



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Philipp Suppinger

Optimierung eines Prozesses zur Charakterisierung des Materialverhaltens eines thermoplastischen Kunststoffes unter dynamischer Belastung durch Einbeziehung von Zug- und Druckversuchen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Philipp Suppinger

Optimierung eines Prozesses zur Charakterisierung des Materialverhaltens eines thermoplastischen Kunststoffes unter dynamischer Belastung durch Einbeziehung von Zug- und Druckversuchen

Masterthesis eingereicht im Rahmen des Masterstudiengangs

im Studiengang Fahrzeugbau mit Schwerpunkt Karosserieentwicklung
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Firma Autoliv B.V. & Co. KG
Abteilung ES1
Otto-Hahn-Straße 4
25335 Elmshorn

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Marsolek
Zweitprüfer: M.Eng. Stefan Schilling

Abgabedatum: 26.11.2019

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Philipp Suppinger

Thema der Masterthesis

Optimierung eines Prozesses zur Charakterisierung des Materialverhaltens eines thermoplastischen Kunststoffes unter dynamischer Belastung durch Einbeziehung von Zug- und Druckversuchen

Stichworte

LS-DYNA; Materialkalibrierung; Thermoplast; SAMP-1; Materialeigenschaften; Zugversuch; Druckversuch; Triaxialität; Validierung; Dehnrage; Hochgeschwindigkeit;

Kurzzusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, einen Prozess zur Kalibrierung des dynamischen Materialverhaltens eines Thermoplastes weiterzuentwickeln. Die Materialkalibrierung wird um den Druckversuch erweitert, bisher wurden für die Erstellung der Materialkarte nur Ergebnisse des Zugversuches genutzt. Eine Vorrichtung für Hochgeschwindigkeitszugversuche existiert bereits und wird in dieser Ausarbeitung genutzt. Ein Prüfstand für Druckversuche wird mithilfe der Simulation entwickelt. Das Material wird mithilfe des Materialmodelles SAMP-1 der Software LS-DYNA kalibriert und durch einen abschließenden Komponentenversuch und eine Produktsimulation validiert.

Name of Student

Philipp Suppinger

Title of the paper

Optimization of a process for characterizing the material behaviour of a thermoplastic under dynamic load by including tensile and compression tests

Keywords

LS-DYNA; material calibration; thermoplastic; SAMP-1; material properties; tensile test; compression test; triaxiality; validation; strain rate; high speed;

Abstract

The aim of this work was to further develop a process for calibrating the dynamic material behaviour of a thermoplastic. The material calibration is extended by the compression test, so far only results of the tensile test were used for the creation of the material model. A device for high-speed tensile tests already exists and is used in this paper. A test bench for compression tests is being developed with the aid of simulation. The material is calibrated using the material model SAMP-1 of the LS-DYNA software and validated by a final component test and a product simulation.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Theorie	3
1.1 Struktur der Polymere	3
1.2 Strukturmechanik	11
1.3 Materialmodell SAMP-1	24
1.4 Anforderungen an dynamische Versuche	27
2 Vorgehensweise und Zielsetzung	31
3 Ermittlung eines geeigneten Druckversuches	33
3.1 Konzeptvorstellung	33
3.2 Ergebnisse der Simulation der Druckversuche	35
3.3 Auswahl eines Versuches	39
4 Materialtests an einem Polyamid 6.6	40
4.1 Probenvorbereitung	41
4.2 Versuchsaufbau des Zug- und Druckversuches	47
4.3 Versuchsergebnisse der Druckversuche	48
4.4 Versuchsergebnisse des Zugversuches	50
4.5 Diskussion der Ergebnisse	52
5 Kalibrierung mithilfe eines Reverse Engineering Prozesses	54
5.1 Benchmark zugbasierte Materialkarte	54
5.2 Optimierungsverfahren	55
5.3 Vorstellung des Prozesses	57
5.4 Optimierung der Materialkarte	58
6 Validierung der Materialkarte	63
6.1 Auswahl des Komponentenversuches	63
6.2 Validierung der Materialkarte auf Basis des Komponentenversuches	65
6.3 Validierung der Materialkarte in der Produktsimulation	66
6.4 Diskussion	67
7 Zusammenfassung und Ausblick	69
Literaturverzeichnis	71

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 VERNETZUNGSGRAD VON POLYMERGRUPPEN (EIGENE DARSTELLUNG).....	4
ABBILDUNG 2 SCHEMATISCHER AUFBAU DER POLYMERE (RÖSLER, 2006)	5
ABBILDUNG 3 SPANNUNGS-/DEHNUNGSVERHALTEN VON POLYMEREN SCHEMATISCH IN ANLEHNUNG AN (STOMMEL, ET AL., 2011).....	6
ABBILDUNG 4 DARSTELLUNG DES EINFLUSSES DER BELASTUNGSGESCHWINDIGKEIT AUF POLYMERE (EIGENE DARSTELLUNG).....	7
ABBILDUNG 5 VISKO-ELASTISCHES UND -PLASTISCHES MATERIALVERHALTEN (STANG, HAW HAMBURG 2015)	7
ABBILDUNG 6 DEFORMATIONSMCHANISMEN EINES THERMOPLASTES (RÖSLER, 2006)	8
ABBILDUNG 7 MIKROSTRUKTUR EINES CRAZES, ENTNOMMEN AUS J.RÖSLER, 2006	9
ABBILDUNG 8 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER FEUCHTE (STANG, HAW HAMBURG 2015).....	9
ABBILDUNG 9 SCHUBBELASTUNG AUF EINEN KÖRPER (EIGENE DARSTELLUNG)	11
ABBILDUNG 10 KOMPONENTEN DES SPANNUNGSTENSORS IN ANLEHNUNG AN (GROSS, ET AL., 2007)	13
ABBILDUNG 11 DER VON MISES FLIEßKÖRPER; LINKS: IM HAUPTSPANNUNGSRAUM, RECHTS: IN DERHAUPTSPANNUNGSEBENE (STANG, HAW HAMBURG 2015)	18
ABBILDUNG 12 DRUCKER-PRAGER FLIEßKÖRPER LINKS: HAUPTSPANNUNGSRAUM, RECHTS: HAUPTSPANNUNGSEBENE (STANG, HAW HAMBURG 2015)	19
ABBILDUNG 13 ZUGVERSUCH MIT ENTLASTUNG (EIGENE DARSTELLUNG).....	20
ABBILDUNG 14 QUADRATISCHE FLIEßFLÄCHE F UND PLASTISCHES POTENTIAL G FÜR POLYMERE IN ANLEHNUNG AN (DAIYAN, 2011).....	21
ABBILDUNG 15 ISOTROPE VERFESTIGUNG IN ANLEHNUNG AN (RÖSLER, 2006)	22
ABBILDUNG 16 KINEMATISCHE VERFESTIGUNG (RÖSLER, 2006).....	23
ABBILDUNG 17 FLIEßBEDINGUNG IN DER HAUPTSPANNUNGSEBENE (KOLLING, 2005)	26
ABBILDUNG 18 DEHN RATENVERLAUF EINES QUASISTATISCHEN ZUGVERSUCHES (EIGENE DARSTELLUNG)	28
ABBILDUNG 19 LASTAUFBRINGUNG AUF EINE ZUGPROBE (EIGENE DARSTELLUNG).....	29
ABBILDUNG 20 VORGEHENSWEISE DER AUSARBEITUNG ZUR ERSTELLUNG UND VALIDIERUNG EINER MATERIALKARTE (EIGENE DARSTELLUNG)	32
ABBILDUNG 21 FLACHSTAUCHVERSUCH [LOKILECH HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:FLACHSTAUCHVERSUCH.SVG].....	33
ABBILDUNG 22 KOMPRESSIONSVERSUCH EINER PLATTE (EIGENE DARSTELLUNG).....	34
ABBILDUNG 23 ZUGPROBE UNTER DRUCKBELASTUNG (EIGENE DARSTELLUNG)	34
ABBILDUNG 24 FLACHSTAUCHVERSUCH IN DER	35
ABBILDUNG 25 VERGLEICH VON ZWEI UNTERSCHIEDLICHEN PROBENGEOMETRIEN (EIGENE DARSTELLUNG)	36
ABBILDUNG 26 QUADERSTAUCHVERSUCH IN DER SIMULATION (EIGENE DARSTELLUNG)	37
ABBILDUNG 27 ZUGPROBE UNTER DRUCKBELASTUNG (EIGENE DARSTELLUNG)	38
ABBILDUNG 28 PROBENGEOMETRIEN FÜR DIE MATERIALVERSUCHE (EIGENE DARSTELLUNG).....	41
ABBILDUNG 29 DAUER DER KONDITIONIERUNG VERSCHIEDENER PROBENDICKEN BEI RAUM-TEMPERATUR NACH DIN ISO 291 (EIGENE DARSTELLUNG)	42
ABBILDUNG 30 DARSTELLUNG DES GEWICHTSVERLAUFES BIS ZUR ERREICHUNG DES ZUSTANDES "NASS" (EIGENE DARSTELLUNG)	43
ABBILDUNG 31 DARSTELLUNG DES GEWICHTSVERLAUFES BIS ZUR ERREICHUNG DES ZUSTANDES "TROCKEN" (EIGENE DARSTELLUNG) ..	44
ABBILDUNG 32 TEMPERATURVERLAUF NACH ENTNAHME AUS TIEFKÜHLTRUHE/OFEN (EIGENE DARSTELLUNG)	45
ABBILDUNG 33 PROBENMARKIERUNG ANHAND DER ZUGPROBE	46

ABBILDUNG 34 EXPLOSIONSZEICHNUNG DER PRÜFVORRICHTUNG FÜR HOCHGESCHWINDIGKEITSVERSUCHE (EIGENE DARSTELLUNG).....	47
ABBILDUNG 35 PRÜFAUFBAU DER DRUCKVERSUCHE	48
ABBILDUNG 36 ERGEBNISSE DES DRUCKVERSUCHES (EIGENE DARSTELLUNG).....	49
ABBILDUNG 37 SPANNUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMM DES DRUCKVERSUCHES (EIGENE DARSTELLUNG)	49
ABBILDUNG 38 MATERIALVERHALTEN BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN.....	50
ABBILDUNG 39 VARIATION DES FEUCHTEGEHALTES IN DER PROBE.....	51
ABBILDUNG 40 DEHNATENABHÄNGIGKEIT POLYAMID 6.6.....	51
ABBILDUNG 41 VERGLEICH ZWISCHEN ZWEI KONDITIONIERUNGSZUSTÄNDEN	52
ABBILDUNG 43 DRUCKVERSUCH SIMULATIONS- UND VERSUCHSERGEBNISSE (EIGENE DARSTELLUNG)	55
ABBILDUNG 44 SEQUENTIAL DOMAIN REDUCTION VON LS-OPT (EIGENE DARSTELLUNG)	56
ABBILDUNG 45 ERSTELLUNG EINER SYSTEMANTWORT DURCH EINE NÄHERUNGSFUNKTION; FINDEN DES OPTIMUMS ÜBER DEN OPTIMIERUNGsalgorithmus LFOPC (STANG, HAW HAMBURG 2015)	57
ABBILDUNG 46 REVERSE ENGINEERING PROZESS ZUR MATERIALKALIBRIERUNG (EIGENE DARSTELLUNG)	58
ABBILDUNG 47 ANALYTISCHE BESCHREIBUNG DES POLYAMIDES (EIGENE DARSTELLUNG).....	59
ABBILDUNG 48 REDUKTION DER ABWEICHUNG VON VERSUCH UND SIMULATION DURCH VARIATION DER PARAMETER IM REVERSE ENGINEERING PROZESS (EIGENE DARSTELLUNG).....	60
ABBILDUNG 49 QUADERSTAUCHVERSUCH: VERGLEICH BEIDER MATERIALKARTEN UND DER VERSUCHSDATEN (EIGENE DARSTELLUNG) ...	61
ABBILDUNG 50 GEGENÜBERSTELLUNG DER VERFESTIGUNG DER SPANNUNGSZUSTÄNDE „ZUG“ UND „DRUCK“ (EIGENE DARSTELLUNG) .	62
ABBILDUNG 51 AUSWAHL DES KOMPONENTENVERSUCHES (EIGENE DARSTELLUNG)	63
ABBILDUNG 52 SPANNUNGSZUSTÄNDE DER KOMPONENTENVERSUCHE (EIGENE DARSTELLUNG)	64
ABBILDUNG 53 ERGEBNISSE DES FLACHSTAUCHVERSUCHES (EIGENE DARSTELLUNG).....	65
ABBILDUNG 54 DARSTELLUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE UND DER VERNETZUNGSGRÖÖE (EIGENE DARSTELLUNG)	66
ABBILDUNG 55 VERGLEICH BEIDER MATERIALKARTEN IN DER PRODUKTSIMULATION (EIGENE DARSTELLUNG)	67

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 VERSUCHSMATRIX ZUR CHARAKTERISIERUNG DES POLYAMIDES (EIGENE DARSTELLUNG)	40
TABELLE 2 ZEITRÄUME FÜR BESCHLEUNIGTES KONDITIONIEREN (ISO/TC, 1995) (EIGENE DARSTELLUNG)	41
TABELLE 3 VERSUCHSPLAN PROBEN KONDITIONIERUNG (EIGENE DARSTELLUNG)	43

Formelzeichen und Abkürzungen

E	Elastizitätsmodul
Δl	Längenänderung
L_0	Ausgangslänge
ε_x	Technische Dehnung
ε_w	Wahre Dehnung
FE – Netz	Finite Elemente Netz
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Elemente Methode
LS-DYNA	Simulationsprogramm entwickelt durch LTSC
LS-OPT	Graphisches Optimierungstool von LTSC
SAMP-1/Mat_24	Materialkarten des Solvers LS DYNA
OEM	Original Equipment Manufacturer
α	Parameter Fließkurve
CAD	Computer Aided Design
PA66	Polyamid 66
φ	Umformgrad
A_0	Koeffizient der Fließbedingung in SAMP-1 /Ausgangsquerschnitt
A_i	Aktueller Querschnitt
C	Elastizitätstensor 4. Stufe
M	Nachgiebigkeitstensor
μ	Reibungskoeffizient/Lame Konstante
ν	Querkontraktion
λ	Lame Konstante
G	Schubmodul
$d\underline{\underline{\varepsilon}}^{(pl)}$	Plastisches Dehnungsinkrement
$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{(pl)}$	Plastische Dehnung in Ratenformulierung
$\dot{\lambda}$	Proportionalitätsfaktor
g	Veränderliche Fließflächendefinition
ε_v^{pl}	Plastische Vergleichsdehnung
H	Verfestigungskoeffizient
A_1	Koeffizient der Fließbedingung in SAMP-1
A_2	Koeffizient der Fließbedingung in SAMP-1
$\sigma_s, \sigma_t, \sigma_c$	Schub-, Zug-, Druckfließspannung
$\sigma_{sQS}, \sigma_{tQS}, \sigma_{cQS}$	Schub-, Zug-, Druckfließspannung quasistatisch
ν_p	Plastische Querkontraktion
$\dot{\varepsilon}_{\gamma\gamma p}, \dot{\varepsilon}_{x\gamma p}$	Longitudinale und transversale Dehnrate
α	Plastische Querkontraktionszahl
A_g	Gleichmaßdehnung
$\dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_{nom}$	Dehnrate, nominelle Dehnrate
c	Schallgeschwindigkeit
A_0, B_0, C_0, m_0, n_0	Parameter der Fließkurvenbeschreibung
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik

Einführung

In der Automobilindustrie nimmt die Verwendung von Kunststoffen durch ihre zahlreichen Vorteile, wie der Gewichtseinsparung, den geringen Rohstoffkosten sowie der hohen Funktionsintegration immer weiter zu. In den Anfängen wurden Abdeckungen, Dichtungen und Teile der Innenausstattung aus Kunststoffen gefertigt. Dies sind Bauteile, welche keine lasttragende Funktion hatten. Durch die zunehmende Weiterentwicklung, wie beispielsweise Verbundstoffen, werden Kunststoffe jedoch auch in lasttragenden Bauteilen eingesetzt. Besonders in Umgebungen, in welchen durch die hohen Temperaturen früher nur Metalle eingesetzt werden konnten, wie beispielsweise im Motorraum eines Fahrzeuges, finden nun zunehmend Kunststoffteile ihre Anwendungen: Ventildeckel, Motorölwannen und Aggregatehalter sind hier nur einige Beispiele (Lanxess, 2016).

Zudem reagieren Kunststoffe sensitiver als Metalle auf Langzeitbelastungen (Kriechen), Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten, den Feuchtegehalt und den Spannungszustand. Vor dieser Arbeit wurde in einer internen Projektarbeit bereits ein Polyamid auf Basis von Zugversuchen über ein breites Temperatur-, Dehnraten- und Feuchtegehaltsspektrum kalibriert. In vorliegender Arbeit wird der Fokus auf der Ergänzung der Fließbedingung um einen Kompressionsversuch gelegt, um die Abhängigkeit des Polyamides vom Spannungszustand zu charakterisieren.

Die Vorteile gehen jedoch auch mit Nachteilen einher. Zum Beispiel sind Kunststoffe generell schwieriger zu modellieren als Metalle. So können alle Finite-Elemente-Analyse (FEA) Softwares lineare statische Berechnungen durchführen, dazu zählen auch zahlreiche integrierte Lösungen in CAD-Systemen. Diese bieten dem Entwicklungsingenieur erste Anhaltswerte für das Bauteilverhalten. Metalle mit ihrem Materialverhalten, die während elastischen Verformungen dem Hookeschen Gesetz folgen, eignen sich für linear statische Simulationen daher sehr gut. Kunststoffe mit ihrem nichtlinearen elastischen Verhalten sind für diese Art der Simulation nicht geeignet und können nur mit fortgeschrittenen Methoden modelliert werden.

Beim Marktführer im Bereich der passiven Insassenschutzsysteme Autoliv B.V. & Co. KG, steigt der Einsatz an Kunststoffen stetig. Besonders bei dynamischen Belastungen wie einem Verkehrsunfall sind die Bauteile hohen Verformungsgeschwindigkeiten unterworfen. Die Werkstoffdaten bei diesen Belastungen befinden sich in der Regel nicht in Materialdatenblättern der Hersteller. Diese Daten sind jedoch zwingend erforderlich, um Vorhersagen für neue Produkte mittels der FEA zu treffen. Nur durch die FEA sind die verkürzten Entwicklungszeiträume und der gestiegene Kostendruck der Automobilindustrie zu bewältigen.

Aus genannten Gründen wird deshalb in dieser Ausarbeitung ein bestehender Prozess optimiert und ergänzt, wie anhand von Zug- und Druckversuchen im eigenen Hause und Anwendung der numerischen Simulation die Materialeigenschaften eines Kunststoffes bei dynamischen Belastungen gewonnen werden. Eine geeignete Probe für den Druckversuch wird mithilfe der Simulation ausgewählt, eine Zugprobe für die Materialcharakterisierung existiert bereits. Für die Zugversuche wird eine eigens entwickelte Vorrichtung an einer Schnellzerreißmaschine genutzt. Die erzeugten Dehnraten werden voraussichtlich $200 \frac{1}{s}$ betragen. Dies ist vergleichbar mit den Dehnraten eines Längsträgers aus dem Vorderbau eines PKW bei 50 km/h Aufprallgeschwindigkeit.

Die Ergebnisse werden in das Materialmodell SAMP-1 des Solvers LS-DYNA implementiert. Mithilfe der Optimierungssoftware LS-OPT werden die Parameter des Materialmo-

delles variiert, um die Übereinstimmung von Versuch und Simulation zu erreichen. Abschließend wird der Vergleich zur Materialkarte gezogen, welche nur auf die Ergebnisse einer Zugversuchsreihe kalibriert wurde.

Im Kapitel 1 „Theorie“ werden die Eigenschaften der Thermoplaste näher beleuchtet. Besonders mit dem Aspekt der späteren Materialkartenerstellung werden Themen der Strukturmechanik, wie der Spannungszustand oder der Fließkörper, betrachtet. Zudem werden die thermoplastischen Polymere beschrieben, um die späteren Deformationsmechanismen zu verstehen. Des Weiteren werden die Einstellparameter und Möglichkeiten des verwendeten Materialmodells SAMP-1 des Solvers LS-DYNA vorgestellt.

Im darauffolgenden Kapitel 2 „Vorgehensweise und Zielsetzung“ wird die Vorgehensweise der Ausarbeitung anhand der Abbildung 20 „Vorgehensweise der Ausarbeitung zur Erstellung und Validierung einer Materialkarte“ grafisch dargestellt. Zu Beginn der Ausarbeitung, in Kapitel 3, wird ein geeigneter Versuch gesucht, um die ausstehenden Druckversuche durchzuführen. Ein geeigneter Versuch besitzt einen konstanten Spannungszustand während des Versuches, sodass die Kennwerte direkt zur Beschreibung der Fließkurven und des Fließkörpers genutzt werden können. Die Auswahl eines geeigneten Versuches findet mit Unterstützung der FEA statt.

Im Anschluss folgt Kapitel 4 „Materialtests an einem Polyamid 6.6“ mit der Darstellung der Versuchsergebnisse der Druck- und Zugversuche. Weiterhin ist die Konditionierung der Proben, sowie die Ergebnisse der Druck- und Zugversuche dokumentiert. Hier werden die Ergebnisse der Parameter Dehnrates und Spannungszustand dargestellt, anschließend werden die gewonnenen Ergebnisse diskutiert.

In Kapitel 5 wird die Vorgehensweise zur Kalibrierung der Materialkarte beschrieben.

Um die Materialkarte auf die Versuche zu kalibrieren wird die Optimierungssoftware LS-OPT genutzt, diese variiert die Parameter der Fließkurve. Die Parameter werden solange verändert, bis die simulierten Kraft-Weg-Diagramme den gemessenen entsprechen. Dies wird nur für die Druckversuche durchgeführt. Daraus lässt sich anschließend eine gemeinsame Materialkarte erstellen.

Durch die Einbeziehung der Druckversuche wird eine bessere Abbildung des realen Verhaltens von Komponentenversuchen unter variierenden Spannungszuständen erwartet. Dies gilt es mit der bisherigen Materialkarte, welche nur die Informationen des Zugversuches beinhaltet, in Kapitel 6 „Validierung der Materialkarte“ zu vergleichen. Das Ergebnis wird abschließend diskutiert.

1 Theorie

Für diese Ausarbeitung werden theoretische Grundlagen vorausgesetzt, die im vorliegenden Kapitel behandelt werden. Es werden der grundsätzliche Aufbau der Polymere sowie typische Deformationsmechanismen erläutert. Neben typischen Phänomenen, die während Materialprüfungen zu beobachten sind wie dem „Crazing“, wird auf den molekularen Aufbau eingegangen, um die Deformationsmechanismen beschreiben zu können. Da einige Versuche unter konditionierten Temperatur- und Feuchtigkeitszuständen durchgeführt werden, wird das typische Verhalten von Thermoplasten in diesen Zuständen dargestellt. Im Anschluss lassen sich Themen der Strukturmechanik wie den Fließkörper, den Triaxialitätszustand, Spannungen und Dehnungen sowie die Verfestigung beschreiben.

Das Materialmodell SAMP-1, welches in dieser Arbeit eingesetzt wird, um die zusätzlichen Druckversuche zu implementieren, wurde für Lasten entwickelt, bei denen die Bauteile hohen plastischen Verformungen und Dehnraten unterliegen. Welchen Einfluss die verschiedenen Eingabeparameter haben, wird im Anschluss an Kapitel 1.2 „Strukturmechanik“ dargestellt. Da ein Großteil der Proben dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, werden in Kapitel 0 Anforderungen für gelungene dynamische Versuche angegeben.

1.1 Struktur der Polymere

Kunststoffe oder auch Polymere sind Werkstoffe, welche aus Makromolekülen bestehen die in Form langer Molekülketten vorliegen. Die Molekülstruktur und die Bindung unter ihnen entscheidet über die mechanischen Eigenschaften der Polymere. Die Atome der Molekülketten sind über starke chemische kovalente Bindungen verknüpft. Die Bindung der Molekülketten untereinander ist jedoch mit Dipol-, Wasserstoffbrücken oder van-der-Waals-Bindungen weitaus schwächer (Rösler, 2006). Die chemische kovalente Bindung bildet sich, wenn freie (-valent) Elektronen eines Atoms mit anderen freien Elektronen reagieren und gemeinsam (Co-) ein Molekül bilden (Höfler, 2019). Diese Reaktion findet statt, um die Edelgaskonfiguration zu erreichen. Deshalb tritt beispielsweise Wasserstoff in der Natur nur als Molekül auf (H_2). Die kovalente Bindung ist schwerer aufzulösen als die physikalischen Bindungen, wie beispielsweise die van-der-Waals-Bindung. Die Molekülketten bestehen aus zahlreichen Monomeren, typischerweise liegt die Anzahl bei 10^3 bis 10^5 . Dadurch kann die Molekülkette einige Mikrometer an Länge erreichen. Die mittlere Anzahl der Monomere wird als *Polymerisationsgrad* bezeichnet. Im Allgemeinen nehmen mit steigendem Polymerisationsgrad die Viskosität und die Festigkeit zu. (Einbock, 2019)

Polymere lassen sich in drei Hauptgruppen unterteilen. Diese Hauptgruppen sind die Elastomere, die Duromere sowie die Thermoplaste. Bei Elastomeren liegt die Einsatztemperatur generell über der Glasübergangstemperatur. Dadurch können diese sich durch eine Belastung elastisch verformen, finden dann aber reversibel in ihre Ausgangsform zurück (Gränzdörffer, 2015). Duromere hingegen können nach ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden. Sie sind harte brüchige Polymere, die über Hauptvalenzbindungen fest vernetzt sind. Die Vernetzung erfolgt durch Mischen von mindestens zwei Komponenten. Anschließend wird die Mischung bei hohen Temperaturen zur Reaktion gebracht oder bei Raumtemperatur mithilfe eines chemischen Katalysators aktiviert. Duromere reagieren nicht mit der Umgebung, da sie chemisch inert sind. Die Haupt-

valenzbindungen der Duromere können zwar mithilfe von Temperatur aufgebrochen werden, jedoch ist dieser Vorgang irreversibel. Thermoplaste hingegen lassen sich in einem bestimmten Temperaturbereich verformen, da die Molekülketten nur schwach über physikalische Bindungen miteinander verbunden sind und sich durch Temperatureinwirkung reversibel lösen lassen. Verformungen lassen sich durch Erwärmung in den flüssigen Zustand beliebig oft wiederholen.

Maßgeblich für die Eigenschaften der Polymere ist der Vernetzungsgrad. Dieser entscheidet über die temperatur- und zeitabhängigen Eigenschaften. Je höher der chemische Vernetzungsgrad der Moleküle, desto höher ist dieser thermisch und mechanisch belastbar, desto geringer ist die Kriechneigung, desto beständiger ist das Polymer gegen Medieneinflüsse (Eyerer.P et., 2008). Abbildung 1 gibt einen Überblick über die drei vorgestellten Polymergruppen und ihren Vernetzungsgrad.

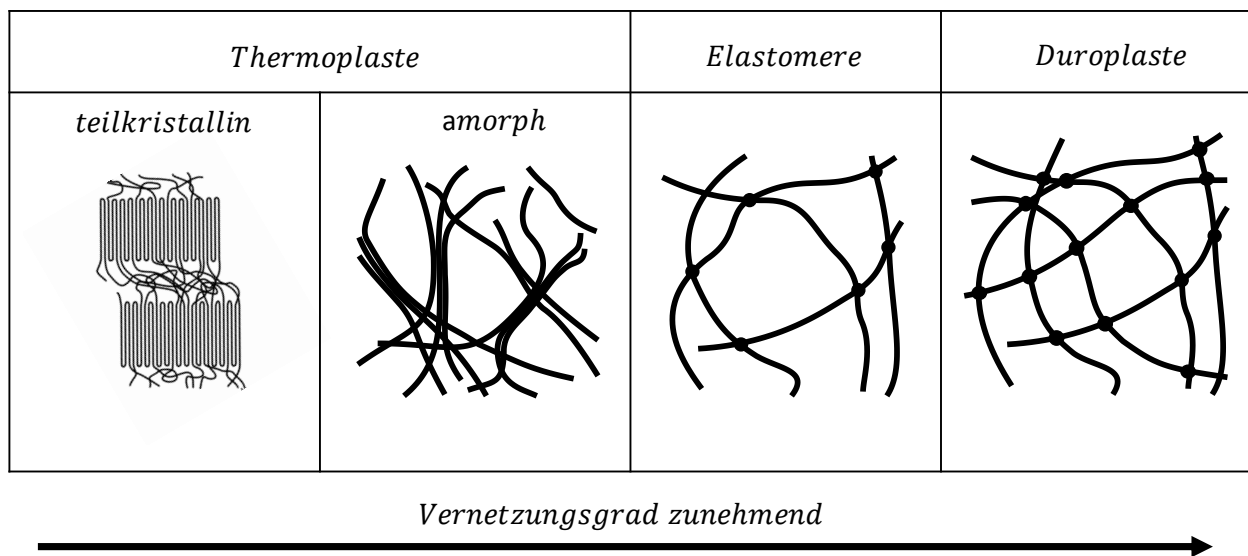


Abbildung 1 Vernetzungsgrad von Polymergruppen (Eigene Darstellung)

Vernetzungen sind kovalente Bindungen, die die Molekülketten untereinander eingehen, um so ein molekulares Netzwerk zu schaffen (Rösler, 2006). Um die Vernetzungsdichte zu quantifizieren, kann ein Diamantkristall als ein Kohlenstoff-Kettenmolekül angesehen werden mit dem Vernetzungsgrad 1, da jedes Atom mit seinem benachbarten Atom verbunden ist. Wird der Vernetzungsgrad der Polymere mit dem des Diamantkristalls verglichen, kann Elastomeren eine Vernetzungsdichte von 10^{-4} bis 10^{-3} nachgewiesen werden. Elastomere weisen also etwa bei jedem tausendsten Monomer eine Verzweigung auf. Bei Duromeren liegt diese Zahl mit 10^{-2} bis 10^{-1} deutlich höher. Thermoplaste weisen keine Vernetzungsstellen auf. Dafür können sie im Gegensatz zu Elastomeren und Duromeren teilkristallin sein. Teilkristalline Werkstoffe bestehen aus ungeordneten (amorphen) und geordneten (kristallinen) Molekülketten. In einem kristallinen Bereich des Thermoplastes liegen die Molekülketten nicht als gestreckte, parallel zueinander ausgerichtete Ketten vor. Vielmehr sind diese bereichsweise aufgefaltete und der Bereich kann auch als Faltungslamelle (s. Abbildung 2) bezeichnet werden.

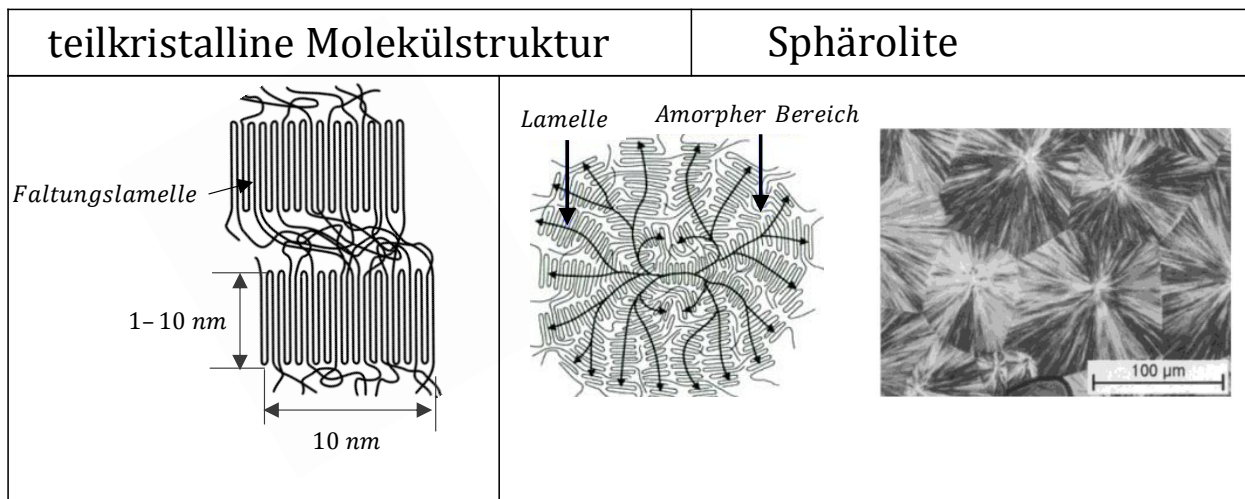


Abbildung 2 Schematischer Aufbau der Polymere (Rösler, 2006)

Weiterhin ordnen sich die kristallinen Bereiche oft radial an. Die sich ergebenden Zwischenräume werden durch amorphe Bereiche gefüllt und sorgen so für den Zusammenhalt. Dadurch bilden Polymere sogenannte Sphärolite, die im wesentlichen Einfluss auf das mechanische und optische Verhalten haben.

Da in dieser Arbeit ein Polyamid 6.6 charakterisiert werden soll, beschränkt sich die weitere Beschreibung der Grundlagen auf Thermoplaste. Auf Elastomere sowie Duromere soll in vorliegender Arbeit nicht detailliert eingegangen werden.

Thermoplaste

Wie bereits erwähnt sind bei Thermoplasten die Molekülketten unvernetzt. Der Zusammenhalt der Monomere in den Molekülketten ist durch chemische Bindungen stärker als die physikalischen Bindungen. Maßgeblich für das mechanische Verhalten des Werkstoffes sind die Nebenvalenzkräfte, mit welchen die Molekülketten untereinander verbunden sind. Eine Belastung durch äußere Kräfte oder Temperatur kann zum Aufbrechen dieser Verbindung führen und sorgt somit für eine bleibende plastische Verformung.

Die Nebenvalenzkräfte lassen sich durch Temperatureinwirkung lösen, da bei entsprechender Temperatur die Ketten sogenannte „mikrobrownsche“ Bewegungen durchführen (Stommel, et al., 2011). Diese führen dazu, dass keine Verbindung mehr zwischen den Ketten stattfinden kann. Mit abnehmender Temperatur wird der Thermoplast zunehmend steifer, da die Moleküle wieder Verbindungen untereinander eingehen können. Eine gänzliche Verhinderung der Bewegung der Molekülketten zueinander ist jedoch zu keinem Zeitpunkt möglich. Die Entschlafung und das Abgleiten laufen in diesem Fall nur verlangsamt ab (Rösler, 2006). Mithilfe dieses Modells lässt sich das zeitabhängige (viskose) Verhalten der Polymere erklären. Wenn der Werkstoff durch eine Dehnung belastet wird, spannen sich die Molekülketten. Sollte die Dehnung aufrechterhalten werden, beginnen die Molekülketten sich langsam zu entschlaufen und aneinander abzugleiten. Durch das Nachgeben der Ketten sinkt die Spannung im Material, das Material „relaxiert“. Gleiches geschieht durch die Aufrechterhaltung der Last. Hierdurch nimmt die Dehnung immer weiter zu. Dies ist als „Kriechen“ bekannt.

Durch eine schnelle Belastung, wie einem Verkehrsunfall, bleibt den Molekülketten wenig Zeit sich zu entschlaufen, weshalb viskose Effekte in den Hintergrund treten. Das Materialverhalten kann als elastisch angesehen werden. Die Verbindungen werden überwiegend zerrissen, sodass die Materialantwort spröde ist. Gleiches Verhalten ist bei niedrigen Temperaturen zu beobachten (Kolling, 2005).

Durch Abkühlung aus dem Zustand der Schmelze, kann es zu teilkristallinen Kristallisationsprozessen kommen. Es bilden sich die oben genannten amorphen und kristallinen Bereiche aus. Aufgrund der Molekülkettenlänge kann eine vollständige Kristallisation nicht auftreten, wohl aber ein rein amorpher Kunststoff. Diese Auswirkungen der verschiedenen Kunststofftypen auf das mechanische Verhalten bei Raumtemperatur sind in Abbildung 3 dargestellt. Amorphe Thermoplaste wie PMMA oder PS zeigen ein sehr sprödes Verhalten. Dies liegt daran, dass der amorphe Thermoplast unter seiner Glasübergangstemperatur verwendet wird. Sobald ein Polymer unter seiner Glasübergangstemperatur verwendet wird, reagiert es sehr spröde, da die Bewegung der Molekülketten untereinander stark eingeschränkt ist. Anders verhält es sich mit Thermoplasten wie PE und PP, welche bei Raumtemperatur über der Glasübergangstemperatur liegen. Resultierend daraus erhält der Werkstoff durch die beweglichen amorphen Bereiche Zähigkeit und durch die kristallinen Bereiche Steifigkeit. Dies resultiert in einem nahezu elastisch-ideal plastischen Verhalten. Elastomere, wie Gummi, sind amorph; aus diesem Grund werden sie im Gegensatz zu PMMA oder PS oberhalb der Glasübergangstemperatur genutzt. Der Einsatz von Elastomeren über der Glastemperatur führt dazu, dass die Molekülketten sehr beweglich sind und leicht aneinander abgleiten können. Dies ermöglicht Elastomeren große elastische Dehnungen.

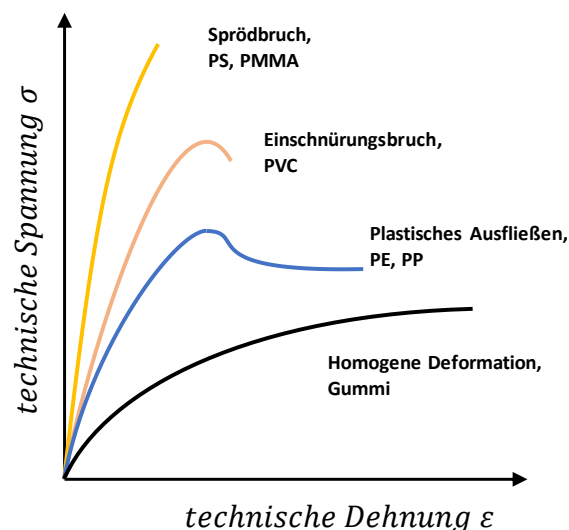


Abbildung 3 Spannungs-/Dehnungsverhalten von Polymeren schematisch in Anlehnung an (Stommel, et al., 2011)

Neben der Molekülstruktur ist auch die Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur ein entscheidender Parameter für die mechanischen Eigenschaften eines Polymers. In Abbildung 4 ist die Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit gezeigt. Darin sind Änderungen der Belastungsgeschwindigkeit bzw. Dehnrates deutlich sichtbar. Dies liegt an den oben erläuterten Vorgängen in der Makroebene. Aus diesem Grund ist in der Norm DIN EN ISO 527 zur Prüfung von Zugeigenschaften von Kunststoffen auch eine Belastungsgeschwindigkeit vorgeschrieben. Neben der Belastungsgeschwindigkeit reagieren Polymere sehr sensitiv auf Temperatureinflüsse. In Abbildung 4 ist gleichzeitig die Prüftemperatur der Zugproben eingetragen. Das steifste Verhalten von Polymeren wird erreicht durch niedrige Temperaturen und eine schnelle Belastungsgeschwindigkeit. Das nachgiebigste Verhalten erhält man durch hohe Temperaturen und langsame Belastungsgeschwindigkeit.

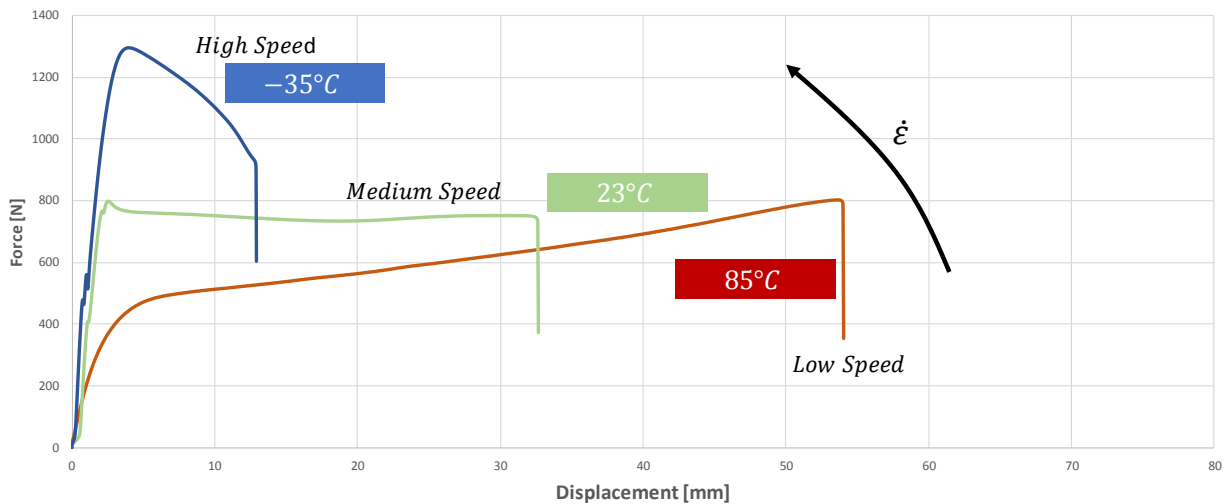


Abbildung 4 Darstellung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf Polymere (Eigene Darstellung)

Deformationsmechanismen

Die Molekülketten liegen bei Thermoplasten unvernetzt vor, sodass das mechanische Verhalten durch die relative Bewegung der Ketten zueinander bestimmt wird. Wird eine Belastung auf ein Polymer aufgebracht, konstant gehalten und nach einer bestimmten Zeit entlastet, entsteht die Dehnungsverteilung, wie in Abbildung 5 „Visko-elastisches und -plastisches Materialverhalten“ zu sehen. Diese Überlagerung der einzelnen Dehnungsanteile resultiert aus den bereits vorgestellten Wechselwirkungen der Molekülketten untereinander. Kurz nachdem die Belastung aufgebracht wurde, besteht die Dehnung rein aus elastischen ε_2 und plastischen ε_1 Anteilen. Die viskosen Anteile wirken sich erst mit ausreichender Belastungsdauer auf die Dehnung aus. Dies sind die visko-elastische ε_3 und visko-plastische ε_4 Dehnung. Das genannte Phänomen ist bekannt als Kriechen. Nach Rücknahme der Belastung wird die Dehnung umgehend um den elastischen Anteil ε_2 verringert und schließlich reduziert sich auch der visko-elastische ε_3 Anteil.

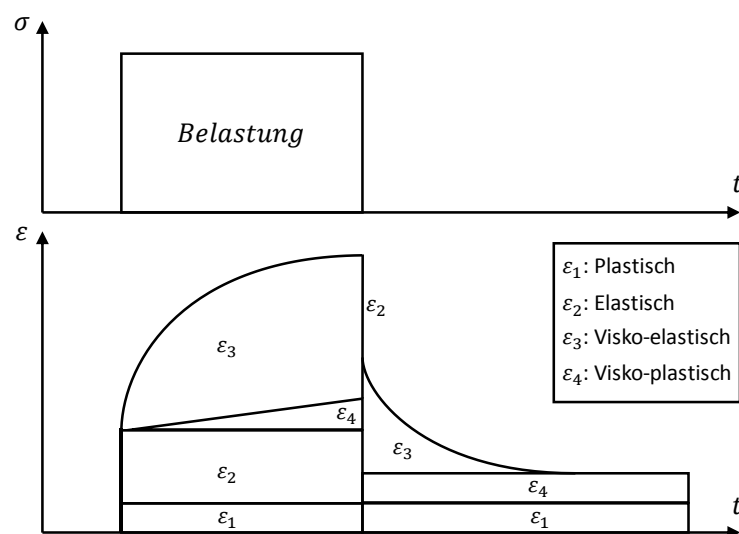


Abbildung 5 Visko-elastisches und -plastisches Materialverhalten (Stang, HAW Hamburg 2015)

Die Wechselwirkungen zwischen der Beweglichkeit der Molekülketten und den Umgebungsparametern Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur wurde bereits in diesem Kapitel erläutert. Im Folgenden soll es deshalb um die molekularen Deformationsmechanismen bis zum Bruch des Werkstoffes gehen.

Durch den verringerten Abstand der Molekülketten im kristallinen Bereich kommt es dort zu stärkeren Bindungskräften als in den amorphen Bereichen. Dies führt dazu, dass teilkristalline Polymere ein höheres Elastizitätsmodul und höhere Festigkeitswerte aufweisen als amorphe Polymere.

Wird ein teilkristallines Polymer einer Belastung ausgesetzt, werden zunächst die amorphen Bereiche des Polymers gestreckt und die Molekülketten beginnen sich zu entschlafen (s. Abbildung 6 „Deformationsmechanismen eines Thermoplastes“). Mit steigender Dehnung setzt eine Umorientierung der kristallinen Bereiche ein, indem sie sich parallel zur Belastung ausrichten. Dies führt dazu, dass der Werkstoff anisotrope Eigenschaften erhält und ist eine Ursache für die kinematische Verfestigung (s. Kapitel 1.2.3) des Werkstoffes. Bei weiterer zunehmender Dehnung teilen sich die kristallinen Bereiche in Blöcke auf. Dies erleichtert das Abgleiten der einzelnen Blöcke aneinander.

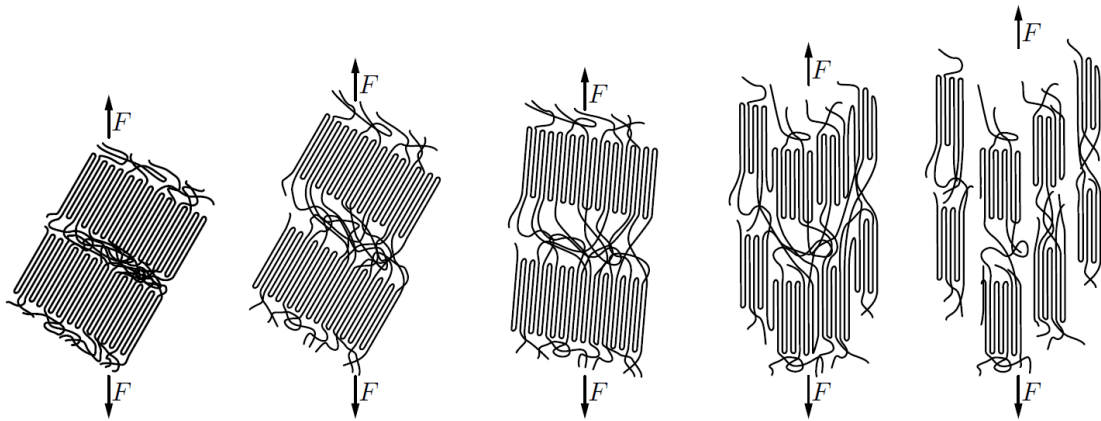


Abbildung 6 Deformationsmechanismen eines Thermoplastes (Rösler, 2006)

Polymere verfestigen bei kleinen plastischen Dehnungen im Gegensatz zu Metallen nicht, da beim Abgleiten der Moleküle keine neuen Hindernisse entstehen. Eine Verfestigung erfolgt erst durch die Orientierung der teilkristallinen Bereiche in Belastungsrichtung. Durch die Belastung eines Polymeres können sich sogenannte „Crazes“, wie in Abbildung 7 „Mikrostruktur eines Crazes“, bilden. Diese sind elliptische Hohlräume mit einer Dicke von etwa $1\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$, welche durch Fibrillen überbrückt sind. Diese Fibrillen, mit einem Durchmesser von $10\ \text{nm}$ - $100\ \text{nm}$, bestehen aus mehreren Kettenmolekülen und machen etwa 10% bis 50% des Volumenanteils eines Crazes aus. Obwohl Crazes ein rissartiges Erscheinungsbild aufweisen, ist ihre Festigkeit nur marginal geringer als die des unverformten Materials. Dies liegt daran, dass die Kettenmoleküle in den Fibrillen gestreckt sind und so eine erhöhte Spannung aufnehmen können.

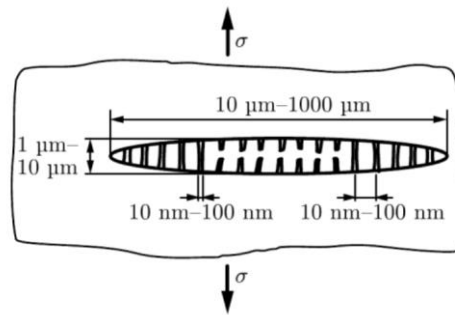


Abbildung 7 Mikrostruktur eines Crazes, entnommen aus J.Rösler, 2006

Die Ursachen für Crazes liegen meist in Oberflächendefekten oder Verunreinigungen. In Versuchen sind Crazes durch eine Weißfärbung des Polymers erkennbar. Aus diesem Grund wird das Versagen von Thermoplasten auch als Weißbruch bezeichnet (Rösler, 2006).

Feuchtigkeit

In den amorphen Bereichen des Thermoplastes kann sich Wasser einlagern. Grundlegend für die Wasseraufnahme sind die Nebervalenzbindungen zwischen den Molekülketten der Thermoplaste (Lutterbeck, 2016). Bei genauer Betrachtung besitzt Wasser eine Affinität zu den Carbonamidgruppen des Polyamides. Bei trockener Umgebung sind die Wasserstoffbrücken zwischen den Carbonamidgruppen für die guten mechanischen Eigenschaften von Polyamid verantwortlich. In einer Umgebung mit hoher relativer Feuchte lagert sich das Wasser an die polaren Amidgruppen an. Mit weiterer Wasseraufnahme werden die Nebervalenzbindungen abgesättigt und der Zusammenhalt der Moleküle wird zunehmend schwächer. Das Wasser wirkt wie ein Weichmacher bei Polyamiden und führt gleichzeitig zur Quellung. Diese Quellung schafft Platz für weitere Wassermoleküle, sodass der Anstieg der Wasseraufnahme überproportional zunimmt. (Lutterbeck, 2016)

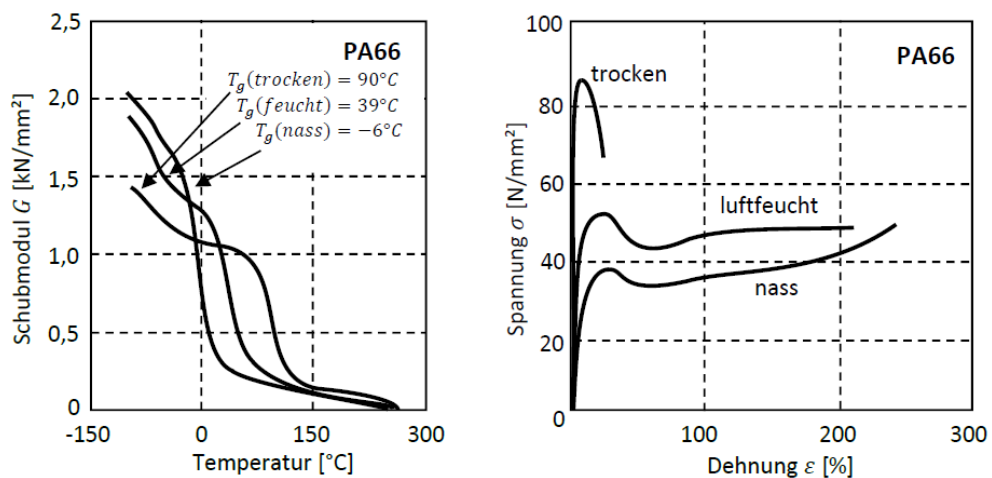


Abbildung 8 Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Feuchte (Stang, HAW Hamburg 2015)

In Abbildung 8 „Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Feuchte“ ist dieses Wirkprinzip an einem PA66 verdeutlicht. Durch verschiedene Aufnahmemengen an Wasser im Polyamid, vertreten durch die Zustände „trocken“, „luftfeucht“ und „nass“, ändern sich die Glasübergangstemperaturen. Wie bereits geschildert, hängt das mechanische Verhalten von Polymeren von dem Einsatzbereich über oder unter der Glasübergangstemperatur ab. Durch die Einlagerung von Wasser in das Polyamid, welches als Weichmacher agiert, reagiert das Thermoplast wie ein Elastomer, wenn der Zustand „nass“ vorliegt. Umgekehrt reagiert das Thermoplast wie ein amorphes Polymer im Zustand „trocken“, welches unterhalb der Glasübergangstemperatur genutzt wird. Das Thermoplast ist im trockenen Zustand sehr steif und spröde, da hierbei die Bewegung der Molekülketten stark eingeschränkt ist.

1.2 Strukturmechanik

Im vorliegenden Kapitel werden die Grundbegriffe der elastischen und plastischen Materialbeschreibung vorgestellt. Zunächst werden die skalaren Größen Dehnung und Spannung eingeführt. Im Anschluss werden die Zusammenhänge zwischen Dehnungen und Spannungen über das Stoffgesetz hergestellt. Die Beschreibung der Plastizitätstheorie findet im Anschluss statt. Die Plastizitätstheorie beinhaltet grundlegende Ansätze zur Beschreibung eines Materialverhaltens. So existieren verschiedene Ansätze, um Materialien zu beschreiben, zum Beispiel wird für elastische Verformungen eine Fließbedingung formuliert. Diese bestimmt, ab wann eine Dehnung elastisch ist und ab wann die Dehnung so groß ist, dass plastische Dehnungen auftreten. Zur Beschreibung des Verhaltens während plastischer Dehnungen sind Kenntnisse über Verfestigungsgesetze und Fließgesetze erforderlich, welche in diesem Kapitel behandelt werden.

1.2.1 Dehnung

Wenn auf das Bauteil gedanklich eine ausreichende Anzahl an Punkten gelegt wird, dann werden sich durch die Belastung eines Bauteiles einige Punkte verschieben. Diese Bewegung kann verschiedene Ursachen haben. Eine Möglichkeit ist, dass die Verschiebungen durch eine Bewegung des Bauteiles im Raum herbeigeführt werden; dann ist von einer „Starrkörperverschiebung“ die Rede. Auch Rotationen können eine Punktverschiebung verursachen, dies wird „Starrkörperrotation“ genannt. In beiden genannten Fällen kann es sein, dass sich das Material nicht verformt hat. Möchte man die Verformung eines Bauteiles beschreiben, ist also eine Betrachtung der Verschiebungen nicht zweckmäßig. Um die Verformung zu beschreiben, müssen Längenänderungen und Winkelverzerrungen betrachtet werden. Alle Formänderungen lassen sich aus den beiden Komponenten Längenänderung und Winkelverzerrung beschreiben. Die Längenänderungen können durch die Normaldehnung ε ausgedrückt werden.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

Dabei ist die Normaldehnung ε durch den Quotienten der Längenänderung Δl und der Ausgangslänge l_0 definiert.

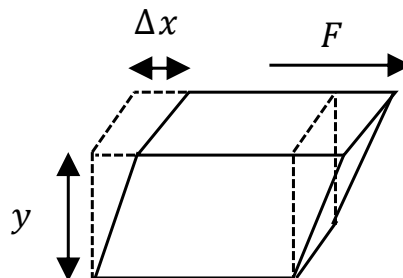


Abbildung 9 Schubbelastung auf einen Körper (Eigene Darstellung)

Wird ein Bauteil einer Schubbelastung unterworfen, wie in Abbildung 9 „Schubbelastung auf einen Körper“ zu sehen, kann die Scherung γ durch die beiden Größen Δx und y ausgedrückt werden (2).

$$\gamma = \frac{\Delta x}{y} \quad (2)$$

Die Dehnung sowie die Scherung beziehen sich auf eine Bezugsgröße. Für die Dehnung ist dies die Ausgangslänge l_0 und für die Scherung die Länge y . Durch große Dehnungen wird die Bezugsgröße jedoch verändert, sodass die obigen Größen nur für elastische Dehnungen genutzt werden können. Für plastische Dehnungen muss die aktuelle Bezugsgröße berücksichtigt werden. Zur Definition von plastischen Dehnungen hat sich der Umformgrad φ etabliert. Der Umformgrad ist äquivalent zu der wahren Dehnung ε_w :

$$\varepsilon_w = \varphi = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} \quad (3)$$

Durch die Integration über die gesamte Längenänderung l_i wird die Bezugsgröße aktualisiert. Dadurch kann die wahre Dehnung zur Beschreibung plastischer Dehnungen genutzt werden. Durch Umformung der Gleichung (3) kann die wahre Dehnung ε_w beschrieben werden als:

$$\varepsilon_w = \varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4)$$

Damit ist es möglich die wahre Dehnung ε_w nur durch die technische Dehnung ε zu bestimmen.

1.2.2 Spannung

Aus äußeren Belastungen, wie einer Kraft oder einem flächigen Druck, resultieren innere Beanspruchungen. Die Größe der inneren Beanspruchungen ist davon abhängig, welcher Querschnitt belastet wird. Vergrößert sich der belastete Querschnitt, verringert sich die Beanspruchung. Um die Tragfähigkeit einer Struktur zu bewerten, sind Kennwerte gefordert, welche unabhängig der unterschiedlichen Bauteildimensionen und -geometrie sind. Diese Kennwerte können dann in genormten Versuchen ermittelt werden, um auf unterschiedliche Bauteile angewendet zu werden. Erreicht werden kann dies, indem die Belastung und die Verformung auf den Querschnitt normiert werden (Rösler, 2006). Diese normierte Größe ist die Spannung σ , die als Quotient von Kraft und Fläche definiert ist. Spannungen werden nach der Orientierung der Kraft und Fläche unterschieden. Wenn die Kraft F auf der Fläche A senkrecht steht, wird diese Spannung Normalspannung σ genannt (5).

$$\sigma = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (5)$$

Für den Fall, dass die Kraft F parallel zur Fläche A wirkt, wird die Spannung Schubspannung τ genannt (6).

$$\tau = \frac{F_{\parallel}}{A} \quad (6)$$

Alle anderen Spannungen bestehen aus einer Überlagerung der Normal- und Schubspannungen. Sind die Spannungen an einem spezifischen Punkt in der Fläche interessant, so lässt sich dieser Körper in Gedanken entlang einer *Schnittebene* aufschneiden. Durch den Schnitt müssen die Spannungen, welche vor dem Schnitt übertragen wurden, als äußere Schnittspannungen eingezeichnet werden. Dadurch bleibt das Kräftegleichgewicht im Material erhalten. In Abbildung 10 links ist dies beispielhaft durchgeführt. Der Spannungsvektor t ist als Addition des Normal- und Schubspannungsvektors eingezeichnet. Ebenso ist der Spannungsvektor als äußere Schnittspannung eingezeichnet. Ist der Spannungszustand an der Schnittebene unbekannt, bietet es sich an, den Körper entlang der drei Koordinatenachsen zu schneiden. Durch die drei Schnitte, können räumliche Spannungszustände berücksichtigt werden. Wird ein Körper senkrecht zu den Koordinatenachsen x_1, x_2, x_3 geschnitten, ergeben sich die Komponenten des Spannungstensors. Diese Komponenten sind in Abbildung 10 rechts dargestellt. Der erste Index kennzeichnet die Normale auf der Fläche, der zweite Index weist die Richtung der Spannung aus. Die Spannungen $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ beschreiben dabei die Normalspannungen, während die Spannungen σ_{12}, σ_{23} , etc. Schubspannungen beschreiben.

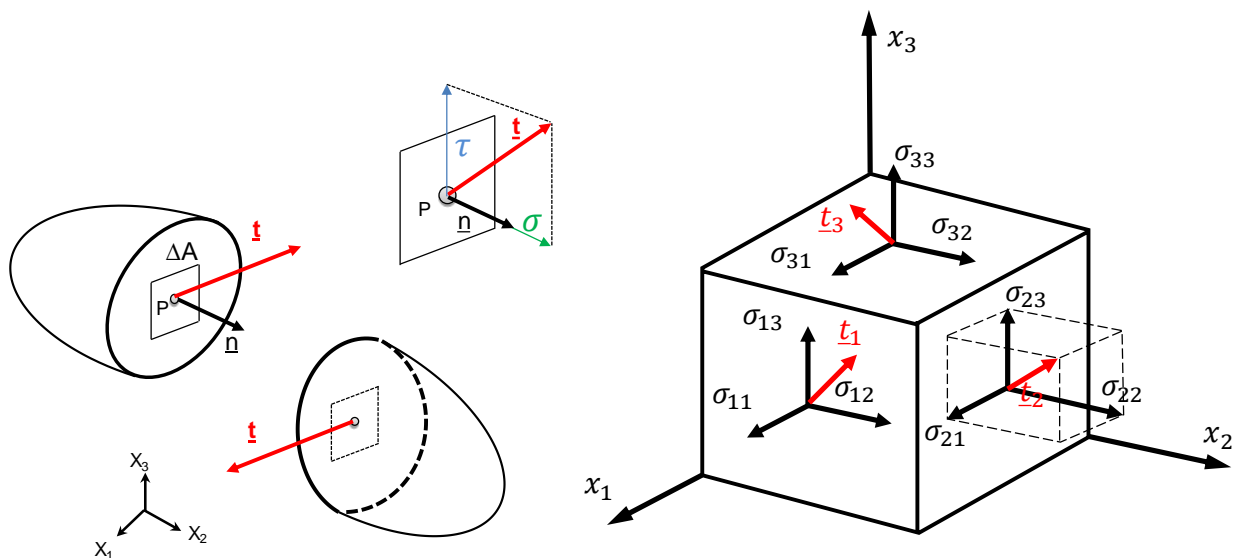


Abbildung 10 Komponenten des Spannungstensors in Anlehnung an (Gross, et al., 2007)

Die neun Größen σ_{ij} des Spannungstensors sind die Komponenten des Cauchyschen Spannungstensors σ (Cauchy, 1827). Wird ein Momentengleichgewicht aufgestellt, ergibt sich, dass die Schubspannungen in senkrecht aufeinander stehenden Schnitten betragsgleich sind. Dadurch besteht der Cauchysche Spannungstensor σ nur noch aus sechs unabhängigen Spannungskomponenten (7). Dies lässt sich in Matrixschreibweise wie folgt dokumentieren:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Für jeden Spannungstensor lässt sich ein Koordinatensystem definieren, für welches der Cauchysche Spannungstensor nur Einträge auf der Hauptdiagonalen besitzt. Diese Form heißt „Hauptachsenform“, die dazugehörigen Spannungswerte „Hauptspannungen“. Der Spannungstensor lässt sich in der Hauptachsenform wie folgt darstellen:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Es ist erkennbar, dass Hauptspannungen frei von Schubspannungen sind.

Wie zuvor bei den Dehnungen ist die Definition der Spannungen (5)(6) auf eine Ausgangsgröße bezogen. Um die Spannungen bei hohen Deformationen anzugeben, existiert, analog zu der wahren Dehnung ε_w , die wahre Spannung σ_w . Die wahre Spannung σ_w ist definiert über den Quotienten der aktuellen Kraft und der aktuellen Querschnittsfläche A_i :

$$\sigma_w = \frac{F}{A_i} \quad (9)$$

Die Annahme einer Volumenkonstanz, bei der das Volumen der Probe während der Deformation konstant bleibt, vereinfacht die Gleichung der wahren Spannung und kann wie folgt beschrieben werden:

$$A_0 * l_0 = A_i * l_i \quad (10)$$

Dabei sind A_0 der Ausgangsquerschnitt und l_0 die Ausgangslänge. Durch eine Verformung ändern sich diese Parameter. Das Produkt bleibt jedoch immer gleich. Das Produkt der Ausgangslänge und -fläche muss demnach genau so groß sein, wie das Produkt der Länge l_i und des Querschnitts A_i nach der Verformung.

Mithilfe der Annahme einer Volumenkonstanz, kann die Gleichung der wahren Spannung (9) durch den Ausdruck $A_i = \frac{A_0}{1+\varepsilon}$ umgeschrieben werden zu:

$$\sigma_w = \frac{F}{A_0} * (1 + \varepsilon) = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (11)$$

1.2.3 Stoffgesetze

Zwischen Dehnungen und Spannungen existiert ein Zusammenhang. Dieser wird über die Stoffgesetze hergestellt. Wie bereits geschildert, weisen Thermoplaste ein zeitabhängiges Verhalten auf, was sich in der Praxis durch die Phänomene „Kriechen“ und „Relaxation“ zeigt. In dieser Arbeit wird das zeitabhängige (viskose) Verhalten von Kunststoffen vernachlässigt, da bei der dynamischen Belastung von Zugproben diese Effekte kaum auftreten. Aus diesem Grund lassen sich Thermoplaste unter dynamischen Lasten gut durch elasto-plastische Materialmodelle beschreiben (Kolling, 2005). Im Folgenden wird daher näher auf die Grundlagen der Beschreibung der elastischen und plastischen Werkstoffeigenschaften eingegangen.

1.2.3.1 Elastizität

Zwischen Dehnungen und Spannungen existiert ein Zusammenhang. Dieser kann in einfachster Schreibweise über das Hookesche Gesetz (Hooke, 1678) dargestellt werden. Für einachsige Fälle, wie der Belastung eines Zugstabes, kann das Hookesche Gesetz wie folgt beschrieben werden:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (12)$$

Dabei ist die Spannung σ_x im Stab äquivalent zu dem Produkt aus dem Elastizitätsmodul E und der aktuellen Dehnung ε_x . Das Hookesche Gesetz im allgemeinen Fall lässt sich durch eine lineare Tensorgleichung vierter Stufe ausdrücken (13) (Gross, et al., 2007). Der Doppelpunkt kennzeichnet eine Summation über zwei Indexpaare, in diesem Fall k und l . Der Tensor C hingegen beschreibt den Elastizitätstensor vierter Stufe. Das Hookesche Gesetz für den allgemeinen Fall lautet:

$$\sigma = C : \varepsilon \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (13)$$

Wird obige Formel(13) nach den Verzerrungen ε umgeformt, so lässt sich das Elastizitätsgesetz wie folgt schreiben:

$$\varepsilon = M : \sigma \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_{ij} = M_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (14)$$

Um diese Umformung des Hookeschen Gesetzes durchzuführen, wird die Inverse der Matrix C^{-1} durch M ersetzt. M ist der Nachgiebigkeitstensor mit den Komponenten M_{ijkl} . Für den Nachgiebigkeitstensor gelten die gleichen Symmetrieeigenschaften wie sie für die Komponenten C_{ijkl} gelten.

Mit den insgesamt 81 Komponenten i, j, k und l werden die elastischen Eigenschaften des Materials charakterisiert. Durch Symmetrie der Verzerrungs- und Spannungstensoren lässt sich diese Zahl auf 36 reduzieren. Diese Matrix (15) ist bei weiteren Überlegungen ebenfalls symmetrisch und besitzt für den Fall einer Anisotropie maximal 21 voneinander unabhängige Konstanten. Dabei gilt die Symmetrie $C_{ijkl} = C_{klij}$.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{sym.} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Thermoplaste sind anisotrop. Diese Anisotropie kann durch eine Faserverstärkung, durch eine Belastung oder durch den Spritzgussprozess, entstehen. Da in dieser Arbeit ein un-

verstärktes PA6.6 untersucht wird und die Einflüsse des Spritzgussprozesses nicht berücksichtigt werden sollen, kann initial isotropes Materialverhalten angenommen werden. Demnach vereinfacht sich der Elastizitätstensor zu:

$$L^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & 2(1+\nu) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dadurch reduziert sich die Anzahl der elastischen Konstanten von 21 auf zwei. Die beiden Unbekannten sind dabei der Elastizitätsmodul E und die Querkontraktion ν . Dies sind einfach zu ermittelnde Materialkennwerte, da ein Zugversuch sie bestimmen kann. Häufig findet sich auch die Schreibweise für isotrope Medien mithilfe der Lamé-Konstanten μ und λ :

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\text{Spur}(\varepsilon)\delta_{ij} \quad (17)$$

Die Spannungen σ_{ij} können dabei über die zugehörige Dehnung ε_{ij} ermittelt werden. Die mathematische Operation „Spur“ summiert die Komponenten der Hauptdiagonalen auf, in diesem Fall die des Dehnungstensors. Die ausgeschriebene Schreibweise verdeutlicht erneut den Zusammenhang zwischen Dehnungen und Spannungen:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = 2\mu \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Die erste Lamé-Konstante λ kann, ebenso wie die zweite Konstante μ , in Abhängigkeit von dem Elastizitätsmodul und der Querkontraktion ausgedrückt werden. Dabei kann λ aus der Querkontraktion ν und dem Elastizitätsmodul E berechnet werden als:

$$\lambda = \frac{\nu}{1-2\nu} * \frac{1}{1+\nu} * E \quad (19)$$

μ entspricht dem Schubmodul G , welcher wiederum durch den Elastizitätsmodul E und der Querkontraktion ν ausgedrückt wird:

$$\mu = G = \frac{1}{2} * \frac{1}{1+\nu} * E \quad (20)$$

1.2.3.2 Plastizität

Sobald bei einem Werkstoff eine bestimmte Grenze überschritten wird und nach der Belastung bleibende Verformungen bestehen, ist der Werkstoff plastisch verformt. Wann der Übergang von elastischen zu plastischen Dehnungen stattfindet, wird von der Fließbedingung bestimmt. Diese kann vom Nutzer ausgewählt werden oder ist teilweise durch das gewählte Materialmodell vorgegeben. Im Anschluss an elastische Dehnungen während plastischer Verformungen, beschreibt das Fließgesetz, ob die plastische Dehnung koaxial zum Normalenvektor der Fließfläche fortschreitet oder nicht. Findet die plastische Dehnung senkrecht zur Fließfläche statt, wird vom assoziierten Fließen gesprochen. In allen anderen Fällen wird vom nicht assoziierten Fließen gesprochen. Durch das Fließen wird ein weiterer Vorgang initiiert, das Verfestigen der Fließbedingung. Die Fließbedingung weitet sich auf, dadurch wird das Verhalten des Werkstoffes nach einmaliger plastischer Verformung beschrieben. Durch eine Verfestigung wird, um die gleiche Dehnung wie vor der Belastung zu erreichen, mehr Kraft benötigt. Wie stark die Fließbedingung durch die Verfestigung modifiziert wird, hängt von dem Verfestigungsgesetz ab.

Fließbedingung

In der praktischen Anwendung unterliegen die meisten Bauteile mehrachsigen Spannungszuständen. Um das Verhalten des Werkstoffes in diesen Zuständen zu beschreiben, wird für elastische Verformungen die Fließbedingung genutzt. Diese beschreibt für jeden Spannungszustand die zulässige elastische Verformung, bevor der Werkstoff zu fließen beginnt. Unabhängig von der Formulierung der Fließbedingung wird mindestens ein Werkstoffparameter k_1 und der Spannungstensor σ_{ij} benötigt, um diese zu definieren. Die allgemeine Beschreibung der Fließbedingung F ist beschrieben als:

$$F = 0 = F(\sigma_{ij}, k_1, \dots, k_n) \quad (21)$$

Spannungszustände auf der Fließfläche ($F(\sigma_{ij}, k_1, \dots, k_n) = 0$) bedeuten plastische Verformung des Werkstoffes, während Punkte innerhalb der Fließfläche ($F(\sigma_{ij}, k_1, \dots, k_n) < 0$) auf eine elastische Verformung hinweisen.

Für ein isotropes Material kann die Fließbedingung auch anhand der Koordinatensystem unabhängigen Größen, den Invarianten des Spannungstensors I_σ , II_σ und III_σ beschrieben werden.

$$F = 0 = F(I_\sigma, II_\sigma, III_\sigma) \quad (22)$$

Aus dieser Gleichung (22) ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten. An dieser Stelle wird jedoch nur auf die für diese Ausarbeitung wichtigen Fließbedingungen eingegangen. Dies sind die Fließbedingungen nach Drucker-Prager und von Mises.

Die von Mises Fließbedingung lautet:

$$F = II_{\sigma} - k^2 = 0 \quad (23)$$

Plastisches Fließen tritt somit auf, wenn II_{σ} den Wert k^2 erreicht. Der Wert k^2 ist auch hier wieder ein Werkstoffparameter. Die von Mises Fließbedingung kann auch in folgender Form geschrieben werden:

$$F = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (24)$$

Demnach ist im Raum der Hauptspannungen die Fließfläche nach dem Mathematiker von Mises eine Kreiszyylinderfläche mit einer Mittelachse, die mit der hydrostatischen Achse zusammenfällt (s. Abbildung 11). Der Radius des Fließflächenzylinders beträgt $\sqrt{2}k$. Wird die Fließfläche im zweidimensionalen Hauptspannungsraum ($\sigma_3 = 0$) betrachtet, ergibt sich eine konvexe elliptische Fläche. Diese Fließfläche unterscheidet nicht zwischen Zug- ($\sigma_2 = 0, \sigma_1 = \sigma_y$) und Druckbelastung ($\sigma_2 = -\sigma_y, \sigma_1 = 0$). Daher schneidet die Fläche jede Achse bei exakt identischen Werten, der Streckgrenze des Materials.

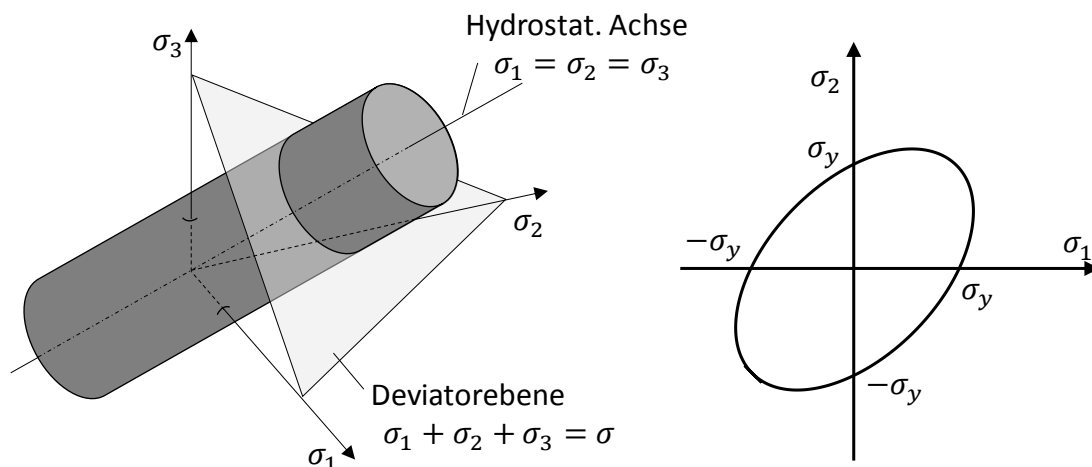


Abbildung 11 Der von Mises Fließkörper; links: im Hauptspannungsraum, rechts: in der Hauptspannungsebene (Stang, HAW Hamburg 2015)

Die Fließfläche nach von Mises ist für Werkstoffe mit isotropen Eigenschaften geeignet. Für anisotrope Werkstoffe bietet sich beispielsweise die Fließbedingung nach Drucker-Prager an. Diese kann unterschiedliche Streckgrenzen für Druck- und Zugspannungen berücksichtigen. So ergibt sich die folgende Fließbedingung nach Drucker-Prager im Hauptspannungsraum mit den Hauptspannungen σ_1, σ_2 und σ_3 :

$$\frac{m+1}{2m} \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} + \frac{m-1}{2m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{Fc} \quad (25)$$

$$\text{mit } m = \frac{\sigma_{Fc}}{\sigma_{Ft}}$$

Der Parameter m ist dabei über die Streckgrenze für Zugspannungen σ_{Fc} und der Streckgrenze für Druckspannungen σ_{Ft} definiert. Im Gegensatz zur von Mises Fließbedingung

ist die Drucker-Prager Fließbedingung vom hydrostatischen Druck abhängig. So kann ein rein hydrostatischer Spannungszustand ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) ein Fließen hervorrufen. Der Fließkörper nach Drucker-Prager stellt einen spitz zulaufenden Kegel im Hauptspannungsraum dar. Bei hohem hydrostatischem Druck wird der Kegel aufgeweitet, sodass das Material mehr Dehnung erfahren muss, bevor es zu fließen beginnt. In der Hauptspannungsebene ($\sigma_3 = 0$) in Abbildung 12 ist der Unterschied zur von Mises Fließbedingung verdeutlicht. Hierbei ist zu erkennen, dass im Bereich von negativen Hauptspannungen die Fließfläche größer ist als bei positiven Hauptspannungen.

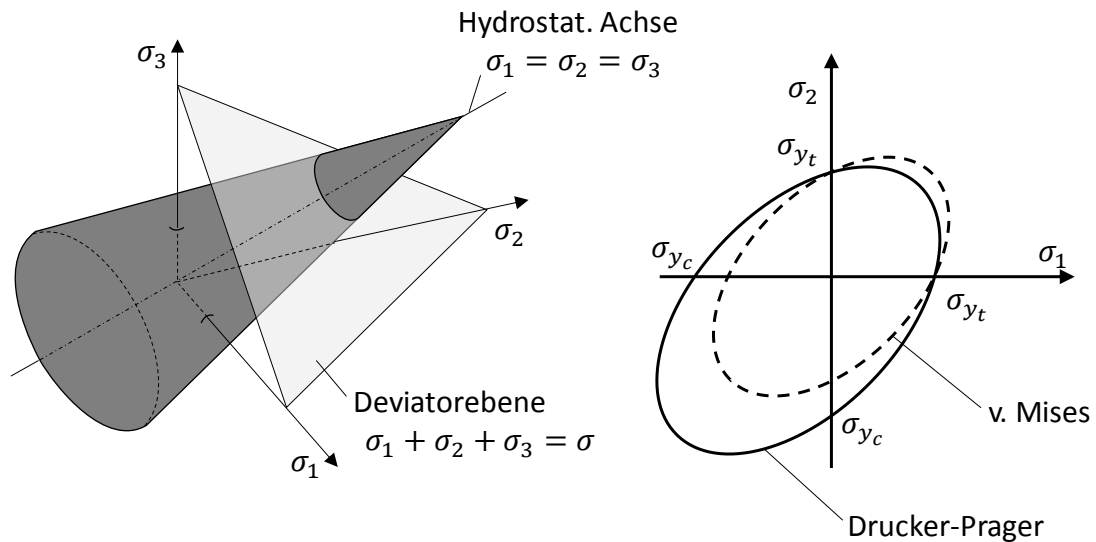


Abbildung 12 Drucker-Prager Fließkörper links: Hauptspannungsraum, rechts: Hauptspannungsebene (Stang, HAW Hamburg 2015)

Der Drucker-Prager Fließkörper eignet sich für die Modellierung von Polymeren mit ihren anisotropen Eigenschaften, die durch eine Faserverstärkung, Belastung oder den Spritzgussprozess entstehen können. Ein rein hydrostatischer Spannungszustand durch Zugspannungen kann ab einem gewissen Punkt bereits zu plastischem Fließen führen. Dies ist bei dem Fließkörper nach von Mises durch die Unabhängigkeit von der hydrostatischen Achse nicht der Fall.

Fließregel

Wie bereits beschrieben, kann mithilfe der Fließbedingungen bestimmt werden, wann der Übergang von elastischen Dehnungen auftritt. Ab diesem Punkt wird das Werkstoffverhalten mit den Fließregeln bestimmt. Sobald plastische Dehnungen auftreten, besteht kein Zusammenhang mehr zwischen Dehnungen und Spannungen. Ein Zugversuch mit Entlastung beispielsweise, führt zu zwei unterschiedlichen Spannungen für einen Dehnungswert. Dies ist in Abbildung 13 dargestellt.

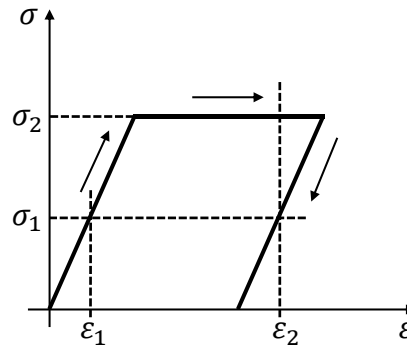


Abbildung 13 Zugversuch mit Entlastung (Eigene Darstellung)

Demnach gibt es für die Dehnung ε_2 zwei Spannungswerte; dies wären σ_1 und σ_2 . Der aktuelle Zustand hängt bei plastischen Verformungen demnach von der Verformungsgeschichte ab. Um eine Verbindung zwischen beiden Größen herzustellen, bietet es sich an, die Spannung in Abhängigkeit eines plastischen Dehnungsincrementes $d\underline{\underline{\varepsilon}}^{(pl)}$ auszudrücken (26).

$$d\underline{\underline{\varepsilon}}^{(pl)} = d\underline{\underline{\varepsilon}}^{(pl)}(\underline{\underline{\sigma}}) \quad (26)$$

Differentielle Änderungen werden häufig durch die inkrementelle Zeit dt geteilt. Dadurch kann die obige Gleichung auch in Ratenformulierung geschrieben werden als:

$$\underline{\underline{\varepsilon}}^{(pl)} = \underline{\underline{\varepsilon}}^{(pl)}(\underline{\underline{\sigma}}) \quad (27)$$

Daraus folgt ein gängiges Fließgesetz in Ratenformulierung:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} = \dot{\lambda} \sigma'_{ij} \text{ bzw. mit } \sigma'_{ij} = \frac{\delta g}{\delta \sigma_{ij}} \rightarrow \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} = \dot{\lambda} \frac{\delta g}{\delta \sigma_{ij}} \quad (28)$$

Der Proportionalitätsfaktor $\dot{\lambda}$ stellt sich dabei so ein, dass der Spannungsdeviator σ'_{ij} während plastischer Formänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}$ die Fließfläche nicht verlässt.

Wenn das plastische Fließpotenzial g ungleich der Fließbedingung f ist, wird dieser Zustand als nicht-assoziiertes Fließen bezeichnet. Bei Übereinstimmung von der Fließbedingung f mit dem plastischen Fließpotenzial g wird dagegen vom assoziierten Fließen gesprochen. Die Anpassung an experimentelle Ergebnisse gelingt mit der nicht-assoziierten Fließregel besser.

Da Polymere während plastischer Dehnung keine Volumenkonstanz aufweisen, ist es von Vorteil, wenn von einer nicht-assoziierten Fließregel ausgegangen wird. Durch das plastische Potential g kann der Grad der Volumendehnung beschrieben werden und somit die Volumendilatation adressiert werden. In Abbildung 14 ist die Fließfläche f sowie das plastische Fließpotential g in der Invariantenebene dargestellt.

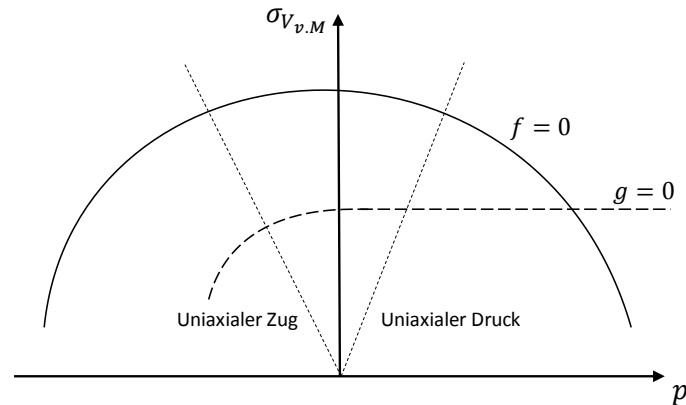


Abbildung 14 Quadratische Fließfläche f und plastisches Potential g für Polymere in Anlehnung an (Daiyan, 2011)

Wie zu erkennen ist, entspricht das plastische Fließpotential $g(p)$ unter Druckbelastungen der von Mises Fließfläche. Bei Zugbelastung hingegen wird die Volumenänderung berücksichtigt, sodass dort eine quadratische Abhängigkeit des hydrostatischen Druckes definiert ist. Die Fließbedingung f ist symmetrisch zur Ordinate und stellt sich durchgehend als quadratisch abhängig vom hydrostatischen Druck dar.

Verfestigung

Eine plastische Verformung führt meist zu einer Verfestigung des Werkstoffes. Die Spannung, die für eine weitere Verformung benötigt wird, steigt an. Dieses Verhalten liegt am Aufbau des Werkstoffes, auf welches bereits in Kapitel 1.1 „Struktur der Polymere“ eingegangen wurde. Bei Polymeren ist der Verfestigungsprozess durch die Vorgänge auf molekularer Ebene begründet. Hierbei kommt es zu irreversiblen Umlagerungen der Molekülketten, welche die Möglichkeit haben, sich parallel zur ersten Hauptspannung auszurichten. Dadurch wird das Material in der Belastungsrichtung „verfestigt“. Im Falle einer Druckbelastung werden die Molekülketten aufeinandergesprengt und Abgleitvorgänge werden erschwert. Wie bereits im vorherigen Kapitel geschildert, ist ein Zustand außerhalb der Fließfläche nicht zulässig, weshalb sich der Fließkörper aufweiten muss, um eine Verfestigung abzubilden.

Die veränderliche Fließflächendefinition ($g(x)$) lautet demnach:

$$g(\sigma_{ij}, k_l, \varepsilon_{ij}^{pl}) = 0 \quad (29)$$

Die Komponenten sind hierbei: k_l stellvertretend für einen Satz an Verfestigungsparametern, ε_{ij}^{pl} als aktuelle plastische Verformung und der aktuelle Spannungszustand über den Cauchy'schen Spannungstensor σ_{ij} .

Wie bei der ursprünglichen Funktion wird der Werkstoff für $g < 0$ elastisch verformt.

Im Folgenden sollen zwei verschiedene Arten der Verfestigung vorgestellt werden, die isotrope und die kinematische Verfestigung.

Zunächst wird auf die isotrope Verfestigung eingegangen, bei ihr kann die veränderliche Fließflächendefinition vereinfacht werden zu:

$$g(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_l(\varepsilon_v^{pl})) = 0 \quad (30)$$

Im Unterschied zur allgemeinen Definition der veränderlichen Fließfläche wird hier anstatt der aktuellen plastischen Verformung ε_{ij}^{pl} die plastische Vergleichsdehnung ε_v^{pl} herangezogen. Bei der isotropen Verfestigung wächst die Fließfläche symmetrisch zum Ursprung (s. Abbildung 15). Hierdurch fällt der Anteil der plastischen Verformung ε_{ij}^{pl} weg. Wie stark die Fließbedingung aufgeweitet wird, hängt vom Verfestigungsgesetz ab. Ein einfaches Verfestigungsgesetz ist das sogenannte lineare Verfestigungsgesetz. Um die Fließspannung σ_f zu beschreiben, wird ein Verfestigungskoeffizient H eingeführt. Als Anfangsbedingung für den Fließvorgang wird angenommen, dass die Fließspannung der Streckgrenzen Spannung entspricht $\sigma_f = \sigma_y$. Die Größe der Fließspannung σ_f hängt proportional mit der plastischen Vergleichsdehnung ε_v^{pl} zusammen:

$$\sigma_f = \sigma_y + H \times \varepsilon_v^{pl} \quad (31)$$

In Abbildung 5 ist die isotrope Verfestigung anhand eines Zugversuches erläutert. Wird im Zugversuch die Streckgrenze R_p überschritten, ist die Fließbedingung (30) erfüllt und der Werkstoff verformt sich plastisch. Die Schnittpunkte der Fließbedingung mit den Hauptspannungsachsen werden um den Faktor $\frac{\sigma_f}{\sigma_y}$ vergrößert. Wird während dem plastischen Deformationsvorgang die Belastung umgekehrt, muss die Belastung größer als zuvor sein, um weitere plastische Dehnungen zu erzeugen.

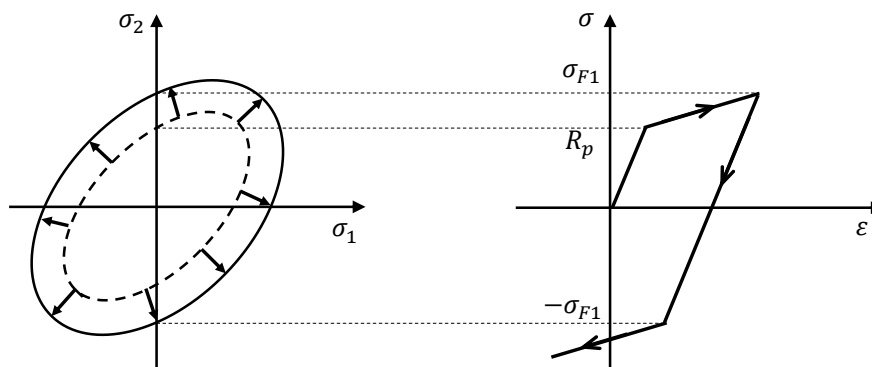


Abbildung 15 Isotrope Verfestigung in Anlehnung an (Rösler, 2006)

Bei den meisten Materialien ist der Verfestigungsvorgang eine Mischung aus der isotropen und kinematischen Verfestigung (Rösler, 2006), weshalb nun im Sinne der Vollständigkeit auf die kinematische Verfestigung näher eingegangen wird. Bei einer kinematischen Verfestigung verschiebt sich der Ursprungspunkt der Fließbedingung im Hauptspannungsraum und die Größe der eingeschlossenen Fläche bleibt konstant. Wie bei der isotropen Verfestigung hängt es vom Verfestigungsgesetz ab, wie stark die Fließbedingung verschoben wird. Durch die kinematische Verfestigung kann das Phänomen des „Bauschinger-Effektes“ erklärt werden. In Abbildung 16 „Kinematische Verfestigung“ ist ein starker „Bauschinger-Effekt“ zu erkennen; dort hat sich nach dem Verfestigen durch plastische Verformungen die Fließbedingung so weit verschoben, dass bei umgekehrter Belastung das Material bei positiven Dehnungen erneut zu fließen beginnt.

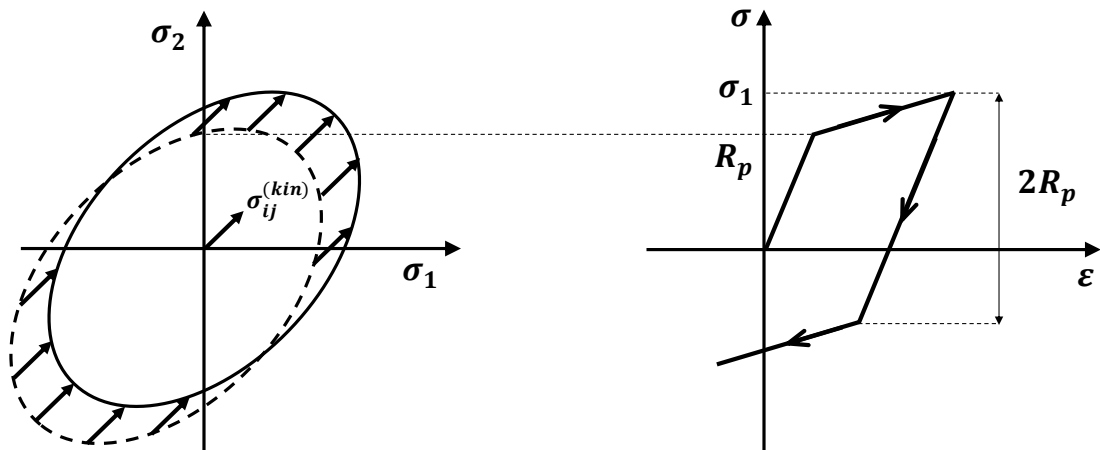


Abbildung 16 Kinematische Verfestigung (Rösler, 2006)

Durch die Verschiebung der Fließbedingung im Hauptspannungsraum, wird das Material anisotrop.

1.3 Materialmodell SAMP-1

Das Materialmodell SAMP-1 („**S**emi-**A**nalytical **M**odel for simulation of **P**olymers“) wurde mit DYNAmore GmbH und der Daimler AG in Zusammenarbeit mit Paul Du Bois entwickelt (Kolling, 2005). Bei dynamischen Belastungen mit hoher Belastungsgeschwindigkeit sind Kunststoffe meist auch hohen plastischen Verformungen unterworfen und werden versagen. Um dies abzubilden, ist das Entlasten sekundär und Kunststoffe können als elasto-plastische Körper modelliert werden (Kolling, 2005). Durch die Analogie zu Metallen werden Kunststoffe oft mit Materialkarten abgebildet, welche ursprünglich für die Abbildung von Metallen entwickelt wurden. Im Falle des Solvers LS-DYNA ist hier die Materialkarte „MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY“ (kurz „MAT_24“) zu nennen. Diese ist eine elasto-plastische Materialkarte mit einer von Mises Fließbedingung. Die einfachste Formulierung der Materialkarte MAT_24 findet durch die Definition des Elastizitätsmoduls für elastische Dehnungen und eines Tangentenmoduls für plastische Dehnungen statt. Dadurch wird die Fließkurve als lineare Funktion beschrieben. MAT_24 kann jedoch auch Dehnrateneffekte auf Basis von Versuchsdaten implementieren. Der Umfang ist für die meisten transienten Simulationen von Kunststoffen ausreichend. Jedoch sind die Annahmen des Materialmodelles wie die Volumenkonstanz oder die Druck-/Zugisotropie nur für Metalle zutreffend. Dadurch schleicht sich bei der Verwendung dieser Materialmodelle automatisch ein Fehler ein. Ist eine höhere Aussagegüte gefragt, kann SAMP-1 mit seinen vielen Eingabeoptionen deshalb realitätsnähere Ergebnisse liefern.

Mit SAMP-1 können experimentell beobachtete Phänomene, wie die Einschnürung, die Dehnratenabhängigkeit, das Entlastungsverhalten und das Versagen von Kunststoffen adressiert werden (Kolling, 2005). Zudem kann das unterschiedliche Verhalten auf verschiedene Spannungszustände berücksichtigt werden. So können für die vier verschiedenen Spannungszustände Scherung, Kompression, Zug und bi-axialem Zug Versuchsdaten hinterlegt werden, welche dann durch eine quadratische Fließbedingung beschrieben werden. Besonders die Berücksichtigung des Spannungszustandes und die Option die Volumenkonstanz zu steuern, führen zu einer größeren Eignung für die Simulation von Kunststoffen im Gegensatz zu Materialmodellen auf Basis der von Mises Fließbedingung, wie zum Beispiel dem oben genannten MAT_24.

Aufgrund ihres molekularen Aufbaus sind Kunststoffe sehr dehnratenabhängig (Kolling, 2005) Eine geeignete visko-plastische Formulierung ist daher wichtig, um dieses Verhalten korrekt abzubilden. Die Dehnratenabhängigkeit in SAMP-1 wird über die tabellarische Eingabe von dynamischen Zugversuchen implementiert. Auf dieser Basis interpoliert SAMP-1 die Fließkurve und Fließspannung für den jeweiligen Dehnungszustand des Elementes. Das Materialmodell unterliegt der Annahme, dass der Dehnrateneffekt für jeden Spannungszustand identisch ist; daher folgt für die Fließspannung des Spannungszustandes Schub σ_s und Druck σ_c auf Basis der Fließspannung der Zugversuche σ_t :

$$\sigma_s = \sigma_{sQS} \frac{\sigma_t}{\sigma_{tQS}} \quad (32)$$

$$\sigma_c = \sigma_{cQS} \frac{\sigma_t}{\sigma_{tQS}} \quad (33)$$

Wie in der Formel angegeben, wird die statische Fließkurve ($\sigma_{cQS}, \sigma_{sQS}$) der jeweiligen Spannungszustände skaliert. Die Abhängigkeit des Materials von der Belastungsgeschwindigkeit wird nur anhand von Zugversuchen qualifiziert; dies ist vertretbar, da dynamische Druck- und Scherversuche schwierig in der Praxis umzusetzen sind.

Durch den modularen Aufbau des Materialmodells SAMP-1 können je nach Verfügbarkeit von Versuchsdaten für maximal vier Spannungszustände Fließkurven hinterlegt werden. Im einfachsten Fall jedoch nur eine Fließkurve aus Zugversuchen. Je nach Umfang der Eingabedaten passt SAMP-1 die Formulierungen für die Fließfläche an. Werden nur Zugversuchsdaten implementiert, wird die Fließfläche durch eine von Mises Fließbedingung beschrieben, mit der Annahme einer Zug-/Druckisotropie. Die Streckgrenze für den Spannungszustand „Zug“ und „Druck“ ist dadurch äquivalent. Durch Ergänzung von einem weiteren Spannungszustand wie Druck- oder Scherversuchen wird die Fließfläche zur Drucker-Prager Formulierung erweitert. Die Drucker-Prager Formulierung weist keine Zug-/Druck-Isotropie auf und ist daher besonders geeignet die Abhängigkeit eines Kunststoffes von der Belastungsrichtung abzubilden. Die Ergänzung einer dritten Versuchsreihe definiert die Fließfläche vollständig, da alle drei Parameter in Gleichung (35) berechnet werden können. Sollten für alle vier Spannungszustände Daten vorliegen, wird das Materialmodell versuchen, über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, die Fließbedingung den Versuchsdaten anzunähern.

Die Fließbedingung f in SAMP-1 wird grundsätzlich als quadratische Gleichung wie folgt ausgedrückt:

$$f = \sigma_{vm}^2 - A_0 - A_1 p - A_2 p^2 \leq 0 \quad (34)$$

Die drei Koeffizienten A_0 , A_1 und A_2 werden anhand der Versuchsergebnisse der drei unabhängigen Spannungszustände Druck σ_c , Schub σ_s und Zug σ_t kalibriert.

$$\begin{aligned} 3\sigma_s^2 = A_0 & \rightarrow A_0 = 3\sigma_s^2 \\ \sigma_t^2 = 3\sigma_s^2 - A_1 \frac{\sigma_t}{3} + A_2 \frac{\sigma_t^2}{9} & \rightarrow A_1 = 9\sigma_s^2 \left(\frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c \sigma_t} \right) \\ \sigma_c^2 = 3\sigma_s^2 + A_1 \frac{\sigma_c}{3} + A_2 \frac{\sigma_c^2}{9} & \rightarrow A_2 = 9 \left(\frac{\sigma_c \sigma_t - 3\sigma_s^2}{\sigma_c \sigma_t} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

Grundsätzlich ist der Nutzer aufgefordert, auf die Konvexität der Fließbedingung zu achten. Diese ist gegeben, wenn folgende Bedingung für die Streckgrenze des Scherversuches σ_s erfüllt ist:

$$\sigma_s \geq \frac{\sqrt{\sigma_t \sigma_c}}{2} \quad (36)$$

Anderenfalls entsteht eine hyperbolische Fließbedingung und die Konvexität ist verloren. An Abbildung 17 sind verschiedene Fließbedingungen in Abhängigkeit der Streckgrenze des Scherversuches σ_s in der Hauptspannungsebene aufgetragen. Für den Fall, dass die

Streckgrenze des Scherversuches σ_s nicht der Bedingung (36) entspricht, ergibt sich die erwähnte hyperbolische Fließbedingung (Graph C in Abb.(17)). Dies würde bedeuten, dass bei bi-axialer Belastung keine Plastifizierung des Materials auftritt. Erst wenn die obige Bedingung erfüllt ist, entsteht eine realistische konvexe Fließbedingung (Graph A).

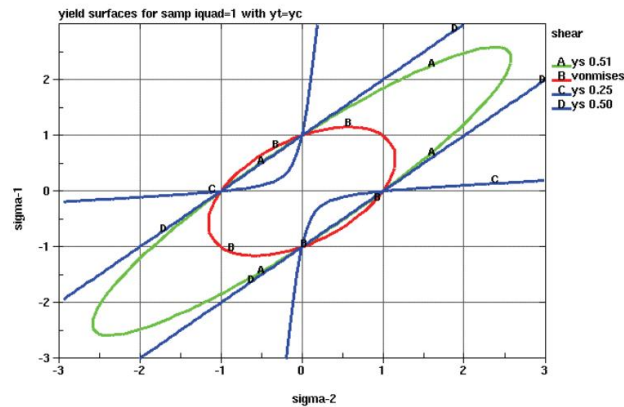


Abbildung 17 Fließbedingung in der Hauptspannungsebene (Kolling, 2005)

Bei elasto-plastischen Materialmodellen, wie dem MAT_24 mit einer von Mises Fließbedingung, wird eine Volumenkonstanz während Formänderungen im plastischen Zustand angenommen. Dies trifft nicht auf Kunststoffe zu, weshalb SAMP-1 die Möglichkeit bietet, den Verlauf der plastischen Querkontraktion v_p zu implementieren. Diese kann aus Zug- oder Druckversuchen extrahiert werden, indem das Verhältnis aus transversaler $\dot{\varepsilon}_{xxp}$ und longitudinaler Dehnrate $\dot{\varepsilon}_{yyp}$ berechnet wird (37).

$$v_p = -\frac{\dot{\varepsilon}_{yyp}}{\dot{\varepsilon}_{xxp}} \quad (37)$$

Die plastische Querkontraktion v_p kann als fester Wert oder in Abhängigkeit der plastischen Dehnung definiert werden. Dies ermöglicht kompressibles Verhalten während der plastischen Verformung abzubilden. Die Definition einer plastischen Querkontraktionszahl erfordert auch die Verwendung einer nicht assoziierten Fließregel. An dieser Stelle sei auf die Ausführungen in Kapitel 1.2 „Strukturmechanik“ verwiesen.

Da bei Verwendung einer nicht assoziierten Fließregel das Fließpotenzial g ungleich der Fließbedingung f ist, folgt das plastische Potenzial g :

$$g = \sqrt{\sigma_v^2 + \alpha p^2} \quad (38)$$

Mit der Definition der plastischen Querkontraktionszahl α :

$$\alpha = \frac{9}{2} \frac{1 - 2v_p}{1 + v_p} \quad (39)$$

1.4 Anforderungen an dynamische Versuche

Unter dynamischem Testen wird verstanden, dass der Versuch zeitlich transient ist, also seine Größen wie beispielsweise die Last oder die Prüfgeschwindigkeit kontinuierlich variieren (Gross, et al., 2015). Daher können dynamische Versuche zum Beispiel zyklische Versuche wie Dauerfestigkeitsversuche oder auch Schnellzerreiversuche beschreiben. In dieser Ausarbeitung geht es um Schnellzerreiversuche an Kunststoffproben. Die Begründung dynamisch zu testen liegt zum einen daran, dass die meisten Bauteile transienten Belastungen unterliegen; außerdem zeigen Polymere eine starke Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit. In diesem Kapitel wird auf die Besonderheiten eingegangen, die es zu beachten gilt, wenn Materialien dynamisch belastet werden.

Zunächst wird der Begriff der Dehnrates erläutert. Die Dehnrates $\dot{\varepsilon}$ beschreibt die Dehnungsgeschwindigkeit. Analog zur Geschwindigkeit ist dies das Verhältnis von Dehnungsänderung $d\varepsilon$ zur Zeitänderung dt . Diese Größe wird oft im Zusammenhang mit dynamischen Versuchen genannt, da es eine Größe darstellt, welche unabhängig von der jeweiligen Bauteilgröße ist und sich somit gut vergleichen lässt.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (40)$$

Meist können die zu erwartenden Dehnrates im Versuch mit der nominellen Dehnrates abgeschätzt werden. Die nominelle Dehnrates fordert als Eingabe nur die Prüfgeschwindigkeit V_0 und die eingespannte Länge L_c des Prüfkörpers.

$$\varepsilon_{nom} = \frac{V_0}{L_c} \quad (41)$$

Die späteren Materialtests werden bei den Geschwindigkeiten $1 \frac{m}{s}$ sowie $5 \frac{m}{s}$ durchgeführt. Wird die obige Formel angewendet, resultiert bei einer Einspannlänge von 20 mm eine Dehnrates von $\dot{\varepsilon} = 250 \frac{1}{s}$ für die schnellste Abzugsgeschwindigkeit und eine Dehnrates von $\dot{\varepsilon} = 50 \frac{1}{s}$ für die langsamere Abzugsgeschwindigkeit. Dies ist vergleichbar mit den Dehnrates, welche bei einem Frontalcrash im Längsträger eines Fahrzeuges auftreten, wenn das Fahrzeug eine Aufprallgeschwindigkeit von 50 km/h hat.

Die Dehnrates während der Versuchsdurchführung wird selten konstant sein, da die Geschwindigkeiten der Längenänderung und der Querschnittsverjüngung der Probe nicht konstant gehalten werden können. Ein typischer Dehnratesverlauf ist in Abbildung 18 „Dehnratesverlauf eines quasistatischen Zugversuches“ dargestellt.

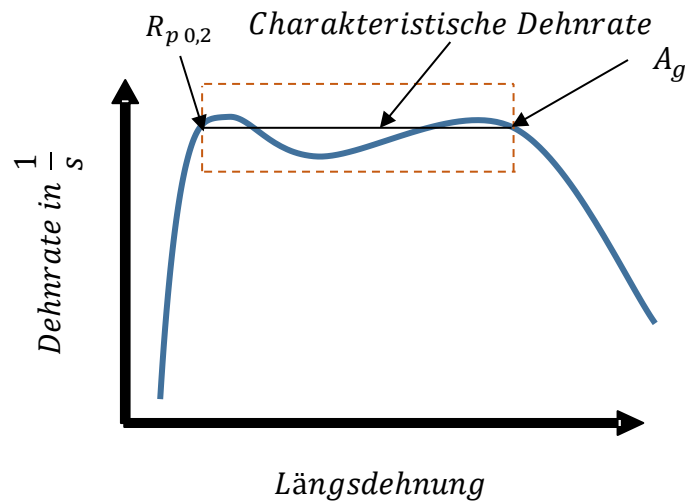


Abbildung 18 Dehnratenverlauf eines quasistatischen Zugversuches (Eigene Darstellung)

Als Kriterium für eine erfolgreiche Versuchsdurchführung kann das Kriterium aus der Forschungsvereinigung Automobiltechnik herangezogen werden (Böhme, 2007). Dabei darf die Dehnrade, bis zur Gleichmaßdehnung A_g , 30% von der charakteristischen Dehnrade abweichen. Die charakteristische Dehnrade ist der Mittelwert der Dehnrade zwischen der elastischen Dehngrenze und der Gleichmaßdehnung. In Abbildung 18 ist der Korridor, in welchem die Dehnrade schwanken darf, durch den gestrichelten Kasten verdeutlicht. Befindet sich die Dehnrade bis zur Gleichmaßdehnung in diesem Bereich, kann der Versuch als gültig eingestuft werden.

Neben der Dehnrade gilt es eine weitere Größe zu beachten, welche in dynamischen Versuchen einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Diese Größe ist das dynamische Spannungsgleichgewicht. Bei dynamischen Versuchen kann es vorkommen, dass das Material schneller belastet wird, als sich die Schallgeschwindigkeit im Material ausbreiten kann. Risse und Spannungen schreiten mit Schallgeschwindigkeit fort (Wissenschaft.de, 2006). Wird die Probe schneller belastet als die Spannungen sich ausbreiten können, kann dies unerwartete Ergebnisse liefern. So kann eine Probe beispielsweise in einem Bereich nachgeben, welcher nicht dafür vorgesehen ist. Beispielsweise kann die Probe an der Einspannung anstelle des eingeschnürten Bereiches versagen. Während die beschriebenen Phänomene durchaus optisch und damit subjektiv erkennbar sind, ist es hilfreich, gleichzeitig auch ein objektives Bewertungskriterium heranzuziehen. Dieses Kriterium ist die Erreichung des dynamischen Spannungsgleichgewichtes.

Ein Spannungsgleichgewicht ist ein Gleichgewicht, in welchem die Spannungen homogen im Bauteil verteilt sind. Des Weiteren geht damit eine homogene Verformung einher. Hauptsächliche Bedingung für ein Spannungsgleichgewicht ist, dass die Spannungswellen, welche durch die Belastung induziert werden, mindestens drei Mal am gegenüberliegenden Ende reflektiert werden (Xinran, 2007). Im einfachsten Falle eines eindimensionalen Stabes ergibt sich die Schallgeschwindigkeit wie folgt:

$$c_{Stab\ 1D} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (42)$$

Wird der Elastizitätsmodul E des Materials erhöht, führt dies zu einer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit; eine Erhöhung der Dichte ρ hingegen führt zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit.

Für Festkörper wird die Querkontraktion in der Berechnung der Schallgeschwindigkeit berücksichtigt. Bei Festkörpern gilt folgender formelmäßiger Zusammenhang:

$$c_{\text{festkörper } 3D} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad (43)$$

Eine Erhöhung der Querkontraktionszahl durch die Wahl eines anderen Materials führt zu einer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit.

Mithilfe der Schallgeschwindigkeit für Festkörper lässt sich berechnen, wie lange drei Schallwellen benötigen, um reflektiert zu werden. Da die reflektierte Schallwelle zunächst den Probenkörper durchschreiten und im Anschluss durch die Reflektion die gleiche Strecke zurücklegen muss, wird die Länge der Probe mit dem Faktor 2 versehen (44). Die Zeit, welche benötigt wird, bis ein Spannungsgleichgewicht erreicht ist, lässt sich auf Basis der Länge der Probe L und der zuvor berechneten Schallgeschwindigkeit c (43) wie folgt berechnen:

$$T = n \frac{2L}{c} \quad (44)$$

Um zu prüfen, ob ein Versuch das erwähnte Kriterium erfüllt, muss die obige Formel umgestellt und nach n aufgelöst werden:

$$n = \frac{T \times c}{2L} \quad (45)$$

Dadurch kann, für einen beliebigen Versuch, die Anzahl der Schallwellendurchgänge während der Lastaufbringung bestimmt werden. Um dieses Vorgehen anschaulich darzustellen, ist die Zeit, bis die Belastung auf die Probe aufgebracht wurde, in Abbildung 19 „Lastaufbringung auf eine Zugprobe“ gekennzeichnet. Aus Abbildung 19 kann als Dauer der Lastaufbringung etwa $t = 0.3 \text{ ms}$ angenommen werden.

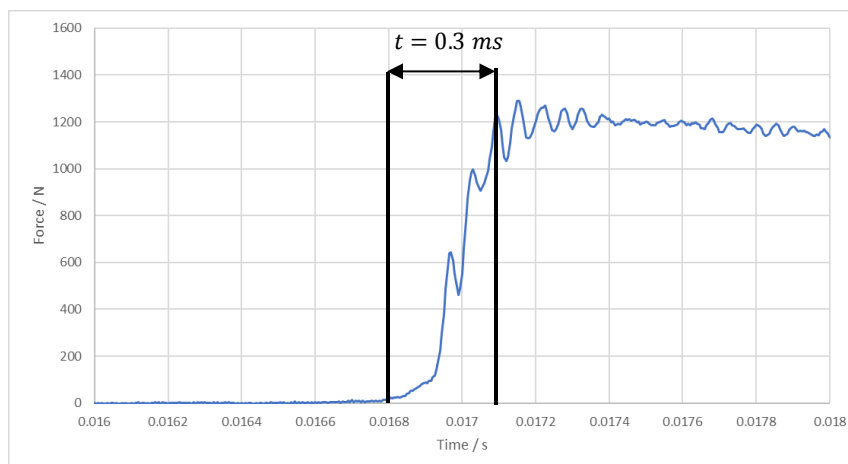


Abbildung 19 Lastaufbringung auf eine Zugprobe (Eigene Darstellung)

Anhand des Beispiels von obiger Abbildung ergeben sich, mit einer Schallgeschwindigkeit des Festkörpers von $245 \frac{m}{s}$ und einer Einspannlänge von 30 mm , 1.23 reflektierte Wellen im Probenkörper für die Lastaufbringungsphase. In diesem Fall wäre es ein ungültiger Versuch, da mindestens drei reflektierte Wellen erforderlich sind (Xinran, 2007). Sobald dynamisch getestet wird, sind Schwingungen unvermeidbar. Das System wird durch das stoßartige Ankoppeln der Probe an den Kraftstrang zu Schwingungen angeregt. Dies können Biege- oder Längsschwingungen sein, die sich als Oszillationen im Kraftsignal zeigen. Selbst bei einem ideal plastischen Koppeln des Kraftstranges an die Probe werden Schwingungen induziert. Ein Grund dafür kann beispielweise das Geschwindigkeitsprofil der Maschine sein, welches selten konstant ist. Besonders kritisch für die Auswertung der Versuche und der wichtigen Kennwerte der Materialien ist die Güte der Kraftmessung. Es gibt wenige Anhaltswerte, ab wann eine Kraftmessung zu stark mit Schwingungen überlagert ist. In der Forschungsvereinigung für Automobiltechnik (FAT)-Richtlinie „Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation“ ist ein objektives Bewertungskriterium aufgeführt. Dieses bewertet die erste Schwingung des Kraftsignales, indem Maxima F_{1max} und Minima F_{1min} verglichen werden.

$$\frac{F_{1max}}{F_{1min}} \leq F_g \quad (46)$$

Je nach Genauigkeitsanforderungen der Anwendung wird der Parameter F_g wie folgt festgelegt (Böhme, 2007):

$F_g = 1.3$	Für die Anwendung bei Crashsimulationen und hoher Genauigkeit schon im Anfangsbereich bei Fließbeginn.
$F_g = 2.0$	Für vergleichende Werkstoffuntersuchungen ohne Bestimmung von Dehn-/Streckgrenze, aber noch hinreichend genau zur Bestimmung des R_m -Wertes aus dem mittleren Kraftsignal.

Generell lässt sich sagen, dass die Schwingungen im Kraftsignal reduziert werden, je geringer die Prüfgeschwindigkeit ist und je näher die Kraftmessung an der Probe erfolgt. Die Anwendung von Filtern und ein Glätten des Signales dürfen nur durchgeführt werden, wenn signifikante Eigenschaften des Signalverlaufes nicht verändert werden (Böhme, 2007).

2 Vorgehensweise und Zielsetzung

Im Rahmen der immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten in der Automobilindustrie, kann der konventionelle Weg der Bauteilentwicklung, mit reinen physikalischen Versuchen, nicht mehr eingeschlagen werden. Mithilfe von frühzeitigen Simulationen kann das Bauteil für verschiedene Lastfälle abgesichert und damit die Entwicklungszeit verkürzt werden. Um die Produktentwicklung weiter zu beschleunigen, muss die Aussagegüte der Simulation steigen.

Generell sind Kunststoffe schwieriger zu modellieren als Metalle. So können alle Finite-Elemente-Analyse- (FEA) Softwarelösungen lineare statische Berechnungen durchführen, dazu zählen auch zahlreiche integrierte Lösungen in CAD-Systemen. Diese bieten dem Entwicklungsingenieur erste Anhaltswerte für das Bauteilverhalten. Metalle mit ihrem Materialverhalten, welches während elastischer Verformungen dem Hookeschen Gesetz folgt, eignen sich für linear-statische Simulationen daher sehr gut. Kunststoffe mit ihrem nichtlinearen elastischen Verhalten eignen sich für diese Art der Simulation nicht und können nur mit fortgeschrittenen Methoden modelliert werden.

Insbesondere bei dynamischer Belastung ist die Vorhersage des Verhaltens des Kunststoffes ungenau, da Kunststoffe sensitiver auf Dehnraten reagieren als Metalle. Zudem gibt es selten Daten aus dem Materialdatenblatt oder von den Kunststoffherstellern selbst. Aus diesem Grund ist es notwendig eigene Versuche durchzuführen oder externe Versuche zu beauftragen, um Kunststoffe zu charakterisieren. In dieser Arbeit wird eine Methodik weiterentwickelt, wie aus Materialtests im Hause Autoliv, Materialkarten für die Simulation abgeleitet werden. Die bisherige Methode zeichnete sich durch eine breite Zugversuchsreihe aus, mit welcher ein „Reverse Engineering“-Prozess angestoßen wurde, um die Materialeigenschaften zu bestimmen. Vorherige Arbeiten legen nahe, dass die Einbeziehung von Druckversuchen eine Verbesserung der Aussagegüte nach sich zieht (Schoof, HAW Hamburg 2017).

Die Parameter Temperatur, Feuchtigkeit und Belastungsgeschwindigkeit haben einen signifikanten Einfluss auf das Materialverhalten. Ebenso wie der Spannungszustand, der in dieser Arbeit erstmalig untersucht wird. Bezüglich des Spannungszustandes sollen neben den Zugversuchen auch Druckversuche stattfinden. Hierdurch wird eine bessere Beschreibung der Fließfläche und damit auch des späteren Bauteilverhaltens erwartet.

Das Testprogramm mit 15 Zugversuchen, bei welchen der Parameter Belastungsgeschwindigkeit evaluiert wird, wird um fünf Druckversuche ausgeweitet.

Im nachfolgenden Kapitel 3 "Ermittlung eines geeigneten Druckversuches" wird ein geeigneter Druckversuch gesucht, der die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen erfüllt. Die Anforderungen sind ein plattenförmiger Probenkörper, ein homogener Verzerrungszustand während des Versuches und ein möglichst hoher Umformgrad. Eine Auswahl der Konzepte wird in Kapitel 3.1 „Konzeptvorstellung“ vorgestellt und diese Auswahl eines geeigneten Druckversuches durch die Simulation unterstützt. Insgesamt werden drei Konzepte untersucht.

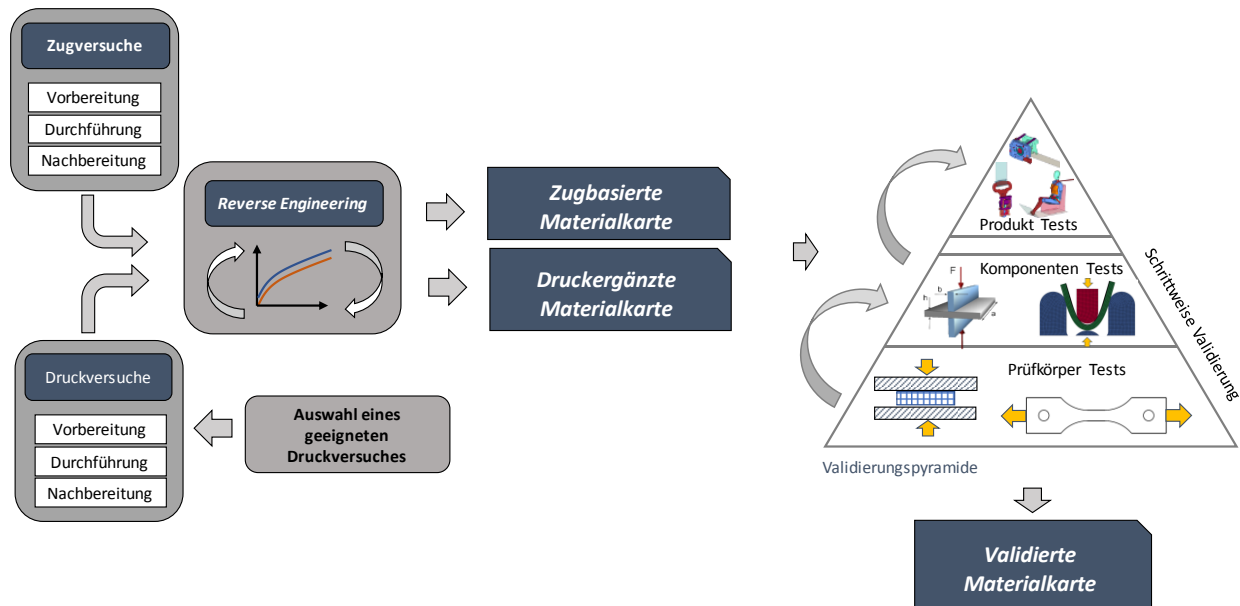


Abbildung 20 Vorgehensweise der Ausarbeitung zur Erstellung und Validierung einer Materialkarte (Eigene Darstellung)

Wenn ein geeigneter Druckversuch gefunden wird, startet der Materialkartenkalibrierungsprozess. In Abbildung 20 findet sich ein schematischer Ablauf des Prozesses, welcher gleichzeitig die Struktur dieser Ausarbeitung ist.

Gemäß diesem Prozess werden Zug- und Druckversuche durchgeführt. Dafür müssen die Proben zunächst, analog zu Kapitel 4.1 „Probenvorbereitung“, konditioniert und markiert werden. Im Anschluss werden die dynamischen und statischen Versuche durchgeführt und die Kraft-Weg- und Dehnungs-Abzugsweg-Kurven extrahiert. Danach schließt sich die Nachbereitung an, weshalb für jeden Testparameter ein „Motion-Tracking“ durchgeführt wird, sowie die Daten der Prüfmaschine ausgewertet werden. Die Ergebnisse dazu befinden sich in Kapitel 4.4 „Versuchsergebnisse des Zugversuches“. Eine abschließende Diskussion verweist auf die Unterschiede der Parameter und die Bedeutung für den Kalibrierungsprozess.

Mithilfe der Kraft-Weg- und der Dehnungs-Abzugsweg-Kurven wird ein iterativer „Reverse Engineering“-Prozess angestoßen, um die Parameter der Materialkarte zu bestimmen. Diese Parameter sind beispielsweise der E-Modul oder parametrisierte Formeln zur Bestimmung einer Fließkurve. Insgesamt wird dieser Prozess zweimal durchlaufen. Erstmalig um eine Materialkarte, basierend auf Zugversuchen, zu erstellen. Im Anschluss ein zweites Mal, um die Druckversuche zu berücksichtigen und eine druckergänzte Materialkarte auf Basis der Versuchsdaten zu erstellen.

Mit diesen beiden Materialkarten wird eine schrittweise Validierung vorgenommen. Nach den Versuchen mit konstantem Spannungszustand zur Materialkalibrierung schließt sich ein Komponentenversuch an. Diesen gilt es auszuwählen unter dem Aspekt eines möglichst multiaxialen Spannungszustandes, um die Vorhersagegüte der Materialkarten zu prüfen. Anhand des Komponentenversuches werden beide erstellten Materialkarten verglichen. Die höchste Ebene stellt die Simulation auf Produktebene dar; dort kann der Effekt der druckergänzten Materialkarte beim Zusammenspiel der Bauteile quantifiziert werden.

3 Ermittlung eines geeigneten Druckversuches

In diesem Kapitel soll ein geeigneter Versuch ermittelt werden, um Druckversuche an einem Polyamid 6.6 durchzuführen. Ein geeigneter Versuch ist ein solcher, welcher den Spannungszustand während der Versuchsdurchführung konstant hält, eine homogene Dehnungsverteilung aufweist und den Randbedingungen der Prüfmaschine gerecht wird. Nach einer Konzeptvorstellung werden die Konzepte hinsichtlich der Anforderungen simulativ geprüft und die Ergebnisse vergleichend dargestellt.

3.1 Konzeptvorstellung

Es gibt diverse Meinungen, welcher Versuch für die Charakterisierung von Fließkurven im Spannungszustand Druck am geeignetsten ist. „Die große Zahl an Verfahren zum Bestimmen der Fließspannung lässt vermuten, dass keines alle Anforderungen ideal erfüllt und dass je nach Anwendungsfall, das eine oder andere Verfahren Vorteile bietet.“ (Doege, 1986). Die erste Einschränkung, die es zu beachten gilt, ist, dass die Probenkörper im Rahmen dieser Ausarbeitung plattenförmig sein müssen. Das vorhandene Spritzgusswerkzeug bietet die Möglichkeit, Probenkörper aus einer 4 mm dicken Platte zu entnehmen. Im Folgenden werden Versuchsaufbauten vorgestellt, welche der Literatur entnommen oder davon abgeleitete Varianten sind.

Die Versuche sollen im Anschluss mithilfe eines „Reverse Engineering“-Prozesses nachgebildet werden, um auf die Materialparameter zu schließen. Von Vorteil wäre ein homogener Dehnungszustand während des Versuches, damit auf eine optische Dehnungsmessung verzichtet werden kann.

In Doege et al. werden verschiedene Versuche vorgestellt, mit flachen Proben als Ausgangsbasis. Dort befindet sich beispielsweise der Flachstauchversuch, bei welchem eine Platte mithilfe von zwei Stempeln lokal komprimiert wird. Eine beispielhafte Darstellung befindet sich in Abbildung 21 „Flachstauchversuch“.

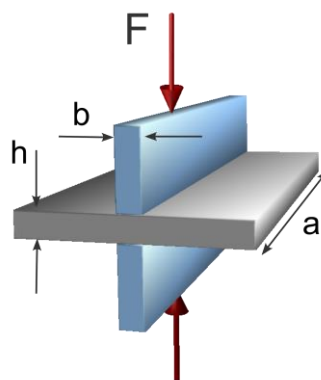


Abbildung 21 Flachstauchversuch [Lokilech <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flachstauchversuch.svg>]

Dieser Versuch bietet eine relativ einfache Möglichkeit, Kompressionsversuche mit einem hohen Umformgrad von bis zu $\varphi = 2$ durchzuführen. Für die Einhaltung eines homogenen Spannungszustandes gilt es, einige Randbedingungen bezüglich der

Abmaße zu beachten. So muss beispielweise das Breite zu Höhe Verhältnis $\frac{a}{h_0} > 6$ sein, um einen angenähert ebenen Formänderungszustand zu erzwingen. Desweiteren sollte die initiale Probendicke h_0 äquivalent zur Stempeldicke b sein (Doege, 1986). Mit dem Flachstauchversuch wird hier ein Versuchsaufbau angeboten, bei dem Auswertung und Durchführung vermeintlich einfach sind.

Neben dem Flachstauchversuch bietet sich die Möglichkeit, analog zu dem Zylinderstauchversuch, einen plattenförmigen Probenkörper zwischen zwei Stempeln zu komprimieren.

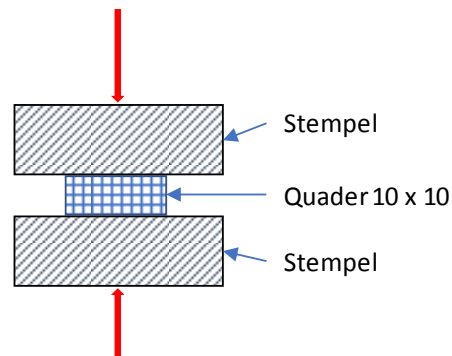


Abbildung 22 Kompressionsversuch einer Platte (Eigene Darstellung)

Dieser Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 22 „Kompressionsversuch einer Platte“ gezeigt. Diese Konstellation hat den Vorteil, dass die Stempel eine beliebige Geometrie vorweisen können. Dadurch kann auf alte Prüfvorrichtungen zugegriffen werden, welche im Bereich des Probenkörpers planar sind. Zwingend notwendig bei diesem Versuch ist eine homogene Dehnungsverteilung, denn eine optische Dehnungsauswertung lässt sich, durch die geringe Probendicke, schwer umsetzen. Der homogene Spannungszustand ist stark abhängig von den Reibkoeffizienten der Reibpaare. Hier gilt: Je geringer der Reibkoeffizient ist, desto homogener ist der Spannungszustand.

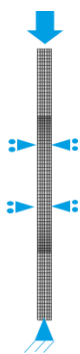


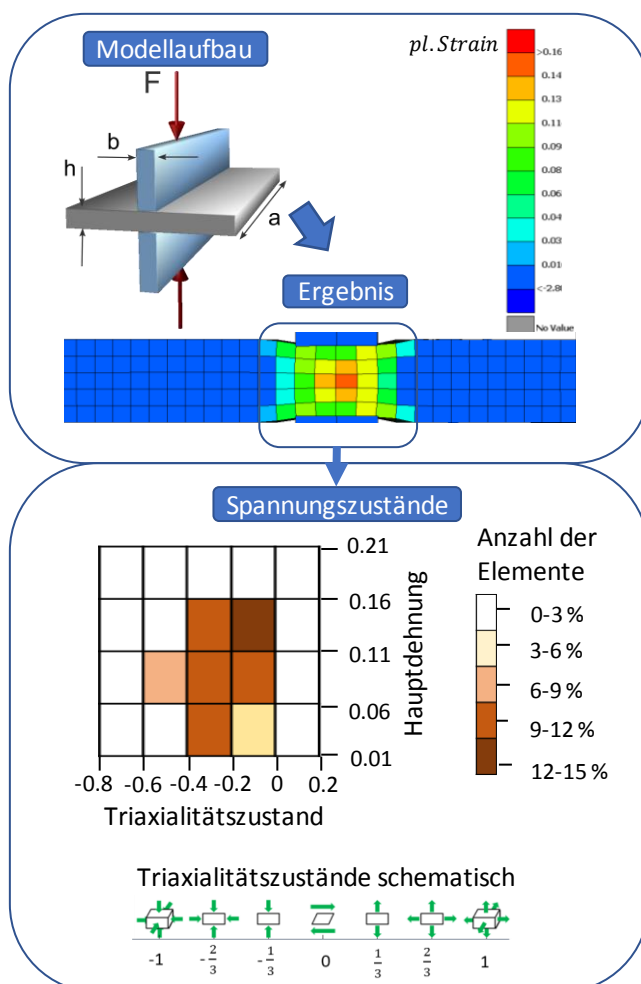
Abbildung 23
Zugprobe unter
Druckbelastung
(Eigene Dar-
stellung)

Das dritte Konzept nutzt die bereits vorhandene Zugprobe und belastet diese mit einer Druckkraft. Das Ziel soll sein, nur den verjüngten Bereich zu belasten. Diese Idee ist abgeleitet von Versuchen, um die Eigenschaften von unidirektionalen Laminaten zu bestimmen (Hodgkinson, 2000). Besonders durch die Länge und durch das geringe Flächenträgheitsmoment in den knickgefährdeten Achsen, müssen hier Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, um den Versuch erfolgreich durchzuführen. Ein Versuchsaufbau ist vorgesehen, welcher eine leichte horizontale Dehnung durch ein starres Führungsblech zulässt. Eine Skizze des Versuches befindet sich in Abbildung 23. Ein Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die Probenkörper bereits existieren. Durch die Führungsbleche ist dies kein Versuch, welcher von der Reibung unabhängig ist.

3.2 Ergebnisse der Simulation der Druckversuche

Wie bereits in Kapitel 3.1 „Konzeptvorstellung“ erläutert, ist der Versuch am geeignetsten, welcher einen möglichst homogenen Verzerrungszustand während der Versuchsdauer aufweist. Dies würde eine optische Dehnungsmessung überflüssig machen. Um einen Versuchsaufbau auszuwählen, wurde jedes vorgestellte Konzept mithilfe der Simulation auf die Anforderungen geprüft. Als Anforderung ist beispielsweise die Kraftlimitierung auf 50 kN der Prüfmaschinen zu nennen. Die Zugversuche weisen einen hohen Umformgrad von $\varphi = 0.8$ bis $\varphi = 1.2$ auf. Um die zu erstellende Materialkarte für hohe Umformgrade unabhängig des Spannungszustandes zu nutzen, wäre daher ein möglichst hoher Umformgrad der Druckprobe wünschenswert.

3.2.1 Der Flachstauchversuch



Das erste Konzept, der Flachstauchversuch stellt einen relativ einfachen Versuchsaufbau dar. Die Auswertung hingegen gestaltet sich schwieriger. Dadurch, dass der Probenkörper nur lokal gestaucht wird und nicht global, unterliegt nur ein Bruchteil der Probe dem Druck der Stempel. Während des Versuches verjüngt sich der lokale Querschnitt und der Anteil der Querschnittsfläche, welcher komprimiert wird, sinkt weiter. In Abbildung 24 sind im oberen Abschnitt der Versuchsaufbau und das Ergebnis der Simulation dargestellt. Wie eingangs erläutert, ist nur ein Bruchteil der Elemente belastet. Jedes Element, das einer Dehnung unterworfen wurde, wurde berücksichtigt, um ein Diagramm des Triaxialitätszustandes zu erzeugen. Dies ist kenntlich gemacht an dem abgerundeten Rechteck um das Simulationsergebnis. Wird der Triaxialitätszustand am Ende der Simulation ausgewertet, entsteht das Diagramm im unteren Teil der Darstellung. Dieses Diagramm wird erstellt, indem die aktuellen Dehnungs- und Triaxialitätszustände gespeichert und aufsummiert werden, welche jeweils zu einem Korridor gehören. In diesem Fall streuen die Triaxialitätszustände während der Versuchsdurchführung sehr breit, was nicht gewünscht ist. So befinden sich viele Elemente abseits des Triaxialitätszustandes „Druck“, welcher dem Zahlenwert -0.3 zugeordnet ist. Durch den inhomogenen Triaxialitätszustand eignet sich dieser

Abbildung 24 Flachstauchversuch in der Simulation (Eigene Darstellung)

den sich viele Elemente abseits des Triaxialitätszustandes „Druck“, welcher dem Zahlenwert -0.3 zugeordnet ist. Durch den inhomogenen Triaxialitätszustand eignet sich dieser

Versuch nicht für eine Erstellung einer Materialkarte. Die Fließkurve wird im Materialmodell für einen spezifischen Spannungszustand hinterlegt. Weicht der Spannungszustand ab, sind die Eingabedaten in das Materialmodell ungültig. Auch das Problem der starken Abhängigkeit von der Reibung ist bei diesem Versuchsaufbau nicht gelöst, während des Versuches gleitet das Material von den Stempeln ab, um zur Seite auszuweichen. Je nachdem welcher Reibkoeffizient in der Simulation hinterlegt wird, gleiten die Elemente besser oder schlechter unter dem Stempel. Um dieses Problem zu umgehen, müsste der Versuch aufgenommen werden, damit optisch die Dehnungen gemessen werden können, um das Fließen unter dem Stempel genau zu beobachten. Aufgrund dieser Nachteile und des inkonsistenten Spannungszustandes wird dieser Versuchsaufbau nicht weiterverfolgt.

3.2.2 Der Quaderstauchversuch

Das nächste Konzept, welches es zu untersuchen gilt, ist der Quaderstauchversuch. Dieser Versuch ist abgeleitet von dem Zylinderstauchversuch, weil in dieser Ausarbeitung nur plattenförmige Probenkörper zur Verfügung stehen. Die Prüfkraft steigt proportional mit der Fläche der Prüfkörper, weil die Dehnsteifigkeit der Probe ebenfalls proportional zur Fläche steigt. Um die optimale Größe der Probe zu ermitteln, wurden zwei verschiedene Proben erstellt. Die Proben differenzieren sich durch die Abmaße $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ und $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$. Durch die hohen Umformgrade des Zugversuches, ist auch beim Druckversuch ein hoher Umformgrad gewünscht. Um die beiden Proben zu vergleichen wurde deshalb die Kraft über dem Umformgrad in einem Diagramm aufgetragen und in Abbildung 25 eingefügt. Neben den beiden Kraftverläufen ist ebenfalls das Kraftlimit der Prüfmaschine gestrichelt eingezeichnet.

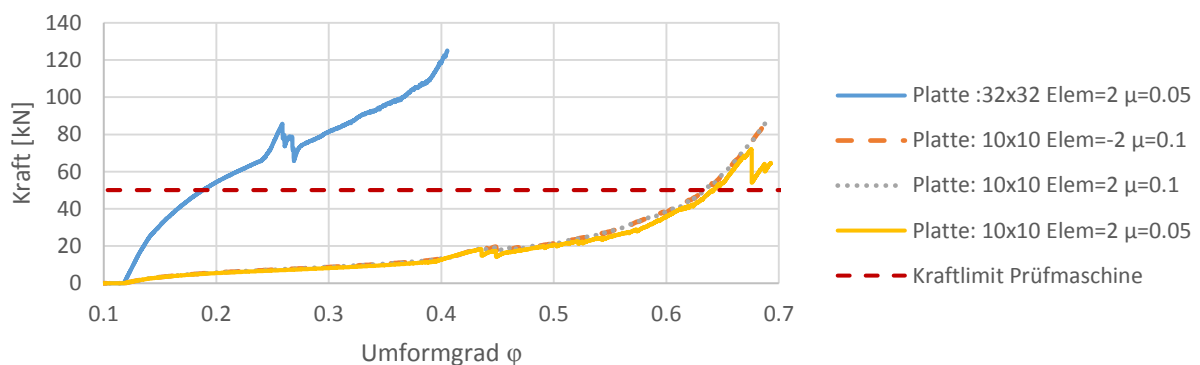


Abbildung 25 Vergleich von zwei unterschiedlichen Probengeometrien (Eigene Darstellung)

Gut zu erkennen ist, dass die Probe mit den Maßen $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ einen sehr steilen Verlauf hat und schnell das Kraftlimit der Prüfmaschine erreicht. Bei 50 kN weist die Probe einen Umformgrad von $\varphi = 0.18$ auf. Dies ist sehr viel kleiner als die Umformgrade des Zugversuches. In Gelb ist der Kraftverlauf der Probe mit den Maßen $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ zu sehen. Dieser hat eine homogene Steigung, bis zu einem Umformgrad von $\varphi = 0.5$. Im Anschluss steigt der Kraftverlauf rapider und bei 50 kN wird ein Umformgrad von $\varphi =$

0.63 erreicht. Dieser Umformgrad ist größer und damit näher an den Werten des Zugversuches, die $\varphi = 0.8$ bis $\varphi = 1.2$ erreichen.

Im nächsten Schritt werden analog zum Flachstauchversuch die Hauptdehnungen über dem Triaxialitätszustand aufgetragen. Dies ist in Abbildung 26 dargestellt. Neben dem Versuchsaufbau ist das Ergebnis der Simulation im oberen Block gezeigt. Da alle Elemente der Probe eine Verzerrung erfahren, werden auch alle Elemente für die Auswertung des Triaxialitätszustandes verwendet. Die Simulation wurde für zwei verschiedene Reibkoeffizienten durchgeführt. Zum einen der niedrige Reibkoeffizient von $\mu = 0.05$ so-

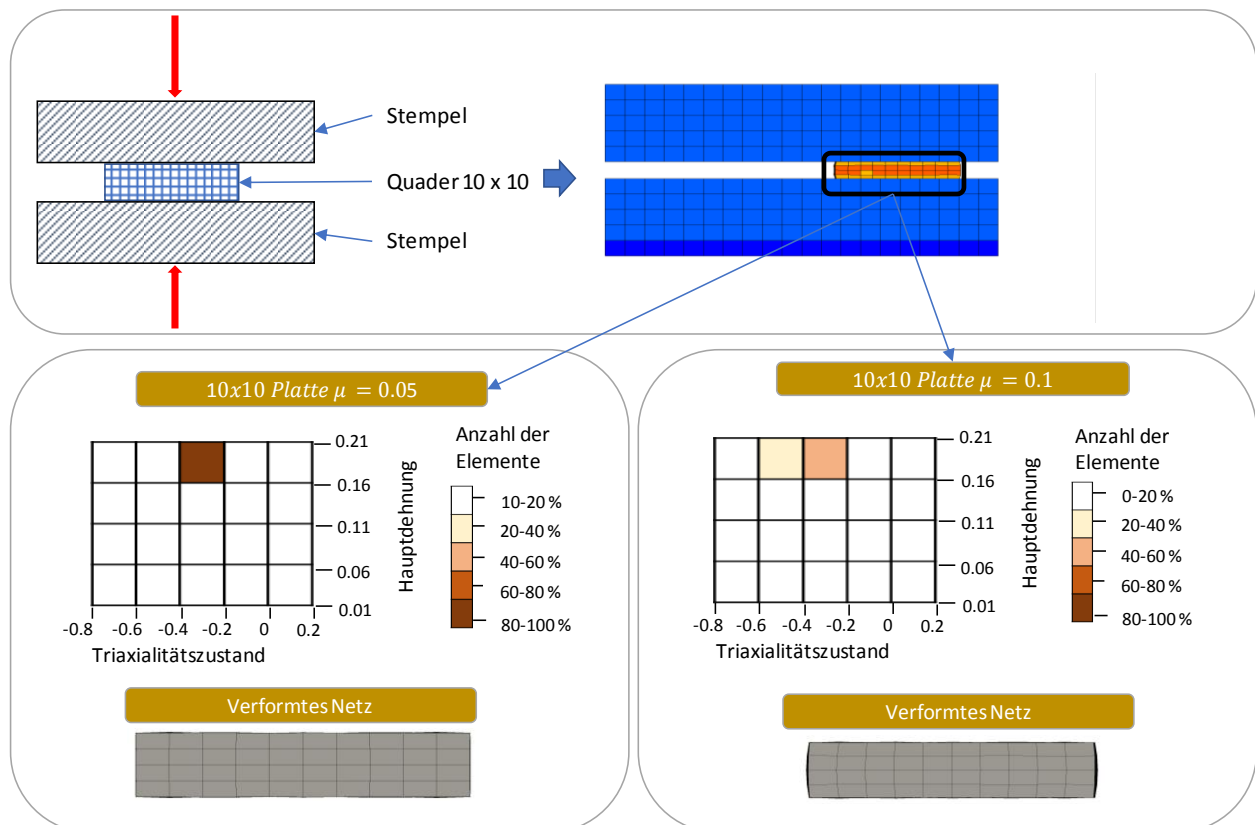


Abbildung 26 Quaderstauchversuch in der Simulation (Eigene Darstellung)

wie einem Reibkoeffizient von $\mu = 0.1$. Der Reibkoeffizient von $\mu = 0.05$ wurde gewählt, da dieser Reibkoeffizient für die geschmierte Kontaktpaarung Stahl-Kunststoff in der Literatur gefunden wurde (Rohloff/Matek, 2007). Im unteren Block der Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Evaluation des Triaxialitätszustandes dargestellt. Die Simulation mit der geringeren Reibung erfüllt alle Anforderungen, die an den Versuch gestellt wurden.

Alle Elemente haben den gleichen Dehnungs- und Spannungszustand. Damit ist die Dehnungsverteilung homogen und auf eine zusätzliche Dehnungsmessung kann verzichtet werden. Da dieses Ergebnis nur unter idealen Bedingungen erreicht werden kann, wird die Simulation mit einem etwas höheren Reibkoeffizienten erneut durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass nur noch 50% der Elemente den gewünschten Spannungszustand aufweisen, die restlichen Elemente verschieben sich in Richtung bi-axialem Druck. Dies ist ebenfalls in der Grafik an dem vernetztem Quader zu sehen; bei der Simulation mit erhöhter Reibung wölben sich die Kanten des Quaders nach außen, sodass neben der axialen Dehnung eine Dehnung in horizontaler Richtung entsteht.

Eine Aufzeichnung mit einer Kamera während des Versuches wäre sinnvoll, um Rückschlüsse auf die Reibkoeffizienten schließen zu können. Aufgrund der Erkenntnisse der Abbildung 25 und Abbildung 26 wird die Probe mit den Maßen $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ weiterverfolgt, da sie sich stärker umformen lässt.

3.2.3 Die Zugprobe unter Druckbelastung

Das letzte Konzept, „Die Zugprobe unter Druckbelastung“, ist abgeleitet von Druckversuchen an dünnwandigen Laminaten (Hodgkinson, 2000). Während bei Hodgkinson Stäbe mit konstantem Querschnitt verwendet werden, ist diese Probe verjüngt. Angenommen wurde eine flächige Krafteinleitung über die Schraubenachsen sowie eine Führung der Probe zu beiden Seiten, um ein Ausknicken zu vermeiden. Die Elemente im verjüngten Bereich werden ziemlich gleichmäßig komprimiert. Werden die Dehnungen und Spannungszustände der Elemente am Ende der Simulation ausgewertet, ist eine Verschiebung des Spannungszustandes erkennbar. Vergleichbar ist dies mit dem Quaderstauchversuch mit erhöhter Reibung. Hier entsteht ebenfalls ein bi-axialer Spannungszustand. Zu erkennen ist dies am unteren Diagramm der Abbildung 27. Etwa 55 % der Elemente sind bi-axialem Druck ausgesetzt, die restlichen Elemente befinden sich sogar nah am hydrostatischen Druck, also Druck in jeder Raumrichtung. Bisher sind die Führungen der Elemente, die dem Ausknicken entgegenwirken, starr. Dies begründet auch den bi-axialen Spannungszustand. Nun müsste sukzessive eine Steifigkeit eingestellt werden, bei welcher sich die Elemente in Dickenrichtung ausdehnen können, jedoch so, dass die Probe nicht ausknickt. Dies erfordert einen umfangreicheren Versuchsaufbau und eine aufwendige Simulation, weshalb dieses Konzept nicht weiterverfolgt wird.

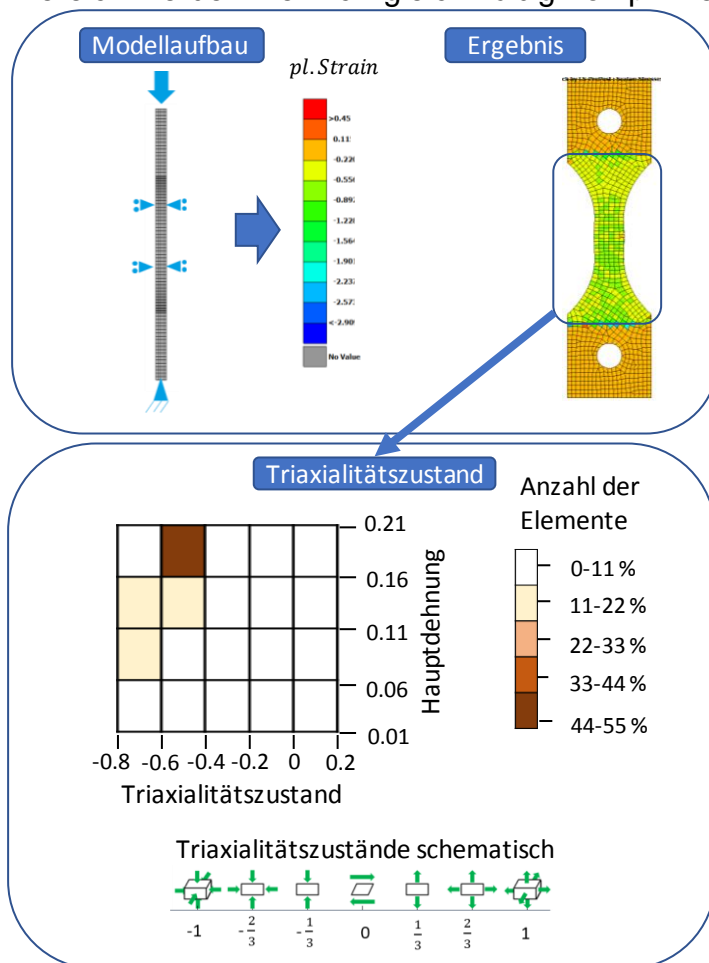


Abbildung 27 Zugprobe unter Druckbelastung (Eigene Darstellung)

3.3 Auswahl eines Versuches

Das Ziel des Kapitels war es, einen geeigneten Druckversuch für diese Ausarbeitung zu finden. Als geeignet wird ein Versuch eingestuft, welcher den Spannungszustand während der Versuchsdurchführung konstant hält. Des Weiteren wäre es von Vorteil, wenn der Verzerrungszustand homogen ist, sodass eine optische Dehnungsmessung obsolet wäre. Dies würde die benötigte Zeit in der Nachbereitung des Versuches sowie im „Reverse Engineering“-Prozess reduzieren. Ebenfalls gilt es unter den physikalischen Belastungsgrenzen der Prüfmaschine zu bleiben. Mit diesen Bewertungsparametern wurden drei Konzepte untersucht. Der Flachstauchversuch, der Quaderstauchversuch und eine Zugprobe unter Druckbelastung.

Der Flachstauchversuch zeichnet sich durch einen sehr einfachen Versuchsaufbau aus. Dieser ist jedoch in der Nachbereitung aufwendig. Dies führt zu einem dreiachsigen Spannungszustand. Das Ergebnis des Flachstauchversuches ist, wie die zwei anderen Konzepte, stark von dem Reibkoeffizienten abhängig. Dadurch erhöht sich die Zahl der Variablen und ein nachgeschaltetes „Reverse Engineering“ verlängert sich. Neben der hohen Anzahl an Variablen ist der Spannungszustand nicht einachsig, weshalb dieser Versuchsaufbau nicht weiterverfolgt wird.

Die Zugprobe unter Druckbelastung ist abgeleitet von uniaxialen Druckversuchen an faserverstärkten Proben (Hodgkinson, 2000). Durch die geringe Steifigkeit in den knickgefährdeten Bereichen, ist das Ausknicken der Probe während des Versuches zu erwarten. Um dem entgegenzuwirken, werden in der Simulation die Seiten der Probe geführt. Dadurch entsteht ein bi-axialer Dehnungszustand. Dies kann nur mit speziellen Platten, welche bei einer bestimmten Querkraft nachgeben, verhindert werden. Der Entwicklungsaufwand dieses Versuchsaufbaus kann nicht abgeschätzt werden, weshalb dieser Versuchsaufbau nicht weiterverfolgt wird.

Der Quaderstauchversuch ist von dem Zylinderstauchversuch abgeleitet, da nur plattenförmige Probenkörper zur Verfügung standen. Zunächst wurde der Größeneinfluss evaluiert. Es stellte sich heraus, dass die Maße $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ besser den Anforderungen gerecht wurden, als eine Platte mit den Maßen $32\text{mm} \times 32\text{mm}$, da der Umformgrad größer war. Der Quaderstauchversuch ermöglicht hohe Umformgrade bei einem gleichzeitig homogenen Dehnungszustand. Besonders auf unterschiedliche Reibkoeffizienten reagiert dieser Versuch sensitiv, bei einem niedrigen Reibkoeffizienten von $\mu = 0.05$ herrscht durchgehend der gewünschte Spannungszustand „einachsiger Druck“. Sobald der Reibkoeffizient etwas größer wird, beispielsweise $\mu = 0.1$, stehen nur noch die Hälfte aller Elemente unter dem gewünschten Spannungszustand. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wird dieser Versuch in der weiteren Ausarbeitung verwendet.

4 Materialtests an einem Polyamid 6.6

Zur Charakterisierung der Eigenschaften des Polyamides werden im Hause Autoliv dynamische Zugversuche und quasistatische Zug- und Druckversuche durchgeführt. Im Rahmen der Materialcharakterisierung werden die Zugversuche über einen weiten Temperatur-, Dehnraten- und Feuchtigkeitsbereich geprüft. Der Temperaturbereich liegt zwischen -40°C und $+85^{\circ}\text{C}$ und die Proben sind auf die Feuchtigkeitszustände „nass“, „trocken“ und „konditioniert“ eingestellt. Diese Zustände werden mit „W“ für „wet“, „D“ für „dry“ und „C“ für „conditioned“ abgekürzt. Die Prüfgeschwindigkeiten reichen von quasistatisch bis $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Prüfgeschwindigkeit. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Ergänzung der Materialkarte um Fließkurven aus dem Druckversuch bei Raumtemperatur und konditionierter Raumfeuchte. Jedoch sollen die Ergebnisse der Versuche mit variierenden Feuchtigkeitszuständen und Temperaturen ebenfalls gezeigt werden, um die Abhängigkeit des Kunststoffes von den Umgebungsparametern zu zeigen. In Tabelle 1 ist der Versuchsplan der geplanten Versuche dargestellt.

Belastungsart	Feuchtegehalt	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Maschinengeschwindigkeit [m/s]	Nominelle Dehnrade [$1/\text{s}$]
Zug	C	LT	0.000833	0.042
			1	50
			5	125
		RT	0.000833	0.042
			1	50
			5	125
		HT	0.000833	0.042
			1	50
			5	125
	D	RT	0.000833	0.042
			1	50
			5	125
	W	RT	0.000833	0.042
			1	50
			5	125
Druck	C	RT	0.000033	0.00083

Tabelle 1 Versuchsmatrix zur Charakterisierung des Polyamides (Eigene Darstellung)

Die Prüftemperaturen in Tabelle 1 entsprechen 23°C für „RT“, 85°C für „HT“ und -40°C für „LT“. Da die Prüfmaschine nicht klimatisiert werden kann, weichen die Prüftemperaturen von den vorgesehenen Temperaturen ab. Weitere Details dazu können dem Kapitel 4.1 „Probenvorbereitung“ entnommen werden.

In Kapitel 3 „Ermittlung eines geeigneten Druckversuches“ wurde die Wahl des Druckversuches erläutert. Aus diesem Grund wird für die Druckversuche bei Raumtemperatur mit konditionierten Proben die Geometrie im linken Teil der Abbildung 28 „Probengeometrien für die Materialversuche“ verwendet. Der Quader hat eine Kantenlänge von 10 mm und eine Materialstärke von 4.5 mm . Diese Geometrie wird zwischen zwei parallelen Platten komprimiert.

Für die dynamischen und statischen Zugversuche wird eine modifizierte Junginger-Probe verwendet (Abbildung 28) (Junginger, 2002). Diese zeichnet sich durch einen längeren parallelen Messbereich von 10 mm anstatt 5 mm aus. Dies soll dazu beitragen, einen konstanteren Triaxialitätszustand zu erreichen (Stang, HAW Hamburg 2015).

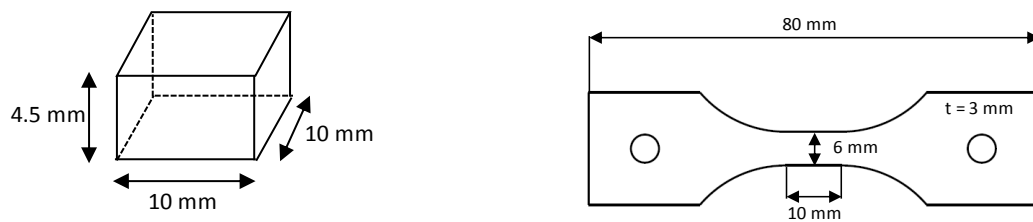


Abbildung 28 Probengeometrien für die Materialversuche (Eigene Darstellung)

Der Quader wird aus gespritzten Kunststoffplatten gefräst, während die Zugprobe direkt aus einem Spritzgusswerkzeug entnommen wird. Der Grund für die Auswahl der beiden Probengeometrien ist die direkte Verwendung der Versuchsergebnisse. Während bei Schubversuchen der Spannungszustand im Laufe des Versuches variiert (Stang, HAW Hamburg 2015), erreichen die obigen Proben einen nahezu konstanten Spannungszustand während des Versuches. Dies ist von Vorteil, weil es die Nacharbeit erleichtert. Die Eingabe von Fließkurven in das Materialmodell SAMP-1 basiert auf der Annahme, dass die Fließkurven das plastische Verhalten des Werkstoffes in genau diesem Spannungszustand abbilden. Ist dies nicht gegeben, kann die Fließkurve nur zu einem Teil, mit Korrekturfaktoren oder gar nicht genutzt werden.

Neben der Protokollierung der Probenkonditionierung und Vorbereitung wird in diesem Kapitel auf den Versuchsaufbau der Druck- und Zugversuche eingegangen. Nach Erläuterung des Versuchsaufbaus werden die Versuchsergebnisse über das Dehnraten-, Temperatur- und Feuchtigkeitsspektrum dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert.

4.1 Probenvorbereitung

Die Materialeigenschaften von Kunststoff haben, wie in Kapitel 1.1 erläutert, eine starke Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchtigkeit. Die späteren Materialtests sollen bei drei verschiedenen Konditionierungszuständen stattfinden. Dies sind die Zustände „nass“, „trocken“ und „konditioniert“. Die Auswahl dieser Zustände liegt darin begründet, dass Autoliv Produkte in einem Temperaturbereich von -40°C bis $+85^{\circ}\text{C}$ und in einer Umgebungfeuchte von weniger als 10% bis mehr als 90% relativer Feuchte auf ihre Funktion prüft.

Die Geschwindigkeit, mit der ein Kunststoff Feuchtigkeit aufnimmt, ist direkt von der Temperatur abhängig. Bei Raumtemperatur ist die Diffusionsgeschwindigkeit so gering, dass ein Prüfkörper von 4 mm Dicke ein Jahr bräuchte, bis das Gewicht konvergiert (ISO/TC, 1995). Deshalb existiert die Norm DIN ISO 1110, um das Konditionieren von Kunststoffproben zu beschleunigen. In dieser Norm wird vorgeschrieben, die Proben einer Umgebungstemperatur von $+70^{\circ}\text{C}$ und der jeweiligen relativen Luftfeuchtigkeit auszusetzen. Die Tabelle 2 zeigt die Mindestdauer der Konditionierung in einer Klimakammer nach DIN ISO 1110.

Gruppe	PA	t_1 in einer Kabine (Tage)	t_2 (Tage)
1	6,66,11,12,6/66,46	$\geq \frac{1}{3} h^2$	$\geq \frac{1}{8} h^2$
Notiz: h ist die Dicke der Proben in mm			

Tabelle 2 Zeiträume für beschleunigtes Konditionieren (ISO/TC, 1995) (Eigene Darstellung)

Der Parameter t_1 ist die Zeit, die benötigt wird, bis 95% der maximalen Aufnahmemenge an Wasser in die Proben diffundiert ist, t_2 hingegen gibt den Kontrollzeitraum des Wiegens an. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, kann für die Dicke der Proben von 3 mm eine Konditionierungsdauer von Minimum drei Tagen festgelegt werden, sowie eine Messung des Gewichtes im Zyklus von circa einem Tag (t_2).

DIN ISO 291 bietet einen anderen Ansatz, um die voraussichtliche Konditionierungsdauer zu berechnen. Hier wird angenommen, dass bei einer Aufnahme von 70% der maximalen Wassermenge eine weitere Zunahme keine Änderungen der mechanischen Eigenschaften bewirkt. Im Gegensatz zur DIN ISO 1100 wird hier bei einer Umgebungstemperatur von 23°C konditioniert.

Die DIN ISO 291 bietet eine Formel, mit welcher die Konditionierungsdauer einer Probe berechnet werden kann. Damit ergibt sich mit d , für die Dicke der Probe, das folgende Diagramm:

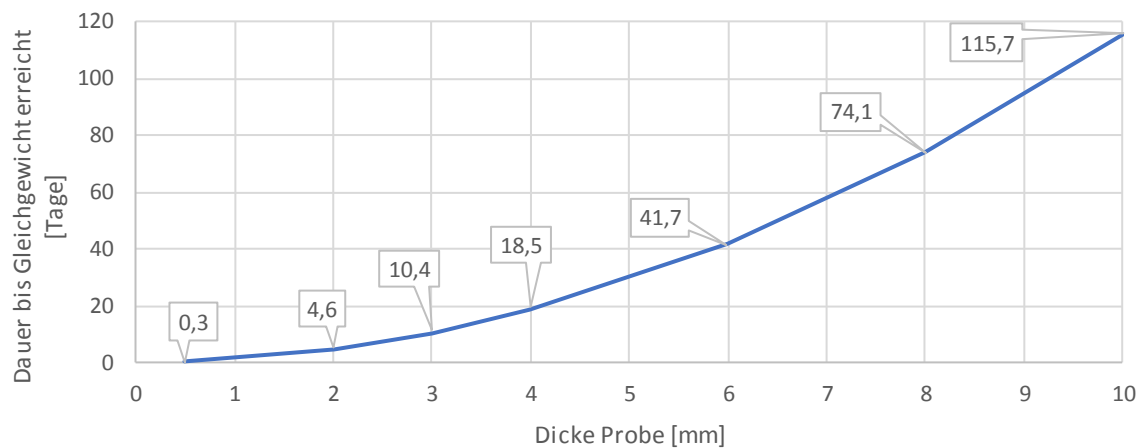


Abbildung 29 Dauer der Konditionierung verschiedener Probendicken bei Raumtemperatur nach DIN ISO 291 (Eigene Darstellung)

In Abbildung 29 lässt sich für eine Probendicke von 3 mm eine Zeit von zehn Tagen ablesen, bis 70% des maximalen Wasseraufnahmevermögens erreicht ist. Dies ist im Vergleich zur DIN ISO 1110, mit beschleunigter Konditionierung, sieben Tage länger. Für diese Arbeit wurden die Konditionierungszustände „nass“ und „trocken“ mithilfe der Norm DIN ISO 1110 erreicht und der Konditionierungszustand „unkonditioniert“ mithilfe der DIN ISO 291.

Es wurden Versuche zur Gewichtszunahme der Proben geführt, um die Aussagen der DIN-Normen zu überprüfen. Dazu wurde für die Konditionierung des Zustandes „nass“ eine Klimakammer auf eine Temperatur von +70°C und eine Luftfeuchtigkeit von > 90% eingestellt. Für den Konditionierungszustand „trocken“ waren die Parameter +70°C und eine Luftfeuchtigkeit von < 15%. Der Übersichtlichkeit halber sind diese Werte auch in Tabelle 3 dargestellt.

Konditionierungszustand	Temperatur	Relative Feuchte
nass	70°C	> 90%
trocken	70°C	< 15%
konditioniert	23°C	~50%

Tabelle 3 Versuchsplan Proben Konditionierung (Eigene Darstellung)

Die Proben wurden einmal pro Tag entnommen, mit einem trockenen Tuch abgetrocknet und im Anschluss gewogen. Die Prüfung wurde so lange durchgeführt, bis die Gewichtsänderung weniger als 0.1 mg betrug. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt.

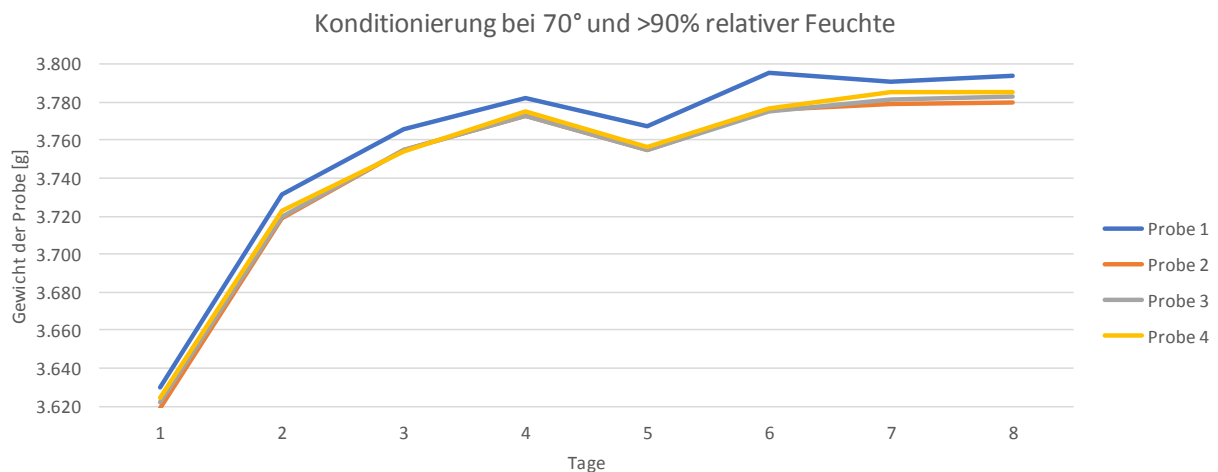


Abbildung 30 Darstellung des Gewichtsverlaufes bis zur Erreichung des Zustandes "nass" (Eigene Darstellung)

In Abbildung 30 ist die Gewichtszunahme der Proben durch Anreicherung von Wasser im Polyamid grafisch dargestellt. Zwischen Tag vier und fünf lag ein Wochenende ohne Aufenthalt in der Klimakammer, deshalb haben die Proben einen Teil ihres eingelagerten Wassers wieder an die Umgebung abgegeben. Nach erneutem Einlagern in der Klimakammer erreichten die Gewichte das Niveau von Tag vier. Das Gewicht änderte sich jedoch nur noch marginal, weshalb von einer Sättigung nach vier Tagen auszugehen ist. Die ersten 24 Stunden tragen zum größten Teil der Wasseraufnahme bei. Etwa 60% der gesamten Gewichtszunahme diffundieren an diesem Tag in die Proben.

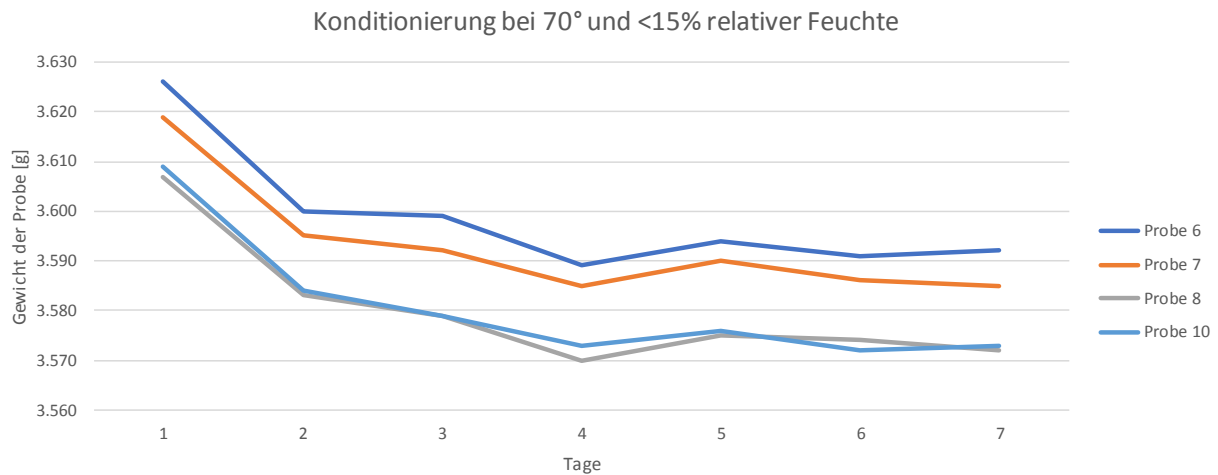


Abbildung 31 Darstellung des Gewichtsverlaufes bis zur Erreichung des Zustandes "trocken" (Eigene Darstellung)

Durch Trocknung in der Klimakammer verringert sich der Anteil des Wassers im Kunststoff. Dies geht aus Abbildung 31 hervor. Besonders die ersten 24h zeigen den höchsten Gradienten, in dieser Zeit verringert sich das Gewicht um 25 mg. Insgesamt verlieren die Proben im Mittel 36 mg Gewicht. Dadurch trägt der erste Tag zu 70% der Gesamtmenge bei. Zeitlich lässt sich der Verlauf mit Abbildung 30 vergleichen. In beiden Fällen ändert sich das Gewicht der Proben nach dem vierten Tag kaum, weshalb auch hier eine Sättigung nach vier Tagen festgelegt wird.

Nach diesen Ergebnissen kann die berechnete Mindestdauer von drei Tagen für ein 3 mm Probenkörper bis 95% des maximalen Wasseraufnahmevermögens erreicht sind aus der DIN ISO 1110 bestätigt werden. Basierend auf der Aussage der DIN ISO 291, dass die mechanischen Eigenschaften ab 70% des Feuchtegleichgewichtes sich nicht ändern, kann demnach auch bereits der erste Tag mit beschleunigter Konditionierung ausreichend sein. Nach dem ersten Tag sind 60% des Feuchtegleichgewichtes für die Proben im feuchten Klima erreicht. Im trockenen Klima verlieren die Proben am ersten Tag bereits 70 % des gesamten Gewichts.

Demnach sollten die Proben mindestens 24 Stunden vor den Versuchen konditioniert werden. Für diese Ausarbeitung wurden alle Proben 24 Stunden in eine Klimakammer unter den oben genannten Bedingungen gelagert und im Anschluss getestet.

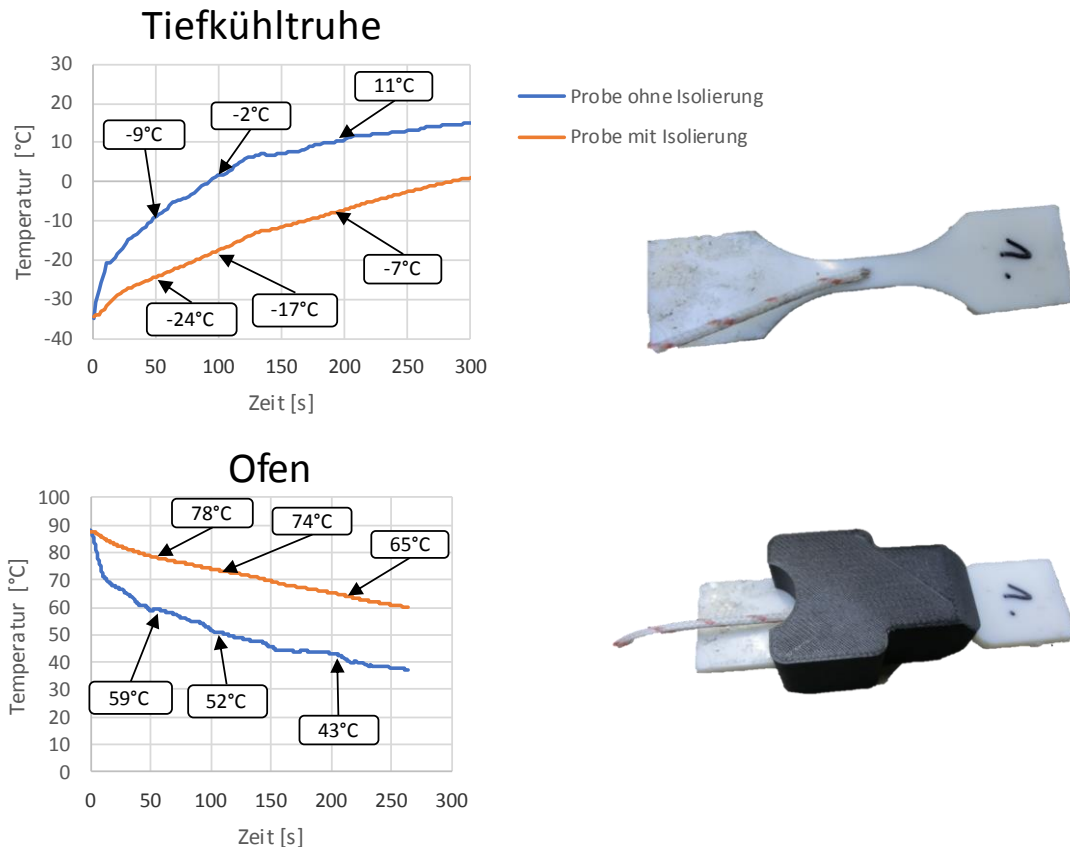


Abbildung 32 Temperaturverlauf nach Entnahme aus Tiefkühltruhe/Ofen (Eigene Darstellung)

Da die Versuche auch bei hohen und niedrigen Temperaturen stattfinden und derzeit keine Möglichkeit besteht, die Prüfumgebung zu klimatisieren, muss davon ausgegangen werden, dass die Temperaturen während der Prüfung nicht den gewünschten Werten entsprechen. Um den Effekt dieser Abweichung zu evaluieren, wurden im Vorfeld Abklingkurven aufgenommen. Durch Konvektion wird ein großer Teil der Wärmemenge in der Probe an die Umgebung abgegeben. Aus diesem Grund läuft die Abnahme beziehungsweise Zunahme der Temperaturen ohne Isolierung der Proben sehr schnell ab. Um dem entgegenzuwirken, soll ein Gehäuse um die Proben konstruiert werden, um die Wärmeverluste klein zu halten.

Die Ergebnisse der Prüfung sind in Abbildung 32 dargestellt. Je Diagramm sind zwei Kurven eingezeichnet. Diese Kurven stellen den Temperaturverlauf nach Entnahme aus dem Ofen beziehungsweise der Tiefkühltruhe dar. In orange dargestellt ist der Temperaturverlauf der Probe mit der zusätzlichen Isolierung und in blau der Verlauf ohne Isolierung. Nach Entnahme aus der Tiefkühltruhe ergibt sich nach 50 Sekunden eine Differenz von 13°C zwischen isolierter und nicht isolierter Probe. Für die Entnahme aus dem Ofen ergibt sich nach 50 Sekunden eine Differenz von 19°C zwischen beiden Versuchen. Die Isolierung hilft merklich eine schnelle Angleichung an die Umgebungstemperatur zu verhindern. Die Dauer der Rüstzeit bei den Hochgeschwindigkeitszugversuchen betrug im Mittel 45 Sekunden. Danach schloss sich eine 45 Sekunden dauernde Testphase an, in

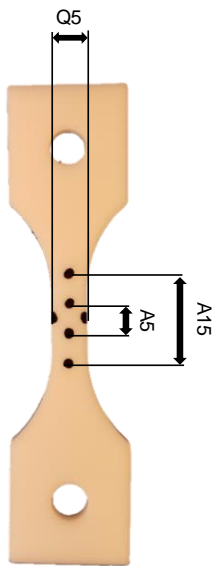


Abbildung 33
Probenmarkie-
rung anhand
der Zugprobe

welcher die Isolierung abgenommen werden musste, um die Dehnung optisch zu messen.

Mithilfe der beiden Graphen in Abbildung 32 können die Prüftemperaturen ermittelt werden. Die Hochtemperaturversuche (HT) wurden bei etwa 60°C durchgeführt, anstatt der gewünschten 85°C und die Niedrigtemperaturversuche (LT) fanden bei -8°C statt. Für die Niedrigtemperaturversuche war eine Temperatur von -35°C vorgesehen.

Neben der Konditionierung der Proben als Versuchsvorbereitung wurden die Proben mit Markierungen versehen (s. Abbildung 33 „Probenmarkierung anhand der Zugprobe“). Diese Markierungen ermöglichen mithilfe der Aufnahme einer Hochgeschwindigkeitskamera die optische Dehnungsmessung. Durch die Punkte können drei lokale Dehnungen gemessen werden. Q5 als Querdehnung im verjüngten Bereich, A5 als Indikator für die Längsdehnung zwischen einer Messlänge von 5 mm sowie A15 als Indikator für eine Messlänge von 15 mm .

Neben dem Kraftsignal der Kraftmesszelle fließt die Dehnung ebenfalls in den „Reverse Engineering“-Prozess mit ein. Dadurch beeinflussen nicht nur globale Größen, sondern auch lokale Größen das Ergebnis des „Reverse Engineering“-Prozesses.

4.2 Versuchsaufbau des Zug- und Druckversuches

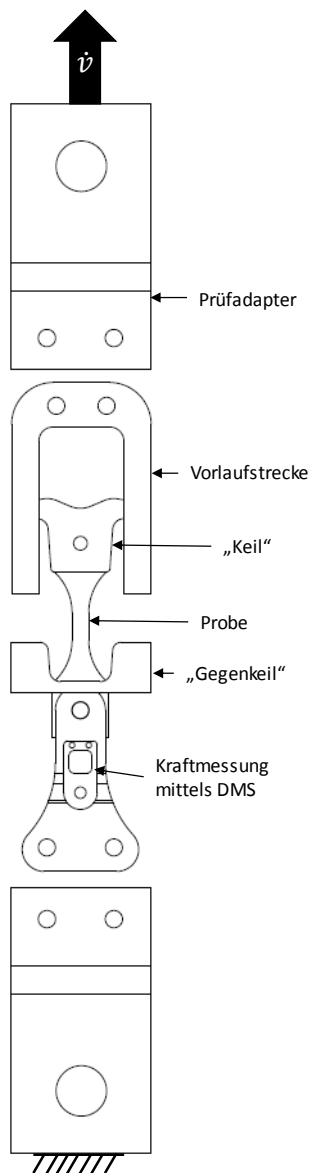


Abbildung 34 Explosionszeichnung der Prüfvorrichtung für Hochgeschwindigkeitsversuche (Eigene Darstellung)

Nebstehend in Abbildung 34 „Explosionszeichnung der Prüfvorrichtung für Hochgeschwindigkeitsversuche“ ist der Versuchsaufbau dargestellt, mit welchem die dynamischen Zugversuche durchgeführt wurden. Dieser Versuchsaufbau wurde in einer vorherigen Bachelorarbeit entwickelt und konstruiert (Suppinger, HAW Hamburg 2018). Der Grund für die Entwicklung war eine unzureichende Güte der Versuchsdaten. Besonders die Bestimmung des Elastizitätsmodules war nicht möglich, weil die Ankopplung an den Kraftstrang, nach Erreichen der Prüfgeschwindigkeit, nicht erfolgreich war. Nebstehender Versuchsaufbau stellt eine Vorlaufstrecke bereit, welche ausreicht, um eine Abzugsgeschwindigkeit von etwa $8 \frac{m}{s}$ zu erreichen. Die Vorlaufstrecke gibt der Prüfmaschine die benötigte Zeit, um die gewünschte Abzugsgeschwindigkeit zu erreichen. Nach Durchlaufen dieser Vorlaufstrecke schlägt der Keil in den Gegenkeil ein und koppelt so die Probe mit dem Kraftstrang. Mehrere Versuche mit Dämpfung wurden durchgeführt, jedoch nicht weiterverfolgt, weil dies einen weiteren zu kalibrierenden Parameter im gesamten Prozess bedeutet hätte. Die Kopplung an den Kraftstrang erfolgt voll elastisch. Durch das niedrige Gewicht des Keiles, der aus dem Werkstoff Aluminium gefertigt ist, muss nur eine geringe Masse beschleunigt werden. Dies wirkt sich positiv auf die induzierten Schwingungen des Versuchsaufbaus aus. Da die Anforderungen an die Güte des Kraftsignales hoch waren, wurde eine lokale Kraftmessung in den Prüfaufbau implementiert. Diese Kraftmessung führt zu einem Kraftsignal mit niedrigeren Kraftamplituden als eine Kraftmessung am „Prüfadapter“ mit einem piezoelektrischen Kraftaufnehmer. Der Grund für die Verbesserung des Kraftsignales liegt in dem in Kapitel 1.4 „Anforderungen an dynamische Versuche“ erläuterten Wirkprinzip, dass die Amplituden des Kraftsignales in Richtung der Mitte der Probe mit jedem Bauteil niedriger werden. Je höher die Frequenzen der jeweiligen Bauteile und je weniger Bauteile im Kraftstrang involviert sind, desto geringer werden die Amplituden des oszillierenden Kraftsignales. Durch kleinere Amplituden steigt die Güte des Kraftsignales und auf ein Glätten des Signales kann meist verzichtet werden.

Die Umsetzung der lokalen Kraftmessung erfolgt mit Dehnungsmessstreifen in Vollbrückenordnung. Mit Dehnungsmessstreifen können die Dehnungen mit sehr hohen Abtastraten abgetastet werden. Dies ist bei dynamischen Versuchen durch die geringe Versuchsdauer von Vorteil.

Die servohydraulische Prüfmaschine VHS 160 der Firma Instron, an welcher die dynamischen Versuche durchgeführt werden, kann Prüfgeschwindigkeiten von bis zu $25 \frac{m}{s}$ erreichen und bis 100 kN belastet werden. Die Aktuatorik der Maschine befindet sich in der

oberen Traverse der Maschine, ebenso die induktive Messung des zurückgelegten Aktuatorweges. Ergänzend zur Kraftmessung werden die Versuche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Bildfrequenz beträgt hierbei 40.000 Hz . Durch Markierung der Proben mit diversen Punkten, kann die Bewegung der Punkte evaluiert werden. Daraus lassen sich lokale Dehnungswerte der Probe ermitteln.

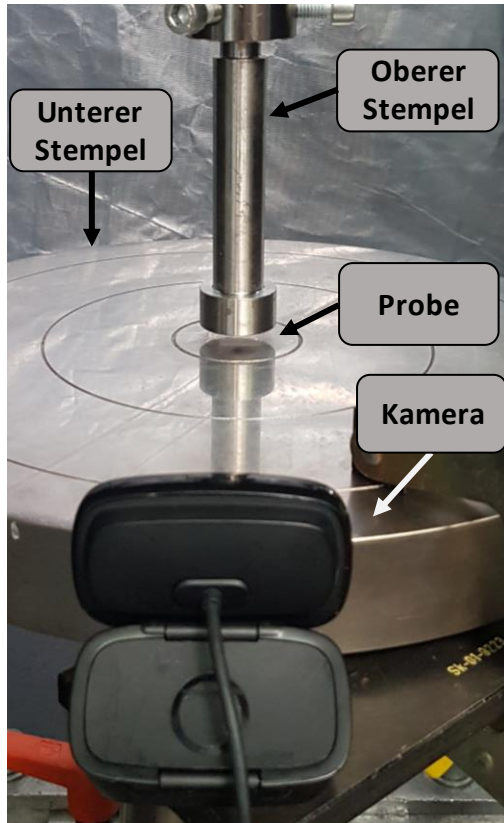


Abbildung 35 Prüfaufbau der Druckversuche

Für die Druckversuche wurden bestehende Prüfaufnahmen genutzt. Zum Einsatz kommt eine elektromechanische Zwick Prüfmaschine. In Abbildung 35 befindet sich der Aufbau des Druckversuches. Zwei, im Vergleich zur Probe, steife Stempel werden genutzt, um die Kunststoffquader zu komprimieren. Die Kunststoffquader haben die Abmessungen $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ und eine initiale Dicke von 4.5 mm . Diese Quader werden um 3 mm gestaucht, daraus resultiert ein Umformgrad von etwa $\varphi = 0.7$. Eine Kamera wird parallel zur Horizontale ausgerichtet, um die Dehnungen der Probe optisch zu messen. Obwohl in Kapitel 3.2.2 „Der Quaderstauchversuch“ ein homogener Verzerrungszustand für den Reibungskoeffizienten von $\mu = 0.05$ berechnet wurde, kann es durch andere Reibfaktoren zu einem abweichenden Verzerrungszustand kommen. Deshalb wird der Versuch mithilfe einer Kamera aufgezeichnet. Durch die hohen Kräfte im Vergleich zum Zugversuch gilt es bei den Druckversuchen eine Eigenschaft zu berücksichtigen, die Nachgiebigkeit der Prüfmaschine. Durch einen Versuch ohne Probenkörper konnte eine Nachgiebigkeit der Prüfmaschine von etwa 1.5 mm ermittelt werden. Dies ist unbedingt zu berücksichtigen, da für die Ermittlung des Kraft-Weg-Diagrammes das

Wegsignal der Prüfmaschine herangezogen wird. So wie die Prüfmaschine einen Weg von 4.5 mm aus, während die Probe nur 3 mm gestaucht wurde. Es gibt die Möglichkeit, die Nachgiebigkeit der Prüfmaschine in die Prüfsoftware zu integrieren, jedoch variiert diese Nachgiebigkeit mit jedem Versuchsaufbau.

4.3 Versuchsergebnisse der Druckversuche

Die Quaderstauchversuche wurden bei Raumtemperatur und konditionierten Proben durchgeführt. In Abbildung 36 ist das Ergebnis der Druckversuche gezeigt. Die Kameraaufnahmen weisen auf eine homogene Dehnungsverteilung hin, sodass angenommen werden kann, dass der Spannungszustand konstant war. Die Stempel wurden vor jedem Versuch mit einer Schicht Schmieröl versehen, um für jeden Versuch gleiche Randbedingungen zu schaffen. Insgesamt lagen alle Versuche nah beieinander und es zeigten sich keine Ausreißer. Wie bereits geschildert, wurde der Quader um 3 mm zusammengestaucht und durch die Nachgiebigkeit der Maschine addierten sich 1.5 mm zu dem gemessenen Weg der Maschine hinzu.

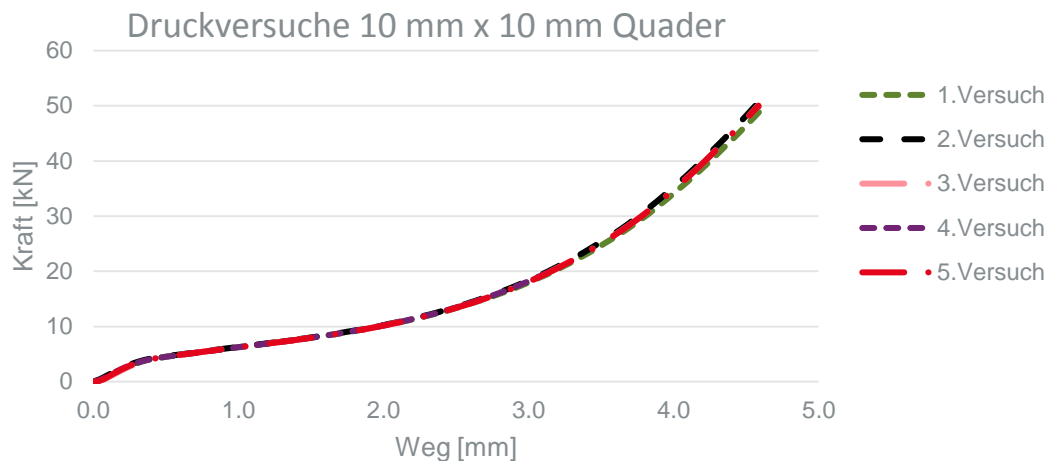


Abbildung 36 Ergebnisse des Druckversuches (Eigene Darstellung)

In Abbildung 36 lässt sich eine konstante Steigung zu Beginn des Versuches erkennen, dies ist der Elastizitätsmodul. Nach dem Überschreiten der Streckgrenze beginnt die Plastifizierung des Materials und die Kraft steigt exponentiell bis zum Versuchsende an, bis der Gesamtweg von 4,5 mm erreicht ist.

Im Anschluss wurde das Kraft-Weg-Diagramm in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgewandelt (s. Abbildung 37); dafür wurde die aktuelle Prüfkraft durch den Ausgangsquerschnitt geteilt. In dem Diagramm sind der Druckversuch und ein Zugversuch bei Raumtemperatur und konditionierten Proben aufgetragen. Dieses Diagramm ist insofern interessant, als dass es aufzeigt, wie das Material auf unterschiedliche Belastungen reagiert. Für kleine plastische Dehnungen kann angenommen werden, dass die Probengeometrie sich zum Ausgangszustand noch nicht verändert hat. So kann bereits bei einer plastischen Dehnung von 0,1 eine steifere Antwort des Materials unter Druckbelastungen als unter Zugbelastungen erkannt werden.

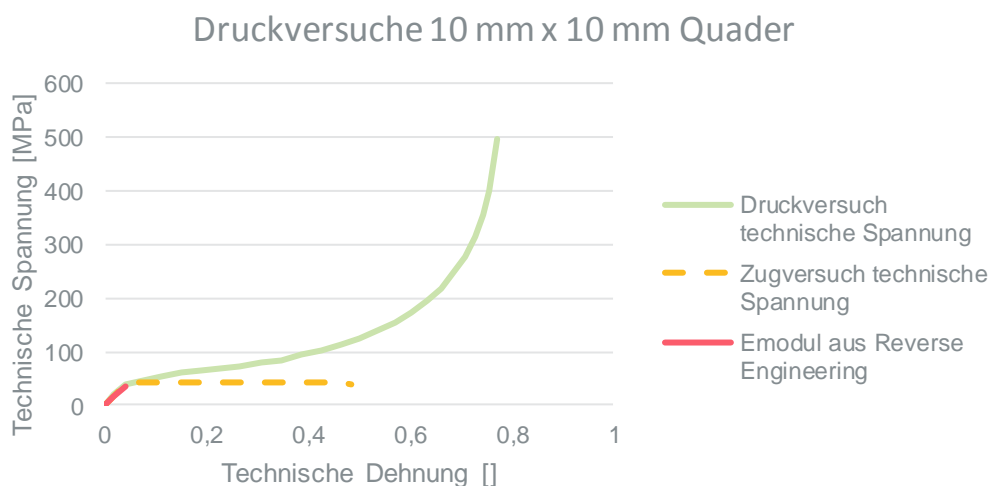


Abbildung 37 Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Druckversuches (Eigene Darstellung)

4.4 Versuchsergebnisse des Zugversuches

Die Zugversuche mit dem Polyamid 6.6 wurden analog zur Tabelle 1 durchgeführt. Wie bereits geschildert, soll eine vorhandene Materialkarte, welche auf Zugversuchen basiert, durch Druckversuche ergänzt werden. Um die Eingangsparameter der bereits existierenden Materialkarte darzulegen dient dieses Kapitel.

Das Material wurde bei drei Konditionierungszuständen geprüft. Diese sind „trocken“, „konditioniert“ und „nass“. Diese Konditionierungszustände entsprechen einem Wasseranteil von weniger als 0.2% für den Zustand „trocken“, 2.7 – 3% für den Zustand „konditioniert“ und 7 – 8% für den Zustand „nass“ in der Probe. Die Abhängigkeit des Materialverhaltens von dem Feuchtegehalt soll durch die Versuche bei Raumtemperatur evaluiert werden.

Der Einfluss der Temperatur auf das Materialverhalten soll anhand des Konditionierungszustandes „konditioniert“ erfolgen. Die Prüftemperaturen stellen -35°C für „LT“, 23°C für „RT“ und 85°C für „HT“ dar. Für jeden Parameter wurden fünf Versuche durchgeführt, sodass insgesamt 75 Zugversuche erfolgten.

Der Einfluss der Temperatur auf das Materialverhalten ist in folgender Abbildung zu sehen:

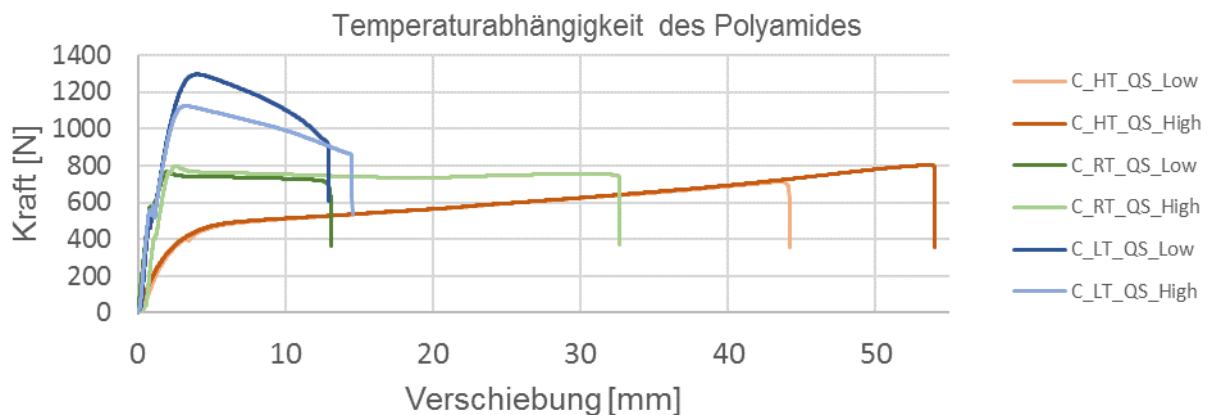


Abbildung 38 Materialverhalten bei verschiedenen Temperaturen

Wie bereits in Kapitel 4.1 geschildert, wichen die Prüftemperaturen von der Solltemperatur ab, sodass die Hochtemperaturversuche bei 60°C stattfanden und die Niedrigtemperaturversuche bei -8°C . In der Abbildung 38 ist gut zu erkennen, wie das Polyamid auf unterschiedliche Temperaturen reagiert. In einer 60°C heißen Umgebung können die Molekülketten leichter aneinander abgleiten, was zu einer erhöhten Bruchdehnung und niedriger Festigkeit führt. Umgekehrt ist bei kalten Temperaturen der Elastizitätsmodul und die Festigkeit höher, während die Bruchdehnung geringer ist. Die Proben, welche bei Raumtemperatur getestet wurden, unterscheiden sich im Elastizitätsmodul nicht zu den Proben welche bei -8°C getestet wurden. Weiterhin ist zu vermerken, dass der Kraftverlauf der Proben in heißer Umgebung progressiv ist während bei kalten Temperaturen -8°C der Verlauf degressiv ist.

Bei Variation des Feuchtegehaltes in der Probe (s. Abbildung 39) ergibt sich ein ähnliches Bild wie durch Variation der Umgebungstemperatur. Bei Trocknung der Proben ergibt sich eine geringere Bruchdehnung als bei konditionierten Materialproben. Während das Verhalten der trockenen und konditionierten Proben als elastisch-ideal plastisch angesehen werden kann, ist das Verhalten der nassen Proben als initial viskoelastisch und im Anschluss plastisch anzusehen.

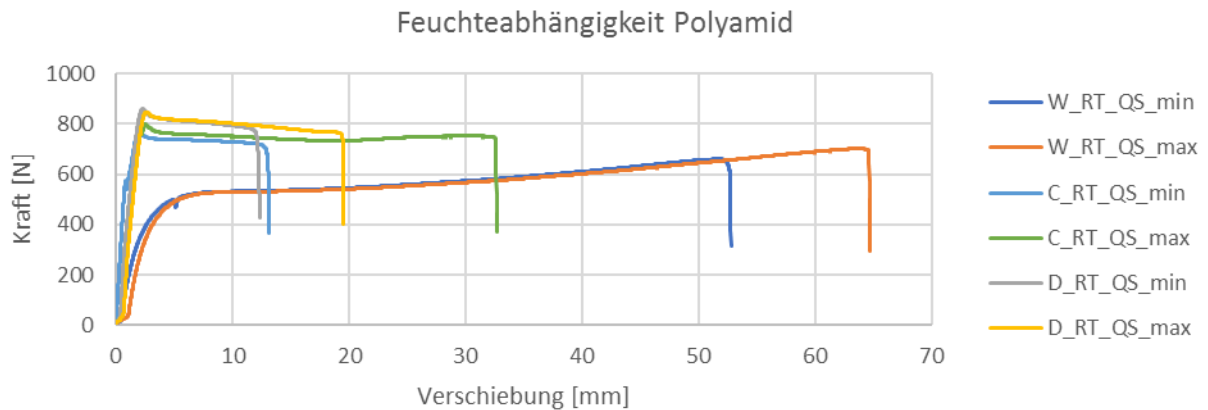


Abbildung 39 Variation des Feuchtegehaltes in der Probe

Neben den Umgebungsbedingungen wurde auch der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit evaluiert. Die Versuche wurden bei 0.833 mm/s (QS) sowie bei 1 m/s (MS) und 5 m/s (HS) durchgeführt. Die Versuchsdauer der Hochgeschwindigkeitsversuche war etwa 20 ms bis 160 ms und die Versuchsdauer der quasi statischen Zugversuche war im Mittel 30 s .

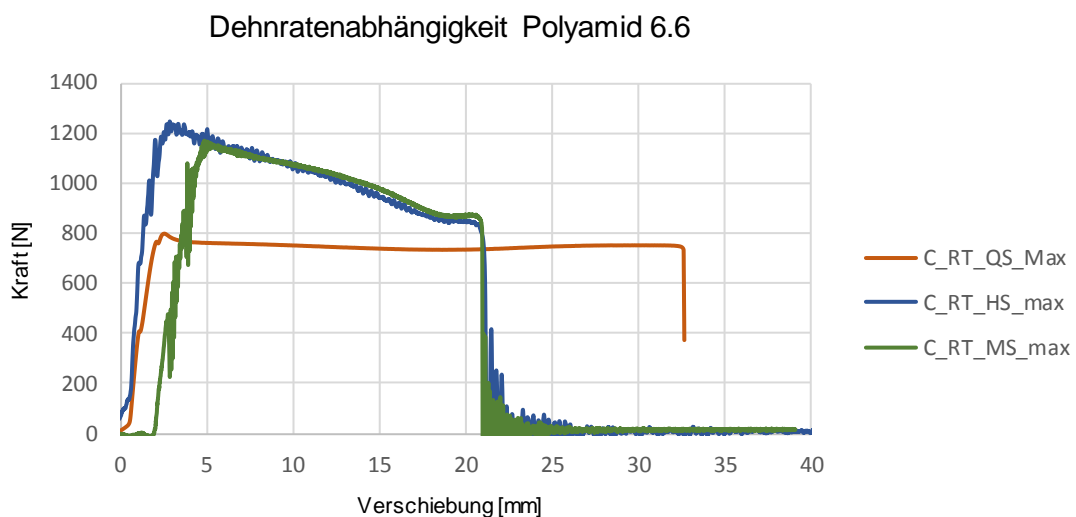


Abbildung 40 Dehnratenabhängigkeit Polyamid 6.6

In Abbildung 40 ist der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten dargestellt. Die Variation der Geschwindigkeit bei Hochgeschwindigkeitsversuchen führt demnach kaum zu einem messbaren Unterschied. Der Unterschied zur quasi statischen Versuchsdurchführung jedoch ist deutlich erkennbar. Viskose Effekte kommen bei den Versuchen mit hoher Belastungsgeschwindigkeit nicht zum Tragen. Dadurch, dass das Material kaum Zeit hat auf die Belastung zu reagieren, werden die schwachen physikalischen Bindungen der Ketten untereinander aufgebrochen und können sich während des Versuches nicht erneut verbinden. Dies führt zur degressiven Kennung der Hochgeschwindigkeitsversuche.

Bestimmte Parameterkombinationen weisen geringe Unterschiede voneinander auf, so wie die Ergebnisse für konditionierte und trockene Proben bei Raumtemperatur.

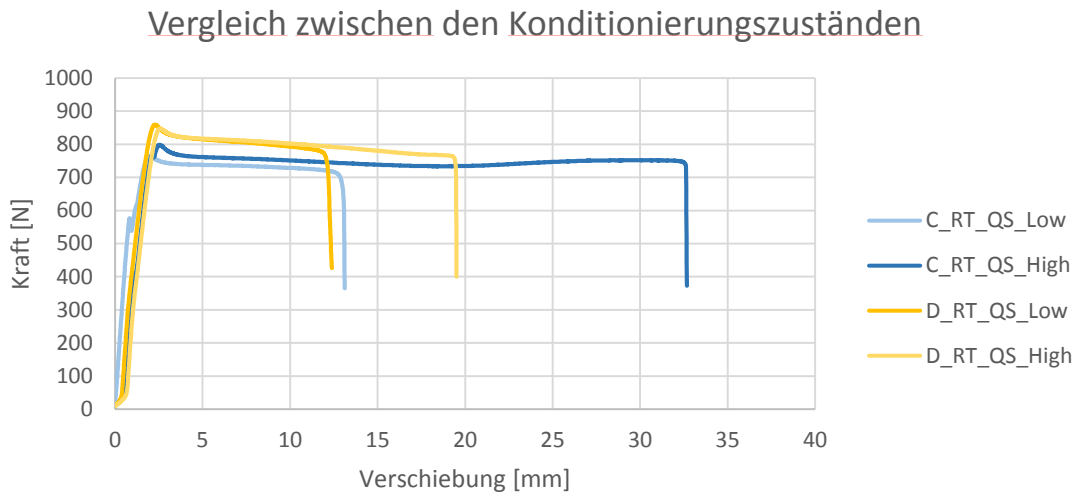


Abbildung 41 Vergleich zwischen zwei Konditionierungszuständen

In Abbildung 41 sind die Kraftsignale für trockene und konditionierte Proben bei Raumtemperatur aufgetragen. Beide Proben weisen ein elastisch ideal-plastisches Verhalten auf. Die trockenen Proben weisen eine geringere Streuung der Bruchdehnung als die konditionierten Proben auf. Im Mittel ist die Bruchdehnung der trockenen Proben geringer als die der konditionierten Proben.

4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Versuche konnten nicht bei den gewünschten Prüftemperaturen durchgeführt werden. Mithilfe einer klimatisierten Prüfkammer würde die Möglichkeit bestehen, die Prüftemperaturen konstant zu halten, diese war jedoch nicht vorhanden. Die Versuche mit hochtemperierten Proben wurden daher bei 60°C anstatt 85°C durchgeführt. Die Versuche mit Proben im unteren Temperaturbereich wurden bei -8°C anstatt bei -35°C durchgeführt (s. Kapitel 4.1).

Der Quaderstauchversuch zeigte, dass das Polyamid sensitiv auf die Belastungsrichtung reagiert. Gleichzeitig deutet das Spannungs-Dehnungs-Diagramm (s. Abbildung 37 „Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Druckversuches“) daraufhin, dass das Material unter Kompression stark verfestigt. Im nächsten Schritt soll der Versuch mithilfe der Finiten-Elemente-Methode nachgestellt werden, um die Werkstoffkennwerte zu extrahieren.

Die Zugversuche fanden unter Variation der Parameter Wassergehalt in der Probe, Umgebungstemperatur und Belastungsgeschwindigkeit statt. Die Matrix der Zugversuche ist Tabelle 1 zu entnehmen. Es zeigte sich, dass das mechanische Verhalten des Polyamides stark von der Umgebungstemperatur abhängt (s. Abbildung 38 „Materialverhalten bei verschiedenen Temperaturen“). Der Kraftanstieg bei Proben in Raum- und Niedrigtemperatur ist nahezu identisch, was auf den gleichen Elastizitätsmodul schließen lässt.

Die Auswirkungen des eingelagerten Wassers in der Probe sind in Abbildung 39 „Variation des Feuchtegehaltes in der Probe“ dargestellt. Während die Probe im Zustand „nass“ ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten für elastische und plastische Dehnungen zeigt, bilden die Konditionierungszustände „Trocken“ und „konditioniert“ eine ideal elastisch plastische Kennung ab. Zwischen den trockenen und konditionierten Proben gibt es abgesehen von der Bruchdehnung kaum Unterschiede, weshalb in diesem Feuchtebereich die Auswirkungen auf das mechanische Verhalten des Materials fast vernachlässigbar

sind.

Schließlich ist der Vergleich unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten in der Abbildung 40 „Dehnratenabhängigkeit Polyamid 6.6“ aufgetragen. Für quasistatische Belastungsgeschwindigkeiten haben die Molekülketten Zeit sich zu entschlafen, weshalb die Streckgrenze sowie die Steifigkeit niedriger sind als bei schnellen Belastungsgeschwindigkeiten. Bei Variation der Abzugsgeschwindigkeiten an der Hochgeschwindigkeitszugmaschine ergibt sich kaum eine Differenz der aufgezeichneten Kurven. Die Belastungsgeschwindigkeit ist bereits so hoch, dass das Material einen Sättigungspunkt erreicht hat, an dem nur noch eine marginale Steigerung der Verfestigung auftritt.

5 Kalibrierung mithilfe eines Reverse Engineering Prozesses

Zunächst soll gezeigt werden, weshalb die bestehende Materialkarte, welche durch Zugversuche kalibriert wurde, nicht imstande ist, den Quaderstauchversuch nachzubilden. Dazu wird der Versuch mithilfe der Finiten-Elemente-Methode nachgebildet und die beiden Ergebnisse miteinander verglichen.

Um die Versuchsergebnisse an die Simulationsergebnisse anzugleichen, müssen die Parameter der Fließkurve angepasst werden; als Resultat wird eine „druckergänzte Materialkarte“ generiert. Diese Parameter gilt es zu kalibrieren. Dafür gibt es verschiedene methodische Ansätze. Beispielsweise kann der Versuch unternommen werden, die Übereinstimmung durch erfahrungsbasierte Variation der Parameter zu erreichen. Dieser Ansatz kann bei einfachen Problemstellungen zielführend sein, jedoch nicht bei Anwendungen mit einem hohen Komplexitätsgrad.

Da die Parameter sehr sensitiv sind, wird der oben genannte Ansatz der erfahrungsbasierten Variation der Parameter nicht verfolgt und stattdessen ein automatisierter Reverse Engineering Prozess angestrebt. In diesem soll die Software LS – OPT[®], durch iteratives Verändern von Parametern der Fließkurvenbeschreibung, das Versuchsergebnis an das Ergebnis der Simulation annähern.

Dadurch wird in Kapitel 5.2 kurz auf das Optimierungsverfahren eingegangen, mit dem im Anschluss die Materialkarte modifiziert wird. Der Reverse Engineering Prozess wird ausführlich in Kapitel 5.3 besprochen, um den Ablauf des automatisierten Prozesses nachvollziehen zu können.

5.1 Benchmark zugbasierte Materialkarte

Um zu prüfen, ob eine Optimierung der existierenden Materialkarte durchgeführt werden muss, wird der Quaderstauchversuch durch die Finite-Elemente-Methode nachgebildet und das Ergebnis mit den Versuchsdaten verglichen. In dem Finite-Elemente Modell ist die bestehende Materialkarte, basierend auf der Kalibrierung an Zugversuchen, hinterlegt. Als Reibung wurde ein Reibkoeffizient von $\mu = 0.05$ angenommen, da die Kameraaufnahmen kein Ausbeulen des Probekörpers zeigten, welches auf eine Querdehnung hinweisen würde und dadurch der Reibkoeffizient in einem Bereich von $\mu = 0.01$ bis $\mu = 0.05$ liegen muss. Diese Erkenntnis geht ebenfalls aus den vorherigen Simulationen hervor (vgl. Kapitel 3.2.2).

Als Ergebnis erhält man die Darstellung in Abbildung 42, in welchem die Versuchsergebnisse sowie das Ergebnis der Simulation mit der bestehenden Materialkarte aufgetragen sind. Wie leicht zu erkennen ist, ist die Abweichung zu den Versuchsdaten groß. An dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 37 „Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Druckversuches“ aus Kapitel 4.2, konnte bereits eine steifere Antwort des Materials auf Druckbelastungen festgestellt werden. Dies ist hier ebenfalls zu sehen, da die Kraft-Weg-Kurve der Simulation eine flachere Steigung als die Testdaten aufweist. Dies ist auf die Fließkurve des Zugversuches zurückzuführen; dort tritt deutlich weniger Verfestigung auf als bei der Fließkurve der Druckversuche. Der Elastizitätsmodul, welcher in dem Reverse Engineering Prozess der Zugversuchsreihe bestimmt wurde, bildet den elastischen Bereich des Druckversuchs gut ab, weshalb dieser beibehalten werden kann. Durch die große Abweichung zwischen Simulation und Versuch macht es Sinn, die Materialkarte um eine Fließkurvenbeschreibung im Spannungszustand „Druck“ zu ergänzen.

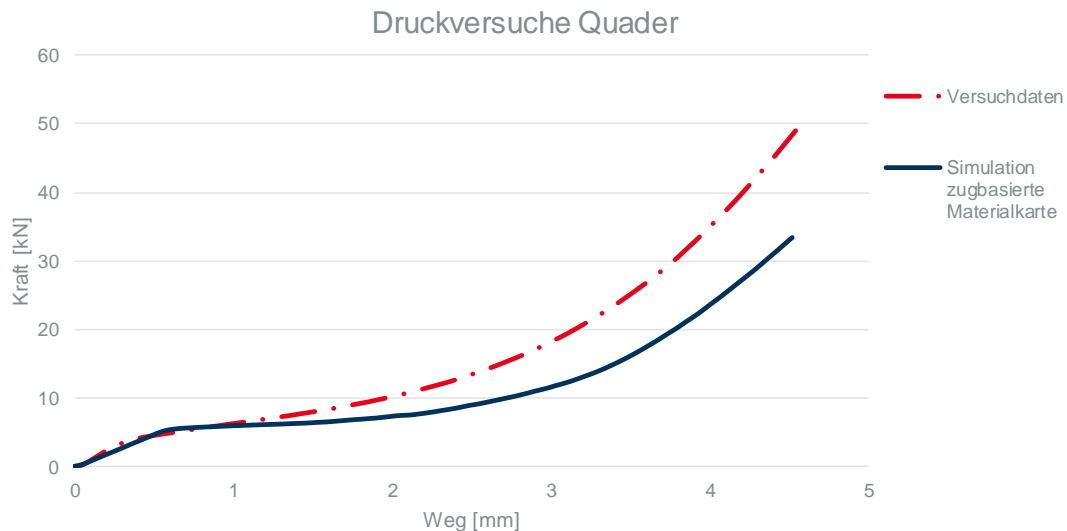


Abbildung 42 Druckversuch Simulations- und Versuchsergebnisse (Eigene Darstellung)

5.2 Optimierungsverfahren

Da die existierende Materialkarte den Quaderstauchversuch unzureichend abbilden kann, muss eine Optimierung der Materialparameter durchgeführt werden. Um diese durchzuführen, wird hier kurz auf das verwendete Optimierungsverfahren eingegangen.

Eine Optimierung ist im Allgemeinen das Finden eines Minimums oder Maximums der Zielfunktion unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Jarre, 2003). Im technischen Bereich werden beispielsweise durch eine Optimierung die Eigenschaften eines Produktes verbessert. Als Parameter einer Optimierung sollten signifikante Parameter ausgewählt werden; diese können durch Erfahrungswerte oder durch eine Sensitivitätsanalyse bestimmt werden. Die Parameter werden als Zielfunktionen oder Nebenbedingungen in das Optimierungsmodell implementiert und durch die Optimierung ermittelt (Stander, et al., 2013) (Meywerk, 2007).

Die Optimierung in dieser Arbeit basiert auf einem sogenannten Response-Surface-Methode (RSM)-Approximationsverfahren, mit welchem aus Parameterkombinationen Systemantworten generiert werden. Die Ergebnisse der Parameterkombinationen werden ausgewertet und stellen zunächst eine Punktwolke im Raum dar. Die Punktwolke wird mithilfe einer Näherungsfunktion approximiert, die durch den Nutzer vorgegeben wird. Um die Koeffizienten der Näherungsfunktion zu bestimmen, wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate genutzt (Schumacher, 2004). Die bestimmte Näherungsfunktion stellt die Systemantwort dar; auf dieser Basis kann der Parameterraum eingeschränkt und die Lage der Parameterkombinationen im Raum verändert werden.

Die bestimmte Näherungsfunktion wird auch als Metamodell bezeichnet. Basierend auf dem Metamodell wird das Optimum berechnet. Anschließend wird mit diesen Erkenntnissen ein neuer Satz an Parameterkombinationen gewählt und erneut eine Systemantwort generiert, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

Um den Parameterraum im Laufe der Optimierung einzuschränken und somit schneller das Optimum zu finden, kann der Ansatz der „Parameterraumreduktion“ genutzt werden.

Dabei wird der Fokus auf das berechnete Optimum gelegt und in der Nähe dieses Optimums ein neuer kleinerer Parameterraum aufgespannt. Dadurch können selbst sehr sensitive Parameter schnell ermittelt werden (Stander, et al., 2013). Dieses Vorgehen ist in Abbildung 43 demonstriert. Die Punkte in dem Parameterraum stellen jeweils eine Parameterkombination dar. In dieser Abbildung ist der Parameterraum auf der linken Seite die Ausgangskonstellation, der durch das sequentielle Reduzieren bis zur letzten Iteration (rechte Abbildung) stark verkleinert wird.

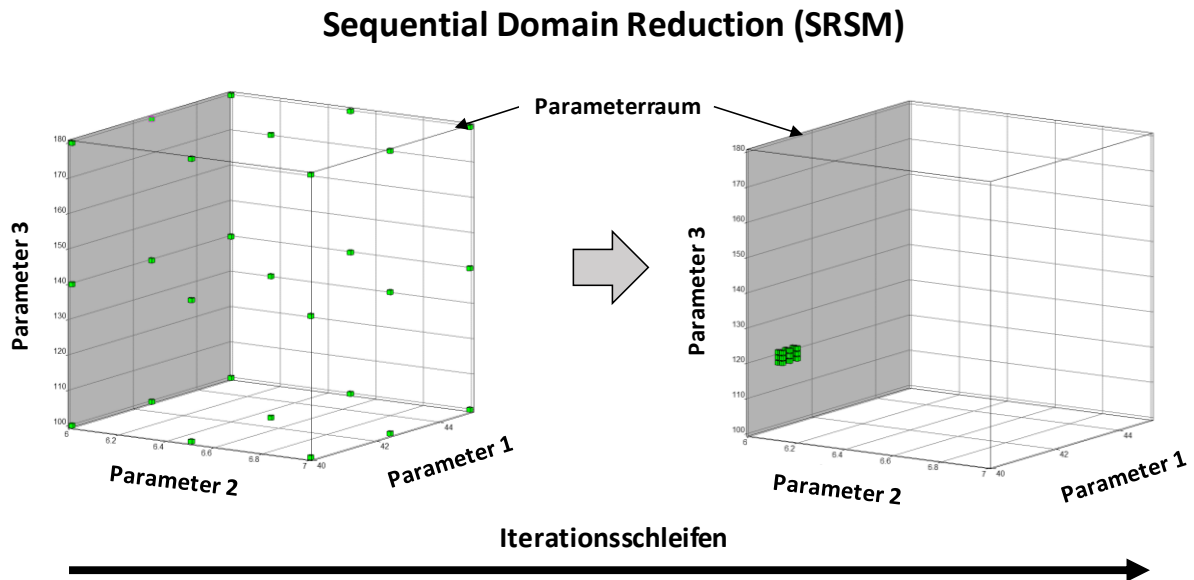


Abbildung 43 Sequential Domain Reduction von LS-OPT (Eigene Darstellung)

Die Generierung einer Antwortfläche verlangt nach einer Definition einer Näherungsfunktion. Diese Näherungsfunktion kann durch Polynome beschrieben werden, welche eine einfache und schnelle Ermittlung des Optimums erlaubt. Eine umfangreichere Beschreibung wird durch Verfahren wie dem *neuronalen Netzwerk* oder dem *Radial Basis Function Network* erreicht.

Neben der Näherungsfunktion muss ein Versuchsplan ausgewählt werden; dieser beschreibt, wie der Parameterraum abgetastet wird. Es existieren auch hier mehrere Verfahren. Ein Beispiel ist der voll faktorielle Versuchsplan, bei dem die Punktzahl pro Variable definiert wird; diese Punktzahlen werden dann gleichmäßig auf die Variable verteilt. Bei einer Punktzahl von drei wird beispielsweise der Maximalwert, der Minimalwert und der Mittelwert der Variable als Parameter ausgewählt.

Es existieren weiterentwickelte Versuchspläne, um die Anzahl an Simulation zu verringern. Dazu gehört der D-optimale Versuchsplan. Dieser berücksichtigt vorangegangene Iterationen, um auf das Systemverhalten in der Zukunft zu schließen. Dieses Verfahren positioniert die Parameterkombinationen so, dass die Varianz der erwarteten Systemantworten minimiert wird. Dadurch wird der Prozess der Optimierung effizienter und der Prozess kann schneller ein Optimum finden.

Um die Systemantwort auszuwerten und ein Optimum zu finden, wird ein geeigneter Optimierungsalgorithmus benötigt. Es gibt verschiedene Optimierungsalgorithmen; für das genutzte Optimierungstool LS – OPT[®] stehen vier Algorithmen zur Verfügung. Die Verfahren sind das Leapfrog optimizer for constrained minimization (LFOPC)-Verfahren, genetische Algorithmen (GA), das Adaptive simulated annealing (ASA)-Verfahren und das Differential Evolution (DE)-Verfahren. Die konkrete Funktionsweise kann Stander et al. entnommen werden.

Zusammenfassend ist in Abbildung 44 eine typische Iterationsschleife schematisch dargestellt.

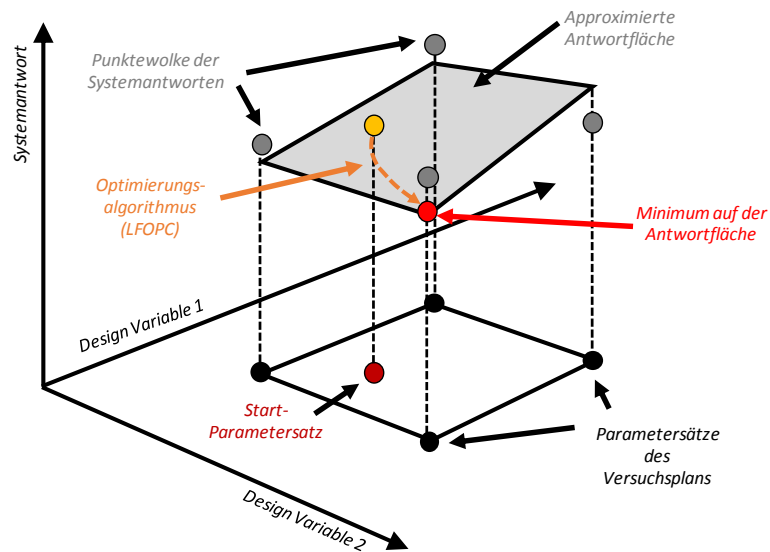


Abbildung 44 Erstellung einer Systemantwort durch eine Näherungsfunktion; Finden des Optimums über den Optimierungsalgorithmus LFOPC (Stang, HAW Hamburg 2015)

In Abbildung 44 werden basierend auf den Ergebnissen der Parameterkombinationen (Punktwolke der Systemantworten) die Koeffizienten der Näherungsfunktion bestimmt. Hier ist die Näherungsfunktion durch eine lineare Polynomfunktion beschrieben. Der Versuchsplan in diesem Beispiel ist voll-faktoriell mit jeweils zwei Parametern pro Variable. Der hier genutzte Optimierungsalgorithmus LFOPC findet das Minimum der Antwortfläche, von dem aus weitere Iterationen folgen können.

5.3 Vorstellung des Prozesses

Wie bereits beschrieben, kommt in dieser Arbeit ein Reverse Engineering Prozess zum Einsatz. Die Darstellung des Optimierungsprozesses ist in Abbildung 45 „Reverse Engineering Prozess zur Materialkalibrierung“ gezeigt. Demnach werden zunächst die Zug- und Druckversuche aufbereitet und die Kraft-Weg-Kurven in den Reverse Engineering Prozess eingepflegt. Die Versuchsaufbauten des Zug- und Druckversuches werden mithilfe der FEM diskretisiert. In dem diskretisierten Modell werden mithilfe des Reverse Engineering Prozesses die Parameter der Materialkarte verändert, um die im Versuch ermittelten Kraft-Weg-Kurven anzunähern. Der automatisierte Materialkalibrierungsprozess legt zu Beginn jeder Iteration die Parameterkombinationen zur Beschreibung der Fließkurve fest. Das Optimierungstool LS – OPT[®] kann diese Parameter kontrollieren. Die eingesetzten Parameter werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

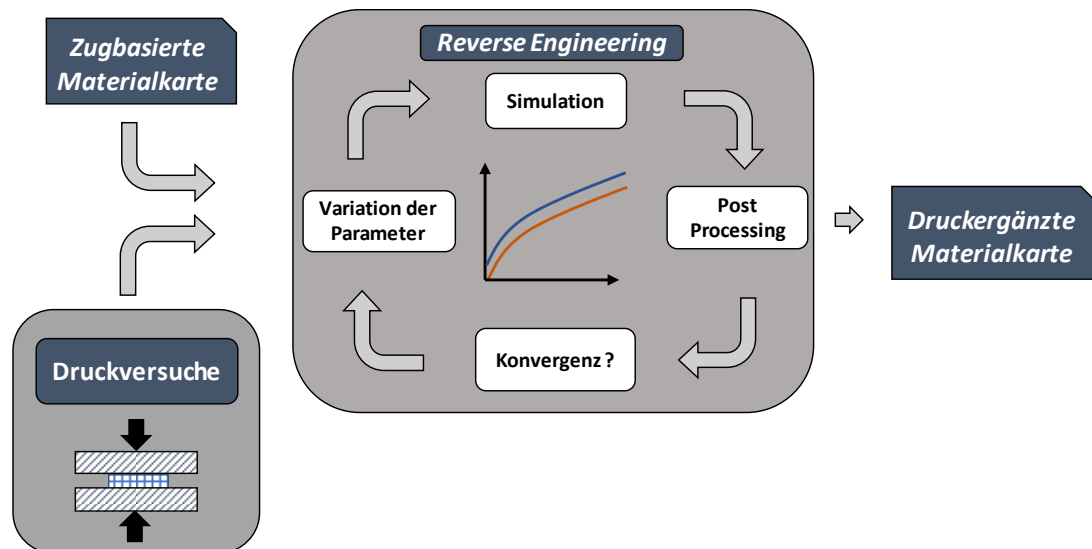


Abbildung 45 Reverse Engineering Prozess zur Materialkalibrierung (Eigene Darstellung)

Nach erfolgter Simulation der verschiedenen Modelle werden die Ergebnisse mit einem Python Skript ausgewertet und in das Optimierungsprogramm LS – OPT[®] erneut eingespeist. Aus diesen Ergebnissen werden die Systemantworten über die Näherungsfunktion des Metamodellens ermittelt. Basierend darauf, wird die Reduzierung des Parameter-raumes durchgeführt. Im reduzierten Parameterraum wird die gleiche Anzahl an Parameterkombinationen verteilt und die Simulationen starten erneut. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis ein gewähltes Konvergenzkriterium erreicht oder die maximale Anzahl an Iterationen durchgeführt wurde. Durch dieses Vorgehen ergibt sich eine Materialkarte, welche durch die Ergänzung einer Fließkurve auf Basis von Druckversuchen in der Lage ist, auf Belastungen anisotrop zu reagieren.

5.4 Optimierung der Materialkarte

Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, werden während der Optimierung die Formulierungen der Fließkurve des Materialmodells angepasst. In dem Materialmodell SAMP-1 können für die vier verschiedenen Spannungszustände „Druck“, „Zug“, „Scherung“ und „Biaxialer Zug“ Fließkurven hinterlegt werden. Die bereits vorhandene Materialkarte, basierend auf Zugversuchen, hat drei hinterlegte Fließkurven. Sie liegen in tabellarischer Form in Abhängigkeit der Dehnrates vor; dadurch ist neben der Beschreibung des plastischen Verhaltens bei quasi-statischer Belastung auch die Dehnratenabhängigkeit charakterisiert.

In der Optimierung wird deshalb die bestehende Konfiguration der Materialkarte beibehalten und nur eine Fließkurve für den Spannungszustand „Druck“ nachgetragen. Dadurch wird der Fließkörper zu einer Drucker-Prager-Formulierung geändert und das Material kann auf elastische und plastische Belastungen anisotrop reagieren.

Für die Fließkurve der Zugversuche wurde ein modifizierter Ansatz verwendet, welcher auf dem Ludwik-Ansatz basiert:

$$\sigma_{LM} = [A_0 + B_0 \times (\epsilon_{pl})^{n_0}] \times \ln(C_0 + (\epsilon_{pl})^{m_0}) \quad (47)$$

Hiermit wird die Fließkurve über die fünf Kalibrierungsparameter A_0 , B_0 , C_0 , m_0 und n_0 in Abhängigkeit der plastischen Dehnung ϵ_{pl} beschrieben.

Für die Beschreibung der Fließkurve des Spannungszustandes „Druck“ wurde ein anderer Ansatz gewählt, da die Anzahl der Parameter mit fünf zu einer großen Anzahl an Simulationen im Reverse Engineering Prozess führt, bis eine Konvergenz erreicht ist.

Um einen geeigneten Ansatz zu finden und den Parameterraum sowie die Parametersensitivität zu bestimmen, wurde versucht, das technische Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Abbildung 37 „Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Druckversuches“ analytisch zu beschreiben. Das technische Spannungs-Dehnungs-Diagramm liegt mit der Charakteristik nah an der Zielgröße des wahren Spannungs-Dehnungs-Diagrammes. Aus dem wahren Spannungs-Dehnungs-Diagramm kann die Fließkurve direkt entnommen werden. Um die Versuchsergebnisse des Quaderstauchversuches analytisch anzunähern, wurden verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Fließkurven in einer Excel-Datei verglichen und ihre Koeffizienten mithilfe des Excel Plugins „Solver“ optimiert.

Als Ergebnis des gewählten Ansatzes ergibt sich die analytische Beschreibung des technischen Spannungs-Dehnungs-Diagrammes in Abbildung 46. Die durchgezogenen Linien stellen das aufbereitete Versuchsergebnis dar, indem das Kraft-Weg-Diagramm in ein technisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgewandelt wurde. Die gestrichelte Linie stellt die Fähigkeit des gewählten Ansatzes dar, plastische Dehnungen zu beschreiben.

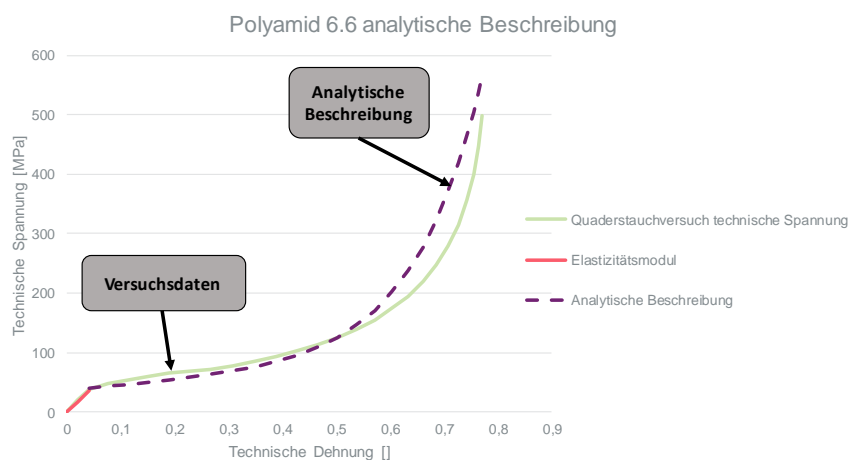


Abbildung 46 Analytische Beschreibung des Polyamides (Eigene Darstellung)

Der Ansatz, der gewählt wurde für die Beschreibung der Fließkurve im Spannungszustand „Druck“, lautet wie folgt:

$$\sigma_c = [A_0 + B_0 \times \epsilon_{pl}] + e^{(C_0 \times \epsilon_{pl})} \quad (48)$$

Dieser Ansatz enthält drei Parameter; des Weiteren wurde der natürliche Logarithmus aus der Formel 47 durch einen exponentiellen Term ersetzt, um die Verfestigung zu beschreiben. Die reduzierte Formulierung der Fließkurve wurde umgesetzt, damit die Optimierung effizienter ablaufen kann.

Der Parameter A_0 ist äquivalent zu dem Wert der Streckgrenze und fließt additiv in die Beschreibung der Fließspannung ein. Parameter C_0 und B_0 hingegen beeinflussen das

Ergebnis der Simulation durch Variation stark. In der Excel-Datei wurden die Parameter aus der Formel 48 verändert, um ihre Sensitivität zu bestimmen. Dies führte dazu, dass der Parameterraum auf ein Minimum eingeschränkt werden konnte.

Wie in Abbildung 43 „Sequential Domain Reduction von LS-OPT“ aus Kapitel 5.2 zu erkennen, wurde der Parameterraum reduziert, bis eine Konvergenz erreicht wurde. Dadurch wurde die Fließkurvenbeschreibung so angepasst, dass die Simulation das gemessene Kraft-Weg-Signal des Versuches gut abbilden konnte.

In Abbildung 47 ist die Minimierung der Abweichungen zu den Versuchsergebnissen im Laufe des Reverse Engineering Prozesses zu sehen.

Effekt der Reduktion des Parameterraumes

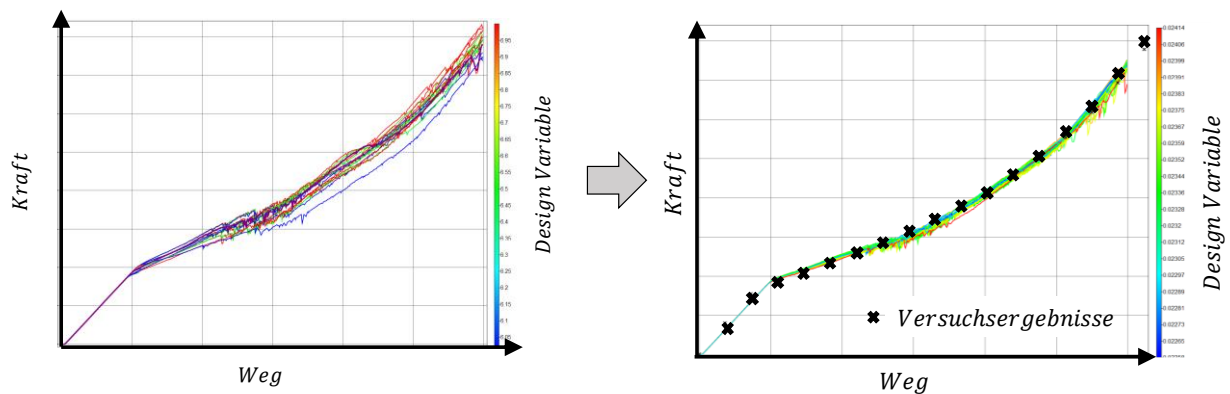


Abbildung 47 Reduktion der Abweichung von Versuch und Simulation durch Variation der Parameter im Reverse Engineering Prozess (Eigene Darstellung)

Um zu analysieren, wie sich die Veränderung der Materialkarte auf die Simulationsergebnisse auswirkt, wurde der Quaderstauchversuch mit beiden Materialkarten erneut simuliert. Die erste Materialkarte entspricht der Karte, welche durch die Zugversuchsreihe gewonnen wurde. Die zweite Materialkarte wurde zudem durch die Fließkurvenbeschreibung der Druckversuche ergänzt. Das Ergebnis befindet sich in Abbildung 48. Die Abweichung, welche in Kapitel 5.1 festgestellt wurde, ist durch die neue Materialkarte stark reduziert worden.

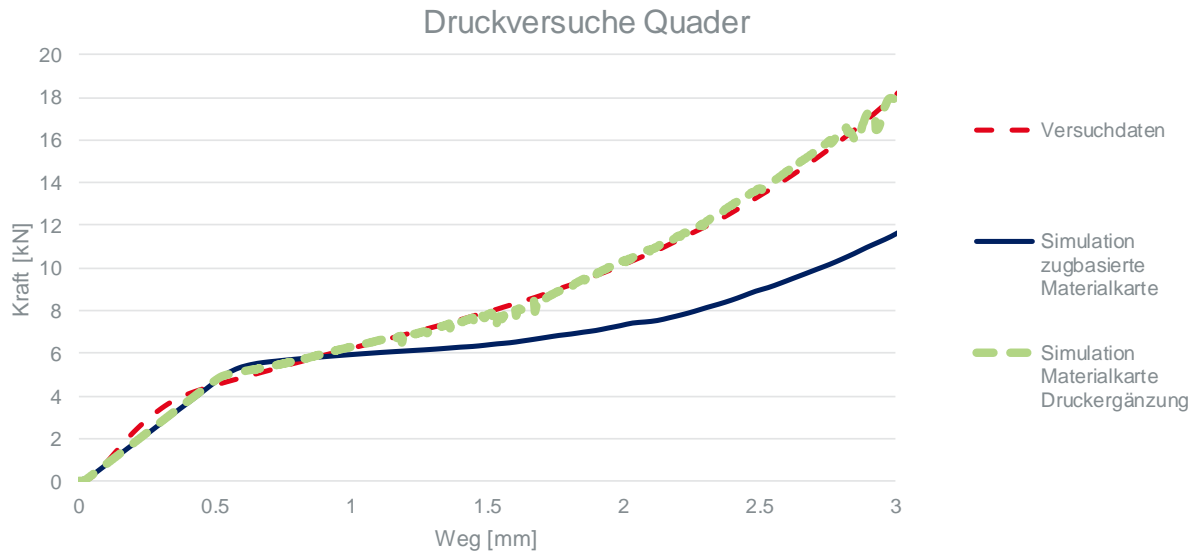


Abbildung 48 Quaderstauchversuch: Vergleich beider Materialkarten und der Versuchsdaten (Eigene Darstellung)

Wie bereits in Kapitel 4.3 angedeutet, muss die Fließkurve des Materials unter Druckbelastung ein steiferes Verhalten aufweisen, als die Fließkurve des Materials unter Zugbelastung. Die erweiterte Formulierung der Materialkarte, hier gestrichelt dargestellt, ist in der Lage, das plastische Verhalten des Quaderstauchversuches sehr gut abzubilden. Der elastische Bereich ist unverändert, da im Materialmodell nur die Fließkurve ergänzt wurde.

Nachfolgend findet sich in Abbildung 49 die Darstellung der beiden Fließkurven, die für die Beschreibung des Materials unter plastischen Verformungen bei Zug- und Druckbelastung genutzt werden. Selbst bei plastischen Dehnungen von 0.3 beträgt die Fließspannung bei Druckbelastung 82 MPa und 48 MPa bei der Fließkurve für reine Zugspannungen. Dieser Unterschied beträgt bei dieser Dehnung 70%. Die Fließkurven weichen also stark voneinander ab. Eine einfache Skalierung der Fließkurve für Zugbelastungen, um die Fließkurve für Druckbelastungen annähernd zu beschreiben, ist nicht möglich. Vielmehr müsste ein Term der Gleichung (48) verändert werden. Die dargestellten Fließkurven sind für Umformgrade bis $\varphi = 0.8$ gültig; im Anschluss an diese Dehnung ist der Verlauf künstlich versteift, damit die numerische Stabilität gewährleistet ist. Eine numerisch instabile Materialkarte führt zu typischen Abbruchkriterien, wie negative Jacobi-Determinanten. Diese treten auf, wenn das Element so stark verzerrt wurde, dass es sich selbst durchdringt. Durch eine künstliche Versteifung wird die Wahrscheinlichkeit für eine Selbstdurchdringung geringer.

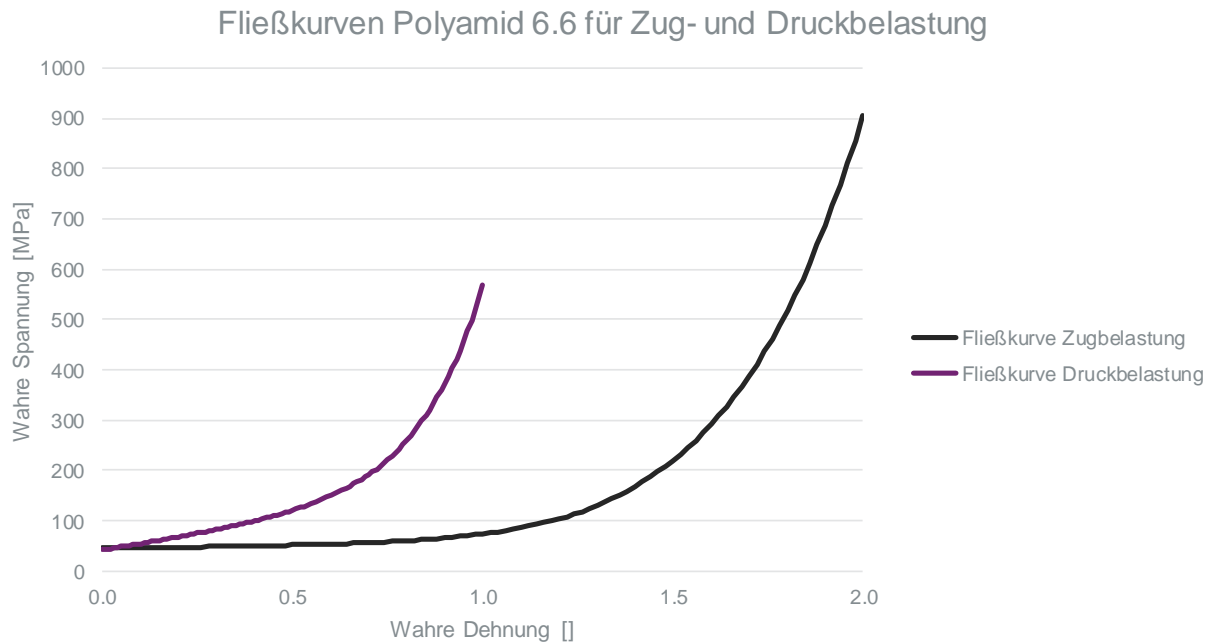


Abbildung 49 Gegenüberstellung der Verfestigung der Spannungszustände „Zug“ und „Druck“ (Eigene Darstellung)

Durch die Optimierung der bestehenden Materialkarte konnten die gewonnen Versuchsergebnisse gut durch die Simulation nachmodelliert werden. Die Veränderung des Terms (47) zur Beschreibung der Fließkurven führte, mit der Vorauswahl der Koeffizienten durch das Excel Plugin „Solver“, zu einer schnellen Konvergenz.

Wie erwartet, ist die Fließkurve bei Druckbelastungen steifer als die Fließkurve bei Zugbelastungen.

Welche Auswirkungen die Ergänzung der Materialkarte auf Komponenten vorweist, wenn der Spannungszustand multiaxial ist, soll im nächsten Kapitel evaluiert werden.

6 Validierung der Materialkarte

Die bestehende Materialkarte wurde im vorherigen Kapitel anhand des Quaderstauchversuches neu kalibriert. Um zu prüfen, welche Auswirkungen die Modifikation auf mehrachsige Spannungszustände hat, wird in diesem Kapitel die weiterentwickelte Materialkarte in verschiedenen Umgebungen validiert (s. Validierungspyramide in Abbildung 20). Zunächst soll die Materialkarte auf Komponentenebene validiert werden. Komponenten sind in diesem Kontext Bauteile mit multiaxialen Spannungszuständen. Einen geeigneten Komponentenversuch gilt es auszuwählen. Bei der Auswahl des Komponentenversuches wird der später auftretende Spannungszustand im Produkt als Vergleich herangezogen, da der Komponentenversuch die spätere Belastung idealisiert darstellen soll. Neben dem Komponentenversuch wird die entwickelte Materialkarte auch in eine Simulation des Gesamtproduktes eingepflegt, um den Einfluss zu quantifizieren.

6.1 Auswahl des Komponentenversuches

Der Komponentenversuch stellt einen Aufbau dar, bei dem das Material einem mehrachsigen Spannungszustand unterworfen wird. Bisher stellten die Versuche, um das Materialverhalten zu qualifizieren, einen isolierten Aufbau mit homogenen Spannungszuständen dar, welche so in der Praxis selten auftreten. Oftmals sind die Geometrien von Bauteilen inhomogen, sodass zwangsläufig mehraxiale Spannungszustände auftreten. Der Komponentenversuch soll die Fähigkeit erörtern, ob die Materialkarte in der Lage ist, das Materialverhalten bei multiaxialen Spannungszuständen treffend zu beschreiben.

Zur Auswahl des Komponentenversuches lag das Hauptaugenmerk auf dem oben genannten multiaxialen Spannungszustand. Dazu wurden mehrere Versuchsaufbauten mit der Simulation ausgewertet und schließlich ein Aufbau ausgewählt. Zur Auswahl standen zwei Aufbauten (s. Abbildung 50); diese sind der Flachstauchversuch aus Kapitel 3.2.1 und ein 3-Punkt-Biegeversuch mit Kontakt am Ende der Durchbiegung.

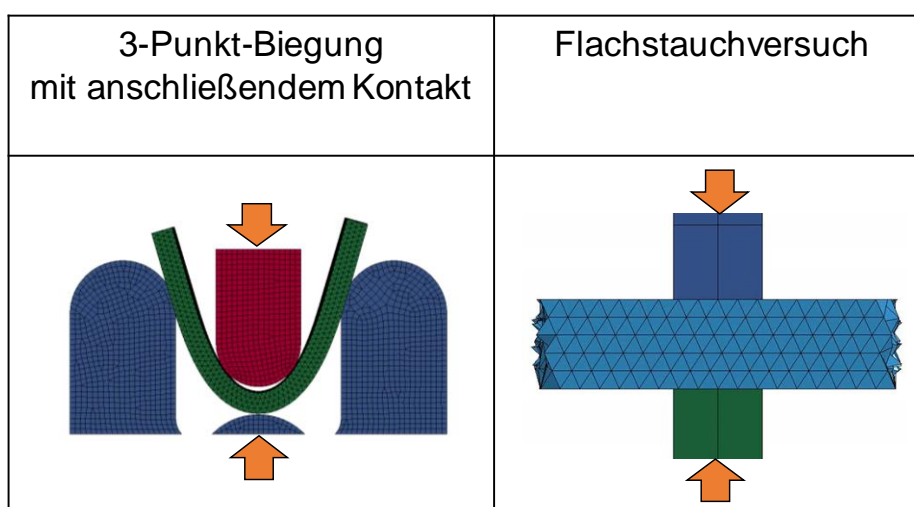


Abbildung 50 Auswahl des Komponentenversuches (Eigene Darstellung)

Der 3-Punkt-Biegeversuch mit anschließendem Kontakt soll typische Spannungsverteilungen einer Biegebelastung aufweisen. Durch den Kontakt am Ende des Versuches wird

der Prüfkörper lokal gestaucht und ein druckdominanter multiaxialer Spannungszustand entsteht.

Beim Flachstauchversuch ist die Kinematik sowie die Spannungsverteilung bereits bekannt, weshalb an dieser Stelle auf Kapitel 3.2.1 verwiesen sei.

Zur Bewertung der Eignung der Versuche wird der Spannungszustand während der Versuchsdurchführung analysiert sowie der Aufwand in der Fertigung beurteilt. Die Materialkarte soll im Kontext eines bestehenden Produktes angewendet werden, sodass der Spannungszustand des Produktes als Referenz herangezogen wird.

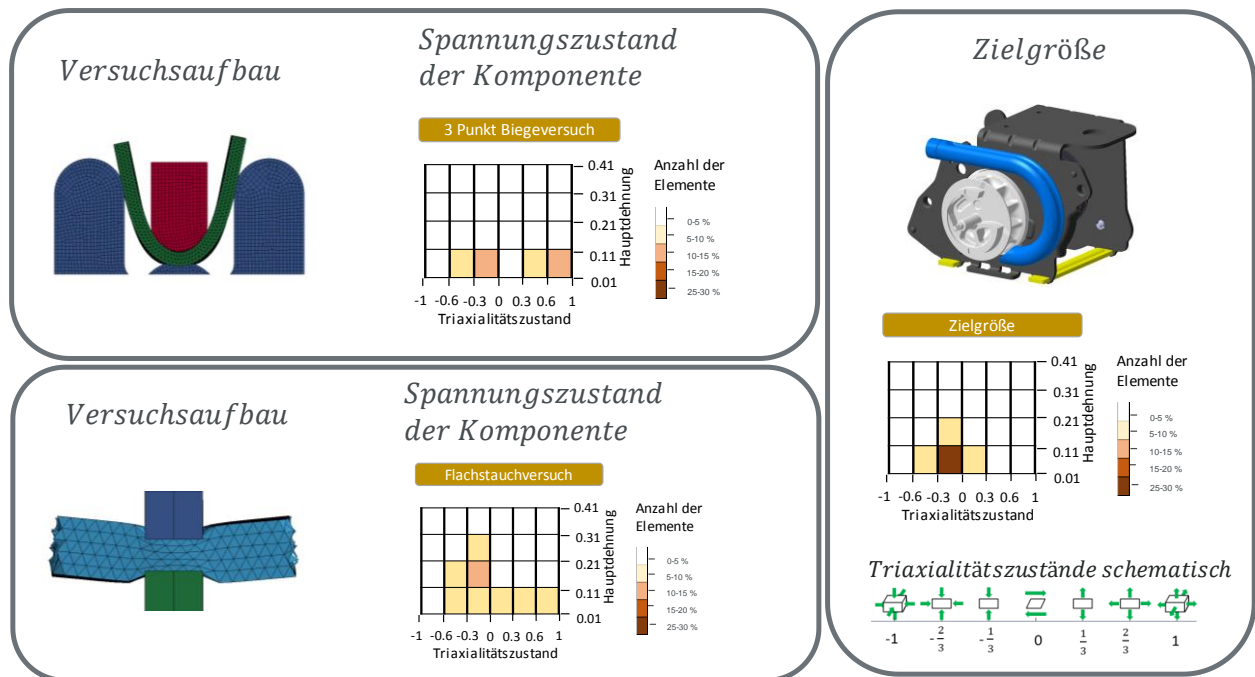


Abbildung 51 Spannungszustände der Komponentenversuche (Eigene Darstellung)

In Abbildung 51 ist der Spannungszustand der Zielgröße in der rechten Spalte dargestellt. Die Zielgröße ist eine Welle eines Gurtaufrollers, welche durch einen Kunststoffstab bewegt wird. Der geplottete Spannungszustand dieser Zielgröße ist die des Kunststoffstabes, während er über die Ritzel der Zähne geschoben wird. Dieser ist druckdominant, enthält aber ebenfalls Anteile von Zugspannungen.

Auf der linken Seite sind beide Spannungszustände der Komponentenversuche, die in Frage kommen, gezeigt. Der 3-Punkt-Biegeversuch weist ebenfalls einen großen Anteil an Druckspannungen auf, jedoch ist der Anteil an Zugspannungen in der Komponente größer. Der Flachstauchversuch hat einen druckdominanten Spannungszustand wie die Zielgröße, jedoch sind die Spannungszustände weiter gestreut als die der Zielgröße.

Aufgrund der relativ einfachen Umsetzung des Versuches und dem ähnlichen Spannungszustand zur Zielgröße wurde der Flachstauchversuch als Versuch für die Validierung auf Komponentenebene ausgewählt. Gleichzeitig ist bei dem Flachstauchversuch eine größere Analogie zu der Zielgröße gegeben. Wie dort auch, wird ein lokales Eindringen in den Körper abgebildet. Die Versuchsergebnisse sowie die Ergebnisse der Simulation werden im nächsten Kapitel vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Vergleich der beiden Materialkarten.

6.2 Validierung der Materialkarte auf Basis des Komponentenversuches

Der für die Materialkartenerstellung ungeeignete Flachstauchversuch erwies sich als geeignet für die Validierung der Materialkarte. Der Versuchsaufbau und die Ergebnisse sind nachfolgend in Abbildung 52 dargestellt. Der Versuch war verschiebungsgesteuert und wurde bei Erreichung einer Prüfkraft von 50 kN beendet. Es wurde keinerlei Schmiermittel verwendet. Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse fällt auf, dass die Ergebnisse sehr konsistent sind und kaum Streuung vorhanden ist. Bis 1 mm Verformung kann das Verhalten als elastisch angesehen werden, danach beginnt das Material zu fließen. Ein Bruch tritt während des Versuches nicht auf, da die Probe komprimiert wird.

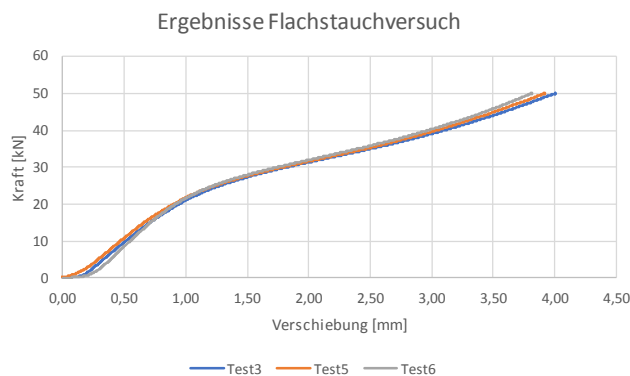


Abbildung 52 Ergebnisse des Flachstauchversuches (Eigene Darstellung)

Die Versuchsumgebung wurde mithilfe der Methode der FEM diskretisiert und ausgewertet. Der Probenkörper ist, wie der Stempel, nur teilweise in der Simulation abgebildet, da die restliche Geometrie nicht belastet wird (Abbildung 53). Da der Unterschied in der Steifigkeit der Kontaktpaare mit dem Faktor 200 groß ist, wird eine Kontaktoption genutzt, welche in der Lage ist, diese Differenz zu adressieren. Vier Simulationen werden durchgeführt, davon jeweils zwei für eine Netzgröße. Für jede Netzgröße wird die Simulation mit beiden Materialkarten durchgeführt und das Ergebnis im unteren Teil der Abbildung 53 dargestellt.

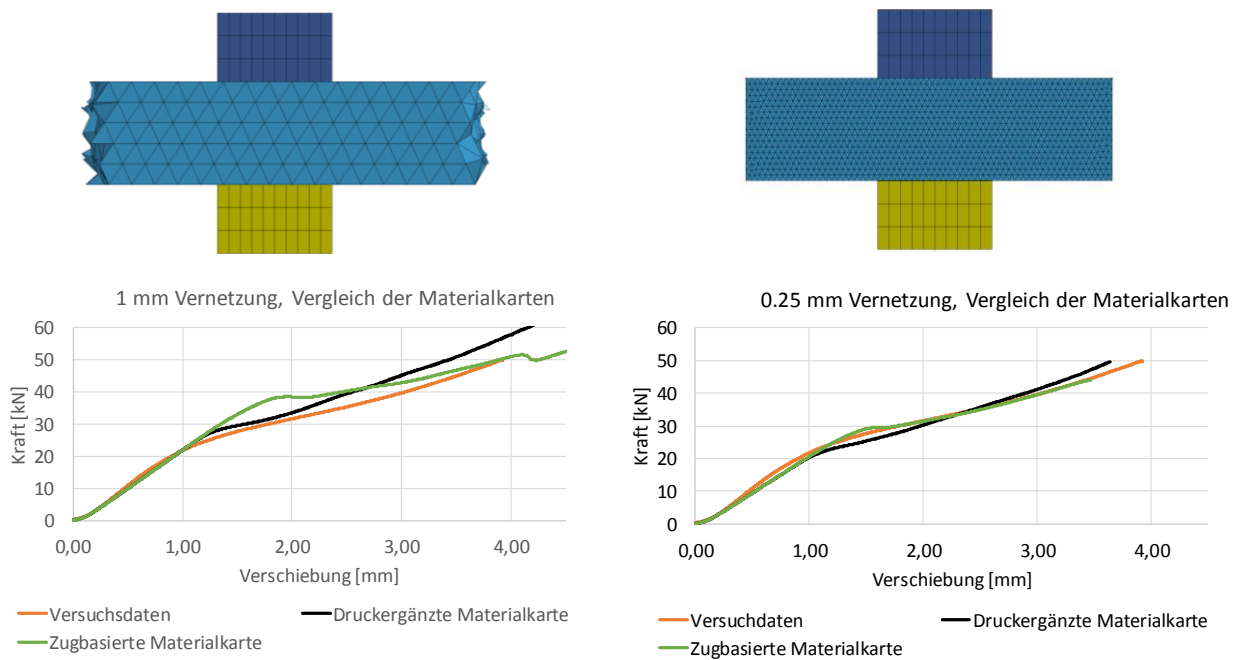


Abbildung 53 Darstellung der Simulationsergebnisse und der Vernetzungsgröße (Eigene Darstellung)

Die Kalibrierung beider Materialkarten fand bei einer Elementgröße von 1 mm Kantenlänge statt. Daher wird zunächst das Ergebnis der Simulation bei 1 mm Kantenlänge beschrieben.

Die Simulationsergebnisse für die Vernetzung mit 1 mm Kantenlänge korrelieren im elastischen Bereich gut mit den Versuchsergebnissen. Der bestimmte Elastizitätsmodul kann das Materialverhalten gut beschreiben. Sobald die Steigung der Kraft abfällt und die plastische Verformung beginnt, divergieren die Ergebnisse voneinander. Die Materialkarte, welche um die Ergebnisse aus Druckversuchen ergänzt wurde, kann das Materialverhalten am Umschlagpunkt besser abbilden als die Materialkarte, welche nur auf Zugversuchen basiert. Im Anschluss ist die Steigung der Kraft der zugbasierten Materialkarte geringer als die Versuchsdaten und die Steigung der Kraft der druckergänzten Materialkarte etwas größer als die der Versuchsdaten. Wenn die Vernetzung des Probenkörpers verfeinert wird, korrelieren die Simulationsergebnisse besser mit den Versuchsergebnissen. Die leichte Überhöhung der zugbasierten Materialkarte am Umschlagpunkt bleibt bestehen. Der Übergang von elastischen zu plastischen Dehnungen ist bei der druckergänzten Materialkarte etwas zu früh. Die anschließende Verfestigung des Materials wird gut von der zugbasierten Materialkarte getroffen, während die druckergänzte Materialkarte eine etwas zu hohe Verfestigung zeigt.

6.3 Validierung der Materialkarte in der Produktsimulation

Die letzte Stufe der Validierungspyramide aus Abbildung 20 „Vorgehensweise der Ausarbeitung zur Erstellung und Validierung einer Materialkarte“ stellt die höchste Ebene die Simulation auf Produktebene dar; dort kann der Effekt der druckergänzten Materialkarte quantifiziert werden. Die Größe des Effektes variiert je nach Auswahl der Ausgabegröße und der Relevanz des Bauteiles im Lastpfad. Im vorliegenden Fall wird ein Kunststoffstab mithilfe von Pyrotechnik über ein Ritzel geschoben. Es werden zwei Simulationen durchgeführt, in denen die Materialkarten für den Kunststoffstab variiert werden.

Für die höchste Ebene der Validierung liegen im Vergleich zu der Komponentenebene

und der Prüfkörperebene keine Versuchsdaten vor.

Neben der erzwungenen Wellenrotation des Kunststoffstabes wird die Welle einer Gegenkraft unterworfen durch ein angekoppeltes Gurtsystem. Dieses Gurtsystem modelliert einen Prüfaufbau der Norm „AK-LV106“. Darin sitzt ein Dummy auf einem Prüfsitz und diverse Anforderungen an ein Gurtstraffsystem werden abgeprüft.

In Abbildung 54 links ist die gemessene Ausgangsgröße verdeutlicht. Die bewertete Ausgangsgröße ist die Wellenrotation infolge des Zündens der pyrotechnischen Einheit.

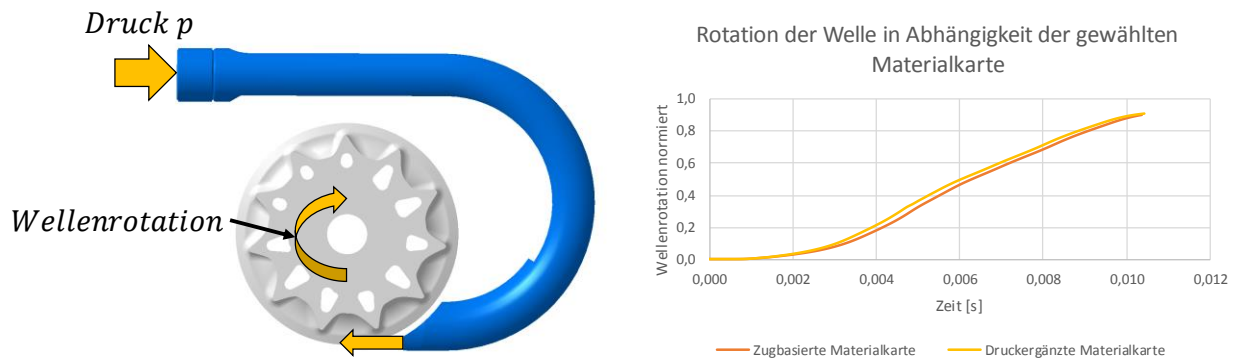


Abbildung 54 Vergleich beider Materialkarten in der Produktsimulation (Eigene Darstellung)

Im rechten Teil der Abbildung 54 ist der resultierende Graph zu sehen. Dabei ist die Wellenrotation der beiden Simulationen über der Zeit aufgetragen. Zu erkennen ist, dass die druckergänzte Materialkarte ein steiferes Anspruchsverhalten aufweist als die zugbasierte Materialkarte. Dies ist auf die steifere Fließkurve der druckergänzten Materialkarte zurückzuführen. Insgesamt unterscheiden sich die Materialkarten marginal.

6.4 Diskussion

Zur Auswahl eines geeigneten Komponentenversuches standen zwei Konzepte zur Verfügung. Als Zielgröße des Komponentenversuches galt die Verteilung der Spannungszustände in Abbildung 51 „Spannungszustände der Komponentenversuche“. Der Flachstauchversuch und die 3-Punkt-Biegung mit anschließendem Kontakt wiesen beide einen multiaxialen Spannungszustand auf. Der Spannungszustand des Flachstauchversuches ähnelte dem Spannungszustand der Zielgröße am ehesten durch die Dominanz der Druckspannungen. Dadurch und aus Fertigungsgründen wurde der Flachstauchversuch gegenüber dem 3-Punkt-Biege-Versuch präferiert.

Die anschließenden Ergebnisse des Flachstauchversuches sind sehr konsistent und die Versuche weisen kaum eine Streuung auf. In der anschließenden Simulation mit zwei verschiedenen Materialkarten und variierenden Elementgrößen wichen die Simulationsergebnisse von den Testergebnissen ab (s. Abbildung 53 „Darstellung der Simulationsergebnisse und der Vernetzungsgröße“). Je besser das Modell diskretisiert ist, desto geringer ist die Abweichung der berechneten Kurven der Simulation von den Testergebnissen in diesem Fall. Zunächst wurde die Simulation mit 1 mm Kantenlänge durchgeführt, derselben Kantenlänge der Elemente, bei welcher auch die Kalibrierung der Materialkarte stattfand. Für die Simulation mit 1 mm Kantenlänge ist die Abweichung der druckergänzten Materialkarte während der Plastifizierung geringer als die der Materialkarte, welche nur auf Zugversuchen basiert (Abbildung 53 links). Ebenso ist die Charakteristik der

druckergänzten Materialkarte während plastischer Verformungen ähnlicher als die der zugbasierten Materialkarte.

Um die Einflüsse der Elementkantenlänge zu evaluieren, wurden die Simulationen für 0.25 mm Kantenlänge erneut durchgeführt (Abbildung 53 rechts).

Die Simulationsergebnisse mit 0.25 mm Kantenlänge zeigen ein zu steifes Verhalten der druckergänzten Materialkarte während plastischer Dehnungen und eine sehr gute Übereinstimmung der zugbasierten Materialkarte mit den Versuchsergebnissen.

Visuell ist gut zu erkennen, dass für die Elementierung mit 1 mm Kantenlänge die Elemente der Probe über die Stempel herausragen. Somit wird in der Simulation eine größere Fläche als in der Realität komprimiert. Dies erklärt die verbesserte Beschreibung der beiden Materialkarten bei elastischen und plastischen Dehnungen der feinen Vernetzung.

Für die kalibrierte Elementkantenlänge von 1 mm schneidet die druckergänzte Materialkarte etwas besser ab. Für eine Elementkantenlänge von 0.25 mm kann die zugbasierte Materialkarte das Verhalten besser abbilden.

Nach dem Schema der Validierungspyramide wird die entwickelte Materialkarte in eine Produktsimulation eingepflegt. In einer Produktsimulation können die Auswirkungen im Gesamtsystem festgestellt werden, welche durch eine Veränderung des Materials induziert werden. In der Produktsimulation wird die Wellenrotation ausgegeben. Die Wellenrotation wird durch einen Kunststoffstab erzeugt, der durch Pyrotechnik über ein Ritzel gedrückt wird. Das Material des Kunststoffstabes wird für jede Simulation variiert. Das Resultat der Produktsimulation befindet sich in Abbildung 54 „Vergleich beider Materialkarten in der Produktsimulation“. Die druckergänzte Materialkarte weist in der Produktsimulation ein schnelleres Ansprechverhalten als die zugbasierte Materialkarte auf. Dies kann auf die veränderte Fließkurve zurückgeführt werden. Insgesamt ist der Einfluss auf die Wellenrotation durch die neuformulierte Materialkarte gering. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass hohe plastische Dehnungen unter Druckbelastung dort nicht auftreten. Der Spannungszustand des Produktes ist zwar druckdominant, jedoch ist in Abbildung 51 „Spannungszustände der Komponentenversuche“ zu erkennen, dass die Hauptdehnungen nicht größer als $\varepsilon = 0.21$ sind. Die Fließkurven der beiden Spannungszustände sind stark unterschiedlich, jedoch kommt bei kleinen plastischen Dehnungen dieser Effekt kaum zum Tragen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, eine bestehende Materialkarte für die numerische Simulation, welche auf Zugversuchen basiert, durch Versuchsdaten aus einem Druckversuch zu ergänzen. Die Motivation dahinter begründet sich in einer Empfehlung aus vorherigen Arbeiten (Schoof, HAW Hamburg 2017), (Stang, HAW Hamburg 2015), um das Materialverhalten eines Polyamides 6.6 numerisch besser zu beschreiben.

Zunächst musste ein geeigneter Druckversuch gefunden werden, der sich für eine Materialcharakterisierung eignet. Dieser Versuch weist während der Versuchsdurchführung idealerweise einen konstanten Spannungszustand auf. Nur dadurch kann die Fließbedingung und die Verfestigungskurve für den konkreten Spannungszustand bestimmt werden. Drei verschiedene Versuche wurden in die engere Auswahl aufgenommen und mithilfe der FEA analysiert: Der Quaderstauchversuch, der Flachstauchversuch und die Zugprobe unter Druckbelastung. Von den drei Versuchen eignet sich nur der Quaderstauchversuch für die Materialcharakterisierung, der Flachstauchversuch und die Zugprobe unter Druckbelastung wiesen keinen konstanten Spannungszustand während der Durchführung auf. Um annähernd die Umformgrade des Zugversuches von $\varphi = 0.8$ bis $\varphi = 1.2$ zu erreichen, wurde eine Probengeometrie des Quaderstauchversuches von $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ausgewählt. Diese Probengeometrie erreicht Umformgrade von $\varphi = 0.7$.

Im Anschluss an die Festlegung des Versuchsaufbaus für den Druckversuch schließen sich die Versuche an. Neben dem Versuchsaufbau wurde auch die Probenkonditionierung dokumentiert, um die Proben bei den gewünschten Feuchtigkeitszuständen zu prüfen. Nach der Vorstellung des Versuchsaufbaus sind die Versuchsergebnisse der Zug- und Druckversuche dokumentiert worden.

Der Quaderstauchversuch wurde bei Raumtemperatur und konditionierter Probenfeuchte durchgeführt. Die Ergebnisse dazu befinden sich in Kapitel 4.3. Der Quaderstauchversuch wurde nach den Versuchen mit der FEM modelliert. Eingesetzt wurde dort die Materialkarte, welche auf Zugversuchen basiert. Es wird deutlich, dass diese Materialkarte die Versuchsergebnisse nicht beschreiben kann, da eine große Abweichung zwischen Simulation und Versuch besteht.

Diese Erkenntnis führt dazu, dass die bestehende Materialkarte um eine Fließkurve für Druckspannungen ergänzt werden muss. Dadurch kann das Materialmodell die Anisotropie des Materials sowohl bei elastischen als auch bei plastischen Dehnungen adressieren.

Die Fließkurve aus den Versuchsdaten des Quaderstauchversuches wird mithilfe eines Reverse Engineering Prozesses extrahiert. Dabei wird die Beschreibung der Fließkurve im Materialmodell solange verändert, bis die Ergebnisse des Versuches mit der Simulation übereinstimmen. Nach Durchlaufen des Reverse Engineering Prozesses trifft die ergänzte Materialkarte die Versuchsergebnisse mit minimalen Abweichungen (s. Abbildung 48 „Quaderstauchversuch Vergleich beider Materialkarten und der Versuchsdaten“). Die ergänzte Materialkarte wird anschließend mithilfe der Validierungspyramide in Abbildung 20 „Vorgehensweise der Ausarbeitung zur Erstellung und Validierung einer Materialkarte“ schrittweise validiert. Dazu wird auf Komponentenebene ein geeigneter Versuch in Kapitel 6.1 „Auswahl des Komponentenversuches“ gesucht. Entsprechend den Anforderungen erwies sich der Flachstauchversuch am geeignetsten für einen Komponentenversuch. Deshalb wurden die Versuche und Simulationen mit diesem durchgeführt. Auch

hier wurden beide erstellten Materialkarten verglichen und die Ergebnisse in Abbildung 52 „Ergebnisse des Flachstauchversuches“ dargestellt. Die Materialkarten wurden auf eine Elementkantenlänge von 1 mm kalibriert, dadurch wurde zunächst die Simulation mit 1 mm Elementkantenlänge durchgeführt. Dort kann die druckergänzte Materialkarte das Verhalten besser abbilden, da der Umschlagpunkt von elastischen zu plastischen Dehnungen sowie die Verfestigung treffender beschrieben wird. Bei Verfeinerung der Vernetzung trifft die bestehende zugversuchsbasierte Materialkarte das Ergebnis des Komponentenversuches besser. Für das feine Netz kann festgehalten werden, dass beide Materialkarten das Verhalten insgesamt gut abbilden.

Die letzte Ebene der Validierungspyramide stellt die Simulation auf Produktebene dar. In dieser existieren keine Versuchsergebnisse, weshalb nur der Effekt der beiden Materialkarten auf eine Ausgangsgröße bewertet wird. Diese Ausgangsgröße ist die Wellenrotation eines Gurtbandaufrollers. Die Wellenrotation wird durch einen Kunststoffstab verursacht, welcher mithilfe von Pyrotechnik die Welle in Rotation versetzt (vgl. Abbildung 54 „Vergleich beider Materialkarten in der Produktsimulation“). Für diesen Kunststoffstab werden die Materialkarten variiert. Das Resultat ist ein schnelleres Anspruchverhalten der Welle bei der druckergänzten Materialkarte. Insgesamt ist der Einfluss durch die Variation der beiden Materialkarten gering.

Zusammenfassend ist die Ergänzung des Prozesses, um die Ergebnisse aus Druckversuchen, eine Möglichkeit, die ergriffen werden kann, wenn die Spannungszustände des Produktes eine große Dominanz in Druckspannungen aufweisen. Als geeigneter Versuchsaufbau dafür ist der Quaderstauchversuch zu nennen. Gleichzeitig sollten auch hohe plastische Dehnungen in diesem Spannungszustand auftreten. Diese hohen plastischen Dehnungen unter Druckbelastungen werden jedoch selten erreicht. Beispielsweise ist der Spannungszustand des Produktes zwar druckdominant, jedoch ist in Abbildung 51 „Spannungszustände der Komponentenversuche“ zu erkennen, dass die Hauptdehnungen nicht größer als $\varepsilon = 0.21$ sind. Die Fließkurven der beiden Spannungszustände sind stark unterschiedlich, jedoch kommt bei kleinen plastischen Dehnungen dieser Effekt kaum zum Tragen.

Es kann festgehalten werden, dass eigene Materialversuche generell sinnvoll sind. In den Versuchsreihen wurde beispielsweise der Elastizitätsmodul ebenfalls extrahiert und mit dem Datenblatt verglichen. Die eigenen Versuche wiesen durchgehend einen um 50% reduzierten Elastizitätsmodul auf. Dies ist insbesondere für die Vorhersage des elastischen Verhaltens eine bedeutende Einflussgröße. Daher ist die Durchführung von Zugversuchen zunächst am sinnvollsten, da der Versuchsaufbau, die Auswertung und die Durchführung unkomplizierter sind als bei uniaxialen Druckversuchen. Ebenfalls ist die Erreichung eines einachsigen Spannungszustandes bei Zugversuchen einfacher. Bei starker Druckbelastung wie beispielsweise in Dämpfern, Gleitlagern oder Dichtungen empfiehlt sich die Ergänzung der Materialkalibrierung um Druckversuche.

Literaturverzeichnis

- DIN EN ISO 291. 2005.** *Normalklimate für Konditionierung und Prüfung.* s.l. : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2005. DIN EN ISO 291.
- B. Yan, Y. Kuriyama, A. Uenishi, D. Cornette, M. Borsutzki and C. Wong. 2006.** Recommended Practice for Dynamic Testing for Sheet Steels - Development and Round Robin Tests. Vol. 115 Section 5 s.l. : SAE International, 2006. Bd. Vol. 115 Section 5, S. 147-157.
- Böhme, et. al. 2007.** Dynamische Kennwerte für die Crashsimulation. Freiburg : FAT, 2007.
- Cauchy. 1827.** De la pression ou tension dans un corps solide. 1827. Bd. Ex. Math. 2.
- Daiyan, H. 2011.** Experimental and Numerical Investigation of the Mechanical Response of Injection Moulded Polypropylene Materials. s.l. : Universität Oslo, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, 2011.
- Doege, Meyer-Nolkemper, Saeed. 1986.** *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe.* München : Carl Hanser Verlag, 1986. ISBN 3-446-14427-7.
- Einbock, Sebastian. 2019.** lernort-mint.de. [Online] 2019. [Zitat vom: 25. 09. 2019.] <https://www.lernort-mint.de/nawi/kunststoffe/polymerisationsgrad.html>.
- Eyerer, P. et., al. 2008.** *Polymer Engineering.* Heidelberg : Springer Verlag, 2008.
- Gränzdörffer, Dr. Andrea. 2015.** www.k-online.de. [Online] 01. 05 2015. [Zitat vom: 03. 07 2019.] https://www.k-online.de/de/News/Thema_des_Monats/Thema_des_Monats_-_Archiv/Mai_2015:_Polymerchemie_trifft_Biotechnologie_%E2%80%93_Kunststoffe_%C3%A0_la_Frutti_di_Mare/Kunststoffe_werden_unterteilt_in_Thermoplaste,_Duroplaste_und_Elastomere.
- Gross, Dietmar und Seelig, Thomas. 2007.** *Bruchmechanik.* 6.Auflage 2016. s.l. : Springer Verlag, 2007.
- Gross, et al. 2015.** Technische Mechanik 3-Kinetik. 13.Auflage s.l. : Springer, 2015.
- Hill, S.I. 2004.** Standardization of high strain rate test techniques for automotive plastic project. [Online] 2004.
- Hodgkinson, J M. 2000.** *Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites.* Cambridge : CRC Press LLC, 2000. ISBN 0-8493-0845-3.
- Höfler, Andreas. 2019.** ahoefler. [Online] 2019. [Zitat vom: 08. 07. 2019.] <https://www.ahoefler.de/maschinenbau/werkstoffkunde/chemische-grundlagen/97-elektronenpaarbindung.html>.
- Hooke, Robert. 1678.** De Potentia Restitutiva, or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies. London : s.n., 1678.
- ISO/TC, Technical Commitee. 1995.** *Kunststoffe beschleunigtes Konditionieren von Prüfkörpern.* Genf : International Organization for Standardization, 1995. ISO 1110:1995(E).
- Jarre, Stoer. 2003.** Optimierung. Heidelberg : Springer, 2003.
- Junginger, M. 2002.** Charakterisierung und Modellierung unverstärkter thermoplastischer Kunststoffe zur numerischen Simulation von Crashvorgängen. München : Universität der Bundeswehr, 2002.
- Kolling, Haufe, Feucht, Du Bois. 2005.** SAMP-1: A Semi-Analytical Model for the Simulation of Polymers. Bamberg : Dynamore, 2005.
- Lanxess, AG. 2016.** Kunststoffe.de. [Online] 2016. [Zitat vom: 22. 08. 2019.] <https://www.kunststoffe.de/produkte/uebersicht/beitrag/hochverstaerktes-pa-66-mit-60-glasfasern-zur-konstruktion-stark-belastbarer-strukturbauteile-1342672.html>.
- Liefervorschriften, Arbeitskreis. 2009.** AK-LV106. *Rückhaltesystem Gurtstraffer.* s.l. : OEM, 2009.

- 2018.** LS-DYNA® Keyword User`s Manual Volume 1-3. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2018.
- Lutterbeck, Karin. 2016.** Das Verhalten von Kunststoffen unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte und -temperatur. s.l. : RAM-Verlag, 2016.
- Meywerk, M. 2007.** CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Berlin/Heidelberg : Springer Verlag, 2007.
- Rohloff/Matek. 2007.** *Maschinenelemente-Tabellenbuch*. 14.Auflage 2018. s.l. : Viewegs, 2007. ISBN 3-834-80262.
- Rösler, Harders, Bäker. 2006.** *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. 6.Auflage 2019. Wiesbaden : Teubner Verlag, 2006. ISBN-103-8351-0008-4.
- Schoof, Dora. HAW Hamburg 2017.** Kalibrierung eines Materialmodells für die numerische Simulation eines unverstärkten thermoplastischen Kunststoffs auf der Basis von Versuchsdaten. Hamburg : Masterthesis, HAW Hamburg 2017.
- Schumacher, Axel. 2004.** Optimierung mechanischer Strukturen. Hamburg : Springer Verlag, 2004. ISBN: 3-540-21887-4.
- Stander, Nielen, Roux, Willem und Basudhar, Anirban. 2013.** LS-OPT® A Design Optimization and probabilistic analysis tool for the engineering analyst. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 2013. Bd. 5.0.
- Stang, Sebastian. HAW Hamburg 2015.** Zur Charakterisierung und Validierung des dynamischen Materialverhaltens eines unverstärkten thermoplastischen Kunststoffs für die numerische Simulation. Hamburg : Masterthesis, HAW Hamburg 2015.
- Stommel, Markus, Stojek, Marcus und Korte, Wolfgang. 2011.** FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. München : Hanser Verlag, 2011. Bd. 2.Auflage 2018.
- Suppinger, Philipp. HAW Hamburg 2018.** Simulationsbasierte Entwicklung und konstruktive Ausfertigung einer Hochgeschwindigkeits-Prüfaufnahme für Kunststoff-Zugproben. Hamburg : Bachelorthesis, HAW Hamburg 2018.
- Wissenschaft.de. 2006.** Wissenschaft.de. [Online] 21. 11. 2006. [Zitat vom: 27. 08. 2019.] <https://www.wissenschaft.de/allgemein/rissausbreitung/>.
- Xinran, Xiao. 2007.** Dynamic tensile testing of plastic materials. Michigan : Science Direct, 2007.