6 Röntgen Mikro-CT Y-Box (IIS/EZRT)

Am Fraunhofer Zentrum für Röntgentechnik in Fürth (IIS/EZRT) steht eine Mikro-CT (Bild 23) mit einer Auflösung von unter  $10\ \mu\text{m}$  zur Verfügung. Ein Scan des gesamten Bauteils war nicht möglich, sodass an ausgewählten Bereichen der Y-Box Proben entnommen wurden. Die Entnahmepositionen und die entnommenen Zugproben sind in Bild 21 und Bild 22 dargestellt.

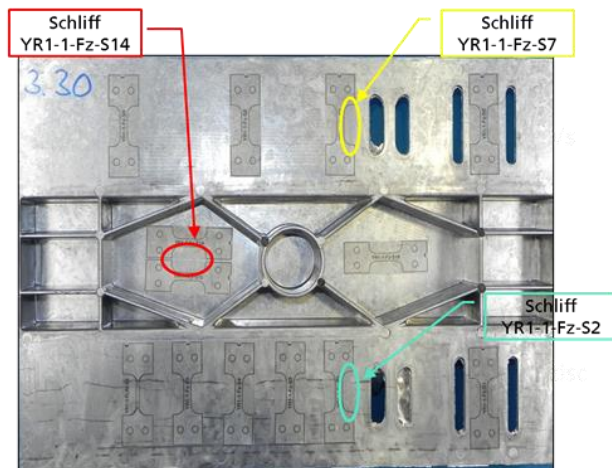


Bild 21: Positionen für die Probenentnahme für Mikro-CT-Scans



Bild 22: Entnommene Zugproben für Mikro-CT-Scans

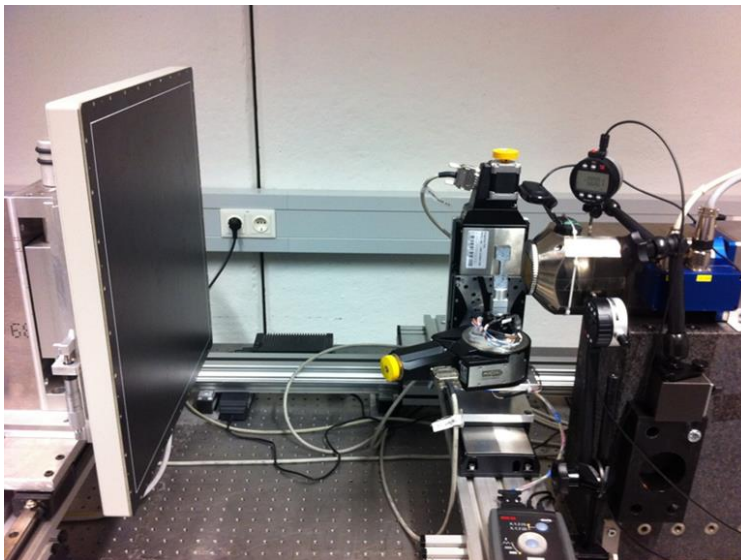


Bild 23: Mikro-CT-Anlage Fraunhofer IIS/EZRT

3D-Abbildungen von vier ausgewählten Scans sind in Bild 24 dargestellt. Das untersuchte Volumen beträgt  $3\text{mm} \times 5\text{mm} \times 10\text{mm}$ . Deutlich ist der inhomogene und statistische Charakter der lokalen Porenverteilung zu erkennen.

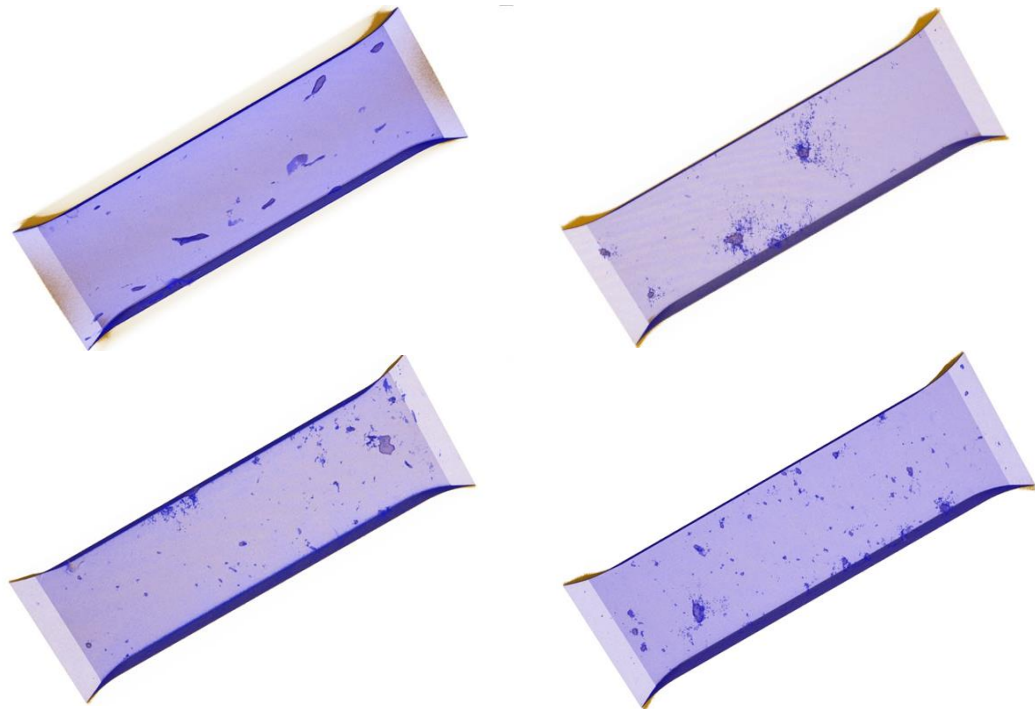


Bild 24: CT-Scans der entnommenen Proben (Fenstergröße: 3mm x 5mm x 10mm)

Im 2D-Schnitt (Bild 25) sieht man, dass in dieser Auflösung die örtliche Verteilung der Porosität nicht mehr durch eine stetige Funktion beschrieben werden kann.

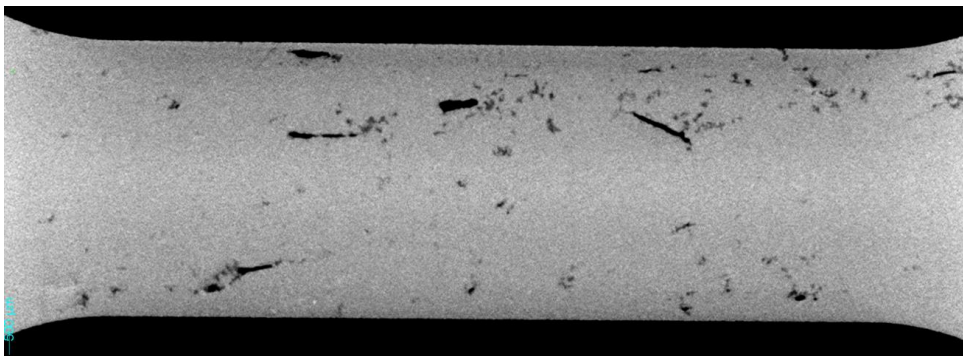


Bild 25: Porositätsverteilung im 2D-Schnitt

## 5.7 Röntgenprüfung des Karosserieknötens (IFAM)

Durch das IFAM wurden stichprobenweise Röntgendurchleuchtungen zur Porositätserkennung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 26 dargestellt. Dabei konnte nur qualitativ Porosität nachgewiesen werden. Mikro-CT-Untersuchungen konnten durch die Verzögerung wegen des Werkzeugumbaus nicht durchgeführt werden. Weitere Röntgenbilder findet man in Absatz 6.2.

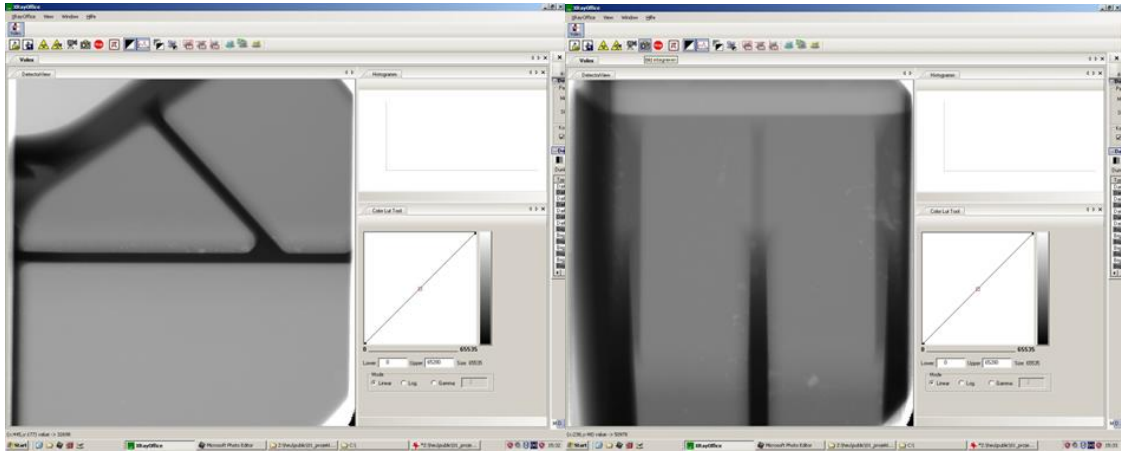


Bild 26: Röntgendurchleuchtung des Karosserieknotts

## 6 Gießsimulation der Demonstrationskomponenten (IFAM)

### 6.1 Y-Box (MAGMA, GI)

Gießsimulationen an der Y-Box wurden mit MAGMA durch das Gießerei-Institut der RWTH Aachen durchgeführt. Zur Simulation wurden die in Absatz 5.2 angegebenen Gießparameter verwendet. Bild 27 zeigt die Temperaturverteilungen im Gussteil für zwei Parametersätze nach der Formfüllung ( $t=1,3$  s) und Bild 28 nach Abkühlung ( $t=17$  s). Die Bauteile des zweiten Parametersatzes wurden nicht verwendet. Das Angussystem ist aus Vertraulichkeitsgründen (GI) nicht zu sehen. Man erkennt die Lage aber deutlich an den heißeren Temperaturen am unteren Flansch.

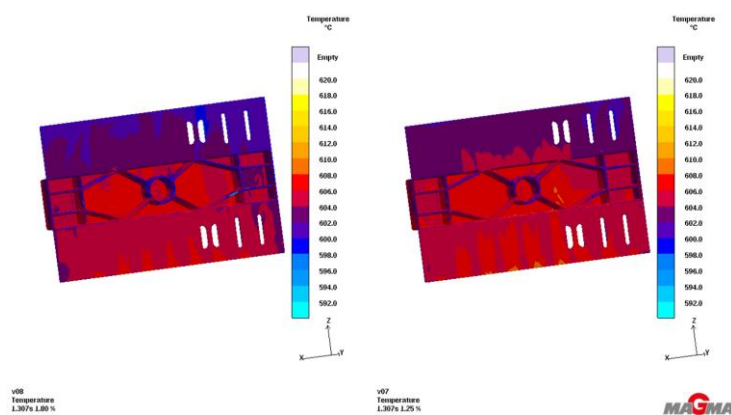


Bild 27: Temperaturverteilungen in Y-Box nach 1,3 s aus zwei unterschiedlichen Parametersätzen

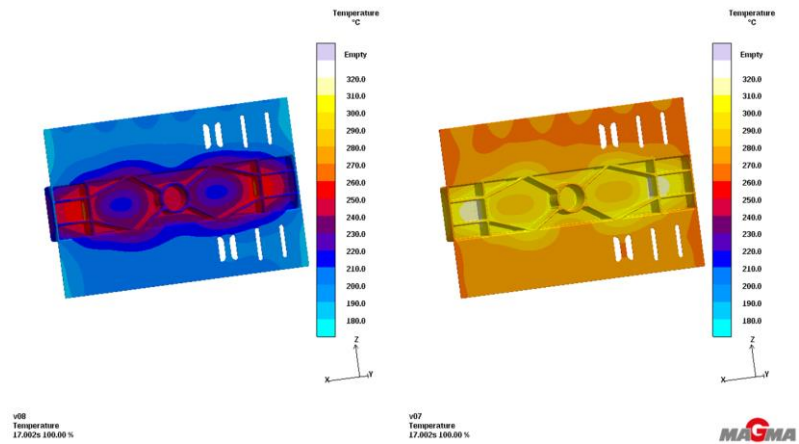


Bild 28: Temperaturverteilungen in Y-Box nach der Abkühlung (t=17 s) für zwei Parametersätze

Die Berechnung der Schrumpfungsporosität (Bild 29) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den CT-Scans aus Absatz 5.5. Hier tritt die Porosität hauptsächlich in und an den Rippen auf. Der scheinbar statistische Charakter beruht auf numerischen Ungenauigkeiten in der Simulation. Auch hier ist die quantitative Auswertung der Simulationsdaten zweifelhaft.

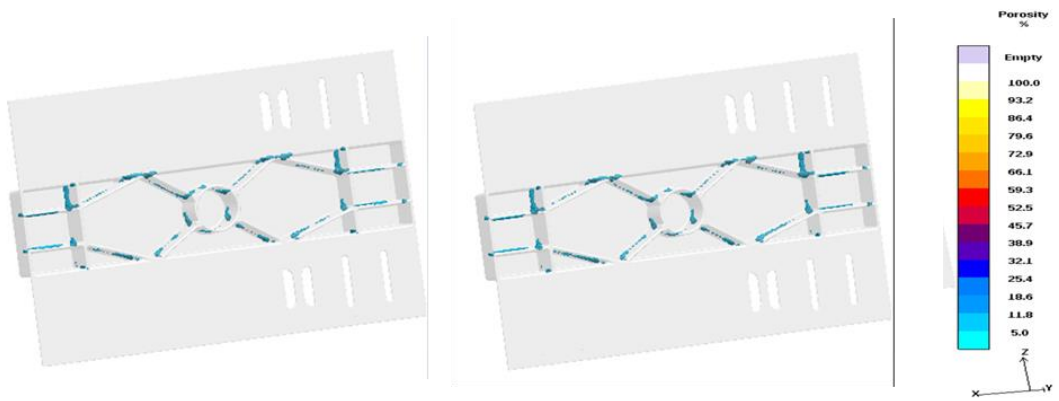


Bild 29: Örtliche Verteilung der Schrumpfungsporosität in Y-Box (Parametersatz 1 links, 2 rechts, s. Bild 12)



## 6.2 Karosserieknoten (MAGMA, IFAM)

Die Gießsimulation für den Karosserieknoten wurde am IFAM mit den in 5.3 angegebenen Gießparametern durchgeführt. Die Geometriedaten des Werkzeugs stellte die Firma MAGMASOFT zur Verfügung. Allerdings fehlte die Geometrie des Angussystems. In einem ersten Versuch wurden die Geometriedaten des Angussystems mit einem 3D-Scanner ermittelt (Bild 30). Leider gab es große Ungenauigkeiten an den Anschnitten.

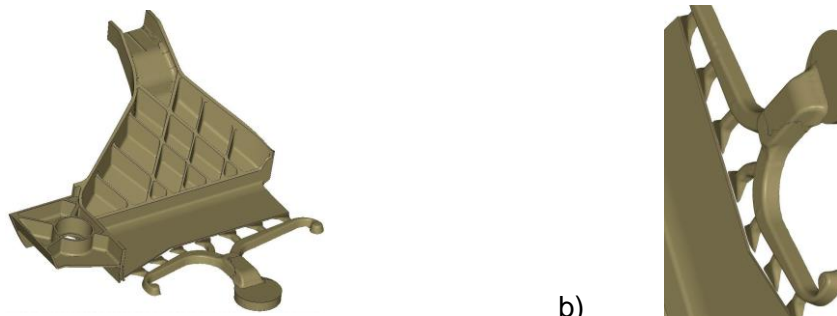


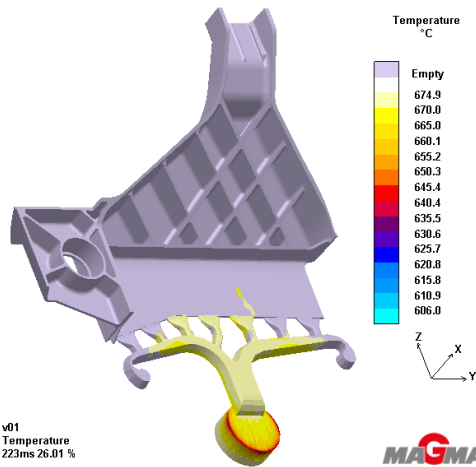
Bild 30: Unbrauchbare Geometrie mit 3D-gescanntem Angussystem. a) Karosserieknoten mit Angussystem, b) Angussystem

Die Nachkonstruktion mit einem CAD-System durch händische Messungen am Original hatte schließlich Erfolg (Bild 31).

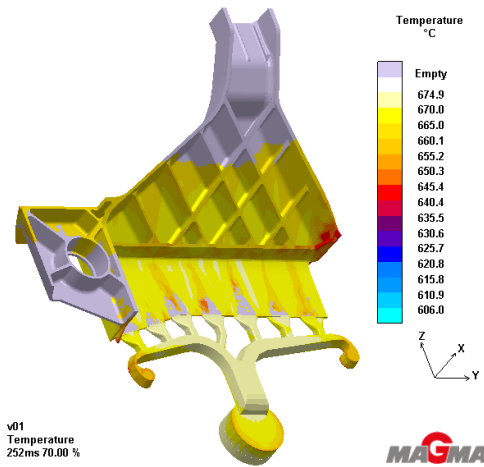


Bild 31: Geometrie mit nachkonstruiertem Angussystem. a) Karosserieknoten mit Angussystem, b) Angussystem

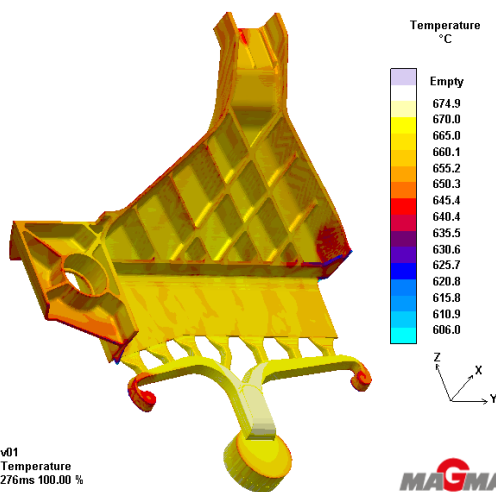
Bild 32 a zeigt die Temperaturverteilung beim Beginn des Gießprozesses, Bild 32 b die nach 29 ms. Die Formfüllung wird nach 53 ms erreicht (Bild 32 c). Die Abkühlung nach ca. 15 s ist in Bild 32 d dargestellt.



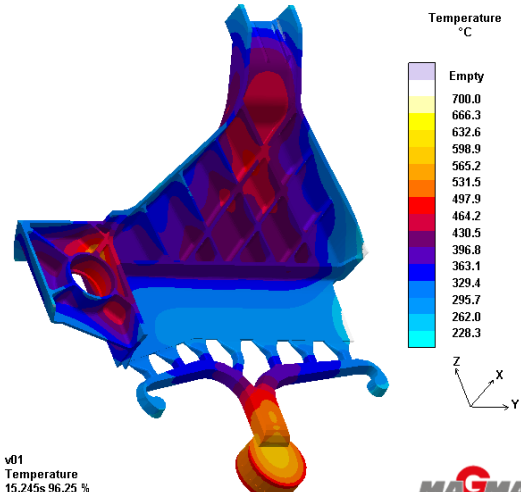
a) beim Beginn des Gießprozesses



b) nach 29 ms



c) nach 53 ms (Formfüllung)



d) nach ca. 15 s Abkühlung

Bild 32: Temperaturverteilung im Gussteil zu verschiedenen Gießzeiten a) beim Beginn des Gießprozesses, b) nach 29 ms, c) beim Formfüllung, nach ca. 15 s Abkühlung

Die Berechnung der Schrumpfungsporosität (Bild 33) zeigt Übereinstimmungen mit den Röntgenprüfungen (Absatz 5.7). Auch hier ist der scheinbar statistische Charakter auf numerische Ungenauigkeiten zurückzuführen (Bild 34).

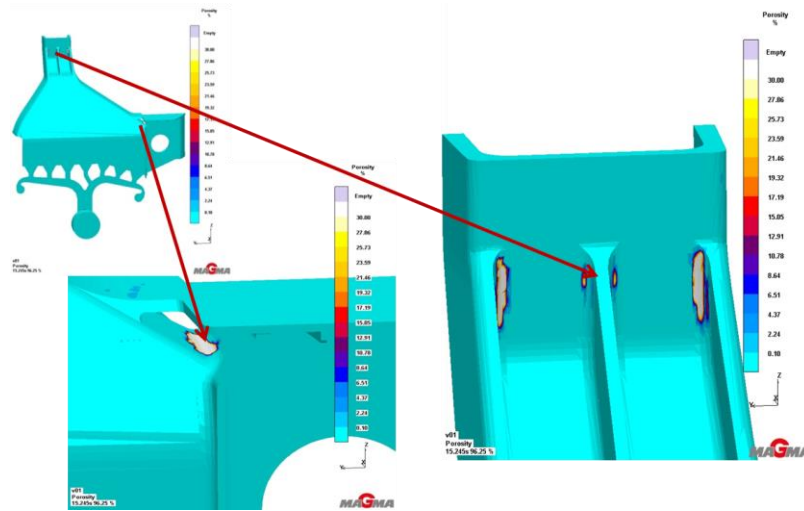


Bild 33: Berechnete Verteilung der Schrumpfungsporosität im Karosserieknoten

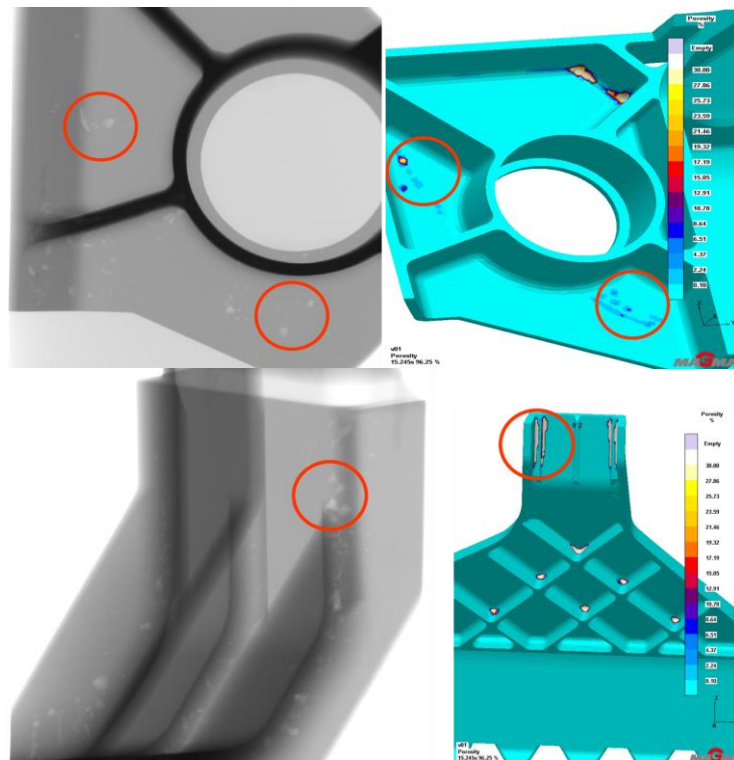


Bild 34: Scheinbar statistisch verteilte Poren in der Simulation

Ein Ergebnis des Vergleichs zwischen Röntgenuntersuchungen und Simulation der Schrumpfungsporosität ist, dass kontinuumsmechanische Ansätze den statistischen Charakter der Porosität (Porenmorphologie) in feiner Auflösung ( $< 1 \text{ mm}$ ) nicht mehr beschreiben können. Hier müssen stochastische Materialmodelle helfen (Absatz 7).

### 6.3 Karosserieknoten (ProCAST, ESI)

Die Gießsimulation wurde auch von der Fa. Calcom ESI mit dem kommerziellen Programm ProCAST durchgeführt. Die Geometrie und die Prozessinformation wurden vom IFAM übergeben. Im Gegensatz zur FDM (Finite-Differenzen-Methode) Magma-Simulation handelt es sich bei der ProCAST-Simulation um eine FEM (Finite-Elemente)-Berechnung. Bild 35 zeigt die verwendete Geometrie und einen Ausschnitt, um die Qualität der Vernetzung darzustellen. Bei der Simulation wurde die Gießkammer mit verwendet, um eine realistischere Simulation des Füllverhaltens zu ermöglichen.

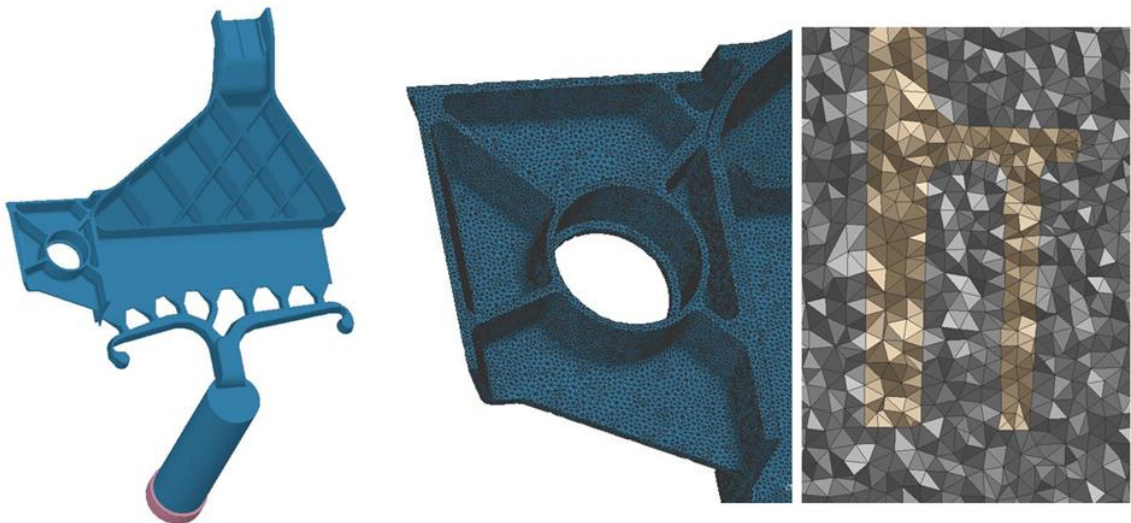


Bild 35: Links: Bei der ProCAST Simulation verwendete Geometrie, Rechts: Detail Ansichten der Vernetzung (Oberfläche Bauteil, Schnittansicht Vernetzung)

Bild 36 zeigt einen Ausschnitt der Formfüllung über die Gießkammer. Die einströmende Schmelze wird hier nicht über eine Randbedingung dargestellt, sondern über eine teilgefüllte Gießkammer, bei der die Schmelze über eine Kolbenbewegung in das Bauteil eingedrückt wird. In der Dargestellung sieht man deutlich, dass das Geschwindigkeitsprofil der Füllung nicht optimal ausgewählt wurde. Ein Teil der Schmelze läuft vor und eine Blase verbleibt in der Gießkammer, die zu einem späteren Zeitpunkt in die Kavität eingebracht wird, was mit einem Risiko der Einbringung von Oxidhäuten verbunden ist.

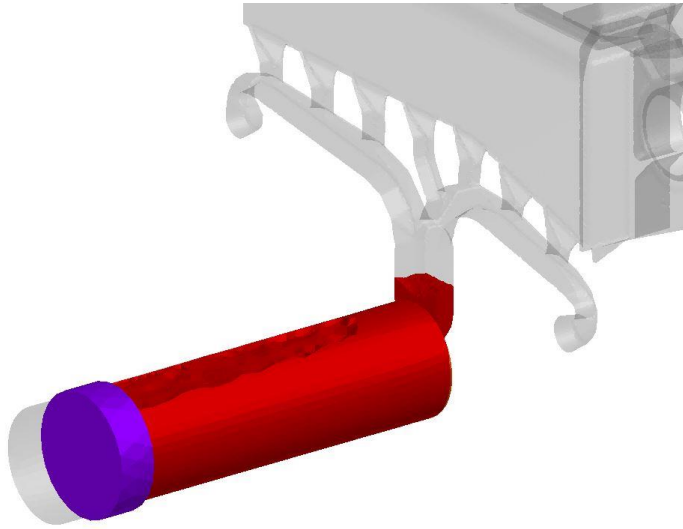


Bild 36: Füllung inklusive Betrachtung der Gießkammer

Bild 37 zeigt sehr deutlich das prinzipielle Füllverhalten des Bauteils. Die Schmelze schießt durch die Unterseite in den Bauteilhohlraum. Sie wird an der Rückwand reflektiert und füllt dann die Rippenprofile von der Rückseite nach vorne. Auch auf der im Bild linken Bauteilseite bildet sich eine Verwirbelung und auch diese Seite wird von der Rückseite aus nach vorne gefüllt.

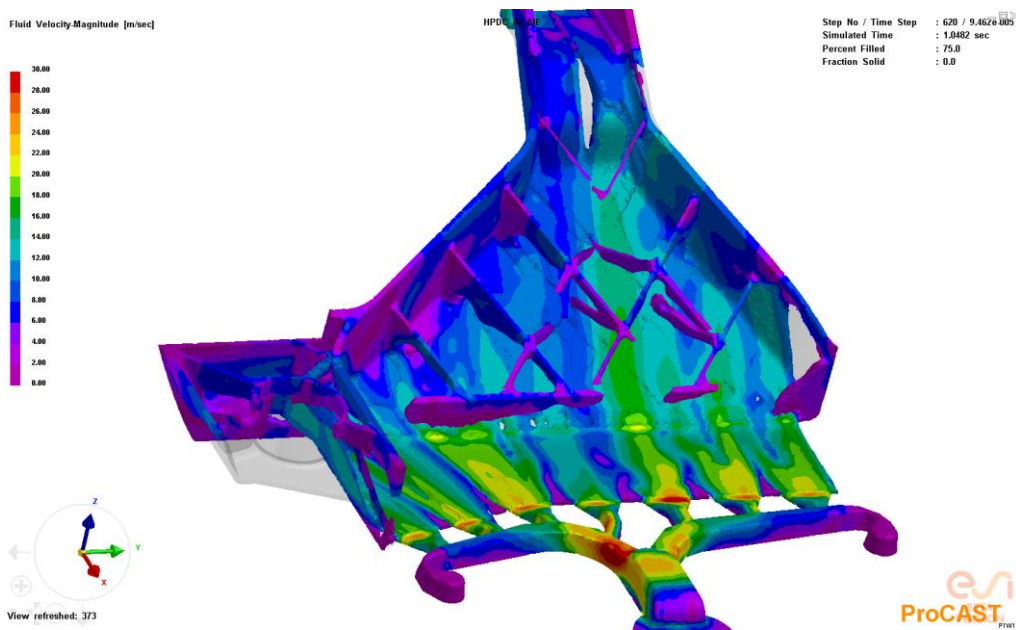


Bild 37: Prinzipielles Füllverhalten des Bauteils



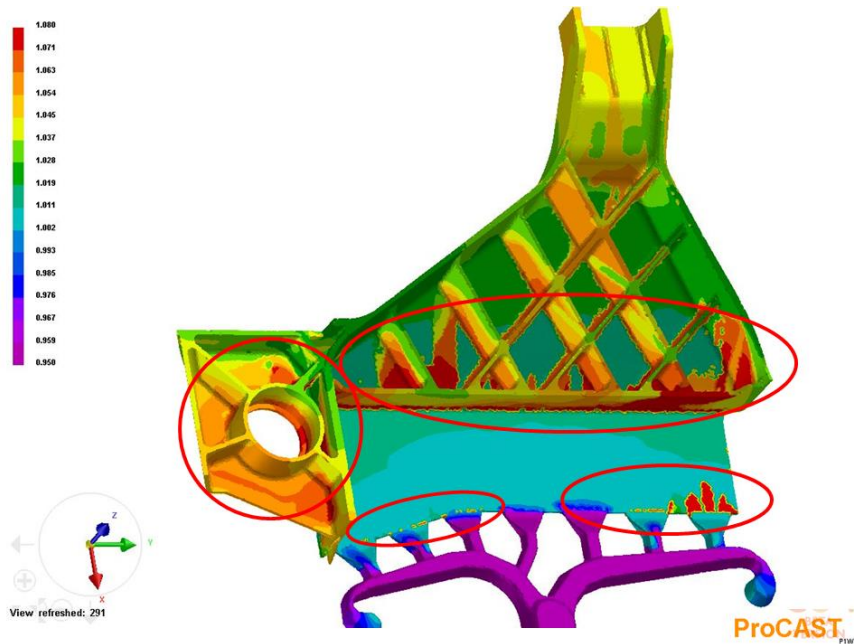


Bild 38: Lokale Füllzeit

Einen Gesamtüberblick über das Füllverhalten des Bauteils gibt die lokale Füllzeit (Bild 38). Kritische Bereiche sind rot markiert. Sowohl der vordere Rippenbereich als auch die linke Seite des Bauteils werden erst zu einem späteren Zeitpunkt gefüllt. Zu bemerken ist auch, dass der Anschnittbereich nicht optimal ausgelegt erscheint, da dort Bereiche zu bemerken sind, die lange ungefüllt bleiben, so dass z.B. Lufteinschlüsse über den gesamten Füllvorgang in das Bauteil eingespült werden können.

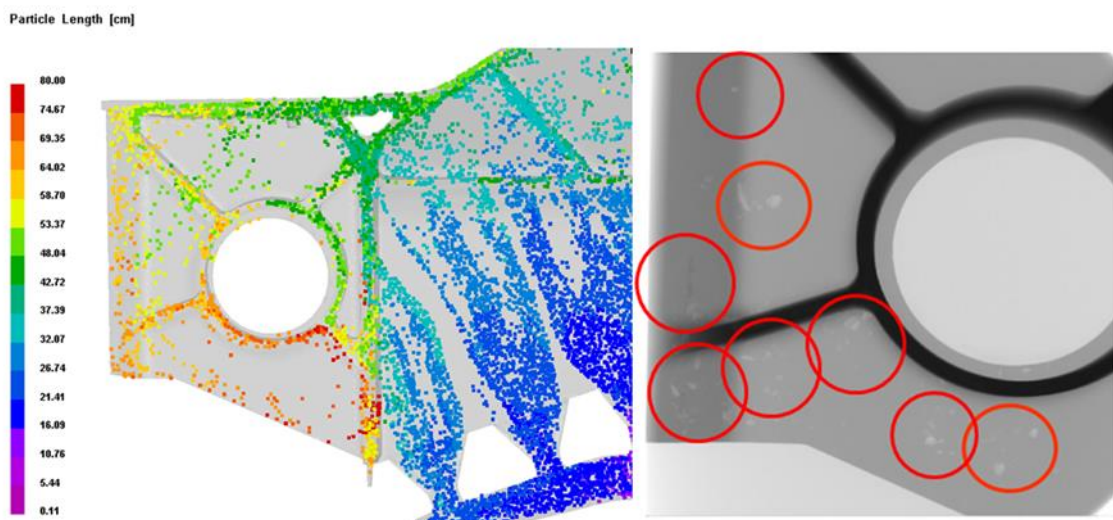


Bild 39: Auswertung der Füllung mit einem Partikelverfahren im Vergleich zu Röntgenaufnahmen der entsprechenden Lokalität

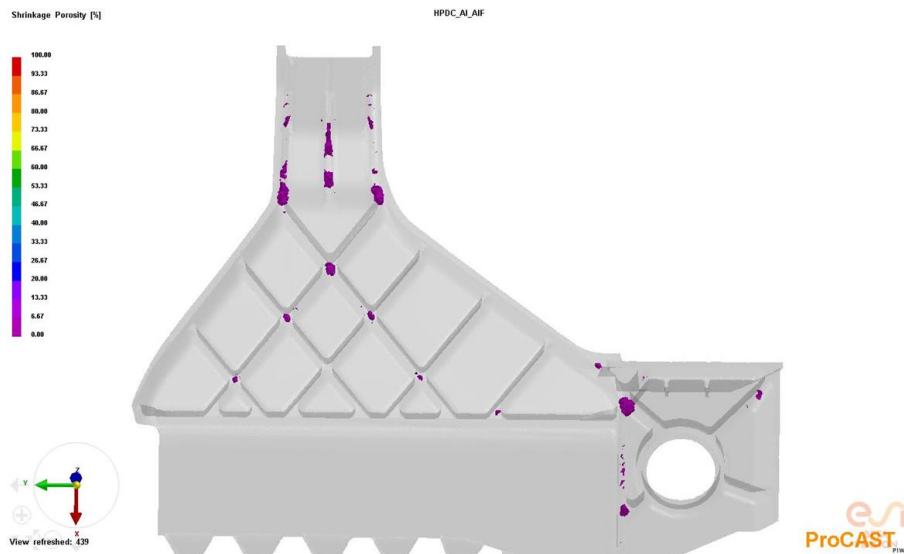


Bild 40: Schrumpfporenverteilung im Bauteil

Das Ergebnisse der ProCAST Gießsimulation wurden mit einem Partikelverfahren untersucht. Bild 39 zeigt die Länge, die ein Partikel im berechneten Strömungsfeld durchläuft, um die unterschiedlichen Orte in der Bauteilkavität zu erreichen. Partikel mit einer langen Fließlänge spiegeln dabei ein erhöhtes Auftreten von Oxiden wider. Dies lässt sich auch gut im Vergleich mit Röntgenaufnahmen der entsprechenden Stellen beobachten.

Bild 40 zeigt die von der ProCAST-Simulation ermittelte Porositätsverteilung im Bauteil. Porositäten befinden sich im Bereich von Materialanhäufungen.

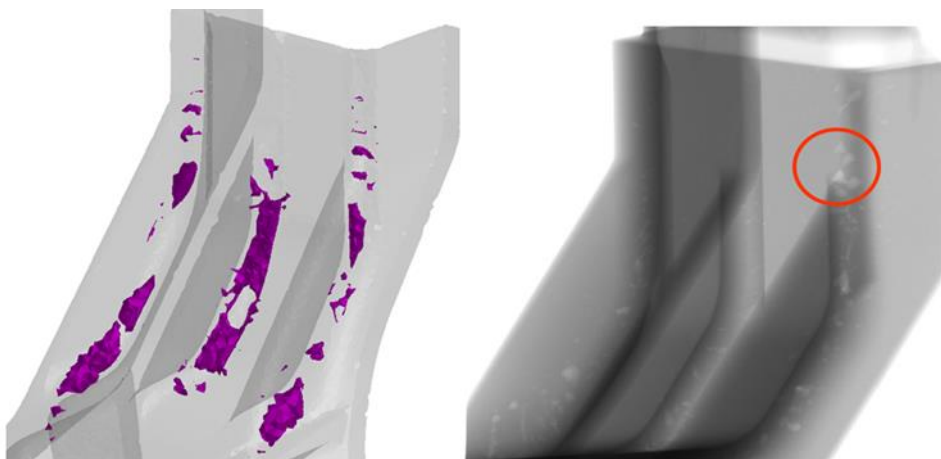


Bild 41: Vergleich der mit ProCAST simulierten Porosität (links) mit einer Röntgendarstellung (rechts) der entsprechenden Lokalität

Bild 41 zeigt die in der Simulation ermittelte Porosität im Vergleich zu einer Röntgenaufnahme der entsprechenden Lokalität.

## 7 Entwicklung eines stochastischen Modells zur Beschreibung der Porenmorphologien (IFAM)

### 7.1 Porenmorphologien und Markov-Felder (Ising-Modell)

Grundlage der folgenden Überlegungen ist, dass ein Werkstoff nicht mehr als homogen und kontinuierlich betrachtet wird, sondern als inhomogen, diskret und statistisch. Dieses Materialmodell lässt eine kontinuumsmechanische Betrachtungsweise nicht mehr zu. Als Ersatzmodell kann angenommen werden, dass ein Werkstoff sich aus einer endlichen Anzahl diskreter Phasen zusammensetzt, die räumlich eine elementare Ausdehnung besitzen, also nicht – wie in der euklidischen Geometrie – zu einem Punkt, einer Linie oder einer Fläche zusammenschrumpfen können. Die Abbildung aus dem euklidischen Raum auf eine solche Topologie kann durch eine räumliche Parkettierung (z.B. reguläres Netz) erfolgen. Jede elementare Zelle hat eine Materialeigenschaft, die innerhalb der Zelle örtlich konstant ist. Die elementare Zelle hat eine bestimmte Anzahl (Koordinationszahl) von nächsten Nachbarn, mit denen sie wechselwirkt. In der Festkörperphysik spricht man im atomaren Bereich von sog. Wigner-Seitz-Zellen. Eine statistische Verteilung von Materialeigenschaften (Phasen) auf das topologische System von Elementarzellen kann dann durch eine Energieformulierung angesetzt werden. Porosität kann als Zwei-Phasen-System betrachtet werden, mit einer Festkörper- und einer Hohlraumphase. Eine örtliche Verteilung kann dann durch ein sogenanntes Gibbs-Potenzial und die Wechselwirkung von Poren und Nichtporen über ein Art Bindungsenergie  $U(x)$  beschrieben werden (Bild 42), die ggf. sogar Anisotropie berücksichtigt. Diese Zufallsfelder werden als Markov-Felder bezeichnet.



$$U(x) = -\beta_1 \sum_{\langle i,j \rangle} x_i x_j - \beta_2 \sum_{\begin{smallmatrix} i \\ j \end{smallmatrix}} x_i x_j.$$

Some typical patterns drawn from this version are shown in Figure 3 for different combinations of  $\beta_1$  and  $\beta_2$ .  $\square$



FIGURE 2. Samples from an Ising model on a lattice with first-order neighborhood system and increasing  $\beta = 0$  (in that case  $X_i$ s are i.i.d., and sampling is direct), 0.7, 0.9, 1.1, 1.5, and 2.



FIGURE 3. Samples from an anisotropic Ising model on a lattice with first-order neighborhood system and  $(\beta_1, \beta_2) = (5, 0.5), (5, 0.1), (1, -1), (-1, -1)$ , respectively.

Bild 42: Realisierung von Markov-Feldern über die Energieformulierung  $U(x)$

Die Gesamtsumme  $E$  über die Wechselwirkungsenergie  $U(x)$  für alle Elementarzellen eines Kontrollvolumens kann als Zustandsgröße für eine Porenmorphologie betrachtet werden. Dies sei am Bild 43 wie folgt erläutert. Die vorgegebene Porosität  $p$  (hier: 50%) sagt noch nichts über die Porenmorphologie aus (Anzahl und Größe der Poren, örtliche Verteilung). Das komplette Hohlräumvolumen kann sich auf eine große Pore oder auf eine endliche Anzahl kleiner Poren verteilen. Dies hängt vom Markov-Parameter ab, der die Anziehung/Abstoßung von Poren und Nichtporen steuert.

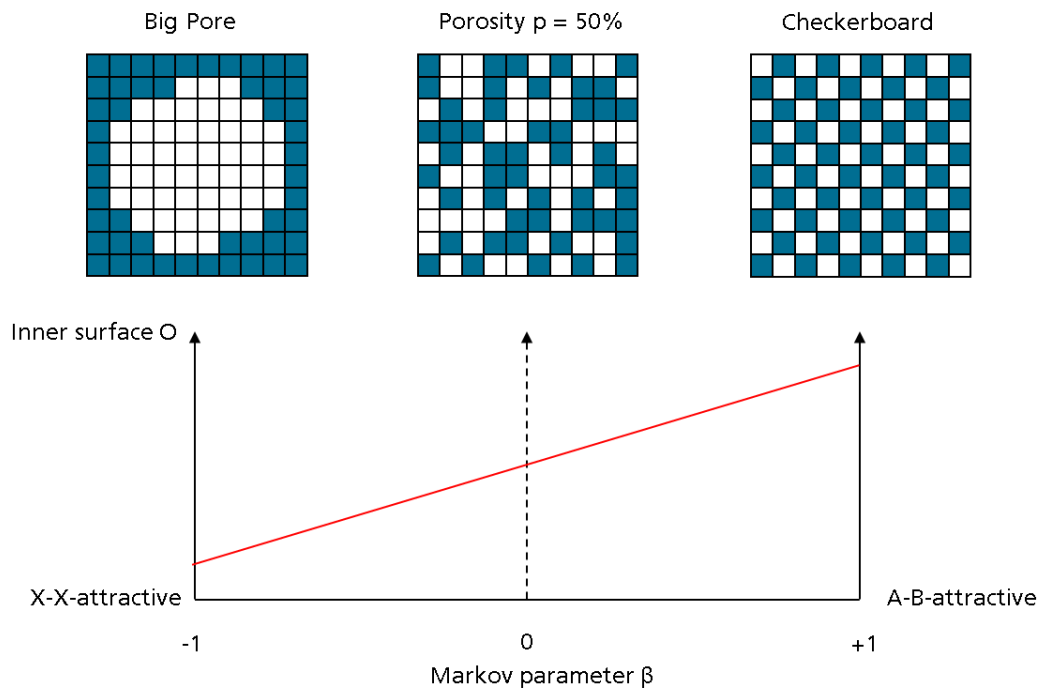
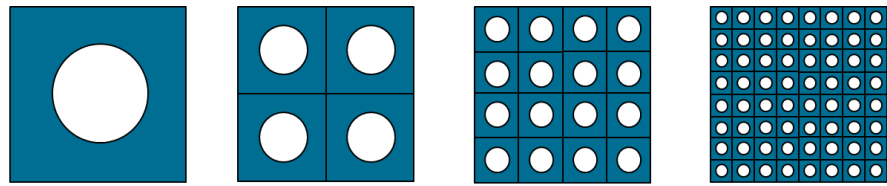


Bild 43: 2D-Porenmorphologien und Markov-Parameter

Jeder Wert des Markov-Parameters kann einer Morphologiekategorie zugeordnet werden, die eine große Anzahl von Realisationen hat. Leider hat der Markov-Parameter mit dem Wert 0 die Eigenschaft, dass er alle möglichen Morphologien repräsentiert, da es weder Anziehung noch Abstoßung gibt. Deshalb bilden wir den Markov-Parameter auf die innere Oberfläche der Porenmorphologie ab, die an der Stelle 0 eine stetige Ergänzung hat. Damit haben wir neben der makroskopischen Porosität einen weiteren mikroskopischen Parameter, der die statistische Verteilung der Poren definiert. Ist die innere Oberfläche klein, liegen bei gleicher Porosität, wenige große Poren vor; ist sie groß, gibt es viele kleine Poren. Geht die innere Oberfläche gegen unendlich und die Größe der Poren gegen 0 liegt der kontinuumsmechanische Fall vor. Wichtig ist, dass die innere Oberfläche keine relative Größe ist, sondern den absoluten Wert einer Fläche besitzt.

## 7.2 Äquivalente Porengröße als Morphologiekategorie

In vielen Bereichen ist es üblich, technische Größen einzuführen, die für den Anwender einfacher zu benutzen sind und seiner Vorstellung näher kommen. So kann man die in 7.1 definierte innere Oberfläche einer Porositätsverteilung auch in eine äquivalente Porengröße  $D_{eq}$  umwandeln. Damit hat man für die Beschreibung einer Porenmorphologie das Eigenschaftspaar (Porosität  $P$ , Porengröße  $D_{eq}$ ), das angibt, dass sich für ein vorgegebenes Kontrollvolumen  $V_0$  die Porosität  $P$  durch eine Anzahl  $N$  Poren mit dem ungefähren Durchmesser  $D_{eq}$  statistisch verteilt. Die Formeln, die sich aus diesem Ansatz ergeben, sind in Bild 44 dargestellt.

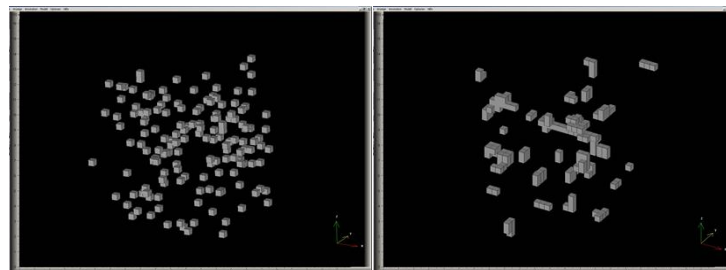


Volume	$V_0$	Number of pores $n$	Porosity $p$
Sphere volume	$V_K = \frac{\pi}{6} \cdot D^3$	Sphere surface	$O_K = \pi \cdot D^2$
Hollow volume	$V_R = p \cdot V_0 = n \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_{eq}^3$	Hollow surface	$O_R = n \cdot \pi \cdot D_{eq}^2 = \frac{6 \cdot p \cdot V_0}{D_{eq}}$
Number of pores	$n = \frac{6 \cdot p \cdot V_0}{\pi \cdot D_{eq}^3}$	Equivalent pore size	$D_{eq} = \frac{6 \cdot p \cdot V_0}{O_R}$

Bild 44: Beziehungen zwischen Morphologieparametern

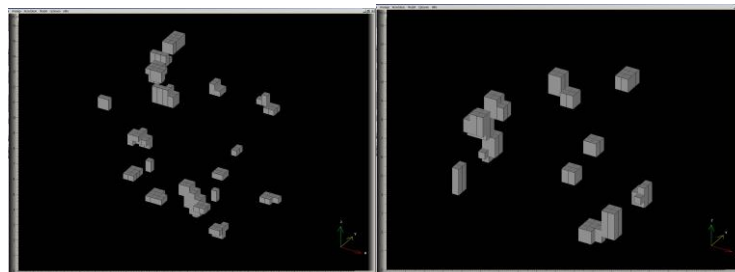
### 7.3 Monte-Carlo-Simulation zur Realisation von Porenmorphologien

Am Fraunhofer IFAM wurde im Rahmen des Projekts ein Programm entwickelt, das für ein vorgegebenes Kontrollvolumen Porenmorphologien mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Die Anordnungen der Poren sind zufällig, das heißt bei jeder Simulation anders. Sie folgen aber den Gesetzen des stochastischen Modells der Absatz 7.1 und 7.2. Bild 45 zeigt unterschiedliche Realisationen von Porenmorphologien für ein Kontrollvolumen  $V_0$  von  $1 \text{ mm}^3$ .



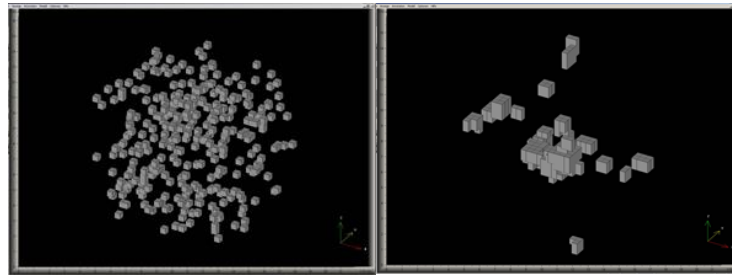
P = 1 %, D = 40  $\mu\text{m}$

P = 1 %, D = 60  $\mu\text{m}$



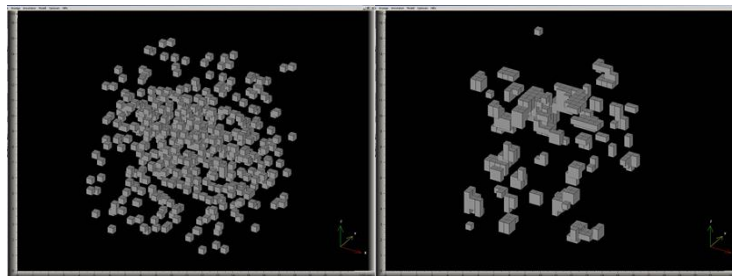
P = 1 %, D = 80  $\mu\text{m}$

P = 1 %, D = 98  $\mu\text{m}$



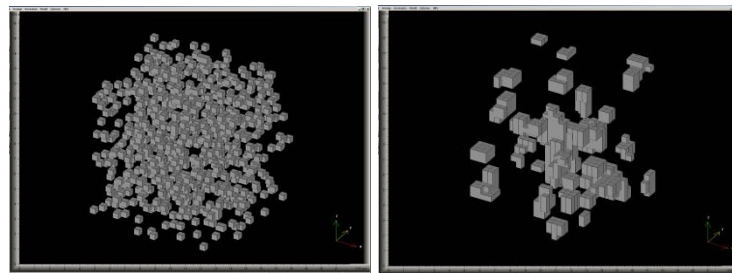
$P = 2 \%$ ,  $D = 40 \mu\text{m}$

$P = 2 \%$ ,  $D = 100 \mu\text{m}$



$P = 3 \%$ ,  $D = 40 \mu\text{m}$

$P = 3 \%$ ,  $D = 80 \mu\text{m}$



$P = 5 \%$ ,  $D = 40 \mu\text{m}$

$P = 5 \%$ ,  $D = 100 \mu\text{m}$

Bild 45: Realisation verschiedener Porenmorphologien

Die Idee ist nun, für ein Gussbauteil über Gießsimulation oder Mikro-CT, örtlich verteilte Porositäten und Porengrößen zu ermitteln, um sie dann auf das Netz der mechanischen FE-Analyse abzubilden (Bild 46).

Die Kopplung mit den kontinuums-mechanischen Gleichungen des Bruchverhaltens wird in Absatz 11 erläutert.

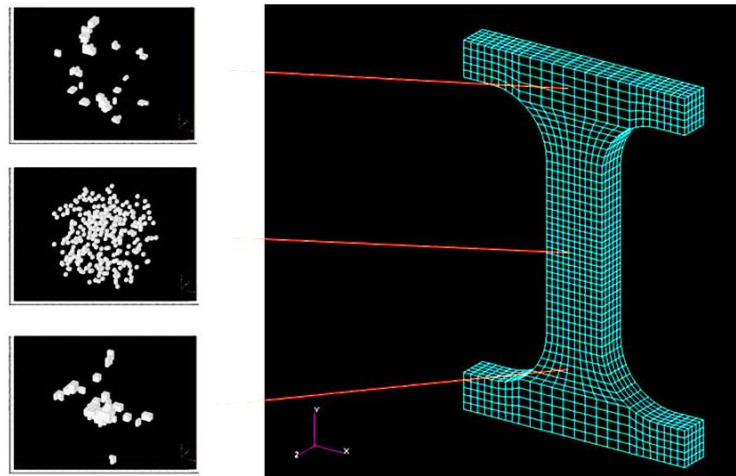


Bild 46: Abbildung von Porenmorphologien auf ein FE-Netz

## 8 Stochastische Charakterisierung der Porenmorphologie und Anwendung auf Demonstrationskomponenten (IFAM)

### 8.1 Ermittlung von Porosität und äquivalenter Porengröße aus der Mikro-CT

Das entwickelte stochastische Modell macht die Auswertung der Mikro-CT-Bilder zu einer einfachen Aufgabe. Die CT-Daten bestehen aus einer Anzahl von Schnittbildern (Bild 47), die in x,y-Richtung (Bildkoordinaten) und z-Richtung (Stapelrichtung der Schnittbilder) eine Auflösung von 10  $\mu\text{m}$  besitzen.

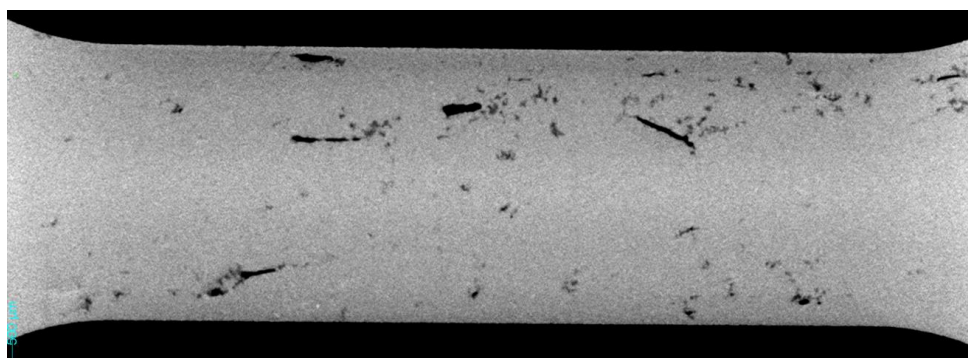


Bild 47: 2-dimensionales CT-Schnittbild

Über eine Bildverarbeitung können die Schnittbilder in Zweifarbenbilder (Pore (weiß)/Nichtpore (schwarz)) umgewandelt werden (Bild 48).



Bild 48: Zweifarben CT-Schnittbild (Pore: weiß /Matrix: schwarz)

Das ergibt ein 10 $\mu$ m-Voxelfeld, aus dem die Porenmorphologieparameter wie folgt ermittelt werden können:

1. Porosität  $P = \text{Anzahl der weißen Voxel (Hohlraum)} / \text{Anzahl aller Voxel}$
2. Äquivalente Porengröße  $D_{eq} = \text{Anzahl der Weiß-Schwarz-Übergänge} \cdot \text{Voxelseitenlänge}$

Das IFAM entwickelte im Rahmen des Vorhabens ein Programm, das aus CT-Bitmap-Daten die Porenmorphologieparameter bestimmt. Für die vorliegenden Zugproben wurden in etwa  $P=5\%$  und  $D_{eq} = 250 \mu\text{m}$  bestimmt.

## 9 Charakterisierung der Einflüsse der Mikrostruktur und des Spannungszustands auf das Versagensverhalten

Zur Charakterisierung der Ortsabhängigkeit des Verformungs- und Versagensverhaltens wurden Glattzugproben aus verschiedenen Stellen in der Y-Box und im Karosserieknoten entnommen und unter statischer Belastung geprüft. Zusätzlich wurde der Einfluss der Spannungsmehrachsigkeit auf das Versagen mit verschiedenen Probengeometrien untersucht. Der gesamte Versuchsplan ist in Tabelle 1 angegeben.

	Versuchstyp	Entnahmeort	Geometrie/Last	wiederholung	Probenanzahl
<b>Proben aus Y-Box</b>	Zug, Ortsabhängigkeit (Screening)	16	glatt	3	48
	Zug (Stochastik)	3	glatt	5	15
	Zug, Orientierungseinfluss	1	glatt quer	5	5
	Rundzug	1	glatt	3	3
	Druck	2	flach	5	10
	Scherzug	2	$\theta=0^\circ$	5	10
	Scherzug	1	$\theta=45^\circ$	4	4
	Flachkerbzug	2	$r=4$	4	8
	Biegung	2	$B=10, L=50$	5	10
	Durchstoß	1	$D=20$	4	4
<b>Proben aus Gussknoten</b>	Zug, Ortsabhängigkeit (Screening)	16	glatt	2	32
<b>Komponenten</b>	Biegung		Y-Box	3	3
	Stauchung		Y-Box	3	3
	<b>Summe</b>				<b>155</b>

Tabelle 1: Durchgeführte Versuche an verschiedenen Proben aus der Y-Box und dem Gussknoten (Karosserie)

## 9.1 Y-Box

### 9.1.1 Charakterisierung der Ortsabhängigkeit mechanischer Eigenschaften

Zunächst wurden 16 Probenentnahmeorte (Bild 50) für ein Screening-Programm ausgewählt. Die glatten Flachzugproben haben eine Probenbreite von 5 mm und eine Messlänge ( $L_0$ ) von 10 mm. Die Probengeometrie ist in Bild 49 a) angegeben. Die Probendicke der meisten Zugproben entspricht der originalen Wanddicke an jeder Entnahmeposition, die zwischen 2,35 mm und 2,8 mm liegt. Nur die Proben aus den Stegen (Positionen 10, 11, 12 und 13) wurden zur Gewährleistung einer homogenen Probendicke in der Dickenrichtung abgearbeitet. Alle Proben wurden durch mechanische und funkenerosive Bearbeitung entnommen und gefertigt.

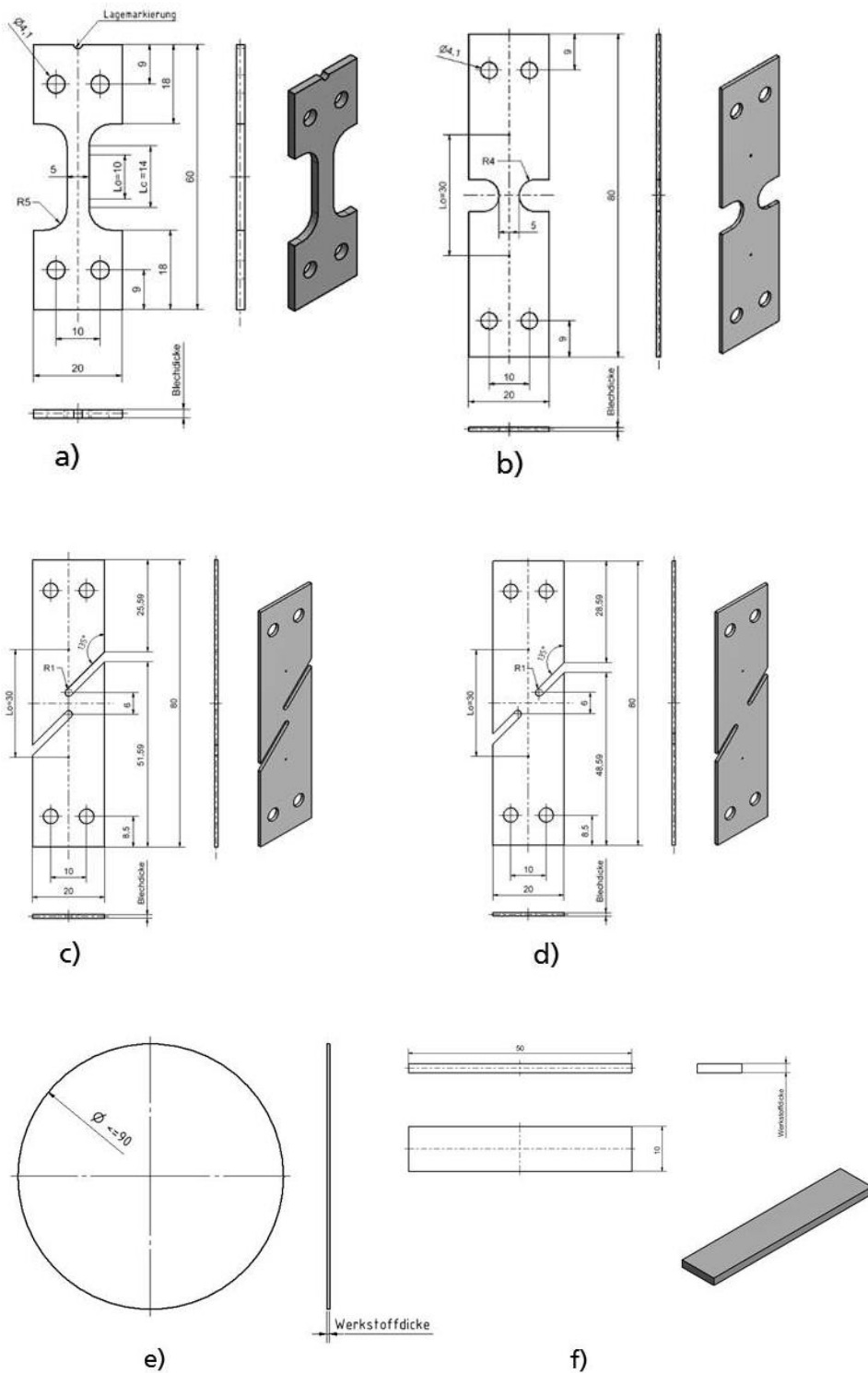


Bild 49: Verwendete Probengeometrien a) Glatzzugprobe, b) Kerbzugprobe, c) Scherzugprobe  $\theta = 0^\circ$ , d) Scherzugprobe  $\theta = 45^\circ$ , e) Durchstoßprobe, f) Biegeprobe



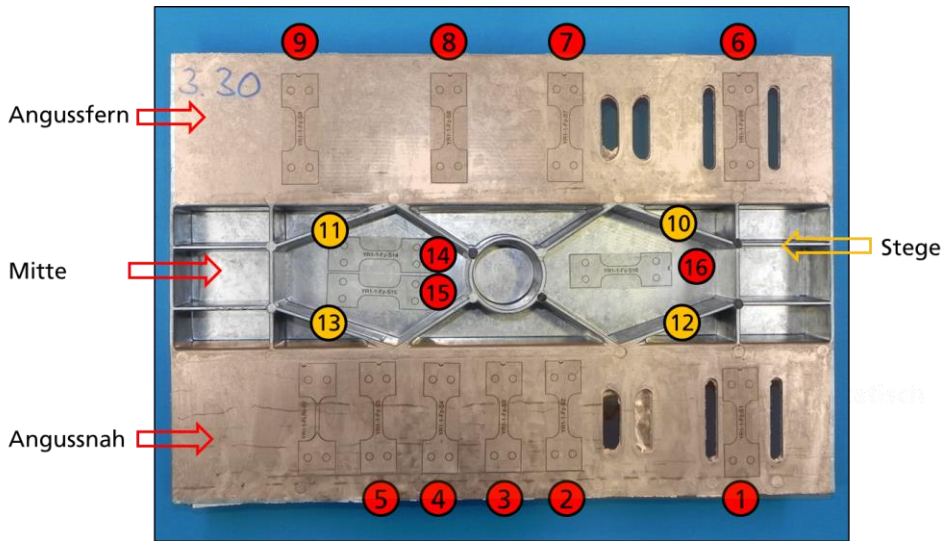


Bild 50: 16 Positionen zur Entnahme von glatten Zugproben aus der Y-Box für ein Screening-Programm

Die ermittelten technischen Spannungs-Dehnungskurven aus drei Y-Boxen werden in Bild 51, Bild 52 und Bild 53 dargestellt. Trotz großer Streuungen kann man eine Tendenz der Ortsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften erkennen. Sowohl die Fließspannungen als auch die Bruchdehnungen hängen stark von der Entnahmeposition ab. Die Angussstelle liegt auf der unteren Seite der in Bild 50 dargestellten Y-Box. Deswegen sind die Proben aus Position 1 bis Position 5 vom Bereich „Angussnah“ und die Proben aus Position 6 bis Position 9 vom Bereich „Angussfern“. Die Proben aus der Position „Angussfern“ zeigen im Vergleich zu den Proben aus der Position „Angussnah“ eine höhere Festigkeit. Die Proben aus dem Bereich „Stege“ (Position 10 bis 13) zeigen die niedrigsten Spannungs-Dehnungskurven und die kleinsten Bruchdehnungen. Das ist teilweise darauf zurückzuführen, dass die Proben aus den Stegen wegen Abarbeitung in der Dickenrichtung keine Gusshaut haben, die im Vergleich mit dem inneren Bereich aufgrund geringerer Porosität höhere Festigkeit zeigt.

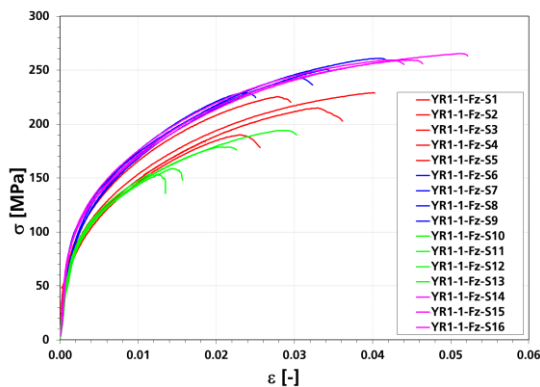


Bild 51: Technische Spannungs-Dehnungskurven von 16 Positionen aus Y-Box 1

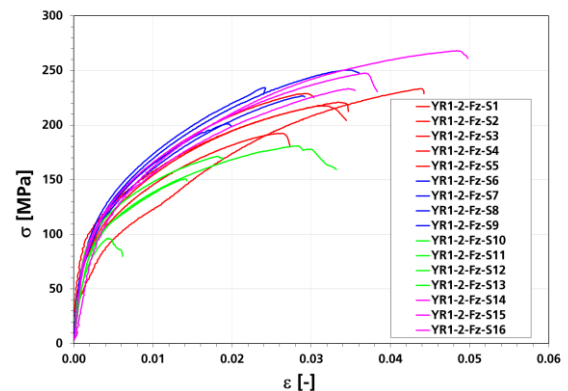


Bild 52: Technische Spannungs-Dehnungskurven von 16 Positionen aus Y-Box 2

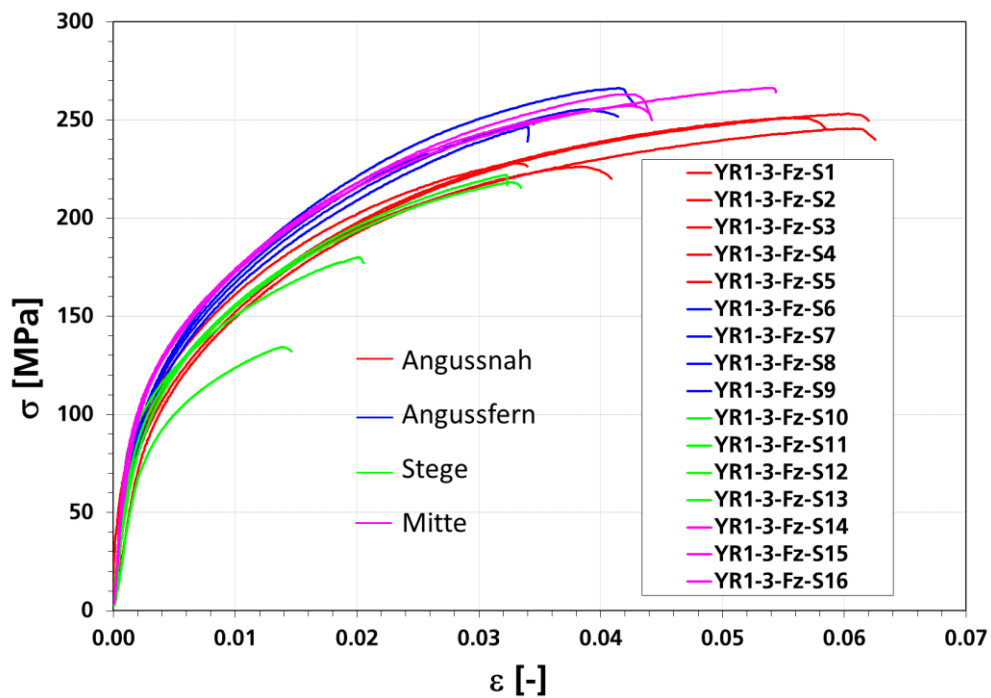


Bild 53: Technische Spannungs-Dehnungskurven von 16 Positionen aus Y-Box 3

### 9.1.2 Charakterisierung des Einflusses des Spannungszustands

Nach dem Screening-Programm wurden die Einflüsse der Spannungsmehrachsigkeit auf das Versagensverhalten durch Glattzug-, Kerbzug-, Scherzug-, Biege- und Durchstoßversuche mit stochastischem Aspekt untersucht. Fünf Y-Boxen wurden zur Probenentnahme von 5 Proben in einer Testserie jeweils an gleicher Position verwendet. Die Probengeometrien sind in Bild 54 dargestellt.

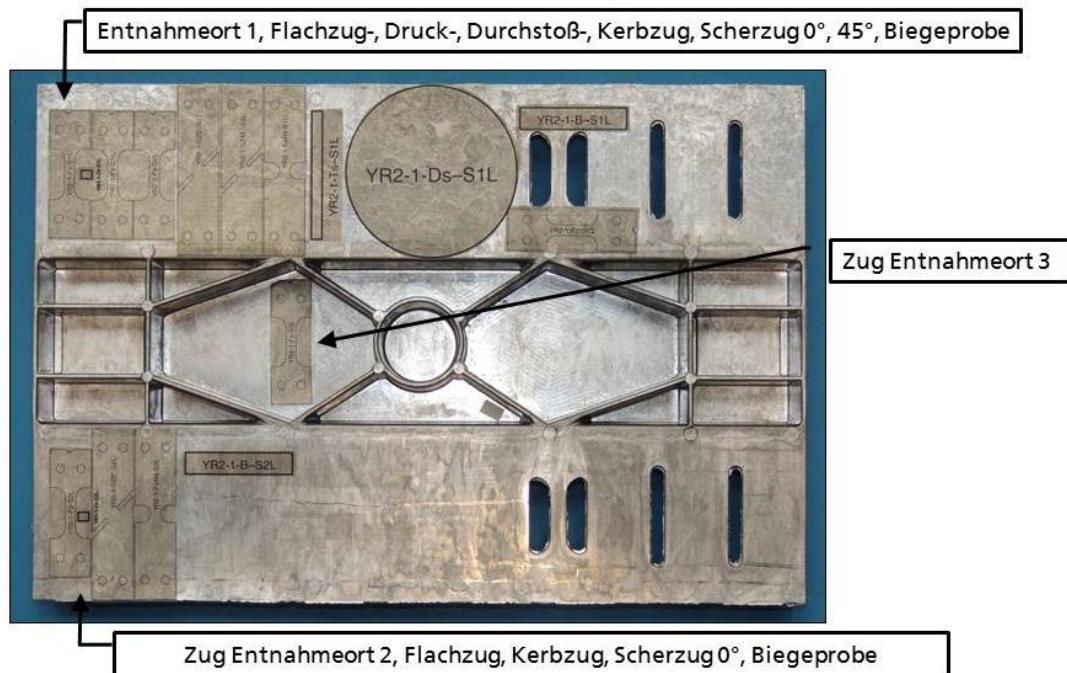


Bild 54: 16 Positionen zur Entnahme von verschiedenen Proben aus der Y-Box zur Untersuchung der Einflüsse der Mehrachsigkeit und Entnahmeposition

Die experimentell ermittelten technischen Spannungs-Dehnungskurven aus den Glattzug- und Kerbzugversuchen für Position 1 und Position 2 in der Y-Box sind in Bild 55 zusammengestellt. Die gebrochenen Proben nach Versuch sind in Bild 56 dargestellt. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Screeningprogramm sind die Spannungs-Dehnungskurven der Glatt- und Kerbzugproben aus Position 1 höher als die aus Position 2. Die technischen Bruchdehnungen unterscheiden sich zwischen den beiden Positionen nur geringfügig. Das Streuband der Bruchdehnungen aus den glatten Zugproben für Position 1 ist größer als für Position 2. Wie erwartet sind die nominalen Spannungs-Dehnungskurven aus den Kerbzugproben aufgrund höherer Spannungsmehrsichtigkeit und inhomogener Dehnungsverteilung im Kerbbereich deutlich höher als die aus den Glattzugproben. Die Bruchdehnungen der Kerbzugproben weisen deutlich geringere Streuungen als die der Glattzugproben auf, weil das hoch beanspruchte Volumen in der Kerbzugprobe viel kleiner als in der Glattzugprobe und damit die Wahrscheinlichkeit für ein Vorhandensein von großen Poren im Prüfbereich geringer ist.

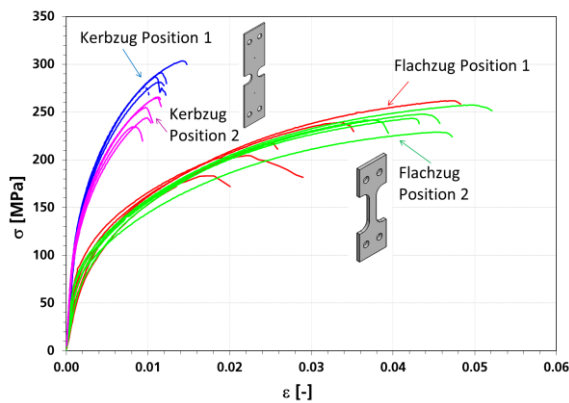


Bild 55: Technische Spannungs-Dehnungskurven der Glattzug- und Kerbzugproben aus Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) in der Y-Box

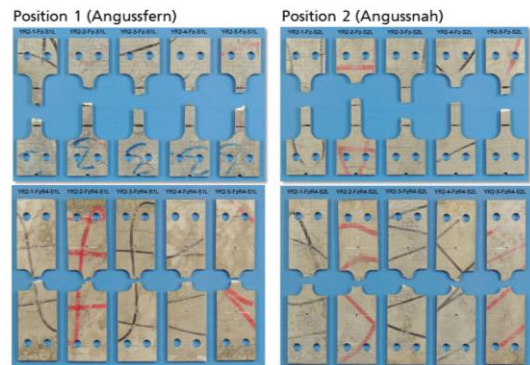


Bild 56: Glattzug- und Kerbzugproben aus Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) nach Versuch

Zur Darstellung des stochastischen Effekts werden die technischen Spannungs-Dehnungskurven von Proben in Längsrichtung aus drei Entnahmepositionen und Proben in Querrichtung aus Position 1 in Bild 57 zusammengestellt. Die Bruchdehnung streut von 1% bis 6% und die Zugfestigkeit variiert von 145 MPa bis 275 MPa. Keine großen Unterschiede in den Spannungs-Dehnungskurven zwischen Längs- und Querrichtung wurden festgestellt. Die gebrochenen Zugproben aus Position 3 (Mitte) längs und Position 1 (Angussfern) quer werden in Bild 58 dargestellt.

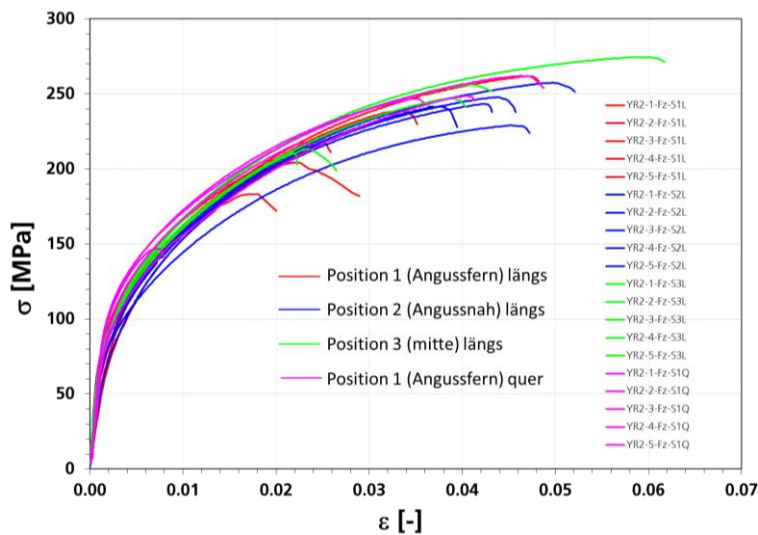


Bild 57: Technische Spannungs-Dehnungskurven aus Glattzugproben aus verschiedenen Entnahmepositionen und Vergleich zwischen Längs- und Querrichtung für Position 1.

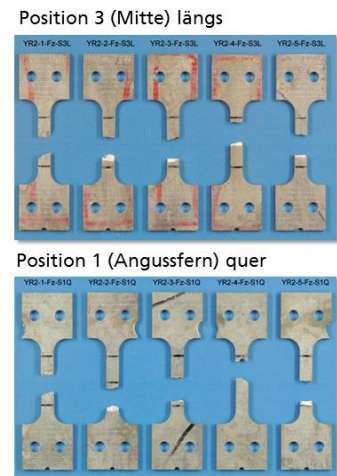


Bild 58: Glattzugproben aus Position 3 (Mitte) längs und Position 1 (Angussfern) quer

Tabelle 2 zeigt die technischen Kennwerte Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchdehnung  $A_{10mm}$  bei  $L_0=10$  mm und Einschnürung  $Z$  für Glattzugproben in Längsrichtung aus drei Entnahmepositionen und Glattzugproben in Querrichtung aus Position 1.

#### Position 1 längs

Probennummer	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{10mm}$ [%]	$Z$ [%]
YR2-1-Fz-S1L	109	183	1.6	2.9
YR2-2-Fz-S1L	109	217	2.2	4.9
YR2-3-Fz-S1L	112	204	2.7	3.8
YR2-4-Fz-S1L	109	262	4.4	10.0
YR2-5-Fz-S1L	110	239	3.2	5.3
Mittelwert	110	221	2.8	5.4
Standardabweichung	1	31	1.1	2.7

#### Position 2 längs

Probennummer	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{10mm}$ [%]	$Z$ [%]
YR2-1-Fz-S2L	109	258	4.9	7.4
YR2-2-Fz-S2L	106	243	3.9	X
YR2-3-Fz-S2L	105	242	3.7	5.0
YR2-4-Fz-S2L	106	248	4.0	X
YR2-5-Fz-S2L	100	229	4.4	6.8
Mittelwert	105	244	4.2	6.4
Standardabweichung	3	11	0.5	1.2

#### Position 3 längs

Probennummer	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{10mm}$ [%]	$Z$ [%]
YR2-1-Fz-S3L	117	275	5.8	5.3
YR2-2-Fz-S3L	115	213	2.4	6.4
YR2-3-Fz-S3L	115	247	3.7	6.2
YR2-4-Fz-S3L	114	256	4.0	7.4
YR2-5-Fz-S3L	110	211	2.0	4.3
Mittelwert	114	240	3.6	5.9
Standardabweichung	3	28	1.5	1.2

#### Position 1 quer

Probennummer	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{10mm}$ [%]	$Z$ [%]
YR2-1-Fz-S1Q	128	262	4.5	4.7
YR2-2-Fz-S1Q	111	249	3.7	X
YR2-3-Fz-S1Q	128	147	0.6	4.0
YR2-4-Fz-S1Q	128	247	3.2	7.0
YR2-5-Fz-S1Q	125	218	2.0	4.1
Mittelwert	124	225	2.8	5.0
Standardabweichung	7	46	1.5	1.4

X = Bruch außerhalb der Messlänge

Tabelle 2: Technische Kennwerte Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchdehnung  $A_{10mm}$  bei  $L_0=10$  mm und Einschnürung  $Z$  für Glattzugproben in Längsrichtung aus drei Entnahmepositionen und Glattzugproben in Querrichtung aus Position 1 in der Y-Box

Lokale Dehnungsverteilungen in den Glattzugproben wurden mit Hilfe des optischen Dehnungsmesssystems ARAMIS während des Versuchs ermittelt. Für die ARAMIS-Auswertung wurden eine Bezugslänge von 0,104 mm und eine Facettengröße von 13 x 13 Pixel ausgewählt. Bild 59 zeigt die ARAMIS-Ergebnisse einer Glattzugprobe über die Verteilung der Vergleichsdehnung kurz vor Bruch und die Dehnungsentwicklung für sechs verschiedene Stellen mit zunehmender globaler technischer Dehnung, die mit einer Bezugslänge von 10 mm bestimmt wurde. Obwohl diese Glattzugprobe ohne Einschnürung gebrochen ist, ist die Dehnungsverteilung aufgrund der inhomogenen Mikrostruktur nicht homogen. Die aus den ARAMIS-Messungen ermittelte maximale lokale Bruchdehnung der Zugprobe beträgt 0,064. Dagegen liegt die aus dem Kennwert  $Z$  berechnete globale wahre Bruchdehnung nur bei 0,039. Hier ist klar zu erkennen, dass die inhomogene Mikrostruktur zu einem deutlichen Unterschied zwischen der lokalen und der globalen Bruchdehnung geführt hat.



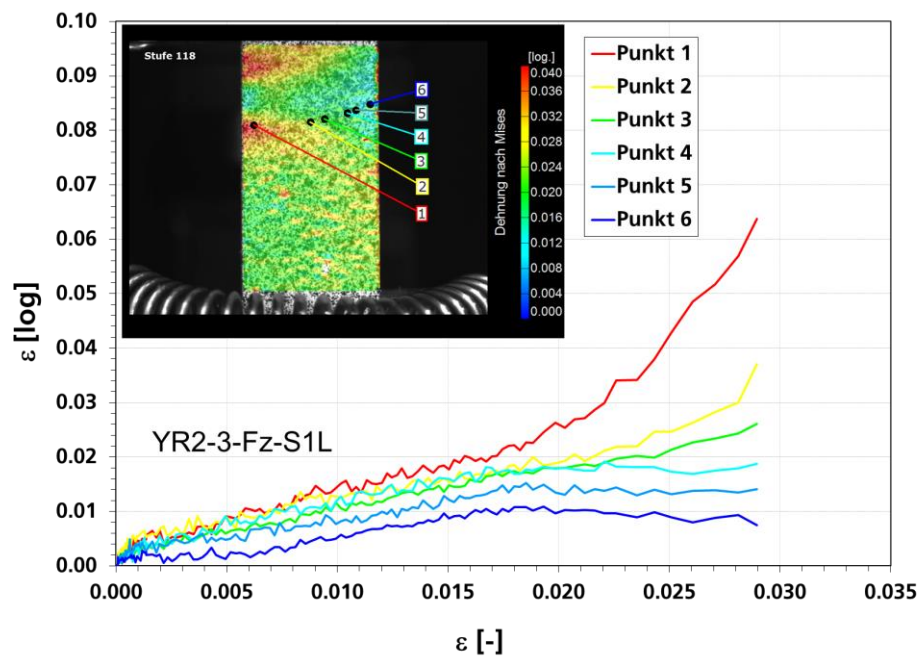


Bild 59: Verteilung der Vergleichsdehnung kurz vor Bruch und Entwicklung der lokalen Vergleichsdehnung aus ARAMIS-Messungen für sechs verschiedene Stellen in einer Flachzugprobe aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) mit zunehmender globaler technischer Dehnung

Die ARAMIS-Ergebnisse einer Kerbzugprobe wurden in Bild 60 dargestellt. Eine Facettengröße von 13 Pixel x13 Pixel und eine Bezugslänge von 0,173 mm wurden für die ARAMIS-Messungen ausgewählt. Offensichtlich sind die lokalen Dehnungen an den Kerbgründen bis zum Bruch höher als die in der Probenmitte. Die maximale lokale Dehnung beim Bruch der Kerbzugprobe beträgt 0,081.

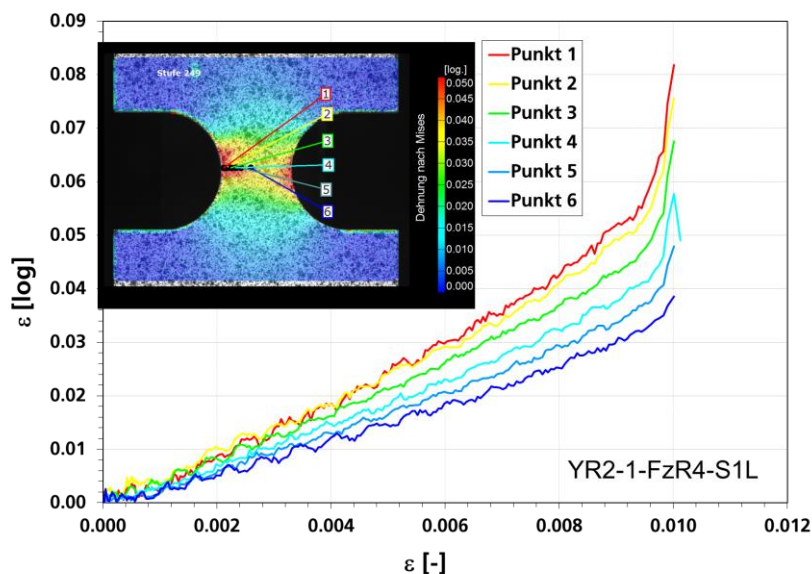


Bild 60: Verteilung der Vergleichsdehnung kurz vor Bruch und Entwicklung der lokalen Vergleichsdehnung aus ARAMIS-Messungen für sechs verschiedene Stellen in einer Kerbzugprobe aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) mit zunehmender globaler technischer Dehnung

Druckversuche an würfelförmigen Proben mit einer Höhe von 4 mm, einer Probenbreite von 5 mm und Probendicke von 2,4 mm durchgeführt. Die experimentell ermittelten technischen und wahren Spannungs-Dehnungskurven der Druckproben aus Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) werden in Bild 61 und Bild 62 verglichen. Die Fließspannungen für Position 1 sind leicht höher als die für Position 2. Alle Druckproben wurden bis zu einer großen Dehnung belastet und dann entlastet. Die in Bild 61 dargestellten Druckproben nach Versuch zeigen keine Schädigung.

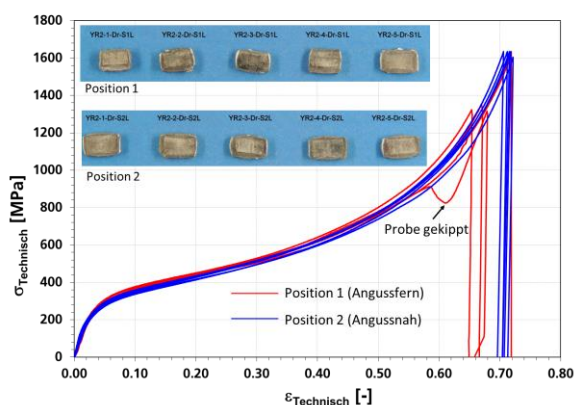


Bild 61: Technische Spannungs-Dehnungskurven der Druckproben aus Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) in der Y-Box

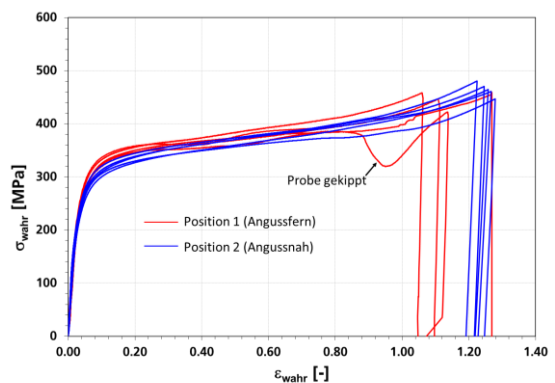


Bild 62: Wahre Spannungs-Dehnungskurven der Druckproben aus Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) in der Y-Box

Zum Vergleich werden wahre Spannungs-Dehnungskurven für Zug- und Druckbelastung für Probenentnahmeposition 1 und 2 in Bild 63 zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass die gemessene Steifigkeit der Druckproben niedriger als die der Zugproben ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Messlänge der Druckprobe deutlich kleiner als die der Zugproben ist und die Rauigkeit an den Kontaktstellen zwischen dem Stempel und der Probe eine große Rolle für die Reduzierung der Messwerte der Steifigkeit spielt. Ein zusätzlicher Druckversuch an einer eingespannten Glattzugprobe (ohne Kontakte zwischen Stempel und Probe) zeigt eine ähnliche Steifigkeit wie die aus dem Zugversuch und bestätigt damit die Erklärung.

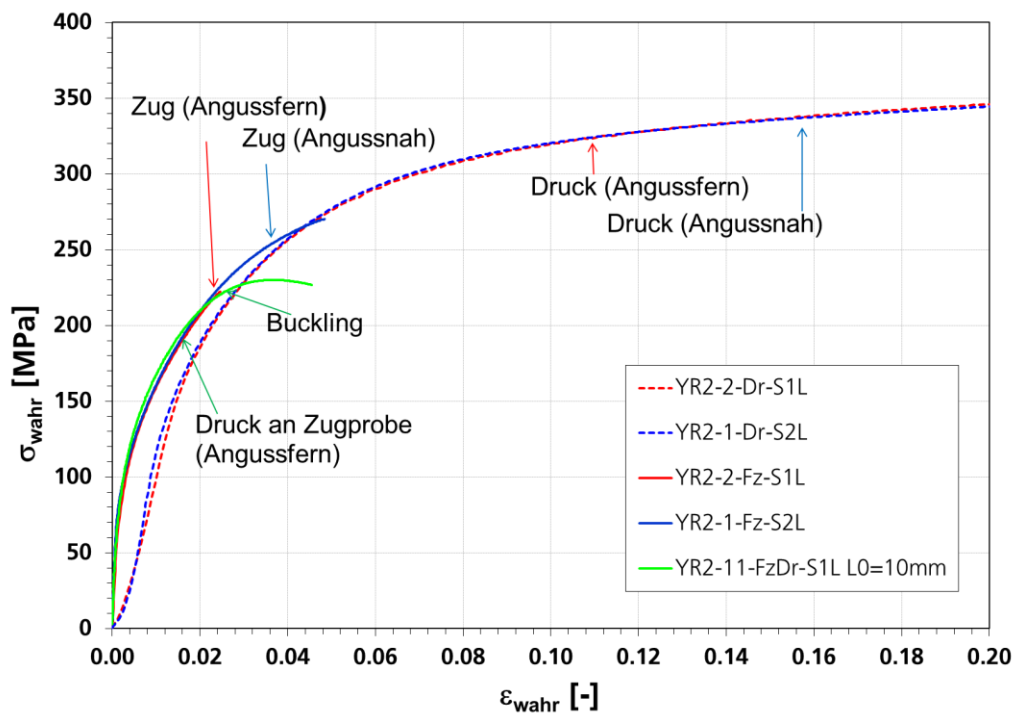


Bild 63: Wahre Spannungs-Dehnungskurven aus Zug- und Druckversuchen für Position 1 und Position 2 in der Y-Box 3

Die experimentellen Ergebnisse der Scherzugversuche an doppelt gekerbten Scherzugproben  $\theta=0^\circ$  (mit senkrecht übereinander positionierten Kerben) werden in Bild 64 und Bild 65 für Entnahmeposition 1 und 2 dargestellt. Die Fläche für die Normierung der Kraft bezieht sich auf den Kerbabstand in Zugrichtung und die Probendicke. Die Versagensbilder der Scherzugproben  $0^\circ$  für Position 1 und 2 sind leicht unterschiedlich. Während die Scherzugproben aus Position 1 mit Ausnahme von einer Probe (YR2-S-Sz $0^\circ$ -S1L) eine Abscherung im engsten Querschnitt stattgefunden hat, zeigen zwei von fünf Proben aus Position 2 ein Zugversagen mit Trennung eines Schenkels anstatt der Abscherung zwischen den beiden Kerben (Bild 65). Da das Zugversagen etwas früher als das Scherversagen auftritt und die entsprechende Schädigungsentwicklung langsamer abläuft, sind unterschiedliche Formen der normierten Kraft-Verschiebungskurven nach dem Schädigungsbeginn für Position 1 und 2 zu erkennen. Die gemessene Kraft der Scherzugproben aus Position 1 außer der Probe YR2-S-Sz $0^\circ$ -S1L reduziert sich nach dem Beginn der Abscherung



schlagartig auf Null, dagegen sinkt die Kraft der Proben aus Position 2 mit zunehmender Verschiebung nur langsam auf null.

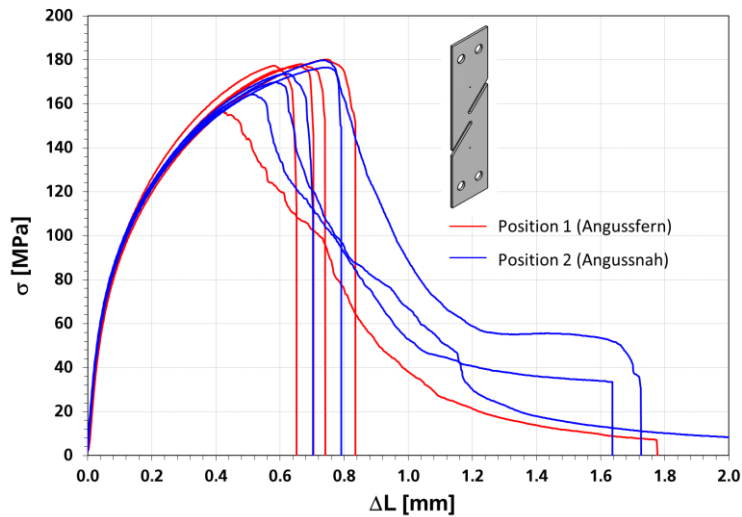


Bild 64: Normierte Kraft-Verschiebungskurven der Scherzugproben  $\theta=0^\circ$  aus Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) in der Y-Box



Bild 65: Scherzugproben  $\theta=0^\circ$  nach Versuch aus Position 1 und 2

Bild 66 zeigt die Verteilung der Vergleichsdehnung kurz vor Bruch und die Entwicklung der Vergleichsdehnung an fünf verschiedenen Positionen mit zunehmender globaler technischer Dehnung, die durch eine Normierung der Verschiebung auf eine Bezugslänge von  $L_0=30$  mm berechnet wurde. Eine Facettengröße von 13 Pixel x 13 Pixel und eine Bezugslänge von 0,229 mm wurden für die ARAMIS-Messungen verwendet. Die maximale lokale Vergleichsdehnung bei Bruch der Scherzugprobe  $\theta=0^\circ$  beträgt 0,1.

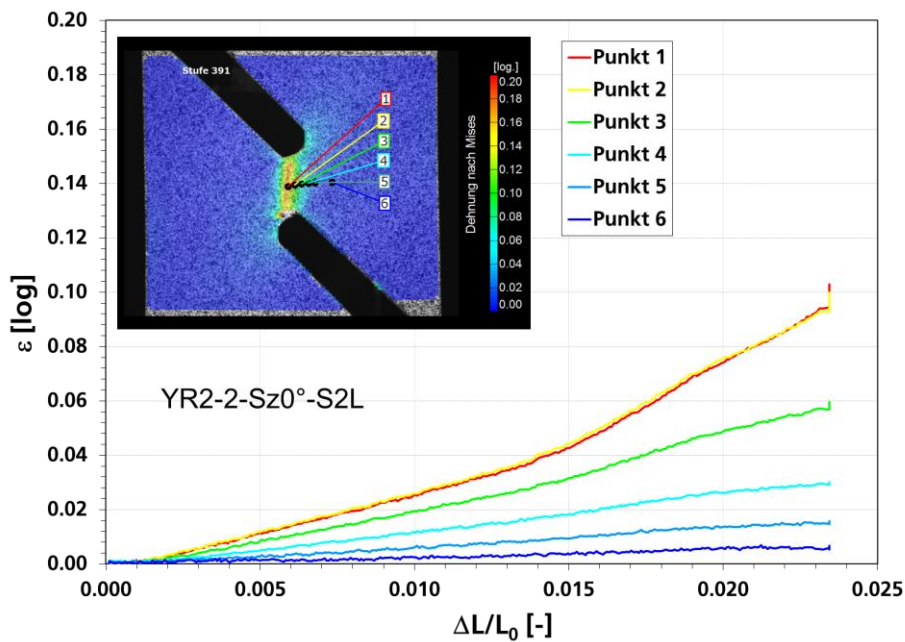


Bild 66: Verteilung der Vergleichsdehnung kurz vor Bruch und Entwicklung der lokalen Vergleichsdehnung aus ARAMIS-Messungen für sechs verschiedene Positionen in einer Scherzugprobe aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) mit zunehmender Belastung

Zur Variation des Verhältnisses des Anteils von Zug zu Scherung wurden Scherzugversuche an doppelt gekerbten Scherzugproben mit  $\theta=45^\circ$  durchgeführt. Bild 67 und Bild 68 zeigen die normierten Kraft-Verschiebungskurven bzw. die geprüften Scherzugproben  $\theta=45^\circ$  aus Position 1 (Angussfern). Aufgrund des größeren Zuganteils liegen die maximalen normierten Kräfte der Proben mit  $\theta=45^\circ$  im Vergleich mit denen der Proben mit  $\theta=0^\circ$  bei deutlich kleineren Verschiebungen.

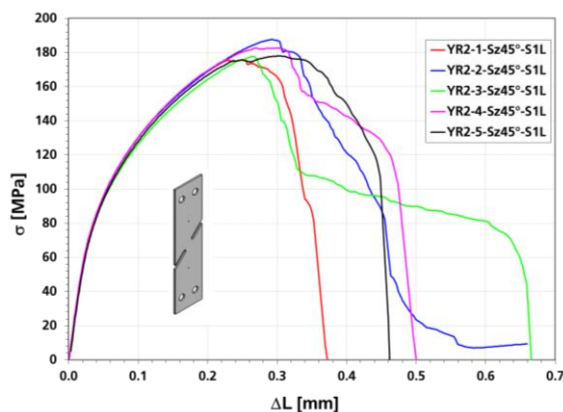


Bild 67: Normierte Kraft-Verschiebungskurven der Scherzugproben  $\theta=45^\circ$  aus Position 1 (Angussfern) in der Y-Box

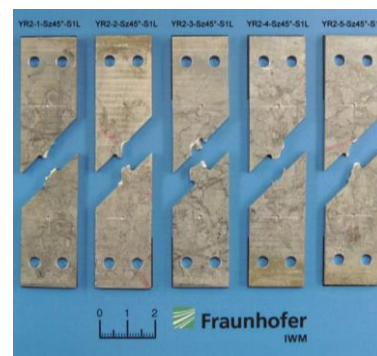


Bild 68: Scherzugproben  $\theta=45^\circ$  nach Versuch aus Position 1

Dreipunkt-Biegeversuche wurden an Biegeproben mit Probenbreite von 10 mm und Probenlänge von 50 mm für Position 1 und 2 durchgeführt. Der Auflagerabstand beträgt 24 mm und der Stempel- und Auflagerradius sind 2 mm und 1 mm. Bild 69 und Bild 70 zeigen die gemessenen Kraft-Durchbiegungskurven der Biegeversuche bzw. die Biegeproben nach Versuch für Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah). Ähnlich wie bei den Glattzugproben sind die Kraft-Durchbiegungskurven für Position 1 höher als die für Position 2 und das Streuband für die Bruchverschiebungen ist für Position 1 größer als für Position 2. Alle geprüften Biegeproben zeigen Rissbildung an der Seite mit maximaler Zugbelastung.

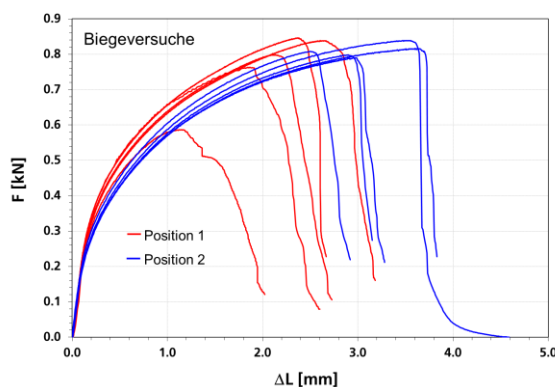


Bild 69: Kraft-Durchbiegungskurven der Biegeversuche für Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah) in der Y-Box

Bild 70: Biegeproben nach Versuch für Position 1 (Angussfern) und Position 2 (Angussnah)

Bild 71 zeigt die Ergebnisse der ARAMIS-Messungen für eine Biegeprobe aus Entnahmeposition 2 (Angussnah). Eine Facettengröße von 13 Pixel x 13 Pixel und eine Bezugsgröße von 0,351 mm wurden für die ARAMIS-Messungen ausgewählt. Die Entwicklungen der lokalen Dehnungen auf der Seite der Zugbelastung wurden für sechs Stellen ausgewertet. Interessant ist, dass die lokale Dehnung direkt unter dem Stempel kurz vor Bruch dramatisch ansteigt und eine Bruchdehnung von 0,28 erreicht wurde. Dieser Wert unter Biegebelastung ist ca. 3-fach größer als die Bruchdehnungen der Glatt-, Kerb- und Scherzugproben unter Zugbelastung. Es könnte an den Eigenschaftsgradienten über die Wanddicke liegen. Bei Biegung ist die maximale Belastung an der Probenoberfläche, wo wegen geringer Porosität der Gusshaut höhere Festigkeit und Bruchdehnung zu erwarten sind.

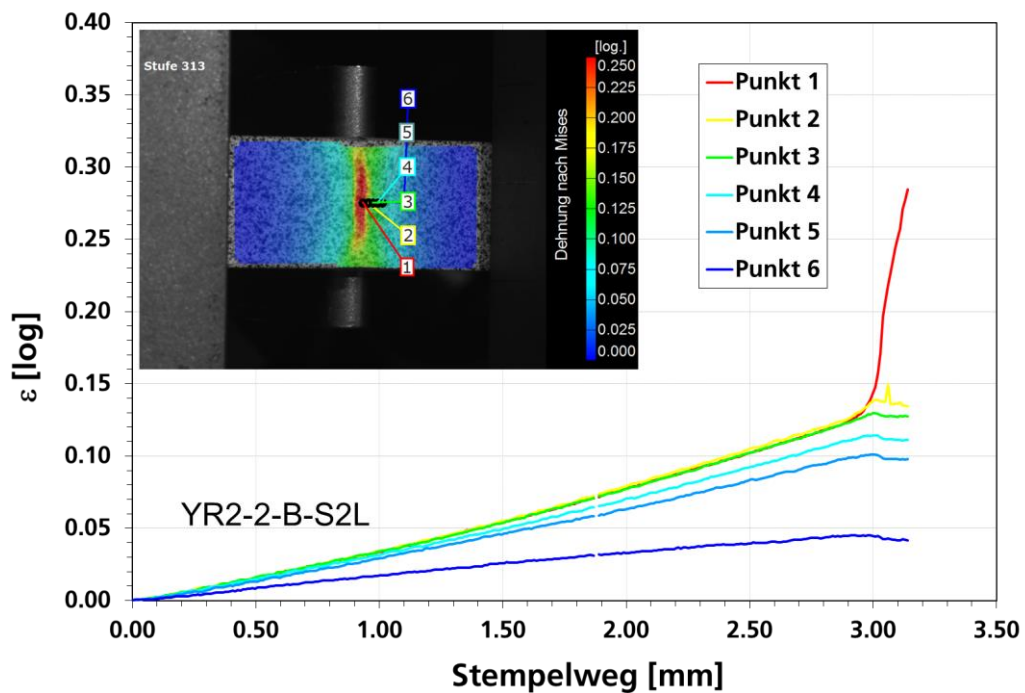


Bild 71: Verteilung der Vergleichsdehnung kurz vor Bruch und Entwicklung der lokalen wahren Dehnungen aus ARAMIS-Messungen für sechs verschiedene Positionen in einer Biegeprobe aus Entnahmeposition 2 (Angussnah) mit zunehmendem Stempelweg

Zur Realisierung eines biaxialen Spannungszustands wurden Durchstoßversuche nach Erichsen (DIN EN ISO 20482) durchgeführt. Beim Durchstoßversuch wurde ein Kugelstempel mit einem Durchmesser von 20 mm gegen das Prüfblech, das einen Durchmesser von 90 mm hat und ringförmig eingespannt wurde, bis zum Versagen gedrückt. Eine servohydraulische Prüfmaschine von Typ INSTRON 1275 wurde für die Durchstoßversuche eingesetzt. Die Wegmessung des Druckstempels erfolgt mit einem induktiven Wegaufnehmer und die lokalen Dehnungsverteilungen wurden durch optische 3D-ARAMIS-Messungen ermittelt. Bild 72 zeigt den Versuchsaufbau für den Durchstoßversuch mit zwei Kameras für 3D-ARAMIS-Messungen. Zur Reduzierung der Reibkräfte wurden die Proben und der Stempel vor Versuch mit Fett geschmiert.

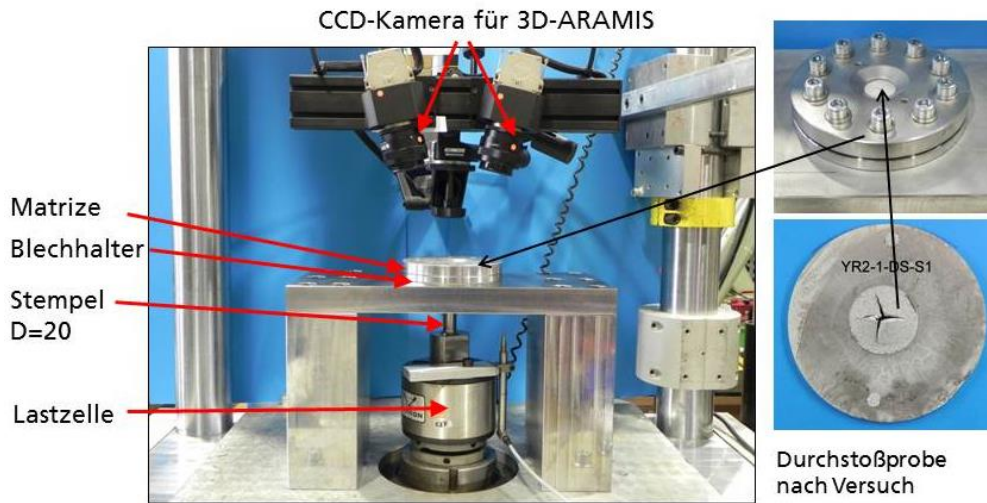


Bild 72: Versuchsaufbau für einen Durchstoßversuch mit 3D-ARAMIS-Messungen

Die gemessenen Kraft-Stempelwegkurven und die geprüften Durchstoßproben werden in Bild 73 und Bild 74 dargestellt. Die Streuung der Kraft-Stempelwegkurven im elastischen Bereich ist sehr gering. Alle fünf Durchstoßproben zeigen die gleiche Versagensstelle in der Probenmitte, die vom kugelförmigen Stempel direkt belastet wurde. Offensichtlich findet die Rissbildung bei einem relativ kleinen Stempelweg von ca. 1,5 mm statt. Mit zunehmender Belastung wuchsen die Risse in radialer Richtung und die Kraft nimmt bis zu einem Stempelweg im Bereich von 4 mm bis 4,6 mm weiterhin zu. Die gemessenen maximalen Kräfte liegen zwischen 4,6 kN und 5,5 kN.

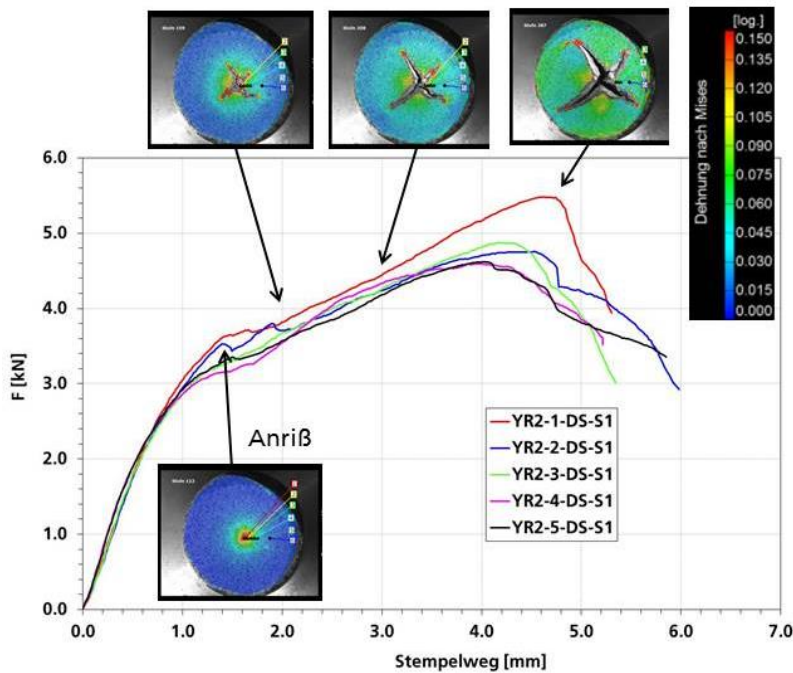


Bild 73: Kraft-Verschiebungskurven der Durchstoßproben aus Position 1 (Angussfern) und Dehnungsverteilungen aus ARAMIS-Messungen



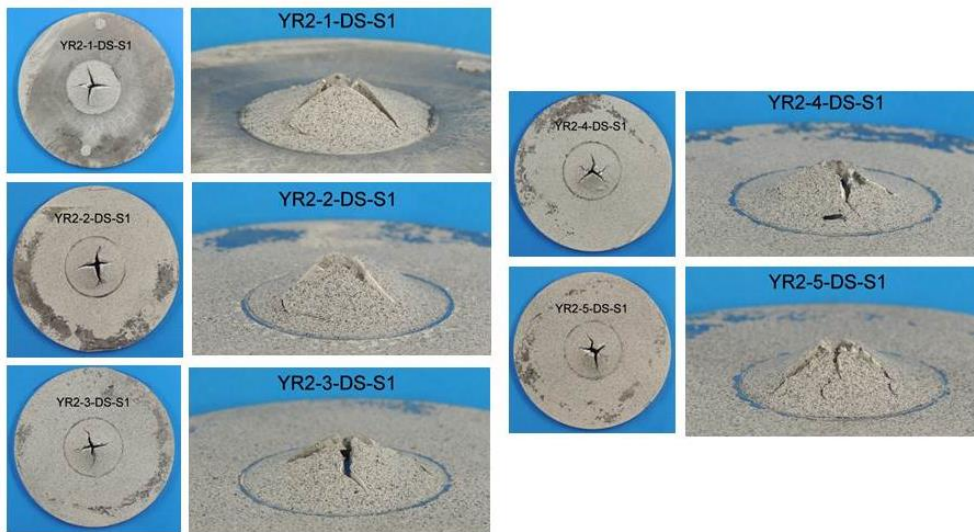


Bild 74: Durchstoßproben nach Versuch aus Position 1 (Angussfern)

Die mit ARAMIS ermittelte Verteilung der lokalen Vergleichsdehnung in einer Durchstoßprobe wird in Bild 75 dargestellt. Eine Facettengröße von 13 Pixel x 13 Pixel und eine Bezugsgröße von 0,355 mm wurden für die ARAMIS-Messungen ausgewählt. Die maximale Vergleichsdehnung bei der Rissbildung in der Durchstoßprobe liegt bei 0,32 und ist ähnlich wie die Bruchdehnung der Biegeproben. Auch hier wird die Gushaut maximal beansprucht.

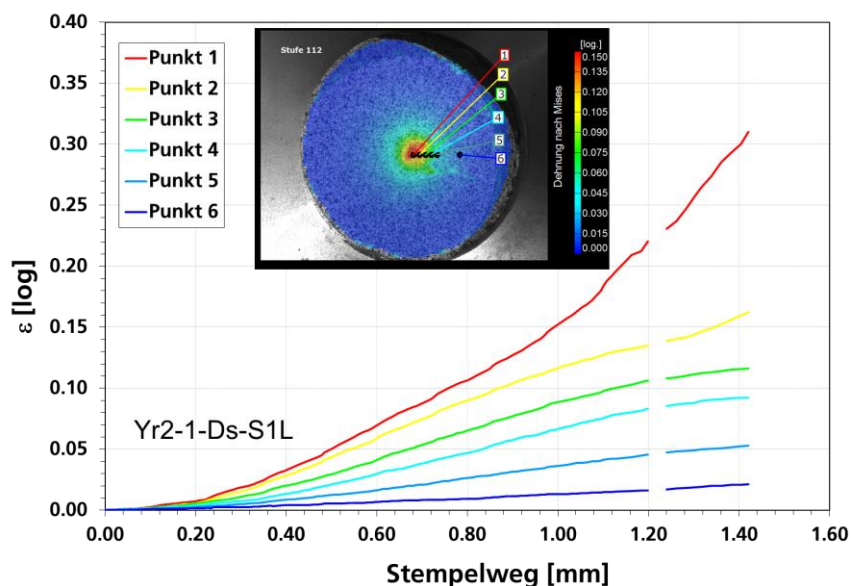


Bild 75: Verteilung der Vergleichsdehnung bei der Rissbildung und Entwicklung der lokalen wahren Dehnungen aus ARAMIS-Messungen für sechs verschiedene Positionen in einer Durchstoßprobe aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) bis zur

Rissbildung

## 9.2 Karosserieknoten

Zur Charakterisierung der Inhomogenität von mechanischen Eigenschaften im Karosserieknoten wurden 15 Positionen zur Entnahme von Flachzugproben und 3 Positionen zur Entnahme von Minirundzugproben ausgewählt. Bild 76 und Bild 77 zeigen die verschiedenen Probenentnahmepositionen im Karosserieknoten. Die Probengeometrie der Flachzugproben ist in Bild 49 a) angegeben.

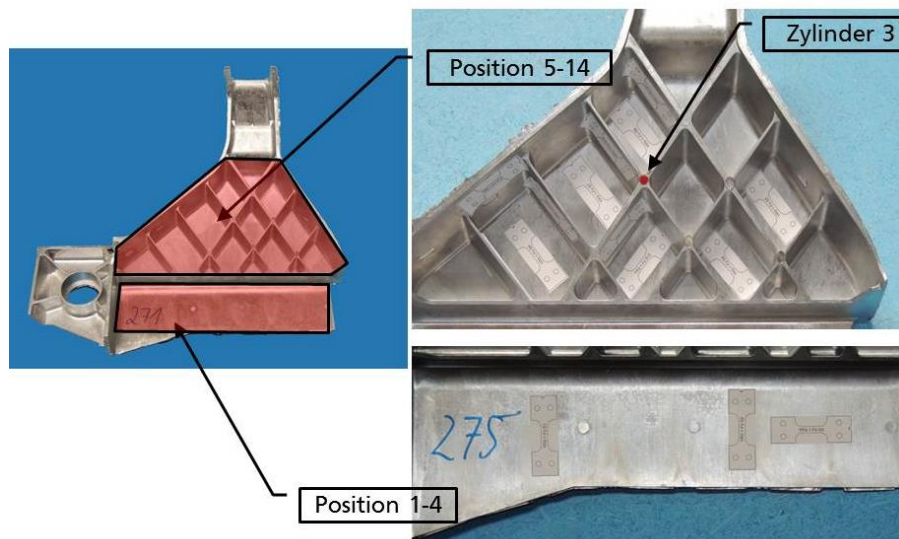


Bild 76: Entnahmepositionen für 14 Flachzugproben und 1 Rundzugprobe aus dem Karosserieknoten

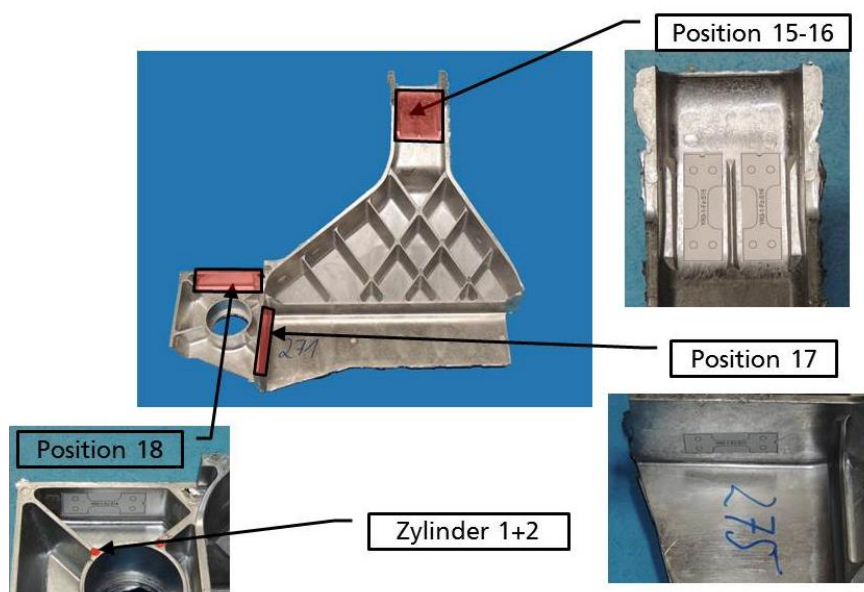


Bild 77: Entnahmepositionen für weitere 4 Flachzugproben und 2 Rundzugproben aus dem Karosserieknoten

dem Karosserieknoten

Die experimentell ermittelten technischen Spannungs-Dehnungskurven aus den Flachzugversuchen für unterschiedliche Entnahmepositionen werden in Bild 78 zusammengestellt. Es wurden große Streuungen der Fließspannung, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung zwischen den unterschiedlichen Probenentnahmepositionen festgestellt. Der Streubereich der Bruchdehnung liegt zwischen 1% und 6%. Die höchste Spannungs-Dehnungskurve wurde von der Probe aus dem unteren Bereich des Karosserieknotens, der an die Angussstelle anschließt, geliefert. Die relativ niedrigeren Spannungs-Dehnungskurven werden an Entnahmepositionen 15, 16 und 17 ermittelt. Entnahmeposition 17 liegt in einem Übergangsbereich (Bild 77) und Positionen 15 und 16 liegen im Endbereich des Karosserieknotens (Angussfern).

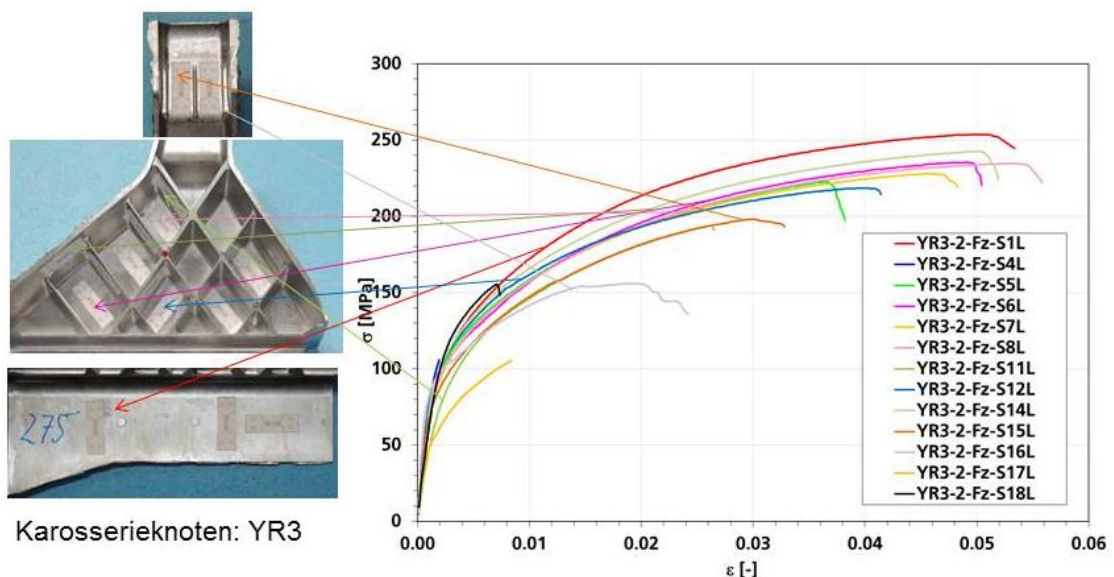


Bild 78: Technische Spannungs-Dehnungskurven aus Flachzugversuchen für unterschiedliche Entnahmepositionen im Karosserieknoten

Zum Vergleich der mechanischen Eigenschaften in der Y-Box und im Karosserieknoten werden die technischen Spannungs-Dehnungskurven der Flachzugproben aus den verschiedenen Positionen in den beiden Demonstratoren in Bild 79 zusammengestellt. Die roten Kurven stellen die Ergebnisse der Y-Box und die blauen Kurven die Ergebnisse des Karosserieknotens dar. Die Größen der Streubänder der Fließspannung, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in den beiden Demonstratoren sind ähnlich. Aus diesem Grund wurde keine weitere experimentelle Charakterisierung am Karosserieknoten durchgeführt.



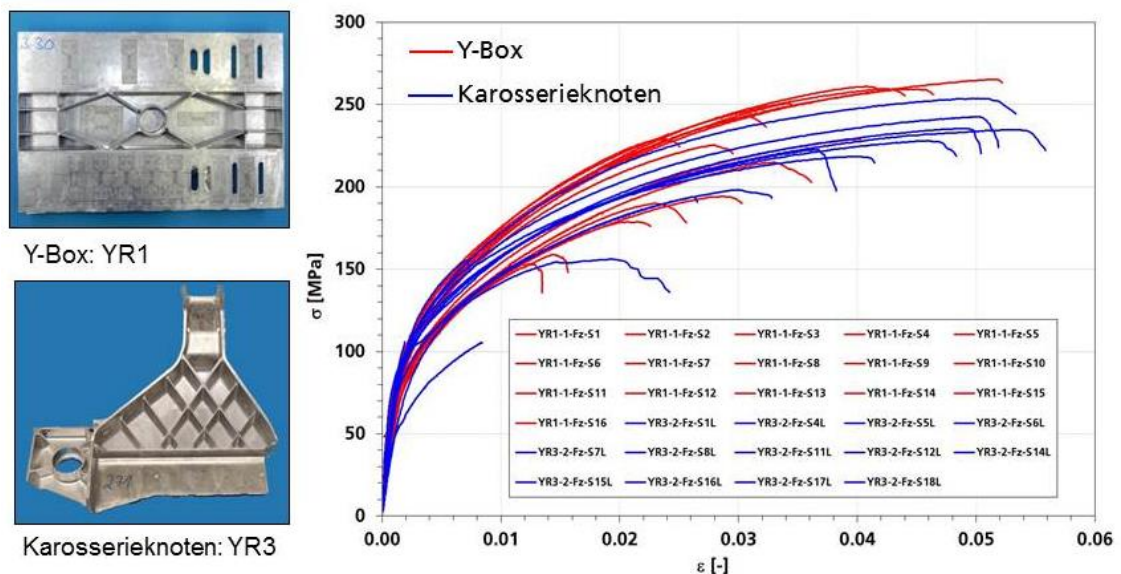


Bild 79: Vergleich der technischen Spannungs-Dehnungskurven aus der Y-Box und dem Karosserieknoten

## 10 Metallographische Untersuchungen und mikromechanische Modellierung von Bruchmechanismen (IWM)

Bruchflächen und Schlibbilder von glatten und gekerbten Flachzugproben und Scherzugproben aus verschiedenen Entnahmepositionen wurden durch metallographische und fraktographische Untersuchungen mit Licht- und Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) analysiert. Die Verteilungen der Porosität (2D) wurden aus Bildanalysen der Schlibbe der glatten Flachzugproben bestimmt. Es wurde versucht, mögliche Zusammenhänge zwischen der Bruchdehnung und der Porenmorphologie zu erkennen.

### 10.1 Bruchflächen und Schlibbilder von Glattzugproben

Die Bruchflächen der geprüften Glattzugproben aus Entnahmeposition 1, 2 und 3 in der Y-Box und die entsprechenden technischen Spannungs-Dehnungskurven werden in Bild 80, Bild 81 und Bild 82 dargestellt. Bild 80 zeigt, dass die Bruchspannung und Bruchdehnung innerhalb einer Versuchsserie für die gleiche Entnahmeposition stark variiert. Die REM-Bilder von Bruchflächen der entsprechenden Zugproben geben Hinweise, dass neben Porosität relativ lange Kaltrisse oder Oxidhaut in den Zugproben vorliegen und für die große Streuung der mechanischen Eigenschaften verantwortlich sein könnten.

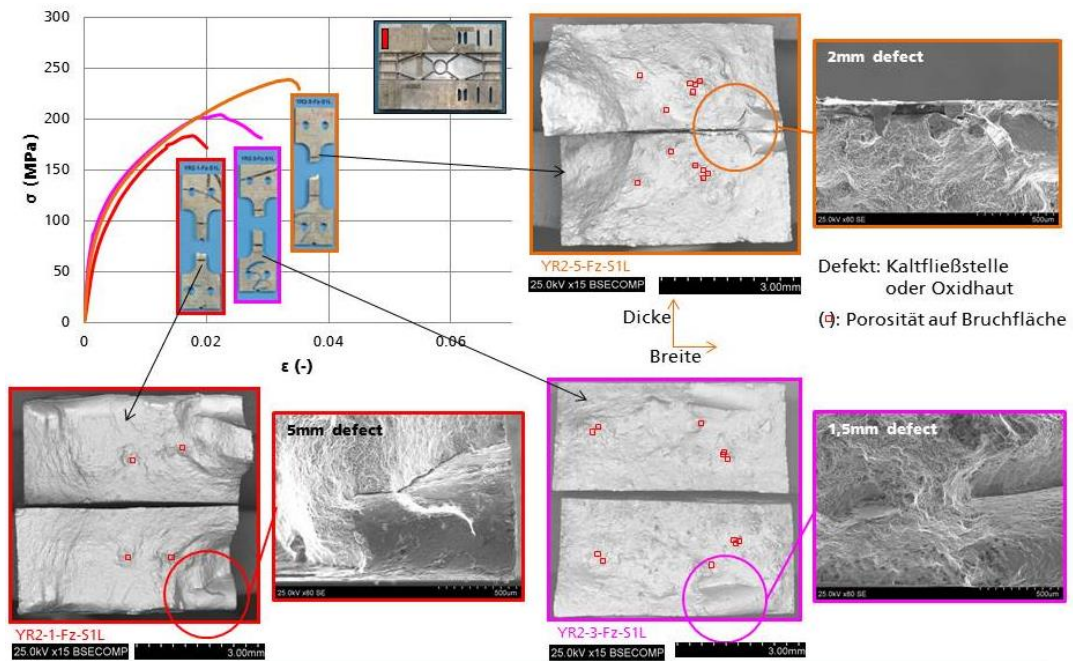


Bild 80: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Glattzugproben aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) in der Y-Box

Bild 81 zeigt, dass die Porosität über die Wanddicke nicht homogen verteilt ist. In der Wandmitte ist ein Band mit deutlich höherer Porosität zu erkennen.

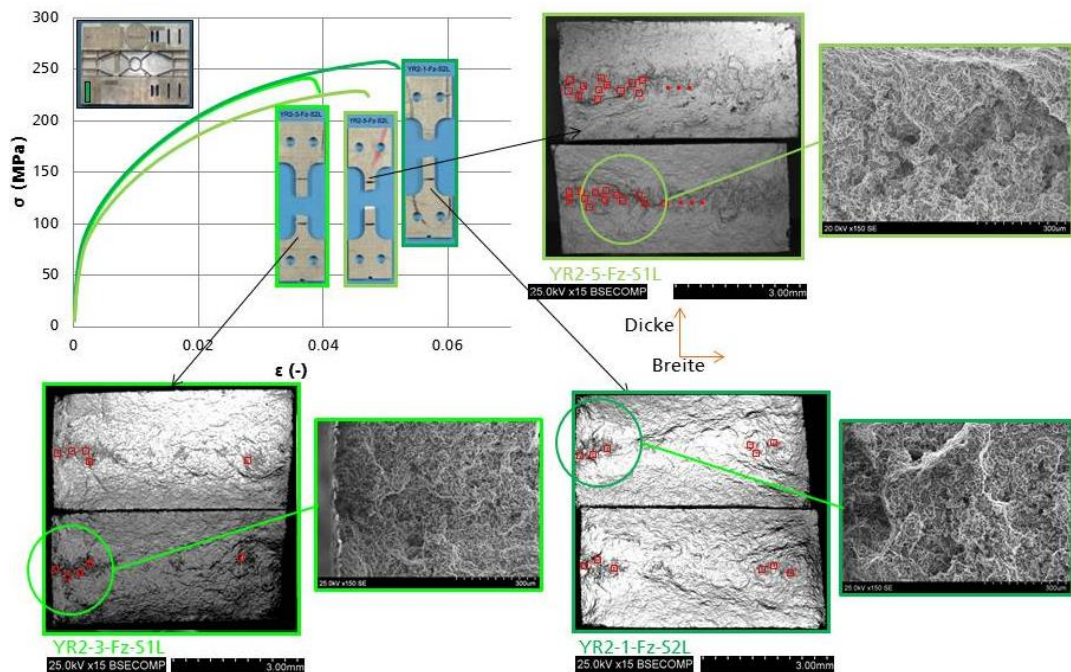


Bild 81: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Glattzugproben aus Entnahmeposition 2 (Angussnah) in der Y-Box

Bild 82 zeigt den Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und der Porenmorphologie anhand der Ergebnisse von Zugversuchen und der Fraktographie. Offensichtlich wird die höchste Porosität auf der Bruchfläche der Zugprobe mit der niedrigsten Bruchdehnung festgestellt.

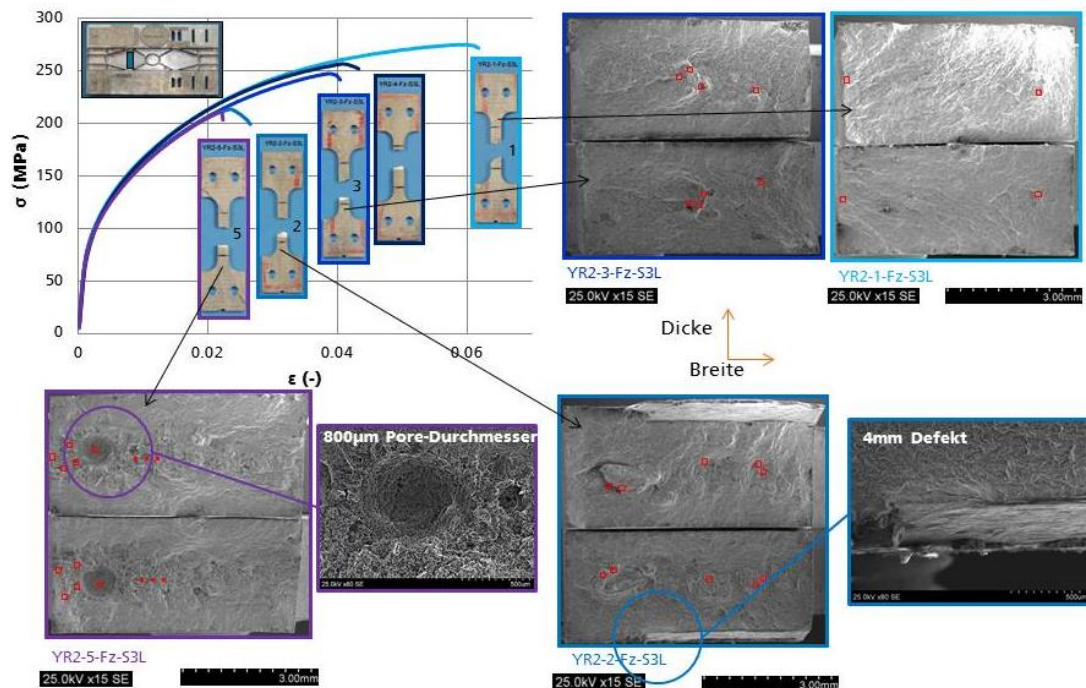


Bild 82: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Glattzugproben aus Entnahmeposition 3 (Mitte) in der Y-Box

Die Porenform und –größe in verschiedenen Zugproben aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) wurden mit Hilfe von Schlifflinien, die an verschiedenen Stellen von Zugproben und in verschiedenen Richtungen geschnitten wurden, untersucht. Bild 83 zeigt 6 unterschiedliche Schlifflinien aus einer Zugprobe von Entnahmeposition 1. Wie Schlifflinienbild 4 zeigt, ist die Porenform unregelmäßig und die maximale Porengröße auf dem zweidimensionalen Bild beträgt ca. 85  $\mu\text{m}$ . Die örtliche Verteilung der Porosität ist auch ziemlich inhomogen. Bild 84 zeigt die Schlifflinien von zwei Zugproben aus der Entnahmeposition 2 (Angussnah). In der Zugprobe (YR2-5-Fz-S2L) ist an einer Stelle eine Konzentration der Porosität in der Wandmitte zu erkennen. Die Breite der Zone mit höherer Porosität beträgt ca. 0,6 mm.



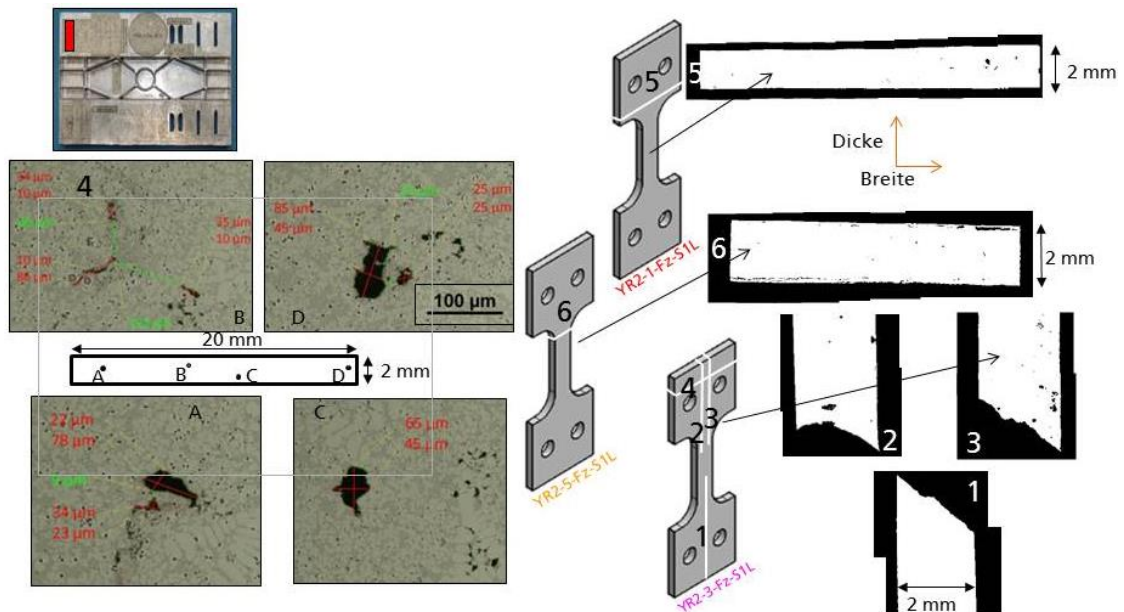


Bild 83: Verschiedene Schliffbilder aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) in der Y-Box mit unterschiedlichen Porositäten

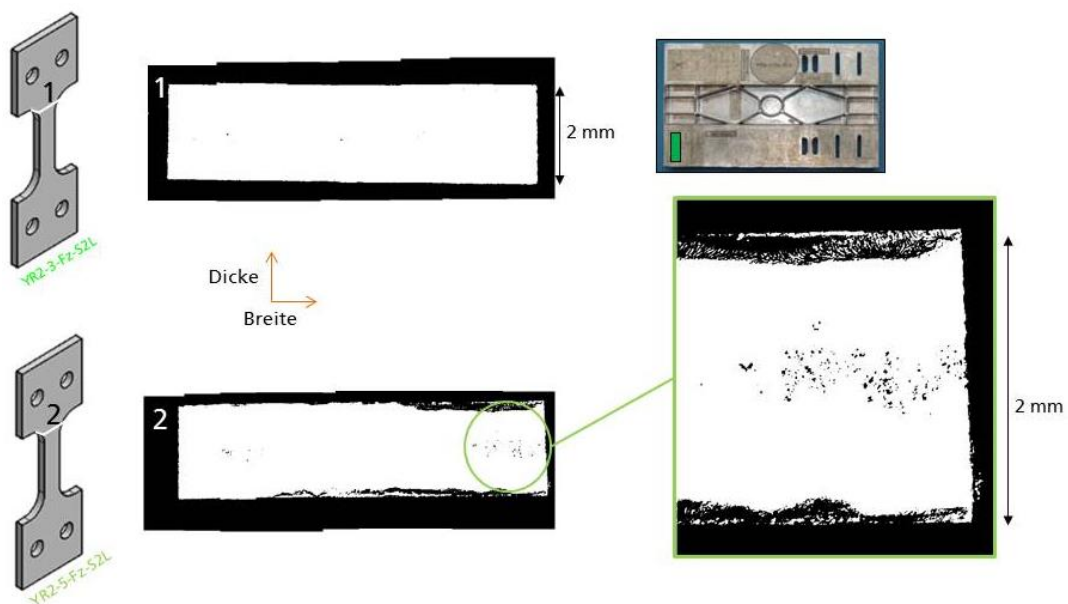


Bild 84: Verschiedene Schliffbilder aus Entnahmeposition 2 (Angussnah) in der Y-Box mit unterschiedlichen Porositäten

Bild 85 zeigt verschiedene Schliffbilder aus Entnahmeposition 3 (Mitte) in der Y-Box mit unterschiedlichen Porositäten. Bild 86 zeigt die Porositätsverteilung entlang der Probenbreite (links) und der Probendicke (rechts) aus einem Schliff der Glattzugprobe YR2-5-Fz-S3L. Der ermittelte Porositätswert hängt deutlich von der Bezugsfläche ab. Bei einer Bezugsfläche von  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  beträgt der maximale Wert der gemittelten Porosität ca. 5% (linkes Bild in Bild 86).

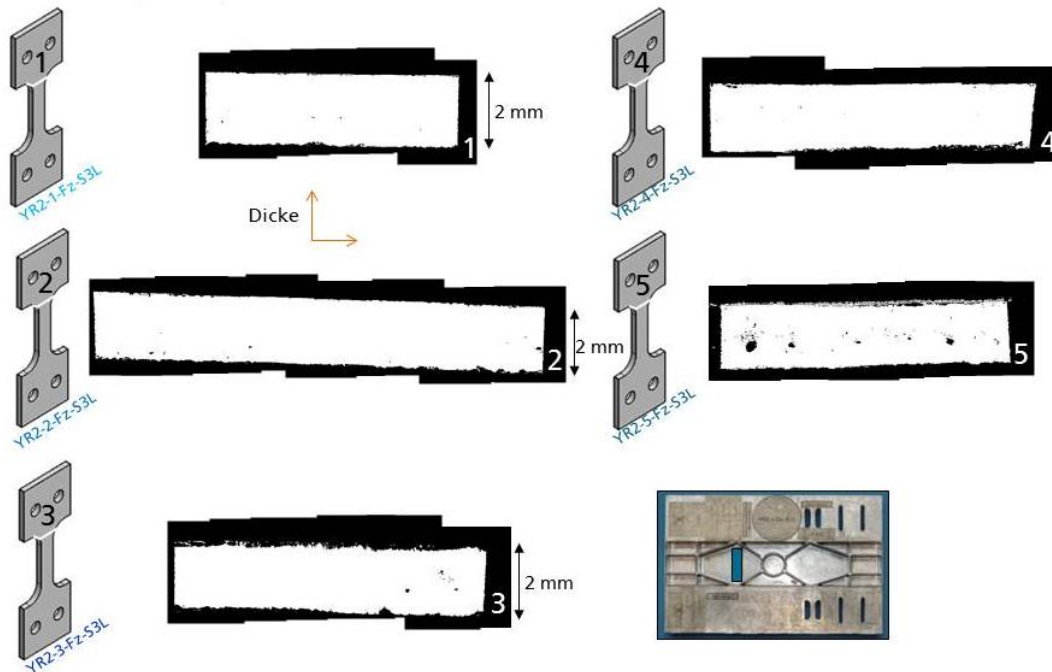


Bild 85: Verschiedene Schliffbilder aus Entnahmeposition 3 (Mitte) in der Y-Box mit unterschiedlichen Porositäten

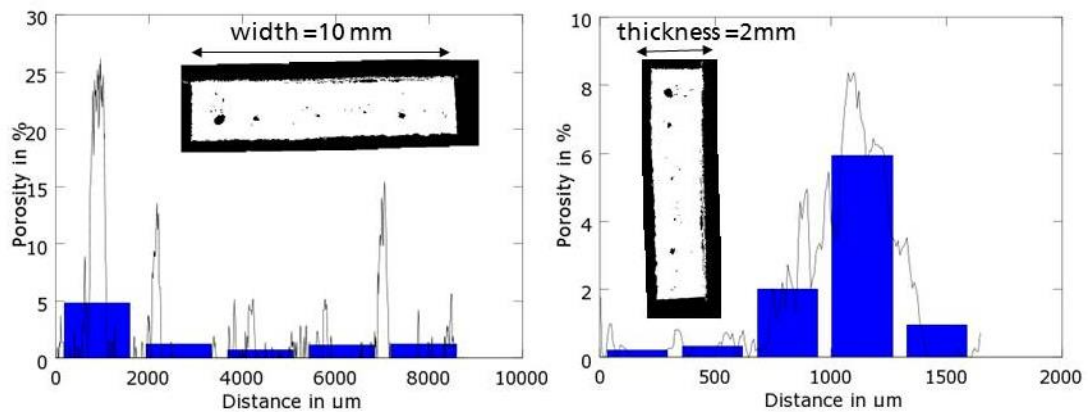


Bild 86: Porositätsverteilung entlang der Probenbreite (links) und der Probendicke (rechts) aus einem Schliff der Glattzugprobe YR2-5-Fz-S3L aus Entnahmeposition 3 (Mitte)

## 10.2 Bruchflächen von Kerbzug- und Scherzugproben

Bild 87 und Bild 88 zeigen für die Kerbzugproben aus zwei Entnahmepositionen die normierten Kraft-Verschiebungskurven und REM-Bilder der Bruchflächen. Die Streuungen der Bruchdehnung der Kerbzugproben sind kleiner als die der Glattzugproben. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Volumen mit höherer

Belastung in der Kerbzugprobe deutlich kleiner als das in der Glattzugprobe ist und dadurch die Porosität im Prüfbereich einer Kerbzugprobe weniger variiert. Im Vergleich mit den Porenverteilungen in den Proben aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) konzentrieren sich die Poren in den Proben aus Entnahmeposition 2 (Angussnah) eher in der Wandmitte. Die Bruchfläche der Kerbzugprobe YR2-5-FzR4-S1L aus Entnahmeposition 2 liefert die geringste Bruchdehnung innerhalb der Probenserie und auf der entsprechenden Bruchfläche ist ein langer Kaltriß zu erkennen.

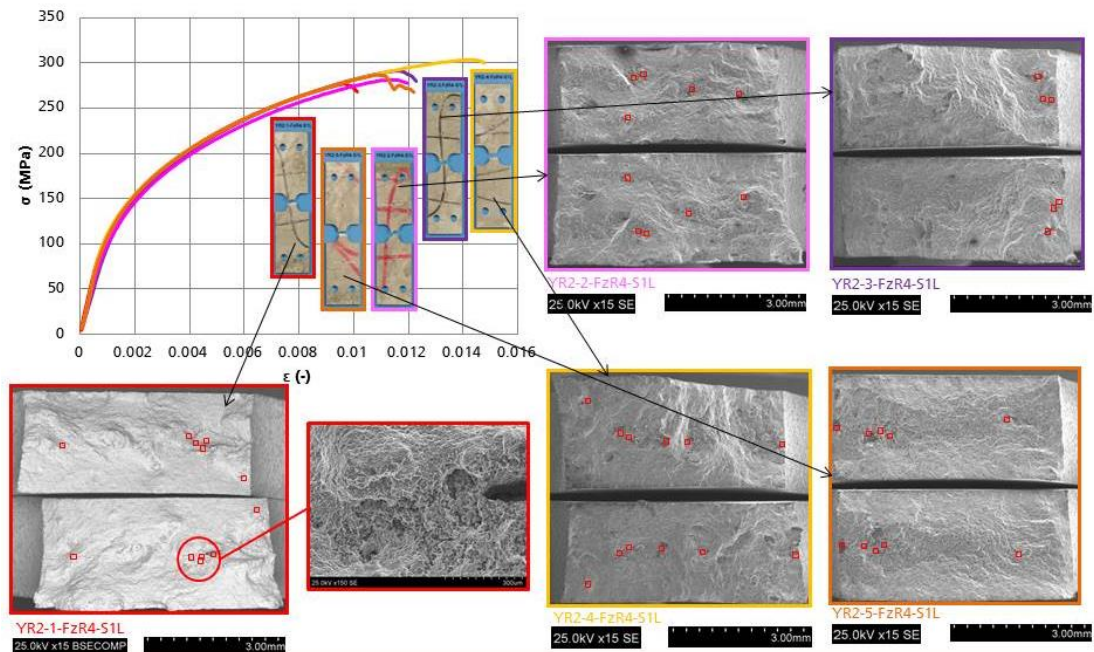


Bild 87: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Kerbzugproben aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) in der Y-Box

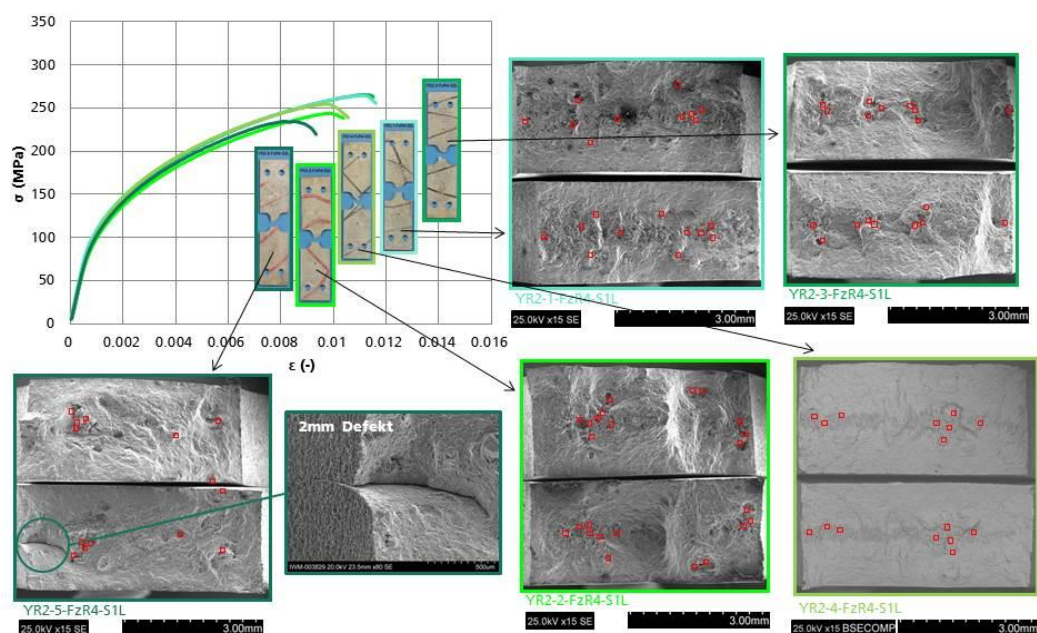


Bild 88: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Kerbzugproben aus Entnahmeposition 2 (Angussnah) in der Y-Box

Die normierten Kraft-Verschiebungskurven und REM-Bilder der Bruchflächen der Scherzugproben werden in Bild 89 und Bild 90 für Probenentnahmeposition 1 und 2 dargestellt. Auch bei Scherzugproben führen große Poren oder Kaltrisse zu einem früheren Versagen. Während bei den Glatt- und Kerbzugproben viele kleine Waben auf den gesamten Bruchflächen vorliegen, sind bei Scherzugproben nur wenige Bereiche mit kleinen Waben zu erkennen und viele Bereiche zeigen tendenziell glattere Bruchflächen.

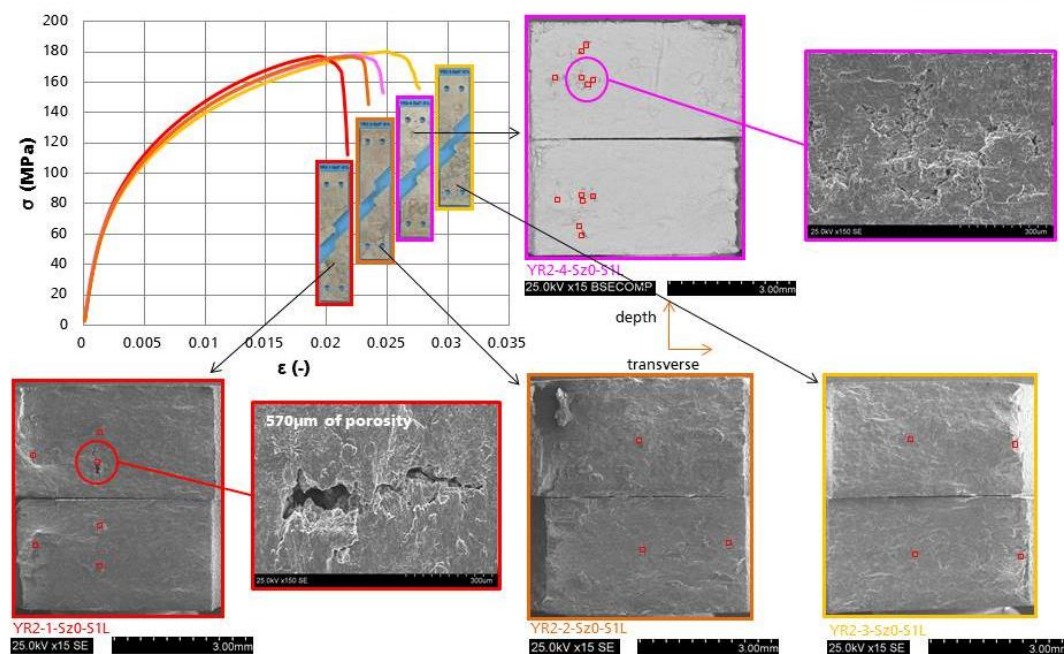


Bild 89: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Scherzugproben aus Entnahmeposition 1 (Angussfern) in der Y-Box



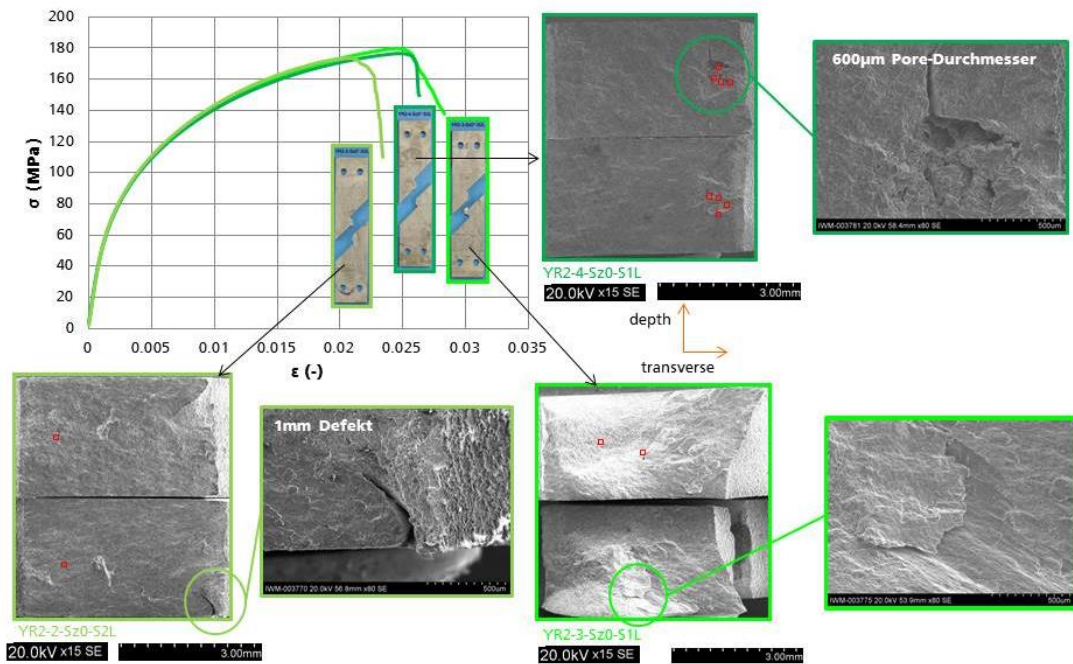


Bild 90: REM-Untersuchungen der Bruchflächen der Scherzugproben aus Entnahmeposition 2 (Angussnah) in der Y-Box

### 10.3 Zellmodellrechnungen

Zellmodellrechnungen mit verschiedenen repräsentativen Volumenelementen (RVE) wurden zur Ableitung von Werkstoffmodellen für die Modellierung der Einflüsse der Porosität auf elastische und plastische Eigenschaften einschließlich des Bruchverhaltens durchgeführt. Während RVE mit einer Pore zur Ableitung der konstitutiven Gesetze eingesetzt wurde, wurden RVE mit mehreren Poren zur Untersuchung der Einflüsse der Porenmorphologie auf das Versagensverhalten verwendet. Dabei wurde jeweils der Spannungszustand systematisch variiert.

#### 10.3.1 Makro-mechanisches Werkstoffmodell des Matrixwerkstoffs

Es wurde angenommen, dass die porenfreie elasto-plastische Matrix mit dem isotropen plastisch inkompressiblen von Mises-Modell und das Versagen mit dem bi-failure-Modell zu modellieren sind. Das phänomenologische bi-failure Modell [SUN13] ist eine Erweiterung des Johnson-Cook-Modells [JOH85] und beruht weiterhin auf einer von Mehrachsigkeit abhängigen Bruchdehnung. Die Mehrachsigkeit  $\sigma_m/\sigma_e$  ist als Verhältnis der hydrostatischen Spannung  $\sigma_m$  zur von Mises-Vergleichsspannung  $\sigma_e$  definiert. Bei dem bi-failure-Modell wird der exponentielle Ansatz nach Johnson-Cook, der zur Beschreibung des Wabenbruchs geeignet ist, nur bei Mehrachsigkeiten oberhalb einer Übergangsmehrachsigkeit  $T_{trans}$  verwendet. Unterhalb des Übergangs wird zur Beschreibung des Scherbruchs ein empirischer Polynom-Ansatz definiert. Schematisch wird die Bruchdehnung als Funktion der Mehrachsigkeit und die analytischen Funktionen in Bild 91 dargestellt.

Übergang:  $\sigma_m/\sigma_e = T_{\text{trans}}$

Scherbruch  $T < T_{\text{trans}}$

$$\varepsilon_{f0} = d_{\text{shear1}} + d_{\text{shear2}} \left| \frac{\sigma_m}{\sigma_e} - T_0 \right|^{m_2} + d_{\text{shear3}} \left\langle - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_e} - T_0 \right) \right\rangle^{m_3}$$

Wabenbruch  $T \geq T_{\text{trans}}$

$$\varepsilon_{f0} = \left( d_1 + d_2 \exp\left( -d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right) \right)$$

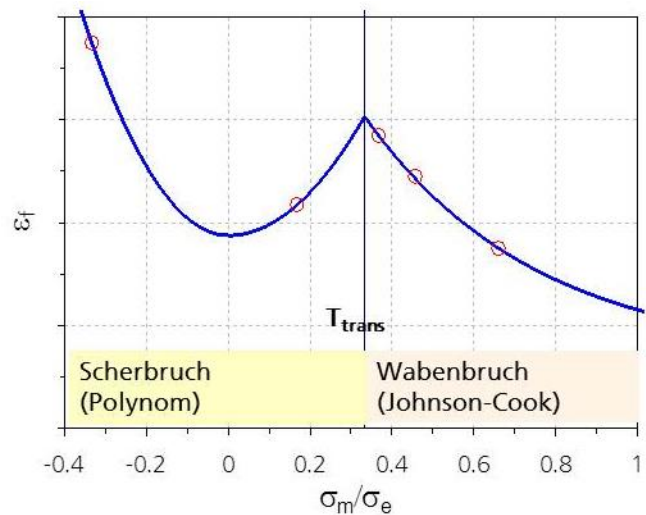


Bild 91: Schematische Darstellung der Bruchdehnung als Funktion der Mehrachsigkeit

Im bi-failure-Versagensmodell sind zehn Parameter durch Simulation der unterschiedlichen Probenformen unter verschiedenen Belastungsarten zu ermitteln.

$T_{\text{trans}}$  ist die Übergangsmehrachsigkeit von Scherbruch zum Wabenbruch,  $d_{\text{shear1}}$ ,  $d_{\text{shear2}}$ ,  $d_{\text{shear3}}$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  und  $T_0$  sind die Parameter zur Beschreibung des Scherbruchs und  $d_1$ ,  $d_2$  und  $d_3$  sind die Johnson-Cook Parameter zur Beschreibung des Wabenbruchs.

### 10.3.2 RVE mit einer Pore

Zur Modellierung der Einflüsse der Porosität auf elastische und plastische Eigenschaften einschließlich des Bruchverhaltens wurden Simulationen an RVE mit einer Pore durchgeführt. Dabei wurde die Porosität von 0% bis 30% variiert mit dreizehn Variationen (0%, 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 8%, 10%, 12%, 15%, 20% und 30%). Im Bild 92 sind die RVE bei 0,5, 5 und 30% Porosität dargestellt. Zur Veranschaulichung sind nur das halbe Matrixvolumen und die ganze äußere Oberfläche der Pore dargestellt.

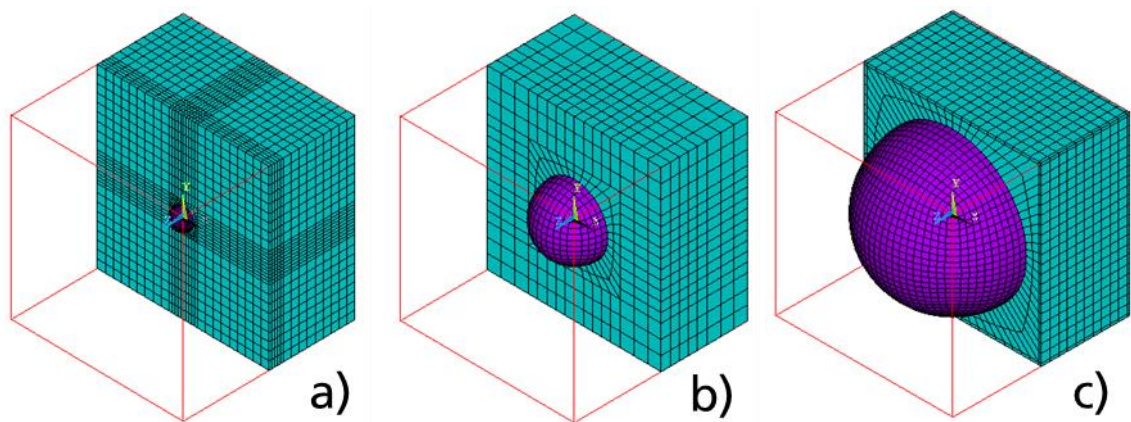


Bild 92: RVE mit einer Pore mit Zellgröße:1mmx1mmx1mm bei a) 0.5% b) 5% und c) 30% Porosität; Matrix in blau und äußere Porenoberfläche in violett

Zur Ableitung des Zusammenhangs zwischen Porosität und Elastizitätsmodul  $E$ , Poissonzahl  $\nu$  und Fließspannung  $\sigma_y$ , wurde eine einachsige Zugbelastung an RVE aufgebracht, wobei periodische Randbedingungen definiert wurden. Zur Modellierung des Einflusses der Porosität auf die Bruchdehnung  $\varepsilon_f$  wurden Zellmodellrechnungen unter verschiedenen Spannungszuständen wie Scherung, Scherzug, Druck, Biaxialzug in Kombination mit periodischen Randbedingungen realisiert. Die daraus berechneten makroskopischen mechanischen Kennwerte, wie das Elastizitätsmodul, die Poissonzahl, die Fließspannung  $\sigma_y$  und die Bruchdehnung, nehmen mit zunehmender Porosität ab. Die Entwicklungen der mit RVE berechneten makroskopischen Kräfte, Verschiebungen und Volumenänderungen werden jeweils gefittet und zur Ableitung von makroskopischen Modellen eingesetzt. Die Einzelheiten werden in Absatz 11 erläutert.

Die periodischen Randbedingungen können mit der folgenden Gleichung angegeben werden:

$$u_i(x_1, x_2, x_3) = \bar{\varepsilon}_{ij} x_j + u_i^*(x_1, x_2, x_3).$$

Dabei bezeichnet  $u_i(x_1, x_2, x_3)$  die Verschiebungen am Punkt  $x_j$ , der erste Teil der rechten Seite der Gleichung repräsentiert das gemittelte Verschiebungsfeld und der zweite Teil der rechten Seite der Gleichung stellt eine periodische Funktion von einem RVE zum anderen RVE dar. Da die Ränder eines RVEs zum Erreichen einer spaltlosen Raumfüllung immer in Form einer gegenüber stehenden parallelen Flächenpaarung erscheinen müssen, können die Verschiebungen der beiden Flächen  $u_i^{k+}$  und  $u_i^{k-}$  mit der folgenden Gleichung ausgedrückt werden:

$$u_i^{k+} - u_i^{k-} = \bar{\varepsilon}_{ij} (x_j^{k+} - x_j^{k-}) = \bar{\varepsilon}_{ij} \Delta x_j^k.$$

Diese Gleichung kann in der FE-Analyse leicht zur Definition von Knotenverschiebungen verwendet werden. Diese periodischen Randbedingungen erlauben es, die ursprünglich geraden Ränder des RVE mit zunehmender Belastung in gekrümmte Form entwickeln. Ein Sonderfall von periodischen Randbedingungen ist die

Beibehaltung der gegenüber parallel stehenden Ränder eines RVEs als gerade Flächen. In Bild 93 und Bild 94 werden berechnete Verformungen für eine Porosität von 30% unter Scherbelastung mit zwei unterschiedlichen Randbedingungen verglichen. Sowohl die berechnete Porenform als auch die berechnete Verteilung der von Mises-Vergleichsspannung hängen von der Annahme der Randbedingungen ab. Bei anderen Belastungen wie z.B. einachsigen und Biaxialzug unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen den beiden Arten von Randbedingungen deutlich geringer.

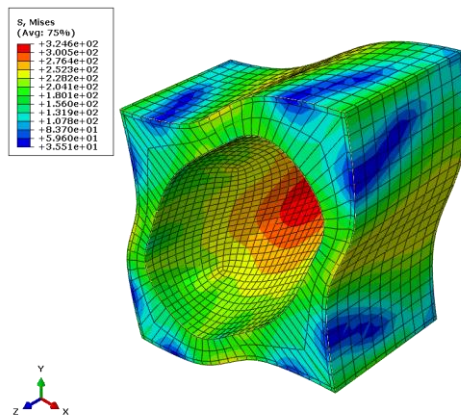


Bild 93: Deformiertes RVE mit einer Porosität von 30% unter Scherung mit periodischen Randbedingungen mit Verteilung der v. Mises-Vergleichsspannung

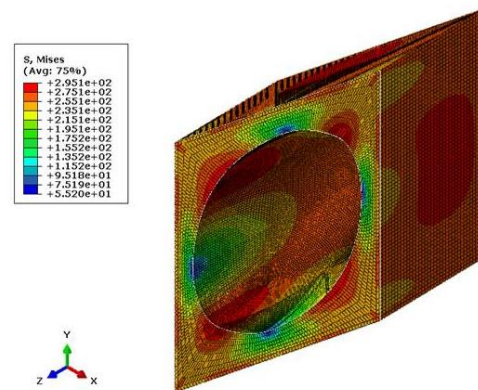


Bild 94: Deformiertes RVE mit einer Porosität von 30% unter Scherung mit Randbedingungen, die Zellränder gerade halten (Straight), mit Verteilung der v. Mises-Vergleichsspannung

Zur Untersuchung des Einflusses der Elementgröße auf die Ergebnisse der Zellmodellrechnungen wurde ein RVE für eine Porosität von 5% mit sieben verschiedenen Elementkantenlängen generiert und unter Zugbelastung berechnet. Die Größe des RVEs beträgt  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$  und die Elementkantenlänge für die Oberfläche der Pore wurde von 0,02, über 0,03, 0,04, 0,05, 0,06 bis 0,09 mm variiert. Bild 95 zeigt drei Zellmodelle mit gleichen Dimensionen und unterschiedlichen Elementgrößen (0,02, 0,04 und 0,09 mm) unter Zugbelastung in x-Richtung. Während die berechnete Verteilung der von Mises-Vergleichsspannung nur geringfügig von der Elementgröße abhängt, wird die berechnete Schädigung von der Elementgröße stark beeinflusst. Die Anwendung einer kleineren Elementgröße führte zu einem früheren Versagen des RVEs. Die makroskopische Vergleichsdehnung bei der Schädigungsinitiation für die Elementgröße  $L_e=0,02 \text{ mm}$  beträgt  $\epsilon_e=0,030$ , für  $L_e=0,04$   $\epsilon_e=0,033$  und für  $L_e=0,09$   $\epsilon_e=0,039$ . Zur Trennung des Elementgrößeneinflusses vom Mehrachsigeinfluss wurden die Zellmodellrechnungen für unterschiedliche Belastungssituationen und Porositäten mit gleicher Elementgröße durchgeführt.



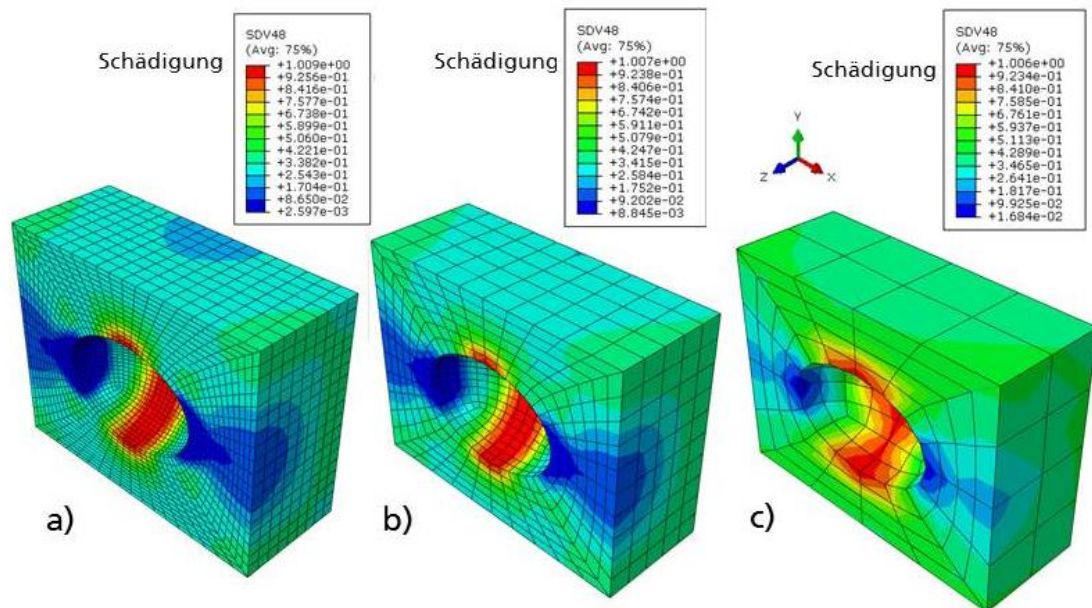


Bild 95: Einflüsse der Elementgröße auf die berechnete Schädigung aus RVEs für eine Porosität von 5% unter Zugbelastung

Die aus Zellmodellrechnungen berechneten makroskopischen Vergleichsspannungs-Vergleichsdehnungskurven für eine Porosität von 30% unter unterschiedlichen Spannungszuständen werden in Bild 96 und Bild 97 für zwei unterschiedliche Randbedingungen (periodisch oder gerade Seitenflächen) dargestellt. Die Endpunkte der Spannungs-Dehnungskurven bezeichnen die makroskopischen Spannungen und Dehnungen, bei denen das Versagenskriterium in den ersten Elementen erreicht wurde. Zwei abweichende Ergebnisse zwischen den beiden Randbedingungenarten sind zu erkennen. Es fällt auf, dass die berechnete Spannungs-Dehnungskurve bei Scherbelastung unter Annahme der periodischen Randbedingungen deutlich niedriger liegt als die Kurven aus anderen Belastungssituationen. Ferner ist zu erkennen, dass die makroskopische Bruchdehnung unter Druckbelastung aus den periodischen Randbedingungen doppelt so groß wie die aus den Randbedingungen für gerade Seitenflächen ist. Diese Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass sich die berechneten lokalen Verformungen in den RVE-Modellen mit den unterschiedlichen Randbedingungen bei Druck- und Scherbelastung deutlich unterscheiden.

Bild 96: Berechnete Vergleichsspannungs-Vergleichsdehnungskurven aus RVEs für eine Porosität von 30% bei verschiedenen Spannungszuständen unter Annahme von periodischen Randbedingungen

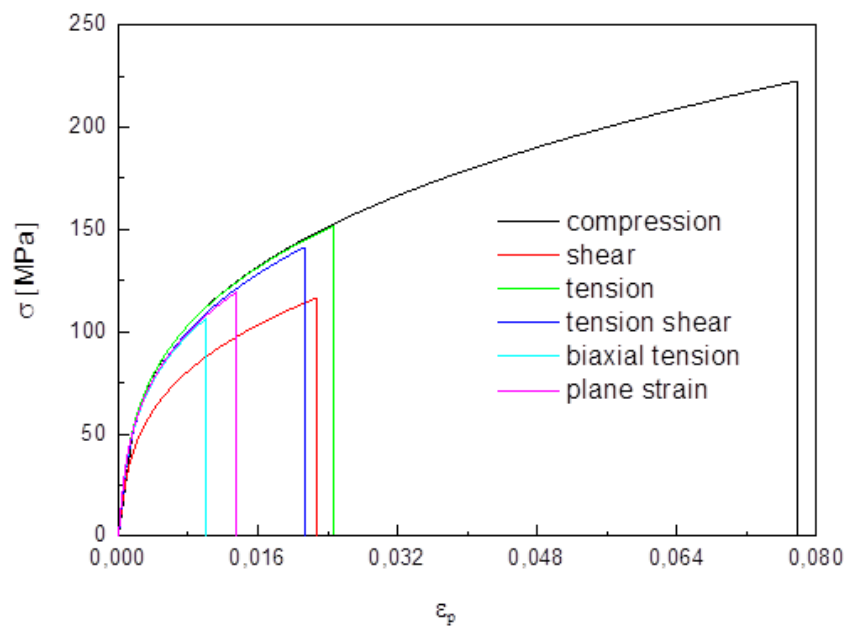


Bild 97: Berechnete Vergleichsspannungs-Vergleichsdehnungskurven aus RVEs für eine Porosität von 30% bei verschiedenen Spannungszuständen unter Annahme von Randbedingungen für gerade Seitenflächen (Straight)

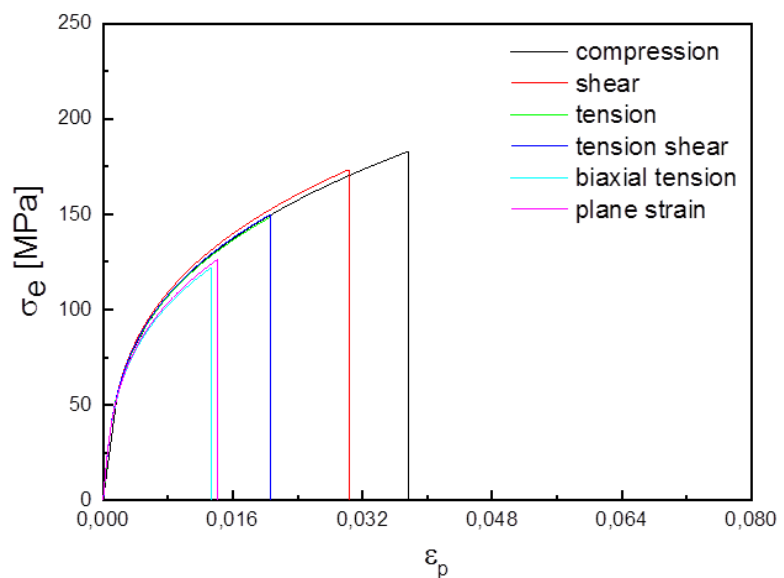
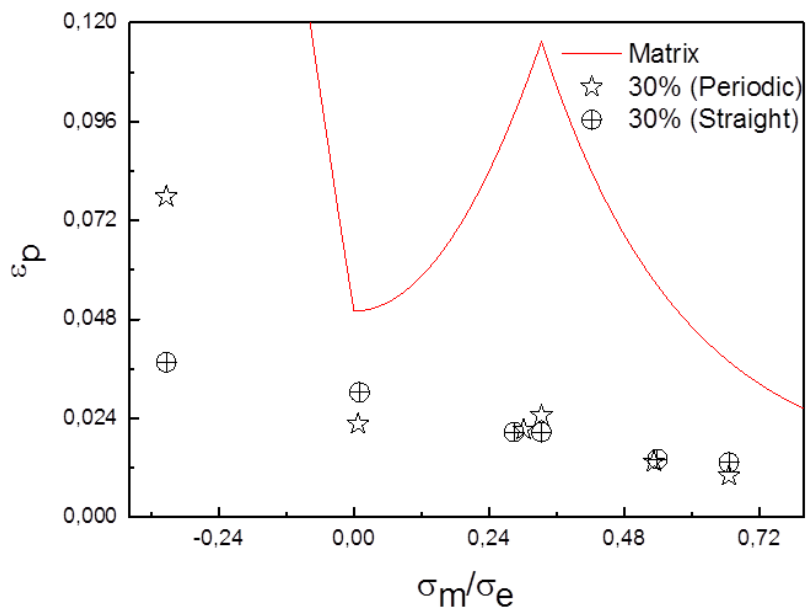


Bild 98 zeigt die aus Zellmodellrechnungen berechneten makroskopischen Bruchdehnungen als Funktion der Mehrachsigkeit für eine Porosität von 30%, wobei zwei unterschiedliche Randbedingungen verwendet wurden. Wie erwartet, nehmen die Bruchdehnungen für Porosität von 30% im ganzen Mehrachsigkeitsbereich mit steigender Mehrachsigkeit ab. Wie oben erwähnt, weichen die Aussagen aus Rechnungen mit den periodischen Randbedingungen über das Bruchverhalten bei Druck- und Scherung von den Aussagen aus den Randbedingungen für gerade Seitenflächen des RVEs ab. Im Bereich der Mehrachsigkeit größer als 0,3, der durch Rechnungen unter einachsiger Zug, ebener Dehnung und biaxialem Zug charakterisiert wurde, sind die Ergebnisse aus den beiden unterschiedlichen Randbedingungsarten ähnlich. Weil die Aussagen der Zellmodellrechnungen bzgl.

Wechselwirkungen zwischen Porosität und Mehrachsigkeit nicht eindeutig sind, wurde die Porositätsabhängigkeit der Bruchdehnung im Folgenden durch eine Skalierung der ganzen Versagenskurve beschrieben.

Bild 98: Berechnete Bruchdehnungen (Symbole) als Funktion der Mehrachsigkeit aus RVEs für eine Porosität von 30% bei verschiedenen Spannungszuständen unter zwei unterschiedlichen Annahmen für die Randbedingungen



### 10.3.3 RVE mit Mehrporen

Zur Untersuchung des Einflusses der Porenmorphologie auf mechanische Eigenschaften insbesondere das Bruchverhalten wurden RVE-Modelle mit mehreren Poren mit unterschiedlichen Formen und Größe erstellt. Dabei wurde immer eine globale Porosität von 5% betrachtet. Kubische Zellen mit einer Seitenlänge von 1 mm wurden weiterhin verwendet, aber reguläre Gitter wurden generiert, sodass die kleinste mögliche Pore einem FE-Element entspricht (Hexaeder von 0.04mm x 0.04mm x 0.04mm). Die RVE-Modelle sind für zwei ausgewählte Morphologien in Bild 99 dargestellt. Die Matrix wurde nicht gezeigt und jede Pore erscheint mit einer eigenen Farbe.



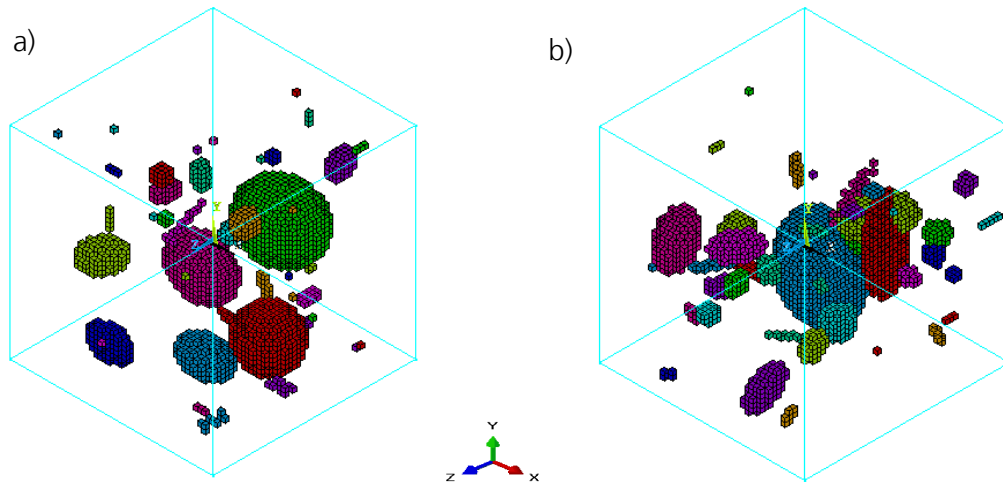


Bild 99: Zwei RVE-Modelle mit mehreren Poren bei Porosität von 5% für zwei Morphologien (a) M3 und b) M7)

Insgesamt wurden 13 Morphologien nach Zufallsprinzip erzeugt. Davon haben 8 Porenmorphologien die gleiche Porosität von 5%. In Tabelle 3 werden die Porenanzahl, die Porenfläche und die äquivalente Probengröße  $D_{eq}$  für die acht Porenmorphologien zusammengestellt. Zellmodellrechnungen wurden mit den Randbedingungen für gerade Seitenflächen der RVEs unter Druck-, Scher-, Scherzug-, Zug-, ebenem Dehnungszustands- und Biaxialzugbelastungen durchgeführt.

Modell ID	Porosität	Porenanzahl	Porenfläche [mm <sup>2</sup> ]	$D_{eq}$ [mm]
Modell-05-1	0.05	50	0.597	0.066
Modell-05-2	0.05	42	0.463	0.086
Modell-05-3	0.05	52	0.692	0.058
Modell-05-4	0.05	46	0.575	0.069
Modell-05-5	0.05	45	0.500	0.080
Modell-05-6	0.05	56	0.669	0.060
Modell-05-7	0.05	46	0.378	0.105
Modell-05-8	0.05	39	0.519	0.077

Tabelle 3: Acht Porenmorphologien für Zellmodellrechnungen mit Multi-Poren

Bild 100 und Bild 101 zeigen die berechneten makroskopischen Vergleichsspannungs-Dehnungskurven für die acht Porenmorphologien unter Zugbelastung in X- bzw. Z-Richtung. Die Einflüsse der Porenmorphologie auf die Bruchdehnungen sind unter den beiden Belastungsrichtungen nicht gleich. Während die Morphologie M3 die niedrigste Bruchdehnung bei Zugbelastung in X-Richtung aufweist, liefert die Morphologie M4 bei der Zugbelastung in Z-Richtung die niedrigste Bruchdehnung.

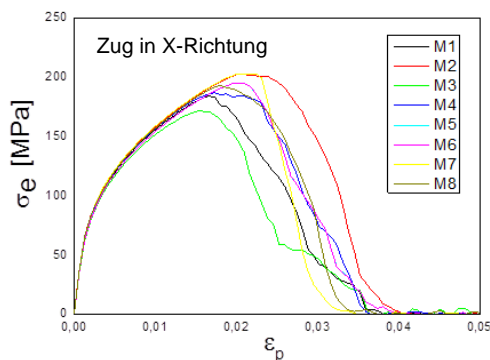


Bild 100: Berechnete Vergleichsspannungs-Dehnungskurven aus RVE-Modellen für unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% unter Zugbelastung in X-Richtung

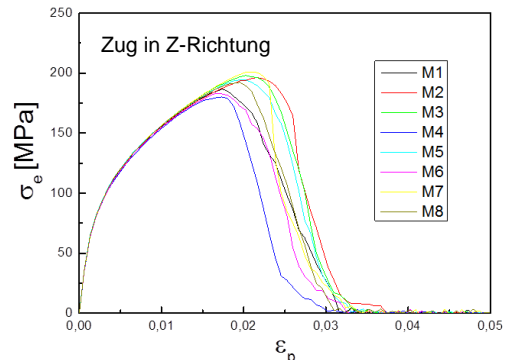


Bild 101: Berechnete Vergleichsspannungs-Dehnungskurven aus RVE-Modellen für unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% unter Zugbelastung in Z-Richtung

Bild 102 und Bild 103 zeigen für die Spannungszustände der ebenen Dehnung und des Biaxialzugs die berechneten makroskopischen Vergleichsspannungs-Dehnungskurven für die acht Porenmorphologien. Die Reihenfolge der Bruchdehnungen für die unterschiedlichen Porenmorphologien ist bei den beiden Spannungszuständen ähnlich. Die Bruchdehnungen unter dem ebenen Dehnungszustand sind im Vergleich mit den Werten unter anderen Spannungszuständen am kleinsten.

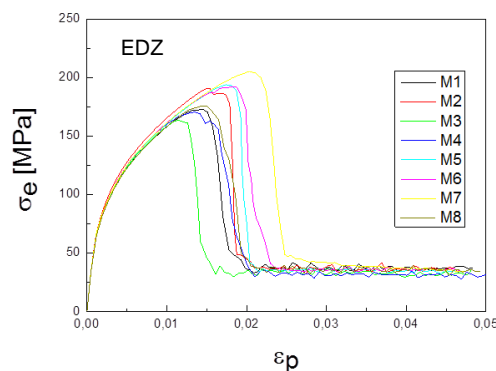


Bild 102: Berechnete Vergleichsspannungs-Dehnungskurven aus RVE-Modellen für unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% unter ebener Dehnung

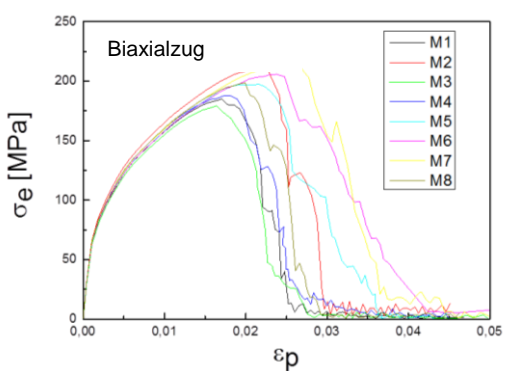


Bild 103: Berechnete Vergleichsspannungs-Dehnungskurven aus RVE-Modellen für unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% unter biaxialem Zug

Bild 104 zeigt die Versagensbilder und die Verteilungen der plastischen Vergleichsdehnung eines RVE-Modells mit der Porenmorphologie M3 (5% Porosität) unter einachsigen Zug-, ebener Dehnungsbelastungen und biaxialem Zug. Die Risse unter Zugbelastung in X- und Z-Richtung laufen über unterschiedliche Poren und daher sind die Einflüsse der Porenmorphologie auf das Versagen von der Belastungsrichtung

abhängig. Bei Betrachtung der in Bild 99 a dargestellten Porenmorphologie M3 ist zu erkennen, dass die Risse in allen Belastungssituationen über die Stellen mit großen Poren laufen.

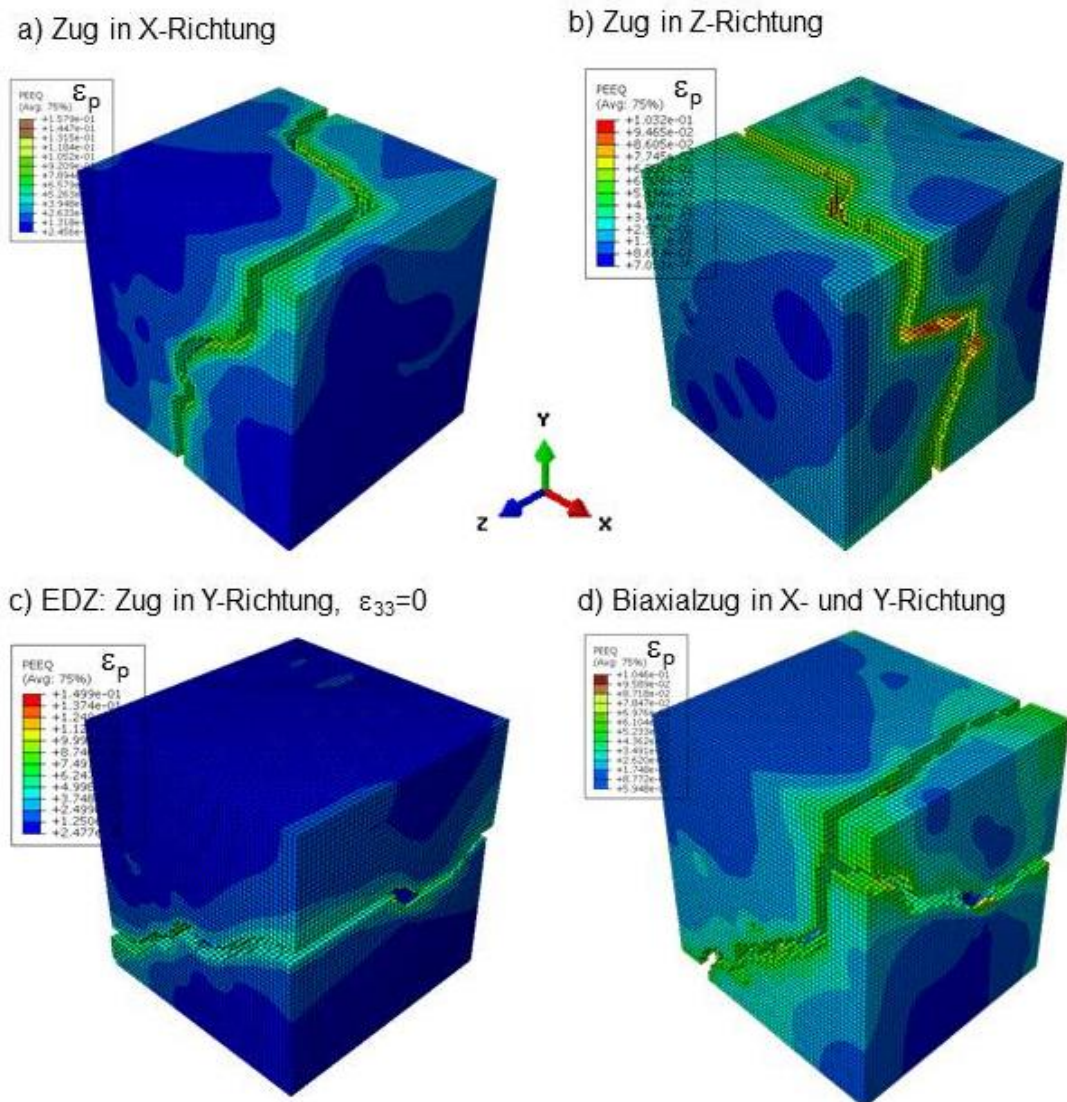
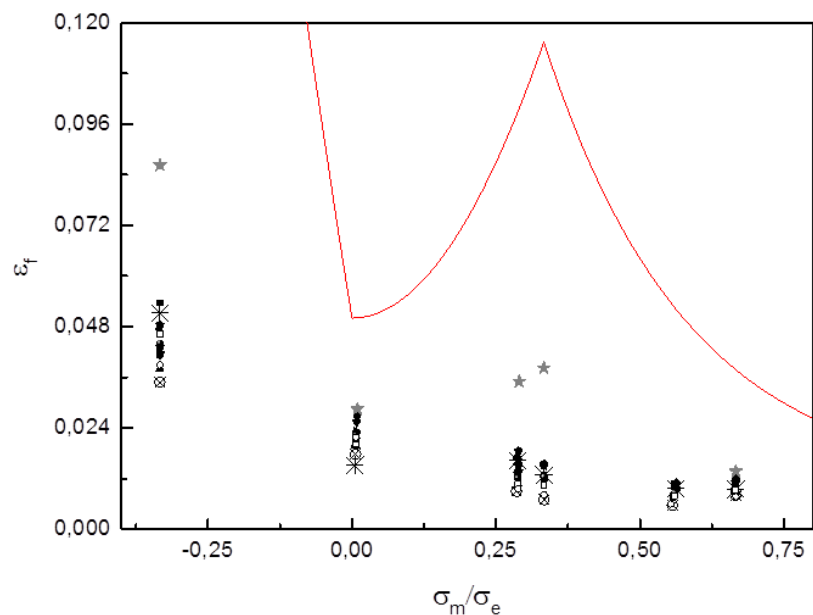


Bild 104: Versagensbilder eines RVE-Modells mit der Porenmorphologie M3 (5% Porosität) unter verschiedenen Belastungen (a: Zug in X-Richtung, b: Zug in Z-Richtung, c: EDZ und d: Biaxialzug)

Die Bruchdehnungen als Funktion der Mehrachsigkeit werden in Bild 105 für alle berechneten Porenmorphologien eingetragen. Die Versagenskurve der Matrix ist mit einer roten Linie und die Versagenspunkte aus den RVE-Modellen mit einer Pore mit grauen Sternen dargestellt. Alle anderen Porenmorphologien sind mit schwarzen Symbolen gekennzeichnet. Aus Bild 105 ist zu entnehmen, dass die Morphologie mit einer Pore im gesamten Bereich der Mehrachsigkeit die größten Bruchdehnungen

liefert. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Porenmorphologien führt zu einer Streuung der Bruchdehnung, und die Größe der Streuung ist von der Mehrachsigkeit abhängig. Der Einfluss der Mehrachsigkeit auf die Bruchdehnung kann in Zusammenhang mit dem Einfluss der Porenmorphologie beschrieben werden. Während die mit gekreuzten Kreisen dargestellte Porenmorphologie fast immer die minimalen Bruchdehnungen zeigt, liefert die mit Sternen bezeichnete Morphologie die maximalen Bruchdehnungen unter Druck und Zug, aber die minimalen Bruchdehnungen unter Scherung und biaxialem Zug. Aus den Ergebnissen von Bild 105 ist anzunehmen, dass eine Berücksichtigung der Einflüsse der Porenmorphologie nicht leicht durch geschlossene Gleichungen (z. B. mit Einbeziehung von Porenabstand, -größe,...) realisiert werden und deren Übertragbarkeit auf beliebige Porenmorphologien nicht gewährleistet werden kann.

Bild 105: Mit RVE-Modellen berechnete Abhängigkeit der Bruchdehnung von Porenmorphologie und Mehrachsigkeit bei Porosität von 5%.  
Rote Linie: Matrix  
Symbole: RVE mit Poren



Zur Erfassung möglicher Zusammenhänge zwischen dem Versagensverhalten und der entsprechenden Porenmorphologie wurden die berechneten Bruchdehnungen für acht unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% als Funktion des äquivalenten Porendurchmessers bzw. der Porenoberfläche in Bild 106 und Bild 107 dargestellt. Die RVE-Modelle wurden unter Zug in Y-Richtung belastet. In beiden Fällen ist keine klare Abhängigkeit zu erkennen.

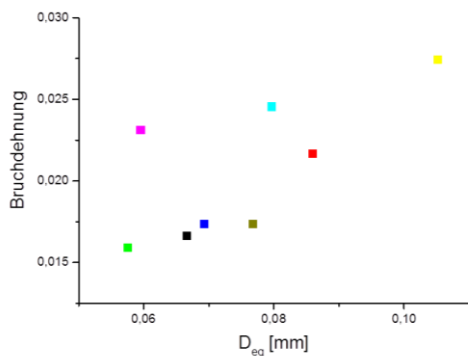


Bild 106: Berechnete Bruchdehnung für unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% unter Zugbelastung in Y-Richtung als Funktion des äquivalenten Porendurchmessers

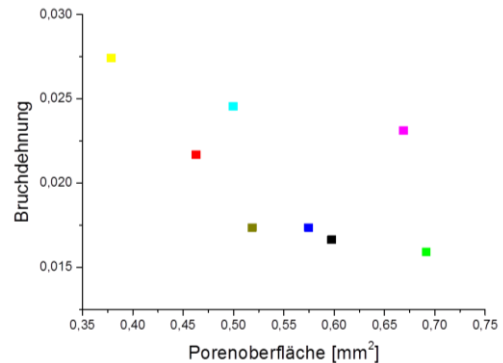


Bild 107: Berechnete Bruchdehnung für unterschiedliche Porenmorphologien bei einer Porosität von 5% unter Zugbelastung in Y-Richtung als Funktion der Porenoberfläche

Alle Befunde aus den Zellmodellrechnungen zeigen, dass eine analytische Beschreibung der Einflüsse der Porenmorphologie auf das Versagen sehr komplex sein wird, und die Übertragbarkeit solcher Ansätze auf beliebige Morphologien und Belastungen kaum zu realisieren ist. Das ist der Anlass, eine andere Vorgehensweise zur Beschreibung des Porenmorphologie-Einflusses vorzuschlagen, um diese Probleme zu vermeiden. Die vorgeschlagene Vorgehensweise zur Modellierung der Porenmorphologie-Effekte wird im Absatz 11.2 dargestellt.

Die Ergebnisse aus den Zellmodellrechnungen mit unterschiedlichen Porenmorphologien beziehen sich auf ausgewählte Morphologien, die nicht unmittelbar repräsentativ für die untersuchten Gussteile sind. In Zukunft können Zellmodelle entweder direkt auf Basis von Ergebnissen von 3D-CT-Scans oder durch Einsatz des neu entwickelten stochastischen Modells erstellt werden.

## 11 Entwicklung eines makroskopischen Versagensmodells (IWM)

### 11.1 Werkstoffmodell mit Berücksichtigung der Porositätseinflüsse

Für die Crashsimulation wurde ein Werkstoffmodell zur makro-mechanischen Modellierung der Einflüsse der Porenmorphologie auf das Versagensverhalten entwickelt und in Crashcodes (ABAQUS und LS-DYNA) implementiert. Die Porenmorphologie wurde nicht durch Einsatz von Gleichungen mit Morphologieparametern sondern mittels einer inhomogenen Verteilung von Porosität beschrieben. Zur Generierung einer Porenverteilung wurde das im Rahmen des Projekts entwickelte stochastische Programm (siehe Absatz 7.1) angewendet. Die Porengröße kann durch die Definition von mehreren nebeneinander liegenden Elementen mit hoher Porosität, der Abstand zwischen zwei Poren durch den Abstand zwischen zwei Elementen mit hoher Porosität, oder die porenfreien Bereiche durch

Elemente mit Null oder geringfügiger Porosität nachgebildet werden. Diese vereinfachte Methode bietet den Vorteil, dass keine Eingangsparameter wie Porengröße oder Porenabstand explizit benötigt werden. Wie bereits aufgezeigt, können keine vollständigen geschlossenen Gleichungen zwischen mechanischen Größen (z.B. Fließgrenze und Bruchdehnung) und Porenmorphologieparametern (z.B. Porenabstand, Porengröße) für einen beliebigen Spannungszustand abgeleitet werden. Zum Veranschaulichen kann das Beispiel eines Zugversuchs an einer Zugprobe mit zwei Poren betrachtet werden. Ein kleiner Abstand zwischen den beiden Poren reduziert die Bruchdehnung drastisch, wenn die Poren quer zur Belastungsrichtung liegen, ist aber harmlos, wenn die Poren parallel zur Belastungsrichtung liegen. Der komplexe Zusammenhang zwischen Porenmorphologie und mechanischen Eigenschaften wurde schon im letzten Absatz ausführlich dargestellt. Dagegen lässt sich der Einfluss der Porosität auf mechanische Eigenschaften mit einem Skalar sinnvoll beschreiben. Mit zunehmender Porosität sinken elastische Module, Fließgrenzen und Bruchdehnungen, und geschlossene Lösungen können aus den bereits erwähnten Zellmodellrechnungen abgeleitet werden. Als Konsequenz wurde ein porositätsabhängiges Modell entwickelt.

Basis des neuen makro-mechanischen Werkstoffmodells ist ein elasto-plastisches Werkstoffmodell einschließlich Versagen für das porenfreie Matrixmaterial. Das elastische, plastische und Versagensverhalten des porösen Materials sind von den Eigenschaften des Matrixmaterials und der Porosität abhängig. Zur Ableitung der Beziehungen zwischen mechanischen Eigenschaften und Porosität werden RVE-Rechnungen mit Variation der Porosität und Mehrachsigkeit durchgeführt.

Es ist zu merken, dass die Porosität immer die Anfangsporosität bezeichnet. Änderungen der Porosität aufgrund von Belastungen unter verschiedenen Spannungszuständen wurden hier nicht berücksichtigt. Als Konsequenz wurde auch der poröse Werkstoff wie die Matrix als plastisch inkompressibel betrachtet.

Auf Basis der Zellmodellrechnungen wurde angenommen, dass eine höhere Porosität eine Absenkung der elastischen Steifigkeit, der Fließspannung und der Bruchdehnung bewirkt. Im Werkstoffmodell wurden die elastische Steifigkeit, die Fließspannung und die Bruchdehnung des porösen Materials als Funktion der entsprechenden Werte des dichten Materials und der Porosität  $f$  definiert. In Grenzfällen beschreiben die Beziehungen das Verhalten des Matrixmaterials bei  $f=0$  und das Porenverhalten (keine Steifigkeit und Festigkeit) bei  $f=1$ .

Für den elastischen Bereich sind im isotropen Fall der Elastizitätsmodul  $E$  und die Poissonzahl  $\nu$  zu bestimmen. Bild 108 und Bild 109 zeigen die im Modell verwendete Beziehung zwischen  $E$  bzw.  $\nu$  und  $f$ . Die Ergebnisse aus den Zellmodellrechnungen sind jeweils mit roten offenen Punkten gekennzeichnet. Aus diesen Punkten konnte eine analytische Form abgeleitet werden, deren angepasste Parameter in Bild 108 und Bild 109 angegeben sind.

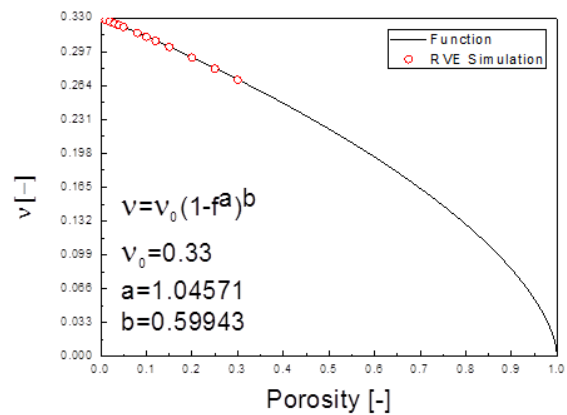
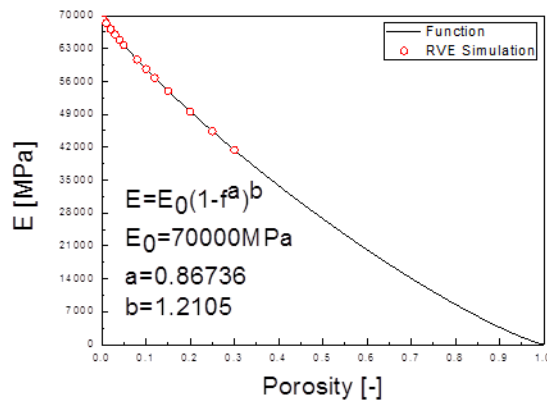


Bild 108: Elastizitätsmodul E als Funktion der Porosität f mit der entsprechenden analytischen Beziehung  
 Bild 109: Poissonzahl  $\nu$  als Funktion der Porosität f mit der entsprechenden analytischen Beziehung

Für das plastische Modell nach von Mises wurde die Erweiterung auf eine Porositätsabhängigkeit durch die Einführung einer Beziehung zwischen Fließspannung und Porosität realisiert. Wie bei den elastischen Eigenschaften wurde diese Beziehung aus Zellmodellrechnungen abgeleitet. Bild 110 zeigt die im Modell verwendete Beziehung zwischen Fließspannung und Porosität, wobei die analytische Form mit den angepassten Parametern angegeben wird. Für die Fließspannung der Matrix  $\sigma_{y0}$  wurde ein Ludwik-Ansatz angenommen.

$$\sigma_y = \sigma_{y0} (1 - f^{s_a})^{s_b}$$

$$\sigma_{y0} = A + B(\bar{\epsilon}_m^{pl})^n$$

$A = 10.5 \text{ MPa}$   
 $B = 771.4 \text{ MPa}$   
 $n = 0.31326$   
 $s_a = 0.85603$   
 $s_b = 1.04655$

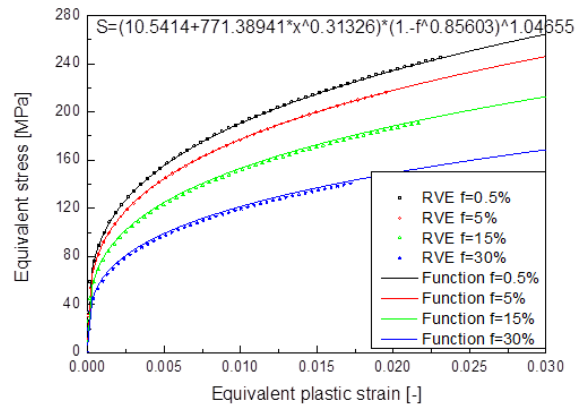


Bild 110: Fließspannung als Funktion der äquivalenten plastischen Dehnung für unterschiedliche Werte der Porosität f mit analytischer Beziehung zwischen  $\sigma_y$  und f

Für das Versagensmodell wurde angenommen, dass die Absenkung der Bruchdehnung mit der Porositätszunahme bei jeder Mehrachsigkeit proportional ist. Die Beziehung zwischen der Bruchdehnung und Porosität wurde aus Zellmodellrechnungen unter einachsiger Zug ermittelt und ist in Bild 111 dargestellt. Für jede Porosität wurde die ganze Versagenskurve mit dem gleichen von der Porosität abhängigen Faktor skaliert (Bild 112).



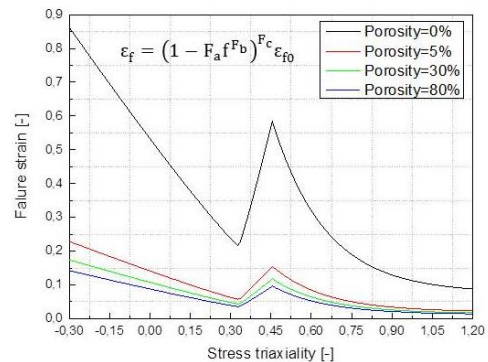
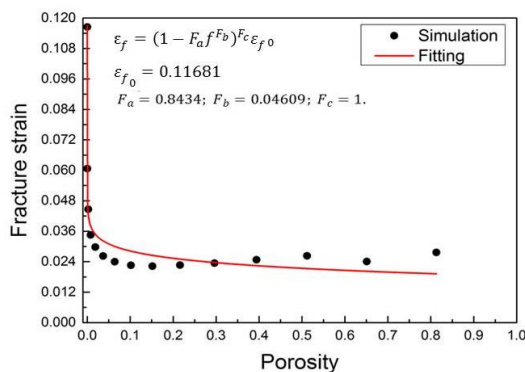


Bild 111: Bruchdehnung  $\varepsilon_f$  als Funktion der Porosität  $f$  bei einachsiger Zugbelastung mit analytischer Beziehung zwischen  $\varepsilon_f$  und  $f$

Bild 112: Bruchdehnung  $\varepsilon_f$  als Funktion der Mehrachsigkeit für unterschiedliche Werte der Porosität  $f$

Das kontinuumsmechanische Werkstoffmodell wurde in die FE-Codes ABAQUS und LS-DYNA als User-Material-Subroutine implementiert. Es handelt sich um ein elasto-plastisches-Modell mit Versagen, das die Porosität als Eingabeparameter benötigt. Um den Einfluss der Porositätsmorphologie nachbilden zu können, muss man die Porositätsverteilung mit Hilfe einer feinen Diskretisierung des FE-Modells für eine Probe oder ein Bauteil, z. B. durch Verwendung des im Absatz 14.1 dargestellten stochastischen Modells, realisieren.

Da keine porenfreien Proben verfügbar waren, erfolgte die Bestimmung der Matrixeigenschaften durch Inverse Simulation mit angenommenen Matrixeigenschaften.

## 11.2 Vorgehensweise für die Probensimulation mit Modellierung des Einflusses der Porenmorphologie

Der Einfluss der Porenmorphologie auf das Verformungs- und Versagensverhalten wurde bei Probensimulationen zunächst exemplarisch untersucht. Die verwendeten FE-Netze für Glattzug-, Kerbzug-, Scherzug- ( $0^\circ$  und  $45^\circ$ ), Durchstoß- und Biegeproben sind in Bild 113 dargestellt. Die Elementkantenlänge im relevanten Bereich beträgt 0,5 mm. In den Modellen für die Durchstoß- und Biegeversuche wurden der Stempel und die Auflager als Starrkörper definiert und der Reibkoeffizient von 0,08 angenommen.

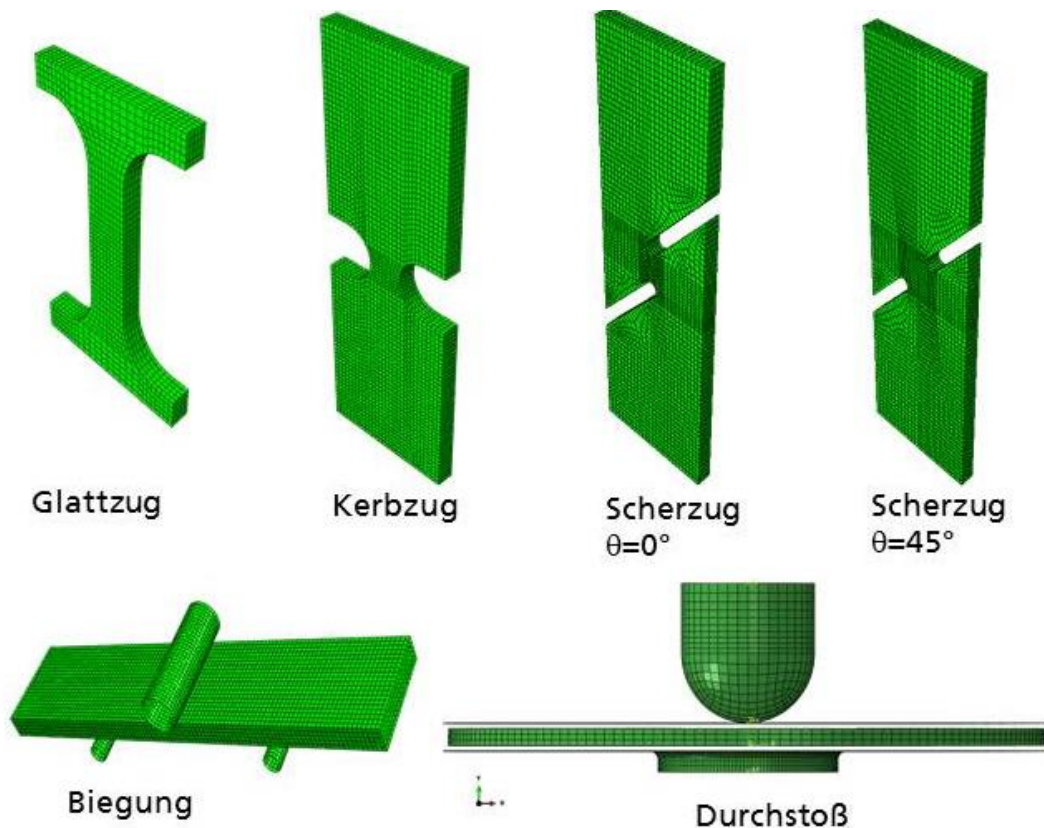


Bild 113: FE-Netze für unterschiedliche Proben

Die Porenmorphologie wurde durch Definition von unterschiedlichen Porositätsklassen bei einer konstanten mittleren Porosität explizit beschreiben. Dies erlaubt eine veranschaulichte Interpretation des Morphologie-Einflusses und dient zur Machbarkeitsanalyse der Methode. Verschiedene Morphologien werden durch unterschiedliche Aufteilungen von vier Porositätsklassen (80, 20, 2 und 0%) bei einer gegebenen mittleren Porosität erzeugt. Die Porenmorphologien wurden nur im Belastungsbereich der Probe definiert und außerhalb des Belastungsbereichs wurde eine homogene Porosität definiert. Zur Untersuchung der Wechselwirkung von Porenmorphologie und Mehrachsigkeit bzgl. des Bruchverhaltens wurden unterschiedliche Porenmorphologien in den Prüfbereichen von Glattzug-, Kerbzug- und Scherzugproben 0° und 45° betrachtet. Die Zuordnung der Porosität zu jedem Element wurde durch ein Fortran-Programm mit einem Zufallsgenerator definiert, wobei die mittlere Porosität gehalten wurde. Vier Porenmorphologien mit der gleichen mittleren Porosität von 5% wurden verglichen, wobei die vierte Morphologie mit homogener Porenverteilung als Referenzlösung betrachtet wurde. Die genauen Definitionen der vier Morphologien sind in Bild 114 gegeben und in Bild 115 für den Belastungsbereich einer Zugprobe dargestellt. Der Belastungsbereich der Zugprobe besteht aus 10x10x5 Elementen und die Elementkantenlänge beträgt 0.5mm. Beispielweise besteht die Morphologie M1 aus 20 Elementen mit 80% Porosität, 30 Elementen mit 20% Porosität, 150 Elementen mit 2% Porosität und die restlichen 300 Elemente haben eine Null Porosität.

**Morphologie 1 (M1):**  
 $20 \cdot 80\% + 30 \cdot 20\% + 150 \cdot 2\%$

**Morphologie 2 (M2):**  
 $30 \cdot 80\% + 50 \cdot 2\%$

**Morphologie 3 (M3):**  
 $100 \cdot 20\% + 250 \cdot 2\%$

**Referenz (Ref):**  
 $500 \cdot 5\%$

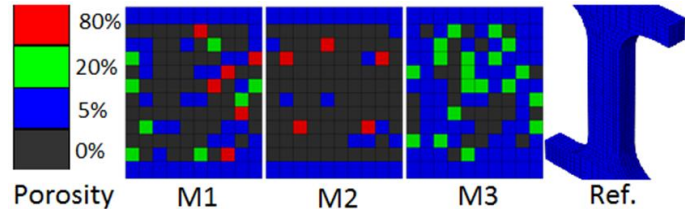


Bild 114: Definition der vier Porenmorphologie-Varianten bei mittlerer Porosität von 5%

Bild 115: Darstellung der vier Porenmorphologie-Varianten bei mittlerer Porosität 5%, Prüfbereich der Zugprobe aus  $10 \cdot 10 \cdot 5 = 500$  Elementen

Das im Absatz 11.1 beschriebene Werkstoffmodell wurde zur Modellierung des Einflusses der Porosität auf Verformung und Versagen verwendet. Die Probensimulationen werden mit allen Porenmorphologien durchgeführt. Mit Hilfe von Anfangsbedingungen wurden Porositätsverteilungen für die vier Porenmorphologien realisiert.

Bild 116, Bild 117, Bild 118 und Bild 119 zeigen die berechneten normierten Kraft-Verschiebungskurven von jeweils Flachzug-, Kerbzug- und Scherzugversuchen ( $0^\circ$  und  $45^\circ$ ) für die 4 Porenmorphologien im Vergleich mit den gemessenen Ergebnissen. Bild 120 zeigt die berechneten Kraft-Stempelwegkurven von Durchstoßversuchen für die 4 Porenmorphologien im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen. Alle Experimente sind mit schwarzen Linien eingetragen und die Simulationen mit roten bzw. grünen, blauen und blaugrünen Linien für die Morphologie M1, bzw. die Morphologie M2, die Morphologie M3 und die Referenzlösung. Die Porenmorphologien im Prüfbereich der Proben, die geprüften Proben und die berechneten Schädigungsverteilungen nach Bruch sind in den Bildern eingetragen.

Bei der Modellierung der Biegeversuche wurde homogene Porenmorphologie für zwei Porositäten von 3% und 5% betrachtet. Die berechneten Kraft-Durchbiegungskurven wurden in Bild 121 mit den experimentellen Ergebnissen aus zwei Entnahmepositionen verglichen. Die berechneten Verschiebungen beim Bruch liegen im Streuband der experimentellen Werte. Die berechneten Vergleichsdehnungen vor dem Bruch an der äußeren Seite sind ca. 0,075 und damit deutlich kleiner als der Messwert aus der ARAMIS-Messung (Bild 71). Dieser Unterschied könnte an den unterschiedlichen Auflösungen (ARAMIS-Facettengröße und FE-Elementgröße) liegen. Insbesondere konnte der große Dehnungsgradient über der Dicke nicht mit einer Elementgröße von 0,5 mm genau nachgebildet werden. Allerdings wurde der Effekt der ungenauen Nachbildung der maximalen Dehnung an der Oberfläche durch Anwendung der Bruchdehnung aus dem gesamten Querschnitt mit Gusshaut kompensiert.

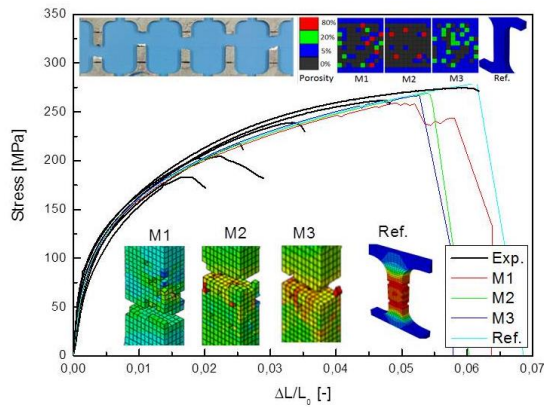


Bild 116: Berechnete normierte Kraft-Verschiebungskurven von Flachzugversuchen für 4 Porenmorphologien bei mittlerer Porosität von 5% im Vergleich mit Experimenten

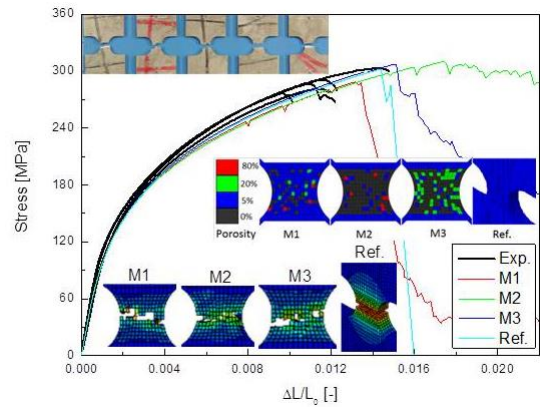


Bild 117: Berechnete normierte Kraft-Verschiebungskurven von Kerbzugversuchen für 4 Porenmorphologien bei mittlerer Porosität von 5% im Vergleich mit Experimenten

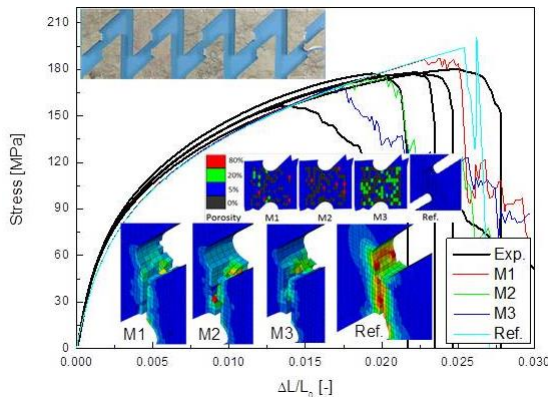


Bild 118: Berechnete normierte Kraft-Verschiebungskurven von Scherzug-0°-versuchen für 4 Porenmorphologien bei mittlerer Porosität von 5% im Vergleich mit Experimenten

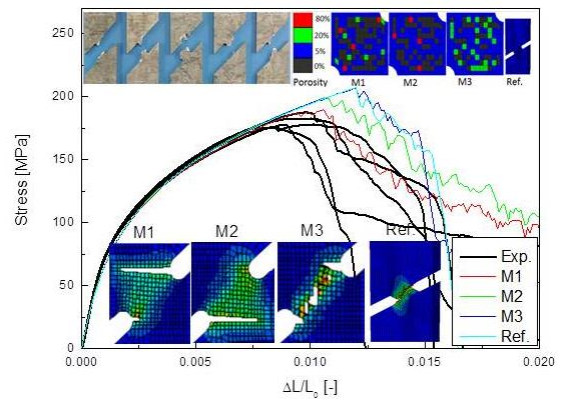


Bild 119: Berechnete normierte Kraft-Verschiebungskurven von Scherzug-45°-versuchen für 4 Porenmorphologien bei mittlerer Porosität von 5% im Vergleich mit Experimenten



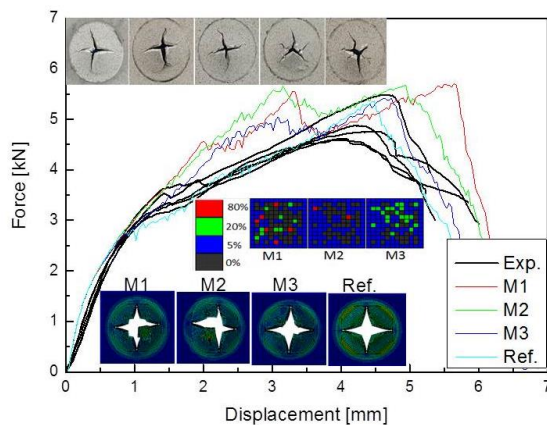


Bild 120: Berechnete Kraft-Stempelwegkurven von Durchstoßversuchen für 4 Porenmorphologien bei mittlerer Porosität von 5% im Vergleich mit Experimenten

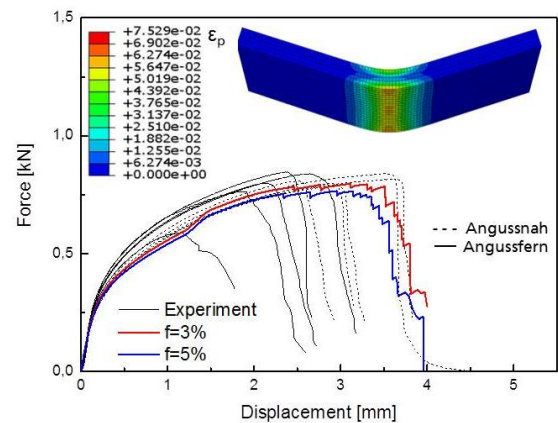


Bild 121: Berechnete Kraft-Durchbiegungskurven von Biegeversuchen für zwei Porositäten von 3% und 5% im Vergleich mit Experimenten

Die Simulationen zeigen bei nominaler Porosität von 5% einen geringfügigen Einfluss der Porenmorphologie auf das Spannungsniveau aber einen deutlichen Einfluss auf das Versagen. Die experimentellen Streubänder der Bruchdehnung für die verschiedenen Probengeometrien können qualitativ durch Variation der Porenmorphologie berechnet werden. Der Einfluss der Porenmorphologie auf die Bruchdehnung hängt von der Mehrachsichtigkeit ab. Während die Morphologie M2 bei den Korbzugproben zur größten Bruchdehnung führt, stellt sie bei den Scherzugproben  $0^\circ$  den zweiten kritischen Fall dar.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das Streuband der Glattzugproben am größten ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass das beanspruchte Volumen in einer glatten Zugprobe am größten ist und dadurch eine größere Variation der Porengröße und Porenposition möglich ist. Dagegen zeigt die Simulation der Zugversuche einen relativ kleinen Streuband. Dies deutet darauf hin, dass die angenommenen Porenmorphologien noch nicht den in den Proben vorliegenden Porenmorphologien entsprechen.

Diese numerischen Untersuchungen haben demonstriert, dass die verwendete Methode im Prinzip geeignet ist, um die Streuungen der Bruchdehnung bei unterschiedlichen Belastungsarten qualitativ zu berücksichtigen. Um eine quantitative Bewertung zu machen, müssen allerdings die Verteilungen der Porositätsklassen repräsentativ für die in Proben bzw. Bauteilen vorliegenden Porenmorphologien sein. In Absatz 14.2 wird gezeigt, wie unterschiedliche Porenmorphologien mit dem im IFAM entwickelten Tool erzeugt und auf die FE-Modelle übertragen werden können.

## 12 Komponentenversuche Biegung/Stauchung (IWM)

Stauch- (Bild 122) und Biegeversuche (Bild 123) an der Y-Box wurden konzipiert und durchgeführt. Die Y-Box hat eine Dimension von  $362 \times 110 \times 42,5 \text{ mm}^3$ . Zur Variation lokaler Beanspruchung wurden zwei Typen von Biegeversuchen durch Druck des Stempels an der äußeren (Bild 123 links) oder inneren (Bild 123 rechts) Seite der Y-Box realisiert.

Bei den Komponentenversuchen wurden Kraft, Stempelweg und lokale Dehnungen gemessen. Zur Analyse des lokalen Verformungs- und Versagensverhaltens wurden Videofilme während eines Bauteilversuchs aufgenommen.

Die Reihenfolge der Schädigung in jedem Bauteilversuch wurde identifiziert. Es wurde festgestellt, dass die Seite mit größerem Anstand zur Angussstelle (angussfern) bei Stauch- und Biegeversuchen zuerst geschädigt wurde.

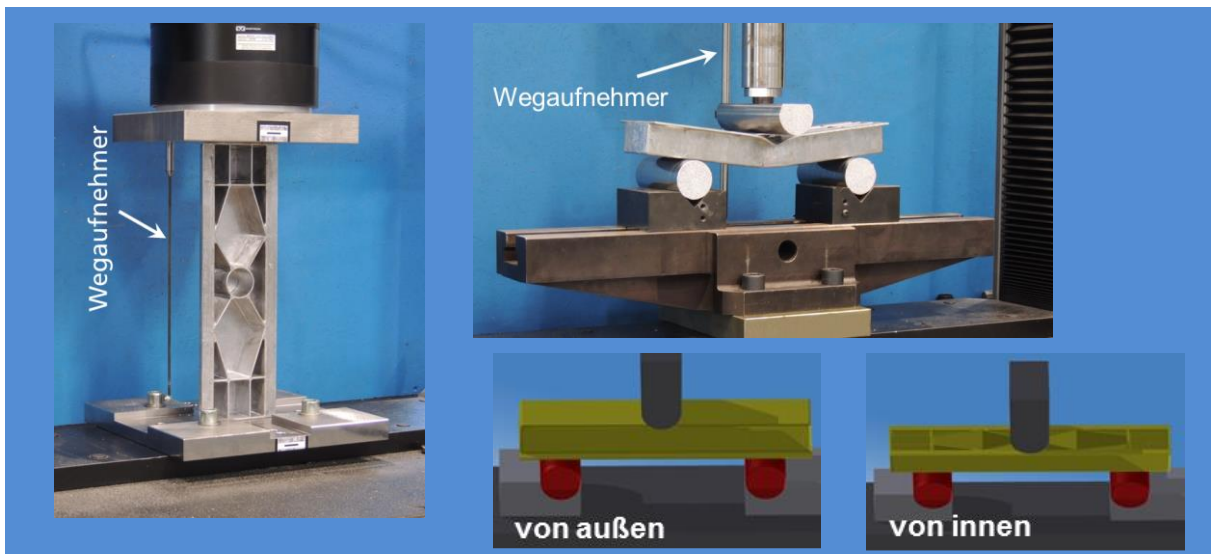


Bild 122: Versuchsaufbau für Stauchversuche an der Y-Box

Bild 123: Versuchsaufbau für Biegeversuche an der Y-Box mit Stempel von der inneren Seite (oben) und schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der zwei Biegeversuchstypen (unten) mit Stempel von der äußeren (links) und von der inneren Seite (rechts)

### 12.1 Stauchversuche

Die Stauchversuche (Bild 122) wurden an einer elektromechanischen Prüfmaschine Typ INSTRON 5985 durchgeführt. Der Weg des Druckstempels wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen, die Prüfgeschwindigkeit beträgt  $0,25 \text{ mm/s}$  bei der Y-Box YR1-ST-S1 und  $0,1 \text{ mm/s}$  bei den Y-Boxen YR1-ST-S2, S3 und S4. Die gemessenen Kraft-Stempelwegkurven sind in Bild 125 dargestellt. Die Y-Boxen nach



Versuch sind in Bild 126 zu sehen. Zur Identifizierung der ersten Anrissstelle wurde der Stauchversuch an Y-Box YR1-ST-S2 bei einem Weg von ca. 9 mm unterbrochen und entlastet. Dadurch wurde festgestellt, dass der erste Anriss an der angussfernen Seite stattfindet (Bild 124 und Bild 126b).

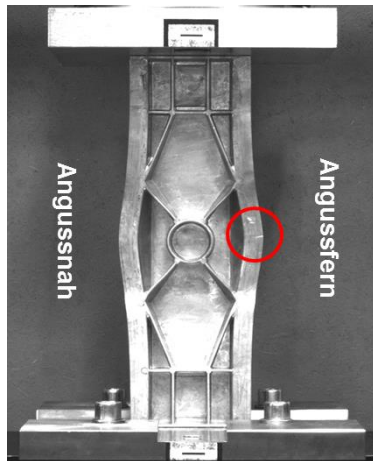


Bild 124: Stauchversuch an einer Y-Box nach erstem Anriss

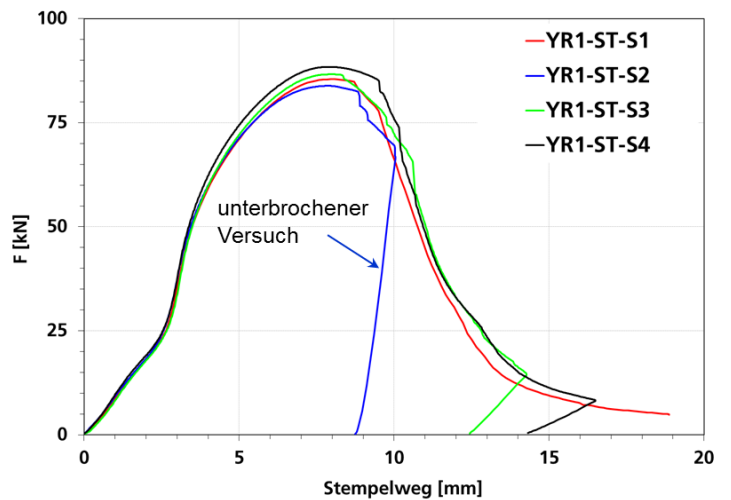


Bild 125: Kraft-Stempelwegkurven von Stauchversuchen an der Y-Box

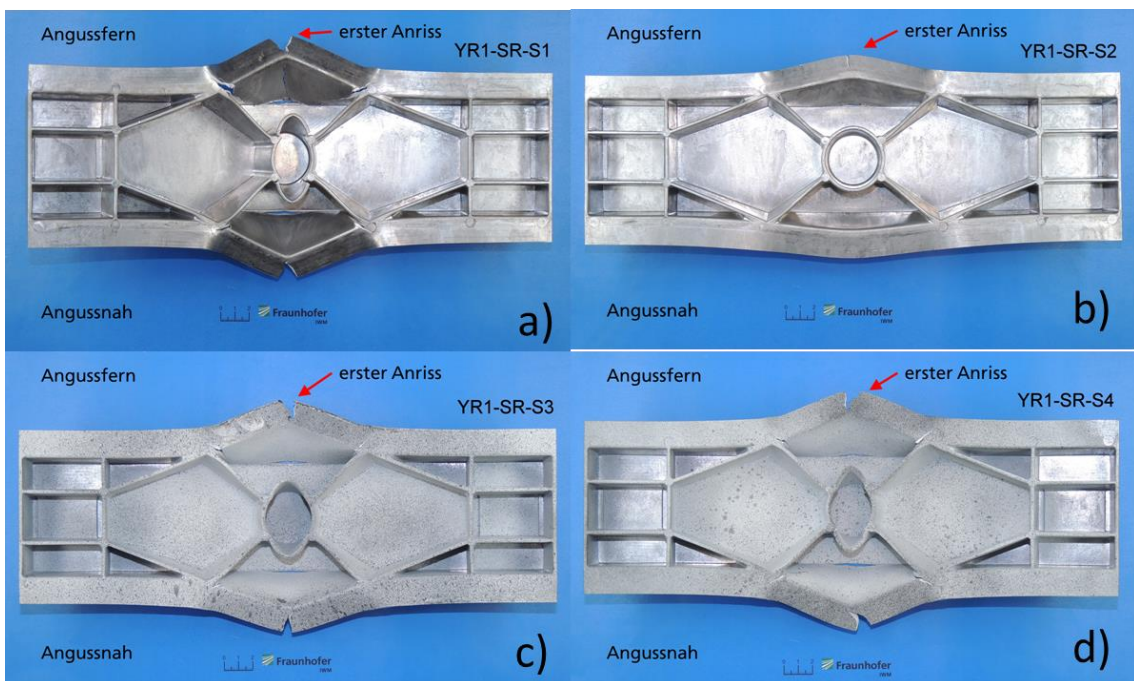


Bild 126: Y-Boxen YR1-ST-S1 (a), YR1-ST-S2 (b), YR1-ST-S3 (c) und YR1-ST-S4 (d) nach dem Versuch. Der Versuch an Y-Box YR1-ST-S2 (b) wurde bei einem Stempelweg von ca. 9 mm unterbrochen.

Wie Bild 125 zu entnehmen ist, ist die Streuung der Kraft-Verschiebungskurven der Stauchversuche relativ gering. Dies liegt sicherlich in der Belastungssituation. Unter Stauchung reagiert das globale Verhalten gegenüber lokaler Streuung weniger empfindlich.

## 12.2 Biegeversuche

Zwei Varianten der Biegeversuche wurden mit dem in Bild 123 dargestellten Aufbau an einer elektromechanischen Prüfmaschine Typ INSTRON 5985 durchgeführt. Der Weg des Druckstempels wurde mit induktivem Wegaufnehmer gemessen. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 0.1mm/s. Stempel und Auflager haben einen Radius von 25 mm und der Auflagerabstand beträgt 254 mm.

Die Kraft-Stempelwegkurven der beiden Biegeversuchstypen sind in Bild 127 verglichen. Seitlich sind die Y-Box YR1-3PB-S5 mit Stempel von der äußeren Seite (links) und YR1-3PB-S2 mit Stempel von der inneren Seite (rechts) nach dem Versuch dargestellt.

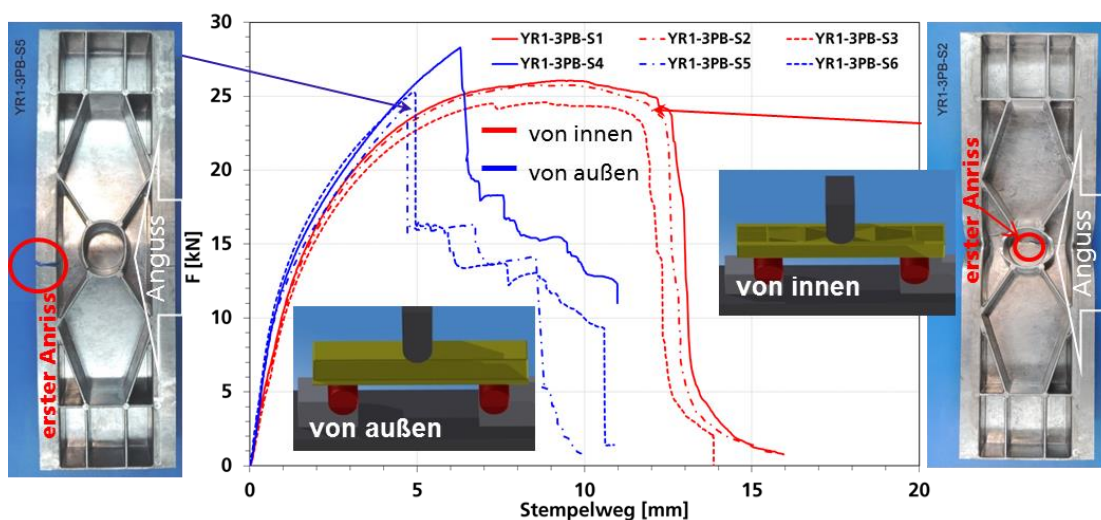


Bild 127: Kraft-Wegkurven von zwei Typen des Biegeversuchs mit Y-Box YR1-3PB-S5 mit Stempel von außen (links) und YR1-3PB-S2 mit Stempel von innen (rechts) nach dem Versuch

Die Streuung beim Versagen ist größer, wenn der Stempel von außen drückt als von innen. Eine Erklärung dafür ist, dass bei der Stempel-Bewegung von außen nach innen die innere Seite mit den Rippen und Flanschen stark unter Zug beansprucht wird, in denen eher inhomogene Verteilungen von Mikrodefekten zu erwarten sind bzw. mit CT-Untersuchungen (s. Absatz 5.5, Bild 20) beobachtet und durch Gießsimulation (s. Absatz 6.1, Bild 29) vorhergesagt wurden. Um diese Erklärung zu bestätigen, sind mehr als drei Versuche notwendig.

Die drei Y-Boxen nach dem Biegeversuch mit dem Stempeldruck von außen nach innen sind in Bild 128 zusammengestellt.

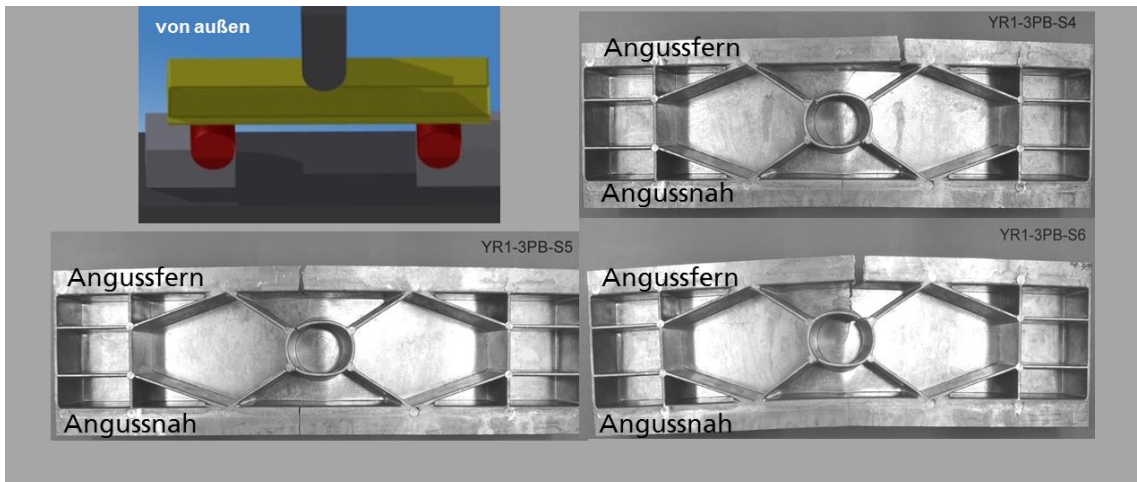


Bild 128: Y-Boxen nach dem Biegeversuch mit dem Stempeldruck von außen nach innen

Im Gegensatz zu den Y-Boxen YR1-3PB-S5 und YR1-3PB-S6 reißt YR1-3PB-S4 nicht in der Mitte und dies führt zu einem späteren Versagen (Bild 127).

Die Y-Boxen nach dem Biegeversuch mit dem Stempeldruck von innen nach außen werden in Bild 129 zusammengestellt.

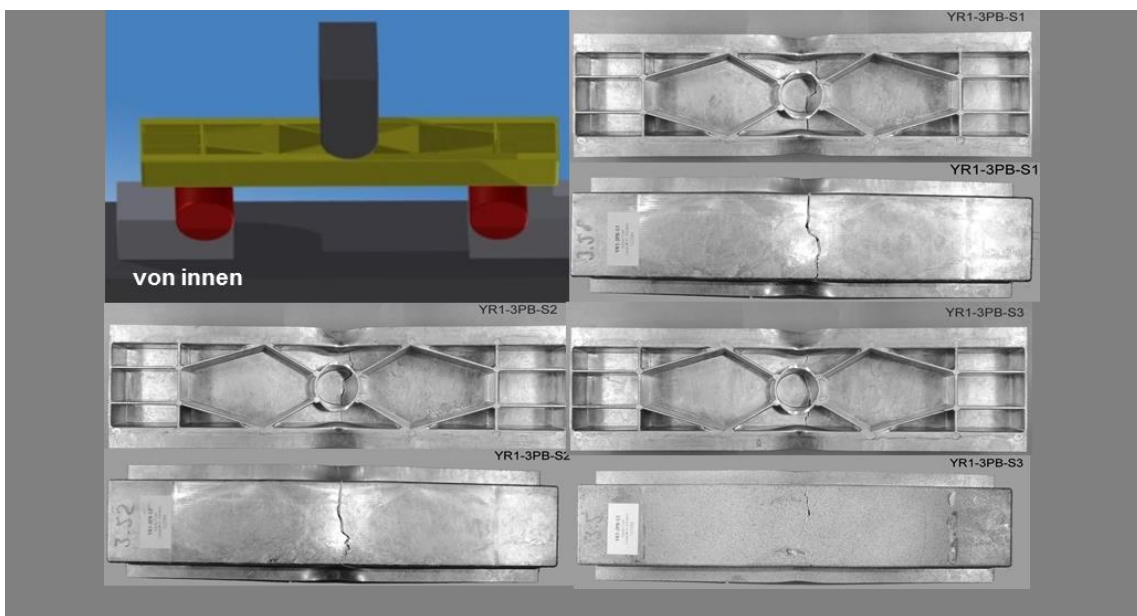


Bild 129: Y-Boxen nach dem Biegeversuch mit dem Stempeldruck von innen nach außen

Mit dem Stempeldruck von innen nach außen trägt die äußere glatte Seite die größte Beanspruchung. Bild 129 zeigt, dass die Versagensbilder der drei Y-Boxen ähnlich aussehen. Bei dieser Belastung ist die Streuung der Kraft-Stempelweg-Kurven geringfügig.



## 13 Komponentensimulation (IWM)

Stauch- und Biegeversuche an der Y-Box wurden zur Validierung der verwendeten Methode für die Versagensmodellierung simuliert. Bei den Biegeversuchen wurden die beiden Lastfälle mit Stempel von der äußeren oder inneren Seite betrachtet.

### 13.1 Simulation der Stauchversuche

Zunächst wurde eine homogene Porosität betrachtet und dabei wurden die Einflüsse von Elementtyp und -größe, von der Spannungs-Dehnungskurve und der Aufbaugeometrie (z.B. Definition einer Kante) untersucht. Anschließend wurde der Einfluss der Porenmorphologie auf das Versagensverhalten der Y-Box untersucht.

FE-Modelle der Y-Box wurden mit vierknotigen Tetraedern (C3D4 in ABAQUS) mit erster Integrationsordnung und modifizierten zehnknotigen Tetraedern (C3D10M in ABAQUS) mit zweiter Integrationsordnung vernetzt. Vier verschiedene FE-Modelle wurden mit den folgenden Elementierungen realisiert:

- konstante Elementgröße  $L_e$  von 2 mm
- konstante Elementgröße  $L_e$  von 4 mm
- sich steigernde Elementgröße von 0.5 mm in der Mitte zu 2 mm am Rand
- sich steigernde Elementgröße von 0.5 mm in der Mitte zu 4 mm am Rand.

Drei ausgewählte FE-Modelle sind in Bild 130 dargestellt.

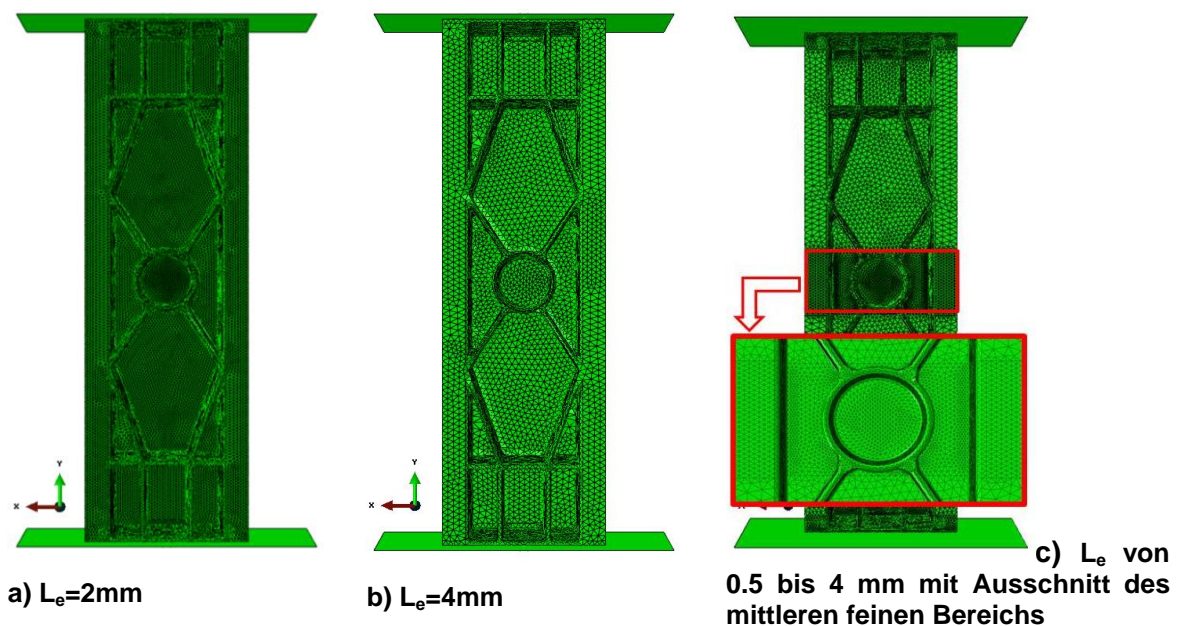


Bild 130: FE-Modelle für den Stauchversuch mit Tetraedern von Elementgröße a) 2 mm, b) 4 mm, c) zwischen 0.5 mm und 4 mm

In Bild 131 werden die berechneten Kraft-Wegkurven für die beiden Typen der Tetraeder-Elemente im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen, die mit schwarzen Linien dargestellt sind, zusammengestellt. Die Elemente mit erster Integrationsordnung sind zu steif und die Verfeinerung mit Elementen von 4 mm (blaue Linie) auf 2 mm (rote Linie) verbessert die Ergebnisse, aber reicht noch nicht aus. Dagegen liefern die zehnknotigen Tetraeder-Elemente mit zweiter Integrationsordnung zufriedenstellende Ergebnisse (grüne Linie). Dabei ist die Verfeinerung von 0.5 mm in der Mitte (grüne Linie) nicht maßgebend. Das Modell mit der konstanten Elementgröße von 4 mm (pinke Linie) liefert ein nur leicht abweichendes Ergebnis. Dieser Effekt wird in Bild 132 durch Vergleich der Ergebnisse zwischen zwei Modellen mit zwei unterschiedlichen Elementgrößen (2 und 4 mm) bestätigt. Die berechnete Kraft-Stempelwegkurve von zehnknotigen Tetraeder-Elementen wird durch Halbierung der Elementgröße von 4mm (rote Linie) auf 2 mm (blaue Linie) nicht mehr wesentlich geändert.

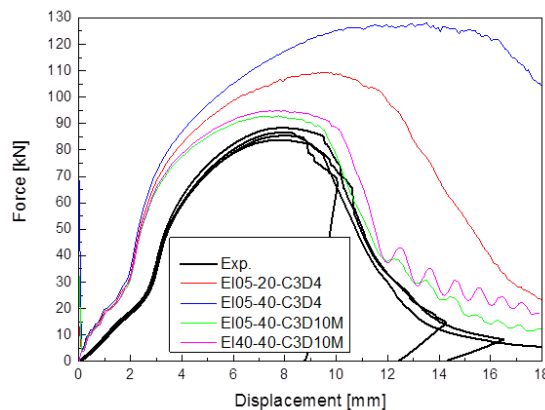


Bild 131: Berechnete Kraft-Wegkurven der Stauchversuche mit vierknotigen Tetraedern erster Integrationsordnung (C3D4) und modifizierten zehnknotigen Tetraedern zweiter Integrationsordnung (C3D10M) mit Variation der Elementgröße  $L_e$

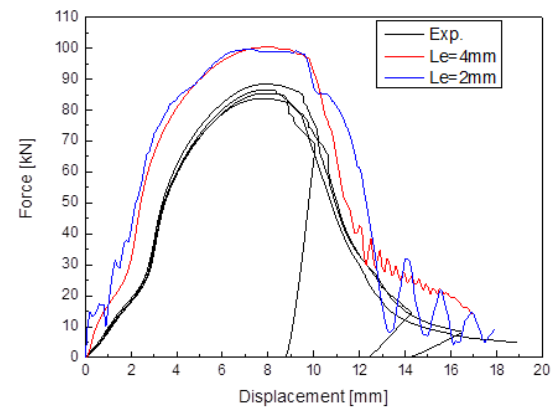


Bild 132: Berechnete Kraft-Wegkurven der Stauchversuche an der Y-Box mit modifizierten zehnknotigen Tetraedern zweiter Integrationsordnung (C3D10M) für  $L_e=2$  und 4 mm

Trotz Anwendung höherer Integrationsordnung und Verfeinerung der Elementgröße sind die berechneten Kraft-Stempelwegkurven im Vergleich zu den Experimenten aber zu steif. Deshalb wurde der Einfluss der Spannungs-Dehnungskurve und der Geometrie untersucht, wobei nur Modelle aus Tetraedern mit zweiter Integrationsordnung mit der variierenden Elementgröße von 0.5 bis 4 mm verwendet wurden.

#### **Einfluss der Fließspannung (Zug-Druck-Unterschied):**

Wie im Absatz 9.1.2 erwähnt wurde, ist die Steifigkeit im Anfangsbereich der Deformation unter Druckbelastung niedriger als die unter Zugbelastung (s. Bild 63). Um den Einfluss der Fließkurve zu untersuchen, wurden die Stauchversuche mit der Spannungs-Dehnungskurve aus den Zug- und Druckversuchen simuliert. Bild 133 zeigt, dass mit der Berücksichtigung der Fließkurve aus den Druckversuchen eine bessere Übereinstimmung im Anfangsbereich erzielt wird, allerdings die Abweichung

mit größerem Stempelweg größer wird. Da die aus den kleinen Druckproben gemessenen niedrigeren Steifigkeiten eher durch die Rauigkeit an den Kontaktstellen zwischen dem Stempel und der Probe als durch das Verhalten der Aluminiumgusslegierung verursacht wurden, wurden die Spannungs-Dehnungskurven aus den Druckversuchen nicht mehr für weitere Komponentensimulation direkt verwendet. Im Folgenden werden immer die Spannungs-Dehnungskurven aus Zugproben bis zum Bruch verwendet, und die Ergebnisse der Druckversuche erst bei großer Verformung eingesetzt, bei der die Zugversuche keine Ergebnisse liefern können.

### **Einfluss der Bauteilgeometrie:**

Es wurde eine leichte geometrische Abweichung zwischen dem FE-Modell und der realen Y-Box festgestellt: eine Kante unter der Y-Box im FE-Modell wurde nicht nachgebildet. Zur Untersuchung des Einflusses wurde eine Kante in der Höhe von 0.5 mm, die eine Überschätzung ist, in ein zusätzliches FE-Modell eingeführt. Die berechneten Kraft-Wegkurven mit und ohne Kante sind in Bild 134 dargestellt. Mit der Kante (rote Linie) stimmt das numerische Ergebnis mit dem Versuchsergebnis im Anfangsbereich nicht überein, aber danach ist die Übereinstimmung besser als ohne Kante (blaue Linie). Da die reale Kante nur mit sehr feinen Elementen nachzubilden ist, wurde sie bei Komponentensimulationen nicht berücksichtigt.

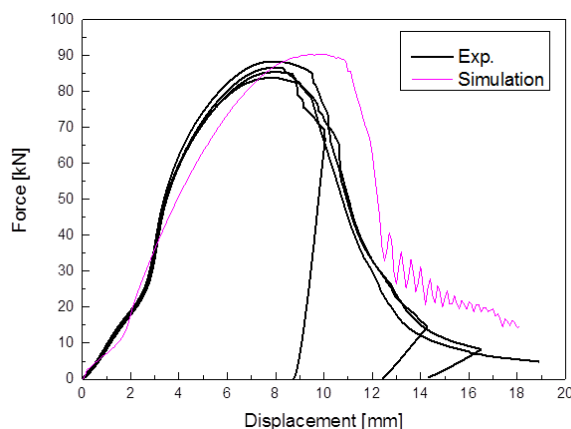


Bild 133: Mit der Fließkurve aus Zug- und Druckversuchen berechnete Kraft-Wegkurven von Stauchversuchen (Elementtyp C3D10M,  $L_e$  von 0.5 bis 4mm)

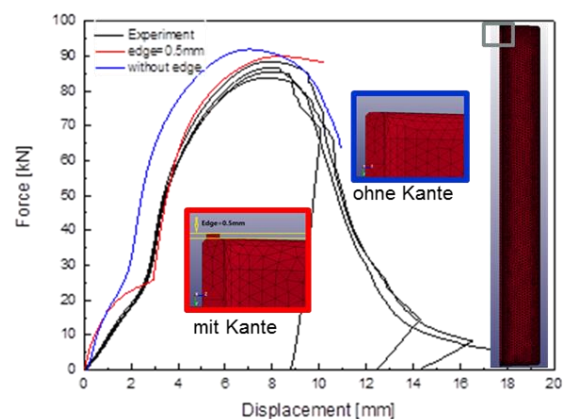


Bild 134: Berechnete Kraft-Wegkurven von Stauchversuchen an der Y-Box mit und ohne Kante (Elementtyp C3D10M,  $L_e$  von 0.5 bis 4mm)

### **Variation der Porenmorphologie:**

Wie im Absatz 11.2 wurden zur Untersuchung des Einflusses der Porenmorphologie auf das Bruchverhalten der Y-Box verschiedene Porenverteilungen mit vier Porositätsklassen (80, 20, 2 und 0%) bei einer mittleren Porosität von 5% mittels eines Fortran-Programms mit einem Zufallsgenerator realisiert. Drei unterschiedliche Porenmorphologien für die gleiche Porosität 5% wurden in Bild 135 verglichen.



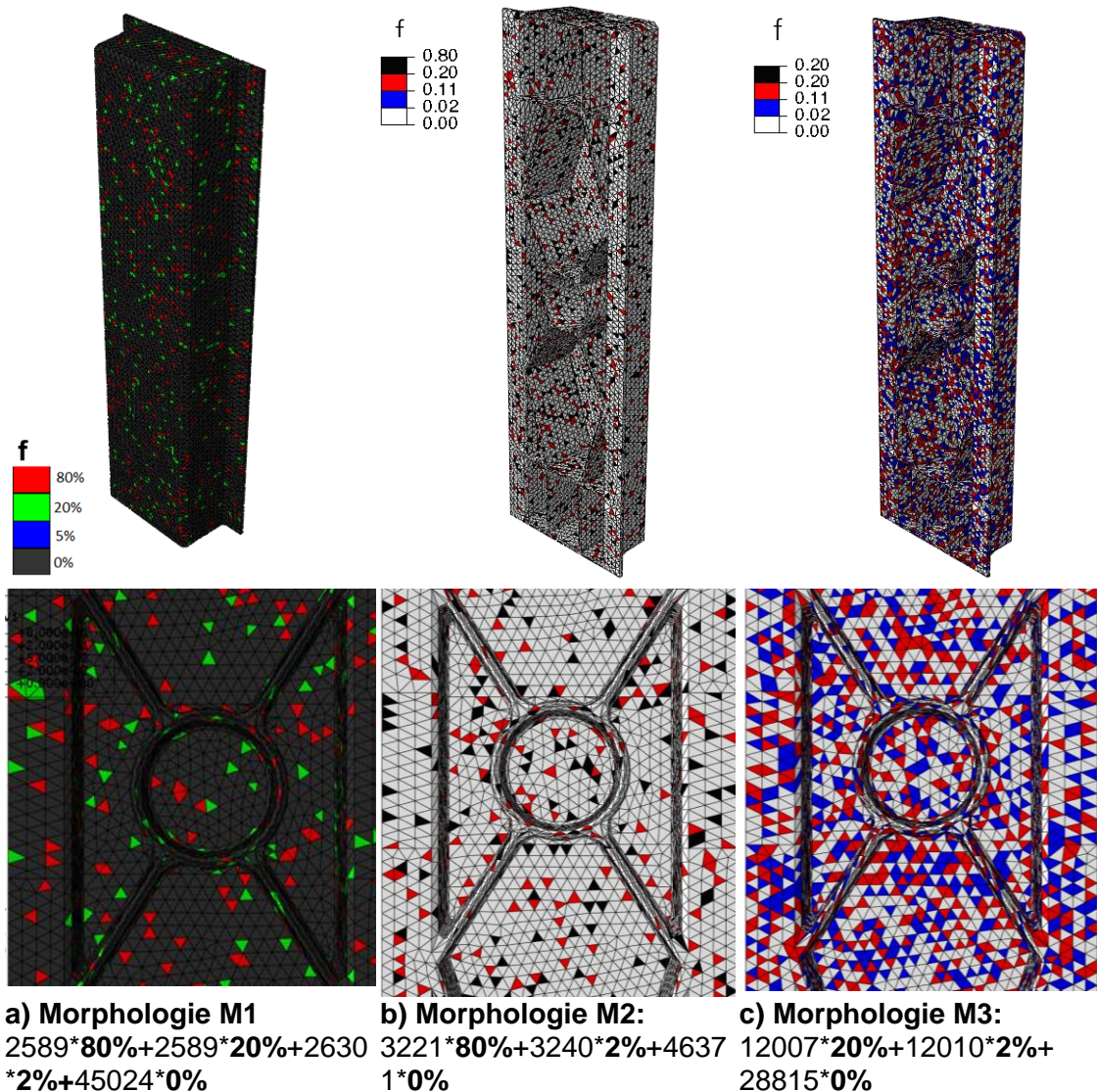
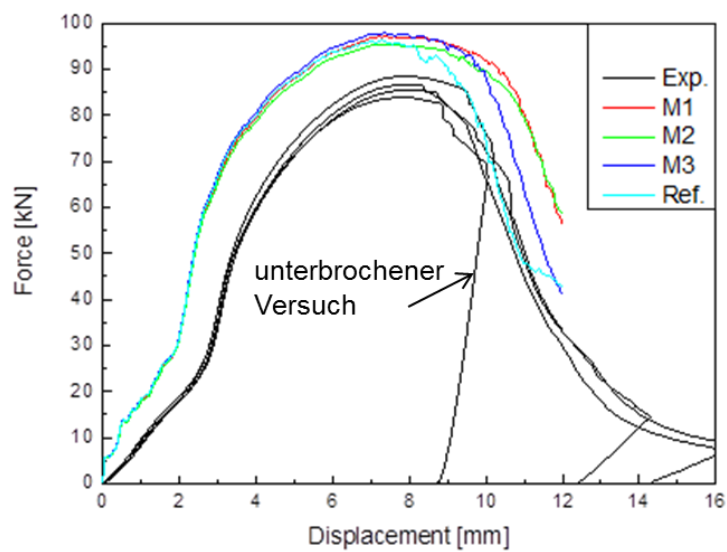


Bild 135: Darstellung von drei Varianten der Porenmorphologie bei mittlerer Porosität 5% in der Y-Box, Oben: Gesamte Ansicht und Unten: mittlerer Bereich von vorn

Bild 136 zeigt die berechneten Kraft-Wegkurven von Stauchversuchen für 4 Porenmorphologien (M1, M2, M3 und Ref) bei einer Porosität von 5% im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen. Die mit Ref. bezeichnete Porenmorphologie besteht aus homogen verteilten Poren. Die Verformung der Y-Box und die Versagensstellen wurden von allen untersuchten Porenmorphologien richtig vorausberechnet. Bis zum Kraftmaximum gibt es nur geringfügige Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Modellen. Danach ist ein Einfluss der Porenmorphologie auf die Kraft-Stempelwegkurve zu erkennen. Die Variation der Porenmorphologie hat jedoch zu keiner großen Streuung der Bruchverschiebung geführt, was den experimentellen Befunden entspricht. Das liegt daran, dass die Beanspruchung auf den gesamten Bereich der Y-Box bewirkt und die lokalen Variationen der Porosität das globale Verhalten unempfindlich beeinflussen.



Y-box nach  
Stauchversuch

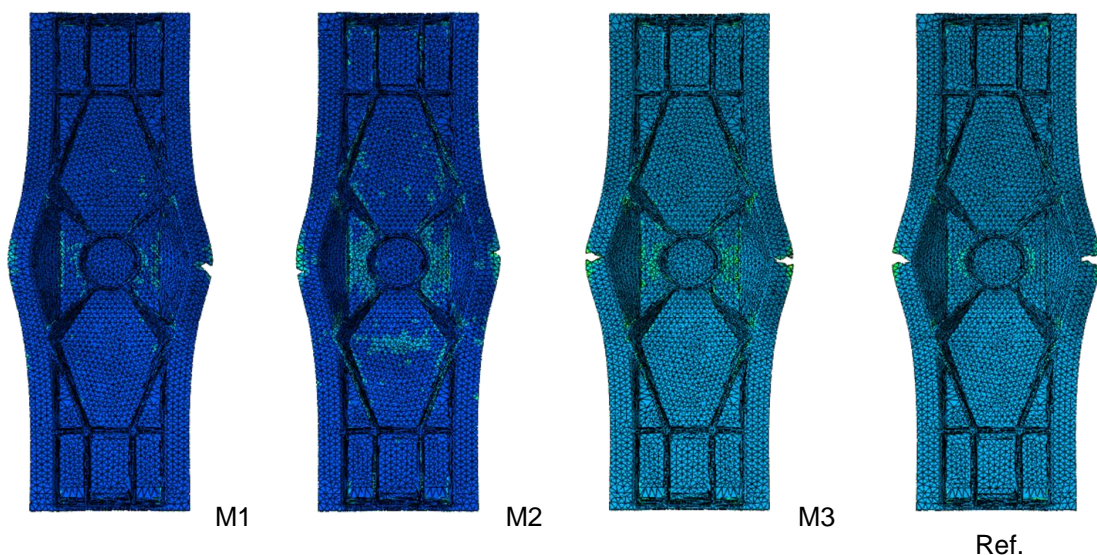


Bild 136: Berechnete Kraft-Wegkurven von Stauchversuchen für 4 Porenmorphologien (M1, M2, M3 und Ref.) bei einer Porosität von 5% im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen, Y-Box nach Versuch (oben rechts) und die Schädigungsverteilungen nach Bruch in FE-Modellen (unten).

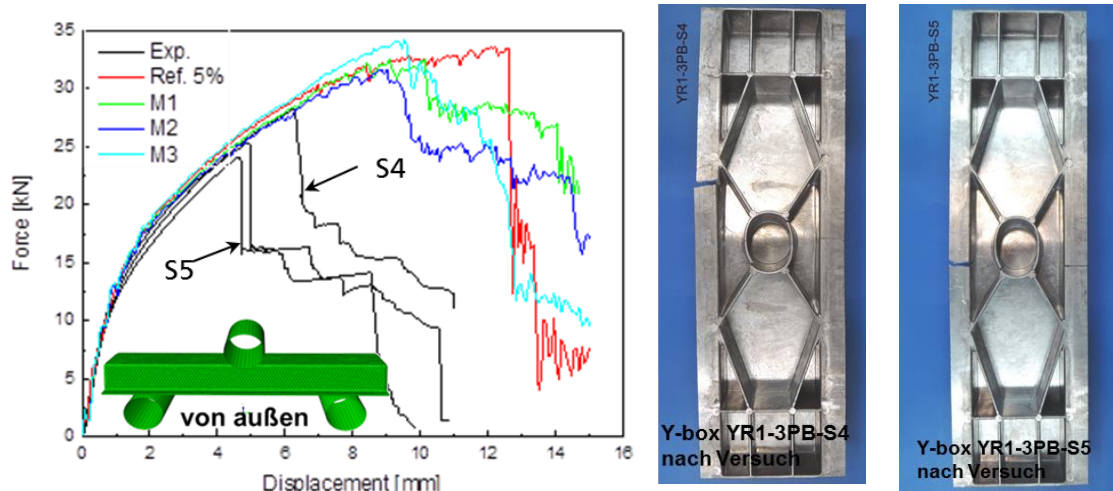
### 13.2 Simulation der Biegeversuche

Bei der Simulation der Biegeversuche wurden die beiden Lastfälle untersucht. Bei dem Aufbau Typ 1 drückte der Stempel auf der inneren Seite der Y-Box (auf den Rippen), beim Typ 2 auf der äußeren glatten Seite. Bei der Simulation sind der Stempel und die Auflager als starre Körper modelliert, wobei ein Reibkoeffizient von 0,08 für alle Kontaktstellen eingesetzt wurde. Modifizierte zehnknotige Tetraeder zweiter Integrationsordnung (C3D10M) mit Elementgröße 4 mm wurden verwendet. Wie bei der Simulation der Stauchversuche wurden die drei in Bild 135 dargestellten

Porenmorphologien und die homogene Porosität von 5% bei den Simulationen der Biegeversuche betrachtet.

### Biegeversuche mit dem Stempel auf äußerer Seite

Bild 137 zeigt die berechneten Kraft-Wegkurven von Biegeversuchen mit dem Stempeldruck auf der äußeren Seite für 4 Porenmorphologien (M1, M2, M3 und Ref.) bei einer Porosität von 5% im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen. Die berechneten Versagensstellen wurden in Bild 137 ebenfalls mit Experiment verglichen. Die Bruchverschiebungen der Biegeversuche wurden von den Simulationen überschätzt. Die Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Porosität bei unterschiedlichen Mehrachsigkeiten wurde betrachtet (s. Absatz 10.3.2). Es wurde festgestellt, dass eine systematische Untersuchung des Zusammenhanges Bruchdehnung/Mehrachsigkeit/Porosität erforderlich ist. In Zukunft soll dieser offene Punkt durch zusätzliche Charakterisierungen und Modellierungen aufgeklärt werden. Auch die Berücksichtigung der Einflüsse der Elementgröße und des Elementtyps muss in die numerischen Tools einfließen. Bild 137 zeigt, dass die Streuung der gemessenen Bruchverschiebungen durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Porenmorphologien qualitativ gut wiedergegeben wird. Auch die unterschiedlichen Bruchstellen (Riss in der Mitte bei der Y-Box S5, Riss im oberen Teil bei der Y-Box S4) könnten bei der Simulation auftreten.





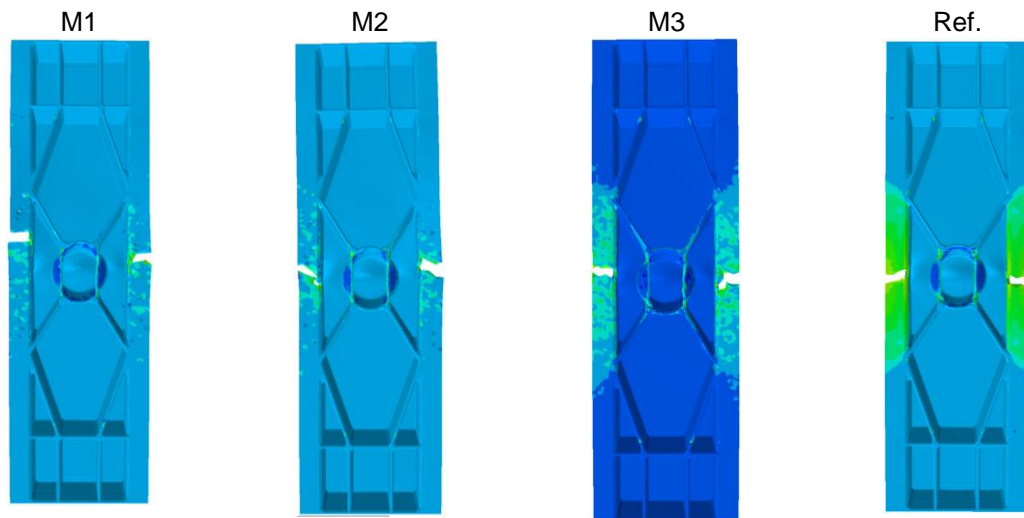


Bild 137: Berechnete Kraft-Wegkurven von Biegeversuchen mit dem Stempeldruck auf der äußeren Seite für 4 Porenmorphologien (M1, M2, M3 und Ref.) bei einer Porosität von 5% im Vergleich mit Experiment, zwei Y-Boxen nach Versuch (oben rechts) und die Schädigungsverteilung nach Bruch in den Modellen (unten).

#### **Biegeversuche mit dem Stempel auf innerer Seite**

Bild 138 zeigt die berechneten Kraft-Wegkurven von Biegeversuchen mit dem Stempeldruck auf der inneren Seite mit den experimentellen Ergebnissen. Für die Rechnungen wurden die 2 Porenmorphologien M2 und Ref., die wie oben definiert wurden, betrachtet. Zusätzlich wurde eine Y-Box mit vier Bereichen (Angussnah, Angussfern, Mitte und Stege) definiert, jedem Bereich wurde eine Porosität zugeordnet und die entsprechende Porosität so angepasst, dass die gemessene Ortsabhängigkeit der Spannungs-Dehnungskurve der Y-Box qualitativ wiedergegeben wird. Bild 139 zeigt, dass die gemessenen Spannungs-Dehnungskurven für Angussnah mit einer Porosität von 7.5%, für Angussfern und Mitte mit einer Porosität von 5% und für Stege mit einer Porosität von 20% angenähert werden könnten. Bei der Simulation mit vier Werkstoffzonen wurde keine Porenmorphologie betrachtet, sondern die Porosität als konstant in jeder Zone definiert.

Die für die Morphologie Ref. berechneten Versagens- bzw. Schädigungsbilder wurden in Bild 140 dargestellt. Die Ergebnisse für die Morphologie M2 sehen ähnlich aus. Die Schädigungsstellen wurden von den beiden Modellen richtig berechnet. Allerdings wurden die im Experiment beobachteten stark lokalen Verformungen der beiden Flansche unter dem Stempel nicht genau nachgebildet. Deswegen weichen die berechneten Kräfte mit zunehmender Verschiebung von den entsprechenden Messdaten immer mehr ab. Wie im ersten Lastfall wurden die Bruchverschiebungen der Biegeversuche von den Simulationen überschätzt. Es könnte mehrere Ursachen für die Abweichungen geben. In den Modellen wurde die Porenmorphologie nur in einem eingeschränkten Bereich variiert und keine Variation der Porosität, z.B. im Bereich mit großen Schrumpfporen, die durch die CT-Untersuchungen nachgewiesen wurden, vorgesehen. Außerdem wurden keine anderen Mikrodefekte wie Kaltrisse und Oxidhäute betrachtet. Die Matrixeigenschaften sind in einer Komponente aufgrund von unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeiten auch nicht homogen.

Diese Erklärung wird von den Ergebnissen des Modells mit 4 Werkstoffzonen bestätigt. Sowohl der Kraft-Wegverlauf als auch das Versagensbild insbesondere die stark lokalen Verformungen der beiden Flansche unter dem Stempel (Bild 141 im Vergleich mit Bild 138 rechts) stimmen mit Experiment besser überein. Diese Ergebnisse aus dem Modell mit vier unterschiedlichen Zonen können durch eine genauere Definition der entsprechenden Porosität noch verbessert werden. Dafür muss allerdings die mittlere Porosität in jeder Zone durch Gießsimulationen und/oder CT-Untersuchungen ermittelt und eine wiederholte Anpassung der Parameter des makroskopischen Modells für die Porositätsabhängigkeit bis zur Porosität von 20% durchgeführt werden. Letztendlich sollte auch die Variation der Porenmorphologie innerhalb jeder Zone berücksichtigt werden.

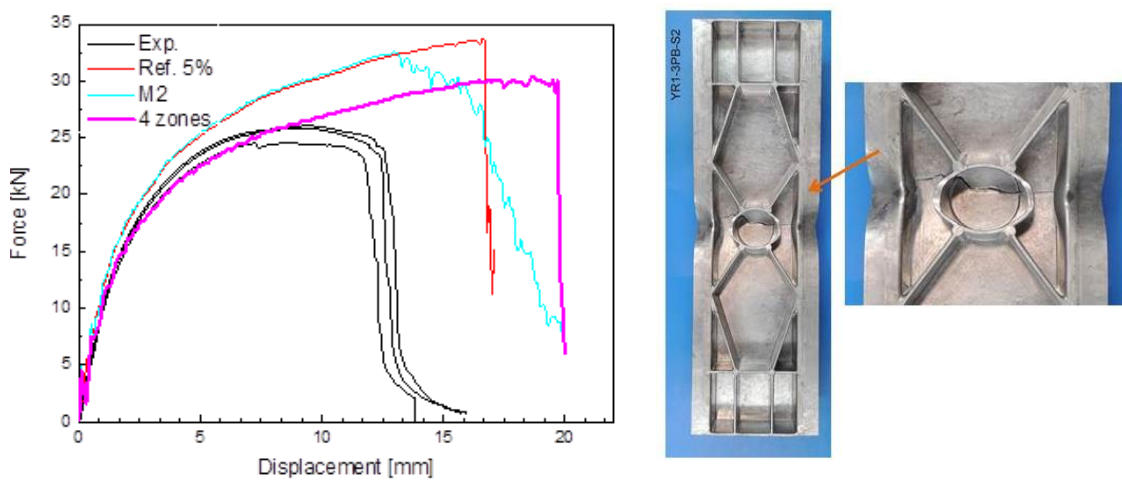


Bild 138: Berechnete Kraft-Wegkurven von Biegeversuchen mit dem Stempel auf der inneren Seite für 2 Porenmorphologien (M2 und Ref.) bei einer Porosität von 5% und für 4 Zonen mit unterschiedlicher Porosität im Vergleich mit Experiment (links); eine Y-Box nach Versuch (rechts)

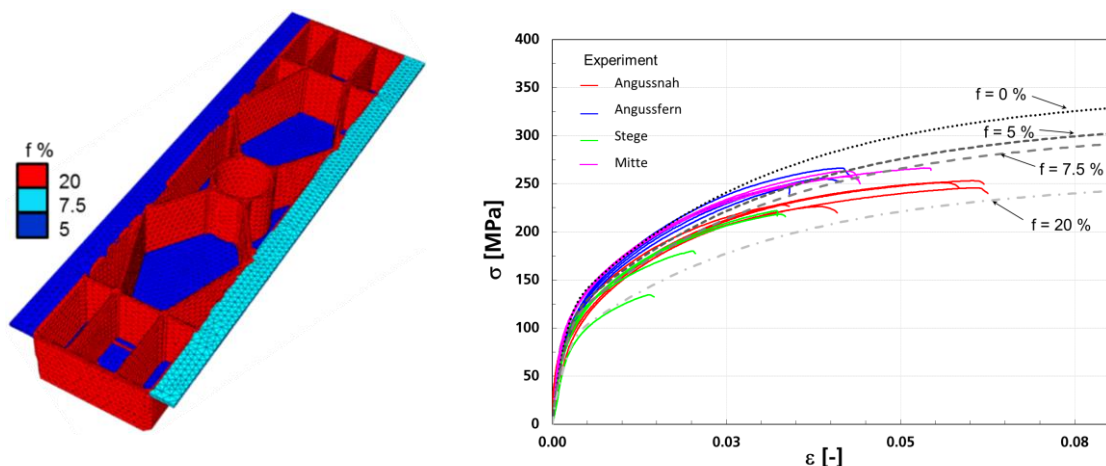


Bild 139: Aufteilung der Y-Box in 4 Bereiche mit unterschiedlichen Porositäten (links) und Spannungs- Dehnungskurven von Zugversuchen an Proben aus Y-Box im Vergleich mit Simulation für 0, 5, 7.5 und 20% Porosität (rechts)

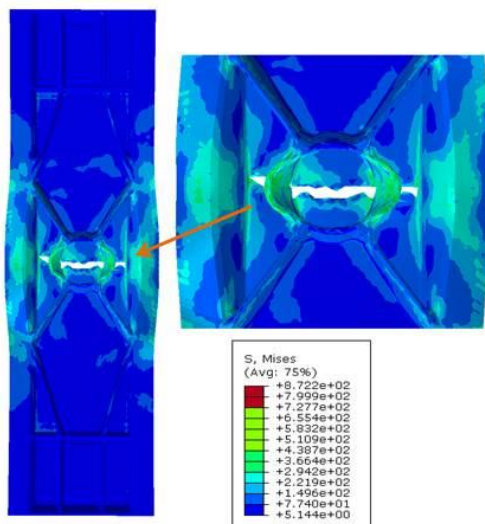


Bild 140: Berechnetes Versagensbild aus dem Modell mit homogen 5% Porosität (Ref.) mit Verteilung der von Mises-Vergleichsspannung

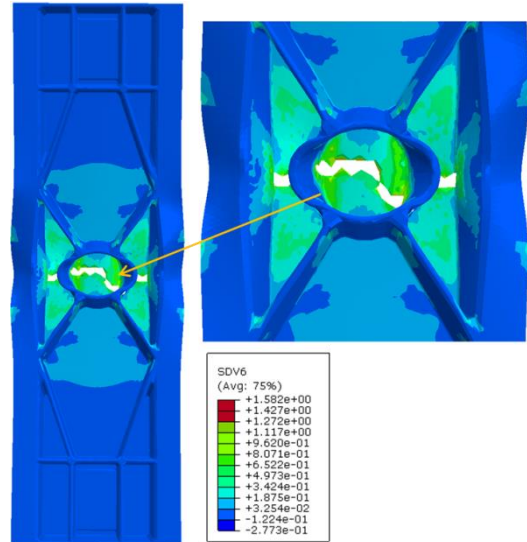


Bild 141: Berechnetes Versagensbild aus dem Modell mit 4 Bereichen mit Verteilung der Schädigungsvariable f

## 14 Kopplung zwischen Gieß- und Crash-Simulation (IFAM, IWM)

### 14.1 Homogenisierungsverfahren zur Kopplung der Porenmorphologie mit FE-Methoden

In der folgenden Erörterung geht es zunächst allgemein um die Kopplung eines Markov-Feldes mit der Kontinuumsmechanik und den in diesem Projekt verwendeten makroskopischen Gleichungen zur Beschreibung des Bruchverhaltens. Bild 142 zeigt die Vorgehensweise der Kontinuumsmechanik, die jedem Punkt des euklidischen Raumes eine Materialeigenschaft zuweist, die als stetiger Grenzwert beschrieben werden kann.



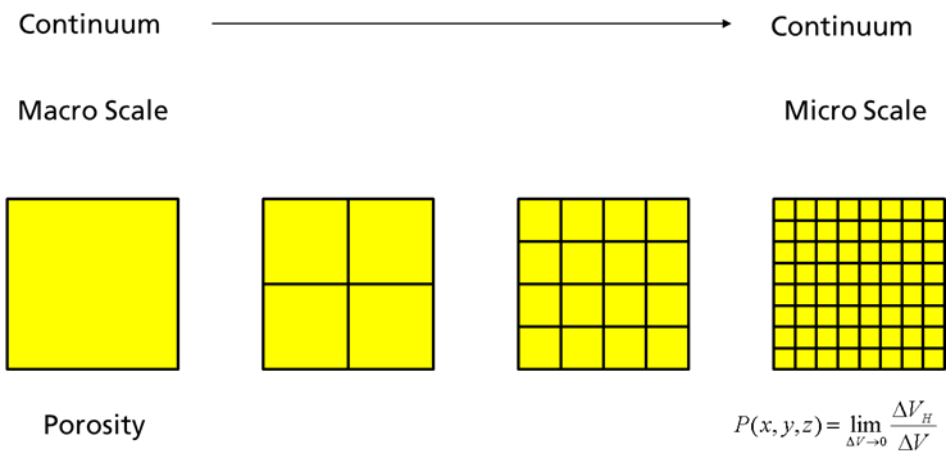


Bild 142: Kontinuumsmechanischer Ansatz

Die Untersuchungen dieses Projektes zeigen, dass die Porosität in der Mikroskala (< 1mm) nur als Zufallsfeld (Markov) beschrieben werden kann. Bei der Kopplung mikroskopischer und makroskopischer Skalen hat sich in der Übergangsskala die Methode der Homogenisierung bewährt. Dabei werden die Porositätswerte der Mikroskala in höheren Skalen gemittelt. Das führt zu einer örtlichen statistischen Streuung der Porositätswerte, deren Streubreite mit geringerer Auflösung (gröberes Netz) abnimmt. Es ist möglich unter Berücksichtigung dieser aus der Mikrostruktur erzeugten Streuungen in der Übergangsskala mit den kontinuumsmechanischen Gesetzen weiter zu arbeiten.

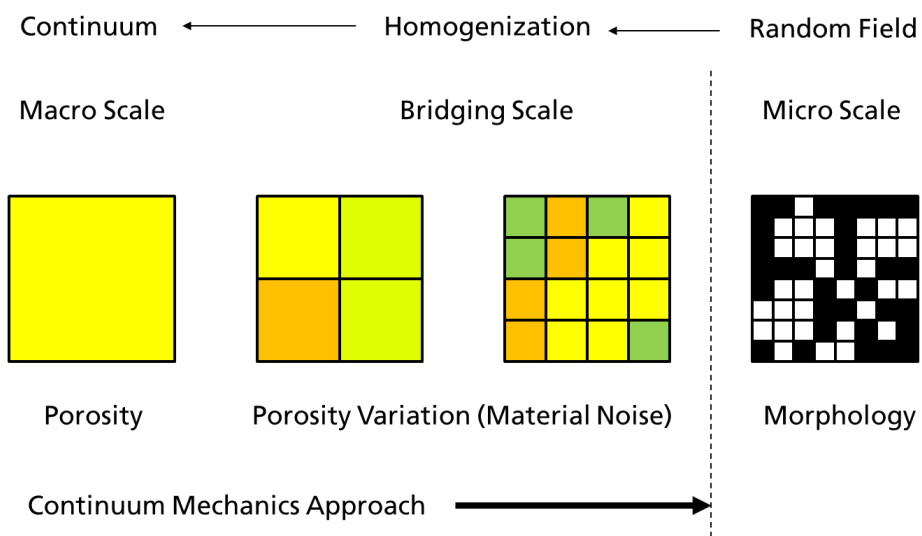


Bild 143: Skalenkopplung durch Homogenisierungsansatz

## 14.2 Anwendung auf Zugproben Y-Box

Für das in Absatz 14.1 beschriebene Homogenisierungsverfahren hat das IFAM ein Programm zur Erzeugung und Homogenisierung von Porenmorphologien und das

Mapping auf ein vorgegebenes FE-Netz (Zugprobe) entwickelt. Die Parameter des Markov-Felder-Ansatzes wurden durch Anpassung der CT-Ergebnisse bestimmt.

Das Programm wurde zur Erstellung von Porenmorphologien für ein FE-Modell von Zugproben mit Elementgröße 0.5 mm angewandt. Zwei Porenmorphologien für eine Porosität von 5% und zwei äquivalente Porengrößen 250 und 500  $\mu\text{m}$  wurden generiert. Ein Kontrollvolumen von 1  $\text{mm}^3$  wurde definiert. Zunächst wurde ein grobes Netz mit Elementgröße 1 mm generiert und für jedes Element wurde das stochastische Programm ausgeführt. Dabei wurde jedes Kontrollvolumen in  $10 \times 10 \times 10$  Elementarzellen, denen der Wert eins (Matrix) oder Null (Pore) zugeordnet wird, aufgeteilt. Anschließend wurde ein Homogenisierungsverfahren zur Zusammenführung der Porositäten von  $5 \times 5 \times 5$  Elementarzellen für ein Element des feinen FE-Netzes verwendet. Es entstehen aus dem Kontrollvolumen mit 5% Porosität  $2 \times 2 \times 2 = 8$  Elemente mit unterschiedlichen Porositäten. Letztendlich muss die Porosität von feinem Netz mit einem Mapping-Programm zum finalen FE-Netz übertragen werden. Dieser letzte Schritt ist aus geometrischem Grund erforderlich, da das feine Netz aus der Geometrie des groben Netzes entsteht und vom FE-Netz für die Probensimulation leicht abweichen kann. Diese Vorgehensweise ist in Bild 144 skizziert. Bei der Untersuchung wurde nicht die ganze Probe sondern nur der relevante Belastungsbereich betrachtet, und die Probenschultern wurden mit einer konstanten Porosität definiert.

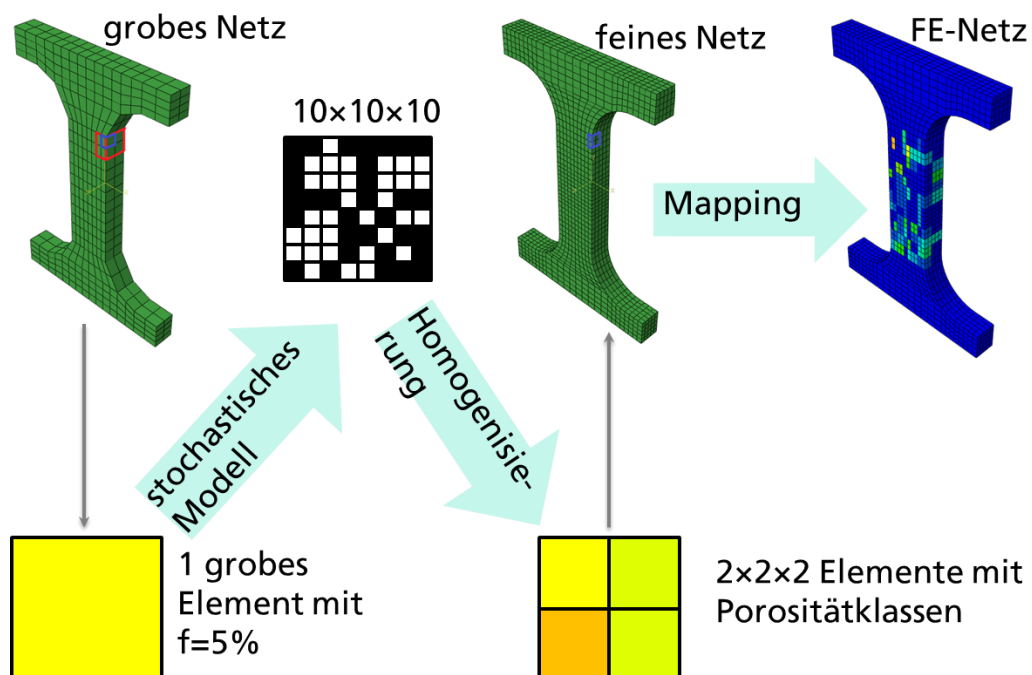


Bild 144: Erzeugung, Homogenisierung und Mapping von Porenmorphologien auf ein FE-Netz für Zugprobe

Für die zwei Porenmorphologien mit der äquivalenten Porengröße von 250 und 500  $\mu\text{m}$  wurden jeweils 20 Realisationen durchgeführt. Bild 145 zeigt für jede äquivalente

Porengröße eine ausgewählte Porenmorphologie, die sichtbare örtliche Porositätsschwankungen aufweist.

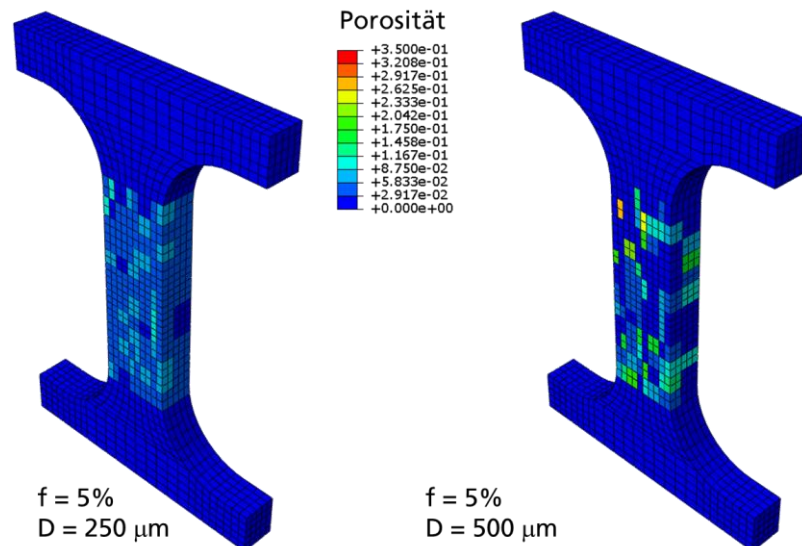


Bild 145: Homogenisierte Porenmorphologien für  $D = 250\mu\text{m}$  (links) und  $D = 500\mu\text{m}$  (rechts) bei  $f = 5\%$

Der Einfluss der äquivalenten Porengröße auf das Versagensverhalten und die Streuung innerhalb einer äquivalenten Porengröße durch unterschiedliche Realisationen wurden mit Zugprobensimulationen untersucht. Dabei wurde die gleiche Vorgehensweise wie im Absatz 11.2 verwendet und der Unterschied besteht darin, dass die Porosität nicht aus einem Zufallsgenerator sondern aus dem stochastischen Programm vom IFAM mit Homogenisierung und Mapping entsteht. Bild 146 zeigt die berechneten technischen Spannungs-Dehnungskurven von Flachzugversuchen für die 20 Realisationen mit 2 äquivalenten Porengrößen, wobei die Referenzergebnisse aus homogener Porosität und die experimentellen Ergebnisse (schwarze Linien) zum Vergleich eingetragen wurden. Die Simulationsergebnisse sind mit grünen bzw. blauen und roten Linien für die Porengröße von 250  $\mu\text{m}$  bzw. 500  $\mu\text{m}$  und die homogene Porosität dargestellt. Zu erkennen ist, dass für eine bestimmte äquivalente Porengröße unterschiedliche Lösungen für unterschiedliche Realisationen berechnet wurden, was die experimentelle Streuung wiedergeben kann. Bei der konstanten Porosität von 5% wurde festgestellt, dass je größer die Porengröße, desto kleiner die Bruchdehnung und desto größer ihre Streuung ist. Im Grenzfall einer homogenen Porosität ist die Bruchdehnung am größten und es gibt nur eine Realisationsmöglichkeit.

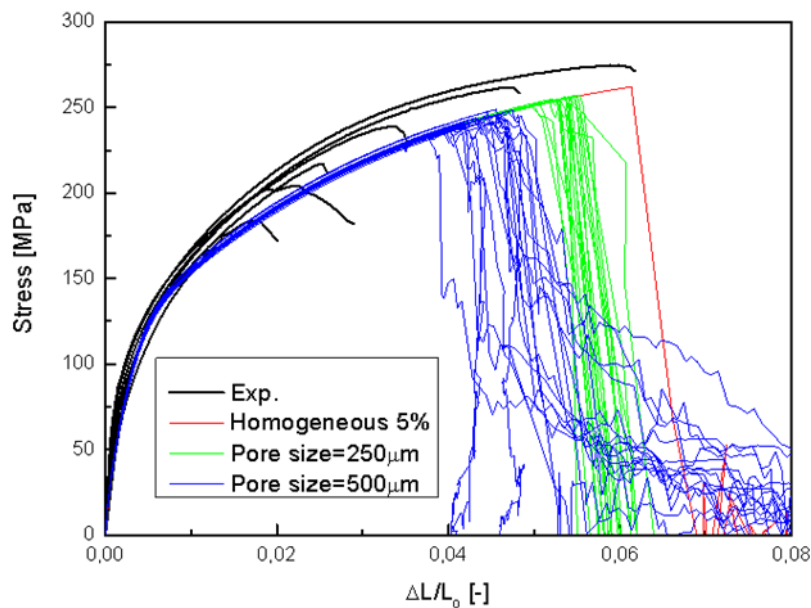


Bild 146: Berechnete normierte Kraft-Verschiebungskurven von Flachzugversuchen für 20 Realisationen bei 2 äquivalenten Porengrößen ( $f = 5\%$ ,  $D = 250\mu\text{m}$ ) und ( $f = 5\%$ ,  $D = 500\mu\text{m}$ ) in Vergleich mit Experimenten

Um den Einfluss der Porengröße auf die Bruchdehnung und ihre Streuung zu klären, wurde für alle Realisationen beider Porengrößen die Erscheinung jeder Porositätsklasse ausgewertet und in Bild 147 für die Variante ( $f = 5\%$ ,  $D = 250\mu\text{m}$ ) und in Bild 148 für die Variante ( $f = 5\%$ ,  $D = 500\mu\text{m}$ ) dargestellt. Die Realisation, die zur maximalen bzw. minimalen Bruchdehnung führt, wird in rot bzw. in schwarz gekennzeichnet. Es gibt keinen deutlichen Zusammenhang zwischen der Streuung der Porositätsklasse (Bild 147 und Bild 148) und der Streuung der Bruchdehnung (Bild 146). Dagegen kann man bei der Auswertung der maximalen Porosität für beide Porenmorphologien (Bild 149) feststellen, dass bei ( $f = 5\%$ ,  $D = 500\mu\text{m}$ ) die größere Streuung der maximalen Porosität zu einer größeren Streuung der Bruchdehnung und die höhere maximale Porosität zu kleinerer Bruchdehnung führt.

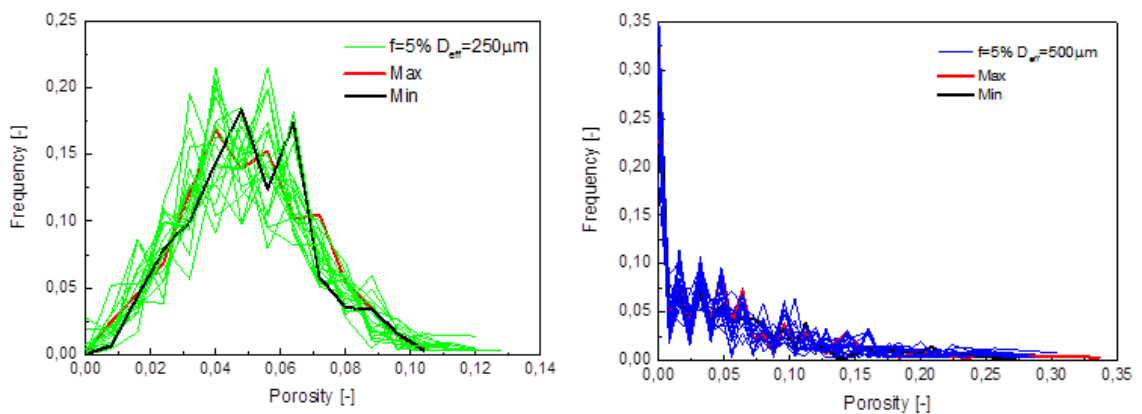


Bild 147: Porositätserscheingung für Porenmorphologie ( $f = 5\%$ ,  $D = 250\mu\text{m}$ ) bei 20 Realisationen  
 Bild 148: Porositätserscheingung für Porenmorphologie ( $f = 5\%$ ,  $D = 500\mu\text{m}$ ) bei 20 Realisationen

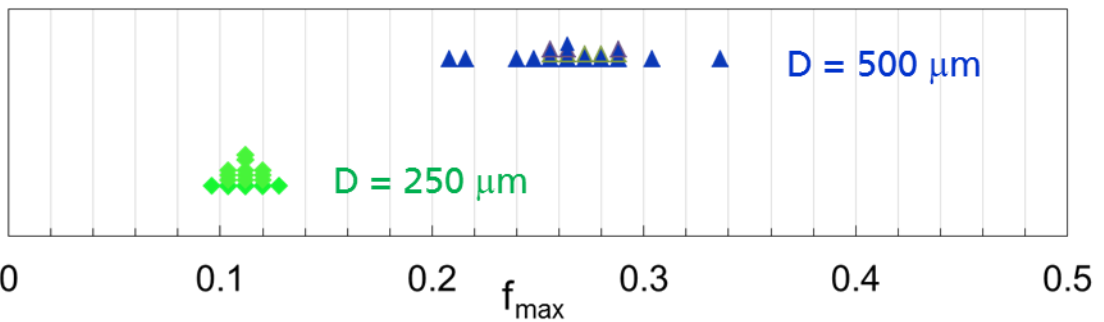


Bild 149: Maximale Porosität für Porenmorphologien ( $f = 5\%$ ,  $D = 250\mu\text{m}$ ) und ( $f = 5\%$ ,  $D = 500\mu\text{m}$ ) bei 20 Realisationen

Diese Vorgehensweise kann prinzipiell auf Simulationen von allen Probenarten und Komponenten übertragen werden. Für Komponentensimulationen muss allerdings noch geklärt werden, welche Fenstergröße zur Charakterisierung der Porenmorphologie sinnvoll ist.

## 15 Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts war die Entwicklung einer Methode zur Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie und –verteilung auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit Berücksichtigung stochastischer Effekte. Dafür wurde eine durchgängige Prozesskette von der Gieß- bis zur Crashsimulation durchgeführt und der stochastische Charakter der Mikrostruktur und die daraus resultierenden lokalen Materialeigenschaften wurden auf Basis von Porenmorphologien berücksichtigt.

Für das Vorhaben wurden zwei Demonstratoren (160 Y-Boxen und 231 Karosserieknoten) aus Castasil-37 gegossen. Dafür wurden die vorhandenen Werkzeuge angepasst und die Prozessparameter zur Gewährleistung der Gussqualität variiert.

Zur Identifizierung von Porenverteilungen wurden CT-Untersuchungen mit unterschiedlichen Auflösungen durchgeführt. Die beim TPW Prüfzentrum in Neuss durchgeführten CT-Scans erfolgten durch eine Phoenix/X-Ray mit einer Auflösung von ungefähr 300 µm. Am Fraunhofer Zentrum für Röntgentechnik in Fürth (IIS/EZRT) wurden Mikro-CT-Untersuchungen mit einer Auflösung von unter 10 µm durchgeführt. Damit wurden ausgewählte Bereiche der Y-Box charakterisiert und analysiert. Die Ergebnisse zeigten den inhomogenen und statistischen Charakter der lokalen Porenverteilung. Beim IFAM wurden stichprobenweise Röntgendurchleuchtungen zur Porositätserkennung durchgeführt.

Gießsimulationen der Y-Box wurden mit MAGMA durch das Gießerei-Institut der RWTH Aachen durchgeführt. Die Temperaturverteilungen im Gussteil wurden für zwei Parametersätze nach der Formfüllung und Abkühlung berechnet. Man erkennt einen Bereich mit heißeren Temperaturen am unteren Flansch. Die Berechnung der Schrumpfungsporosität zeigt eine gute Übereinstimmung mit den CT-Scans aus dem TPW Prüfzentrum. Hier tritt die Porosität hauptsächlich in und an den Rippen auf. Die Gießsimulation für den Karosserieknoten wurde am IFAM durchgeführt. Die Geometriedaten des Werkzeugs stellte die Firma MAGMASOFT zur Verfügung. Allerdings musste die fehlende Geometrie des Angussystems mit einem 3D-Scanner ermittelt und im Modell realisiert werden. Die Berechnung der Schrumpfungsporosität zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Röntgenprüfungen vom IFAM.

Eine weitere Gießsimulation für den Karosserieknoten wurde von der Fa. Calcom ESI mit dem kommerziellen Programm ProCAST durchgeführt. Die Geometrie und die Prozessinformation wurden vom IFAM übergeben. Im Gegensatz zur MAGMA-FDM (Finite-Differenzen-Methode) Simulation handelt es sich bei ProCAST-Simulation um eine FEM (Finite-Elemente) Berechnung. Durch die Gießsimulation wurden kritische Bereiche ermittelt, die lange ungefüllt bleiben, so dass z.B. Lufteinschlüsse über den gesamten Füllvorgang in das Bauteil eingespült werden können. Die Ergebnisse der ProCAST Gießsimulation wurden mit einem Partikelverfahren untersucht. Partikel mit einer langen Fließlänge spiegeln dabei ein erhöhtes Auftreten von Oxiden wider. Dies lässt sich auch gut im Vergleich mit Röntgenaufnahmen der entsprechenden Stellen



beobachten. Die von der ProCAST-Simulation ermittelten Porositäten im Bauteil befinden sich im Bereich von Materialanhäufungen. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Röntgen-Untersuchungen.

Im IWM wurden zunächst die Ortsabhängigkeit des Verformungs- und Versagensverhaltens mit Zugproben aus 16 unterschiedlichen Positionen in der Y-Box charakterisiert. Trotz großer Streuungen kann man erkennen, dass sowohl die Fließspannungen als auch die Bruchdehnungen stark von der Entnahmeposition abhängen. Zur Beschreibung der starken Ortsabhängigkeit wurde die Y-Box in vier Bereiche (Angussnah, Angussfern, Mitte und Stege) aufgeteilt. Die Proben aus der Position „Angussfern“ zeigen im Vergleich zu den Proben aus der Position „Angussnah“ eine höhere Festigkeit. Die Proben aus dem Bereich „Stege“ zeigen die niedrigsten Spannungs-Dehnungskurven und die kleinsten Bruchdehnungen. Die Ursachen für die Ortsabhängigkeit liegen wahrscheinlich in unterschiedlichen Verteilungen von Porosität und anderen Ungängen sowie der Streuung der Matrixeigenschaften zwischen den verschiedenen Probenentnahmeorten. Der zweite Demonstrator „Karosserieknoten“ weist eine ähnliche Ortsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften auf.

Zur Untersuchung des Einflusses des Spannungszustands auf die Bruchdehnung wurden im Anschluss verschiedene Probenversuche unter Zug, Druck, Kerbzug, Scherzug, Biegung und Biaxialzug für zwei Entnahmeorte (Angussnah und Angussfern) durchgeführt. Zahlreiche Versuche wurden gemacht, um den stochastischen Aspekt zu behandeln. Zur Ermittlung des Dehnungsfelds in den Schädigungszonen wurden optische Dehnungsmessungen mit dem ARAMIS System bei jeder Versuchsserie durchgeführt. Bei jedem Versuchstyp wurde eine große Streuung der lokalen Bruchdehnungen zwischen den Komponenten ermittelt, obwohl die Entnahmeposition gleich ist. Trotz dieser Streuung ist eine starke Abhängigkeit der Bruchdehnung vom Belastungstyp, der einen Spannungszustand darstellt, und vom Entnahmeort klar zu erkennen. Metallographische und fraktographische Untersuchungen wurden zur Identifizierung von Mikrodefekten und Mikromechanismen des Versagens sowie zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen Porosität und Mehrachsigkeit durchgeführt.

Die Einflüsse der Porosität auf elastische Eigenschaften, plastisches Fließen und Versagensverhalten wurden durch Zellmodellrechnungen mit einer Pore in einem RVE quantifiziert und mit analytischen Ansätzen beschrieben. Zur Untersuchung des Einflusses der Porenmorphologie auf das Bruchverhalten wurden Zellmodellrechnungen mit mehreren Poren in einem RVE mit Variation von Porengröße, -anzahl, -form und -abstand bei unterschiedlichen Mehrachsigkeiten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen ausgeprägten Einfluss der Porenmorphologie und eine starke Wechselwirkung zwischen Porenmorphologie und Mehrachsigkeit. Die Ableitung einer geschlossenen Gleichung, die die Bruchdehnung als Funktion von Porengröße, -anzahl, -form und -abstand und Mehrachsigkeit beschreibt, scheint eine unlösbare Aufgabe zu sein und dazu kann man nicht gewährleisten, dass ein solcher Ansatz auf andere Porenmorphologien und Belastungssituationen übertragbar ist.

Deswegen wurde eine neue Vorgehensweise für die Modellierung des Einflusses der Porenmorphologie auf Verformung und Versagen vorgeschlagen. Im Wesentlichen

besteht die Vorgehensweise aus den beiden folgenden Schritten:

- a) Erzeugung einer Porenverteilung auf einem FE-Modell mit Hilfe eines stochastischen Modells oder einer CT-Untersuchung als Anfangsbedingungen für anschließende Festigkeits- oder Crashsimulation
- b) Anwendung eines aus Zellmodellrechnungen abgeleiteten makroskopischen Werkstoffmodells für die Festigkeits- oder Crashsimulation mit Berücksichtigung der Einflüsse der Porosität auf das Verformungs- und Versagensverhalten.

Zur Überprüfung dieser Methode wurden vier unterschiedliche Porenmorphologien bei gleicher Porosität von 5% in den Prüfbereichen von Glattzug-, Kerbzug-, Scherzug- und Biaxialzugproben generiert. Als Testbeispiele wurden zunächst die Porenmorphologien durch die Einführung von unterschiedlichen Porositätsklassen aus einem Zufallsgenerator gebildet. Die Wechselwirkung von Porenmorphologie und Mehrachsigkeit bzgl. des Bruchverhaltens könnte damit qualitativ wiedergegeben werden.

Um die in einem Gießprozess entstehende Porenmorphologie nachzubilden, wurde ein stochastisches Modell auf Basis des Markov-Felds entwickelt. Dabei wurde neben der Porosität eine äquivalente Porengröße zur Charakterisierung der Porenmorphologie benutzt. Die Parameter für das Markov-Feld können durch Anpassung an die Porenmorphologie aus CT-Untersuchungen bestimmt werden. Das Modell erzeugt örtliche Variationen der Porosität, die auf ein Finite-Elemente-Netz für eine Crashsimulation übertragen werden können.

Beim IFAM wurde das stochastische Modell für die ersten Anwendungen programmiert und die Modellparameter wurden auf Basis der CT-Ergebnisse ermittelt. Damit wurden jeweils 20 Porenmorphologien für zwei äquivalente Porengrößen erzeugt. Mit einem Mapping-Verfahren wurden sie auf das FE-Modell für Zugversuche übertragen und die entsprechenden Spannungs-Dehnungskurven berechnet. Damit konnten die experimentell ermittelten Streuungen der Bruchdehnung vorausberechnet werden. Diese Methode lässt sich im Prinzip auf alle Probengeometrien und Komponenten übertragen. Allerdings muss das stochastische Programm bzgl. flexibler Definition des Kontrollvolumens verbessert werden. Sowohl der Charakter der Mikrostruktur als auch die Elementgröße im FE-Modell sollen bei der Auswahl des Kontrollvolumens berücksichtigt werden.

Zur Validierung des entwickelten makroskopischen Werkstoffmodells wurden Stauch- und Biegeversuche an der Y-Box konzipiert und durchgeführt. Zwei Typen von Biegeversuchen wurden zur Variation lokaler Beanspruchung durch Druck des Stempels an der äußeren oder inneren Seite der Y-Box realisiert. Es wurde festgestellt, dass die Größe der Streuung bei Komponententests von der Belastungssituation abhängig ist. Im Vergleich mit den Stauchversuchen zeigen die Biegeversuche mit Stempeldruck an der äußeren Seite ein deutlich breiteres Streuband des Stempelwegs bei Bruch und unterschiedliche Bruchbilder. Eine Erklärung ist, dass bei dieser Biegebelastung stochastische Eigenschaftsvariation im kritischen Bereich unter dem Stempel zu einer großen Änderung des globalen Verhaltens führt. Dagegen reagiert das globale Verhalten der Y-Box unter Stauchbelastung wenig empfindlich gegenüber lokaler Schädigung.

Bei der Komponentensimulation wurden die Einflüsse des Elementtyps und der Elementgröße auf numerische Ergebnisse systematisch untersucht. Im Vergleich mit

vierknotigen Tetraedern mit erster Integrationsordnung liefern zehnknotige Tetraeder-Elemente mit zweiter Integrationsordnung bessere Ergebnisse. Das entwickelte Modell mit örtlicher Porositätsverteilung ist in der Lage, die Versagensstellen und ihre stochastischen Variationen in der Y-Box richtig vorherzusagen. Für eine bessere Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation müssen die realen Porenmorphologien genau ermittelt und als Anfangsbedingungen benutzt werden. Außerdem ist notwendig, dass andere Mikrodefekte wie Oxidhäute, Einschlüsse und Kaltfließstellen bei der Modellierung betrachtet werden. Dafür müssen das stochastische Modell und das makroskopische Versagensmodell erweitert werden. Die hier dargestellten Methoden bieten eine gute Basis für die Erweiterungen.

## 16 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die hier entwickelte Methode für die Crashsimulation mit Einbeziehung von inhomogen verteilten lokalen Eigenschaften durch Kopplung zu Gießsimulation ermöglicht eine effiziente Optimierung von Komponentenverhalten und Fertigungsprozessen. Der Einsatz der neuen numerischen Methode in der Aluminium- und Automobilindustrie wird unmittelbar zur deutlichen Verkürzung der Entwicklungsprozesse und Steigerung der Crashesicherheit einer neuen Komponente führen. Die Vorhersage von möglichen Streuungen von lokalen Eigenschaften wird einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Auslegung von neuen Strukturkomponenten bzgl. Sicherheit und Leichtbau leisten.

Die deutschen Hersteller von Aluminiumgussteilen stehen zunehmend unter einem weltweiten Wettbewerbsdruck. Die Einführung einer neuen Methode zur Entwicklung von maßgeschneiderten Produkten, zur Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung ist für die Bewahrung bzw. den Ausbau der bisher führenden Position von substantieller Bedeutung. Bei der Entwicklung von neuen Fahrzeugen ist die Einhaltung der europäischen Crashkriterien bei der Bewertung der Crashtoleranz erforderlich. Die Anwendung der neuen numerischen Methode einschließlich Werkstoffmodelle, Ermittlung von Modellparametern und Berücksichtigung stochastischer Effekte wird die Qualität virtueller Entwicklung, die für Konstruktion von neuen Fahrzeugen immer wichtiger wird, deutlich verbessern. Davon werden die Dienstleistungsgruppen für Konstruktion und Software stark profitieren.

In Deutschland beschäftigen sich zahlreiche kleine und mittlere Unternehmen mit der Auslegung, der Fertigung und der Bewertung des Einsatzes von Aluminiumgusskomponenten, die wegen steigenden Anforderungen an Leichtbau und Kostensenkung zunehmend eingesetzt werden. Wie bereits im Abschnitt 5.1 dargestellt, wird der Einsatz der Simulationemethode bei diesen Unternehmen zu einer deutlichen Verbesserung von Produktqualität, Fertigungseffizienz, Sicherheitsbewertung und Wettbewerbsfähigkeit führen.

Die Ergebnisse beruhen auf einer Verknüpfung von tiefgehenden Kenntnissen auf verschiedenen Gebieten wie dem der Aluminiumwerkstoffe, der Fertigungsprozesse, der stochastischen Analyse, der numerischen Simulation mit übertragbaren Werkstoffmodellen und deren Verifizierung durch Bauteilversuche. Die Beherrschung der hier entwickelten Technik wird die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kleinen und mittleren Unternehmen in Deutschland nachhaltig verbessern. Obwohl die Notwendigkeit der neuen numerischen Methode für die Verbesserung der Fertigungstechnik und die Bewertung der Crashesicherheit von diesen Firmen wie z.B. Dienstleistungsgruppen für Gieß- und Crashsimulation erkannt ist, können die kleinen und mittleren Unternehmen aus Kosten- und Kapazitätsgründen diese Technik nicht selbst entwickeln und die vor einer Umsetzung in die Praxis notwendigen Erfahrungen sammeln. Die hier entwickelte Methode mit einer definierten Vorgehensweise und die aufgezeigte Nutzung werden den kleinen und mittleren Unternehmen entscheidend helfen und ihnen einen Wettbewerbsvorteil auch international liefern.

## 17 Ergebnistransfer

	<b>Zeitraum</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel/Bemerkung</b>
Während der Laufzeit (02/2012-12/2014)	jährlich	Präsentation im AK 27 von VDA/FAT	Fortschrittsbericht, Diskussion, Abstimmung, Festlegungen, Maßnahmen
	halbjährlich	Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	Beratung, Fortschrittsbericht, Diskussion, Abstimmung, Festlegungen, Maßnahmen
	08.-12.04.2013	Hannover Messe Industrie, Fraunhofer SIMULATION, Halle 7, Stand B10	Präsentation von Zwischenergebnissen
	16.-19.06.2014 ICAA14 Trondheim	Vortrag bei der internationalen Aluminiumtagung über Teilergebnisse	Vermittlung von neuen Kenntnissen und numerischen Methoden, Austausch mit internationalen Experten
	06.-08.10.2014 Bamberg	Vortrag bei der Crashtagung LS-DYNA Forum	Vermittlung von neuen Kenntnissen und numerischen Methoden, Darstellung der Anwendung
Nach Abschluss des Vorhabens	Mär. 2015	Abschlussbericht	Bereitstellung von Ergebnissen und numerischen Methoden für Anwendungen in der Wirtschaft
	07.01.2015 Montego Bay	Präsentation beim int. Symposim on Plasticity	Vermittlung von wissenschaftlichen Kenntnissen
	04.03.2015 Bad Homburg	Präsentation im BDG-Fachausschuss Druckguss	Vermittlung von wissenschaftlichen Kenntnissen
	2015	Übergabe von neuen Modellen an Softwarefirmen	Bereitstellung von neuen numerischen Methoden für die Anwendung in der Industrie

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden im projektbegleitenden Ausschuss und im AK 27 von VDA/FAT regelmäßig den Industriepartnern vorgestellt. Darüber hinaus wurden bisher folgende Publikationen erstellt:

- D.-Z. Sun, Y. Ma, F. Andrieux, Modeling of the Influence of Pore Morphology on Damage Behavior of an Aluminum Die Casting Alloy, ICAA14, the 14th Int. Conf. on Aluminium Alloys, June 2014, Trondheim,
- D.-Z. Sun, Y. Ma, F. Andrieux, Modellierung des Einflusses der Porenmorphologie auf das Versagensverhalten eines



Aluminiumgusswerkstoffe, 13. LS-DYNA Forum 2014, 06.-08.10.2014  
Bamberg.

Darüber hinaus sind Publikationen in Fachzeitschriften in Planung. Der Schlussbericht wird bei der TIB Hannover und auf der IWM-Webseite eingestellt.

## 18 Förderhinweis und Danksagung

Das IGF-Vorhaben 412 Z N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für diese Förderung sei gedankt.

Außerdem bedanken wir uns für interessante Diskussionen und Anregungen aus dem projektbegleitenden Ausschuss, dessen Mitglieder im Folgenden aufgeführt sind:

- Herr Marian Bulla                      Altair Engineering GmbH
- Herr Dr. Markus Feucht                Daimler AG, Sindelfingen
- Herr Dr. André Haufe                  DYNAmore GmbH, Stuttgart
- Herr Dr. Norbert Hoffman             TAKATA-PETRI AG
- Herr Herbert Klamser                 Porsche AG, Weissach
- Herr Ole Koeser                        Calcom ESI, CH-Lausanne
- Herr Dr. Harald Mandel                Daimler
- Herr Dr. Jens Neumann                TRW Automotive GmbH
- Herr Gernot Oberhofer                MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer
- Herr Daniel Riemensperger           Opel GmbH, Rüsselsheim
- Herr Ngoc-Boi Tran                    Audi AG, Neckarsulm
- Herr Cesare Troglio                  BDG, Düsseldorf
- Herr Dr. Konrad Weiß                 RWP GmbH
- Herr Dr. Ulrich Weiss                 Ford Forschungszentrum GmbH, Aachen

## 19 Referenzen

- [AND04] F. Andrieux, D.-Z. Sun, H. Riedel, Development and Application of a micromechanical model for the description of the growth and coalescence of spheroidal voids, International Forum on Advanced Material Science and Technology, IFAMST04, Troyes (France), 2004.
- [AND10] F. Andrieux, D.-Z. Sun, Damage modelling for simulation of process chain from forming to crash, Int. J. Mat. Res. 2010, Vol. 101, 8, 963-971.
- [BAO04] Y. Bao, T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, Int. J. Mech. Sci., 2004, 46 (81), 81-98.
- [BEC87] RA: Becker, The effect of porosity distribution on ductile failure, J. Mech. Phys. Solids, Vol.35, No5, 1987.
- [BRO73] L.M. Brown, J.D. Embury, Proc. 3rd Int. Conf. on Strength of Metals and Alloys, Institute of Metals, London, 1973.
- [BÜH03] A. Bührig-Polaczek, B. Pustal, B. Winartomo, J. Jakumeit, B. Böttger Simulation von Gießprozessen, Symposium „Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung“, 5.-7.11.2003, Bremen.
- [BUR08] A. Burbliès, N. Reichert, M. Busse, Einsatz von Leveled-Noise-Verfahren beim Computer Aided Robust Design, 4. ASIM-Workshop Modellierung, Regelung und Simulation in Automotive und Prozessautomation, 29.-30. Mai 2008, Wismar.
- [CAC96] C. H. Caceres, J. R. Griffiths, P. Reiner, The influence of microstructure on the Bauschinger effect in an al-si-mg casting alloy, Acta mater., Vol. 44, No. 1, 15-23, 1996.
- [DOE02] E. Doege, J. Dittmann, Vorhersage der Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften geschmiedeter Bauteile durch FEM-Simulation.
- [FLE05] E. Flender, G. Hartmann, Modellierung und Simulation im Druckguss, Grundlagen und Anwendung. GIESSEREI 92 03/2005. 38-49.
- [GOL93] M. Gologanu, J.B. Leblond, J. Devaux, Approximate models for ductile metals containing non-spherical voids - case of axisymmetric prolate ellipsoidal cavities, J. Mech. Phys. Solids 41 (1993) 1723-1754.
- [GRE03] L. Greve, Development of a PAMCRASH-material model for die casting alloys, Proceedings of the 6<sup>th</sup> international conference magnesium alloys and their applications, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Wolfsburg 2003.
- [GRE05] L. Greve L., A. Hillebrand, D.-Z. Sun, P. Moeller, Failure modelling of cast aluminium and industrial application using multi-model coupling, EuroPAM 2005, 5.-7. Okt. 2005, Potsdam.
- [HAT05] J. Hattel, Fundamentals of Numerical Modelling of Casting Process, Polyteknisk Forlag, 2005.
- [HÄC11] R. Häcker, E. Knothe, (BAM, Berlin) F. Andrieux, D. Memhard, Entwicklung und Verifikation von Materialmodellen und numerischen Methoden zur Vorhersage der Containment-sicherheit beim Bersten von Laufrädern in Abgasturboladern (ATL), FVV-Frühjahrstagung, 17.-18.03. 2011, Bad Neuenahr.
- [HEN01] S. Henn, Werkstoffmechanische Untersuchungen zum Versagensverhalten von Aluminiumguss, DVM-Bericht 233: Anwendungen der Bruch- und Schädigungsmechanik, 2001.

- [JAN07] J. Jansen, Ein Werkstoffmodell für eine Aluminium-Druckgusslegierung unter statischen und dynamischen Beanspruchungen, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007, München, Univ., Diss., 2007, ISBN: 978-3-8167-7382-5.
- [JOH85] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, vol.21 (1985), No.1, pp.31-48.
- [KAP10] J. Kappey, J. Fainberg, M. Schneider, S. Akhtar, M. D. Sabatino, L. Arnberg, E. Sjölander, S. Seifeddine, I. L. Svensson, Microstructure, defects and properties in aluminium alloy castings: modelling and simulation, Multiphysics Simulation – Advanced Methods for Industrial Engineering, June 22-23, 2010, Bonn.
- [KRA96] T. Kraft, H.E. Exner, Numerische Simulation der Erstarrung Zeitschrift für Metallkunde 87 (1996), 7, S. 598-611.
- [MUG04] G. W. Mugicaa, D. O. Tovioa, J. C. Cuyasa, A. C. Gonzálezb, Effect of porosity on the tensile properties of low ductility aluminum alloys, Materials Research, Vol. 7, No. 2, 221-229, 2004.
- [LEE06] C. D. Lee, Constitutive prediction and dependence of tensile properties of high-pressure die-cast AM60B and AZ91D magnesium alloy on microporosity, Metals and Materials International, Vol. 12, No. 5 (2006), 377-383.
- [LEE90] Y. W. Lee, E. Chang, C. F. Chieu: Pore formation in Solidification, Met. Trans. 21 B (1990), S 715 – 722.
- [NAH08] K. Nahshon, J.W. Hutchinson, Modification of the Gurson Model for shear failure, Euro. J. Mech. A/Solids, 2008, 27, 1-17.
- [NEE84] A. Needleman, V. Tvergaard, Analysis of Ductile Rupture in Notched Bars, J. Mech. Phys. Solids 32 (1984) 461-490.
- [PAR05] T. Pardoen, Y. Bréchet, G. Huber, Micromechanics of ductile fracture in multiphase alloys – application to cast aluminium alloy with penny shape voids, ICF11- 11<sup>th</sup> International Conference on Fracture, 2005.
- [PER98] P. Perez, Markov Random Fields and Images, CWI Quarterly, Vol.11 (4) 1998, 413-437.
- [POK04] E. Pokora, H. Huynh-Nguyen, F. Klein, Einfluß der Vernetzung auf die Ergebnisse der numerischen Simulation der Formfüllung und Wärmeübertragung, Giesserei-Praxis, 2004, 7, 277-283.
- [PYT10] T. Pyttel, E. Lieven, J. Cai, O. Köser, M. Wuth, Simulation des Mechanischen Verhaltens von Gussbauteilen mit Berücksichtigung des Herstellungsprozesses, FKM-Tagung: Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise, 16.-17.06.2010, Darmstadt.
- [SCH05] F. Scheppe, C. Obuna, B. Böttger, Prozess-Gefüge-Eigenschaften Giesserei-Praxis (2005), 10, S. 369 – 372.
- [SUN03] Sun D.-Z., Sommer S., Memhard D., Characterization and modelling of material damage under crash loading, 21st CAD-FEM Users' Meeting 2003, 12.-14.11. 2003, Potsdam.
- [SUN10] D.-Z. Sun, A. Ockewitz, F. Andrieux, H. Klamser, Modeling of Damage Behavior of Cast Aluminum Components taking into account Porosity Effects, 12<sup>th</sup> International Conference on Aluminium Alloys, ICAA12 Yokohama, Sept. 2010.
- [THO90] P.F. Thomason, Ductile Fracture of Metals, Oxford, Pergamon Press, 1990.
- [TRE05] R. Treiler, Vom Gießprozess zur Festigkeitsberechnung, Universität Karlsruhe (TH), 2005.
- [VDG03] Verein Deutscher Gießereifachleute – VDG, Gussteile für den Maschinenbau. Leitfaden für die Konstruktion und Bestellung von Gussteilen aus Gusseisen für den Maschinenbau, VDG Merkblatt K200 E.

- [WAN03] Q.G. Wang, Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 34A, Dec. 2003, 2887-2899.
- [WEI99] K. Weiß, Ch. Honsel, J. Gundlach, F. Gütlbauer, W. Blümlhuber, J. Detering, W. Bäsecke, Durchgängige Prototypen- und Prozessentwicklung in der Gießerei mittels Finite Elemente Gießprozess – Simulation, am Beispiel eines V6 Zylinderkurbelgehäuses (Daimler Chrysler) in Zusammenarbeit mit Honsel Guss, Giesserei, vol. 86, 1999.
- [WEI10] U. Weiss, NADIA research project, Magnesium High Pressure Diecast Automotive Body Components, METEF Conference – Brescia, April 16th, 2010.
- [WEI11] U. Weiss, A. Bach, H. Gese, Magnesium HPDC Crash CAE, VDI Fachkonferenz Simulation im automobilen Leichtbau, Baden-Baden, 23. November 2011.
- [YU96] H.J. Yu, R. Schroeder, P. Graja, G. Besserdich, A. Majorek, M. Hoferer Zur Modellierung und Simulation der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, HTM 51 (1996), 1, S. 48-55.

# 20 Anhang

## Chemische Zusammensetzung des untersuchten Werkstoffs Castasil®-37 (AlSi9Mn)

GERMANISCHER LLOYD PRÜFLABOR GMBH  
 Germanischer Lloyd Prüflabor GmbH Lahnstr. 26 D 45478 Mülheim/Ruhr  
 Telefon: 0208 / 58 98 2 - 0 Telefax: 0208 / 58 98 2 - 10



Seite 1 von 2  
 Page 1 of 2

### Prüfbericht für Werkstoffe

Prüf-Nr.: **13 04 589 MH**

Test-report for materials

Test-No.:

**Auftraggeber:** Fraunhofer IWM  
Orderer: Wöhlerstraße 11  
 79108 Freiburg

**Auftrags-Nr.:** 019/235103/971  
Order-No.:

**Kunden-Nr.:** 322993  
Customer-No.:

**Werkstoff:** AlSi9Mn  
Material:

**Abnahmeges.:** -  
Inspection by:

**Werkstoff-Nr.:** o.A.  
Material-No.:

**Anlage zu:**  
Appendix to:

**Norm:** o.A.  
Specification:

**Kontakt:** Herr J.Preußner  
Contact:

Anzahl Number	Gegenstand Object	Abmessungen Dimensions	Schmelze Heat-No.	Bezeichnung Description	Proben-Nr. Testpiece-No.	Id.-Nr. Id.-No.
1	Alu-Blech	D x B x L [mm] 2,4 x 75 x 80	-	Projekt-Nr. 122084	Bauteil 1	D1136 / 1
1	Alu-Blech	D x B x L [mm] 2,4 x 75 x 75	-	Projekt-Nr. 122084	Bauteil 2	D1137 / 1
1	Alu-Blech	D x B x L [mm] 2,4 x 75 x 80	-	Projekt-Nr. 122084	Bauteil 3	D1138 / 1

**Prüfnormen:** Analyse Al  
Test specification

Anzahl Number	Gegenstand Object	Abmessungen Dimensions	Schmelze Heat-No.	Projekt-Nr. Project-No.	Proben-Nr. Testpiece-No.	Id.-Nr. Id.-No.
1	Alu-Blech	D x B x L [mm] 2,4 x 75 x 80	-	122084	Bauteil 1	D1136 / 1

Hersteller Manufact.	Lieferzustand gem. Hersteller Delivery condition acc. to manufacturer
o. A. / not mentioned	o. A. / not mentioned

**Bemerkungen:**  
Remarks:

#### Stückanalyse Al, Vakuum-Emissionsspektrometer [Massenanteile]

Analysis of test piece Al, Vacuum Emission Spectrometer [Mass portions] D1136 / 1

[%]			[%]			[%]		
	min	max		min	max		min	max
Si	11,330		Ti	0,098		Pb	0,003	
Fe	0,084		Zn	0,005		Sn	0,019	
Mg	0,005		B	<0,0001		V	0,012	
Cu	0,006		Ca	0,0002		Zr	0,128	
Mn	0,487		Co	0,005		Al	87,811	
Ni	0,011		Cr	<0,001				

Mülheim/Ruhr, den 02.05.2013



*Unger*  
 Unger  
 Prüflingenieurin

Results refer to given identification. No responsibility in extracts without written approval of GLP



**Prüfbericht für Werkstoffe**

Prüf-Nr.:

**13 04 589 MH**

Test-report for materials

Test-No.:

Anzahl Number	Gegenstand Object	Abmessungen Dimensions	Schmelze Heat-No.	Projekt-Nr. Project-Nr.	Proben-Nr. Testpiece-No.	Id.-Nr. Id.-No.	
1	Alu-Blech	D x B x L [mm] 2,4 x 75 x 75	-	122084	Bauteil 2	D1137 / 1	
Hersteller Manufact.			Lieferzustand gem. Hersteller Delivery condition acc. to manufacturer				
o. A. / not mentioned			o. A. / not mentioned				
Bemerkungen: Remarks:							
<b>Stückanalyse Al, Vakuum-Emissionsspektrometer [Massenanteile]</b>						D1137 / 1	
Analysis of test piece Al, Vacuum Emission Spectrometer [Mass portions]							
	[ % ]	min	max	[ % ]	min	max	
Si	11,230			Ti	0,099	Pb	0,003
Fe	0,084			Zn	0,005	Sn	0,018
Mg	0,005			B	<0,0001	V	0,012
Cu	0,007			Ca	0,0002	Zr	0,127
Mn	0,485			Co	0,005	Al	87,908
Ni	0,011			Cr	<0,001		

Anzahl Number	Gegenstand Object	Abmessungen Dimensions	Schmelze Heat-No.	Projekt-Nr. Project-Nr.	Proben-Nr. Testpiece-No.	Id.-Nr. Id.-No.	
1	Alu-Blech	D x B x L [mm] 2,4 x 75 x 80	-	122084	Bauteil 3	D1138 / 1	
Hersteller Manufact.			Lieferzustand gem. Hersteller Delivery condition acc. to manufacturer				
o. A. / not mentioned			o. A. / not mentioned				
Bemerkungen: Remarks:							
<b>Stückanalyse Al, Vakuum-Emissionsspektrometer [Massenanteile]</b>						D1138 / 1	
Analysis of test piece Al, Vacuum Emission Spectrometer [Mass portions]							
	[ % ]	min	max	[ % ]	min	max	
Si	11,380			Ti	0,096	Pb	0,003
Fe	0,085			Zn	0,005	Sn	0,018
Mg	0,005			B	<0,0001	V	0,012
Cu	0,006			Ca	0,0002	Zr	0,127
Mn	0,482			Co	0,005	Al	87,763
Ni	0,011			Cr	<0,001		

**Die ermittelten Kennwerte sind informativ.**

The determined values are informative

Mülheim/Ruhr, den 02.05.2013



Results refer to given identification in extracts without further approval of GLP

*Unger*  
Unger  
Prüfingenieurin

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2010)

Nr.	Titel
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünobleche aus Stahl, 2010
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbieren aus textil-verstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013

- 251 Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
- 252 Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
- 253 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
- 254 Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
- 255 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
- 256 Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
- 257 Ableitung eines messbaren Klimaausmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
- 258 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
- 259 Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
- 260 Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
- 261 Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013
- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PMW-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
- 273 UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
- 274 Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
- 275 Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
- 276 Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
- 277 Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2015

**VDA**

Verband der  
Automobilindustrie

**FAT**

Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik

Behrenstraße 35  
10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
[www.vda-fat.de](http://www.vda-fat.de)