

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20258 N

Thema

Implementierung und Kalibrierung eines orthotropen Versagenskriteriums für PET in die integrative Simulation des zweistufigen Streckblasprozesses

Berichtszeitraum

11/2018 bis 10/2020

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V.

Aachen,

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

KURZZUSAMMENFASSUNG

Im zweistufigen Streckblasprozess werden etwa 70 % der Produktionskosten von Kunststoffflaschen für das zu verarbeitende Material aufgewendet. Daher sind die Unternehmen der Streckblasbranche bestrebt, die Gesamtkosten zur Flaschenherstellung über einen reduzierten Materialeinsatz zu senken. Der Schlüsselfaktor liegt in der Auslegung des Preforms und der Bestimmung der dazugehörigen Verarbeitungseinstellungen. Die Preform- und Prozessauslegung wird in der Industrie zunehmend durch Simulationswerkzeuge unterstützt, sodass Entwicklungszeiten und -kosten reduziert werden können. Für die effiziente Auslegung der Preforms bis in den Grenzbereich der Materialien sind Kenntnisse des Materialverhaltens bis zum Materialversagen notwendig.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war daher die Kalibrierung und Implementierung eines Versagenskriteriums in die integrative Simulation des zweistufigen Streckblasprozesses zur Vorhersage eines möglichen Materialversagens bei der Verarbeitung leichter Preforms. Die Basis für die Vorhersage möglichen Materialversagens bildet ein Materialmodell, welches bis zum Bereich des Versagens kalibriert wurde. Dazu wurde ein Membran-Inflations-Rheometer modifiziert, sodass dehnreologischen Materialdaten von Polyethylenterephthalat-Folien (PET) unter biaxialer Dehnung mit variierenden Verstreckgeschwindigkeiten in einem weiten Temperaturbereich bis zum Materialversagen ermittelt werden können. Mit diesen Messdaten wurde ein temperatur- und dehnratenabhängiges Yeoh-Modell zur Beschreibung des Materialverhaltens für die Umformsimulation kalibriert. Das Versagensmodell ist temperatur- und dehnratenabhängig und beschreibt die Dehnung und Spannung im Versagenszustand. Als Materialversagen wurde der sogenannte Weißbruch definiert, d. h. die bei hoch verstreckten teilkristallinen Kunststoffen auftretende Weißfärbung. Weiterhin wurde auch das Materialversagen beschrieben, bei dem ein Bruch des Materials auftritt. Das Versagensmodell wurde mit den mittels Membran-Inflations-Rheometer ermittelten Materialdaten kalibriert. Die Validierung erfolgt qualitativ im Streckblasprozess. Im kalibrierten Bereich des Materialmodells kann die Prozesssimulation den Streckblasprozess sehr gut abbilden und sowohl Weißbruch als auch Materialbruch vorhersagen. Damit bietet die Simulation ein wichtiges Werkzeug für die Auslegung leichter Preforms bei extremen Verstreckgraden knapp unterhalb der Versagensgrenze.

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens sind ein Maximaldehnungs- und Maximalspannungsversagenskriterium für PET im Streckblasprozess und deren Bewertung. Neben diesem direkten Ergebnis wurde ein Erkenntnisgewinn im Bereich der hohen Verstreckung von PET angestrebt, der dazu genutzt werden kann, bei sehr leichten Preforms weiter Material einzusparen.

VORWORT UND DANK

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 20258 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Nils Dauber, M.Sc., erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von studentischen Arbeiten niedergelegt. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden. Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWi und der AiF-Mitgliedsvereinigung „Kunststoffverarbeitung“ gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Materialien, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe „Blasformen“ sowie den Teilnehmern der projektbegleitenden Ausschüsse, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

1	ZUSAMMENFASSUNG	1
2	EINLEITUNG	3
3	STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG	5
4	ERMITTLUNG DES DEHNRHEOLOGISCHEN VERHALTENS	8
4.1	Membran-Inflations-Rheometer	8
4.2	Herstellung der Folienproben für die dehnrheologische Untersuchung.....	12
4.3	Dehnrheologische Messung mittels MIR.....	13
4.4	Entwicklung des Materialmodells.....	14
4.5	Entwicklung und Kalibrierung der Versagenskriterien	17
5	AUFBAU UND VALIDIERUNG DER SIMULATIONSROUTINE	22
5.1	Aufbau der Simulationsroutine.....	22
5.2	Validierung der Simulationsroutine	23
6	FAZIT UND AUSBLICK	28
7	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	30
7.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	30
7.2	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes.....	33
8	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU	34
8.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	34
8.2	Wirtschaftlicher Nutzen.....	34
9	ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN.....	36
9.1	Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal	36
9.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	36
10	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	37
10.1	Abkürzungen	37
10.2	Formelzeichen.....	37
10.3	Indizes.....	37
11	LITERATUR.....	38
12	ANHANG.....	41
12.1	Liste der Veröffentlichungen.....	41
12.2	Liste der studentischen Arbeiten	41

1 ZUSAMMENFASSUNG

Im zweistufigen Streckblasprozess werden etwa 70 % der Produktionskosten von Kunststoffflaschen für das zu verarbeitende Material aufgewendet. Daher sind die Unternehmen der Streckblasbranche bestrebt, die Gesamtkosten zur Flaschenherstellung über einen reduzierten Materialeinsatz zu senken. Der Schlüsselfaktor liegt in der Auslegung des Preforms und der Bestimmung der dazugehörigen Verarbeitungseinstellungen. Die Preform- und Prozessauslegung wird in der Industrie zunehmend durch Simulationswerkzeuge unterstützt, sodass Entwicklungszeiten und -kosten reduziert werden können. Für die Auslegung leichter Preforms sind die gängigen Simulationen jedoch nur bedingt geeignet, da im Bereich hoher Dehnraten ($> 50 \text{ s}^{-1}$) und Verstreckgrade (> 5) weder das dehnraten- und temperaturabhängige Materialmodell noch das Materialversagen akkurat modelliert werden können [NMY16].

Die Grundlage für eine aussagekräftige Simulation ist ein Materialmodell im prozessnahen Parameterbereich. Einen neuartigen Lösungsansatz dafür lieferte die prozessnahe Kalibrierung des Materialmodells. Das Membran-Inflations-Rheometer kann die Bedingungen im Streckblasformen kontrolliert nachbilden, in dem eine Folie in isothermer Umgebung biaxial bis zum Materialversagen verstreckt wird. Eine konventionelle Kalibrierung durch Zugversuche bei uniaxialer Dehnung bildet den Prozess nur unzureichend ab, da die biaxiale Beanspruchung das Materialverhalten stark beeinflusst. Die mit einem Membran-Inflations-Rheometer ermittelten Messdaten dienen dazu, ein Materialmodell für die Prozesssimulation zu kalibrieren. Damit kann das Materialverhalten bei prozessnahen Dehnraten zwischen 1 s^{-1} und 100 s^{-1} und Temperaturen zwischen 95 °C und 105 °C bis zum Versagen beschrieben werden.

Ein weiterer wichtiger Beitrag des Forschungsvorhabens ist die erstmalige Quantifizierung der Belastungsgrenzen im Streckblasprozess bei gängigen Prozesstemperaturen und Dehnraten. Als Materialversagen wurde nicht nur der Materialbruch, sondern auch der sogenannte Weißbruch definiert, d. h. die bei hoch verstreckten teilkristallinen Kunststoffen auftretende Weißfärbung vor dem Materialbruch. Mit diesen Kenntnissen wurden zwei Versagenskriterien entwickelt und kalibriert.

Das angepasste Materialmodell wurde zusammen mit den Versagensmodellen in die Streckblassignulation implementiert. Die Streckblassignulationsroutine wurde in der Software Abaqus von Dassault Systèmes, S.A., Vélizy-Villacoublay, Frankreich, umgesetzt. Diese Simulationssoftware bietet die Möglichkeit, über in Fortran programmierten Subroutinen Materialmodelle beliebig zu konfigurieren und zusätzliche Bedingungen wie Versagensmodelle hinzuzufügen.

Das Ergebnis der Streckblassimulation sind dreidimensionale Darstellungen der ausgeformten Flaschengeometrie mit Informationen über Wanddicke, Verstreckgrade, Temperaturen auch dem Versagenszustand. Bei gleichen Prozessparametern auf der Laborstreckblasanlage hergestellte PET Flaschen wurden zur Validierung mit den Simulationsergebnissen verglichen. Im kalibrierten Bereich des Materialmodells kann die Prozesssimulation den Streckblasprozess sehr gut abbilden und sowohl Weißbruch als auch Materialbruch vorhersagen. Damit bietet die Simulation ein wichtiges Werkzeug für die Auslegung leichter Preforms bei hohen Verstreckgraden knapp unterhalb der Versagensgrenze.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

2 EINLEITUNG

Der zweistufige Streckblasprozess ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung von qualitativ hochwertigen Kunststoffhohlkörpern mit hervorragenden mechanischen und optischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringem Materialeinsatz [THG19]. Als Material wird fast ausschließlich PET verwendet, da sich die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften von PET für den Streckblasprozess sowie das Produktsortiment besonders gut eignen. Etwa 7,7 % des europäischen Kunststoffbedarfs im Jahre 2018, das heißt knapp 4 M t, sind auf PET zurückzuführen [URL20]. Etwa 81 % der hergestellten Menge an PET-Verpackungen wird in der Getränkeindustrie verwendet, aber auch der Marktanteil an Lebensmittelverpackungen und non-food-Erzeugnisse wie Kosmetika, Öle und Reinigungsmittel wächst stetig an. In Deutschland wird die Marktmenge für PET Einwegflaschen im Jahre 2015 auf 480 000 t geschätzt [KD17]. Über die Realisierung geringerer Wanddicken und höherer Verstreckgrade ist die Industrie bestrebt, die Materialeffizienz dieser Produkte stetig zu optimieren, da die Gesamtproduktionskosten streckblasgeformter PET Flaschen zu ca. 70 % durch die Aufwendungen für das Material bestimmt wird [For09]. In Folge der stetigen Optimierung der gesamten Prozesskette des Streckblasformens konnte im Verlauf der letzten zehn Jahre bereits eine drastische Reduktion der mittleren Flaschengewichte erreicht werden [For09]. Im Segment der 1,5 l PET-Flasche für kohlensäurehaltige Softgetränke wurde das mittlere Flaschengewicht zwischen den Jahren 2000 und 2012 im Flaschenkörper um 45 % reduziert. So haben PET Flaschen im Vergleich zu konventionellen Glasflaschen eine deutlich bessere Ökobilanz. Das hohe Gewicht der Glasflasche (ca. 650 g bei einer Füllmenge von einem Liter) führt zu höheren Energieverbräuchen in Produktion, Transport und Logistik sowie zur aufwendigeren Reinigung des Leerguts. Im Vergleich dazu bietet die um etwa 600 g leichtere PET-Flasche erhebliche Vorteile [DBA04].

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen Preform und Produkt haben sich in der Streckblasindustrie seit einigen Jahren Simulationswerkzeuge zur Auslegung von Preform- und Werkzeuggeometrie etabliert [RRD04]. In der Industrie werden dazu überwiegend heuristische Verfahren eingesetzt [Cor14]. Wogegen in der Forschung überwiegend Prozesssimulationen entwickelt werden, welche die Wanddickenverteilungen auf Basis physikalischer Modelle berechnen. Materialversagen wird jedoch bisher weder in heuristischen noch in physikalischen Simulationsmodellen berücksichtigt. Eine Vorhersage der Versagensgrenze bei der Umformung ist jedoch notwendig, um die Materialeigenschaften bis zur Versagensgrenze beim Verstrecken maximal ausreizen zu können.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erweiterung der Simulation des zweistufigen Streckblasprozesses, um verschiedene Versagenskriterien für PET und deren Bewertung. Mit

der erweiterten Simulation des zweistufigen Streckblasprozesses wird eine materialeffiziente Entwicklung von Hohlkörpern mit Wanddicken knapp unterhalb der Versagensgrenze ermöglicht.

Im vorliegenden Bericht werden die wesentlichen Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, zusammengefasst. Kapitel 3 beschreibt den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Prozesssimulation des Streckblasprozesses und die Möglichkeiten der verschiedenen Versagensmodelle. Die Modifizierung der Messtechnik für die Materialdatenermittlung sowie die Modellbildung und Kalibrierung ist in Kapitel 4 dokumentiert. Im Anschluss werden die Entwicklung und Implementierung des Materialmodells und der Versagensmodelle in die Simulation des Streckblasprozesses dargestellt.

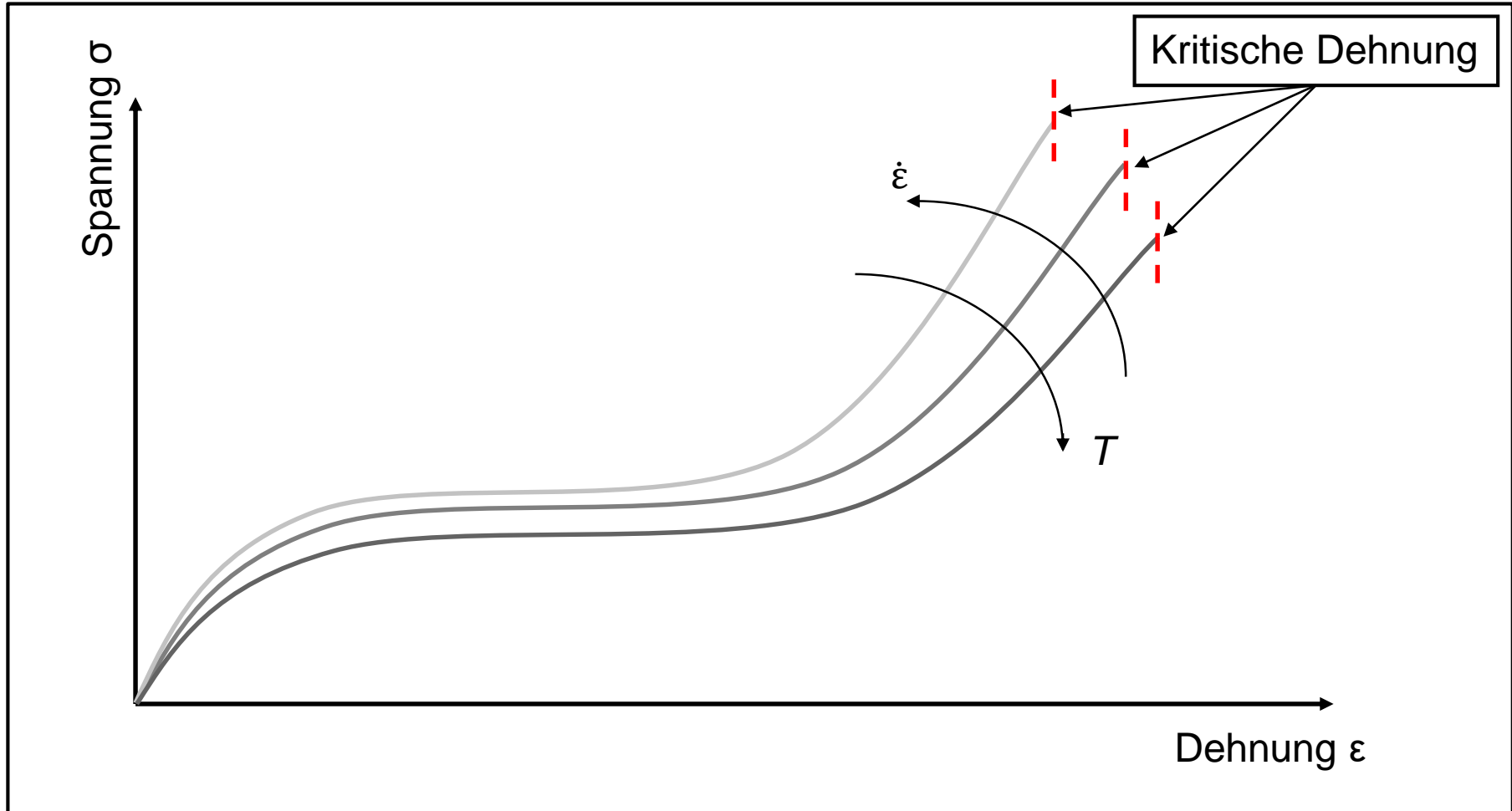
3 STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Das angestrebte Vorhaben umfasst die Kalibrierung und Validierung eines orthotropen Versagenskriteriums und dessen Implementierung in eine Simulation des zweistufigen Streckblasprozesses. Dazu wird im Folgenden der Stand der Forschung in den Bereichen orthotrope Versagenskriterien und Prozesssimulationen im Streckblasformen dargestellt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird der im Streckblasprozess nahezu ausschließlich verwendete Werkstoff PET betrachtet, ein thermoplastischer Kunststoff aus der Familie der Polyester. Im Streckblasprozess wird das Material durch eine Reckstange verformt und unter Druck aufgeblasen. Bei der Verstreckung von PET im Streckblasformen sind vor allem die Belastungsgeschwindigkeit [HK15, SWM+13], Belastungshöhe [BFT+13] und die Temperatur [ZLR15] entscheidende Einflussfaktoren auf das mechanische Werkstoffverhalten [Jab84]. Im Allgemeinen sind weitere Einflussfaktoren beispielsweise Eigenspannungen, Bindenähte [HH12] sowie Medieneinflüsse und Alterung [AKB+14], diese sollen hier jedoch nicht betrachtet werden.

Bei der Verstreckung von PET nehmen Festigkeit und Steifigkeit mit steigender Dehnrate zu. Dieser Vorgang wird als Dehnverfestigung bezeichnet. Ursache dafür ist der molekulare Aufbau von Polymerwerkstoffen [CJ93]. Diese bestehen aus linearen oder verzweigten Molekülketten. Bei geringen Verformungsgeschwindigkeiten können die Molekülketten der Belastung folgen, und es kommt zu einem Abgleiten der Ketten aneinander. Mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit können die einzelnen Ketten der Verformung nicht mehr folgen, was zu einem Steifigkeits- und Festigkeitsanstieg bei gleichzeitig geringerer Gesamtverformung führt. Die Dehnverfestigung und der Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ und Temperatur T auf das mechanische Werkstoffverhalten sind in den Spannungs-Dehnungskurven in Bild 3.1 zu sehen. Wird bei höheren Verstreckgraden eine kritische Dehnung überschritten, kommt es zum Riss der Ketten und damit zum Versagen des Materials. Zur Vorhersage der Spannungs-Dehnungskurven existieren für Thermoplasten verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden. Die größte Vorhersagegenauigkeit für PET im Streckblasformen erzielt derzeit das viskohyperelastische Glass-Rubber-Modell nach *Buckley* [BJ95, BJJ96], mit einer Erweiterung nach *Adams et al.* [ABJ00], das gezielt für die Materialmodellierung von PET im Streckblasprozess entwickelt wurde. Der Fokus des Vorhabens lag jedoch auf einem Versagenskriterium zur Vorhersage der Dehnungsgrenzen, das für PET unter den im Streckblasprozess herrschenden Bedingungen derzeit nicht existiert. Die Herausforderungen liegen im Bereich der Messtechnik zur Kalibrierung des Modells. So ist zur Ermittlung der Koeffizienten eine Messvorrichtung nötig, die bei äquibiaxialer Dehnung mit konstanter Belastungsgeschwindigkeiten in isothermer

Schematisches Spannungs-Dehnungs-diagramm in Abhängigkeit der Temperatur und der Dehnrates



Umgebung das Material bis zum Riss belasten und zu diesem Zeitpunkt die lokale Dehnung und Spannung erfassen kann.

Versagenskriterien

In der Literatur existieren diverse Ansätze zur Versagensmodellierung von Faserverbundkunststoffen. Im Rahmen Vorhabens sind die so genannte Pauschalkriterien interessant, bei denen eine rein phänomenologische Betrachtung der Werkstoffe erfolgt [FBD05, GTR10, ZM05]. Andere Modelle für Faserverbundkunststoffe berücksichtigen das mikromechanische Versagens- oder Schädigungsverhalten wie beispielsweise Delamination auf Faser/Matrix-Ebene. Diese Vorgänge treten bei PET nicht auf, daher wird diese Klasse von Kriterien nicht weiter betrachtet. Unter den Pauschalkriterien wird in der Literatur weiter zwischen zwei Typen unterschieden [AAK04, KS03, Sta99]. Das sind einerseits die sogenannten linearen Kriterien, bei denen keine Interaktionen der wirkenden Spannungen in eine jeweilige Richtung untereinander berücksichtigen werden, und andererseits die sogenannten quadratischen Kriterien, welche diese Interaktionen berücksichtigen. Die einfachste mögliche Variante der Pauschalkriterien ist ein lineares maximales Dehnungskriterium, das für jede Richtung separat über Zug- und Druckbelastung kalibriert wird [KS03]. Im Falle des Streckblasformens erfolgt eine reine äquibiaxiale Dehnung, also eine Zugbelastung aus zwei Richtungen und keine Druckbelastung. Eine Interaktion der Spannungen in verschiedenen Richtungen wird in quadratischen Kriterien berücksichtigt. Diese gehen im Wesentlichen auf *Hill* [Hil50] zurück. Bei reiner biaxialer Dehnung tritt Versagen nach dem ursprünglichen Hill-Kriterium mit zwei Spannungsrichtungen unter der Annahme ein, dass keine Schubspannungen auftreten, wenn Gl. 3.1 erfüllt ist.

$$H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 = 1 \quad (\text{Gl. 3.1})$$

H beschreibt den Materialkoeffizienten, σ_{11} die Spannung in die eine Raumrichtung und σ_{22} die Spannung in andere Raumrichtung. Im äquibiaxialen Spannungszustand führt dieses Kriterium niemals zum Versagen, da sich beide Spannungen auslöschen und Gl. 3.1 den Wert 0 annimmt. Dieses Problem wird durch eine Erweiterung, dem Caddell-Raghava-Atkins-Modell gelöst [CRA73], das im äquibiaxialen Spannungszustand die Form gemäß Gl. 3.2 annimmt.

$$H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + I\sigma_{11} + J\sigma_{22} = 1 \quad (\text{Gl. 3.2})$$

I und J beschreiben weitere Materialkoeffizienten. Weiterhin ist das komplexere Tsai-Wu-Kriterium (Gl. 3.3) potenziell geeignet [TW71], das mit 5 Materialkoeffizienten kalibriert werden muss.

$$I\sigma_{11} + J\sigma_{22} + K\sigma_{11} + L\sigma_{22} + 2M\sigma_{11}\sigma_{22} = 1 \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Die Anforderungen an das Messverfahren zur Ermittlung der Materialkoeffizienten sind eine äquibiaxiale Dehnung des Materials mit verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Temperaturen und eine Belastung der Probe bis zum Materialversagen, wobei die lokale Dehnung und Spannung zu diesem Zeitpunkt erfasst werden muss. In [MTT+05] wurde gezeigt, dass die Ermittlung des biaxialen Dehnverhaltens und folglich auch des Versagens für die simulative Abbildung des Streckblasprozesses unerlässlich ist.

Simulation des Streckblasprozesses

Die Simulation des Streckblasprozesses sollte im Rahmen des Forschungsvorhabens mit einer am IKV entwickelten Routine erfolgen [DH99, Har97, Mic03, Pap05]. Eine grundsätzliche Überarbeitung dieser Routine war im Rahmen des Vorhabens jedoch nicht vorgesehen, da der Fokus auf der Entwicklung und Implementierung des Versagenskriteriums lag.

Im Allgemeinen kann die Simulation des Streckblasprozesses sowohl in kommerziellen Softwarepaketen als auch in universellen FEM-Codes oder Programmen umgesetzt werden. In der Industrie werden meist kommerzielle Blasformsimulationen wie B-SIM von Accuform (Zlin-Stipa, SRO, Tschechien), BlowView von Pace Simulations Inc. (Boucherville, Kanada) und Simblow von Cybernet Systems Co., Ltd. (Tokio, Japan) eingesetzt. Vergleichende Untersuchungen der Leistungsfähigkeit der Softwarepakete B-SIM und BlowView zeigen zufriedenstellende Übereinstimmungen mit experimentellen Untersuchungen [EMS07]. In der Forschung werden jedoch überwiegend eigene FEM-Codes oder Multi-Purpose-FEM-Codes eingesetzt, wie Abaqus von Dassault Systèmes, S.A., Vélizy-Villacoublay, Frankreich. Der Vorteil dieser Codes gegenüber einer kommerziellen Blasformsimulationssoftware sind die flexiblere Modellierung des Streckblasprozesses und die Möglichkeit zur Implementierung neuer Materialmodelle oder eines Versagenskriteriums. Die numerische Simulation des Streckblasprozesses wurde von verschiedenen Forschergruppen untersucht und weiterentwickelt, wie beispielsweise an der TU Dortmund oder der Queens University in Belfast [SMA10, Zim15]. Am IKV wurde eine durchgängige Simulationskette des zweistufigen Streckblasprozesses bestehend aus Aufheiz- und Umformsimulation entwickelt [DH99, Har97, Mic03, Pap05]. Die resultierende Wanddickenverteilung der Simulationskette ist validiert und ausreichend genau. Weiter bietet Abaqus die Möglichkeit, Versagenskriterien zu implementieren.

4 ERMITTLUNG DES DEHNRHEOLOGISCHEN VERHALTENS

Um die Entwicklung von PET Verpackungsprodukten mit immer geringeren Wanddicken und reduziertem Materialeinsatz im Streckblasprozess zu ermöglichen, ist es notwendig, genaue Kenntnisse über das Materialverhalten im hochverstreckten Zustand zu haben.

4.1 Membran-Inflations-Rheometer

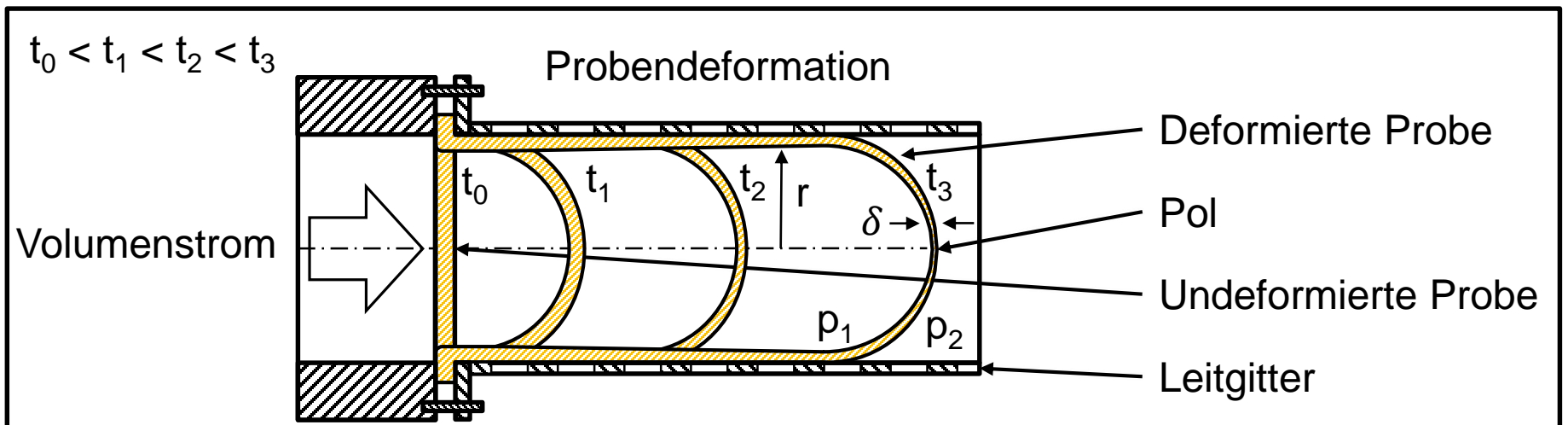
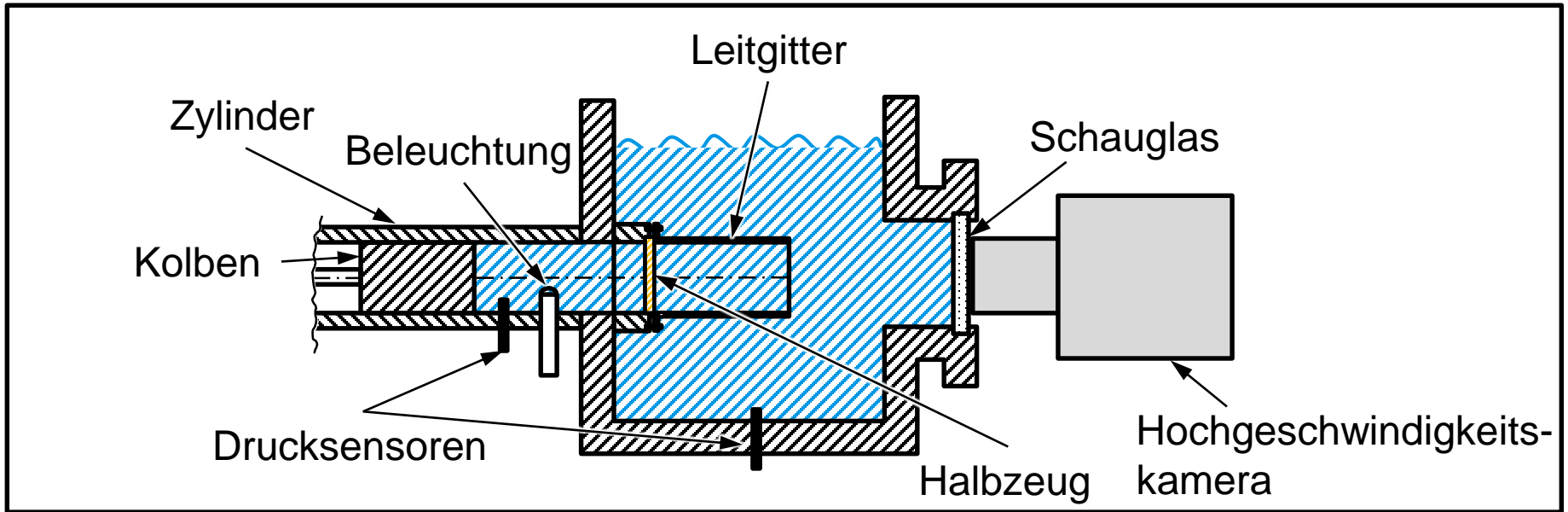
Um äquibiaxiale Dehnungen bei hohen Dehnraten und hohen Verstreckgraden zu erreichen, wurde ein Membrane-Inflation Rheometer konstruktiv weiterentwickelt, welches in Bild 4.1 schematisch dargestellt ist. Ein dünnes, kreisförmiges Halbzeug (Folie) wird in der Probenkammer gegen einen Zylinder abgedichtet. Zylinder sowie Probenkammer sind mit Silikonöl gefüllt und können bis 200 °C temperiert werden. Das Öl wird mit einem elektromechanisch gesteuerten Kolben aus dem Zylinder verdrängt, sodass das Halbzeug in die Probenkammer hinein umgeformt wird. Dieser Prozess ist unten in Bild 4.1 schematisch gezeigt. Damit sich das Halbzeug mit einer definierten Dünnstelle δ ausformt, begrenzt ein Leitgitter die Dehnung in Umfangsrichtung. Das Leitgitter soll außerdem ein Nachrutschen des Materials in Umformrichtung verhindern. Das Halbzeug ist mit einem Punktmuster versehen und wird von hinten durch den Zylinder beleuchtet. Durch die Aufnahme der Umformung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und Auswertung der Punktmusterverschiebung kann die Dehnung ermittelt werden. Je ein piezoresistiver Drucksensor im Zylinder und in der Probenkammer liefern Messdaten, um die Spannung im Pol des Halbzeuges zu berechnen. Durch diese Messanordnung sind Spannungs-Dehnungs-Kurven bis zum Versagen bestimmbar. Die Spannung im Pol, anhand der die Spannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt werden, wird durch den Innendruck in der Probe berechnet. Dies kann durch eine Gleichgewichtsbedingung (Gl. 4.1) gelöst werden. Die Spannung σ wirkt auf die Kreisringfläche, der Druck p auf die Kreisfläche (siehe Bild 4.1). Daraus ergibt sich die sogenannte Kesselformel (Gl. 4.2), mit der Spannung am Flächenelement angegeben werden können [Glo92].

$$\sum F_z = 0: \sigma \cdot 2\pi \cdot r \cdot \delta - p \cdot \pi \cdot r^2 = 0 \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$$\text{Kesselformel: } \sigma = \frac{pr}{2\delta} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Dabei bezeichnet r [m] den Radius der Halbkugel (hier gleich dem Radius des Leitgitters), δ [m] die Dicke der Halbkugel im Pol, p [Pa] den Innendruck in der Halbkugel und σ [Pa] die mechanische Spannung. Die Dicke δ während der Verstreckung ergibt sich aus der Ausgangsdicke δ_0 und dem Verstreckgrad λ (Gl. 4.3) unter der Annahme, dass das Volumen

Schematischer Aufbau des Membran-Inflations-Rheometers



der Probe konstant bleibt. So lässt sich die Spannung im Pol mit Gleichung 4.4 ermitteln. Δp [Pa] ist die Druckdifferenz zwischen p_1 und p_2 (vgl. Bild 4.1)

$$\delta = \frac{\delta_0}{\lambda^2} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

$$\sigma = \frac{\Delta p \cdot \lambda^2 \cdot r}{2 \cdot \delta_0} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

Antriebs- und Prüfkammermodifikation

Im ersten Arbeitspaket wurde das am IKV entwickelte Membran-Inflations-Rheometer [Det01] zur Kalibrierung des Materialmodells und des Versagensmodells modifiziert. Ziel der Modifikation war es, das dehnreologische Verhalten von PET Folien unter prozessnahen Bedingungen zu ermöglichen. Typische Temperaturen für das Steckblasformen von PET liegen im Bereich von 95 - 115 °C [THG19]. Dieser Temperaturbereich kann bereits im Membran-Inflations-Rheometer abgebildet werden. Die Dehnrates, die Geschwindigkeit, mit der die Probe verstreckt wird, liegt bei dem nicht modifizierten Membran-Inflations-Rheometer bei maximal 6 s⁻¹ [Det01]. Im Steckblasformen werden die Preforms mit deutlich höheren Dehnrates von über 20 s⁻¹ verstreckt. Daher wurde der vorhandene druckluftbasierte Antrieb durch einen Linearantrieb ersetzt, mit dem hohe Kolbengeschwindigkeiten realisiert werden können. Ein Antriebssystem der Firma Festo, Esslingen am Neckar, wurde beschafft und in das Antriebssystem integriert. Zusätzlich wurde ein Leitgitter mit verringertem Durchmesser additiv durch das Selective Laser Melting Verfahren (SLM) gefertigt. Mit dem neuen Antrieb und mit der Reduktion des Durchmessers des Leitgitters von 54 mm auf 27 mm können Dehnrates von bis zu 100 s⁻¹ realisiert werden.

Anpassung der Belichtungsstrategie zur optischen Erfassung der Probendeformation

Aufgrund der gesteigerten Dehnrates kommt es jedoch bei den Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen zur Dehnungserfassung zu technischen Herausforderungen. Stand der Technik zur Auswertung der Dehnverformung ist ein Kamerasystem mit maximal 211 fps [Hop19]. Für die Auswertung der Probenverformung wird nun eine vierfach höhere Bildwiederholrate benötigt und dementsprechend eine vierfach stärkere Beleuchtung der Probe. Zusätzlich führt die Verringerung des Leitgitterdurchmessers dazu, dass weniger Licht bei einer seitlichen oder frontalen Beleuchtung auf die Probe trifft und starke Schattierungen auf der Probe auftreten. Besonders bei der digitalen Bildauswertung behindern die Schattierungen das Detektieren des Punktmusters auf der Probe. Daher wurde ein neuartiges Beleuchtungskonzept entwickelt, bei dem die Probe von der Rückseite angestrahlt wird. Vorteile dieser Methode ist, dass eine deutlich höhere Lichtausbeute vorhanden ist und

somit Kameraaufnahmen von bis zu 1000 fps realisierbar sind. Auf diese Weise lassen sich Versuchspunkte mit Dehnraten bis zu 100 s^{-1} auswerten. Die gleichmäßige Ausleuchtung der Probe vereinfacht die digitale Auswertung erheblich. Der Nachteil des neuartigen Beleuchtungskonzept ist jedoch, dass nur transparente Materialien geprüft werden können. Da PET für die Versuche verwendet wurde, ist die Messung uneingeschränkt möglich. Zusätzlich ermöglicht das Beleuchtungskonzept den Nachweis des Weißbruches. Die amorphe Matrix zwischen den kristallinen Bereichen wird soweit verstreckt, dass intramolekulare Fehlstellen entstehen. An diesen Fehlstellen bricht das einfallende Licht und die Transluzenz des Kunststoffes nimmt ab. Mit fallender Transluzenz kommt es zu einer Helligkeitsabnahme der Aufnahme und eine Detektion des Weißbruches ist möglich. Die Weißbrucherkenntnis ist besonders wichtig für die industrielle Anwendung, da das Auftreten von Weißbruch zu optischen Mängeln am Produkt führt und daher ein Ausschusskriterium darstellt.

Modifikation der Probenmarkierung

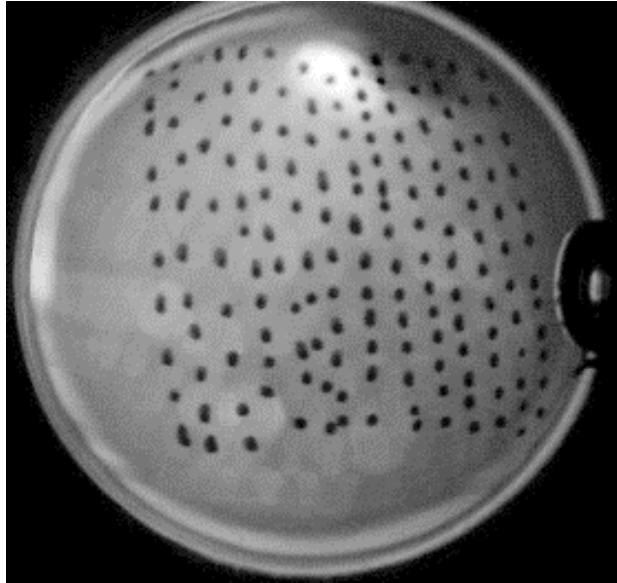
Um die Aufnahmen mittels numerischer Datenanalyse auszuwerten, müssen sich verfolgbare Markierungen auf den Proben befinden. In Vorversuchen wurden die Proben mit rotem Nagellack markiert. Hierzu wurde eine Stempelmaschine verwendet, die die Farbe über ein Klischee und einen Stempel auf die Proben überträgt. Da die Markierungen zusammen mit dem Probenmaterial verstreckt werden, nehmen sie bei hohen Verstreckgraden an Größe und Transparenz zu. Dadurch können von der Analysensoftware (im nächsten Abschnitt genauer beschrieben) keine Markierungen mehr detektiert werden. Da die Markierungen mittels der Analysensoftware fortlaufend verfolgt werden können, benötigen sie keine definierten oder regelmäßigen Abstände. So entstand der Versuch, die Proben mittels Sprühfarbe mit einem Speckle-Muster zu versehen. Jedoch wird auch diese Markierung mit zunehmendem Verstreckgrad nahezu vollständig transparent. Zuletzt wurden Markierungen mit handelsüblichen Folien- und Lackstiften per Hand vorgenommen. Markierungen mit den Farbstiften FaberCastell Multimark 1513 permanent (schwarz) sowie Staedtler Lumocolor permanent (schwarz) sind ebenfalls bei hohen Verstreckgraden nicht mehr ermittelbar. Lediglich Markierungen, erzeugt mit edding Lackmarker 780 (schwarz), sind bis zum Versagen der Probe ausreichend gut mit der Analysensoftware detektier- und verfolgbar.

Erstellung der digitalen Auswertung

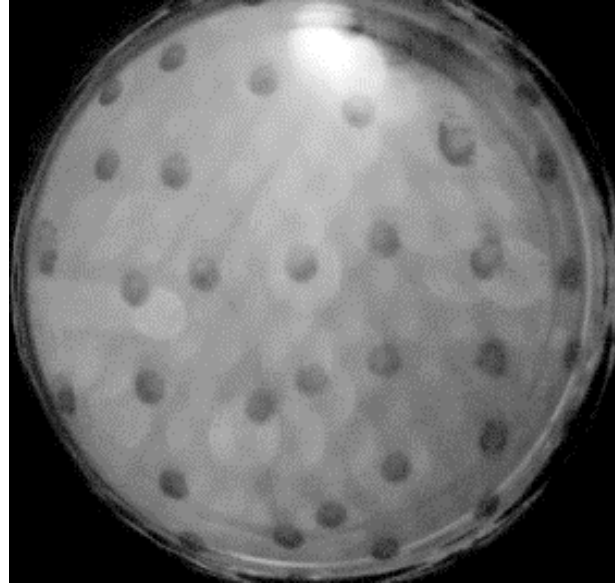
Die Datenanalyse der Bild- und Druckdaten für die Auswertung der mittels Membran-Inflations-Rheometer bestimmten dehnreologischen Messdaten erfolgte mittels MATLAB R2020a der Firma MathWorks, Inc., Natick, USA. Hierzu werden die entsprechenden Dateien in das Programm geladen und spezifische Werte der Messung wie Bildwiederholrate der Bildaufnahme (fps), Probendurchmesser, Probendicke und Frequenz der Druckaufnahme eingetragen.

Der Pol, in Bild 4.1 gezeigt, stellt die Dünnstelle der Folie dar, an der ein Probenversagen stattfindet. Die Dehnung muss folglich möglichst nah am Pol ermittelt werden. Damit die Analysensoftware eine möglichst realitätsnahe Dehnrate und Dehnung erfassen kann, müssen sich die verfolgten Punkte über den gesamten Verstreckprozess möglichst im Pol der Probe befinden. In Bild 4.2 sind die im MIR erfassten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vor und während der Verformung und zum Versagenszeitpunkt dargestellt. Punkte, die aus dem Bildbereich wandern, sind ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr detektierbar. Dadurch werden die ermittelte Dehnrate und Dehnung kleiner als in der Realität. Um die Verwertbarkeit der Aufnahmen zu beurteilen, wurde das Punktmuster im Bild, in dem der Weißbruch eintritt, manuell bewertet. Sind mindestens zwei Punkte im Zentrum der Probe zu erkennen, wird die Aufnahme als ausreichend bewertet. Ist nur noch ein Punkt oder kein Punkt erkennbar, wird die Aufnahme verworfen. Diese Bewertung kann unmittelbar nach der Aufnahme erfolgen, sodass ein Versuchspunkt im Zweifelsfall direkt wiederholt werden kann. Die Datenanalyse der Bild- und Druckdaten erfolgte mittels MATLAB. Zunächst wurde der Bereich der Bilddateien detektiert, in dem sich die Informationen über die Aufnahme befinden. Dieser Bereich wurde für die weitere Analyse entfernt, da er die Punktdetektion beeinflussen kann. Anschließend wurde die Helligkeit aller Bilder ermittelt. Die Helligkeit durchläuft bei jeder Aufnahme ein ähnliches Profil. Sinkt sie unter 90 % der Anfangshelligkeit, wird diese Aufnahme als Weißbruch gewertet. Das Bild im Augenblick des Bruchs wird durch die minimale Helligkeit definiert, da die Helligkeit durch den einsetzenden Weißbruch abnimmt. Nach diesem Bild steigt die Helligkeit infolge des Materialversagens schlagartig an, wodurch der Bruch charakterisiert wird. Die zwei ermittelten Bilder für Weißbruch und Bruch werden ausgegeben und können noch einmal manuell überprüft werden. Sollten sie falsch detektiert worden sein, besteht nun die Möglichkeit, die Versagenszeitpunkte manuell einzutragen. Durch die sinkende Helligkeit beim Weißbruch nimmt der Kontrast zwischen Punkt und Probe ab. Daher wird die Erkennung der Punkte beeinträchtigt. Zur Vergleichbarkeit werden die Aufnahmen folglich nur bis zum Weißbruch ausgewertet. Nun werden für alle Bilder zwischen Start und Weißbruch die Punktpositionen detektiert. Zunächst werden die Punkte durch Binarisierung der Graustufen ermittelt. Anschließend werden diesen detektierten Bereichen verschiedene Attribute wie Schwerpunkt, Durchmesser, Fläche und Position durch x- und y-Werte der Pixel zugewiesen. Anhand von Durchmesser und Fläche wird entschieden, ob es sich bei einem Bereich um einen einzelnen Punkt oder um eine Ansammlung von mindestens zwei Punkten handelt, die separiert werden müssen. Um die Punkte zu verfolgen wird die Verschiebung vom letzten zum aktuellen Bild angewendet. Anhand dieses Wertes wird prognostiziert, wohin sich die Punkte im nächsten Bild verschoben haben werden. Für jede dieser prognostizierten Stellen wird der jeweils nächste Punkt im folgenden Bild ermittelt. Dadurch ergeben sich die korrespondierenden Punkte zwischen aktuellem und folgendem Bild. Ist der nächste Punkt zu einer prognostizierten Stelle

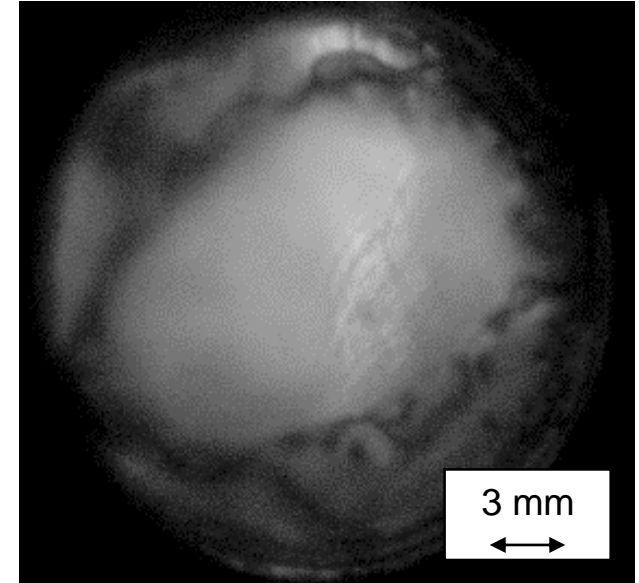
Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Probenverformung im Membran-Inflations-Rheometer



Vor der Verformung



Während der Verformung



Versagen

im folgenden Bild mehr als fünf Pixel entfernt wird er verworfen. So kann sichergestellt werden, dass immer derselbe Punkt verfolgt wird. Können bis zum Weißbruch nicht mindestens zwei Punkte verfolgt werden, ist es möglich, die Punkte manuell zu verfolgen. Anhand der relativen Distanz der Markierungen zueinander zwischen Beginn der Deformation und Weißbruch werden anschließend die Dehnung und die mittlere Dehnrates berechnet. Diese werden jeweils in einem Diagramm aufgetragen. Der Beginn der Deformation wird als jenes Bild definiert, in dem die Dehnung 0,1 % beträgt. Wird der Startpunkt falsch detektiert, kann eine entsprechende Anpassung manuell durchgeführt werden. Anhand der Druck- und Dehnungsdaten wird die mechanische Spannung im Material ermittelt. Die elektrische Spannung des Drucksensors wird bereits während der Druckaufzeichnung im LabVIEW-Programm (National Instruments, Austin, USA) in bar konvertiert. Die Druckdaten werden mit den Dehnungsdaten anhand des Bruchs (maximaler Druck und Bild mit minimaler Helligkeit) synchronisiert. Anschließend wird mittels Gleichung 4.4 die Spannung im Material berechnet und die Spannungs-Dehnungs-Kurve dargestellt. Da die Dehnungserfassung nur bis zum Weißbruch funktioniert, werden die Dehnungsdaten zwischen Weißbruch und Bruch extrapoliert. Das ermittelte Spannungs-Dehnungs-Diagramm beschreibt den gesamten Deformationsprozess bis zum Versagen. Anhand dieser Daten kann das Verarbeitungs- und Versagensverhalten des Materials untersucht werden.

4.2 Herstellung der Folienproben für die dehnreologische Untersuchung

Die Folien für die Untersuchung des dehnreologischen Verhaltens wurden im Technikum des IKV hergestellt. Bei dem verwendete PET Granulat handelt es sich um RAMAPET R180, UAB Indorama Polymers Europe, Klaipėda, Litauen [NN20]. Das PET ist mit Aufwärmadditiven zur besseren Absorption der Infrarotstrahlung versetzt. Die Glasübergangstemperatur liegt bei ca. 78 °C, die Schmelztemperatur bei etwa 245 °C. Die Preforms, die im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens zur Validierung der Simulation genutzt werden, bestehen aus dem gleichen Material.

Das Kunststoffgranulat wurde für 12 h bei 120 °C getrocknet und mit Flachfolienextrusion (Einschneckenextruder, Plastograph EC plus der Firma Brabender Technologie GmbH & Co. KG, Duisburg) mit nachgeschalteter Chill-Roll-Anlage (CR 136/350 der Firma Collin Lab & Pilot Solutions GmbH, Maitenbeth) verarbeitet. Der Spalt der Breitschlitzdüse betrug 1,4 mm und die Breite 120 mm. Die Chill-Roll-Anlage mit einer Kühltemperatur von 60 °C sorgte für eine rasche Abkühlung, sodass die Bildung teilkristalliner Strukturen vermieden wurde. Die Extrusionsparameter sind in Tabelle 4.1 dokumentiert.

Gehäuse- temperatur 1 [°C]	Gehäuse- temperatur 2 [°C]	Gehäuse- temperatur 3 [°C]	Gehäuse- temperatur 4 [°C]	Drehzahl [U/min]	Abzug [m/min]
265	275	280	275	39	0,2

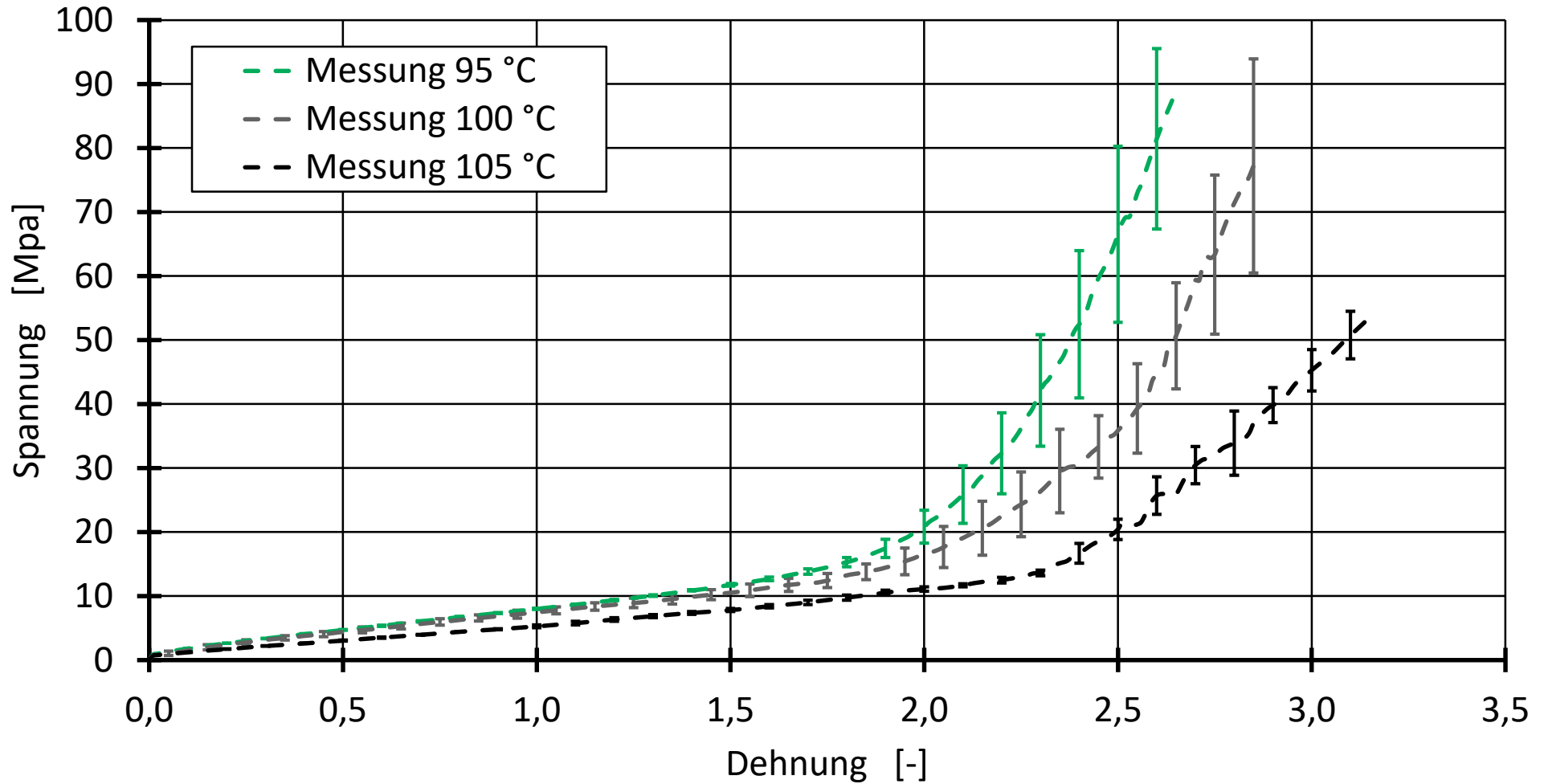
Tabelle 4.1: Parameter der Flachfolienextrusion

Es wurden je 10 m Folie extrudiert, aus der anschließend kreisförmigen Proben mit einem Durchmesser von 90 mm präpariert wurden. Die Proben wurden aus dem mittleren Bereich der Folien entnommen, da die Ränder bei der Flachfolienextrusion durch den Neck-In-Effekt zu Randverdickung neigen. Die Foliendicke beträgt durchschnittlich 760 μm .

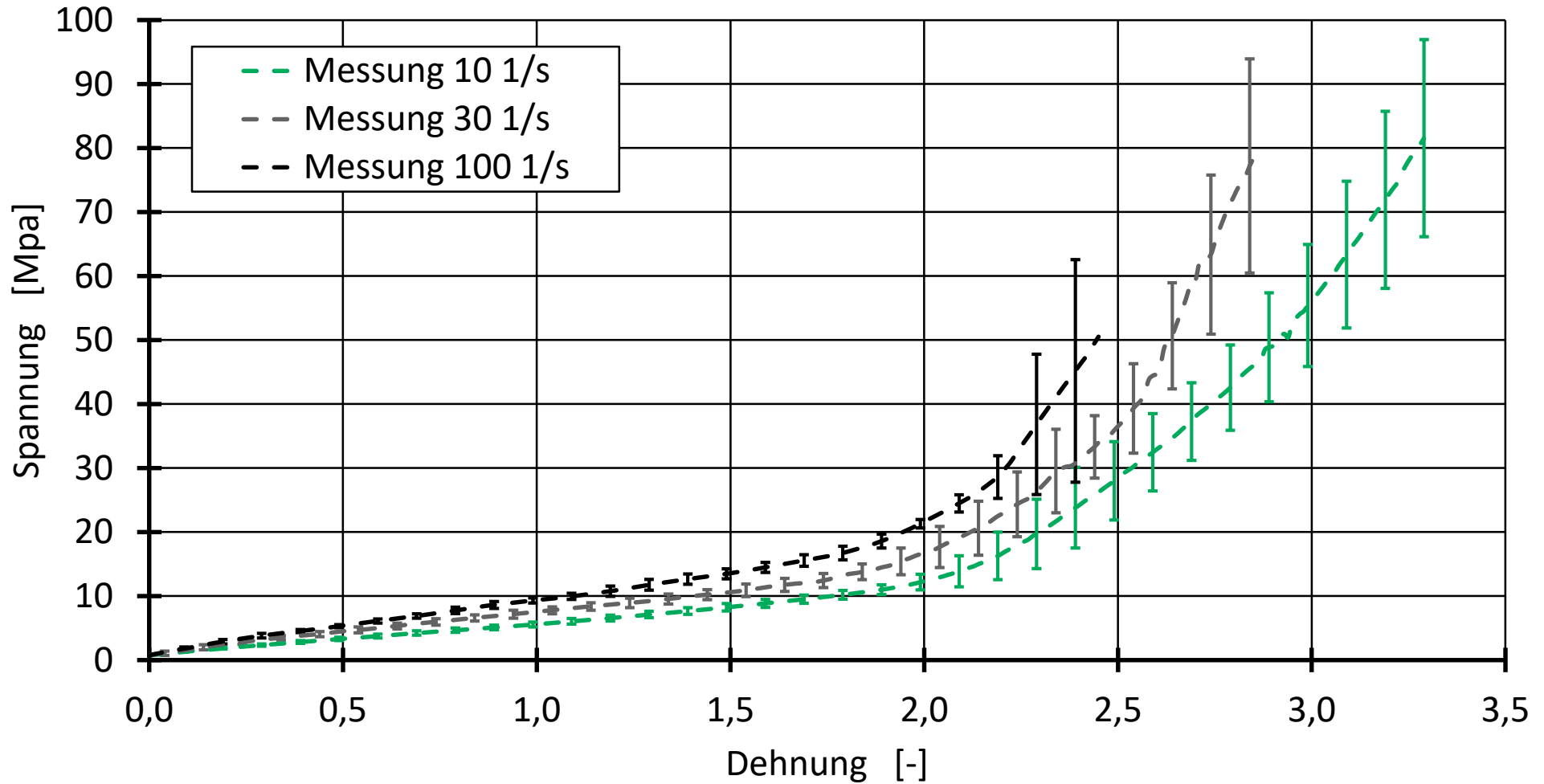
4.3 Dehnrheologische Messung mittels MIR

Das dehnrheologische Verhalten wurde in Abhängigkeit der Temperatur und Dehnrates betrachtet. Die Temperatur des Ölbad wird zwischen 95 °C und 105 °C variiert und die Dehnrates zwischen 10 s^{-1} und 100 s^{-1} eingestellt. Die Parameter sind in Tabelle 4.2 dokumentiert. Übliche Verfahrensparameter für das Streckblasformen im industriellen Maßstab sind Temperaturen zwischen 95 °C und 115 °C und Dehnrates bis zu 100 s^{-1} , wobei Geschwindigkeiten unterhalb von 10 s^{-1} nur während dem Beschleunigungsvorgang erreicht, und sind daher vernachlässigbar. Temperaturen von über 105 °C führen im MIR jedoch zu einer Deformation der Folie während dem Einspannen. Grund dafür ist der Aufbau des Probenhalters. Während dem Einspannvorgang wird die Folie im Ölbad bewegt und damit kurzzeitig einem dynamischen Druck ausgesetzt. Dieser Druck führt oberhalb von einer Ölbadtemperatur von 105 °C zu einer Verformung. Die Versuchsreihen wurden jeweils dreifach durchgeführt und mittels der digitalen Bildverarbeitung in MATLAB ausgewertet. Die erzeugten Spannungs-Dehnungs-Kurven werden anschließend genutzt, um das Materialmodell der Umformsimulation zu kalibrieren. Auf den Bildern 4.3 und 4.4 sind die erzeugten Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abhängigkeit der Temperatur und Dehnrates dargestellt. Wie erwartet, führt eine geringere Temperatur zu einem steileren Anstieg der Spannung. Der gleiche Effekt wird mit einer Steigerung der Dehnrates erzielt.

Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Dehnrates von 10 s^{-1}



Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abhängigkeit der Dehnrates bei einer Temperatur von 100 °C



Parameter	Einheit	Variationen
Temperatur	[°C]	95
		100
		105
Dehnrate	[s ⁻¹]	10
		30
		100

Tabelle 4.2: Parametervariation zur Bestimmung der dehnreologischen Materialdaten

4.4 Entwicklung des Materialmodells

Im Antrag des Forschungsvorhabens wird das viskohyperelastische Glass-Rubber-Modell als Materialmodell gewählt, jedoch wurde im abgeschlossenen IGF-Forschungsvorhaben 19126 N festgestellt, dass die Simulationsdauer bei der Verwendung des viskohyperelastische Glass-Rubber-Modell um den Faktor 14 ansteigt [Hop18]. Für die Anwendung des Glass-Rubber-Modells sind im Vergleich zum Yeoh-Modell wesentlich mehr Rechenoperationen notwendig, die zu der Rechenzeiterhöhung führen. Aufgrund der Rechenperformance wird auch in diesem Forschungsvorhaben das Yeoh-Modell als Materialmodell gewählt.

Das hyperelastische Yeoh-Modell beschreibt das Materialverhalten gummielastischer Werkstoffe. Ist der Werkstoff isotrop, lässt sich die Formänderungsenergiedichte W in Gleichung 4.5 als skalare Funktion durch die Grundinvarianten I_1 des linken Cauchy-GreenTensors sowie der werkstoffspezifischen Konstanten C_i ausdrücken. Durch den dritten Grad des Yeoh-Polynoms kann der Wendepunkt in der Spannung-Dehnungskurve abgebildet werden. Dadurch wurden der hohe Ursprungsmodul, das anschließende Spannungsplateau und die späte Dehnverfestigung gut abgebildet.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (Gl. 4.5)$$

Für dieses Modell müssen die Parameter C_{10} , C_{20} und C_{30} mit Materialkennwerten kalibriert werden. Für eine verbesserte Abbildeleistung im Bereich geringer Dehnungen wurde der Parameter C_{10} des Yeoh-Modells modifiziert (Gl. 4.6). Dabei muss C_{10} von drei weiteren Materialparametern C_{11} , C_{12} und C_{13} und der ersten Invariante I_1 des Dehnungstensors abhängig

sein. Die erste Invariante I_1 ist von dem Verstreckgrad λ abhängig und kann im biaxialen Fall wie in Gl. 4.7 vereinfacht dargestellt werden.

$$C_{10} = C_{11} + C_{12} e^{\left(-\frac{C_{13}}{1+(I_1-3)}\right)} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

$$I_1 = 2\lambda^2 + \lambda^{-4} \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Das modifizierte Yeoh-Modell wurde durch ein Fitting der ermittelten Spannungs-Dehnungskurven kalibriert. Basierend auf diesen Daten werden die Koeffizienten des Yeoh-Modells durch Fitting-Algorithmen so angepasst, dass Modell und Messungen bestmöglich übereinstimmen. Das Fitting der Materialkoeffizienten wurde in mehreren Schritten in der Software MATLAB durchgeführt: Im ersten Schritt wurden Koeffizienten des Yeoh-Modells in Gleichung 4.5 und 4.6 separat an jede einzelne Messkurve angenähert. Das Ergebnis sind 9 Koeffizientensätze C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{20} und C_{30} für 9 Messkurven (3 Temperaturen und 3 Dehnraten). Zu diesem Zeitpunkt liegt für jede Temperatur- und Dehnratenkombination jeweils eine Yeoh-Kurve vor. Diese sogenannten Singlefit-Kurven sind in Bild 4.5 und 4.6 gegenüber den zugehörigen Messwerten dargestellt. Die Abweichung zwischen dem Yeoh-Modell und den Messdaten ist sehr gering. Damit wird deutlich, dass das verwendete Modell sehr gut geeignet ist, um den Spannungsverlauf über den gesamten Dehnungsbereich von PET abzubilden.

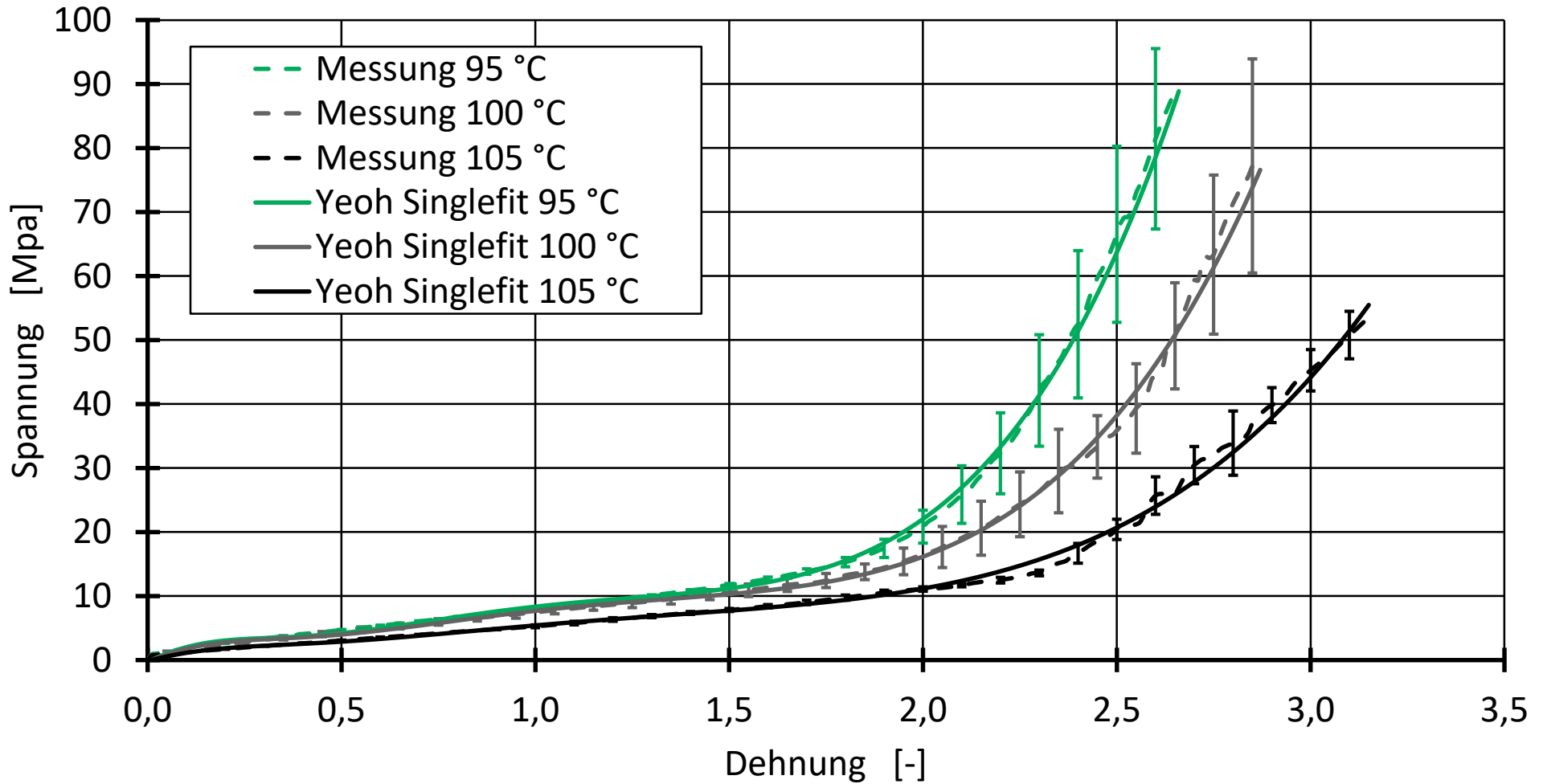
In einem nächsten Schritt wurde das Materialmodell durch eine Zeit-Temperatur-Verschiebung nach dem WLF-Ansatz von der Temperatur abhängig gemacht. Das Materialverhalten wird dabei durch eine Verschiebefunktion in Abhängigkeit der Konstanten C_{T1} und C_{T2} und einer Referenztemperatur T_S in Gleichung 4.8 in Abhängigkeit der Temperatur T modelliert.

$$\sigma(T) = \sigma \cdot 10^{\left(-C_{T1} \cdot \frac{T-T_S}{C_{T2}+(T-T_S)}\right)} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

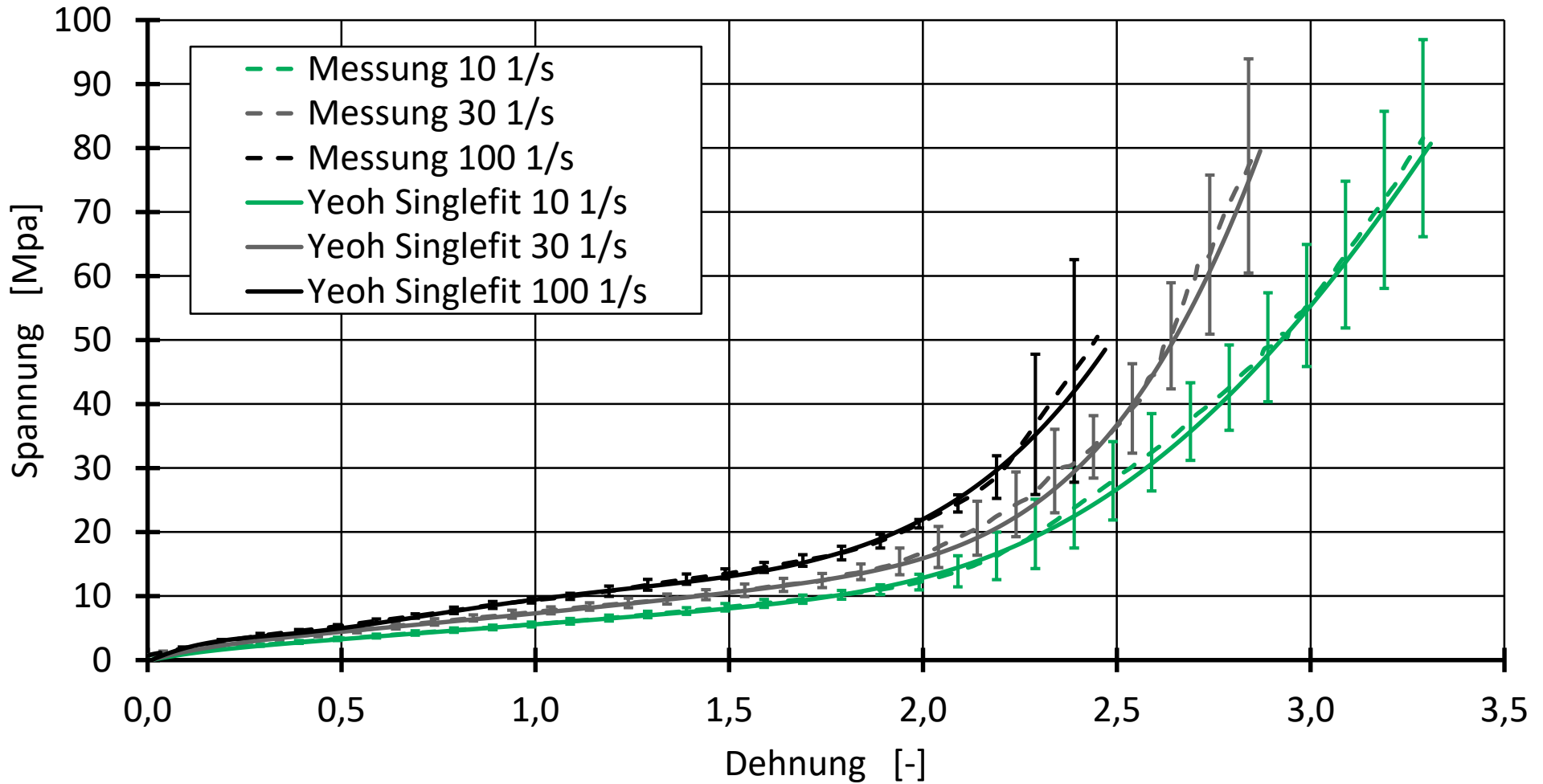
Bild 4.7 zeigt den Vergleich zwischen Messdaten und dem um eine Zeit-Temperaturverschiebung erweiterten Yeoh-Modell. Auch hier ist eine gute Modellgüte zu erkennen. Lediglich bei der Messreihe bei 95 °C überschätzt das Modell die Steifigkeit des PET im mittleren Dehnungsfenster und überschätzt die Steifigkeit im oberen Dehnungsfenster geringfügig. Ein Erklärungsansatz dafür ist die Nähe zur Glasübergangstemperatur (78 °C), bei der ein verändertes Materialverhalten auftreten kann.

In einem dritten Schritt wird die Abhängigkeit des Materialmodells von der Dehnratenrate durch einen Eyring-Ansatz geschaffen. Die Gleichung 4.9 hängt von den konstanten Materialparametern C_{D1} und C_{D2} sowie der Dehnratenrate $\dot{\epsilon}$ ab. Die Modellierung führt dazu, dass

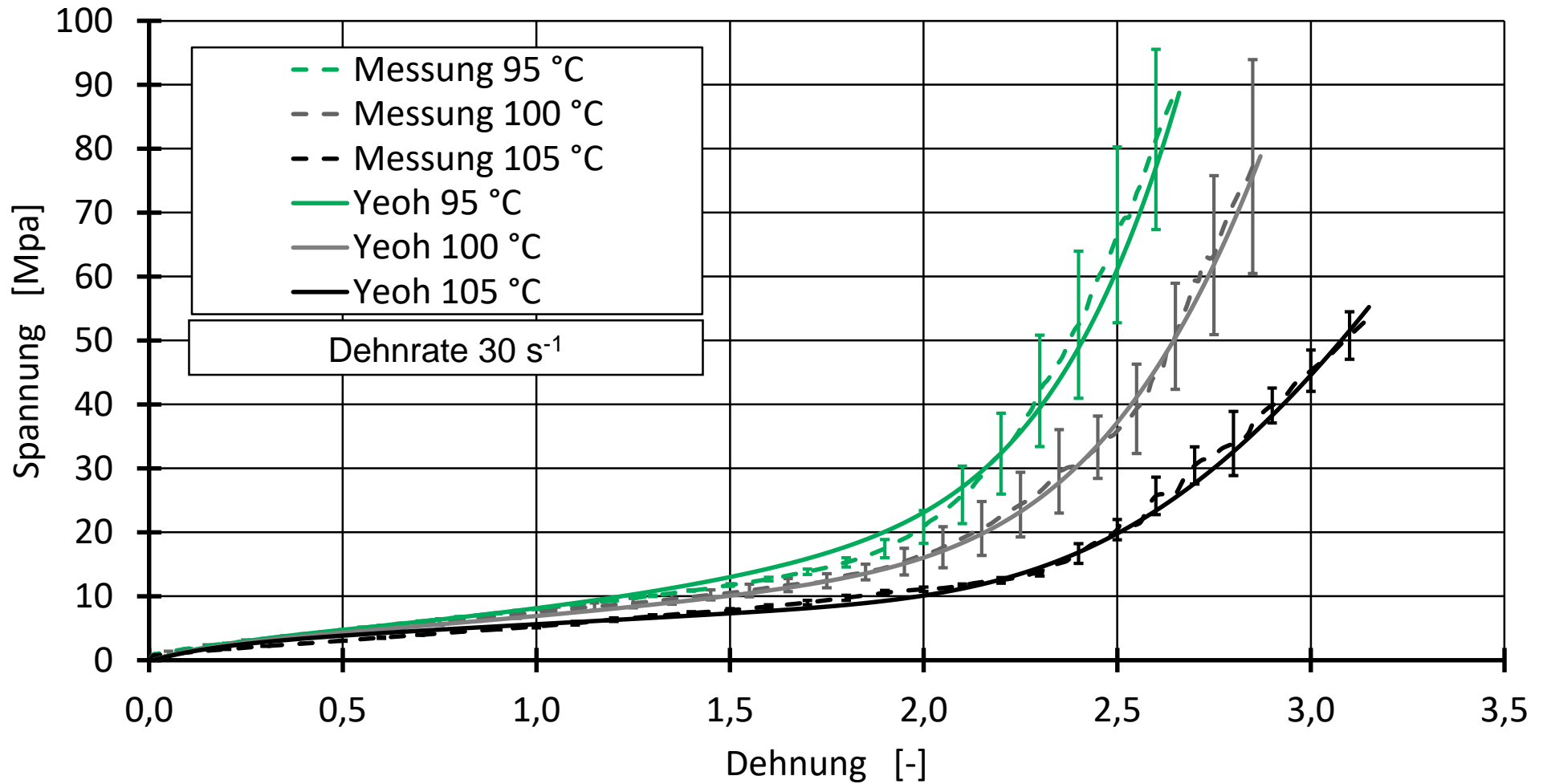
Vergleich zwischen Messdaten und Yeoh Singlefit in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Dehnrade von 10 s^{-1}



Vergleich zwischen Messdaten und Yeoh Singlefit in Abhängigkeit der Dehnrate bei einer Temperatur von 100 °C



Vergleich zwischen Messdaten und dem um das Zeit-Temperaturverschiebung erweiterten Yeoh-Modell



sich die Spannung bei steigender Dehnrates asymptotisch einem Grenzwert annähert. Wird dieser Grenzwert erreicht, bleibt der Widerstand bei steigender Dehnrates konstant.

$$\sigma(D) = \sigma \cdot C_{D1} \operatorname{arcsinh}(\dot{\epsilon}/C_{D2}) \quad (\text{Gl. 4.9})$$

Der Verlauf in Bild 4.8 zeigt, dass die Dehnratesabhängigkeit der Spannung im kalibrierten Bereich gut abgebildet werden kann. Lediglich bei einer geringen Dehnrates von 10 s^{-1} wird die Spannung vom Modell im mittleren Dehnungsfenster unterschätzt. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Spannung auch bei sinkender Dehnrates asymptotisch einem Grenzwert annähert. Da der Fehler nur den unteren Rand des kalibrierten Fensters betrifft und nicht übermäßig ausgeprägt ist, wurde im weiteren Verlauf der Eyring-Ansatz genutzt.

Im vierten Schritt wurde basierend auf den ermittelten Koeffizienten eine Gesamtoptimierung durchgeführt, um die bestmögliche Übereinstimmung zwischen Modell und Messwerten zu erreichen. Das Ergebnis sind die Koeffizienten des Yeoh-Modells in Tabelle 4.3, die Konstanten der WLF-Gleichung in Tabelle 4.4 und die Koeffizienten des Eyring-Ansatzes in Tabelle 4.5.

C₁₁	C₁₂	C₁₃	C₂₀	C₃₀
0,77658	251,17222	119,42430	0,01093	0,0001968

Tabelle 4.3: Koeffizienten des modifizierten Yeoh-Modells

C_{T1}	C_{T2}	T_s
0,0200111702375276	-42,8384509646822	100,000630496538

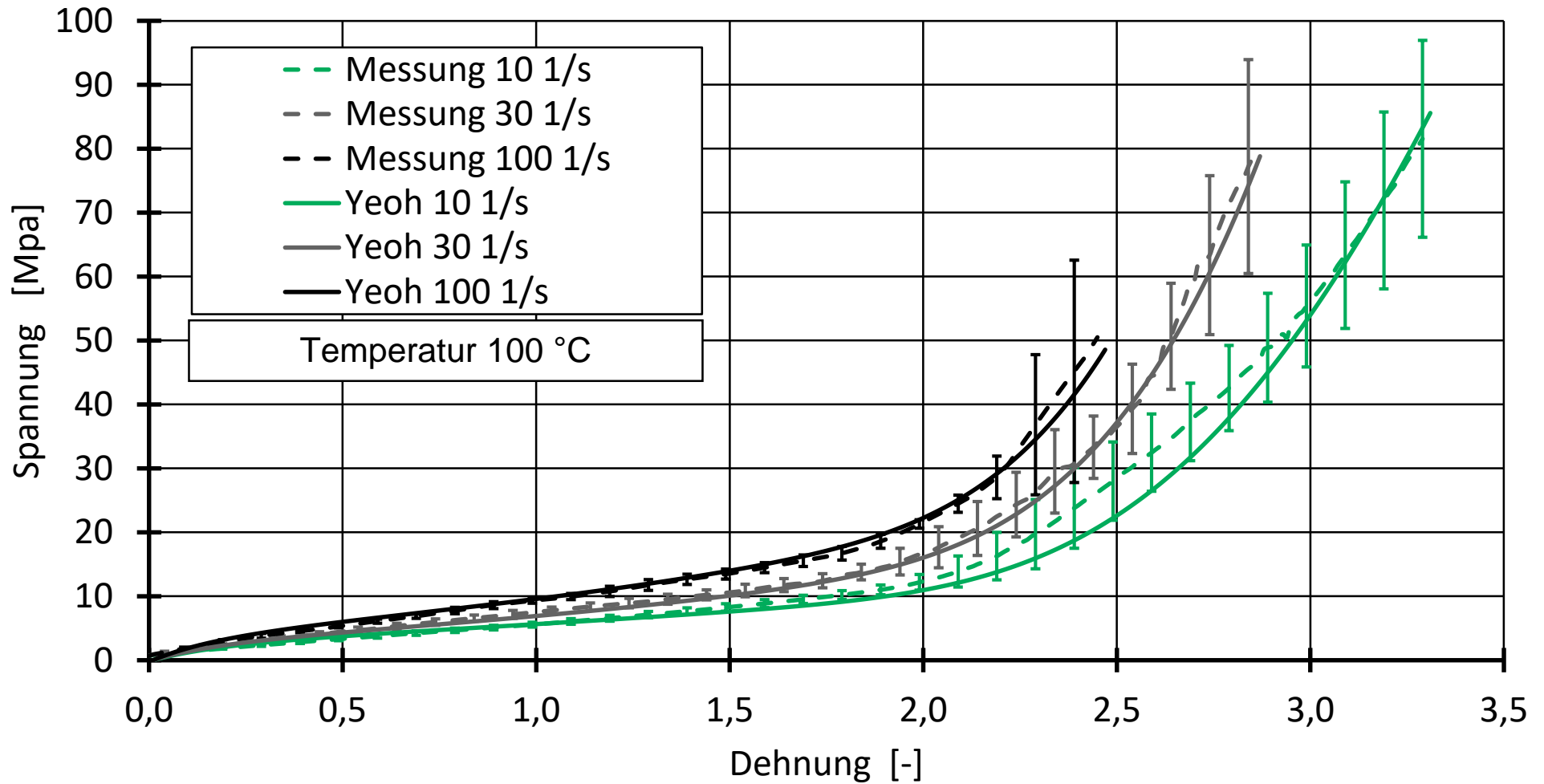
Tabell 4.4: Koeffizienten der Zeit-Temperaturverschiebung des Yeoh-Modells

C_{D1}	C_{D2}
-0,315474926506040	-0,371334760402319

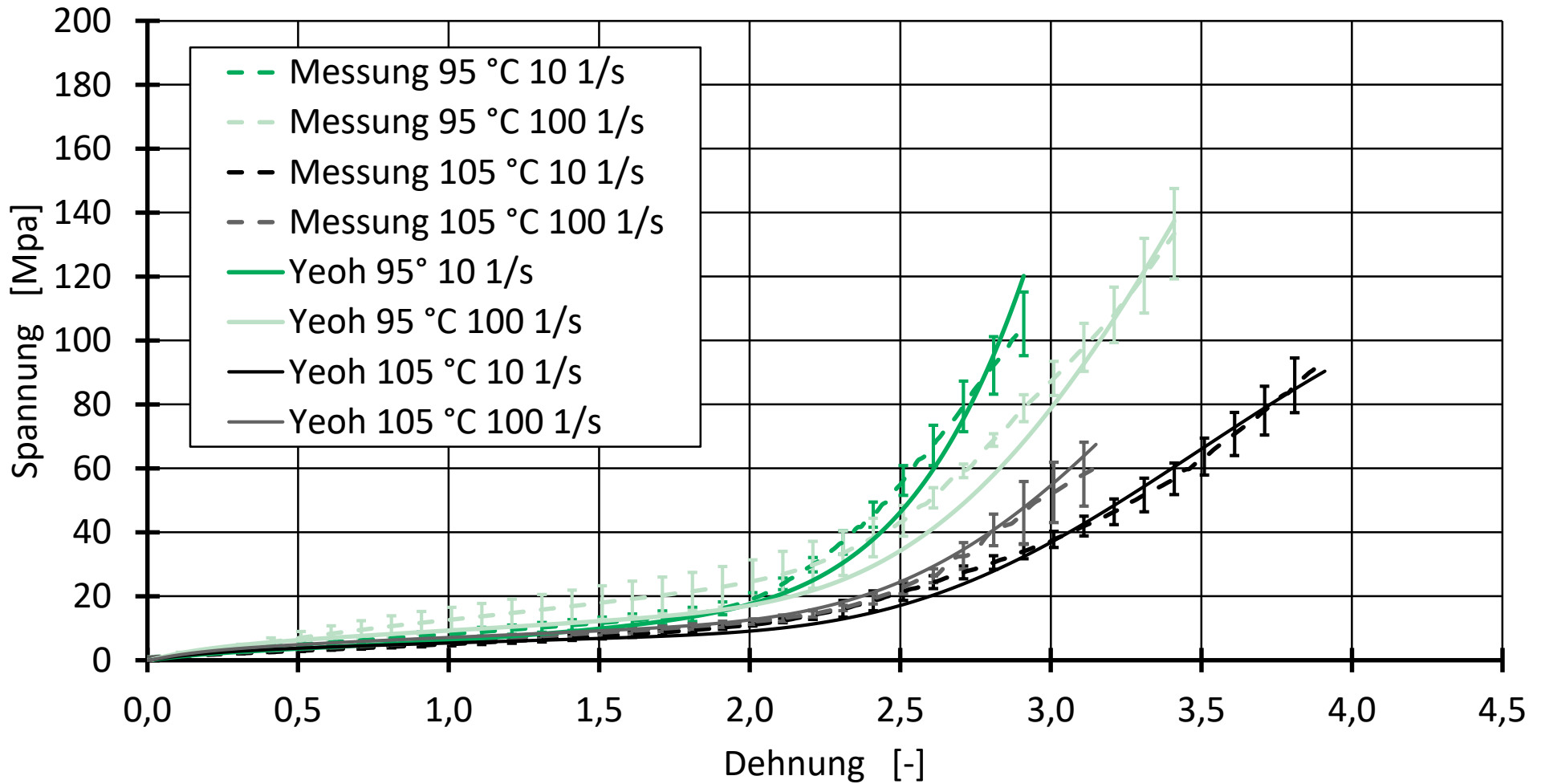
Tabelle 4.5: Koeffizienten des Eyring-Ansatzes des Yeoh-Modells

Die Validierung des Yeoh-Modells erfolgte qualitativ an Prozessparametern, die nicht in die Kalibrierung eingeflossen sind. In Bild 4.9 ist das temperatur- und dehnratesabhängige Yeoh-Modell für die Temperaturen $95 \text{ }^\circ\text{C}$ und $105 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Dehnrates 10 s^{-1} und 100 s^{-1} dargestellt. Zusätzlich sind mittels MIR gemessene Spannungs-Dehnungs-Kurven für diese Prozessparameter abgebildet. Das Modell weist überwiegend nur eine geringe Abweichung von den Messdaten auf, lediglich der Versuchspunkt bei $95 \text{ }^\circ\text{C}$ und 100 s^{-1} ist im mittleren Dehnungsfenster auffällig. Jedoch weist die Messung an dieser Stelle auch eine ungewöhnlich hohe Standardabweichung auf. Daher kann auch eine Unregelmäßigkeit bei der Messung zu

Vergleich zwischen Messdaten und dem um den Eyring-Ansatz erweiterten Yeoh-Modell



Validierung des temperatur- und dehnratenabhängigen Yeoh-Modells



dieser Abweichung geführt haben. Zusammengefasst bildet das temperatur- und dehnratenabhängige Yeoh-Modell das Materialverhalten im kalibrierten Bereich sehr gut ab.

4.5 Entwicklung und Kalibrierung der Versagenskriterien

In diesem Abschnitt wird die Modellbildung und Kalibrierung der Versagenskriterien beschrieben. Im Antrag zu diesem Forschungsvorhaben wurden drei Versagenskriterien vorausgewählt. Zum einen das lineares Maximaldehnungskriterium, welches in Gleichung 4.10 dargestellt ist.

$$e_1^{Zug} = \frac{\varepsilon_{11}}{X} \text{ und } e_2^{Zug} = \frac{\varepsilon_{22}}{Y} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

Mit dem Koeffizienten X und Y sowie ε_{11} der Dehnung in Raumrichtung 1 und ε_{22} der Dehnung in Raumrichtung 2. Versagen tritt ein, wenn $e_1^{Zug} \geq 1$ oder $e_2^{Zug} \geq 1$ gilt. Wie im Stand der Technik gezeigt wurde, kann nicht davon ausgegangen werden, dass e_1^{Zug} unabhängig von e_2^{Zug} ist. Das Modell wurde dennoch untersucht, da die Kalibrierung mit zwei Koeffizienten wenig Aufwand erfordert und die Resultate möglicherweise ausreichend genau sein können.

Des Weiteren wurde das Caddell-Raghava-Atkins-Modell untersucht [CRA73], das im äquibiaxialen Spannungszustand die Form in Gl. 4.11 hat.

$$H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + I\sigma_{11} + J\sigma_{22} = 1 \quad (\text{Gl. 4.11})$$

Mit dem Koeffizienten H, I, J und σ_{11} der Spannung in Raumrichtung 1 und σ_{22} der Spannung in Raumrichtung 2 handelt es sich um ein orthogonales Versagenskriterium, welches von der Spannung abhängig ist.

Als drittes Versagensmodell wird das komplexere Tsai-Wu-Kriterium betrachtet, das mit 5 Koeffizienten kalibriert werden muss (Gl. 4.12). Mit dem Koeffizienten I, J, K, L und M . Damit ist das Tsai-Wu Kriterium mit 5 Koeffizienten in der Kalibrierung mit dem höchsten Rechenaufwand verbunden [TW71].

$$I\sigma_{11} + J\sigma_{22} + K\sigma_{11} + L\sigma_{22} + 2M\sigma_{11}\sigma_{22} = 1 \quad (\text{Gl. 4.12})$$

Die Kalibrierung der Materialmodelle und Versagensmodelle wurden in MATLAB R2020a durchgeführt. Dazu wurden die ausgewerteten Messdaten aus dem MIR importiert. Mit der Funktion `fmincon` wurden die Modelle mit Messdaten kalibriert

Das Tsai-Wu Kriterium und das Caddell-Raghava-Atkins-Modell sind beide orthotrope Versagensmodelle, dementsprechend müssen diese Modelle auch mit orthotropen Messungen kalibriert werden. Dazu wurde das MIR um ein ellipsenförmiges Leitgitter erweitert. Die

Leitgitterform sind in Bild 4.10 abgebildet. Mit dem ellipsenförmigen Leitgitter sollte eine Verstreckung der Proben mit unterschiedlichen Versreckgraden in Raumrichtung 1 und Raumrichtung 2 erreicht werden. Die Querschnittsfläche des ellipsenförmigen Leitgitters wurde, gleich der Fläche des in AP 1 konstruiertem verkleinertem Leitgitter (Bild 4.10), zu 572 mm^2 gewählt, um prozessnahe Dehnraten von bis zu 100 s^{-1} untersuchen zu können. Das Achsenverhältnis des ellipsenförmigen Leitgitters wurde zu 1:2 festgelegt. Anschließend wurden die in AP 1 hergestellten Proben bis zum Versagen im MIR verstreckt. Dabei wurden die zwei Parameter Temperatur und Dehnrade variiert. Diese Variation kann Tabelle 4.6 entnommen werden. Die Temperatur des Ölbad es wurde zwischen $95 \text{ }^\circ\text{C}$ und $105 \text{ }^\circ\text{C}$ variiert und die Dehnrade zwischen 1 s^{-1} und 100 s^{-1} eingestellt. Dies sind übliche Verfahrensparameter für das Streckblasformen im industriellen Maßstab. Jede Parameterpaarung wird dreifach bestimmt.

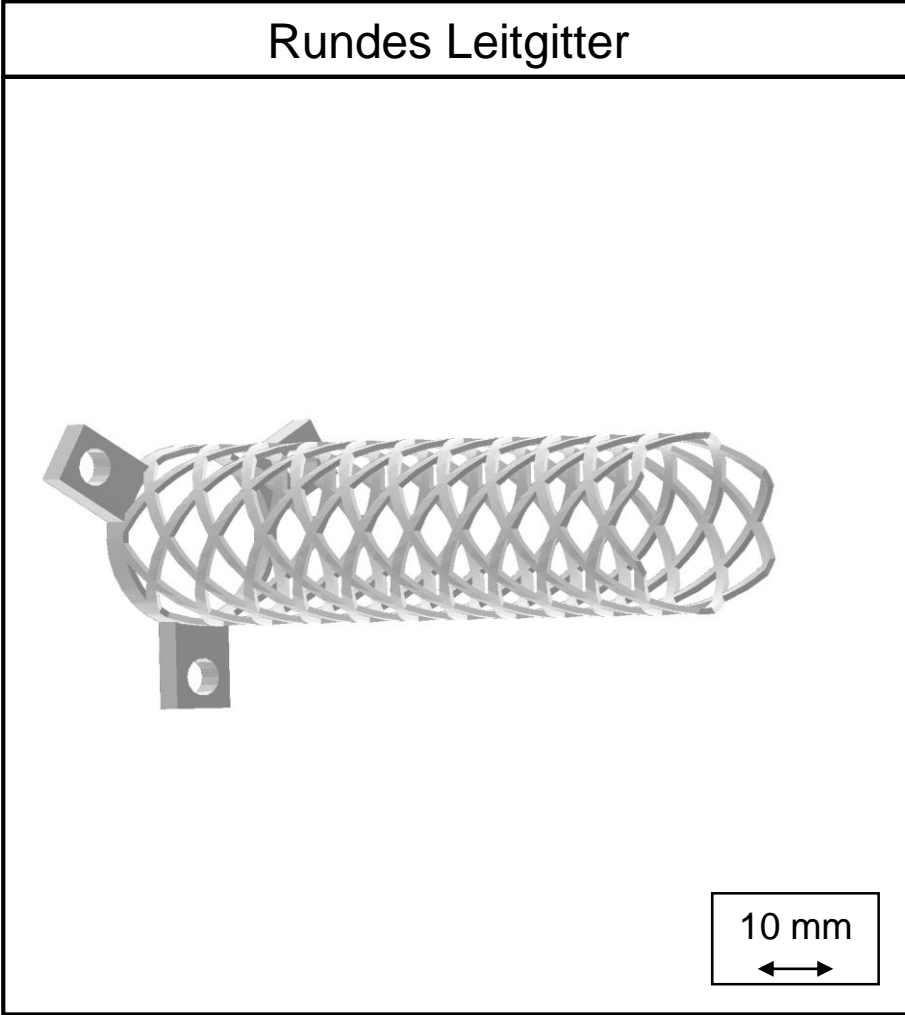
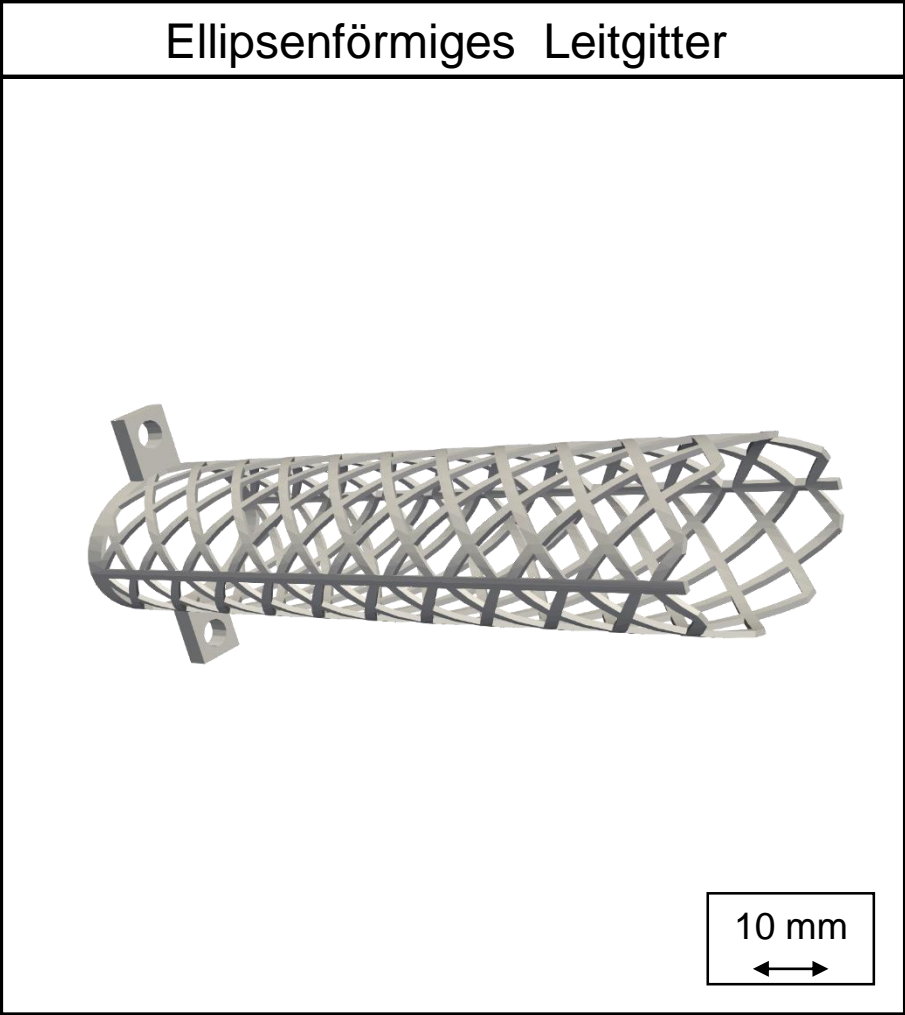
Parameter	Einheit	Variationen
Temperatur	[$^\circ\text{C}$]	95
		100
		105
Dehnrade	[s^{-1}]	1
		3
		10
		30
		100

Tabelle 4.6: Variation der Prüfparameter zu Bestimmung der Versagenskriterien

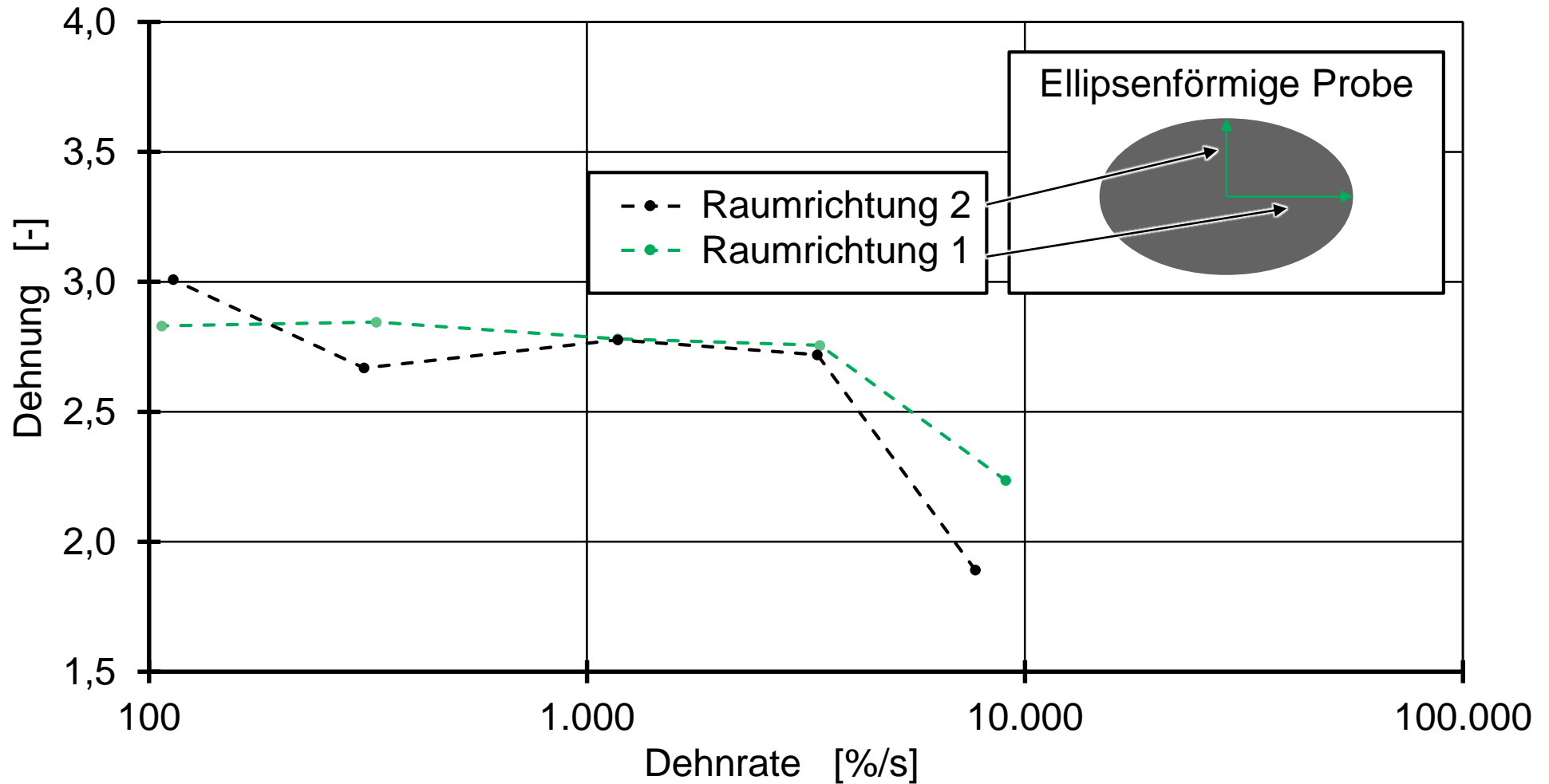
Für die Auswertung wird das Matlab Skript aus AP 1 modifiziert, sodass die Dehnung zum Zeitpunkt des Weißbruches und des Versagens ausgegeben wird. Zusätzlich wird die Dehnung in Raumrichtung 1 und Raumrichtung 2 getrennt betrachtet.

Exemplarisch ist in Bild 4.11 die Dehnung in zwei Raumrichtungen bei Auftreten von Weißbruch in Abhängigkeit von der Dehnrade dargestellt. Entgegen den Erwartungen sind die Dehnungen nicht konsistent abhängig von der Dehnrichtung. Das bedeutet, dass trotz des ellipsenförmigen Leitgitters mit einem Achsenverhältnis von 1:2 keine richtungsabhängigen

Ellipsenförmiges und rundes Leitgitter im Vergleich



Dehnung bei Weißbruch in Abhängigkeit von der Dehnrates gemessen im ellipsenförmigen Leitgitter



Dehnungen erzeugt werden können. Die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera deuten darauf hin, dass sich die Probe zunächst kugelförmig verformt und versagt, bevor sie mit dem ellipsenförmigen Leitgitter in Kontakt kommt. Ursache für das frühe Versagen ist die geringen Temperaturen knapp oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g von 78 °C, welche jedoch repräsentativ für den Streckblasformprozess sind. Aus diesem Grund können die orthotropen Versagenskriterien mit dem MIR nicht kalibriert werden. Stattdessen wurden, in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss, ein Maximaldehnungs- und Maximalspannungskriterium entwickelt, welches mit den äquibiaxialen Dehnungsmessdaten kalibriert werden kann. Die Bestimmung der Materialdaten fand bei den Prozessparametern aus Tabelle 4.6 statt und wurde dreifach durchgeführt. Die Versagensdehnung in Abhängigkeit der Dehnrates und Temperatur ist in Bild 4.12 dargestellt. Die Versagensdehnung nimmt mit abnehmender Dehnrates und mit steigender Temperatur zu, denn die Polymerketten können der langsamen Belastung länger folgen und die höhere Temperatur führt zu einer gesteigerten Beweglichkeit der Polymerketten. Der Weißbruch beginnt bei allen Versuchspunkten bei 70 % bis 90 % der Gesamtbruchdehnung an. Bild 4.13 zeigt die Spannung im Versagensfall in Abhängigkeit von der Dehnrates und der Temperatur. Die Bruchspannung nimmt mit sinkender Dehnrates zu und mit steigender Dehnrates ab. Der Weißbruch findet deutlich unterhalb der Bruchspannung statt.

Da eine starke Abhängigkeit des Versagens von der Dehnrates und der Temperatur erkennbar ist, wurde das Maximaldehnungs- und Maximalspannungskriterium um die Abhängigkeit der Dehnrates und der Temperatur erweitert (Gl. 4.13 und Gl. 4.14).

$$\varepsilon_{max} = H * \dot{\varepsilon}^I + J * t + K \quad (Gl. 4.13)$$

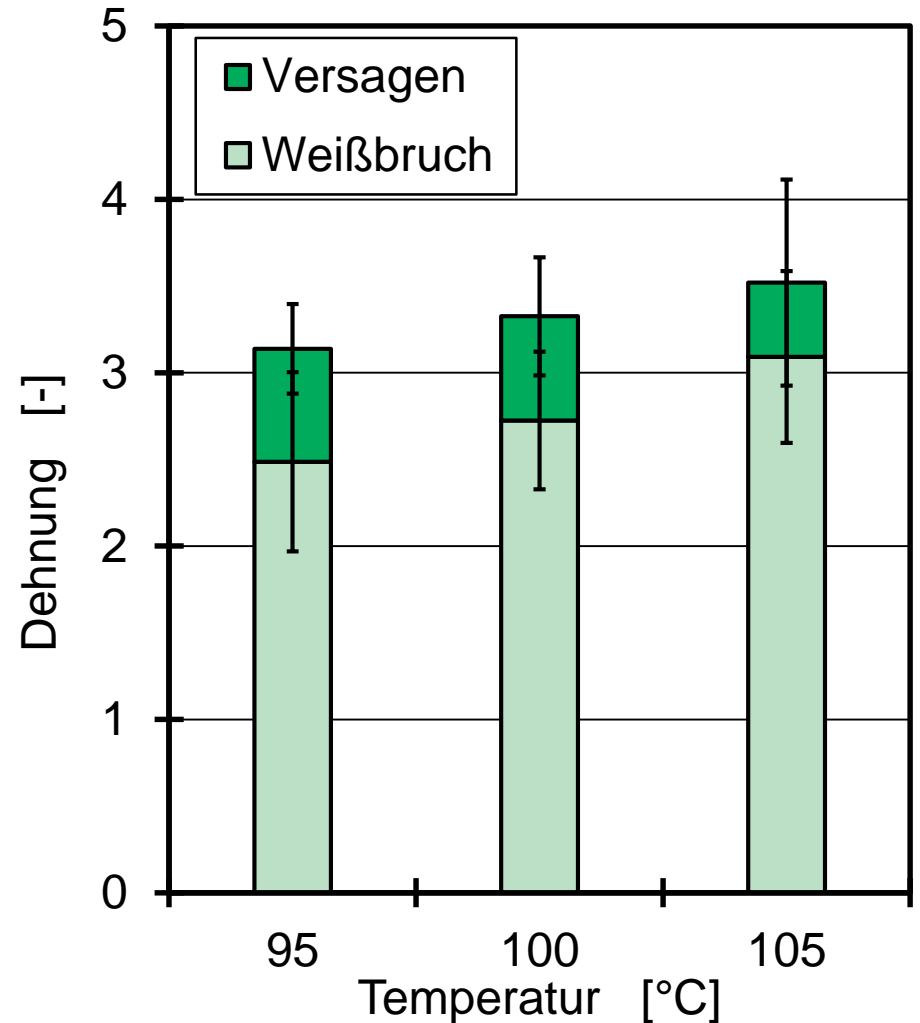
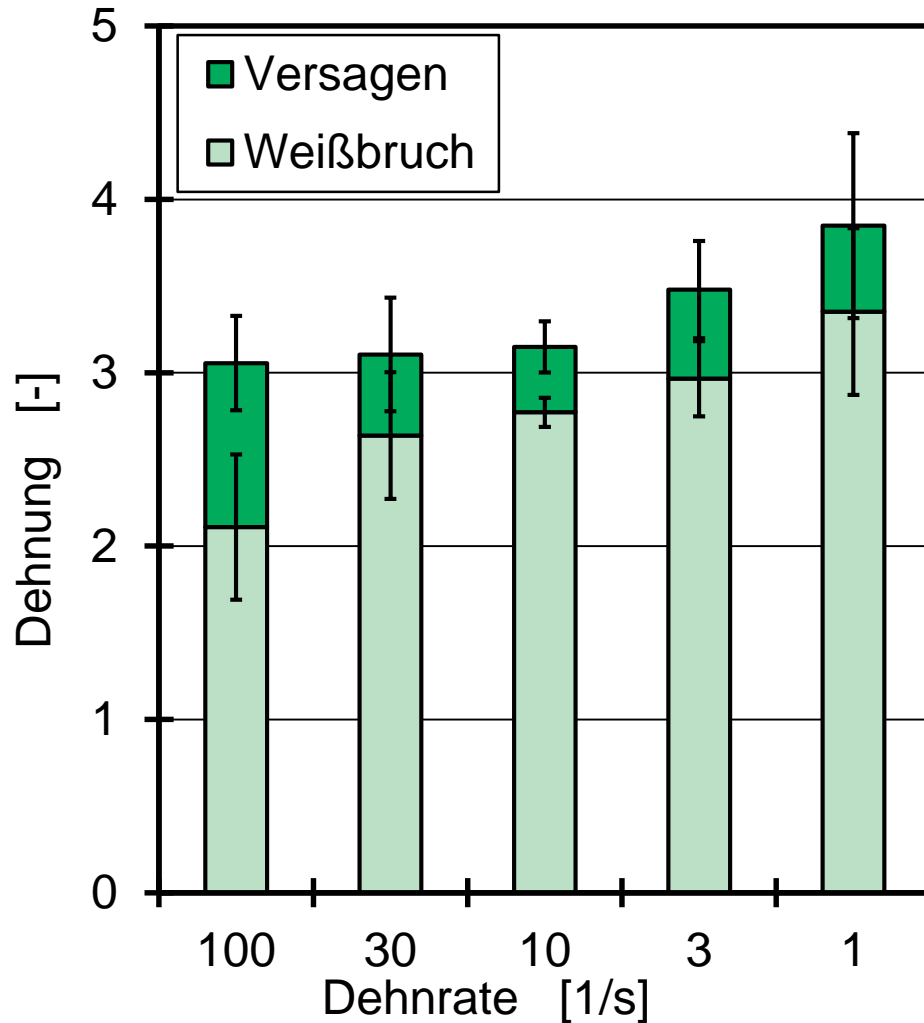
$$\sigma_{max} = H * \dot{\varepsilon}^I + J * t + K \quad (Gl. 4.14)$$

Die Koeffizienten H , I , J und K sind Fittingparameter, die mit den Materialdaten kalibriert wurden. $\dot{\varepsilon}$ ist die Dehnrates und t die Temperatur. ε_{max} bzw. σ_{max} beschreiben die maximal zulässige Dehnung bzw. Spannung, bevor das Materialversagen auftritt. Während die Abhängigkeit von der Temperatur mit einem linearen Term realisiert wurde, verläuft die Abhängigkeit der Dehnrates exponentiell asymptotisch gegen einen Grenzwert. Beide Versagenskriterien werden für beide Versagensmechanismen (Weißbruch und Versagen) kalibriert. Dabei wurden jeweils 4 Koeffizientensätze mit den folgenden Zielen ermittelt:

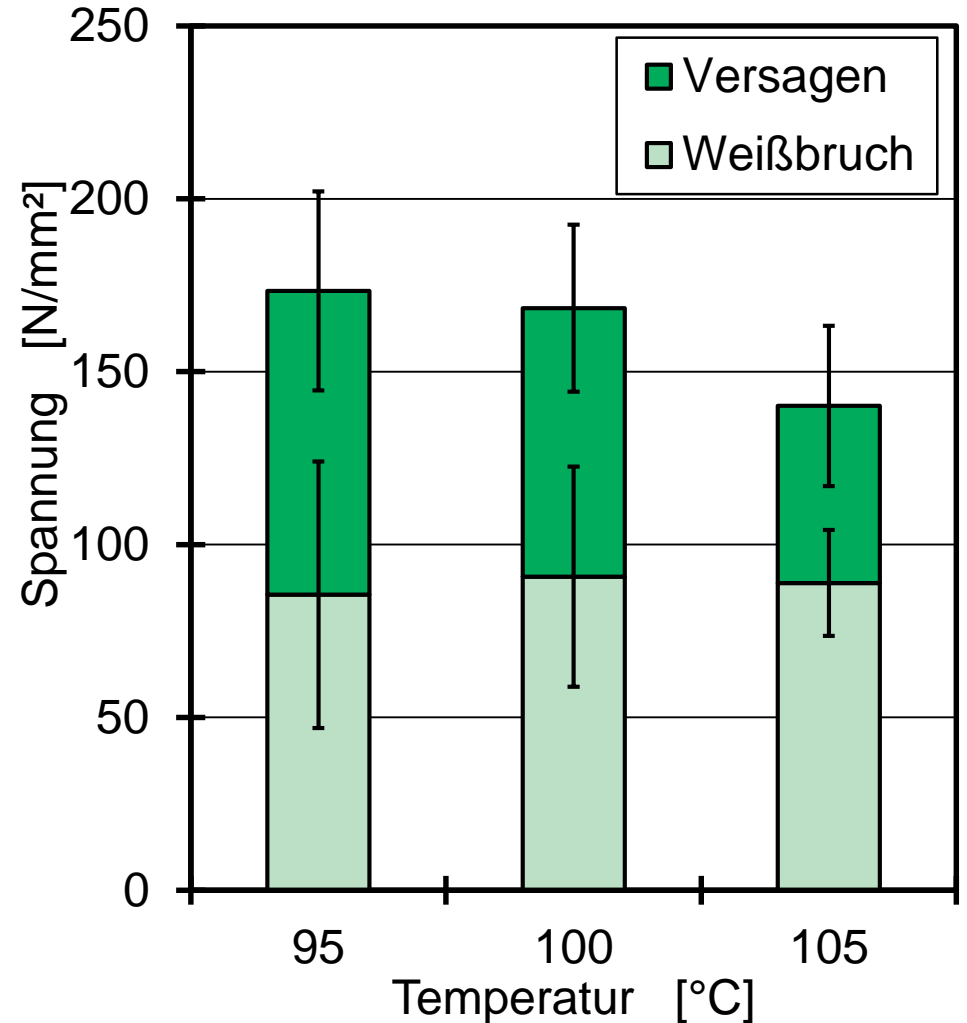
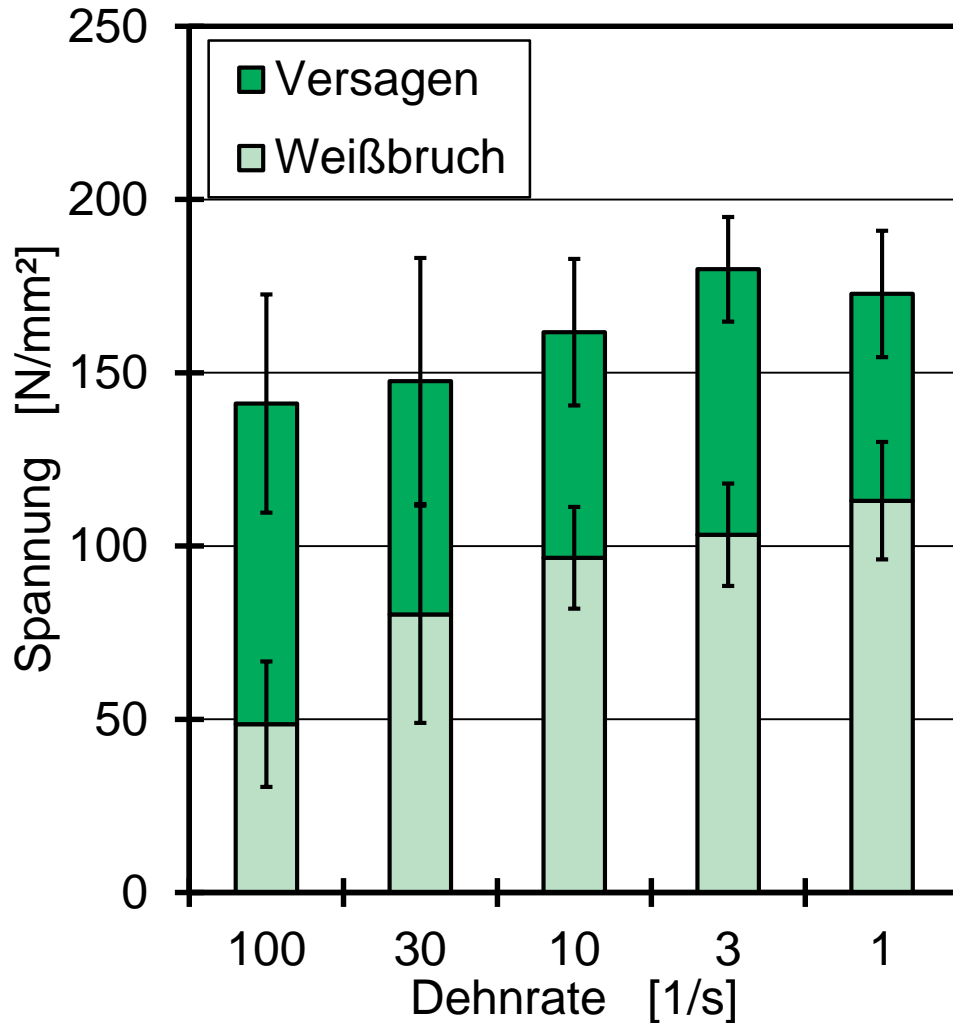
Koeffizientensatz 1 wurde bei hohen Dehnrates von 10 s⁻¹ bis 100 s⁻¹ und hohen Temperaturen von 100 °C bis 105 °C kalibriert. Diese Konfiguration wurde an niedrigen Dehnrates (1 s⁻¹) und niedrigen Temperaturen (95 °C) validiert, um die Güte der Extrapolation nach unten zu zeigen.

Koeffizientensatz 2 wurde bei niedrigen Dehnrates von 1 s⁻¹ bis 10 s⁻¹ und niedrigen Temperaturen von 95 °C bis 100 °C kalibriert. Diese Konfiguration wurde an hohen Dehnrates

Dehnung im Versagensfall in Abhängigkeit von der Dehnrates und der Temperatur



Spannung im Versagensfall in Abhängigkeit von der Dehnrates und der Temperatur



(100 s^{-1}) und hohen Temperaturen (105 °C) validiert, um die Güte der Extrapolation nach oben zu zeigen.

Koeffizientensatz 3 wurde bei niedrigen und hohen Dehnraten von 1 s^{-1} und 100 s^{-1} und niedrigen und hohen Temperaturen von 90 °C und 105 °C kalibriert. Diese Konfiguration wurde an mittleren Dehnraten (10 s^{-1}) und mittleren Temperaturen (100 °C) validiert, um die Güte der Interpolation zu zeigen.

Koeffizientensatz 4 wurde mit allen betrachteten Dehnraten und Temperaturen kalibriert. Diese Konfiguration (vgl. Tabelle 4.7) wurde in die Simulation des Streckblasprozesses eingebunden.

Für eine Abschätzung des Versagens zur sicheren Seite wurden die Koeffizientensätze mit den Minima der jeweiligen Datensätze kalibriert. In der nachfolgenden Tabelle 4.7 sind die kalibrierten Fittingparameter für die Koeffizientensätze angegeben.

Koeffizientensatz 1	H	I	J	K
Maximaldehnung bei Weißbruch	33,65633	-0,00614	0,04711	-34,2943
Maximaldehnung bei Versagen	4,931453	0,541463	0,006249	2,234655
Maximalspannung bei Weißbruch	4311,119	-0,00526	-0,35646	-4018,85
Maximalspannung bei Versagen	276,3431	-0,07869	-3,14285	301,4796
Koeffizientensatz 2	H	I	J	K
Maximaldehnung bei Weißbruch	13,75353	-0,00662	0,012459	-11,6749
Maximaldehnung bei Versagen	17,73081	-0,00921	0,017096	-15,2787
Maximalspannung bei Weißbruch	1353,32	-0,00382	-0,147	-1213,88
Maximalspannung bei Versagen	1551,901	-0,00351	-3,65321	-994,299
Koeffizientensatz 3	H	I	J	K
Maximaldehnung bei Weißbruch	73,21385	-0,00376	0,080595	-76,7018
Maximaldehnung bei Versagen	52,52601	-0,00363	0,037806	-51,7548
Maximalspannung bei Weißbruch	3109,57	-0,00413	1,570959	-3100,08
Maximalspannung bei Versagen	4125,872	-0,00186	-3,44764	-3583,11
Koeffizientensatz 4	H	I	J	K
Maximaldehnung bei Weißbruch	60,77503	-0,00401	0,060956	-62,5526
Maximaldehnung bei Versagen	4,62252	-0,29093	0,040298	-1,56613
Maximalspannung bei Weißbruch	4278,059	-0,00306	1,264146	-4234,72
Maximalspannung bei Versagen	3873,913	-0,00314	-2,64785	-3380,06

Tabelle 4.7: Kalibrierte Koeffizientensätze der Versagenskriterien

Zur Bewertung der Koeffizientensätze wurde die mittlere quadratische Abweichung (MSE) berechnet und mit dem Koeffizientensatz 4 normiert. Mit dem normierten Fehler kann die Modellgüte im extrapolierten Bereich (Koeffizientensatz 1 und 2) und interpolierte Bereich (Koeffizientensatz 3) mit dem über alle Versuchsreihen kalibrierten Koeffizientensatz 4 verglichen werden. Dabei entspricht ein normierter Fehler von 1 der maximalen erreichbaren Modellgüte, ein normierter Fehler größer 1 einer minderen Modellgüte. In Tabelle 4.8 sind MSE, normierte Fehler und die gemittelten Fehler für die Koeffizientensätze angegeben. Es wird deutlich, dass ein extrapoliertes Versagensmodell mit einem gemittelten Fehler über 2 das

Versagen nur ungenügend genau beschreiben kann. Das interpolierte Versagensmodell ist mit einem mittleren Fehler von 1,18 deutlich genauer als die extrapolierten Versagensmodelle und bietet eine Möglichkeit, die Anzahl der Versuchsreihen, auf Kosten einer überschaubaren Steigerung der Vorhersagegenauigkeit, zu reduzieren. Wichtig ist, dass die Versuchsreihen möglichst bei Dehnraten und Temperaturen durchgeführt werden, die im realen Prozess zum Versagen führen. Im folgenden AP 5 zur Validierung der Versagenskriterien wird der über alle Versuchsreihen kalibrierte Koeffizientensatz 4 genutzt.

Koeffizientensatz 1	MSE	normierter Fehler	mittlerer Fehler
Maximaldehnung bei Weißbruch	0,054723	1,141235	2,041462
Maximaldehnung bei Versagen	0,111609	2,20012	
Maximalspannung bei Weißbruch	979,0528	3,727132	
Maximalspannung bei Versagen	266,6851	1,097361	
Koeffizientensatz 2	MSE	normierter Fehler	mittlerer Fehler
Maximaldehnung bei Weißbruch	0,138512	2,888611	2,027784
Maximaldehnung bei Versagen	0,070186	1,383562	
Maximalspannung bei Weißbruch	523,0778	1,991292	
Maximalspannung bei Versagen	449,0287	1,847672	
Koeffizientensatz 3	MSE	normierter Fehler	mittlerer Fehler
Maximaldehnung bei Weißbruch	0,057319	1,195357	1,177409
Maximaldehnung bei Versagen	0,065328	1,287803	
Maximalspannung bei Weißbruch	266,26	1,013619	
Maximalspannung bei Versagen	294,7538	1,212859	
Koeffizientensatz 4	MSE	normierter Fehler	mittlerer Fehler
Maximaldehnung bei Weißbruch	0,047951	1	1
Maximaldehnung bei Versagen	0,050729	1	
Maximalspannung bei Weißbruch	262,6826	1	
Maximalspannung bei Versagen	243,0241	1	

Tabelle 4.8: Vergleich der Modellgüte der Koeffizientensätze

5 AUFBAU UND VALIDIERUNG DER SIMULATIONSROUTINE

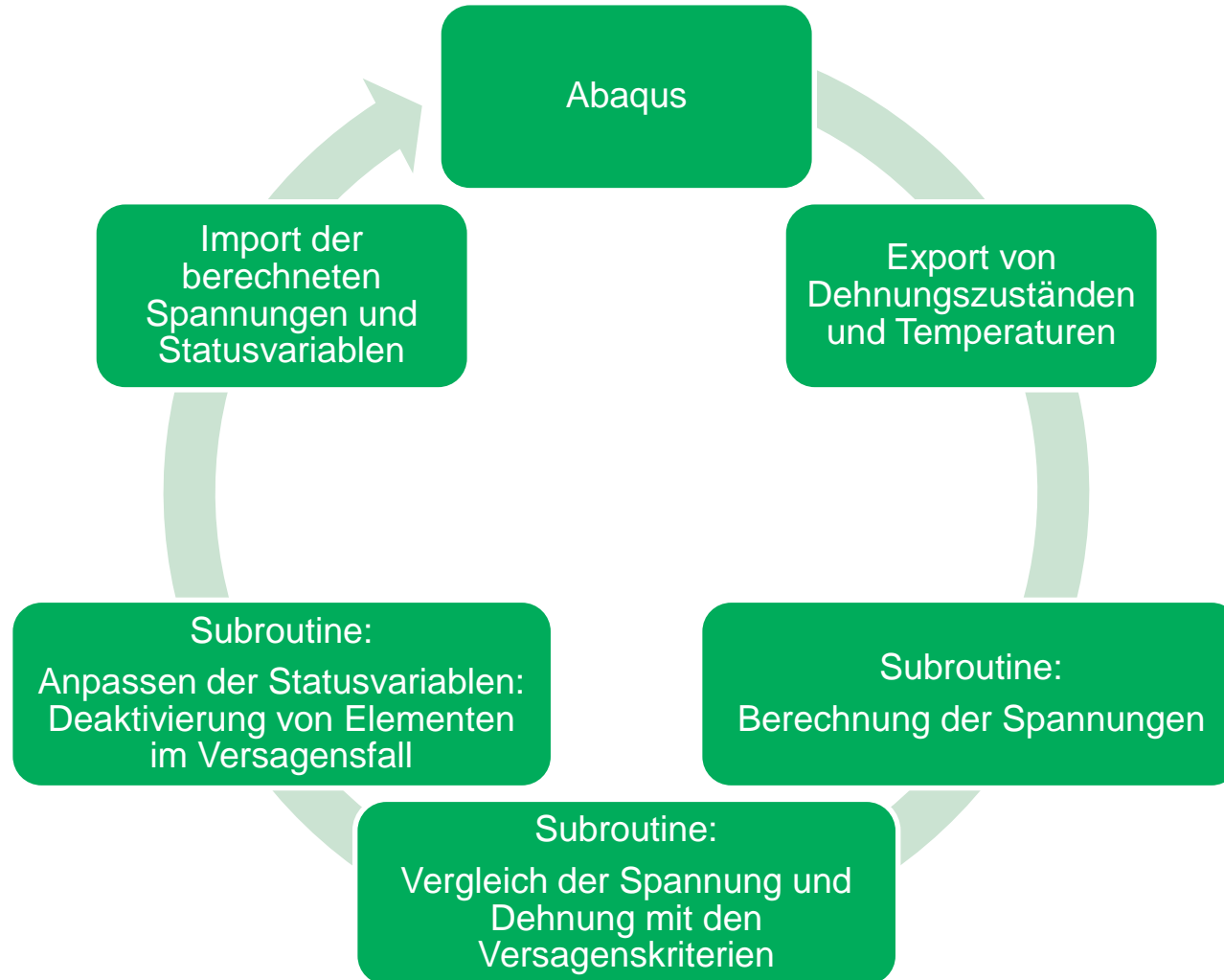
5.1 Aufbau der Simulationsroutine

Die Simulation des Aufheizvorgangs und des Umformprozesses erfolgten in der Software Abaqus von Dassault Systèmes, S.A., Vélizy-Villacoublay, Frankreich. Abaqus ist eine kommerzielle multi-purpose Finite-Elemente-Software mit der Probleme der Festkörperstatik und -dynamik gelöst werden können. Ein Vorteil von Abaqus für Optimierungsaufgaben ist die einfache Parallelisierung der Berechnungen und somit die kurzen Rechenzeit. Weiterhin kann die Eingabe der Randbedingungen über eine simpel gehaltene Syntax erfolgen. Diese Eingabe kann automatisiert werden, sodass iterative Simulationen ohne Benutzerinteraktion möglich sind. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, individuelle Änderungen bspw. am Materialmodell über Subroutinen zu implementieren. Diese Subroutinen werden in der Programmiersprache FORTRAN umgesetzt.

Für die Aufheizsimulation wurden die Geometriedaten von Preform und Infrarotheizstrecke in das Simulationsframework importiert. In einer ersten Simulation wurde der Strahlungsaustausch des Preforms mit der Infrarotheizstrecke berechnet. Zusammen mit den Materialkennwerten Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Transmissionsspektrum wurde in einem zweiten Simulationsschritt die Temperaturverteilung des Preform in einem definierten Zeitintervall bestimmt.

Die Temperaturverteilung des Preforms bildet zusammen mit den Prozessparametern Vorblasdruck, Fertigblasdruck, Blasdauer, Reckstangengeschwindigkeit, Umgebungstemperatur und Geometriedaten der Werkzeugkavität die Basis für die Umformsimulation. Für die Beschreibung des Umformverhaltens wurde die Subroutine VUMAT genutzt. Diese hatte die Aufgabe, auf Elementebene die Spannungen zu berechnen sowie den Versagenszustand zu beurteilen. In Bild 5.1 ist der schematische Ablauf der entwickelten Subroutine dargestellt. Als Input der Subroutine übergibt Abaqus die Dehnungszustände, Dehnraten und Temperaturen. Mit diesen Informationen wird zunächst der Spannungstensor berechnet. Dazu wurde das modifizierte dehnraten- und temperaturabhängige Yeoh-Modell implementiert. Anschließend wird der Versagenszustand bewertet. Dafür wurden das kalibrierte Maximaldehnungs- und Maximalspannungskriterium implementiert. Sollte Materialversagen auftreten, dann wird das Element, welches die Versagenskriterien erfüllt, über die eine Statusvariable deaktiviert. Diese Statusvariable wird zusammen mit dem Spannungstensor für jedes Element zurück an Abaqus übergeben. Damit kann der Punkt des Versagens in der Simulation detektiert und analysiert werden.

Aufbau der VUMAT Subroutine in Abaqus



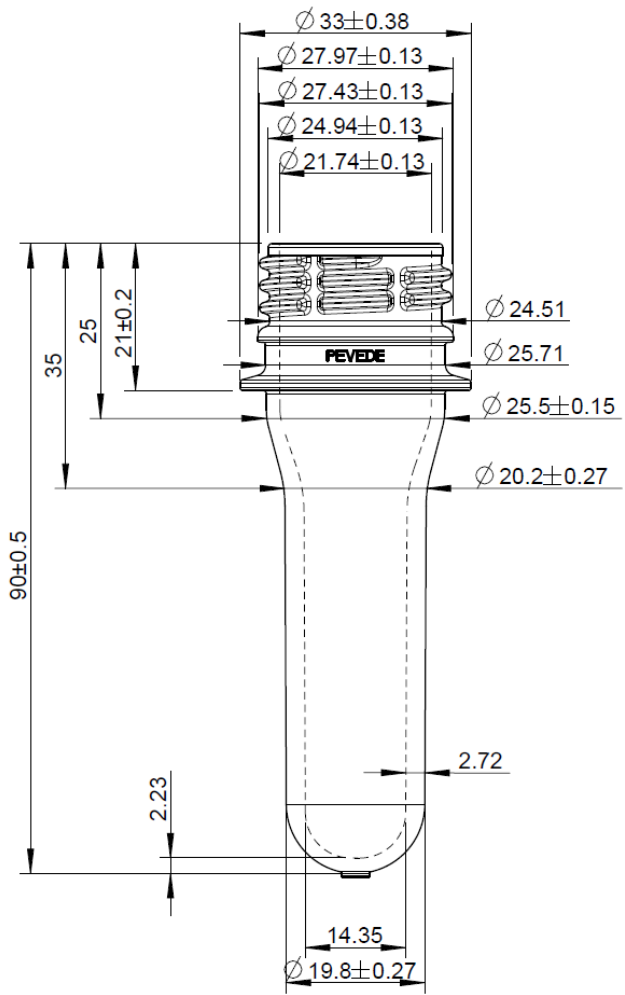
Die Aufbereitung der Randbedingungen und der Simulationsergebnisse sowie die Steuerung der Simulationskette erfolgt durch eine IKV-eigene Software. Diese Software ist in der Programmiersprache Visual Basic .NET von Microsoft Corp., Redmond, USA, geschrieben. Visual Basic .NET besitzt durch die internen Bibliotheken die Möglichkeit, Dateien zu erstellen, zu Kopieren und externen Servern zu senden. Weiterhin können beliebige Berechnungsalgorithmen, beispielsweise zur Vernetzung des Preforms, implementiert werden.

Die Simulationen werden auf einem Hochleistungssimulationsrechner durchgeführt, der im IGF-Forschungsvorhaben Nr. 17232 N beschafft wurde. Der Rechner beinhaltet drei Quad Intel Xeon Prozessoren der 7500 Serie mit jeweils 8 Prozessorkernen. Das System verfügt über 512GB DDR3 RAM und einen Festplattenspeicher von 1000 GB mit 7200U/min. Das Betriebssystem ist eine Linux-Distribution des Typs openSUSE 12.2 "Mantis". Auf dem Rechner wurden die Prozesssimulation und die Struktursimulationen parallel auf 24 Prozessorkernen durchgeführt.

5.2 Validierung der Simulationsroutine

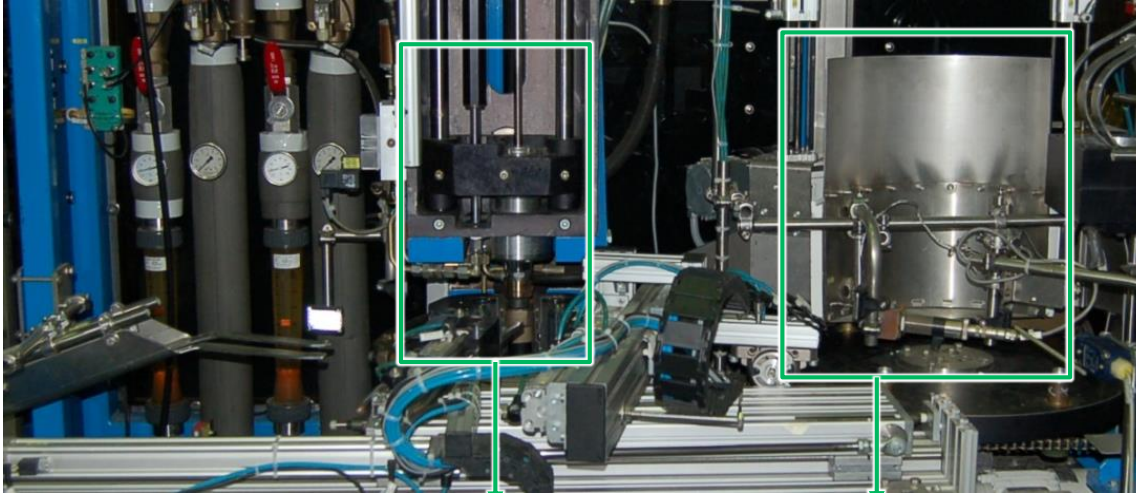
Zur Bewertung der Vorhersagegüte bei der Holzkörperherstellung im Streckblasprozess wurden Preforms mit einem Standardpreformdesign für eine 0,5 l PET-Flasche, die bereits in IGF-Forschungsvorhaben Nr. 19126 N beschafft wurden, verstreckt. Der Preform hat ein Gewicht von 18,5 g und besitzt ein standardisiertes PCO-1810 Mündungsbereich (Bild 5.2). Die Preforms wurden am IKV an einer Streckblasmaschine des Typs Contiform LB1 der Firma Krones AG, Neutraubling, zu Hohlkörpern umgeformt. Die nach dem zweistufigen Streckblasprozess arbeitende Laboranlage kann Flaschen mit 0,5 bis 2 l Inhalt herstellen. Die Anlage verfügt über eine Heizstrecke mit zwei in Reihe geschalteten Heizkästen der Firma HEB Bestrahlungstechnik AG, Wesel. Die Heizkästen sind jeweils mit neun horizontal angeordneten Infrarot-Quarzstrahlern des Typs 14134Z/98 (1200 W) und 14135Z/98 (1600 W) der Firma Philips GmbH, Hamburg, bestückt (Bild 5.3). Die Strahler sind halbseitig mit einer Reflektionsbeschichtung aus Keramik versehen, um die emittierte Strahlung in Richtung des zu erwärmenden Preforms zu fokussieren. Die äußere Preformoberfläche wird über ein Gebläse konvektiv gekühlt, um eine thermische Schädigung oder Kristallisation des oberflächennahen Materials zu vermeiden. Nach dem Austritt des Preforms aus der Infrarotheizstrecke wird die äußere Oberflächentemperatur punktuell auf mittlerer Preformhöhe mittels eines Pyrometers gemessen. Die verwendete Anlage bietet die Möglichkeit, eine vorgegebene Zieltemperatur über die Variation der globalen Strahlerleistung nachzuregeln. Befindet sich der Messwert in dem angegebenen Toleranzbereich, wird der Preform zur Flasche ausgeformt. Das Blaswerkzeug wird durch ein Heizaggregat des Typs STW150/1-3-10-KK5 der Firma Single Temperiertechnik GmbH & Co. KG, Hochdorf, temperiert. Die Blasstation ist schematisch in

Darstellung der Preformgeometrie mit PCO-1810 Mündungsbereich

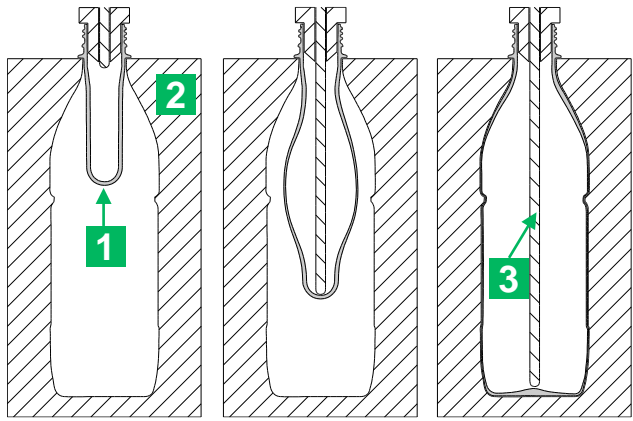


Laborstreckblasmaschine Contiform LB1

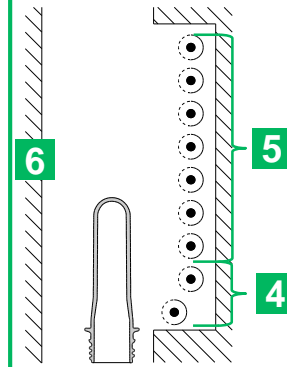
Hersteller: Krones AG, Neutraubling



Blasstation



Heizstrecke

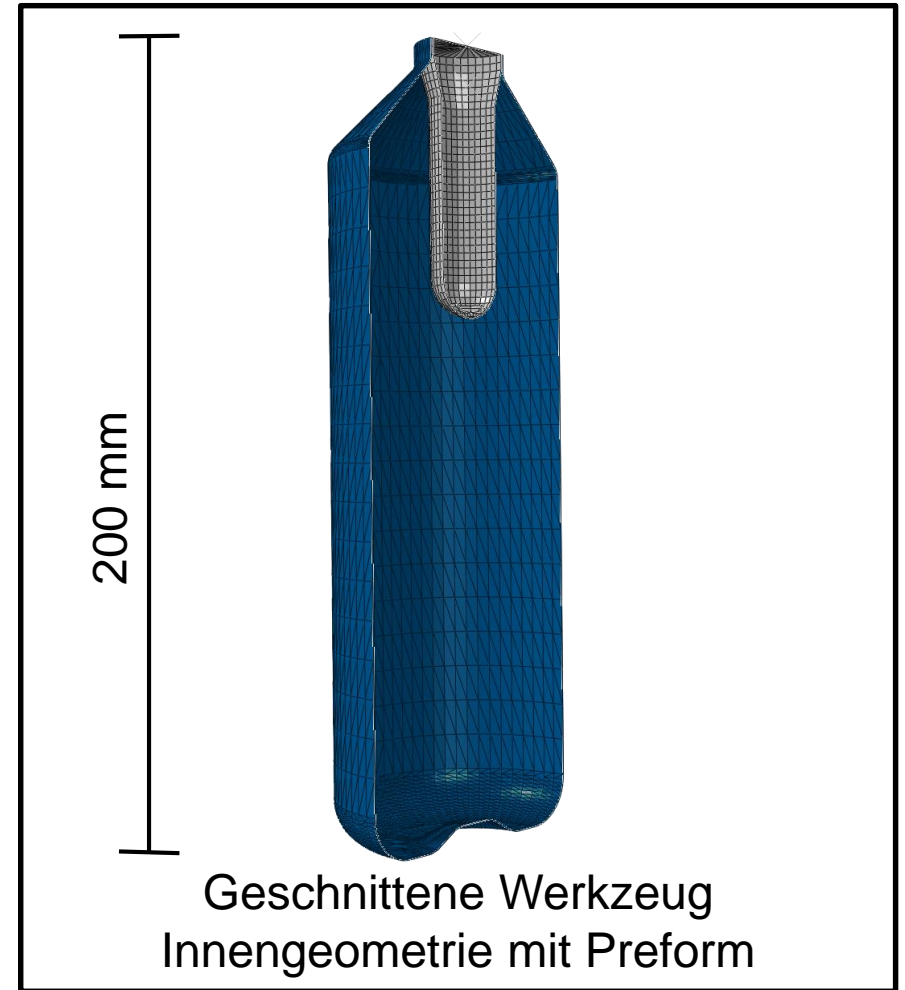
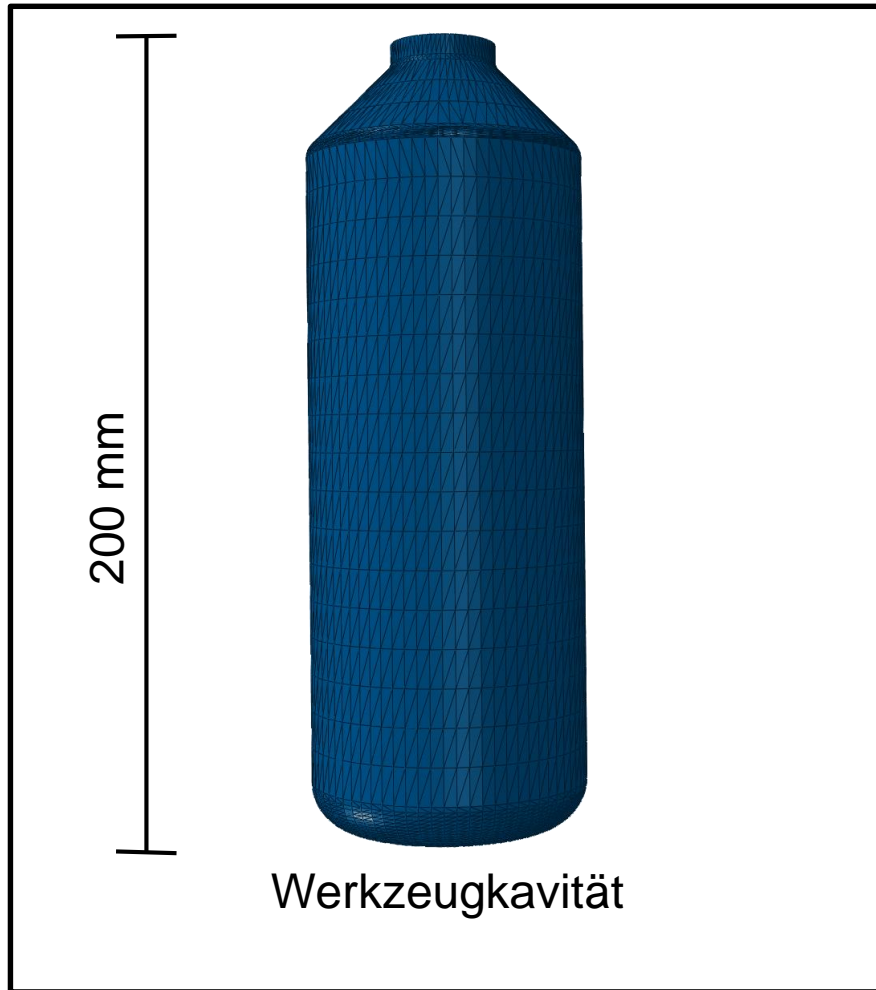


1. Preform
2. Werkzeug
3. Reckstange
4. IR-Quarzstrahler (1600 Watt)
5. IR-Quarzstrahler (1200 Watt)
6. Rückreflektor

Bild 5.3 abgebildet. Nach dem Ausformen durch Reckstange und Druckluft sowie einer ausreichenden Kühlzeit wird die fertige Flasche von einem pneumatischen Handlingsystem aus dem Blaswerkzeug in den Auslauf der Anlage befördert. Um Versagen (Weißbruch und Rissbildung) hervorrufen zu können, wurde der für eine 0,5 l Flasche optimierte Preform in einem 0,75 l Flaschenwerkzeug umgeformt. Die Werkzeuggeometrie ist in Bild 5.4 als CAD Zeichnung dargestellt. Weiterhin wurden sowohl die Preformtemperatur als auch die Dehnrage variiert. In der nachfolgenden Tabelle 5.1 sind die über alle Betriebspunkte konstanten Parameter aufgelistet. Der Fertigblasdruck wurde auf 25 bar festgelegt und dient dazu, Feinstrukturen auszuformen. In der Simulation kann die Vernetzung mit einer Elementgröße von 2 mm Feinstrukturen nur grob abbilden. Höhere Drücke begünstigen daher Instabilitäten im Materialmodell und geringere Drücke führen zu unvollständiger Ausformung der hochverstreckten Flaschen. Der Vorblasdruck dient dazu, den Preform während der Verfahzeit der Reckstange zu stabilisieren und wurde auf den Minimaldruck der Streckblasanlage von 5 bar eingestellt. Bei einem höheren Druck wird der Preform schneller deformiert, als die Reckstange verfährt. Dieser Prozesspunkt ist technisch nicht mehr sinnvoll. Die Infrarotheizstrecke der Streckblasanlage kann zum einen im gesamten (Global Emitter Power) eingestellt werden und bietet zum anderen die Möglichkeit, jedes einzelne Strahlerröhrchen individuell einzustellen. Dies ermöglicht eine axiale Temperaturprofilierung des Preforms. Die Aufheizzeit bezeichnet die Zeit, die der Preform im Ofen aufgeheizt wird. Die Ausgleichszeit ist die Zeit zwischen Verlassen des Ofens und Umformung im Werkzeug.

Für die Validierung der Versagensmodelle werden Betriebspunkt der Streckblasanlage angefahren, bei denen es entweder zum Weißbruch oder zum Versagen der Holkörper durch Rissbildung kommt oder die zu vollständig Ausformung der Flaschen führen. An der Anlage wurden die Leistungen der einzelnen Strahlerröhren der Infrarotheizstrecke, die gesamte Leistung der Infrarotheizstrecke, die Heizdauer und die Ausgleichzeiten erfasst und der Aufheizsimulation als Randbedingungen übergeben. Für die Umformsimulation wurden die Reckstangengeschwindigkeit, die Prozesszeiten sowie der Vorblas- und Fertigblasdruck an der Anlage aufgezeichnet. Die Validierung erfolgte qualitativ durch den Vergleich des Versagensverhalten zwischen Prozesssimulation und Experiment.

Werkzeug zur Fertigung der PET-Flaschen



Parameter	Einheit	Wert
Vorblasdruck	[bar]	5
Fertigblasdruck	[bar]	25
Leistung Strahler 1	[%]	50
Leistung Strahler 2	[%]	70
Leistung Strahler 3	[%]	50
Leistung Strahler 4	[%]	70
Leistung Strahler 5	[%]	50
Leistung Strahler 6	[%]	70
Leistung Strahler 7	[%]	0
Leistung Strahler 8	[%]	0
Leistung Strahler 9	[%]	0
Leistung Strahler 10	[%]	0
Aufheizzeit	[s]	12
Ausgleichszeit	[s]	6

Tabelle 5.1: Konstante Streckblasparameter

Die Leistungsverteilung der einzelnen Strahlerröhrchen wurde konstant gehalten, und die Preformtemperatur über die Global Emitter Power (GEP) variiert. Dabei wurde die Leistung, wie in Tabelle 5.2 aufgelistet, zwischen 55 % und 100 % eingestellt.

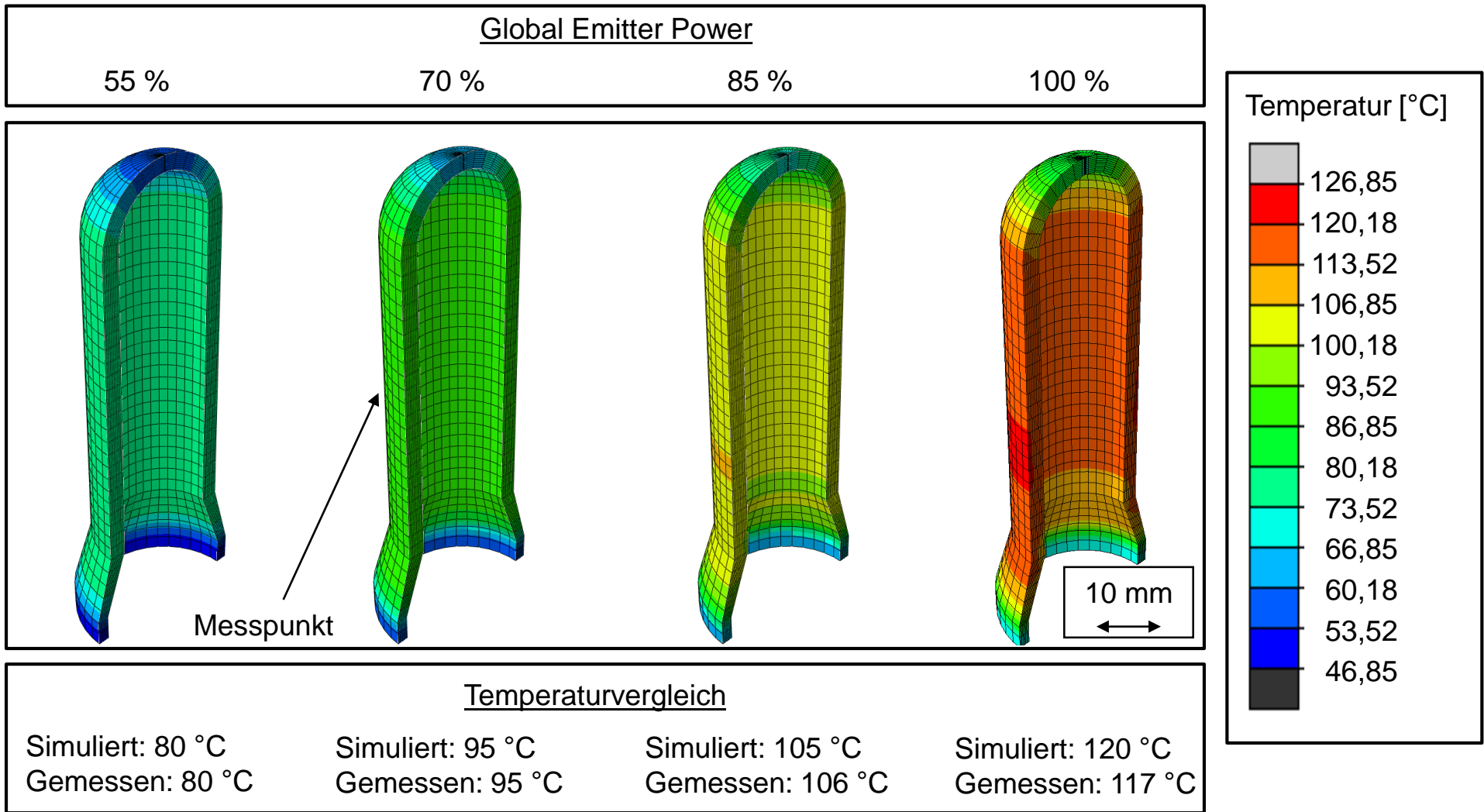
GEP [%]	Reckstangengeschwindigkeit [m/s]	Beschreibung des Versagens
55	1,4	Versagen beim Recken
70	1,4	Auftritt von Weißbruch
85	1,4	Kein Versagen
100	1,4	Versagen beim Fertigblasen

Tabelle 5.2: Prozessparameter bei der Preformerwärmung

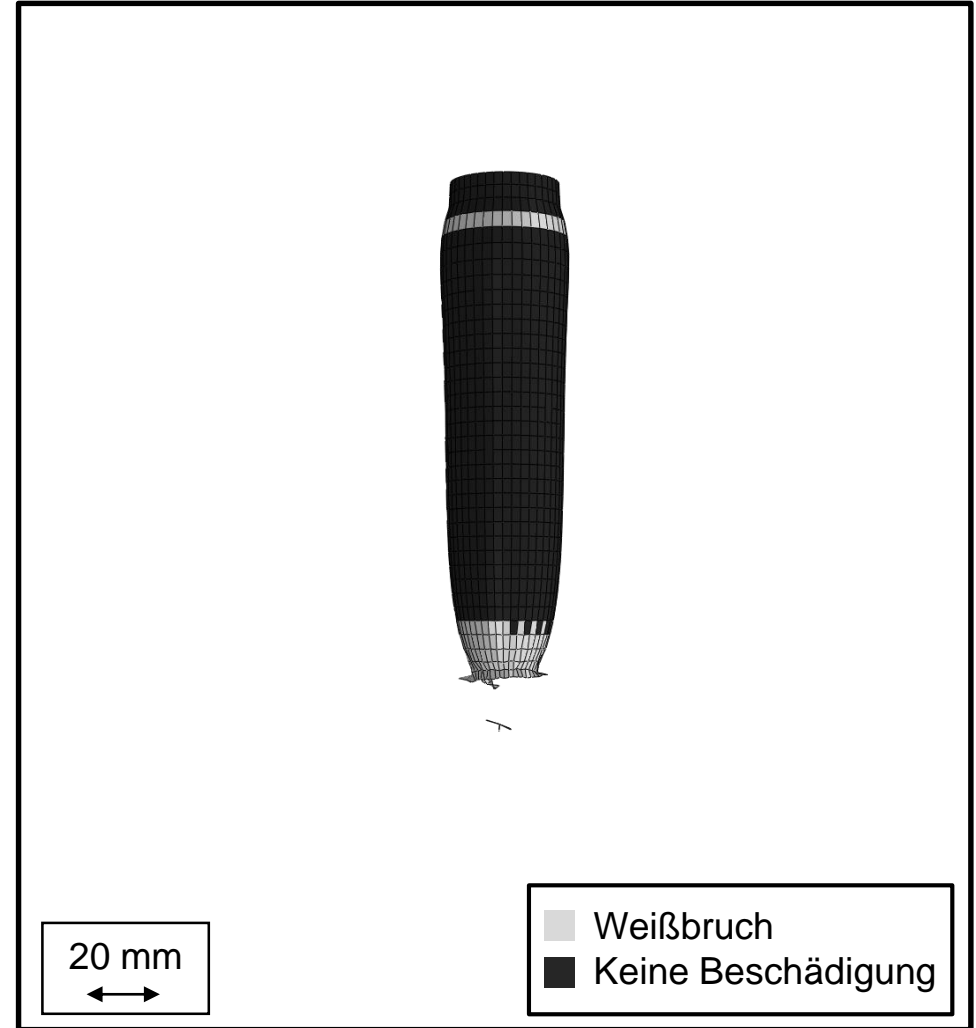
Die aus der Aufheizsimulation resultierenden Temperaturprofile der Preforms sind in Bild 5.5 in Abhängigkeit der GEP dargestellt. Die Streckblasanlage ist mit einem Pyrometer ausgestattet, welcher die Oberflächentemperatur punktuell auf mittlerer Preformhöhe misst. Diese experimentellen Messwerte sind der thermischen Simulation an dieser Stelle gegenübergestellt, um die Aufheizsimulation zu validieren. Im unteren und mittleren Temperaturbereich stimmt die simulierte und gemessene Temperatur überein. Im hohen Temperaturbereich kommt es zu einer Abweichung von bis zu 3 °C. Mögliche Ursachen für diese Abweichung können sowohl im Bereich der Simulation als auch in der Messtechnik liegen. Aufgrund der geringen Abweichung wurde die simulierte Temperaturverteilung im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens eingesetzt.

Im nächsten Schritt wurde die Temperaturverteilung zusammen mit den Prozessparametern der Umformsimulation übergeben. Zuerst wurde das Maximaldehnungs-Versagenskriterium in Anhängigkeit der vier Temperaturprofile angewendet. In Bild 5.6 bis 5.9 sind die in der Streckblasanlage gefertigten Flaschen den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Die Ausgabe der Simulation wurde so eingestellt, dass unbeschädigte Elemente in schwarz und

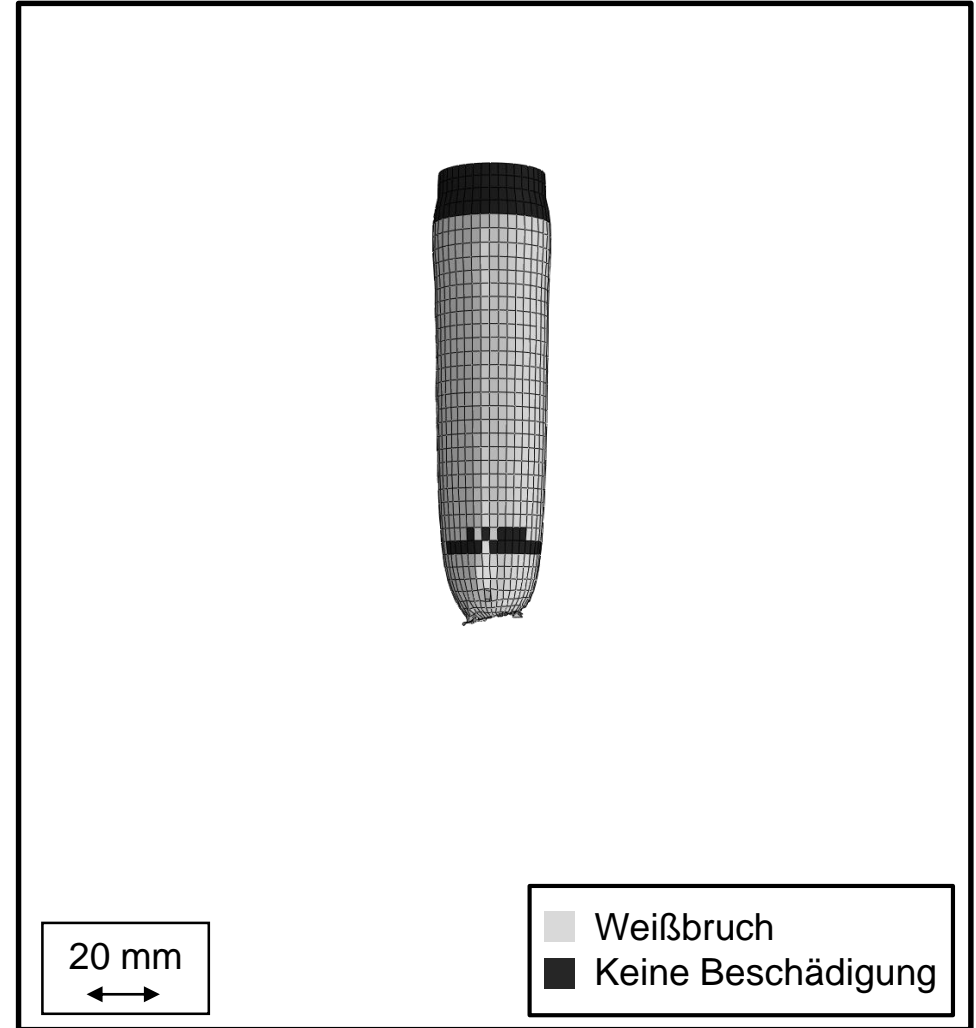
Simulierte Temperaturprofile des Preforms



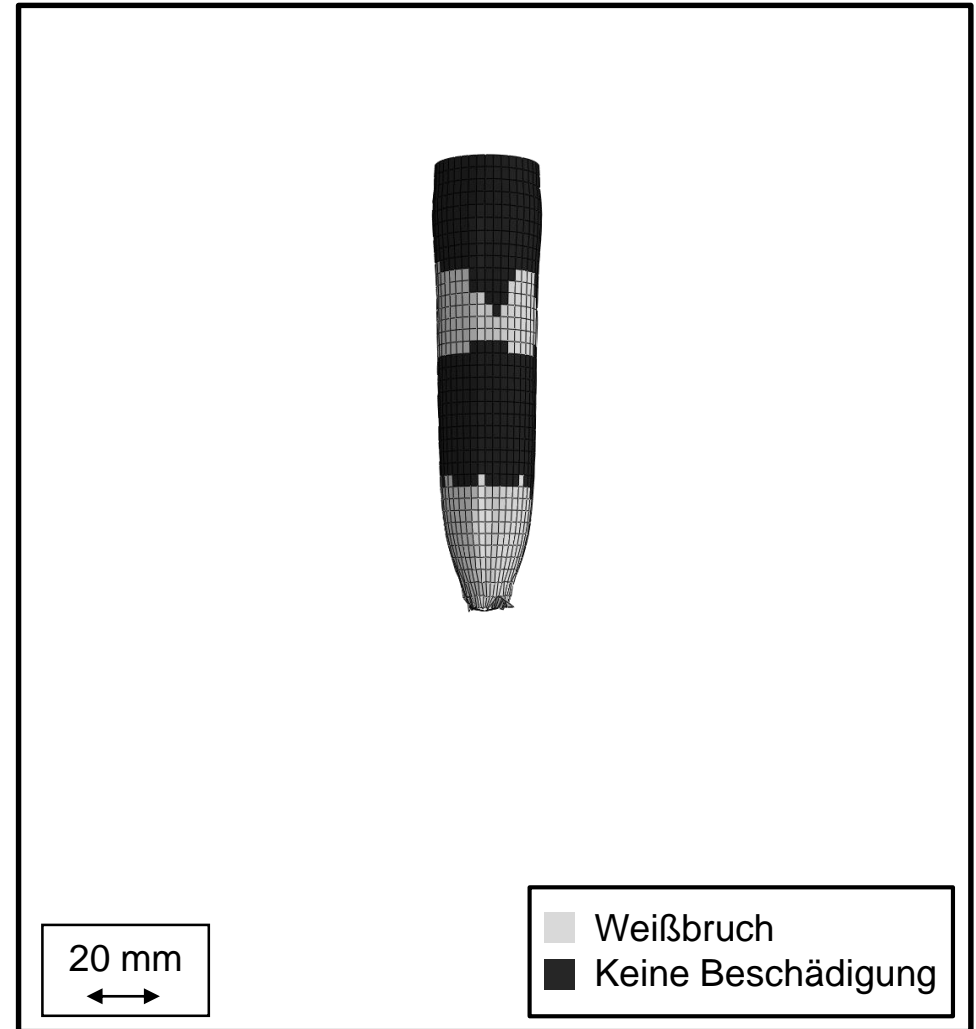
Validierung des Maximaldehnungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 100 %



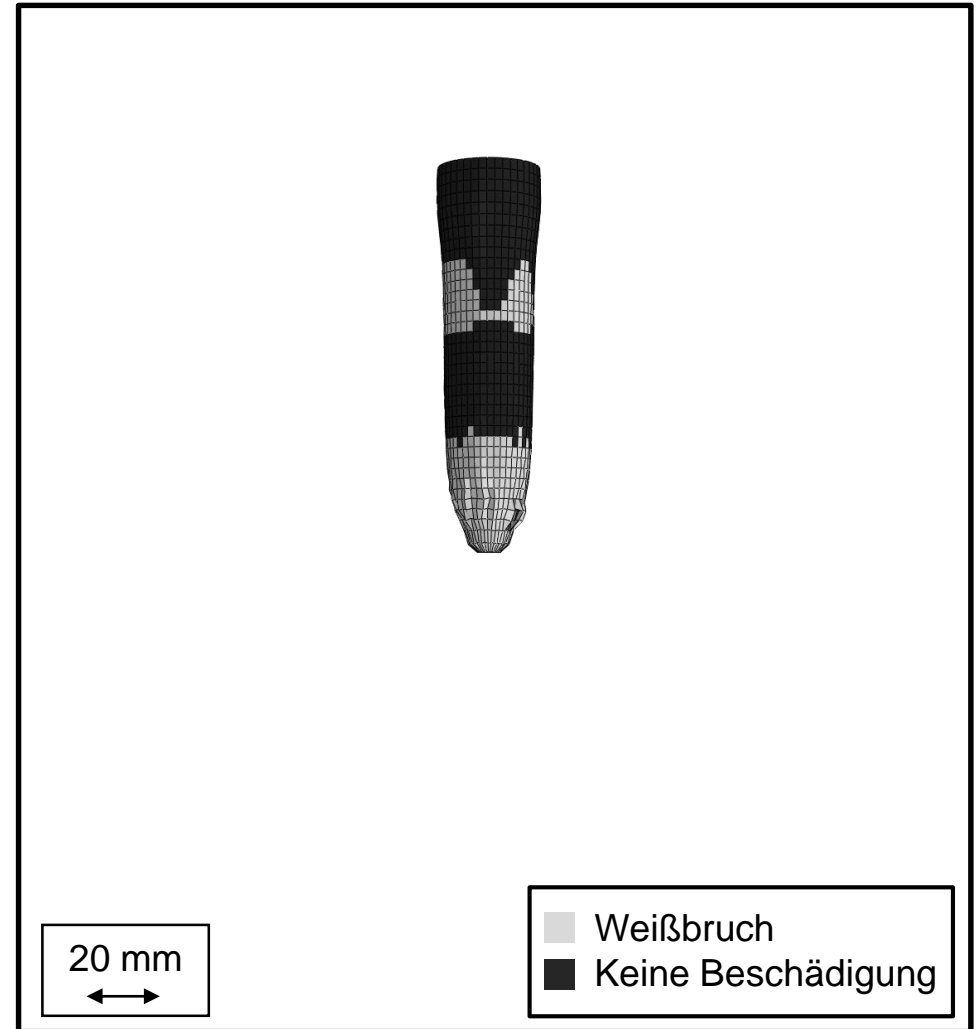
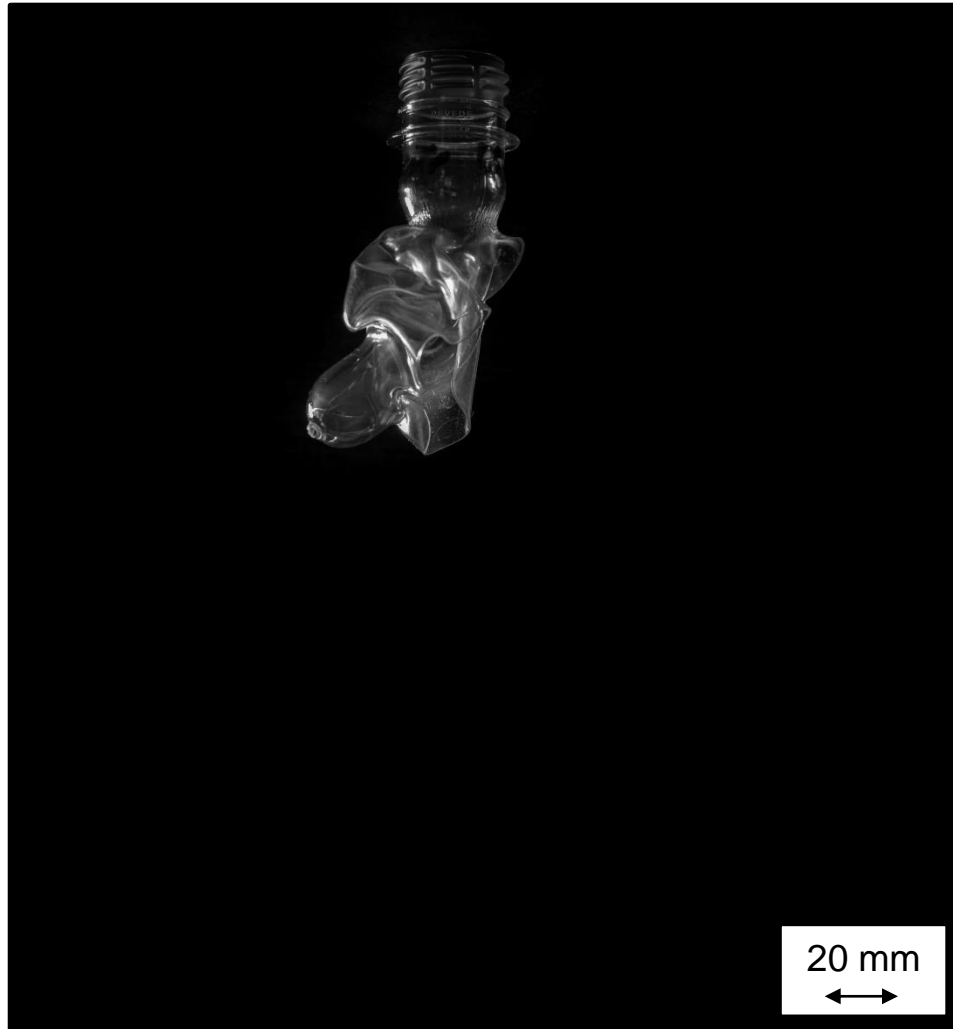
Validierung des Maximaldehnungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 85 %



Validierung des Maximaldehnungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 70 %



Validierung des Maximaldehnungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 55 %



Elemente, die Weißbruch aufweisen hellgrau dargestellt werden. Elemente, bei denen Materialbruch auftritt, wurden in der Simulation deaktiviert. Für alle vier Temperaturprofile kann keine Übereinstimmung der Simulation mit den gefertigten Flaschen festgestellt werden. Bei der Umformsimulation kommt es zu einem verfrühten Preformversagen, der von der Reckstange durchstochen wird. Daher kann das Maximaldehnungs-Versagenskriterium den realen Versagensverlauf nicht abbilden.

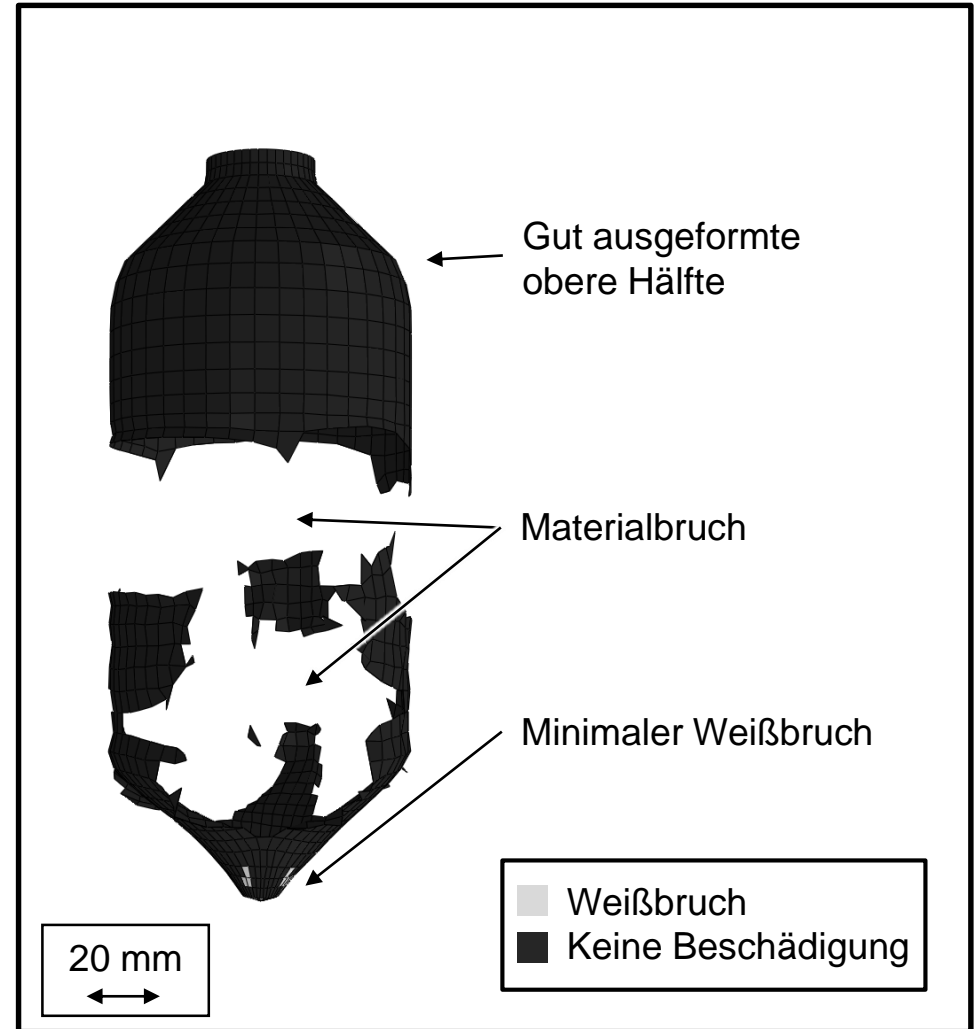
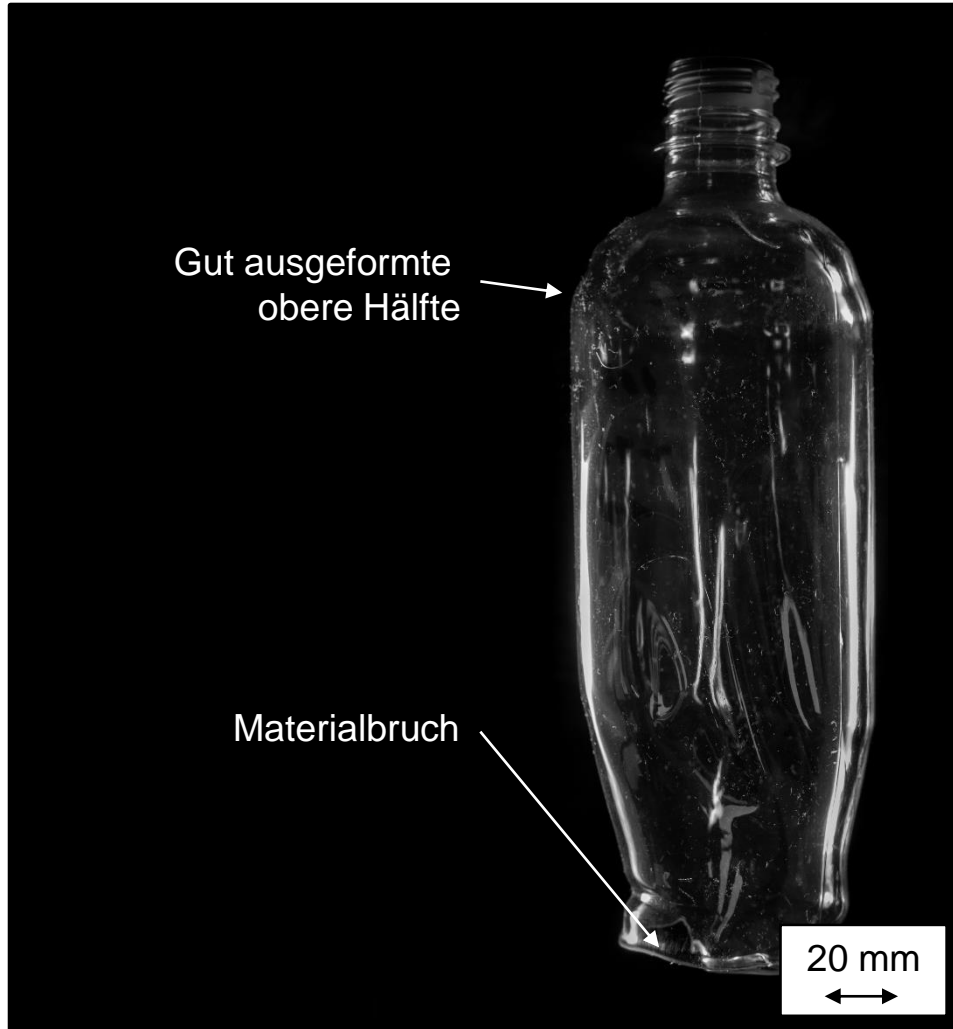
In Bild 5.10 ist auf der linken Seite die PET Flasche dargestellt, die bei einer GPE von 100 % umgeformt wurde. Die Flasche wurde fast vollständig ausgeformt, bis es auf der unteren linken Seite zum Materialbruch kommt. An keiner Stelle der Flasche ist eine weiße Verfärbung zu erkennen, die auf Weißbruch hindeutet. Auf der rechten Seite des Bildes 5.10 ist das dazugehörige Simulationsergebnis dargestellt. In der Simulation tritt im mittleren und unteren Flaschenbereich Materialbruch auf. Der obere Teil der simulierten Flasche stimmt mit der realen Flasche überein. Bis auf eine kleine Stelle an der Reckstangenspitze ist auch in der Simulation kein Weißbruch zu erkennen. Allgemein wird das Versagen bei dieser GEP richtig vorhergesagt. Die Abweichungen sind durch die Temperaturen bei dieser GEP (Bild 5.5) zu erklären. Das Materialmodell und das Versagensmodell wurde in einem Temperaturbereich von 95 °C bis 105 °C kalibriert. Das simulierte Temperaturmaximum liegt jedoch bei 120 °C und das Materialverhalten wird extrapoliert. Damit kann eine genaue Vorhersage des Materialverhaltes nicht garantiert werden.

Im Bild 5.11 ist die PET Flasche, hergestellt bei einer GPE von 85 %, abgebildet. Die Temperatur des Preforms liegt weitestgehend im Bereich zwischen 95 °C und 105 °C und befindet sich damit im kalibrierten Bereich. Sowohl in der Simulation als auch bei der realen Flasche ist eine vollständige Ausformung zu erkennen und kein Materialbruch tritt auf. Im Bodenbereich ist eine weiße Verfärbung des PET zu erkennen. Die Simulation sagt im gleichen Bereich einen Weißbruch vorher. Insgesamt wird das Umformverhalten bei diesem Temperaturprofil von der Simulation exakt dargestellt.

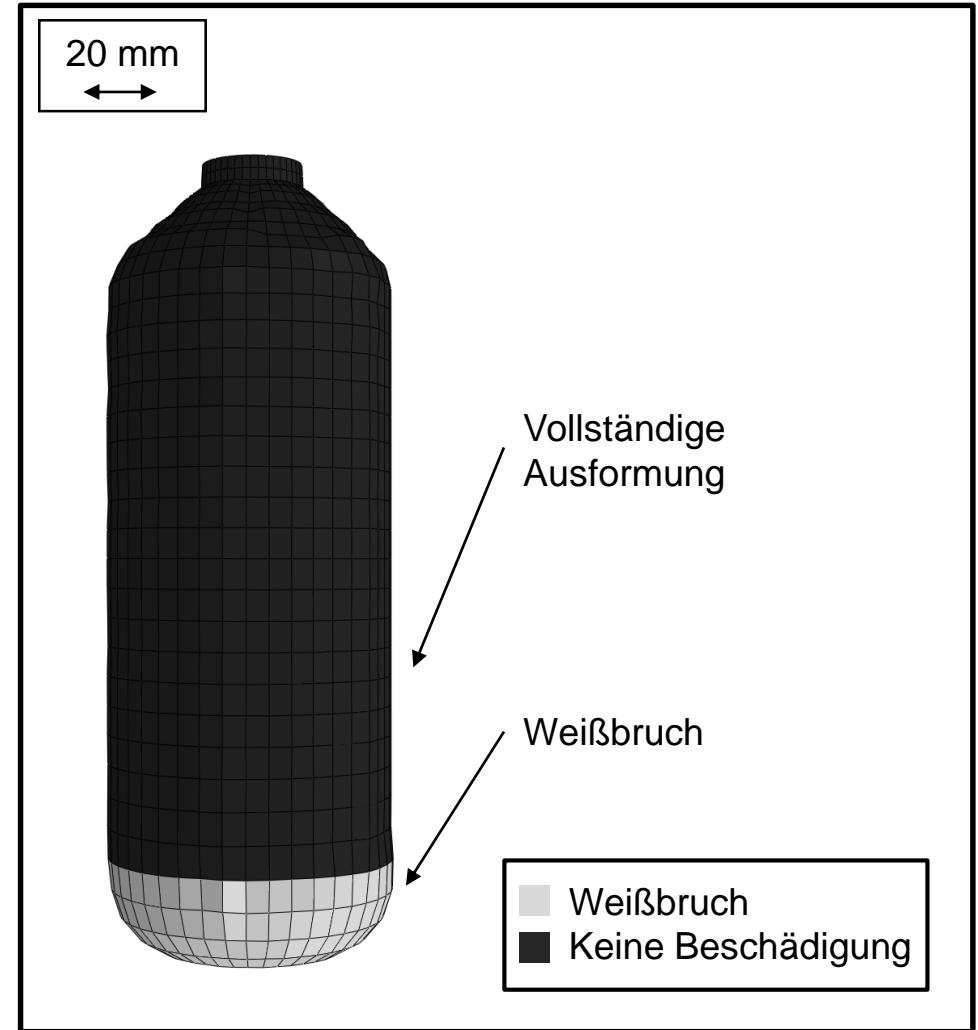
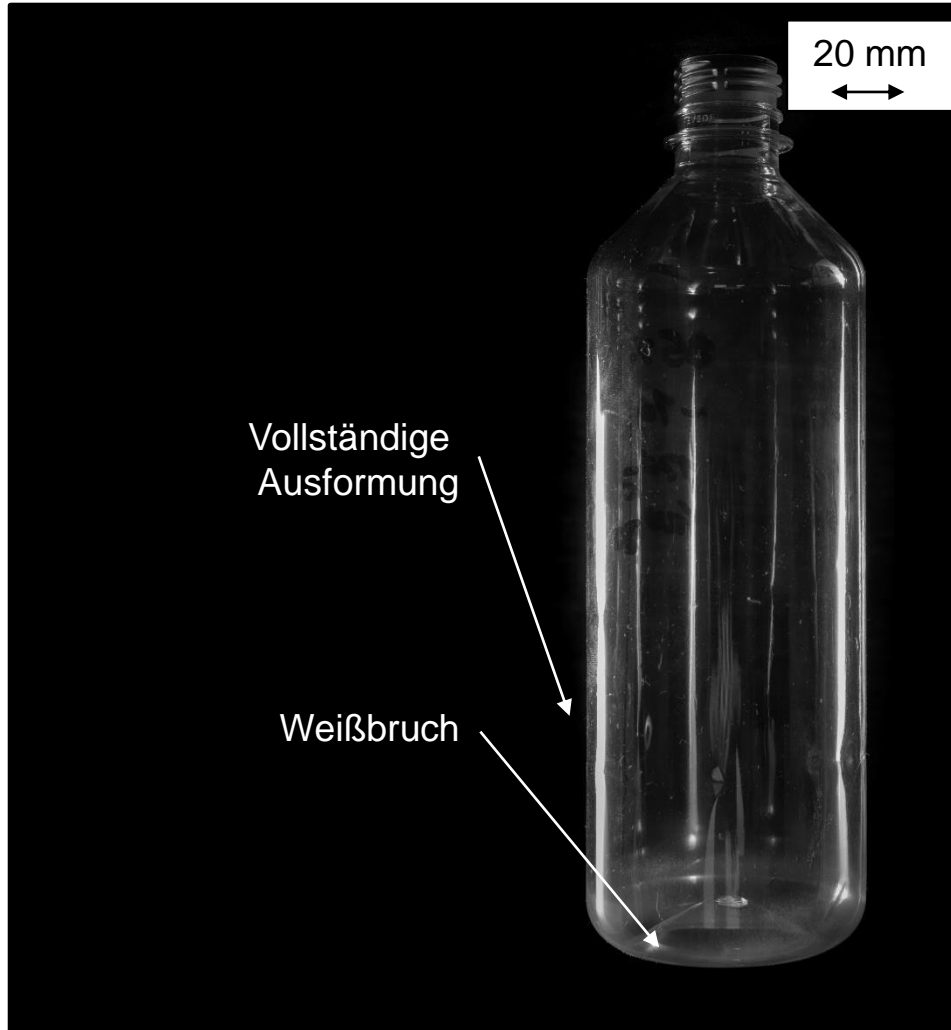
Auch bei einer GPE von 70 % (Bild 5.12) liegt Temperatur des Preforms weitestgehend im kalibrierten Bereich. Die Flasche wurde sowohl experimentell als auch simulativ vollständig ausgeformt. Im gesamten Wand- und Bodenbereich liegt eine weiße Verfärbung der Flasche vor. Nur im Bereich des Flaschenhalses kommt es zu keiner Beschädigung des Materials. Dieses Verhalten wird durch die Simulation exakt vorhergesagt.

In Bild 5.13 sind die Ergebnisse für eine GEP von 55 % dargestellt. Weder in der Simulation noch im realen Versuch wurde der Preform ausgeformt. Beide Darstellungen zeigen ein Versagen durch Materialbruch am Anfang des Umformvorgangs. Simulation und Realität weisen Weißbruch nahe dem Materialbruch auf. In der Simulation kommt es auch im Flaschenhals zum Weißbruch. Zudem sind die Positionen des Materialbruchs unterschiedlich.

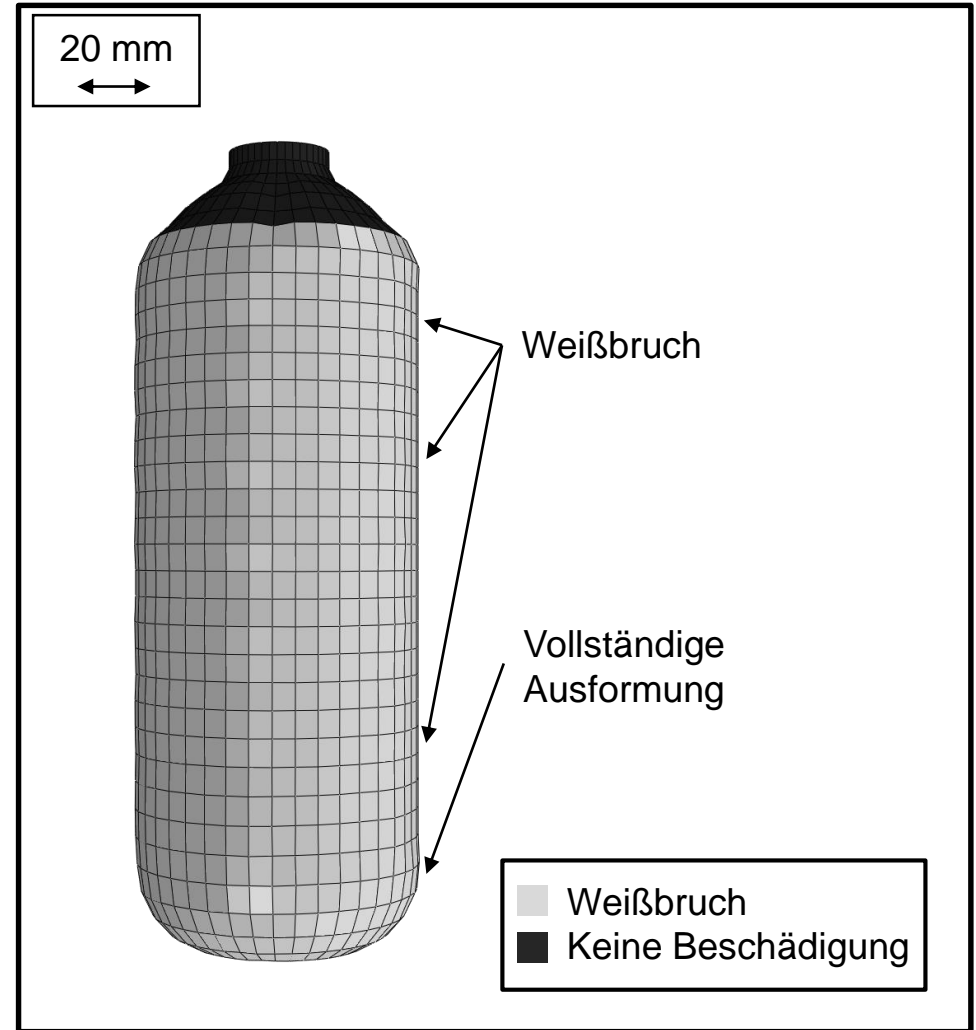
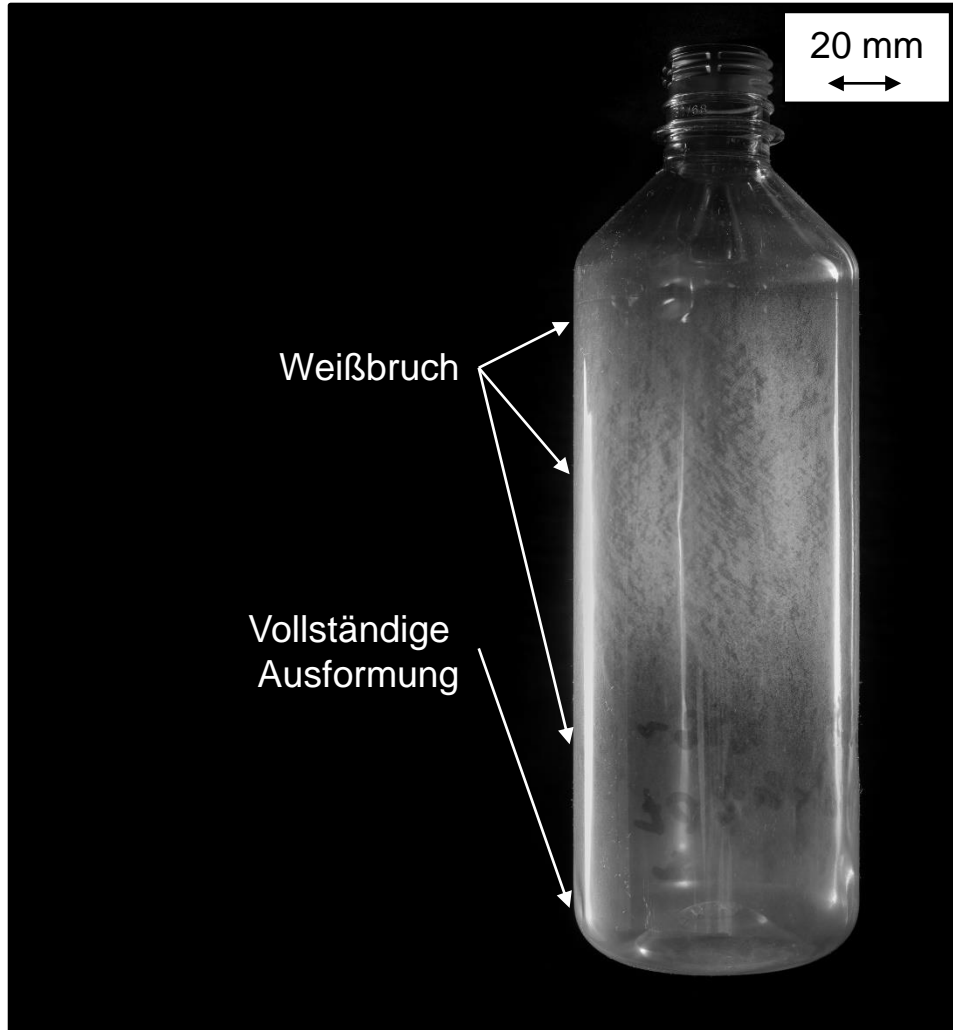
Validierung des Maximalspannungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 100 %



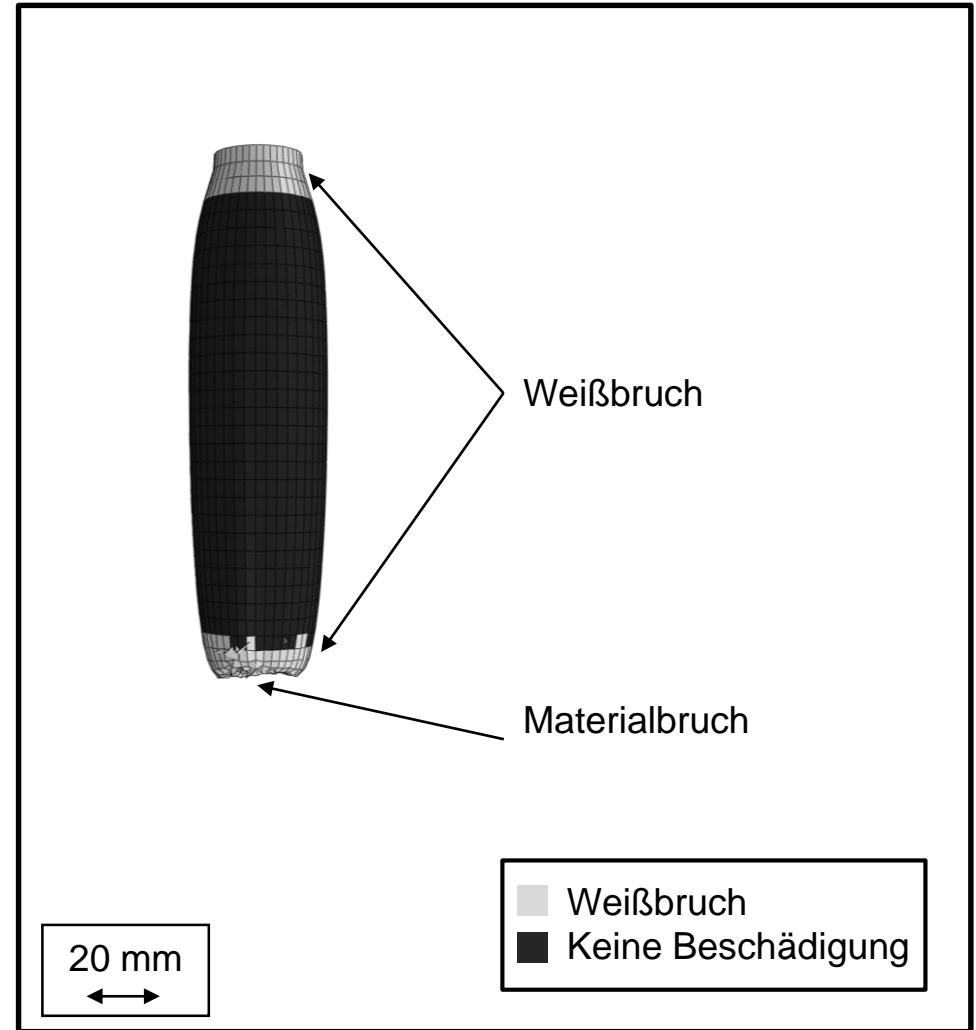
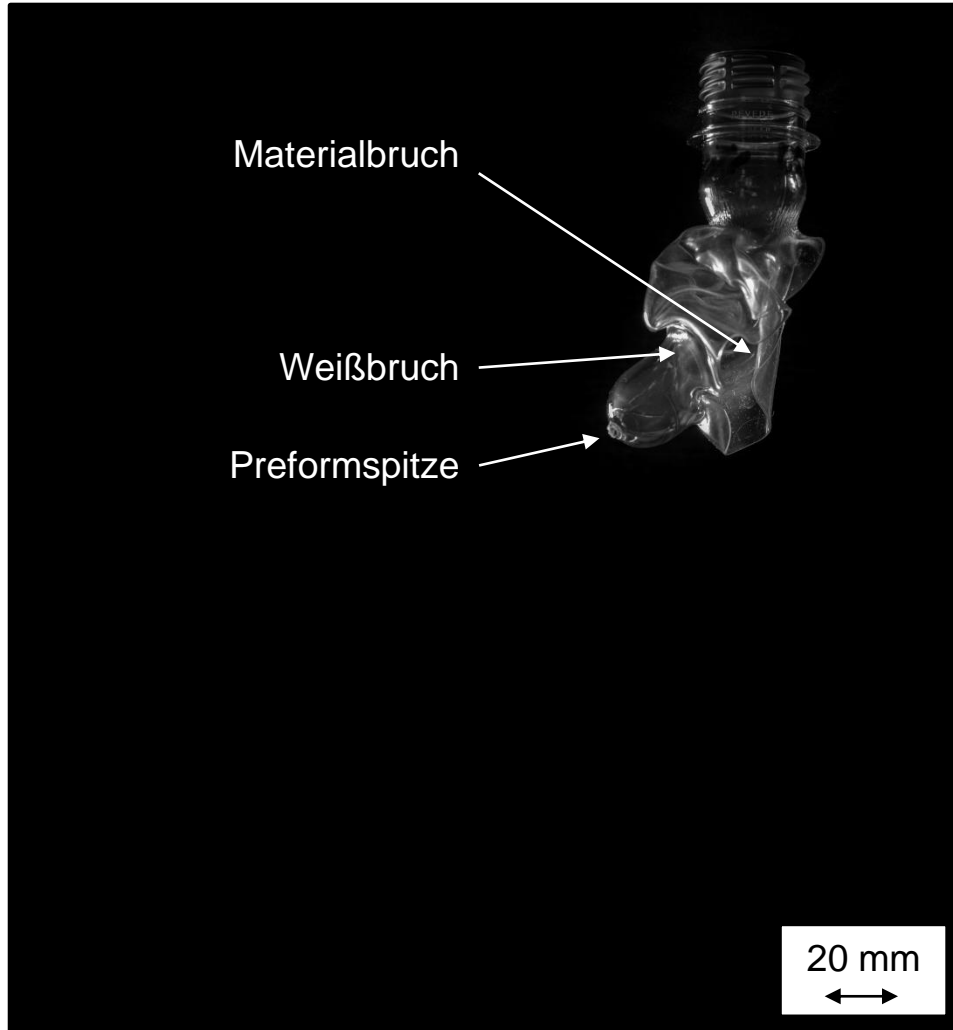
Validierung des Maximalspannungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 85 %



Validierung des Maximalspannungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 70 %



Validierung des Maximalspannungs-Versagenskriterium bei einer Global Emitter Power von 55 %



Im realen Umformvorgang ist die Preformspitze unbeschädigt und der Bruch tritt seitlich auf. Die Simulation sagt ein Materialbruch in der Preformspitze vorher. Insgesamt kann mit der Simulation das Umformverhalten jedoch tendenziell vorhergesagt werden, obwohl die Preformtemperatur in der Preformmitte (Bild 5.5) weit unterhalb des kalibrierten Bereiches liegt.

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss der Dehnrates auf das Versagensverhalten untersucht. Dabei wurde die Reckstangengeschwindigkeit variiert, um die Dehnrates des Materials zu beeinflussen. Im industriellen Maßstab wird eine Reckstangengeschwindigkeit von bis zu 2 m/s genutzt, um die Holkörper wirtschaftlich umzuformen [NMY16]. Die in diesem Forschungsvorhaben genutzte Laboranlage erreicht eine maximale Geschwindigkeit von 1,4 m/s, die in den vorherigen Versuchen eingestellt wurde. Wie aus den Bildern 5.9 und 5.13 zu erkennen ist, kommt es nur bei einer geringen Preformtemperatur von 80 °C (55 % GEP) zum Versagen des Preforms während der Vorverstreckung. Daher wurde für die Variation der Dehnrates, und somit der Reckstangengeschwindigkeit eine geringe Preformtemperatur gewählt, die bei einer Reckstangengeschwindigkeit von 1,4 m/s gerade zum Versagen führt. Der Theorie zur Folge sollte eine Reduzierung der Reckstangengeschwindigkeit dazu führen, dass das Material später versagt. Für eine Reckstangengeschwindigkeit von 1,4 m/s liegt geringste Strahlerleistung, bei der die in der Laboranlage hergestellten Flaschen kein Materialbruch aufweisen, bei 56 % GEP. Dementsprechend wurden die GEP auf 55 % reduziert, um die Temperatur weiter abzusenken. Bei ein Reckstangengeschwindigkeit von 1,4 m/s führt diese Preformtemperatur zum Materialbruch (Bild 5.9 und Bild 5.13). Jedoch bewirkt auch eine Reduzierung der Reckstangengeschwindigkeit auf 0,2 m/s in diesem Temperaturfenster den Materialbruch. Daher war es nicht möglich, den Einfluss der Dehnrates auf Basis einer Variation der Reckstangengeschwindigkeit zu untersuchen. Eine weitere Möglichkeit, die Dehnrates zu beeinflussen, ist der Druckgradient, der beim Beaufschlagen des Fertigblasdrucks auftritt. Dieser Gradient bestimmt die Geschwindigkeit, mit der das Material umgeformt wird. An der Laboranlage ist der Gradient jedoch konstant und kann nicht beeinflusst werden. Daher ist eine Validierung der Dehnrates als Einflussgröße auf das Versagensverhalten mit der genutzten Laborstreckblasanlage nicht möglich.

Zusammengefasst ist eine Vorhersage des Umformverhaltens und die Vorhersage von Weißbruch und Materialbruch mit der einem Maximalspannungs-Versagenskriterium erreichbar. Im kalibrierten Temperaturbereich kann eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment erreicht werden. Außerhalb dieses Bereichs kann das Materialverhalten qualitativ vorhergesagt werden. Die Implementierung eines Maximaldehnungs-Versagenskriterium führt jedoch zu keiner realitätsnahen Vorhersage.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Um die Entwicklung von PET Verpackungsprodukten mit immer geringeren Wanddicken und reduziertem Materialeinsatz im Streckblasprozess zu ermöglichen, ist es notwendig, genaue Kenntnisse über das Materialverhalten im hochverstreckten Zustand zu haben. Dazu zählt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Werkstoffes im prozessrelevanten Temperatur- und Dehnratenbereich. Ein gut kalibriertes Materialmodell ist der notwendige Schlüssel für eine genaue Umformsimulation. Des Weiteren muss die Simulation um ein Versagensmodell erweitert werden, das die Grenzen des Werkstoffes beschreibt. Damit wird es möglich, das maximale Werkstoffpotenzial von PET bei der Herstellung hochversteckter Hohlkörper durch eine hohe Vorhersagegenauigkeit des dehnreologischen Verformungsverhaltens auszuschöpfen.

Das angepasste Membran-Inflations-Rheometer ermöglicht eine genaue Analyse des Deformationsverhaltens und schlussendlich auch des Versagensverhaltens in einer isothermen Umgebung, bei in einem weiten Bereich frei einstellbaren Temperaturen von 20 °C bis 200 °C und Dehnraten von $0,1 \text{ s}^{-1}$ bis 100 s^{-1} . Mit der zusätzlich entwickelten Auswertungsroutine kann das Materialverhalten ausgewertet und Materialversagen detektiert werden. Neben dem Materialbruch wird auch das Auftreten von Weißbruch erkannt. Der Weißbruch ist im industriellen Umfeld ein wichtiges Kriterium, denn die weiße Verfärbung führt zu optischen Mängeln und damit zum Produktausschuss.

Für die Versagensvorhersage wurde ein Maximaldehnungs- und ein Maximalspannungs-Versagenskriterium entwickelt und mit den dehnreologischen Messungen aus dem Membran-Inflations-Rheometer kalibriert. Hierzu wurden vier verschiedene Koeffizientensätze konfiguriert und verglichen. Gezeigt wurde, dass eine Kalibrierung über den gesamten Temperatur- und Dehnratenbereich einer Kalibrierung von Teilbereichen im betrachteten Parameterbereich vorzuziehen ist. Im nächsten Schritt wurden das Materialmodell sowie die Versagenskriterien in die zweistufige Prozesssimulation mittels einer Abaqus Subroutine implementiert. In einer Aufheizsimulation wird der Strahlungsaustausch der Infrarotheizstrecke mit dem Preform simuliert und die Preformtemperaturverteilung berechnet. Zusammen mit dieser Aufheizsimulation kann das Deformationsverhalten des Preforms in der Umformsimulation abgebildet werden.

Die Validierung der Simulation mittels in einer Laboranlage verstreckten PET-Flaschen hat gezeigt, dass sowohl Umformung als auch das Versagen simuliert werden kann. Das Maximalspannungs-Versagenskriterium führt zu aussagekräftigen Ergebnissen bei der Vorhersage von Weiß- und Materialbruch. Während im kalibrierten Temperatur- (95 °C bis 105°C) und Dehnratenbereich (1 s^{-1} bis 100 s^{-1}) die Vorhersagegenauigkeit am höchsten ist,

kann auch im extrapolierten Temperaturbereich (außerhalb von 95 °C bis 105 °C) eine qualitative Aussage über das Versagensverhalten getroffen werden.

Durch die Ergebnisse sind die kmU der Streckblasbranche in der Lage, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, indem sie Hohlkörper mit sehr geringen Wanddicken simulativ auslegen und neue Märkte erschließen sowie Material einsparen können. Weiterhin wurde ein großer Erkenntnisgewinn im Zusammenhang mit dem Prozess- und Materialverhalten von PET bei hohen Verstreckgraden erzielt. In zukünftigen Forschungsprojekten können die Versagensmodelle weiter optimiert werden, sodass eine Kalibrierung über das gesamten Prozessparameterfenster mit einem reduzierten Messdatensatz erfolgen kann. Weiterhin ist die Übertragung des Materialwissen auf industrielle Prozesse hilfreich, um die Ergebnisse der Simulation in die Praxis zu übertragen.

7 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

7.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Zeitrahmen: 1. PbA: 19.06.2019 2. PbA: 18.02.2020 3. PbA: 30.10.2020
<p>Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein intensiver Dialog mit den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses geführt. Um eine breite Umsetzung der Projektergebnisse zu erzielen, spiegelte der Ausschuss den potenziellen Nutzerkreis wider. In diesem waren sowohl Anlagenhersteller als auch kunststoffverarbeitende Unternehmen vertreten, die einen repräsentativen Querschnitt an Firmen darstellen, die sich aktiv mit der industriellen Herstellung von steckgeblasenen Holzkörpern beschäftigen. Die erzielten Ergebnisse wurden dem PbA zu Beginn und während der Projektlaufzeit vorgestellt. In diesem Zusammenhang wurden die Vorgehensweise und die Ergebnisse mit den Unternehmenvertretern diskutiert. Auf Basis dieses intensiven Dialogs konnten die Unternehmen das erworbene Wissen mit in ihren Betrieb transferieren</p>	
Maßnahme: Fachbeiratsgruppe	Zeitrahmen: 04.-06.11.2019 07.-09.12.2020
<p>Das Forschungsvorhaben wurde in der Fachbeiratsgruppe Blasformen der Fördervereinigung des IKV vorgestellt und mit dem potenziellen Nutzerkreis diskutiert. Der Teilnehmerkreis der Fachbeiratsgruppen umfasst ca. 300 Mitgliedsfirmen, von denen der wesentliche Teil klein- und mittelständisch strukturiert ist. Somit wurde der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen. Des Weiteren konnten über die intensive Diskussion in diesem Forum neue Aspekte im Forschungsprojekt berücksichtigt und somit die industrielle Relevanz des Forschungsvorhabens weiter akzentuiert werden.</p>	
Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Zeitrahmen: Kontinuierlich während und nach der Projektlaufzeit

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden mit Ingenieurbüros, Anlagenherstellern und Anwendern im Dialog diskutiert. Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis dieses Vorhabens gehören, wurden gezielt angesprochen. Ein Austausch zu den Inhalten des Forschungsvorhaben fand beispielsweise während des Returnable PET Forums (15.09.2019, Aachen) sowie während der K2019 (16.-23.10.2019, Düsseldorf) mit Vertretern verschiedener Unternehmen statt.

Maßnahme:

Wissenschaftliche Publikationen

Eine Veröffentlichung zum Thema „Improvement of Material Modelling for Lightweight Bottles“ ist in der 2. Ausgabe der Zeitschrift compETence 2019 (PETnology) erschienen.

Eine weitere Veröffentlichung mit dem Titel „PET to the limit“ ist in der 2. Ausgabe der Zeitschrift compETence 2020 erschienen.

Maßnahme:

Beratung von Unternehmen

Zeitraumen:

Während der Laufzeit / nach Abschluss

Das im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitete Wissen fließt in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Interessierten Unternehmen wurde schon während der Projektlaufzeit die Möglichkeit gegeben, Fragestellung zu der konkreten Umsetzung der Versagenskriteriums für die Umformsimulation von Thermoplasten zu besprechen.

Maßnahme:

Akademische Lehre / Personaltransfer

Zeitraumen:

Während der Laufzeit / nach Abschluss

An der Bearbeitung der Aufgabenstellung waren folgende Studierende als Hilfskräfte beteiligt:

- Timo Witte B.Sc.
- Gabriel Stawny, B.Sc.
- Sören Lohmann, B.Sc.
- Lena Marbach, M.Sc.

Zusätzlich werden Bachelor- und Masterarbeiten zu dem Themenkomplex angeboten. Das erarbeitete Wissen können die Studenten später als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen. Die erarbeiteten Erkenntnisse fließen zusätzlich in Lehrveranstaltungen, wie beispielsweise der Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II/III“, „Modellbildung und Simulation in der Kunststoff- und Textiltechnik“, „Fügen und

Umformen“ werden auf diesem Wege Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure.

▪ Geplante Transfermaßnahmen:

Maßnahme: Forschungsbericht	Zeitraumen: 1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden in einem detaillierten und ausführlichen Forschungsbericht dokumentiert. Dieser Forschungsbericht wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Somit kann die erarbeitete Methodik zur Vorhersage von Materialversagen und die gewonnenen Erkenntnisse von den Unternehmen in die betriebliche Praxis transferiert werden.	
Maßnahme: Bereitstellung der Berechnungsroutine	Q1/2021
Ein aufbereiteter und detailliert kommentierter Quelltext wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt.	
Beratung von Unternehmen	Kontinuierlich während und nach der Projektlaufzeit
Das im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitete Wissen fließt in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Interessierten Unternehmen wurde schon während der Projektlaufzeit die Möglichkeit gegeben, ergänzende bilaterale Projekte mit den Forschungsstellen durchzuführen, die die die Fragestellung der konkreten Umsetzung der Versagenskriteriums für Umformprozesse von Thermoplasten behandeln.	
Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen	nach Abschluss
Durch Vorträge und Posterpräsentationen auf Seminaren, Fachtagungen sowie nationalen und internationalen Konferenzen, wie z. B. dem 2022 stattfindenden Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik des IKV, oder der jährlich stattfindenden Konferenz Annual Technical Conference der Society of Plastics Engineers (ANTEC) wird das Fachpublikum direkt angesprochen.	
Hinweise in der Fachpresse	nach Abschluss