DLR-IB-FA-SD-2019-83

Bestimmung und Validierung einer Ersatzfunktion zur Berechnung des Bulkfaktors von trockenen, bebinderten multiaxialen Kohlenstofffaser-Gelegen

Masterarbeit

Sarah Graichen, Björn Reinhard M.Sc.

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

MH-FA-56-FB03_v1.3

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-SD-2019-83

Bestimmung und Validierung einer Ersatzfunktion zur Berechnung des Bulkfaktors von trockenen, bebinderten multiaxialen Kohlenstofffaser-Gelegen

Zugänglichkeit:

Stufe 2 DLR intern zugänglich: analog „allgemein zugänglich", allerdings ist dieser in ELIB nur für intern zugänglich abzulegen.

Stade, *Juni 2019*

Der Bericht umfasst: 80 Seiten

Abteilungsleiter:

Dr. Ing. J. Stüve

Autoren: Sarah Graichen

Betreuer: Björn Reinhard

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

MH-FA-56-FB03_v1.3

Bernburg
Dessau
Köthen

Hochschule Anhalt
Anhalt University of Applied Sciences

emw
Fachbereich
Elektrotechnik, Maschinenbau
und Wirtschaftsingenieurwesen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering (M. Eng.)

Sarah Graichen

Vorname Nachname

Maschinenbau, 2017, 4054142

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

Thema:

Bestimmung und Validierung einer Ersatzfunktion zur Berechnung des Bulkfaktors von trockenen, bebinderten multiaxialen Kohlenstofffaser-Gelegen

Prof. Dr. R. Kärmer

Vorsitzende/r der Masterprüfungskommission

Prof. Dr. R. Kärmer

1. Prüfer/in

Prof. Dr. H.-H. Hiekel

2. Prüfer/in

02.05.2019

Abgabe am

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Stade, 05.08.2019

Ort, Datum

Unterschrift des Studierenden

Sperrvermerk

Sperrvermerk: ja [X] nein [ ]

wenn ja: Die vorliegende Masterarbeit enthält vertrauliche Informationen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., die der Geheimhaltung unterliegen. Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen der Masterarbeit – auch nur auszugsweise – sind ohne ausdrückliche Genehmigung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. nicht gestattet. Die Masterarbeit ist nur den Mitarbeitern des betreuenden Lehrstuhls sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen. Alle Rechte zum Erwerb und zur Anmeldung gewerblicher Schutzrechte, insbesondere zur Anmeldung von Patenten, Gebrauchsmustern und/oder Geschmacksmustern sind dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. vorbehalten.

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
Zentrum für Leichtbau-
produktionstechnologie
Ottenbecker Damm 12
21684 Stade

Stade, 05.08.2019

Ort, Datum

Stempel und Unterschrift des Unternehmens

Angaben zum Unternehmen

Logo des Unternehmens	
Name des Unternehmens	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Abteilung	Verbundprozesstechnologien
Name des Betreuers	Björn Reinhard

Kontaktdaten

Anschrift des Standortes, an dem die Arbeit verfasst wurde	DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Ottenbecker Damm 12 21684 Stade
E-Mail-Adresse des Betreuers	bjoern.reinhard@dlr.de

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Vorgehensweise zur Bestimmung und Validierung einer Ersatzfunktion für die Berechnung des Bulkfakors von trockenen, bebinderten, multiaxialen Kohlenstofffaser-Gelegen beschrieben. Dabei wird zunächst auf die Erkenntnisse vorangegangener Arbeiten eingegangen und eine Datenbankanalyse durchgeführt. Des Weiteren wird analysiert, wie viele Parameterkombinationen und welche für die Erstellung einer aussagekräftigen Ersatzfunktion notwendig sind, um den Versuchsaufwand so gering wie möglich zu halten. Abschließend wird anhand von praktischen Versuchen der Einfluss unterschiedlicher Prozessabläufe bei der Konsolidierung auf die resultierende Dicke untersucht.

Abstract

This master's thesis describes a procedure for the determination and validation of a substitute function for calculation of the bulk factor of dry, bindered, multiaxial carbon fibre fabrics. Initially, the results of previous work is discussed and a database analysis is performed. Furthermore, after analyzation of the number of parameter combinations, their respective necessity for the creation of a meaningful substitute function is assessed in order to keep test efforts as low as possible. Finally, the influence of different processes during consolidation on the resulting thickness is investigated by means of practical tests

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation und Zielsetzung 1

1.1 Einleitung in die Thematik 1

1.2 Zielsetzung der Arbeit 2

2 Stand von Wissenschaft und Technik 3

2.1 Faserkunststoffverbunde 3
2.1.1 Faserarten 3
2.1.2 Faserhalbzeuge 4
2.1.3 Matrixwerkstoffe 5

2.2 Resin Transfer Molding (RTM) 6
2.2.1 Verfahrensablauf 6
2.2.2 Anwendungsfelder 7

2.3 Kompaktierung und Relaxation von Kohlenstofffaserpreformen 8
2.3.1 Literaturrecherche 8
2.3.2 Versuchsablauf 9
2.3.3 Versuchsmaterialien 14
2.3.4 Erkenntnisse aus vorhergehenden Arbeiten 16

3 Ersatzfunktionen 18

3.1 Analyse der Kompaktierungsdatenbank 18
3.1.1 Untersuchende Versuchsparameter 18
3.1.2 Versuchsmatrix 19
3.1.3 Gegenüberstellung der Versuchsparameter zum Bulkfaktor BF_{24h_w} 20

3.2 Aufstellung der Ersatzfunktionen 25
3.2.1 Ersatzfunktionsaufstellung mit Optimus und Matlab 25
3.2.2 Berechnung des Bulkfaktors BF_{24h_w} auf Basis der Ersatzfunktionen 28
3.2.3 Versuchsmatrix für die Überprüfung der Ersatzfunktionen 30
3.2.4 Überprüfung der Materialien 31
3.2.5 Überprüfung der Gegenüberstellung der Versuchsparameter zum BF_{24h_w} 32
3.2.6 Überprüfung der Genauigkeit der Ersatzfunktionen 36
3.2.7 Zwischenfazit 40

3.3 Identifikation des minimalsten Versuchsaufwandes 41
3.3.1 Überprüfung der Genauigkeit der Ersatzfunktionen 43
3.3.2 Auswertung und Folgerung 45

3.4 Veränderung des Versuchsablaufes 46
3.4.1 Varianten 46
3.4.2 Auswertung 48

4 Zusammenfassung und Ausblick 50

Anhang i
A. Gängigste Filamentanzahlen i
B. Versuchsmatrix TOHO1 ii
C. Versuchsmatrix TOHO2 iii
D. Versuchsmatrix SAE3 iv
E. TOHO1 Gegenüberstellung (tabellarisch) v
F. TOHO2 Gegenüberstellung (tabellarisch) v
G. SAE3 Gegenüberstellung (tabellarisch) vi
H. Nummern der Parameterkombinationen vi
I. Arithmetischer Mittelwert und die Standardabweichung der Kombinationen Kombi 1, Kombi 2 und Kombi 3 vii

Symbol- und Indexverzeichnis viii

Abkürzungsverzeichnis **x**
Abbildungsverzeichnis **xi**
Tabellenverzeichnis **xiii**
Literaturverzeichnis **xiv**
Lebenslauf xvii

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Einleitung in die Thematik

Die auf der Erde vorhandenen natürlichen Ressourcen, wie fossile und anorganische Rohstoffe, sind nur begrenzt. Um dem steigenden Bedarf nach Energie und Rohstoffen dennoch langfristig gerecht zu werden ohne dabei die Ressourcen zu verschwenden und die eigene Lebensgrundlage zu zerstören, sind ein ressourcenschonender Umgang mit den zur Verfügung stehenden Energieträgern und Rohstoffen künftig unverzichtbar. Gleichzeitig ist die Suche nach Alternativen aus erneuerbaren Energien und nachwachsenden Rohstoffen als Ausgangsbasis für neue Werkstoffe in allen Wirtschaftsbereichen notwendig. [Che11]

Doch warum wird der Leichtbau zu diesem Problem immer mehr als Schlüsseltechnologie betrachtet. Mit Hilfe des Leichtbaus ist es möglich die Herausforderungen an Energie- und Materialeffizienz zu meistern. Gleichzeitig können dadurch die Leistungsfähigkeit sowie die Produktivität von Maschinen und Anlagen erhöht werden. Wichtige Merkmale dabei sind die hohe Stabilität bei geringem Materialeinsatz. Somit ist es machbar, zugleich leichte, stabile und sichere Bauteile zu fertigen. [IPA19]

Dabei liegt das Augenmerk nicht allein auf der Gewichtsreduzierung, sondern auch auf der Schonung von Material und Ressourcen und der Gesamtoptimierung in technologischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Aufgrund des großen Energieeinsparpotenzials, was in der Luft- und Raumfahrt, als auch in der Automobilindustrie gefordert wird, kann durch ein leichteres Fahrzeug der Energieverbrauch während der Nutzungsphase gesenkt sowie der CO_2-Ausstoß verringert werden. Das ermöglicht die Sicherung der Zukunft der nächsten Generationen. [IPA19]

Bei allen Vorteilen, die der Leichtbau mit sich bringt, stellt sich die Frage, wie eine Gewichtsreduzierung von Bauteilen in der Praxis umgesetzt werden kann. Dafür sind verschiedene Lösungsansätze möglich. Eine davon ist die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen. Faserkunststoffverbunde besitzen hervorragende Eigenschaften. Dazu zählen unter anderem eine geringe Dichte, eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Bruchdehnung. Ein weiterer Vorteil ist die Herstellung von maßgeschneiderten Bauteilen, die sowohl äußeren Belastungen standhalten, als auch ein geringeres Gewicht besitzen. Doch überwiegend werden Bauteile mit einem gewissen Übermaß gefertigt und anschließend noch nachbearbeitet (z.B. gefräst). Dies hat zur Folge, dass der Arbeitsaufwand und der Werkzeugverschleiß steigen. Durch den Nachbearbeitungsschritt entsteht eine noch schwerwiegendere Folge. Aufgrund der bedingten Durchtrennung von Fasermaterial und Harzmatrix entstehen im Grenzbereich von Faser und Matrix Mikrorissen. [Hun18]

Mit Hilfe des Herstellungsverfahren RTM (engl. *resin transfer* moulding) ist es möglich dieses Problem zu umgehen und definierte Harzkanten unter Verwendung von präzise gefertigter Preform herzustellen. Aber die Anforderungen an die Preform werden nur unzureichend erfüllt. Grund dafür ist das Relaxationsverhalten der Faserhalbzeuge nach der Kompaktierung, welches zu einer Veränderung der Geometrie führt. Das hat wiederum zur Folge, dass durch die Abweichung der berechneten zur realen Dicke, eine automatisierte Weiterverarbeitung nicht möglich ist. Um dieses Verhalten zukünftig zu reduzieren, ist eine genaue Kenntnis über das Relaxationsverhalten sowie die einflussnehmenden Parameter unabdingbar. Dazu ist es notwendig, die Verformung zu reduzieren, eine gezielte Anpassung der Ausgangsgeometrie vorzunehmen und falls erforderlich, eine Weiterentwicklung des RTM-Verfahrens durchzuführen. [Hun18]

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) am Standort Stade hat sich dieses Problems angenommen. Dazu wurde in früheren Arbeiten ein Kompaktierungs- und ein Langzeitprüfstand konstruiert, aufgebaut und validiert.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Ersatzfunktion zur Berechnung des Bulkfaktors von trockenen, bebinderten, multiaxialen Kohlenstofffaser-Gelegen bestimmt und validiert werden. Im ersten Schritt wird eine Auswertung der bestehenden Datenbank von Kompaktierungsversuchen mit verschiedenen Materialien und Parameterkombinationen für drei ausgewählte Materialien erfolgen (TOHO1, TOHO2 und SAE3). Auf Grundlage dieser werden für diese Materialien Ersatzfunktionen ermittelt und mit Hilfe von Versuchen auf ihre Genauigkeit hin überprüft. Zusätzlich dazu wird analysiert, wie viele und welche durchgeführten Parameterkombinationen eines Materials mindestens notwendig sind, um auf Basis dieser eine Ersatzfunktion aufstellen zu können und gleichzeitig eine plausible Aussage zu erhalten. Abschließend soll noch geprüft werden, ob eine Veränderung des Versuchsablaufes zu besseren Versuchsergebnissen führt als mit dem bisher gefahrenen Versuchsablauf.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Faserkunststoffverbunde

Bei den Faserkunststoffverbunden (FKV) oder auch faserverstärkten Kunststoffen handelt es sich um eine Untergruppe der Verbundwerkstoffe, bei denen die positiven Eigenschaften von mindestens zwei oder mehreren Werkstoffen miteinander kombiniert werden. Diese moderne Werkstoffklasse behauptet sich in den unterschiedlichen Anwendungsgebieten aufgrund der Herstellung maßgeschneiderter Bauteile, durch die Variation von Faserart und -anordnung je nach vorliegendem Lastfall. Dabei können sowohl große Bauteile, wie zum Beispiel Boote oder Windkraftflügel, bis hin zu Kleinteilen für die Fahrzeug- und Elektroindustrie realisiert werden. [AVK14]

FKV können aus unterschiedlichen Faserarten mit verschiedenen polymeren Matrixsystemen hergestellt werden. Die in der Matrix eingebetteten Fasern (Verstärkungskomponente) besitzen eine hohe Steifigkeit und Festigkeit, welche die Aufgaben besitzen, den Kunststoff zu verstärken und die einwirkende Last zu übertragen [NMB14]. Zusätzlich weisen diese noch eine niedrige Dichte auf. Auf dieser Grundlage wird der Kunststoff auf ein höheres mechanisches Leistungsniveau angehoben [AVK14]. Zu den gängigsten Verstärkungsfasern gehören Glas-, Kohlenstoff-, Aramid- und Naturfasern.

Mit Hilfe der Matrix werden die Fasern vor Umgebungseinflüssen, wie zum Beispiel Staub, Hitze und Beschädigungen geschützt und in der jeweiligen Position fixiert. Der unverstärkte Kunststoff allein ist entweder zu spröde (duroplastische Reaktionsharze) oder zu flexibel (Thermoplasten). Erst durch die Kombination von Faser und Kunststoffmatrix und die feste Anbindung zwischen diesen Komponenten entsteht ein hochbelastbares Bauteil [AVK14]. Die Grenzfläche zwischen der Kunststoffmatrix und den Verstärkungsfasern wird als Interphase bezeichnet. Diese ist zum einem verantwortlich für die Lasteinleitung von der Matrix zu den Fasern und zum anderen hat sie eine große Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften sowie für das Langezeitverhalten von FKV. [NMB14]

2.1.1 Faserarten

Wie bereits im Abschnitt erwähnt, gibt es vier gängige Verstärkungsfasern. Dazu zählen die Glasfasern (GF), die Kohlenstofffasern (CF), die Aramidfasern und die Naturfasern. Da bei den Untersuchungen ausschließlich Versuche mit Gelegen aus CF gemacht wurden, wird im Folgenden nur auf diese näher eingegangen.

Die CF können aus zwei verschiedenen kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien (Precursoren) hergestellt werden. Zum einem aus Pech und zum anderen aus dem thermoplastischen Polyacrylnitril (PAN). Der am häufigsten verwendete Precursor für die CF Herstellung ist PAN. Daher wird im Folgenden nur auf den Herstellungsprozess mit PAN näher eingegangen. Wie in der Abbildung 2.1 zu sehen ist, besteht die Prozesskette aus drei Verarbeitungsstufen und einer anschließenden Oberflächenbearbeitung. [AVK10]

In der ersten Verarbeitungsstufe, der sogenannten Stabilisierung, werden die PAN-Precursorfäden durch einen Oxidationsprozess bei einer Temperatur zwischen 200-300 °C thermisch stabilisiert. Eine Oxidation ist eine chemische Reaktion, bei der ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung eine Bindung mit Sauerstoff eingeht. Durch diesen Schritt werden die Fasern unschmelzbar. Bei der Carbonisierung (Stufe 2) findet in einem Temperaturbereich von 1200 bis 2200 °C die Umwandlung von organischen Substanzen in Kohle oder kohlehaltige Feststoffe durch Pyrolyse statt. Die Pyrolyse ist eine Zersetzung von chemischen Verbindungen mit Hilfe einer sehr

großen Wärmeeinwirkung. Während dieser Verarbeitungsstufe wird der Kohlenstoffgehalt von 60 % auf 90 % gesteigert. In der letzten Verarbeitungsstufe, der sogenannten Graphitisierung, wird der Orientierungsgrad der während der Carbonisierung entstandenen Graphitschichten erhöht. Dieser Prozess findet bei Temperaturen zwischen 2400 – 3000 °C unter Schutzgas, wie Argon, statt. Die hergestellten CF sind nach den drei Verarbeitungsstufen sehr spröde und biegeempfindlich. Daher werden für eine leichtere Weiterverarbeitung ein Haftvermittler und ein Schutz auf die Fasern aufgetragen. [AVK10]

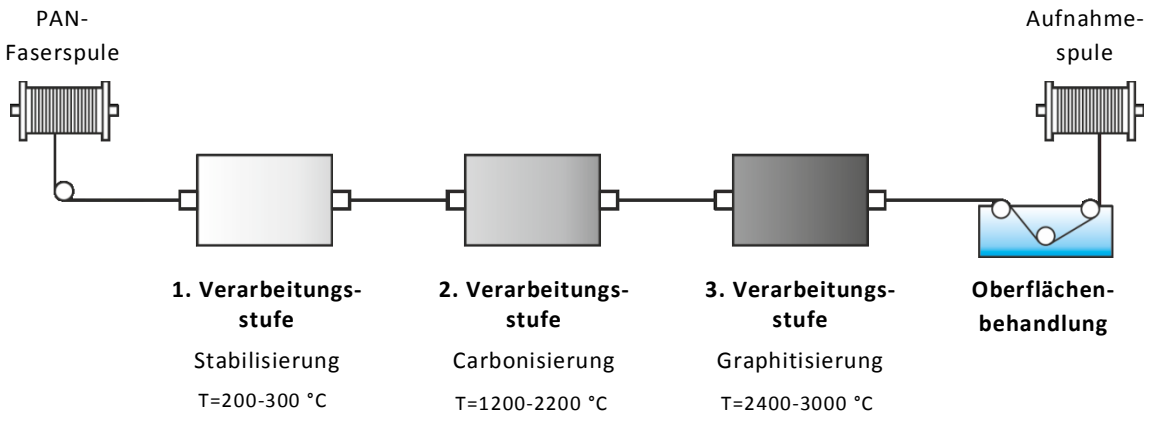


Abbildung 2.1: Herstellung von Kohlenstoff-Fasern aus PAN

Kohlenstofffasern (CF) bieten eine Vielzahl an positiven Eigenschaften. Dazu zählen ein relativ niedriges spezifisches Gewicht und eine hohe Festigkeit und Steifigkeit. Sie sind elektrisch leitend, thermisch stabil (negativer Wärmeausdehnungskoeffizient), unschmelzbar, biokompatibel und für Röntgenstrahlen durchlässig. Des Weiteren sind sie weitgehend chemisch inert. [AVK10] Das bedeutet, dass die Fasern sich an bestimmten chemischen Vorgängen nicht oder nur in einem geringen Maß beteiligen [Dud2]. Das breite Eigenschaftsspektrum bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Dazu gehören die Luft- und Raumfahrt, die Automobilindustrie, die Energieindustrie (Windkraftanlagen), die Medizintechnik (Röntgentische, Prothesen), der Freizeitbereich (Sportgeräte) sowie Musikinstrumente (Streichinstrumente). Jedoch ist das Potenzial noch lange nicht komplett ausgeschöpft. CF sind für viele technische Herausforderungen eine Lösung. [AVK10] Dazu sind zählen die CFK-Strukturen in Verkehrsflugzeugen, wie zum Beispiel des Airbus A380, der Boeing 787 und deren Nachfolgern, die Windkraftanlagen, Wasserstoff-Druckbehälter sowie die Verringerung des Treibstoffverbrauches von Pkws mithilfe der Reduzierung des Gewichtes [RG19].

2.1.2 Faserhalbzeuge

Bei Faserhalbzeugen handelt es sich um Flächengebilde oder dreidimensionale Strukturen, die aus Rovings hergestellt werden. Nach [AVK10] ist ein Roving ein Bündel, das aus mehreren Endlosfilamenten zusammengefügt ist und meist einen elliptischen Querschnitt besitzt. Solch ein Roving kann über die Anzahl an Filamenten je Garnquerschnitt und die Fadenfeinheit klassifiziert werden. Definiert wird die Feinheit durch das Verhältnis von Masse zur Länge. Dabei entspricht ein 1000 m langer Roving mit einem Gewicht von 1 g einem tex (1 tex = 1 g/1000 m). Die Angabe der Filamentanzahl erfolgt jeweils in vollen 1000 Filamenten (1 K). [AVK10] Im Anhang A sind dazu die gängigsten Filamentanzahlen aufgelistet. Die bisher gebräuchlichsten Faserhalbzeuge sind die Geflechte, Gewebe und Gelege. Im Folgenden wird jedoch ausschließlich auf die Gelege näher eingegangen.

Die höchsten mechanischen Eigenschaften unter den Faserhalbzeugen bieten die endlos unidirektionalen (isotrop) eingebrachten Fasern. Dazu zählen die Gelege, welche als textile Strukturen definiert sind (EN 13473-1) und aus einer oder mehreren parallelen Lagen von gestreckten Fäden aufgebaut sein können. Dabei ist es möglich, die einzelnen Lagen verschieden zu orientieren (siehe Abbildung 2.2). Des Weiteren ist eine Integration von Faservliesen, Beschichtungen, Schäumen und anderen Materialien machbar. [AVK10]

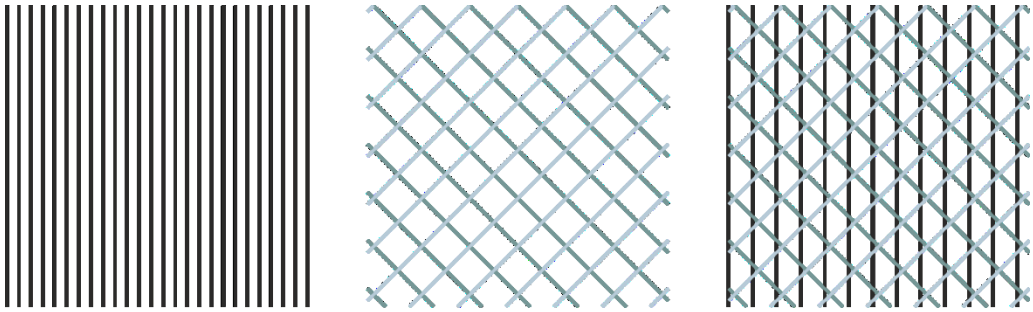


Abbildung 2.2: UD-Gelege (0°), biaxial Gelege (±45°), triaxial Gelege (±45°/0°) (von li nach re)

Mit Hilfe von Maschinen- oder chemischen Bindungssystemen werden die einzelnen Lagen miteinander fixiert. Dadurch liegen die Verstärkungsfasern weitgehend gestreckt vor. Eine Auslenkung dieser erfolgt lediglich von den Nähfäden. [AVK10]

Die Fixierung der Verstärkungsfasern erfolgt über unterschiedliche Nähtechnologien. Dazu gehören die Fransen-, Trikot-, Satin-, Tuch- und Samt-Bindung, sowie die Kombinationen aus den einzelnen Bindungen. Im Folgendem wird ausschließlich auf die Fransen- und Trikotbindung näher eingegangen. Die Fransenbindung ist die einfachste aller Bindungsvarianten, bei der jede Längsnahtreihe aus einem Faden besteht. Im Gegensatz dazu bestehen die Längsnahtreihen der Trikotbindung aus zwei Fäden. In Abbildung 2.3 sind die beiden Bindungsarten abgebildet. [ALU19] [Che11]

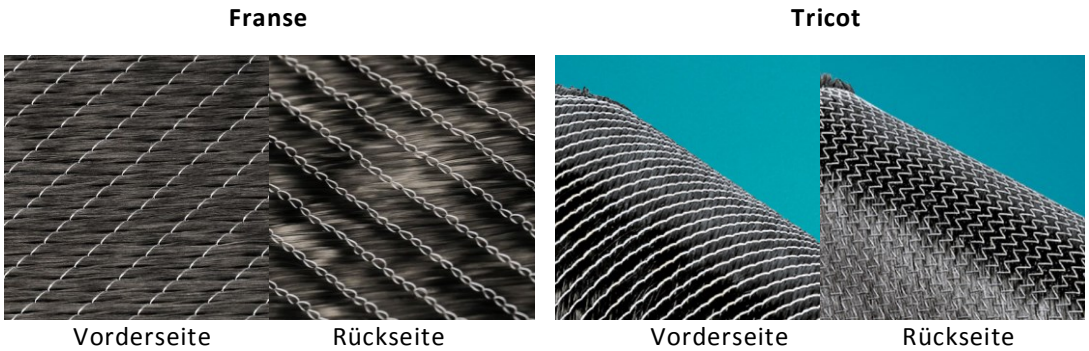


Abbildung 2.3: Fransenbindung (links) [ECC19] und Trikotbindung (rechts) [SGL19]

2.1.3 Matrixwerkstoffe

Aufgrund der besonders großen Typenvielfalt unter den Kunststoffen sind diese als Matrizen bei den FKV nicht mehr wegzudenken. Im Allgemeinen handelt es sich bei den Kunststoffen um organische hochmolekulare Werkstoffe, welche überwiegend synthetisch hergestellt werden. Kunststoffe sind langkettige Polymere, die aus aneinander geknüpften Monomeren (Grundbausteinen) bestehen. Die Verknüpfung der Monomere kann auf verschiedene Art und Weise

stattfinden. Hierbei wird zwischen drei Reaktionsmechanismen unterschieden: der Polymerisation, der Polykondensation und der Polyaddition. [BK95]

Zu den gängigsten Matrixwerkstoffen zählen die Thermo- und die Duroplaste. Im weiteren Verlauf wird jedoch lediglich näher auf die Duroplaste eingegangen. Duroplaste (oft auch als Duromere bezeichnet) sind synthetische Harze, die aus mindestens zwei Komponenten (Harz und Härter) hergestellt werden. Durch das Vermengen von Harz und Härter nach bestimmten Mischungsverhältnissen entsteht eine reaktionsfähige Harzmasse, die nach der Verarbeitung ausgehärtet wird. Während der Härtung steigt die Viskosität des Duroplasts an. Mit Beendigung des Härteprozesses entsteht ein nicht mehr verformbarer Duroplast. Da die Glastemperatur meist oberhalb der Zersetzungstemperatur liegt, ist ein Wiedererweichen des Matrixsystems nicht möglich [Bon14]. Aus diesem Grund sind die Duroplaste nicht recycelbar. Neben diesen Aspekt, besitzen sie auch eine Vielzahl von positiven Eigenschaften. Dazu gehört die gute thermische Wärmebeständigkeit, die hohe Steife und Zugbeständigkeit, das sehr geringe Kriechverhalten, die gute Witterungsbeständigkeit sowie das nicht Aufquellen in Wasser. Zu den typischen Vertretern der Duromere gehören die Polyesterharze (UP-Harze) und die Phenolharze (PF-Harze), sowie die Epoxidharze (EP-Harze). [Bon14]

2.2 Resin Transfer Molding (RTM)

Beim Resin Transfer Molding (RTM) (deuts. Harzinjektionsverfahren) handelt es sich um ein Injektionsverfahren, welches für die Herstellung von lang- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen verwendet wird. Dabei werden trockene Faserhalbzeuge über ein im Werkzeug anliegendes Druckgefälle imprägniert. Das Verfahren wird hauptsächlich für die Herstellung flächiger Bauteile eingesetzt. Das RTM-Verfahren besitzt ein großes Potenzial, um für verschiedene Problemstellungen bzw. Anforderungen maßgenaue Bauteillösungen mit komplexen Geometrien zu realisieren, wodurch die anschließende Nachbearbeitung des Bauteils reduziert wird oder auch ganz entfällt. [AVK14]

Ein weiterer Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass am Ende der Fertigung das Bauteil beidseitig eine glatte Oberfläche besitzt und somit weitere Bearbeitungsschritte zur Schaffung einer lackierfähigeren Oberfläche entfallen können. [PRK19]

2.2.1 Verfahrensablauf

Die Herstellung eines Bauteils mittels des Harzinjektionsverfahrens ist in mehrere Prozessschritte unterteilt. Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 bildet den Verfahrensablauf vom RTM ab. Begonnen wird mit dem Preforming. Dieser Produktionsschritt beschreibt die Herstellung eines Preforms oder auch Vorformling genannt. Das Ausgangsmaterial sind biegeschlaffe, textile Verstärkungsfaserzuschnitte, die anschließend je nach Faserorientierung in das Formwerkzeug drapiert werden (1), um somit die mechanischen Eigenschaften, wie Steifigkeit, Festigkeit und den Faservolumengehalt des resultierenden Bauteils einzustellen. Durch den aufgebrachten Kompaktierungsdruck und das Einwirken von Wärme entsteht aus dem Lagenaufbau ein eigenstabiler, endkonturnaher Vorformling mit definierter Faserorientierung (2). Aufgrund des vorgelagerten Produktionsschrittes reduziert sich die Werkzeugbelegungszeit des Infiltrationswerkzeuges. [Nez15]

Im nächsten Schritt wird das zweiteilige Werkzeug von möglichen Harzrückständen gereinigt und die Kavität eingetrennt. Anschließend wird der Preform in das Werkzeug eingelegt (4), das Werkzeug geschlossen und mit dem reaktiven Harzsystem infiltriert (5). Die Infiltration über den Anguss erfolgt volumen- oder druckkonstant. Zu diesem Zeitpunkt kommt das Verstärkungsmaterial zum ersten Mal mit dem Matrixwerkstoff (Harz) in Kontakt [Bon14].

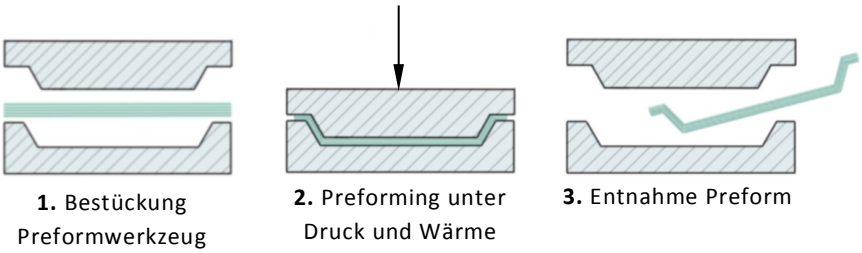


Abbildung 2.4: Herstellung einer Preform

Das Harz durchströmt die Faserlagen und tritt nach dessen Durchtränkung an den Entlüftungen (Steigern) wieder aus. Ist die Kavität vollständig gefüllt, kann eine anschließende Spülphase erfolgen. Mit Hilfe dieser Spülphase wird zusätzliches Harz durch die Kavität gefördert und somit noch mögliche trockene Bereiche der Preform imprägniert und vorhandene Poren innerhalb des Laminates herausgespült. Wenn keine Luftblasen aus den Steigern mehr austreten, werden die Entlüftungen verschlossen und falls nötig zusätzlich noch Nachdruck angelegt. Dieser wird über das außerhalb des Werkzeugs befindliche Harzreservoir angelegt und bis zur vollständigen Aushärtung des Harzes in der Kavität gehalten. Die Aushärtung des Bauteils erfolgt meistens unter erhöhten Temperaturen (6). Im letzten Schritt erfolgt nach der Aushärtung des Bauteils die Entnahme dessen aus dem Werkzeug (7). [AVK14]

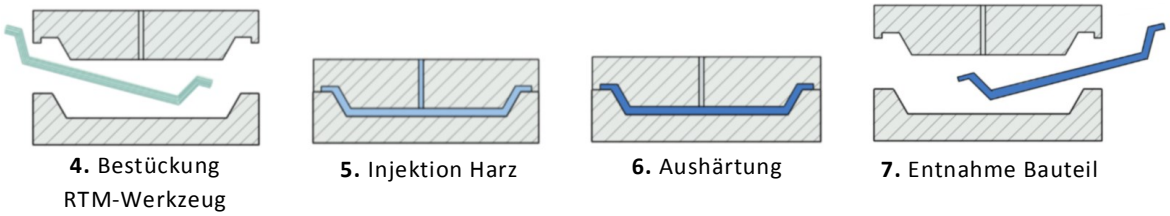


Abbildung 2.5: Injektion einer Preform mit dem Matrixwerkstoffs

2.2.2 Anwendungsfelder

Anhand seiner Vorteile ist die Realisierung eines besonders breiten Bauteilspektrums möglich, wodurch es in vielen Industriezweigen seine Anwendung findet (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Industriezweige und Anwendungsbeispiele

Industriezweig	Anwendungsbeispiel/-e
Fahrzeugbau	Front/End ICE, Automobil Seitenteil (Smart), Frontverkleidung, U-Bahn Wien, Aufstelldach für Viano Wohnmobil
Windenergieanlagen	Rotorblatt Windenergieanlagen
Boots-/ Schiffbau	Rumpf Segelyacht
Maschinenbau	Leichte Robotergreifer
Bauindustrie	Auffangbecken für wassergefährdende Stoffe
Luft- und Raumfahrt	Längskraftbeschläge der Seitenleitwerke bei Airbus
Sport- und Freizeitindustrie	Fahrrad, Surf- und Snowboards

Dieses Spektrum erstreckt sich von Strukturbauteilen für die Luft- und Raumfahrt, wie zum Beispiel die Längskraftbeschläge der Seitenleitwerke bei Airbus, über den Sport- und Freizeitbereich (Fahrrad, Surf- und Snowboards), bis hin zu Verkleidungsbauteilen im Automobilbau (Heckspoiler (Pkw); Fronthauben, Hochdächer (Nutzfahrzeuge)). [AVK14]

2.3 Kompaktierung und Relaxation von Kohlenstofffaserpreformen

Um nach der Kompaktierung von Halbzeuglagen eine dauerhafte Verbindung zu gewährleisten, ist auf den Halbzeuglagen ein duroplastischer oder thermoplastischer Binder ein- bzw. beidseitig aufgebracht. Dieser kann entweder pulverförmig, flüssig oder vliesartig appliziert werden. Für die Herstellung einer Verbindung muss der Binder durch eine bestimmte Temperatur und einer gewissen Haltezeit aktiviert werden. Erst dann ist dieser flüssig und klebefähig. Durch eine abschließende Abkühlung wird eine dauerhafte Verbindung zwischen den Lagen hergestellt, so dass eine Schubverschiebung nahezu unmöglich ist. Mit der Beendigung der Kompaktierung entfallen die formgebenden Zwangsbedingungen, wodurch der Lagenstapel sich entspannen kann und es zu einer elastischen Verformung kommt. Der Lagenstapel dehnt sich senkrecht zur Stapelung aus (siehe Abbildung 2.6). Dieses Verhalten wird als Relaxation bezeichnet. [Hun18]

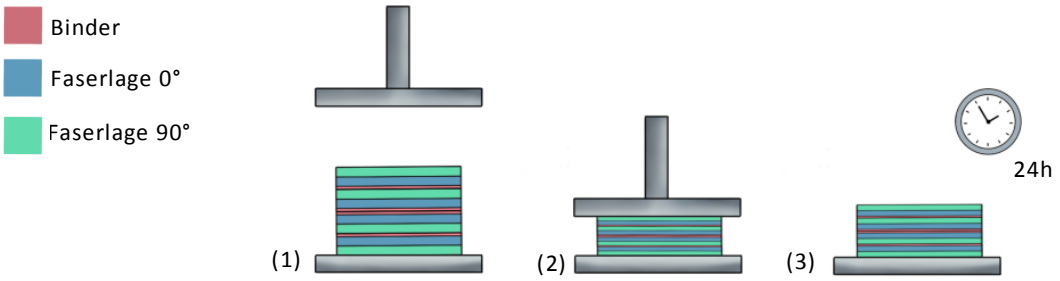


Abbildung 2.6: Preform unkompaktiert (1), kompaktiert (2), relaxiert (3) (von li nach re)

2.3.1 Literaturrecherche

In diesem Abschnitt wird auf die Erkenntnisse von anderen Arbeiten eingegangen.

In den Papern wird unter der Relaxation von den Materialien die Reorganisation von Fasern unter dem Einwirken von Druck verstanden und dem Spannungsabbau innerhalb des komprimierten Fasermaterials. Doch in Bezug auf diese Arbeit wird unter Relaxation die Dickenänderung nach der Kompaktierung verstanden.

In [KMF91] werden Ergebnisse einer experimentellen und analytischen Untersuchung der Reaktion von verschiedenen trockenen Verstärkungsmaterialien vorgestellt, die Druckkräfte ausgesetzt wurden, welche senkrecht auf die Hauptebene wirken. Es wurden Experimente durchgeführt, indem eine Kraft auf verschiedene Materialien mit zwei unterschiedlichen Faserorientierungen aufgebracht wurde. Die experimentellen Ergebnisse wurden mit analytischen Vorhersagen verglichen. Zusätzlich wurde die Relaxation von Preformen mit Hilfe eines viskoelastischem Modell von Maxwell-Wiechert beschrieben. Wie stark dabei die Entspannung der Fasern ausfällt ist von der Faserorientierung abhängig.

Eine theoretische Studie über die elastische Verformung bei der Verdichtung von gewebten Preformen wird in [CC99] vorgestellt. Die Analyse konzentriert sich auf die Einheitszelle einer

orthogonalen, einfach gewebten Preform. Unter Anwendung bestimmter Annahmen wurde ein 3D-Modell der Einheitszelle zur Vorhersage des Druckverhaltens von Rovingen verwendet. Auf Grundlage dieses Modells und der Strahlentheorie in der Materialmechanik wurden analytische Ausdrücke für die Beziehung zwischen den Faservolumenanteil, der aufgebrachten Druckkraft und der Preformdickenreduzierung ermittelt. Eine Vorhersage zu dem maximal möglichen Faservolumenanteils wird ebenfalls gemacht.

In dem Paper [CC00] werden die analytischen Ergebnisse für die Verschachtelung und die elastische Verformung bei der Verdichtung von mehrschichtigen Gewebepreformen vorgestellt. Ein 3D-Modell der Einheitszelle für mehrlagige Gewebe wurde mit bestimmten Annahmen vorgeschlagen und zur Vorhersage des Druckverhaltens von Rovingen verwendet. Wie schon bereits bei [CC99] wurden auf der Grundlage dieses Modells und der Strahlentheorie der Materialmechanik analytische Ausdrücke für die Beziehung zwischen dem Faservolumenanteil, der aufgebrachten Druckkraft und der Preformdickenreduzierung für nicht verschachtelte und maximal verschachtelte Fälle ermittelt. Für die allgemeinen Schachtelungsfälle wird eine empirische Beziehung zwischen der Druckkraft und der Dickenreduzierung vorgeschlagen.

Das Paper [CCC01] stellt ein konzeptionelles Modell vor, dass den gesamten nichtlinearen Verdichtungsprozess von Gewebepreformen, basierend auf der Mikromechanik poröser Materialien, vorherzusagen. Fünf Parameter werden verwendet, um das Modell zu definieren – der anfängliche Faservolumenanteil, der endgültige (maximal erreichbare) Faservolumenanteil, die Faserkomprimierbarkeit, die anfängliche Volumenkomprimierbarkeit und ein empirischer Exponent für das Potenzgesetzt.

Das Kompressions- und Relaxationsverhalten von verschiedenen Faserpreformen wurde experimentell durch Kompressions-, Relaxations- und Dekompressionsverfahren in [LHKYS10] untersucht. Ein einfaches Maxwell-Modell wurde verwendet um das nichtlineare Kompressions- und Relaxationsverhalten vorherzusagen. Ebenfalls wurde eine numerische Simulation für eine Elementarzelle der Faserpreformen unter der Verwendung der Finite Element Methodik, kurz FEM, durchgeführt.

2.3.2 Versuchsablauf

Um das Relaxationsverhalten von Kohlenstofffaserpreformen analysieren zu können, wurden in vorhergehenden Arbeiten zwei Prüfstände konzipiert, aufgebaut und validiert. Der erste Prüfstand dient zur Durchführung und gleichzeitigen Aufzeichnung der einzelnen Prozessparameter zu jedem Prozessschritt, wie z.B. der Preformdicke, der Kraft als auch der Temperatur der oberen und unteren Heizplatte. Mit Hilfe des zweiten Prüfstandes wird für 24 Stunden die Relaxation, die nach der Kompaktierung bei den Preformen auftritt, aufgezeichnet. In der Abbildung 2.7 wurden durch die Verwendung eines Flussdiagrammes die Schritte des Versuchsablaufes der Kompaktierung mit den anschließenden Nachbearbeitungsschritten grafisch dargestellt.

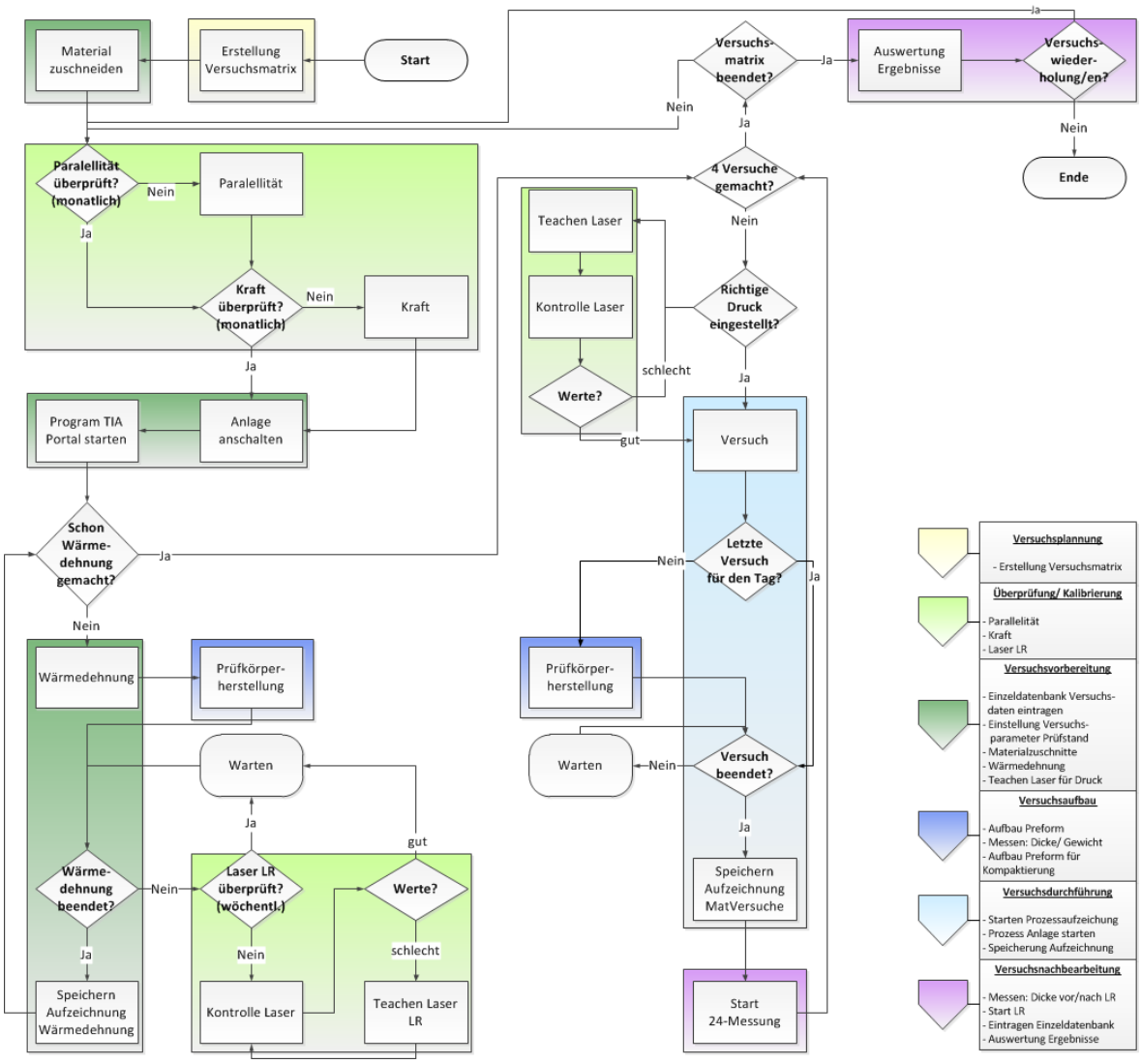


Abbildung 2.7: Versuchsablauf Kompaktierung und Relaxation

Der erste Schritt ist die Versuchsplanung. Dieser beinhaltet die Erstellung einer Versuchsmatrix auf Basis der wesentlichen Einflussparametern die einen Einfluss auf die Kompaktierung haben, welche bereits [Hun18, Mül18] ermittelt wurden. Bei den variablen Parametern handelt es sich um die Lagenanzahl, den Druck, die Temperatur, die Druck- und Temperaturhaltezeit sowie dem Material selbst.

Jede aufgestellte Parameterkombination wird, um ein Minimum an statistischer Sicherheit zu erhalten, bis zu dreimal wiederholt. Aufgrund der Tatsache, dass der Langzeitprüfstand nur vier Prüfplätze für eine 24 Stunden-Messung besitzt, können täglich maximal bis zu vier Versuche durchgeführt werden. Demzufolge ist der gesamte zeitliche Umfang jeder Versuchsmatrix schon festgelegt. Da das Materialhalbzeug auf Rollen angeliefert wird und der Prüfbereich der Anlage in seiner Größe begrenzt ist, muss im nächsten Schritt (Versuchsvorbereitung Teil 1) das Material unter der Verwendung des vordefinierten Zuschnittmusters, in die drei verschiedenen Größen an dem DLR eigenen Cutter zugeschnitten werden (siehe Tabelle 2.2). Bei einem Cutter handelt es sich um ein computergesteuerten Textilschneidetisch für das Zuschneiden von textilen und biegeschlafen Materialien. Im Anschluss erfolgt der Zuschnitt der Trennfolien, welche um zwei Millimeter größer zugeschnitten werden als die Probenzuschnitte des Halbzeuges selbst.

Wenn die Versuchsmatrix und der erste Teil der Versuchsvorbereitung erstellt sind, wird bei dem Kompaktierungsprüfstand zum einem die Parallelität der Heizplatten zueinander, als auch die Kompaktierungskraft überprüft. Diese Überprüfung muss mindestens einmal im Monat durchgeführt werden. Liegen die Ergebnisse der Überprüfung dabei im Toleranzbereich, können die nächsten Schritte der Versuchsvorbereitung (Teil 2) eingeleitet werden. Dazu gehört das Anschalten der Anlage und das Starten des Programmes *TIA Portal* von der Firma Siemens.

Tabelle 2.2: Größen Halbzeugzuschnitte

Halbzeuggröße [mm]	Druck [bar]	Flächeninhalt [mm^2]
120x70	1	8400
60x90	3	5400
55x55	5	3025

Bevor jedoch mit der Versuchsdurchführung begonnen werden kann, muss zunächst die Wärmedehnung gemacht werden. Diese erfolgt einmal täglich vor der jeweils ersten Versuchsdurchführung des Tages. Dadurch ist es möglich, zwischen den einzelnen Versuchen die Schwankungen zu reduzieren, welche aufgrund der Materialdehnung des Prüfstandes selber hervorgerufen werden.

Tabelle 2.3: Parameter für die Wärmedehnung

Parameter	Größe
Temperatur T	100°C
Druck p	• Einstellung vom zuletzt gefahrenen Versuch
Druckhaltezeit t_D	2 s
Temperaturhaltezeit t_T	900 s
Material	• 5 Alubleche, dem Druck entsprechend

Für die Wärmedehnung sind die in Tabelle 2.3 aufgelisteten Werte und fünf Aluminiumbleche, die der Größe des zuletzt gefahrenen Versuchsdruckes entsprechen, zu verwenden. Dazu werden die gestapelten Aluminiumbleche mittig in die Pressvorrichtung auf der unteren Heizplatte positioniert. Durch die gleichzeitige Betätigung des Start-Buttons des *TIA Portals* für die Aufzeichnung des Prozesses, als auch den Startknopfes des Kompaktierungsprüfstandes für den selbstständigen Durchlauf der einzelnen Phasen, wird die Wärmedehnung gestartet.

Bis zu der Beendigung der Wärmedehnung können in der Zwischenzeit die Laser vom Langzeitprüfstand mit Hilfe von Abstandsmaßen überprüft werden. Falls die ermittelten Werte nicht innerhalb des Toleranzbereiches liegen (±0,2 mm), muss eine Neueinstellung des jeweiligen Lasers erfolgen. Im Gegensatz zu der monatlichen Überprüfung der Parallelität der Heizplatten als auch der Kompaktierungskraft wird die Justierung der Laser im wöchentlichen Rhythmus durchgeführt. Um nach der Wärmedehnung einen Versuch durchführen zu können, müssen zunächst auf Basis der Versuchsmatrix die einzelnen Halbzeugzuschnitte auf einander gestapelt werden (Versuchsaufbau). Während des Aufbaus des Lagenstapels ist sicherzustellen, dass die Einzellagen von Faserresten oder anderen Verunreinigungen befreit sind, denn diese könnten sonst zu einer

Verfälschung der Ergebnisse führen. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die binderbeschichtete Seite des Halbzeugzuschnittes zur Symmetrieebene orientiert wird. Nach dem erfolgten Preformaufbau wird dieser dreimal gewogen. Für die Dickenmessung des unkompaktierten Lagenstapels wird dieser mit einer Folie auf der Unter- und Oberseite, sowie einem Aluminiumblech auf der oberen Folie unter einem Laserprüfplatz des Langzeitprüfstandes platziert und an fünf definierten Stellen gemessen. Die Werte vom Wiegen als auch von der Dickenmessung werden in einer Excel-Datenbank notiert. Abschließend werden Probentüten für jeden Versuch vorbereitet. Dazu wird das Datum der Versuchsdurchführung, als auch die Versuchsbezeichnung drauf vermerkt. Die Versuchsbezeichnung ist eine Kombination aus der laufenden Versuchsnummer, der Materialabkürzung, der Anzahl der Halbzeuglagen, des Prozessdruckes und der Prozesstemperatur (siehe Abbildung 2.8). Zum Schluss muss der Preformaufbau noch für die Kompaktierung vorbereitet werden. Dazu wird dieser jeweils mit einer Folie und einem Aluminiumblech auf der Ober- und Unterseite versehen.

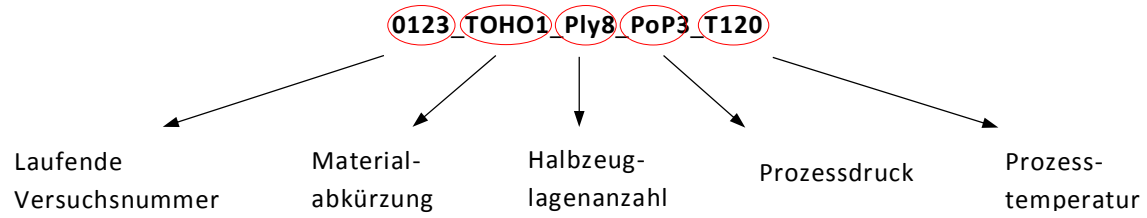


Abbildung 2.8: Abkürzung der Versuchsbezeichnung

Nach dem Abschluss des Preformaufbaus wird dieser zwischen die Heizplatten positioniert sowie die Versuchsparameter aus der Versuchsmatrix in die Prüfstandsteuerung übertragen. Im Folgenden wird ein Aufzeichnungsbutton des *TIA Portals* für die Aufzeichnung der Prozessparameter betätigt und der automatische Versuchsablauf durch die Betätigung eines Startknopfes am Kompaktierungsprüfstandes gestartet. In Abbildung 2.9 ist der Kompaktierungsprüfstand abgebildet.

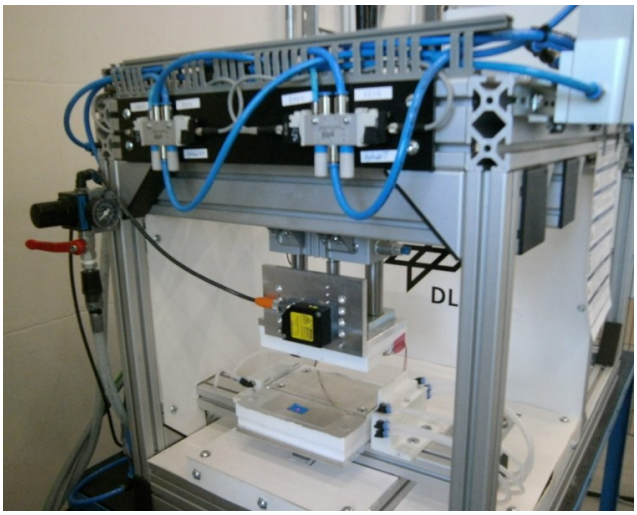
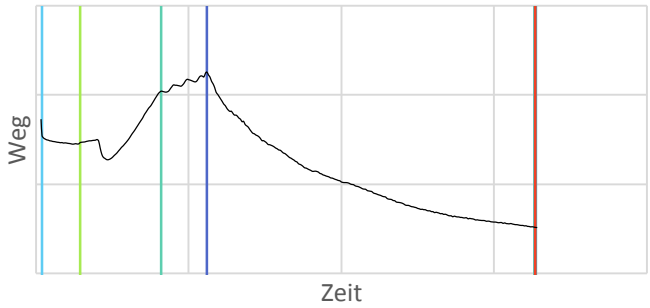


Abbildung 2.9: Kompaktierungsprüfstand

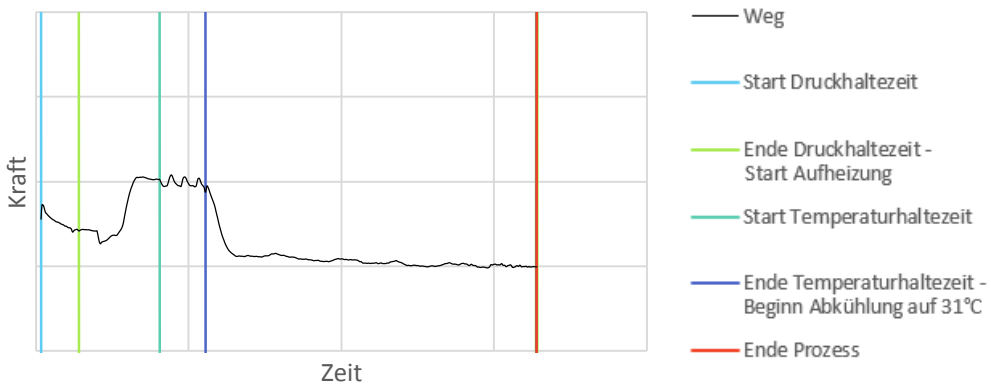
Zu Prozessbeginn wird der Lagenaufbau für die Dauer der Druckhaltezeit mit einem Druck belastet. Nach dem Ablauf der Druckhaltezeit heizen die Heizplatten von der Starttemperatur (31°C) bis zum Erreichen der eingestellten Zieltemperatur auf. In dieser Phase wird der Lagenaufbau für die festgelegte Temperaturhaltezeit unter dem gleichzeitigen Einwirken von Druck und Temperatur kompaktiert. Mit dem Ende der Temperaturhaltezeit wird die Probe auf

wieder 31°C abgekühlt werden, was über einen Luftstrom realisiert wird. Nach Erreichen dieser Temperatur wird der Prüfstand automatisch aufgefahren sowie die Aufzeichnung beendet und gespeichert. Die schematischen Verläufe von Weg, Temperatur und Kraft während des Prüfablaufes sind der Abbildung 2.10 zu entnehmen.

Weg



Kraft



Temperatur

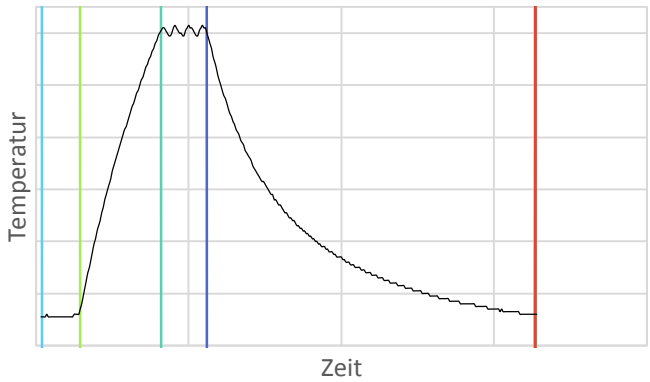


Abbildung 2.10: Phasen bei der Kompaktierung

Nach der Kompaktierung wird die Dicke des Preforms mithilfe eines Langzeitprüfplatzes aufgenommen. Die Dickenermittlung erfolgt hierbei nach demselben Schema wie vor der Kompaktierung. Anschließend wird für einen Zeitraum von 24 Stunden die Aufnahme des Dickenverlaufes des Probenkörpers durch eine Langzeitaufnahme des *LabView*-Programmes gestartet. Die Startzeit der Aufnahme wird dabei auf der Probentüte notiert. Da bis zu vier

Prüfplätze bei dem Langezeitprüfstand vorhanden sind, ist das maximale Versuchslimit pro Tag auf vier Versuche begrenzt.

Nach 24 h wird die Aufzeichnung gestoppt und die Endzeit ebenfalls auf der Probentüte notiert. Abschließend wird für die Auswertung erneut die Preformdicke an fünf definierten Messpositionen mithilfe des Lasers aufgenommen, sowie dreimal die Dicke mittels einer Bügelmesszange gemessen. Nach dem Einfügen aller Daten und Aufzeichnungen in eine Versuchsdatenbank, können diese ausgewertet und weitere Versuche basierend auf den Ergebnissen abgeleitet werden.

2.3.3 Versuchsmaterialien

Bei den verwendeten Materialien für die Bestimmung der Ersatzfunktionen handelt es sich um zwei Materialien der Firma *Toho Tenax* (TOHO1, TOHO2) und um eins der Firma *Saertex*. Alle drei Materialien sind Kohlenstofffaser-Gelege. Da die Fasern in einer gestreckten Form vorliegen, werden diese im Englischen als non-crimp fabrics, abgekürzt NCF, bezeichnet.

Tabelle 2.4: Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen TOHO1 und TOHO2

	Kenngrößen	TOHO1	TOHO2
Gemeinsamkeiten	Filamentanzahl Roving	24 K	
	Dichte Fasern [g/cm^3]	1,78	
	Fasertyp	TOHO Tenax IM565	
	Halbzeugtyp	NCF	
	Nähfaden	CoPA	
	Schlichte [%]	1,25	
	Binderseitenp	1	
	Bindertyp	Epikote Resin 05311	
	Binderaktivierungstemperatur [°C]	102	
	Binder: Preforming-Typ	Reversible	
Unterschiede	Nähart	Franse	Tricot
	FAW (nur Fasern) [g/m^2]	$537{,}1^{+18{,}8}_{-35{,}2}$	$501{,}1^{+10{,}6}_{-29{,}4}$
	Bindermasse (ohne Schlichte) [g/m^2]	$14{,}7^{+0{,}3}_{-5{,}7}$	11^{+4}_{-2}
	Gewicht Nähfaden [g/m^2]	$3{,}9^{+0{,}1}_{-0{,}9}$	$4{,}2^{+0{,}3}_{-0{,}7}$
	Summe Additive (Binder, Toughner, Nähfaden, Schlichte) [g/m^2]	41,71	37,26
	Schichten je Lagen	2	3
	Orientierung Fasern	-45°/+45°	-45°/+45°/0°

TOHO1 und TOHO2 bestehen beide aus Kohlenstofffasern mit einer Dichte von 1,78 g/cm^3, die zu einem 24 K Roving zusammengefasst wurden. Jeweils auf nur einer Seite von den einzelnen

Gelegelagen befindet sich ein Binder vom Typ Epikote Resin 05311. Für die Verbindung der Lagen zu einem Biaxial- sowie Triaxialgelege wird ein CoPA Nähfaden verwendet. Beim TOHO1 werden die Lagen mit einer Orientierung von -45°/+45° durch eine Fransenbindung verbunden. Im Gegensatz dazu sind die Lagen des TOHO2 mit einer Orientierung von -45°/+45°/0° über die Trikot-Bindung zusammengefasst. TOHO1 besitzt mit 14,7 g/m^2 Binder pro Fläche mehr als TOHO2 (11 g/m^2). Die Aktivierungstemperatur bei dem reversiblen Binder liegt bei 102°C. Das Flächengewicht FAW der Fasern abzüglich des Binder-, dem Toughner- und dem Schlichteanteil sowie des Nähfadens beträgt für TOHO1 537,1 g/cm^2 und für TOHO2 501,1 g/m^2. In Tabelle 2.4 sind Kenngrößen der beiden Materialien aufgelistet.

Tabelle 2.5: Gemeinsamkeiten SAE3 zu TOHO1 und TOHO2

Kenngrößen	SAE3	TOHO1	TOHO2
Filamentanzahl Roving	12 K		
Dichte Fasern [g/cm^3]	1,77		
Fasertyp	Toho Tenax HTS40		
Halbzeugtyp	NCF	•	•
Nähfaden	PES		
Schlichte [%]	1		
Binderseiten	1	•	
Bindertyp	Epikot Resin 05311		
Binderaktivierungstemperatur	102	•	•
Binder: Preforming-Typ	Reversible	•	•
Nähart	Franse	•	
FAW (nur Fasern) [g/m^2]	$531{,}6^{+25{,}7}_{-32{,}3}$		
Bindermasse (ohne Schlichte) [g/m^2]	$8{,}3^{+1{,}3}_{-1{,}9}$		
Gewicht Nähfaden [g/m^2]	6 ±1		
Summe Additive (Binder, Toughner, Nähfaden, Schlichte) [g/m^2]	19,62		
Schichten je Lagen	2	•	
Orientierung Fasern	-45°/+45°	•	

Bei dem SAE3 handelt es sich ebenfalls wie bei dem TOHO1 um ein Biaxialgelege mit einer Orientierung von -45°/+45°, welches jedoch aus 12 K Rovings mit einer Faserdichte von 1,77 g/cm^3 hergestellt wurde. Genauso wie bei den beiden anderen Materialien wurde ein reversible Binder vom Typ Epikote Resin 05311 mit einer Aktivierungstemperatur von 102°C verwendet. Dieser ist ebenfalls einseitig auf die Einzellagen aufgebracht. Die Verbindung der Einzellagen erfolgt bei diesem Material unter der Nutzung eines PES Nähfadens mit Hilfe der Franse Nähtechnik. Mit einem Bindergewicht von 8,3 g/m^2 und einem Flächengewicht FAW von 531,6 g/m^2 ist das

Material leichter als das TOHO1, aber dennoch schwerer als das TOHO2. In Tabelle 2.5 sind die Gemeinsamkeiten und Unterschiede des SAE3 zum TOHO1 und TOHO2 aufgelistet.

2.3.4 Erkenntnisse aus vorhergehenden Arbeiten

In der Bachelorarbeit [Hun18] untersuchte Hunger die Einflussfaktoren für das Relaxationsverhalten, die während der Kompaktierung von ebenen, bebinderten Kohlenstofffaserpreformen (TOHO1 und TOHO2) zum Einsatz kommen. Dabei zeigte sich, dass die Temperatur, die Lagenanzahl und der Druck sowie die Druck- und Temperaturhaltezeit unterschiedlichen Einfluss auf die Relaxation der Materialien nehmen.

Um die Relaxationen von unterschiedlichen Materialien mit einander vergleichen zu können, wurde der Bulkfaktor BF_t eingeführt. Dieser ist das Verhältnis aus der Dicke d_t des Fasermaterials zum Zeitpunkt t zur Normaldicke CPT des ausgehärteten Bauteils (siehe Gl. 3.1).

$$BF_t = \frac{d_t}{CPT} \qquad \textbf{Gl. 2.1}$$

Für eine qualifizierte Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Parameterkombinationen ist die Vereinheitlichung des Bulkfaktors notwendig. Dazu muss der Dickeneinfluss von den Fasern und den Halbzeuglagen aus den Ergebniswerten eliminiert werden. Über die Gleichung 3.2 ist das möglich.

$$CPT = \frac{FAW \cdot n}{\rho \cdot \varphi \cdot 10} \qquad \textbf{Gl. 2.2}$$

Der CPT-Wert berechnet sich aus dem Produkt des Flächengewicht FAW und der Lagenanzahl n, geteilt durch die Dichte der Fasern ρ, dem Faservolumengehalt φ und einem Umrechnungsfaktor. Dabei wird für den Faservolumengehalt ein Wert von 58 Prozent angenommen, weil dann die mechanischen Eigenschaften des Bauteils optimal sind. Nach der Versuchsdurchführung kann mit Hilfe des gemessenen Enddickenwertes über eine Rückrechnung der tatsächliche Faservolumengehalt bestimmt werden. Zusätzlich ist noch zu sagen, dass wenn von der Lagenanzahl gesprochen wird, dabei von einer Halbzeuglage die Rede ist und nicht von den Einzellagen, aus denen eine Halbzeuglage besteht. Des Weiteren ist das Flächengewicht, das Gewicht pro Flächen von dem trockenen Faserhalbzeug, ohne die Berücksichtigung von Binder und weiteren Bestandteilen wie zum Beispiel Schlichte und Nähfäden. Somit ist die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Halbzeugen sichergestellt.

Bei dem Einfluss der Lagenanzahl auf dem Bulkfaktor ergab sich für das Material TOHO1, dass Preformen mit vier Lagen stärker konsolidiert werden, aber auch umso stärker wieder aufspringen. Die Vermutung dazu ist, dass bei den Randfaserlagen die benachbarten Lagen fehlen und somit mehr Raum zum Ausdehnen zur Verfügung steht. Gleichzeitig muss dadurch weniger Widerstand gegen den konsolidierenden Druck aufgebracht werden. Dasselbe Ergebnis bezüglich des Einflusses der Lagenanzahl zeigte auch TOHO2. Durch die Variation des Druckes ergab sich, dass dieser einen stark ausgeprägten Einfluss auf die Kompaktierung hat (TOHO2). Je mehr Druck auf den Preform aufgebracht wurde, umso stärker wurde dieser kompaktiert. Gleichzeitig stieg dadurch jedoch auch das Relaxationsvermögen der Preformen an. Bei einem Druck von 1 bar wurde der Lagenaufbau nicht so stark komprimiert, wodurch die Nominaldicke nicht erreicht wurde. Insgesamt fällt aufgrund dessen die Relaxation verhältnismäßig geringer aus. Beim TOHO1 zeigte sich ebenfalls, dass der Druck einen besonders starken Einfluss auf das Zurückspringen hat. Somit ist wie beim TOHO2 beim kleinsten aufgebrachten Druck die Differenz zwischen der minimalsten und der relaxierten Dicke am geringsten.

Die Untersuchung im Hinblick des Einflusses der Temperatur auf das Relaxationsverhalten vom TOHO1 belegt, dass bei hohen Temperaturen eine geringere Dicke und ein weniger starkes Aufspringen der Preform auftritt. Doch im Gegensatz dazu konnten beim TOHO2 keine signifikanten Veränderungen aufgrund der Temperaturveränderungen festgestellt werden. Abschließend wurde noch der Einfluss der Druck- und Temperaturhaltezeit betrachtet. Bei beiden Versuchsmaterialien zeigten sich keine Unterschiede, wodurch die Möglichkeit einer Prozess-optimierung besteht. Eine zusätzliche Betrachtung des Einflusses der Versuchsparameter auf den Bulkfaktor mit Hilfe des Programmes *Optimus* bestätigte, dass die Druck- und Temperaturhaltezeit keinen Einfluss haben. Der größte Einfluss geht somit vom Druck aus, gefolgt von der Lagenanzahl und der Temperatur.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die besten Ergebnisse bei hohen Drücken und Temperaturen erzielt werden. Doch dann liegt der Bulkfaktor immer noch zehn Prozent über dem eigentlichen Sollwert.

Die Betrachtungen zu dem dritten Material (SAE3) ergaben, dass die Temperatur einen kleinen Einfluss ausübt, die jedoch bei zunehmender Erhöhung immer geringer ausfällt. Genau wie bei den anderen beiden Materialien zeigte sich dasselbe Verhalten in Bezug auf die Lagenanzahl. Eine Probe aus vier Lagen wurde ebenfalls stärker kompaktiert, doch zeigte diese auch die größte Relaxation. Die Variation des Druckes erzielte annähernd gleiche Kompaktierungsergebnisse. Somit ist die Schlussfolgerung, dass die Variation des Druckes keinen Einfluss auf die Enddicke hat.

3 Ersatzfunktionen

Dieses Kapitel behandelt die Herangehensweise zur Bestimmung einer Ersatzfunktion für die Materialien TOHO1, TOHO2 und SAE3. Dafür wird zunächst die Kompaktierungsdatenbank untersucht, gefolgt von der Aufstellung von Ersatzfunktionen mit Hilfe der Programme *Optimus* und *Matlab* und deren Überprüfung auf Genauigkeit. Abschließend wird analysiert, was der minimalste Versuchsaufwand und die optimalsten Parameterkombinationen für die Erstellung einer Ersatzfunktion sind. Zusätzlich werden mit Hilfe von weiteren Versuchen andere Versuchsabläufe betrachtet. Somit soll festgestellt werden, ob eine stärkere Kompaktierung bei den Preformen möglich ist.

3.1 Analyse der Kompaktierungsdatenbank

Bei der Kompaktierungsdatenbank handelt es sich um eine in *Excel* erstellte Datenbank, welche zu Beginn der Kompaktierungsversuche aufgebaut wurde. Diese dient dazu, große Mengen von Versuchsdaten strukturiert zu speichern und zu verwalten. Zu diesen Versuchsdaten gehören zum Beispiel die Versuchsparameter, das Gewicht des Lagenaufbaus, die unkompaktierte Dicke sowie die Dicke nach der Kompaktierung, als auch nach der 24 Stunden-Messung. In Tabelle 3.1 ist der Inhalt von der Datenbank zusammengefasst, der im Zusammenhang mit dieser Arbeit relevant ist. Wenn alle Daten zu einem Versuch zusammengeführt sind, werden diese abschließend analysiert und ausgewertet.

Tabelle 3.1: Inhalt der Kompaktierungsdatenbank (Auszug)

Versuchsmatrix	• Versuchsparameter • Material • Anzahl Versuchswiederholungen
Kenngrößen Material	• FAW • Dichte • Anzahl der Lagen je Halbzeug • Binderart, Binderseiten
Versuchs-aufzeichnungen	• Kompaktierung • 24 h-Messung
Dicke (gemessen)	• Unkompaktiert • Nach der Kompaktierung • Nach der 24 h-Messung
Grafische Abbildungen	• Dicke zu definierten Zeitpunkten, zur Analyse und Auswertung der Versuche

3.1.1 Untersuchende Versuchsparameter

Zu den untersuchten Versuchsparametern gehören die Lagenanzahl, der Druck, die Temperatur sowie die Druck- und Temperaturhaltezeit. Für die Untersuchung des Einflusses der Versuchsparameter auf den Bulkfaktor wurden in vorangegangenen Arbeiten [Hun18, Mül18] verschiedene

Parameterkombinationen betrachtet. Wie bereits im Abschnitt 3.1 erwähnt, zeigte sich bei den beiden zuletzt genannten Parametern kein signifikanter Einfluss auf den Bulkfaktor. Aus diesem Grund werden sowohl die Druck- als auch die Temperaturhaltezeit konstant gehalten und bei der Erstellung der Ersatzfunktionen nicht mitberücksichtigt. Des Weiteren ergab die Analyse der Datenbank zu den genannten Materialien, dass bei den restlichen Versuchsparametern überwiegend die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Variationen für die Versuchsdurchführung angewendet wurden.

Tabelle 3.2: Versuchsparameter mit Variationsbereich

Versuchsparameter	Variationsbereich
Lagenanzahl n [-]	4, 8, 12
Druck p [bar]	1, 3, 5
Temperatur T [°C]	105, 120, 140
Druckhaltezeit t_D [s]	240
Temperaturhaltezeit t_T [s]	600

3.1.2 Versuchsmatrix

Auf Grundlage der genannten Versuchsparameter und der zugehörigen Variationsbereiche sowie der Bulkfaktoren je Parameterkombination (dreimalige Wiederholung jeder Parameterkombination) wurde die jeweilige Versuchsmatrix für die Materialien nachgestellt. Diese ist eine Kombination aus den Variationsbereichen der Lagenanzahl, des Druckes und der Temperatur. Dadurch ergibt sich für jedes Material eine Matrix mit 27 verschieden Parameterkombinationen. Im Anhang B bis D befinden sich die Versuchsmatrizen zu den Materialien TOHO1, TOHO2 und SAE3.

Zu einigen Parameterkombinationen wurden mehr als drei Versuchswiederholungen durchgeführt. Um eine Einheitlichkeit bei den Matrizen zu erhalten, müssen in diesen Fällen die jeweils drei am besten zusammenpassenden Versuche ausgewählt werden. In den aufgestellten Versuchsmatrizen sind einige der Versuchsnummern grün hinterlegt. Bei diesen Parameterkombinationen sind drei Versuchswiederholungen erfolgt, doch einer dieser Versuchsergebnisse weist lediglich nur eine minimale Abweichung zu den anderen beiden Versuchen auf und kann dennoch für weitere Untersuchungen mitberücksichtigt werden.

Bei einer näheren Betrachtung der Versuchsmatrizen zeigen sich an unterschiedlichen Stellen Lücken, da nicht zu jeder Parameterkombination der zugehörige Bulkfaktor ermittelt wurde. Im Schnitt wurden bei allen drei Materialien etwa die Hälfte der 27 Parameterkombinationen durchgeführt. Bei dem TOHO1 ist zu erkennen, dass unter den 16 durchgeführten Parameterkombinationen alle mit acht Lagen und 140°C komplett sind. Für TOHO2 lässt sich ein ähnliches Bild erkennen. Hier wurden alle Parameterkombinationen mit 140 °C und bis auf eine mit acht Lagen bei der Kompaktierung durchgeführt. Insgesamt wurden zwei weniger als bei dem TOHO1 betrachtet. Bei dem letzten Material lässt sich ein anderes Muster feststellen. Wie im Anhang D ausgeführt, wurden keine Parameterkombinationen mit 120 °C gefahren, sondern überwiegend bei einer Temperatur von 105 °C. Mit insgesamt zwölf von 27 möglichen Parameterkombinationen wurden bei diesem Material die wenigsten Parameterkombinationen analysiert.

Aus der Analyse der Versuchsmatrizen der Materialien ist zu erkennen, dass der BF umso besser ausfällt, je mehr Lagen beim Probenaufbau verwendet werden. Dasselbe Ergebnis zeigt sich sowohl bei der Temperatur als auch dem Druck. Umso höher der Druck und die Temperatur bei der Kompaktierung ist, desto stärker wird der Preform kompaktiert. Sowohl beim TOHO1, TOHO2 als auch beim SAE3 zeigt sich das beste Ergebnis bei einer Parameterkombination von zwölf Lagen, einem Druck von 5 bar und einer Temperatur von 140 °C.

3.1.3 Gegenüberstellung der Versuchsparameter zum Bulkfaktor BF_{24h_w}

Für die Analyse des Einflusses der Versuchsparameter auf den Bulkfaktor BF_{24h_w} wurde jeder Einflussparameter gegenüber dem gemittelten BF_{24h_w} (abgekürzt $BF_{24h,w,m}$) einer Parameterkombination grafisch abgebildet. Dazu wurde auf den Abszissen der zu untersuchende Einflussparameter und auf der dazugehörigen Ordinate der aus drei Versuchswiederholungen einer Parameterkombination gemittelte Bulkfaktor abgetragen. Über die Berechnung des Mittelwertes für die einzelnen Variationsbereiche eines Einflussparameters konnte eine vorläufige Trendlinie erstellt werden. Mit Hilfe der folgenden Abbildungen wird auf die Erkenntnisse der Gegenüberstellungen zu den verschiedenen Materialien näher eingegangen.

TOHO1

Wie der Abbildung 3.1 zu entnehmen ist, nimmt der gemittelte Bulkfaktor bei steigender Lagenanzahl von den Preformen ab. Des Weiteren sind ausschließlich Parameterkombinationen mit acht Lagen komplett durchgeführt worden. Bei den anderen Lagenanzahlen wurden nur vier bzw. drei von den neun möglichen Parameterkombinationen gefahren. Wie in dem Diagramm zu sehen ist, erstrecken sich die achtlagigen Parameterkombinationen von 1,12 bis 1,19. Das ist eine Differenz von ca. 0,07. Bei den anderen Lagenanzahlen wurden nicht alle Parameterkombinationen getestet. Die Differenz zwischen dem größten zum kleinsten Bulkfaktor bei einer Lagenanzahl von vier Lagen beträgt 0,09 und bei zwölf Lagen 0,07. Da nicht alle Parameterkombinationen mit vier und zwölf Lagen durchgeführt wurden und die Streuungen im Vergleich zu den acht Lagen ungefähr gleich sind, ist nicht eindeutig, ob es sich bei den im Diagramm gekennzeichneten Bulkfaktoren um Ausreißer handelt. Für die Kennzeichnung dieser wurden die jeweils verwendeten Parameter bei der Kompaktierung der Preformen notiert. Das bedeutet, dass bei 4 / 1 / 105 die Preformen aus vier Lagen bestehen und bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 105 °C kompaktiert wurden.

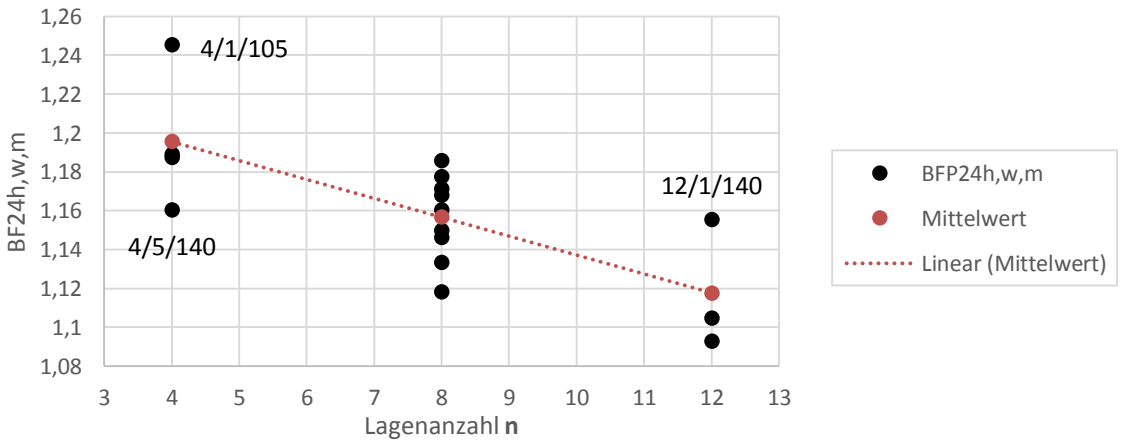


Abbildung 3.1: TOHO1 – Gegenüberstellung der Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Bei der Gegenüberstellung des Druckes ist ebenfalls zu erkennen, dass mit zunehmendem Druck der $BF_{24h,w,m}$ sinkt (vgl. Abbildung 3.2). Auch hier wurden mit durchschnittlich fünf bzw. sechs getesteten Parameterkombinationen für eine Druckgröße nicht alle möglichen Parameter-kombinationen durchgeführt, wodurch keine eindeutigen Aussagen zu den im Diagramm gekennzeichneten Bulkfaktoren gemacht werden kann.

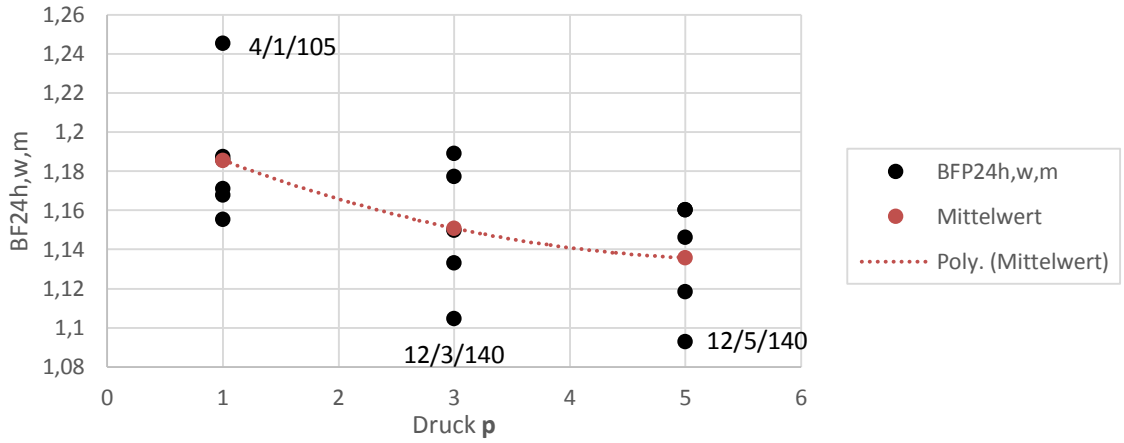


Abbildung 3.2: TOHO1 – Gegenüberstellung des Druckes *p* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Des Weiteren beträgt die Differenz zwischen dem größten zum kleinsten Bulkfaktor ca. 0,09. Somit ist die Streuung bei allen drei Drücken ungefähr gleich, wodurch auch keine eindeutige Aussage über mögliche Ausreißer getroffen werden kann. Ein Vergleich der Trendlinie vom Druck mit der von der Lagenanzahl zeigt, dass die Lagenanzahl einen größeren Einfluss auf den Bulkfaktor ausübt als der Druck. Durch die Erhöhung der Lagenanzahl sinkt der Bulkfaktor von ca. 1,2 auf 1,12 ab. Beim Druck nimmt dieser lediglich von 1,19 um 0,05 ab.

Abschließend wird noch die Gegenüberstellung der Temperatur zu dem $BF_{24h,w,m}$ betrachtet. Wie bereits im Abschnitt 3.1.2 erwähnt, wurden bei dem TOHO1 alle Parameterkombinationen mit 140 °C bei den Kompaktierungen gefahren. In der Abbildung 3.3 ist zu sehen, dass der gemittelte Bulkfaktor der Parameterkombination 4 / 1 / 105 außerhalb der restlichen Bulkfaktoren liegt.

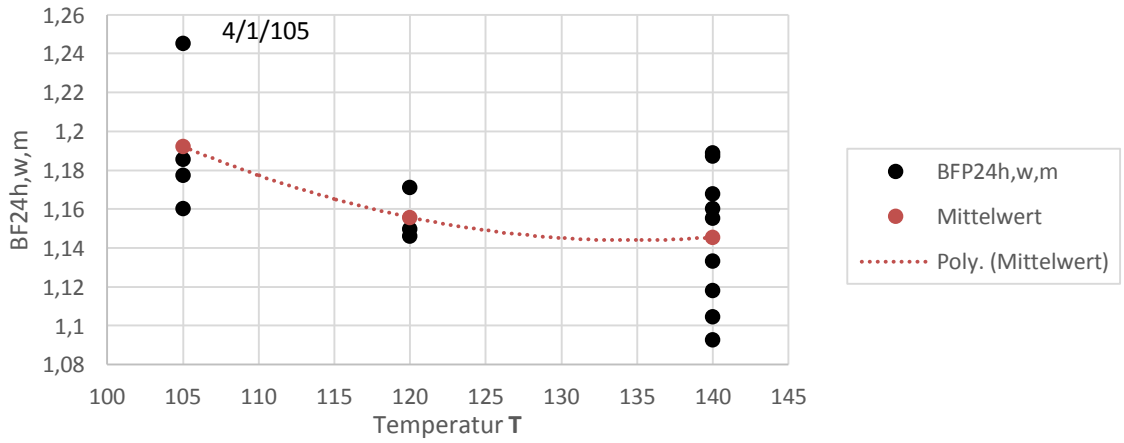


Abbildung 3.3: TOHO1 – Gegenüberstellung der Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Ob es sich hierbei um einen Ausreißer handelt oder nicht, müssen zum einem noch mehr Kombinationen mit 105 °C gefahren werden. Erst dann kann eine genaue Aussage getroffen werden. Zum anderen ist die Streuung innerhalb der Bulkfaktoren der Parameterkombinationen

mit 140 °C sehr groß, wodurch die Möglichkeit besteht, dass bei 105°C die Streuung genauso ausfallen kann und es sich hierbei um keinen Ausreißer handelt. Auch für die Temperatur von 120 °C wurden zu wenig Parameterkombinationen in Versuchen gefahren. Durch die Erhöhung der Temperatur sinkt der $BF_{24h,w,m}$ der Trendlinie von ca. 1,19 auf 1,15 ab. Mit einer Differenz von 0,04 hat die Temperatur einen ähnlich starken Einfluss auf den Bulkfaktor wie der Druck.

TOHO2

Wie auch schon bei der Gegenüberstellung der Lagenanzahl zum Bulkfaktor des TOHO1 erkannt wurde, nimmt beim TOHO2 (siehe Abbildung 3.4) ebenfalls der gemittelte Bulkfaktor mit steigender Lagenanzahl von den Preformen ab. Im Vergleich zu den anderen Lagenanzahlen wurde bis auf eine nicht durchgeführte Parameterkombination bei acht Lagen alle durchgeführt. Durch die Erhöhung der Lagenanzahl sinkt der gemittelte Bulkfaktor von der Trendlinie von ca. 1,27 auf etwa 1,16 ab. Somit reduziert sich dieser um 0,11. Damit hat die Lagenanzahl ebenfalls den größten Einfluss auf den Bulkfaktor.

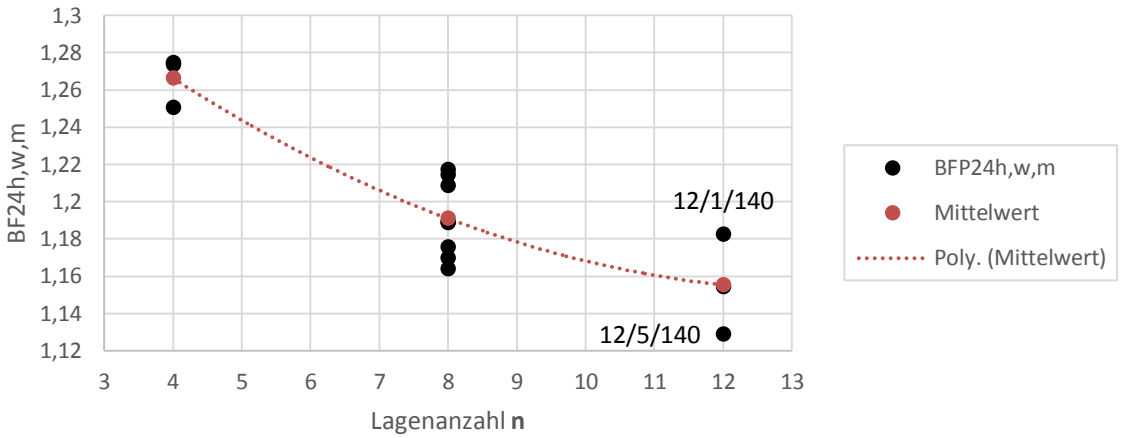


Abbildung 3.4: TOHO2 – Gegenüberstellung der Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Abbildung 3.5 zeigt die Gegenüberstellung des Druckes zu den gemittelten Bulkfaktoren. Für alle drei Drücke wurden mit vier bis fünf Parameterkombinationen ungefähr gleich viele Versuche bei den Kompaktierungen gefahren. Durch die Erhöhung des Druckes auf die Preform wird der Bulkfaktor reduziert.

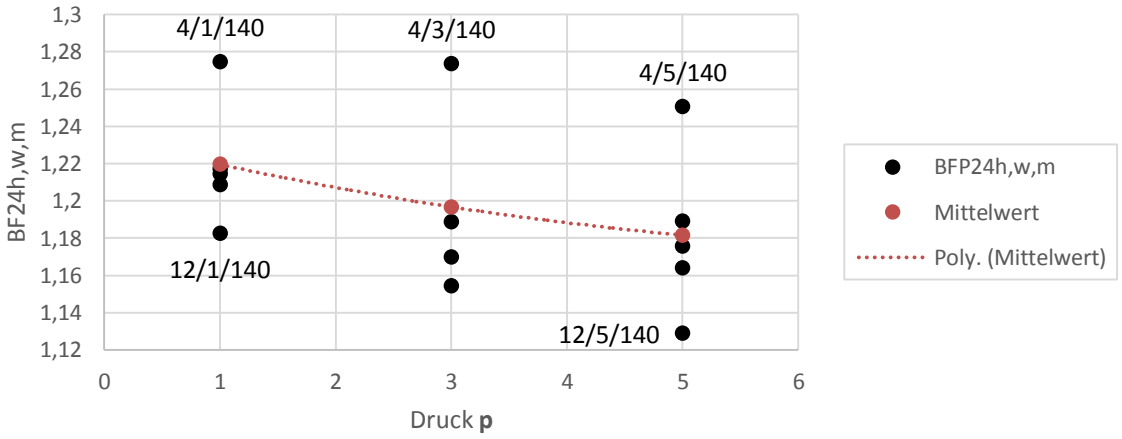


Abbildung 3.5: TOHO2 – Gegenüberstellung des Druckes *p* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Dadurch sinkt der gemittelte Bulkfaktor bei einem Druck von 1 bar von 1,22 auf 1,18 bei 5 bar ab. Im Vergleich zu der Lagenanzahl hat der Druck jedoch einen geringeren Einfluss auf den Bulkfaktor. Aufgrund der großen Abweichungen der Parameterkombinationen 4 / 1 / 140, 4 / 3 / 140 und 4 / 5 / 140 zu den anderen Drücken handelt es sich hierbei um Versuchsausreißer, die durch Versuchswiederholungen auf ihre Richtigkeit überprüft werden müssen.

Zum Schluss wird die Temperatur betrachtet. Anhand der Abbildung 3.6 ist zu sehen, dass der gemittelte Bulkfaktor bei einer Temperatur von 140°C eine sehr hohe Streuung (1,13 bis ca. 1,28) besitzt. Im Gegensatz dazu wurden bei den Temperaturen 105 °C und 120 °C nur drei bzw. zwei der Parameterkombinationen durchgeführt. Somit besitzt das Diagramm an diesen Stellen keine hundertprozentige Aussagekraft für den Verlauf der Trendlinie. Durch weitere Versuche mit Parameterkombinationen von 105 °C bzw. 120 °C kann die Aussagekraft zum Trendlinienverlauf der Temperatur erhöht werden.

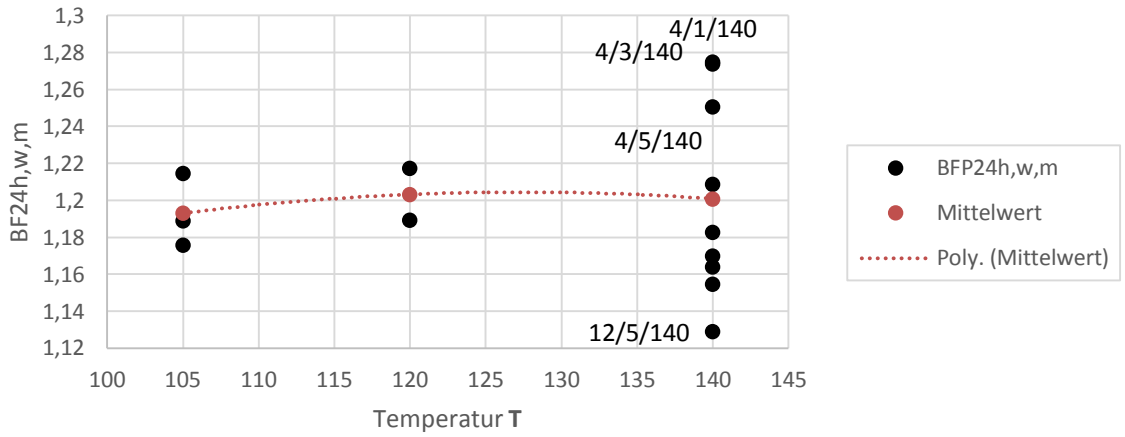


Abbildung 3.6: TOHO2 – Gegenüberstellung der Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

<u>SAE3</u>

Mit steigender Lagenanzahl der Preformen nimmt der gemittelte Bulkfaktor ab (vgl. Abbildung 3.7). Des Weiteren wurden zu den Parameterkombinationen mit acht Lagen die größte Anzahl an Versuchen durchgeführt (5 Stück), gefolgt von den zwölflagigen (4 Stück) und den vierlagigen mit drei Parameterkombinationen.

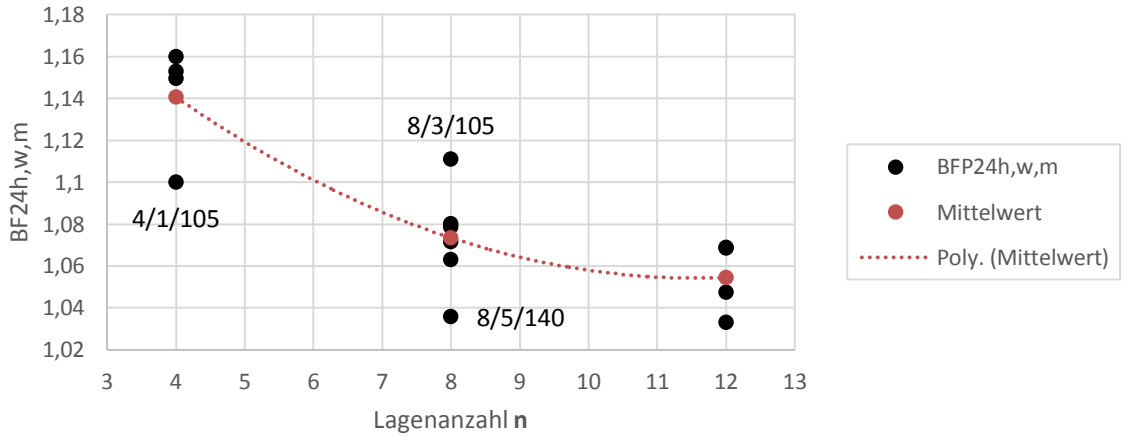


Abbildung 3.7: SAE3 – Gegenüberstellung der Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Da zu den unterschiedlichen Lagenanzahlen nicht alle Parameterkombinationen gefahren wurden, kann bzgl. der Kombinationen 4 / 1 / 105, 8 / 3 / 105 und 8 / 5 / 140 keine genaue Aussage getroffen werden, ob es sich dabei um Ausreißer handelt oder nicht.

Wie in der Abbildung 3.8 bei der Gegenüberstellung vom Druck zu dem $BF_{24h,w,m}$ zu erkennen ist, ergibt die Trendlinie des gemittelten Bulkfaktors eine nach unten geöffnete Parabel. Der Scheitelpunkt der Parabel liegt bei 3 bar. Im Vergleich zu den beiden anderen Materialien zeigt sich hier eine Veränderung bei dem Trendlinienverlauf, welcher nicht begründet werden kann. Da bei 1 und 3 bar die wenigsten Parameterkombinationen gefahren worden sind, ist es möglich, dass durch weitere Versuche sich der Verlauf der Trendlinie verändern kann. Die Abweichung der Parameterkombination 4 / 5 / 105 zu den restlichen 5 bar Kombinationen ist mit 0,1 zu groß, sodass es sich hierbei um einen Ausreißer handelt.

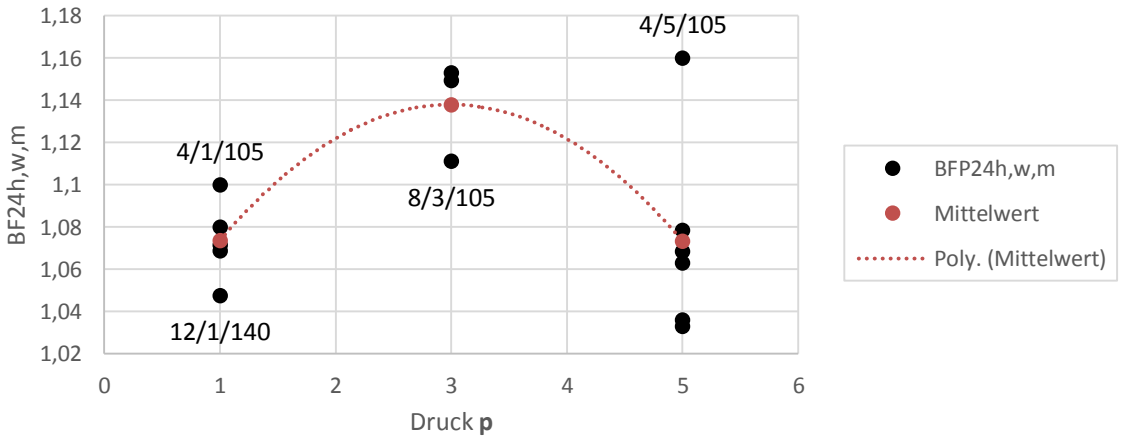


Abbildung 3.8: SAE3 – Gegenüberstellung des Druckes *p* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

Abschließend wird noch die Gegenüberstellung der Temperatur zum $BF_{24h,w,m}$ betrachtet. Im Abschnitt 3.1.2 wurde bereits darauf eingegangen, dass beim SAE3 die meisten Parameterkombinationen bei 105 °C gefahren wurden. Da nur eine geringe Anzahl an Parameterkombinationen mit einer Temperatur von 120 °C bzw. 140 °C in Versuchen durchgeführt wurden, ist die Aussagekraft des Diagrammes zum Einfluss der Temperatur auf den Bulkfaktor nur sehr begrenzt.

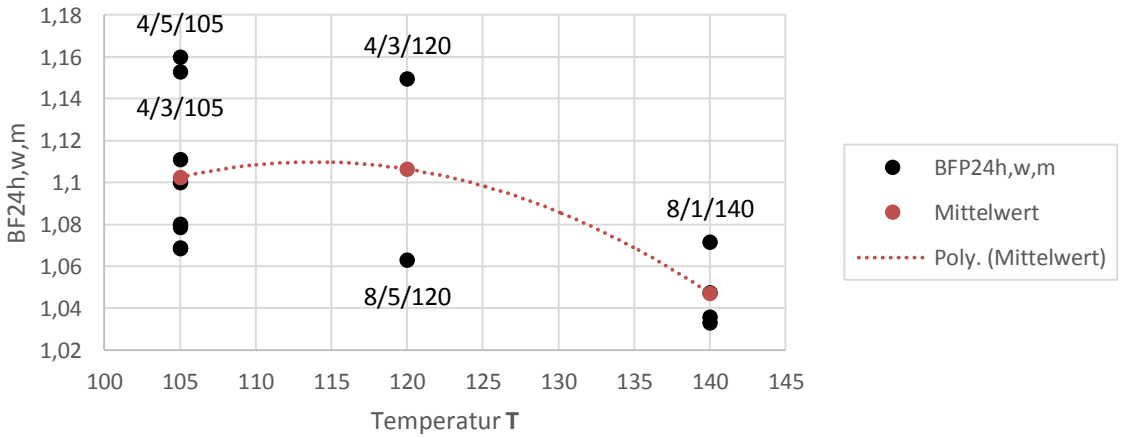


Abbildung 3.9: SAE3 – Gegenüberstellung der Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 1)

3.2 Aufstellung der Ersatzfunktionen

Die Anforderungen an die Preformen für eine anschließende Weiterverarbeitung, wie zum Beispiel im RTM-Verfahren, werden nur unzureichend erfüllt. Der Grund dafür liegt in dem Relaxationsverhalten der Preformen, welches nach der Kompaktierung auftritt. Dieses führt dazu, dass die Preformdicke zunimmt und es zu einer Geometrieveränderung kommt. Das hat zur Folge, dass die berechnete Dicke von der realen abweicht und somit die Preform vom Injektionsharz über- anstatt durchströmt wird, es zu einer Schiefstellung des Werkzeuges kommt oder das Endbauteil vom angestrebten Faservolumengehalt abweicht.

Aus diesem Grund soll für die drei Materialien auf Basis der Kompaktierungsdatenbank jeweils eine Ersatzfunktion bestimmt und validiert werden, um die endgültige Dicke der Preform nach der Relaxation, in Abhängigkeit der gefahrenen Versuchsparameter, möglichst genau berechnen zu können. Für die Erstellung der Ersatzfunktionen werden zwei Programme verwendet. Bei dem ersten handelt es sich um *Optimus*, dass für die Prozessautomatisierung und Optimierung verwendet wird. Das zweite benutzte Programm ist *Matlab*. Dieses dient dazu, für mathematische Probleme eine Lösung zu finden und deren Ergebnisse grafisch darzustellen.

3.2.1 Ersatzfunktionsaufstellung mit Optimus und Matlab

Zuerst wird auf die Herangehensweise zur Erstellung der Ersatzfunktionen mit Hilfe von *Optimus* eingegangen, gefolgt von *Matlab*. Um bei *Optimus* mit den einzelnen Parameterkombinationen sowie den zugehören Bulkfaktoren arbeiten zu können, müssen diese Daten in eine txt-Datei formatiert werden, die anschließend in *Optimus* eingeladen werden kann. Wie in der Abbildung 3.10 zu sehen ist, müssen zunächst Angaben über die Anzahl der einzuladenden In- und Outputs gemacht werden. In diesem Fall sind das drei Inputs (Lagenanzahl, Druck und Temperatur) und der dazugehörige Bulkfaktur als eine Output-Größe. Unterhalb dieser Angaben werden die einzelnen Parameterkombinationen mit dem zugehörigen Bulkfaktor tabellarisch aufgelistet. Dabei ist darauf zu achten, dass anstelle eines Kommas ein Punkt verwendet wird, da sonst die Datei nicht eingelesen werden kann.

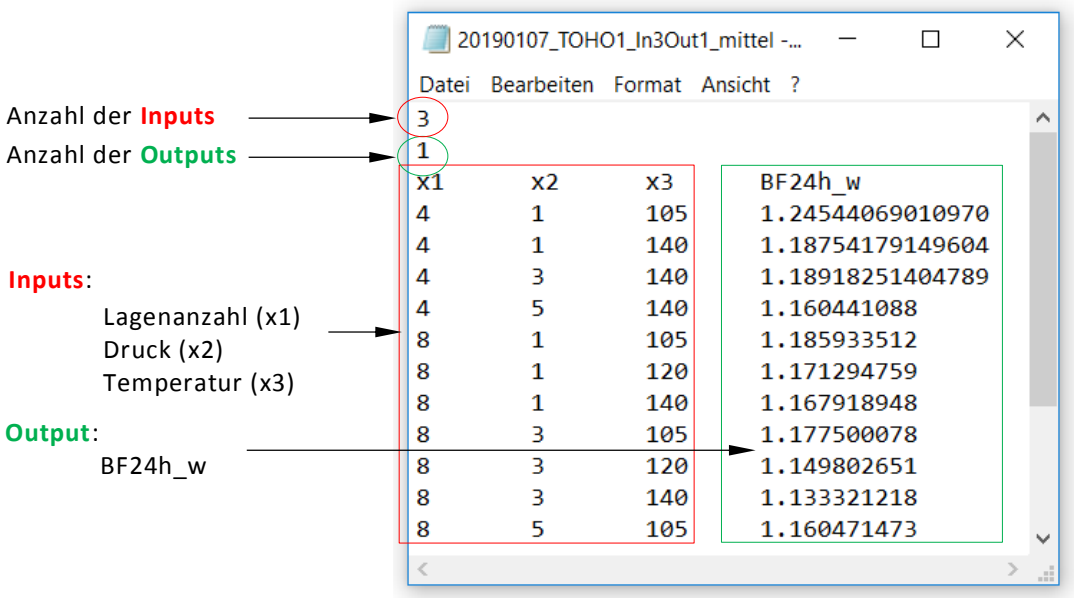


Abbildung 3.10: Aufbau einer txt-Datei für Optimus

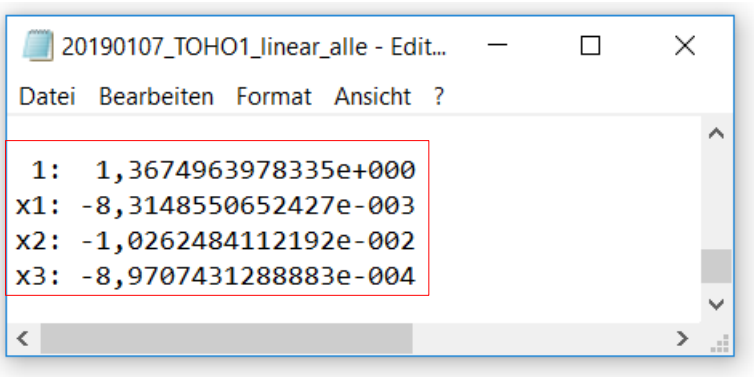
Für jedes Material wurden zwei txt-Dateien erstellen – eine, in der alle ermittelten Bulkfaktoren einer Parameterkombination einzeln berücksichtigt werden und eine, mit den aus drei Versuchen gemittelten Bulkfaktoren einer Parameterkombination. Nach dem Einladen einer txt-Datei in das Programm, muss ein neues Modell erstellt werden. Zur Bestimmung der Funktionen wird die least squares Methode, auch bekannt als die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, ausgewählt. Dabei wird aus einer Datenpunktwolke die passende Kurve gesucht, die möglichst nah an den Datenpunkten verläuft. Die Summe der quadratischen Abweichung eines Punktes zu der Kurve soll dadurch minimiert werden. Abschließend muss noch der Funktionsansatz ausgewählt werden. Je nach Funktionsansatz, wie z.B. linear oder quadratisch, muss eine gewisse Anzahl an notwendigen Parameterkombinationen eingeladen worden sein. Sind weniger als die geforderten Parameterkombinationen eingeladen worden, werden die Punkte von vielen Kurven geschnitten und somit ist das Ergebnis nicht aussagekräftig. Mit jeder zusätzlich eingeladenen Parameterkombination reduziert sich der Einfluss von statistischen Schwankungen. In Tabelle 3.3 ist die notwendige Anzahl an Parameterkombinationen für die jeweiligen Funktionsansätze sowie die vorhandene Anzahl an Parameterkombinationen (gemittelt/alle) der untersuchten Materialien aufgeführt. Wie dabei zu erkennen ist, können mit den txt-Dateien aus den gemittelten Bulkfaktoren keine Ersatzfunktionen mit einem kubischen Funktionsansatz erstellt werden.

Tabelle 3.3:Funktionsansätze und die notwenige Anzahl an Parameterkombinationen (Optimus)

Funktionsansatz	Notwendige Anzahl Parameter-kombinationen	Vorhandene Anzahl Parameterkombinationen					
		TOHO1		TOHO2		SAE3	
		gemittelt	alle	gemittelt	alle	gemittelt	alle
linear	4	16	48	14	42	12	36
linear + interaction	7						
quadratisch	10						
kubisch	20						

Mit der Fertigstellung des Modells wird die Funktion als txt-Datei ausgegeben. In dieser sind die einzelnen Koeffizienten mit der zugehörigen Variable tabellarisch aufgelistet, die dann wie in Abbildung 3.11 zu einer Funktion um geschrieben werden kann. Dazu wird innerhalb einer Zeile die Variable mit dem Koeffizient multipliziert und anschließend die Produkte der einzelnen Zeilen zusammen addiert.

Ausgabe Optimus



Aufbau Funktion

$$f(x_1, x_2, x_3) = 1{,}3674 \cdot 1 + (-8{,}3148 \cdot 10^{-3}) \cdot x_1 + (-1{,}0262 \cdot 10^{-2}) \cdot x_2 + (-8{,}9707 \cdot 10^{-4}) \cdot x_3$$

Abbildung 3.11: Optimus – Ausgabe der Funktion als txt-Datei

Wie bei *Optimus* müssen die Daten für *Matlab*, die die Grundlage für die Erstellung der Funktionen darstellen, eingeladen werden. Dazu wird aus den Eingabegrößen, bestehend aus den Versuchsparametern (Lagenanzahl, Druck und Temperatur), eine *m*-mal-3-Matrix erzeugt. Für die Ausgabegröße BF_{24h_w} wird ebenfalls eine Matrix erstellt, mit der Dimension *m*-mal-1. Das *m* gibt an, wie viele Zeilen die Matrizen besitzen. Die Anzahl der Zeilen wird über die Anzahl der eingeladenen Parameterkombinationen definiert. Mit der Erstellung der Matrizen wird anschließend die Datei „MultiPolyRegress“ mit dem Quellcode für die Erstellung der Funktionen eingeladen. Über die Funktion *MultiPolyRegress* wie sie in der Abbildung 3.12 zu sehen ist, kann dann für jedes Material, die Menge an eingeladenen Parametersätzen (gemittelt/ungemittelt) und des Funktionsansatzes eine Funktion ermittelt werden. Dazu müssen der Funktion die erstellten Matrizen mit den Input- und der Output-Größen, sowie dem Grad der Funktion und die Ausgabeform übergeben werden. Unter dem Grad der Funktion wird bei *Matlab* der Funktionsansatz der Funktion definiert. Dabei entspricht der Grad 1 einem linearen, Grad 2 einem quadratischen, und Grad 3 einem kubischen Funktionsansatz. Im Gegensatz zu *Optimus* wird bei *Matlab* keine Funktion mit einem Funktionsansatz „linear + interaction“ erstellt.

$$reg_Mat_GradFkt = MultiPolyRegress(DATA_{In}, DATA_{Out}, \mathbf{GradFkt}, Ausgabeform)$$

Matrix Inputs:
Lagenanzahl (x1)
Druck (x2)
Temperatur (x3)

Matrix Output:
BF24h_w

Grad des Funktionsansatzes

Abbildung 3.12: Matlab – Einladen der Daten zur Funktionsaufstellung

Die ermittelte Ersatzfunktion wird in einer Variablen gespeichert. Die Bezeichnung der Variable ist eine Kombination aus dem mathematischen Verfahren, dem Material und dem Funktionsgrad wie z.B. Reg_TOHO1_1. Somit können für die unterschiedlichen Funktionsansätze der einzelnen Materialien die Variablen zu den einzelnen Koeffizienten ausgelesen werden. In Abbildung 3.13 ist die Ausgabeform der Funktion bei *Matlab* zu sehen.

Variables - Reg_TOHO1_1

Reg_TOHO1_1

1x1 struct with 18 fields

Field	Value
FitParameters	'----------'
PowerMatrix	4x3 double
Scores	51x4 double
PolynomialExpression	@(x1,x2,x3)+1.3726.*1+-0.0083076.*x1+-0.010254.*x2+-0.00094458.*x3
Coefficients	[1.3726;-0.0083;-0.0103;-9.4458e-04]

Abbildung 3.13: Ausgabeform der ermittelten Ersatzfunktion in Matlab

Sowohl bei *Matlab* als auch *Optimus* wird die Regressionsanalyse angewendet. Dabei handelt es sich um ein statistisches Verfahren für die Modellierung einer Beziehung zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen. In dieser Arbeit sind die unabhängigen Variablen die Lagenanzahl, der Druck und die Temperatur. Der BF_{24h_w} ist die abhängige Variable, welche durch die unabhängigen Variablen beeinflusst wird. Das Verfahren dient zum einen zur Beschreibung der Zusammenhänge der betrachteten Daten und dessen Analyse und zum anderen, um Vorhersagen zu machen auf der Grundlage der betrachteten Daten. Die Idee hinter dieser Funktionsweise ist,

dass eine abhängige Variable durch eine bzw. mehrere unabhängige Variable(n) definiert wird. Wenn ein kausaler Zusammenhang zwischen den Variablen besteht, beeinflusst der Wert der unabhängigen Variablen den Wert der abhängigen. Die Ermittlung einer Funktion erfolgt mit Hilfe von mathematischen Verfahren, um die Abweichung zwischen der erstellten Funktion und den Datenpunkten zu minimieren. Dazu wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewendet. Je nach Funktionsansatz werden wie bei einer linearen Regression nur lineare Funktionen betrachtet.

3.2.2 Berechnung des Bulkfaktors BF_{24h_w} auf Basis der Ersatzfunktionen

Mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms *Excel* ist für die Berechnung des BF_{24h_w} eine Tabelle erstellt worden. Im Folgenden wird auf den Aufbau und die Funktionsweise dieser näher eingegangen. Die Kopfspalte ist untergliedert in sieben Unterspalten. In diesen werden die Versuchsparameter Lagenanzahl, Druck und Temperatur, die bei der Kompaktierung gefahren wurden, mit den drei zugehörigen BF_{24h_w}, sowie der Mittelwert aus diesen, aufgelistet. Außerdem sind noch die Versuchsnummern und die Nummer der Parameterkombination notiert worden. Die Kopfzeile ist unterteilt nach den unterschiedlichen Funktionsansätzen. Zu jedem Funktionsansatz werden der berechnete Bulkfaktor BF_{24h_ber} einer Parameterkombination sowie die prozentuale Abweichung des BF_{24h_ber} vom eigentlichen BF_{24h_w} ermittelt (siehe Abbildung 3.14).

	A	B	C	D	E	F	G	I	J
1								Koeffizienten linear	
2		Alle Messwerte						1	1,3674963978
3								x1	-0,0083148551
4		gemittelten Werte						x2	-0,0102624841
5								x3	-0,0008970743
6		Überprüfung Gleichung							
7									
8		Überpüfung Gleichung + Diagramm							
9									
10		Überprüfung Diagramm							
11									
12		Verwendbarer Versuch mit geringer Abweichung							
13									
14		Überprüfung Materialhaltbarkeit							
15									
16									
17				PARAMETER		VERSUCH			
18								LINEAR	
19	Nr. Versuch	Nr. Parameter-kombination	x_1 Lagenanzahl n [-]	x_2 Druck p [bar]	x_3 Temperatur T [°C]	BF_{24h_w} [-]	$BF_{24h_w_mittel}$ [-]	BF_{24h_ber}	A Abweichung [%]
20									
21	609					1,23152454			0,142
22	611	1	4	1	105	1,23910399	1,24544069	1,229781691	0,752
23	610					1,26569354			2,837
107	Überprüfung Versuche								
108		Arithmetischer Mittelwert a_b							1,082
109									
110		Standardardabweichung σ							0,825
111									

Kopfspalte

Kopfzeile

Abbildung 3.14: Aufbau der Excel-Tabelle für die Berechnung BF_{24h} (Teil 1)

Oberhalb jedes Funktionsansatzes sind die Variablen der Funktion mit den zugehörigen Koeffizienten aufgeführt, auf dessen Grundlage der BF_{24h_ber} berechnet wurde. Zusätzlich wurde noch eine Farbtabelle für die farbliche Kennzeichnung der neuen Versuche nach den verschiedenen Überprüfungsgründen angefertigt. Die hellblau gefärbten Zellen in der Kopfzeile

markieren die Funktionen, die auf Basis aller BF_{24h_w} erstellt wurden. Über die lila gefärbten Zellen werden die Funktionen in der Tabelle gekennzeichnet, die auf Basis von den gemittelten BF_{24h_w} erstellt wurden. Die hellgrün gekennzeichneten Zellen in der Spalte der Versuchsnummern kennzeichnen lediglich die Versuche, die zu den anderen beiden Versuchen einer Parameterkombination eine minimale Abweichung aufweisen, aber dennoch zu ihnen passen und somit für die Funktionsaufstellung berücksichtigt werden können. In dem Abschnitt 3.2.3 wird auf die anderen farblichen Kennzeichnungen in der Versuchsmatrix näher eingegangen.

Mit der Berechnung der prozentualen Abweichung *A* ist die Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Parameterkombinationen gewährleistet. Die prozentuale Abweichung lässt sich über die Gleichung 3.3 berechnen.

$$A = \frac{BF_{24h_w} - BF_{24h_ber}}{BF_{24h_w}} \cdot 100 \qquad \textbf{Gl. 3.1}$$

Wie ebenfalls in der Abbildung 3.14 zu erkennen ist, wird für die Auswertung der Funktionsansätze die Standardabweichung herangezogen, wodurch eine Aussage über die durchschnittliche Abweichung von dem Mittelwert möglich ist. Bei der Standardabweichung σ handelt es sich um einen Streuungsparameter. Diese ist ein Maß für die durchschnittliche Streuungsbreite der einzelnen Messwerte *A* vom arithmetischen Mittelwert a_i. Wie in der Gleichung 3.4 zu sehen ist, ist die Standardabweichung die Wurzel aus der Varianz *Var(X)*. Diese ist die Summe aus der quadratischen Abweichung aller Messwerte *A* vom arithmetischen Mittelwert a_i, welche durch die Anzahl der Messwerte *b* dividiert wird.

$$\sigma = \sqrt{Var(X)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{b}(a_i - A)^2}{b}} \qquad \textbf{Gl. 3.2}$$

Der arithmetische Mittelwert a_i ist die Aufsummierung der einzelnen Messwerte *A*, welche durch die Anzahl der Messwerte geteilt wird (siehe Gleichung 3.5).

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^{b} A}{b} \qquad \textbf{Gl. 3.3}$$

Derselbe tabellarische Aufbau wird auch für die Versuche verwendet, die zur Überprüfung der Funktionen erstellt wurden (vgl. Abbildung 3.15). Auch hier werden die prozentuale Abweichung, der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt, um die Genauigkeit der verschiedenen Funktionsansätze überprüfen zu können.

119									
120			PARAMETER			VERSUCH		LINEAR	
121	Nr. Versuch	Nr. Parameter-kombination	x_1 Lagenanzahl **n** [-]	x_2 Druck **p** [bar]	x_3 Temperatur **T** [°C]	BF_{24h_w} [-]	$BF_{24h_w_mittel}$ [-]	BF_{24h_ber}	**A** Abweichung [%]
122									
123	820					1,194264526			0,129
124	819	5	4	3	120	1,200226331	1,20347982	1,195800608	0,369
125	818					1,215948593			1,657

138	Überprüfung Gleichung		
139		Arithmetischer Mittelwert a_b	1,253
140			
141			
142		Standardabweichung σ	0,724
143			

Abbildung 3.15: Aufbau Excel-Tabelle für die Berechnung BF_{24h} (Teil 2)

3.2.3 Versuchsmatrix für die Überprüfung der Ersatzfunktionen

Um die erstellten Ersatzfunktionen für die drei Materialien auf ihre Genauigkeit zur Berechnung des BF_{24h_w} überprüfen zu können, müssen weitere Parameterkombinationen gefahren werden, die bei der Funktionsaufstellung nicht berücksichtig worden sind. Dazu wurde eine Versuchsmatrix aufgestellt. Wie bereits schon im Abschnitt 3.1 erwähnt, zeigten sich bei der Analyse der Datenbank zu den Materialien Lücken in der Versuchsmatrix. Da diese Parameterkombinationen bei der Funktionsaufstellung nicht berücksichtigt worden sind, werden diese Kombinationen in den folgenden Versuchen gefahren, um die Genauigkeit der Funktionen zu bestimmen. Mit den genannten Materialien wurden bereits in vorangegangenen Arbeiten Versuche gefahren, wodurch noch Materialzuschnitte in den drei Größen vorhanden sind. Jedoch ist das Haltbarkeitsdatum dieser Materialzuschnitte überschritten, wodurch bereits gefahrene Parameterkombinationen wiederholt werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse kann überprüft werden, ob sich die Eigenschaften des Materials verändert haben. Diese sind in der aufgestellten Versuchsmatrix (vgl. Tabelle 3.4) hellblau-weiß gestreift gekennzeichnet. Diese Überprüfung erfolgt für alle Materialien.

Tabelle 3.4: Versuchsmatrix

Art Versuch	Material	Lagenanzahl *n* [-]	Druck *p* [bar]	Temperatur *T* [°C]
Überprüfung Material-haltbarkeit	TOHO1	12	5	140
	TOHO2	8	3	140
	SAE3	8	5	120
Überprüfung Gleichung	TOHO1	4 12	3 5	120 120
	TOHO2	4 8 12	3 3 5	120 120 120
	SAE3	12	5	120
Überprüfung Gleichung & Diagramm	TOHO2	4 4 12 12	1 5 1 5	105 105 120 120
	SAE3	8 8 12	1 3 3	120 120 120
Überprüfung Diagramm	SAE3	4 8	3 5	120 105

Neben der Überprüfung der Haltbarkeit werden auch Versuche für die Überprüfung der Genauigkeiten der Funktionen (gelb) und der Ergebnisse der Gegenüberstellung der einzelnen Parameter gegenüber dem BF_{24h_w} (orange), sowie eine Kombination aus beiden Überprüfungs-arten (orange-gelb gestreift) durchgeführt. Die für die Überprüfung der Funktionen relevanten Parameterkombinationen eines jeden Materials sind in der Tabelle 3.4 tabellarisch aufgelistet.

3.2.4 Überprüfung der Materialien

Für die Überprüfung der Haltbarkeit des Materials TOHO1 wurde die Parameterkombination mit zwölf Lagen, einem Druck von 5 bar und einer Versuchstemperatur von 140 °C zweimal wiederholt. Wie in der Abbildung 3.16 zu sehen ist, ordnen sich die beiden Wiederholungen der Parameterkombination (0797 und 0803) bei den in vorangegangenen Versuchen ermittelten Ergebnissen ein.

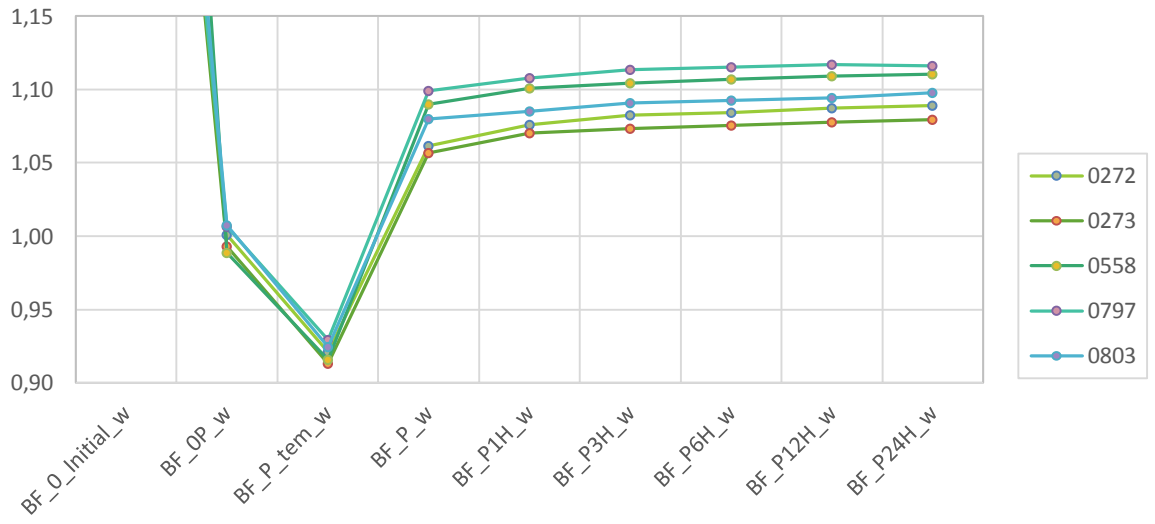


Abbildung 3.16: TOHO1 – Überprüfung des Materials

Bei einer dreimaligen Parameterwiederholung liegt immer eine gewisse Differenz zwischen den ermittelten Versuchsergebnissen vor, da ein Versuchswert nie zu 100 Prozent wieder erreicht wird. Da sich die beiden Wiederholungen der Parameterkombination gut einordnen, können die weiteren gesammelten Ergebnisse von den Versuchen für die Überprüfung der Genauigkeit der erstellten Ersatzfunktionen verwendet werden.

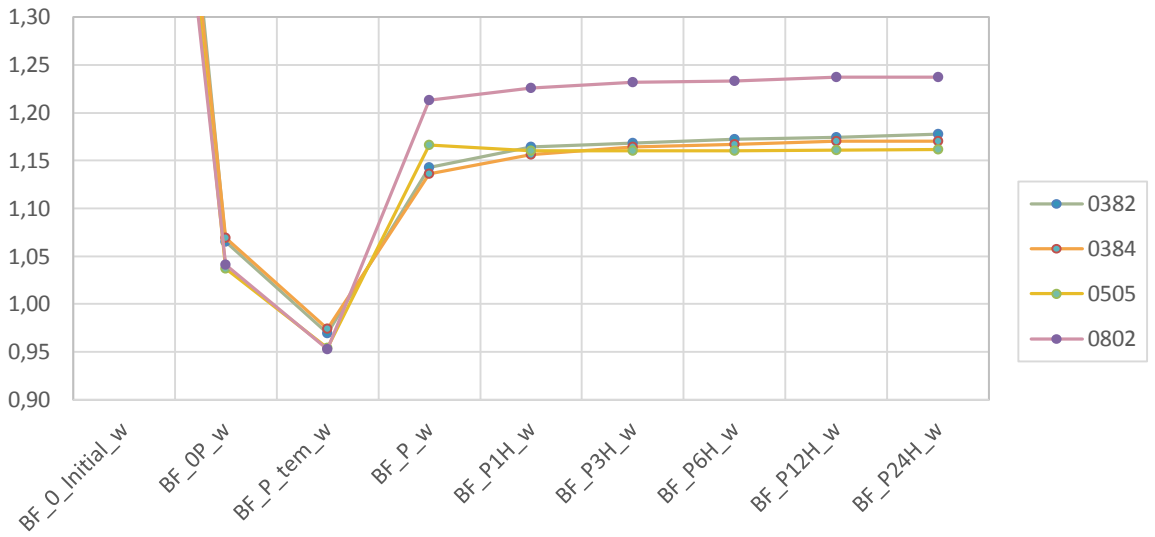


Abbildung 3.17: TOHO2 – Überprüfung des Materials

Die einmalige Wiederholung der Parameterkombination mit acht Lagen, 3 bar und 140 °C zur Überprüfung von der Haltbarkeit des Materials TOHO2 lässt erkennen, dass sich der ermittelte Bulkfaktor der Parameterwiederholung mit der Versuchsnummer 0802 außerhalb der Versuchsergebnisse der vorangegangenen Versuchen (0382, 0384 und 0505) einordnet (vgl. Abbildung 3.17). Da die Abweichung des Bulkfaktors von der Wiederholung zu groß ist, ist davon auszugehen, dass sich das Material nach dem Ablauf des Haltbarkeitsdatums verändert hat. Infolgedessen kann dadurch die Auswertung der Ersatzfunktionen verfälscht werden.

Abschließend wurde noch das letzte Versuchsmaterial (SAE3) auf seine Haltbarkeit hin kontrolliert. Dazu wurde für eine einmalige Versuchswiederholung die Parameterkombination mit acht Lagen, 5 bar und 120 °C ausgewählt. Wie in der Abbildung 3.18 zu erkennen ist, ordnet sich die Parameterwiederholung 0802 innerhalb der Versuchsergebnisse zu den aus vorangegangenen Versuchen ermittelten Bulkfaktoren ein. Aus diesem Grunde ist eine Auswertung der Ersatzfunktionen mit Hilfe der ermittelten Bulkfaktoren aus den weiteren Versuchen möglich.

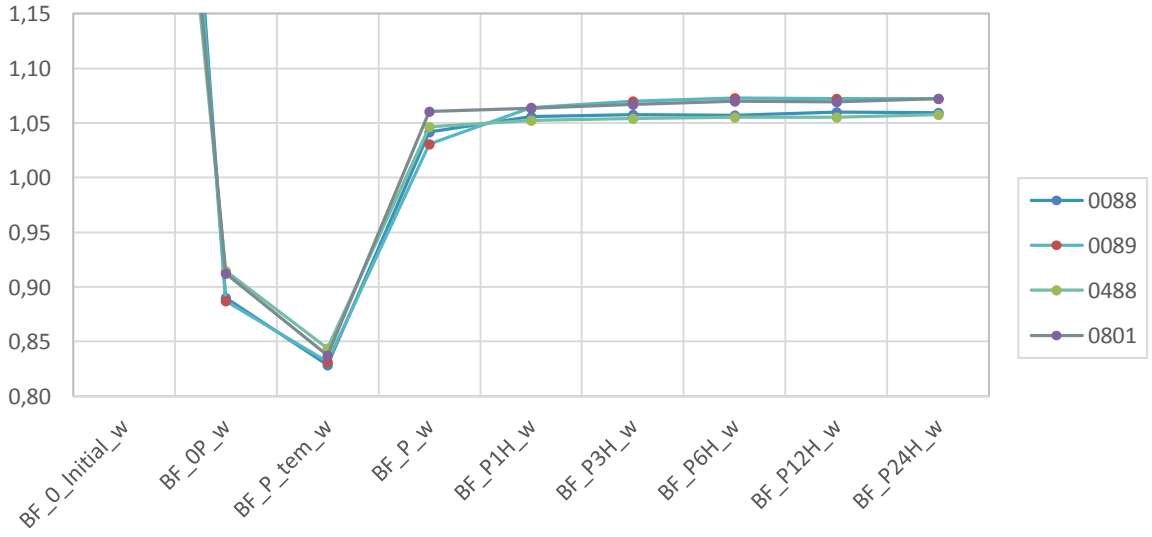


Abbildung 3.18: SAE3 – Überprüfung des Materials

3.2.5 Überprüfung der Gegenüberstellung der Versuchsparameter zum BF_{24h_w}

In diesem Abschnitt wird auf die Überprüfung der Gegenüberstellung der Einflussparameter zum BF_{24h_w} eingegangen. Da bei dem Material TOHO1 verhältnismäßig die meisten Parameterkombinationen der Versuchsmatrix gefahren wurden und sich im Vergleich zu den beiden anderen Materialien bei den einzelnen Gegenüberstellungen klare Trendlinienverläufe ohne starke Abweichungen bzw. unerklärliche Versuchsergebnisse aufzeigen, müssen die Ergebnisse von der Gegenüberstellung der Einflussparameter zum Bulkfaktor nicht durch weitere Parameterkombinationen kontrolliert werden. Wie bereits erwähnt, zeigten sich ausschließlich bei den Materialien TOHO2 und SAE3 in den Gegenüberstellungen Unregelmäßigkeiten. Für die Überprüfung der Unregelmäßigkeiten wurde auf Basis der Lücken in den Versuchsmatrizen eine neue Versuchsmatrix erstellt (vgl. Abschnitt 3.2.3). Im folgenden Abschnitt wird auf die Überprüfungen der einzelnen Gegenüberstellungen der Einflussparameter zum BF_{24h_w} eingegangen.

TOHO2

Die Analyse der Versuchsmatrix des Materials TOHO2 und die Gegenüberstellung der Lagenanzahl zum BF_{24h_w} ergab (vgl. 3.1.3), dass für die Lagenanzahl vier und zwölf zu wenige Parameterkombinationen bei den vorangegangenen Versuchen gefahren wurden. Somit wurden vorrangig Kombinationen mit einer Lagenanzahl von vier oder zwölf aus den Lücken für die Versuchsmatrix ausgewählt, um somit die Aussagekraft der Gegenüberstellung zu erhöhen. Wie in der Abbildung 3.19 zu erkennen ist, ordnen sich alle neuen Parameterkombinationen (rote Punkte) bis auf eine oberhalb der Lagenanzahlgruppierungen ein. Dies ist möglicherweise auf das Ablaufen der Haltbarkeit des Materials zurück zu führen. Des Weiteren ist dem Diagramm zu entnehmen, dass sich durch die neuen Parameterkombinationen der Trendlinienverlauf leicht verändert hat (grün gestrichelte Linie).

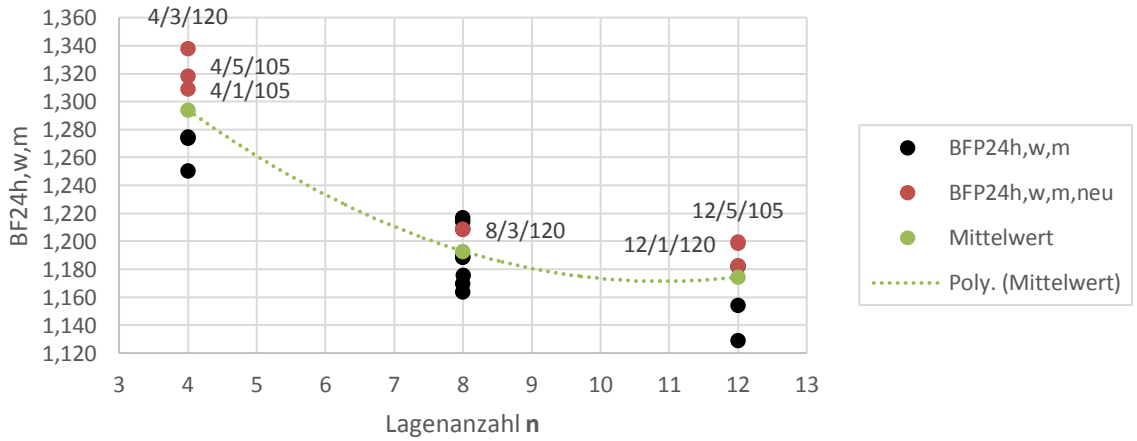


Abbildung 3.19: TOHO2 - Gegenüberstellung Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 2)

In der Abbildung 3.20 ist die Gegenüberstellung des Druckes zum Bulkfaktor mit neuen Versuchsergebnissen abgebildet. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Hälfte der Versuchsergebnisse weit oberhalb der Gruppierungen einsortiert. Diese liegen noch weit oberhalb der möglichen Ausreißer. Dies ist ein Indiz dafür, dass sich das Material durch die Überschreitung des Haltbarkeitsdatums verändert hat. Mit den neuen Versuchsergebnissen hat sich auch hier der Trendlinienverlauf minimal verändert.

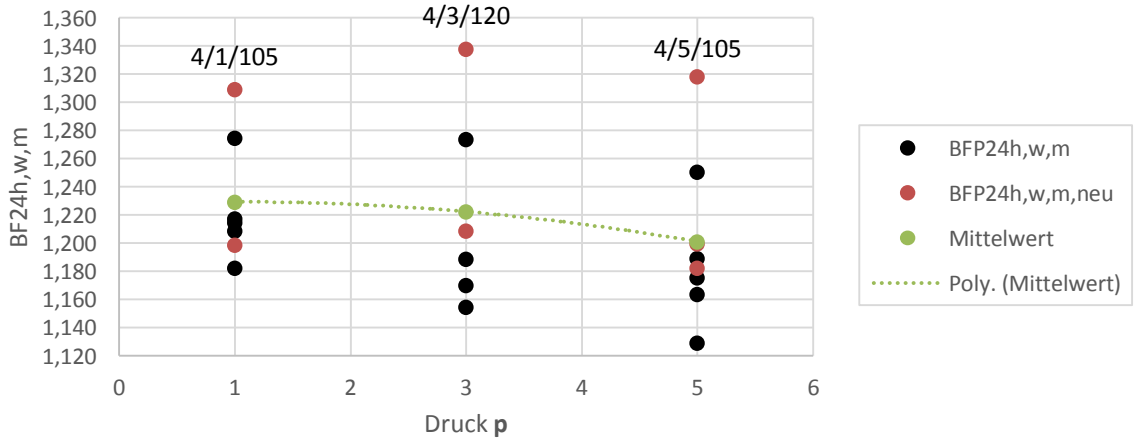


Abbildung 3.20: TOHO2 – Gegenüberstellung Druck *p* zum BF_{24h_w} (Teil 2)

Wie schon bei der Lagenanzahl wurden auch für die Temperaturen 105 °C und 120 °C zu wenig Parameterkombinationen in den vorangegangenen Versuchen durchgeführt. Um die Aussagekraft für diese beiden Temperaturen zu erhöhen, wurden noch nicht betrachtete Parameterkombinationen der Versuchsmatrix gefahren. Die Auswertung der Gegenüberstellung mit den neuen Versuchsergebnissen in Abbildung 3.21 lässt erkennen, dass sich die Hälfte der Versuchsergebnisse weit oberhalb der einzelnen Temperaturgruppierungen einordnet. Dadurch liegt auch hier die Vermutung nahe, dass sich durch das Ablaufen der Materialhaltbarkeit die Eigenschaften verändert haben. Gleichzeitig hat sich der Trendlinienverlauf minimal verbessert.

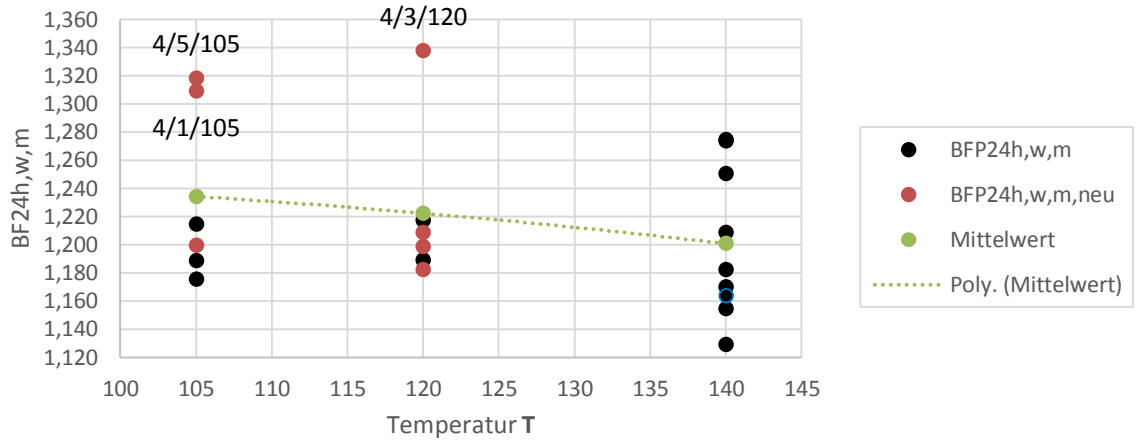


Abbildung 3.21: TOHO2 – Gegenüberstellung Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 2)

<u>SAE3</u>

Anhand der Abbildung 3.22 ist zu entnehmen, dass sich die neuen Parameterkombinationen innerhalb der Gruppen der bereits gefahrenen Kombinationen einordnen, wodurch auch keine Veränderung beim Verlauf der Trendlinie festzustellen ist.

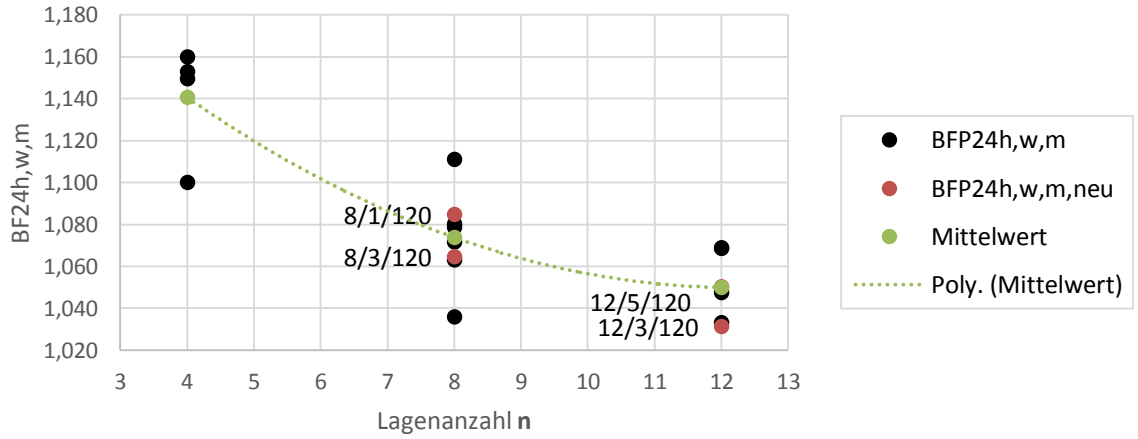


Abbildung 3.22: SAE3 - Gegenüberstellung Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 2)

Die Gegenüberstellung des Druckes zum BF_{24h_w} ergab im Abschnitt 3.1.3 einen zu den anderen Materialien veränderten Trendlinienverlauf. Daher wurden neue Parameterkombinationen festgelegt, um die Versuchsergebnisse zu den drei Drücken aus vorangegangenen Versuchen zu überprüfen. Wie anhand der Abbildung 3.23 zu entnehmen ist, ordnen sich die neuen Versuchsergebnisse dieser Parameterkombinationen mit 3 bar außerhalb der Versuchsgruppe ein. Die Versuchsergebnisse der 1 bzw. 5 bar Parameterkombinationen ordnen sich jedoch unterhalb

dieser Gruppen ein. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei den Versuchsergebnissen der 3 bar Parameterkombinationen aus den vorangegangenen Versuchen um mögliche Ausreißer handelt, genauso wie bei der einen 5 bar Parameterkombination. Mit Hilfe der neuen Versuchsergebnisse wird der Trendlinienverlauf etwas verbessert, jedoch zeigt sich immer noch eine nach unten geöffnete Parabel mit dem Maximum bei 3 bar. Durch die Versuchsergebnisse ist der Verlauf immer noch nicht plausibel.

Abschließend wird die Gegenüberstellung der Temperatur zum Bulkfaktor betrachtet (Abbildung 3.24). Aufgrund, dass bei den vorangegangenen Versuchen zu wenig Parameterkombinationen mit 120 °C gefahren worden sind, ist die Aussagekraft an dieser Stelle sehr gering bzw. zeigt sich ein ähnlicher Trendlinienverlauf wie bereits bei der Gegenüberstellung des Druckes.

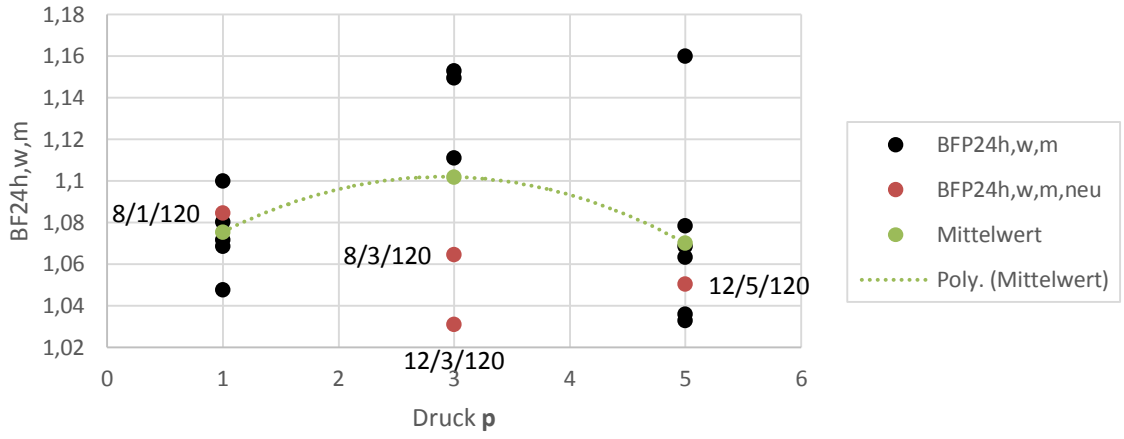


Abbildung 3.23: SAE3 – Gegenüberstellung Druck *p* zum BF_{24h_w} (Teil 2)

Durch das Einfügen von weiteren Parameterkombinationen mit 120 °C verändert sich der nach unten geöffnete Parabelverlauf zu einer fallenden Geraden, da sich die neuen Versuchsergebnisse unterhalb der bisherigen Versuchsergebnisse einordnen. Daher kann es sich bei der Parameterkombination vier Lagen, 3 bar und 120 °C um einen möglichen Ausreißer handeln.

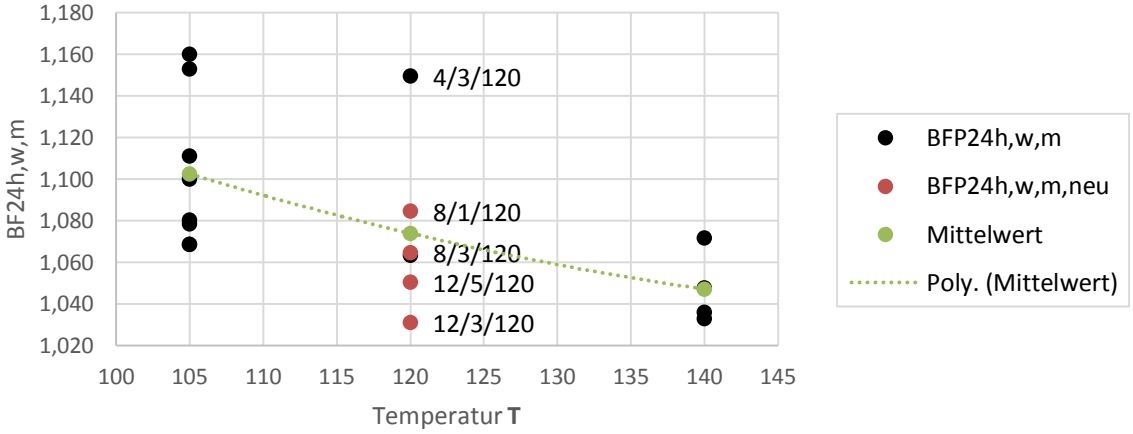


Abbildung 3.24: SAE3 – Gegenüberstellung Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 2)

3.2.6 Überprüfung der Genauigkeit der Ersatzfunktionen

Als nächstes wird auf die gewonnenen Erkenntnisse der Genauigkeitsüberprüfungen der einzelnen Funktionsansätze näher eingegangen. Nachdem mit Hilfe der Programme *Matlab* und *Optimus* die Funktionen mit unterschiedlichen Funktionsansätzen ermittelt wurden, werden die zu den Variablen zugehörigen Koeffizienten eines Funktionsansatzes in die für die Berechnung des Bulkfaktors erstellten Tabelle eingetragen und berechnet. Für die Erstellung der Ersatzfunktionen wurden sowohl die ungemittelten als auch die gemittelten Bulkfaktoren mit den jeweils zugehörigen Parameterkombinationen verwendet. Der Vergleich der Funktionsansätze auf Basis der gemittelten Bulkfaktoren mit den ungemittelten, als auch der berechneten Bulkfaktoren zeigt, dass sowohl die Koeffizienten sowie die berechneten Bulkfaktoren erst nach der achten Nachkommastelle Unterschiede aufweisen. In Abbildung 3.25 ist das am Beispiel des ersten Funktionsansatzes sowohl für *Optimus* (linear) als auch für *Matlab* (Grad 1) dargestellt. Auf Grund der Erkenntnisse, dass sich die berechneten Bulkfaktoren auf Basis der gemittelten Versuchsdaten von den ungemittelten nicht unterscheiden und bei der Auswertung der Versuchsergebnisse immer der aus drei Werten gemittelte Bulkfaktor verwendet wird, erfolgt die Auswertung der Genauigkeit der erstellten Ersatzfunktionen auf Basis der gemittelten Bulkfaktoren. Dieselben Erkenntnisse zeigen sich beim TOHO2 und SAE3.

I	J	AK	AL	BI	BJ	BY	BZ
Koeffizienten linear		**Koeffizienten Grad 1**		**Koeffizienten linear**		**Koeffizienten Grad 1**	
1	1,367496397833 5	1	1,367496397833 5	1	1,367496397664 2	1	1,367496397833 5
x1	-0,008314855065 2	x1	-0,008314855065 2	x1	-0,008314855084 9	x1	-0,008314855065 2
x2	-0,010262484112 2	x2	-0,010262484112 2	x2	-0,010262484149 5	x2	-0,010262484112 2
x3	-0,000897074312 9	x3	-0,000897074312 9	x3	-0,000897074310 1	x3	-0,000897074312 9
ALLE MESSWERTE				MITTELWERTE			
BERECHNUNG MIT OPTIMUS LINEAR		**BERECHNUNG MIT MATLAB** GRAD 1		**BERECHNUNG MIT OPTIMUS** LINEAR		**BERECHNUNG MIT MATLAB** GRAD 1	
BF_{24h_ber}	A Abweichung [%]	BF_{24h_ber}	A Abweichung [%]	BF_{24h_ber}	A Abweichung [%]	BF_{24h_ber}	A Abweichung [%]
1,229781691	0,142 0,752 2,837	1,229781691	0,142 0,752 2,837	1,229781691	1,257	1,229781691	1,257
1,19838409	1,892 1,092 0,223	1,19838409	1,892 1,092 0,223	1,19838409	0,913	1,19838409	0,913
1,177859121	0,788 0,789 2,790	1,177859121	0,788 0,789 2,790	1,177859121	0,952	1,177859121	0,952
1,157334153	0,102 0,223 0,478	1,157334153	0,102 0,223 0,478	1,157334153	0,268	1,157334153	0,268

Abbildung 3.25: Vergleich der auf Basis der ungemittelten und gemittelten Versuchsdaten erstellten Funktionen am Beispiel des TOHO1 (linear)

Im Folgenden wird auf die Überprüfungserkenntnisse der Funktionsansätze der drei Materialien eingegangen. Wie bereits im Abschnitt 3.2.2 erwähnt wurde, wird für die Auswertung einer jeden Funktion die prozentuale Abweichung der berechneten Bulkfaktoren zu den aus Versuchen gewonnenen Bulkfaktoren ermittelt.

Da die Abweichungen unterschiedlich groß sind, wird zusätzlich die durchschnittliche prozentuale Abweichung (arithmetischer Mittelwert) sowie die Streubreite um den Mittelwert (Standard-abweichung) berechnet und grafisch dargestellt. Die Genauigkeitsüberprüfung der Funktionen erfolgt sowohl auf Basis der zur Erstellung genutzten Versuchsdaten als auch der neuen Versuchsdaten, die bei der Funktionsaufstellung nicht berücksichtigt wurden. Diese werden bei der grafischen Darstellung unterschiedlich gekennzeichnet.

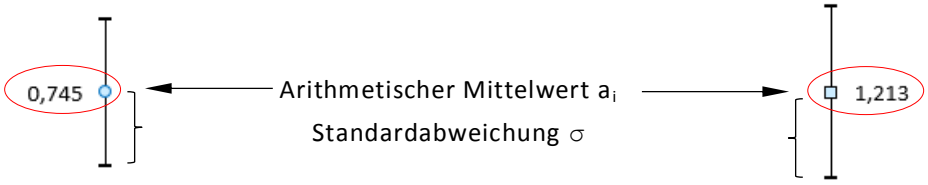


Abbildung 3.26: Auswertung auf Basis der gewählten Versuchsdaten (Kreis)

Abbildung 3.27: Auswertung auf Basis der neuen Versuchsdaten (Quadrat)

In den Abbildung 3.26 undAuswertung auf Basis der neuen Versuchsdaten (Quadrat)Abbildung 3.27 sind die grafischen Darstellungen der zwei Darstellungsarten der Genauigkeitsüberprüfung am Beispiel des TOHO1 (linearer Funktionsansatz) abgebildet. In der Tabelle 3.5 sind der arithmetische Mittelwert a_i sowie die Standardabweichung σ zu jeder Funktion tabellarisch aufgelistet. Des Weiteren wird jedem Funktionsansatz eine Farbe zugeordnet, die bei der grafischen Darstellung verwendet wird.

Tabelle 3.5: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der verschiedenen Funktionsansätze

Art Funktionsansatz	TOHO1		TOHO2		SAE3	
	a_i [%]	σ [%]	a_i [%]	σ [%]	a_i [%]	σ [%]
Linear	0,745	0,487	0,830	0,742	1,620	0,866
Linear (Ü)	1,213	0,575	4,501	1,988	0,994	0,772
Linear + interaction	0,485	0,392	0,842	0,650	1,344	0,749
Linear + interaction (Ü)	2,547	1,641	8,671	6,304	1,149	0,645
Quadratisch	1,043	0,535	0,320	0,229	0,854	0,633
Quadratisch (Ü)	1,650	0,978	5,421	3,454	3,560	2,620
Grad 1	0,745	0,487	0,830	0,742	1,620	0,866
Grad 1 (Ü)	1,213	0,575	4,501	1,988	0,994	0,772
Grad 2	0,410	0,287	0,320	0,229	0,647	0,380
Grad 2 (Ü)	1,766	1,334	5,464	3,467	2,587	1,598
Grad 3	0,157	0,086	0,227	0,226	0	0
Grad 3 (Ü)	53,530	42,251	20,239	9,321	3,051	2,342

Als erstes wurden die Ersatzfunktionen mit Hilfe der Versuchsdaten überprüft, auf deren Basis diese erstellt wurden. Wie der Abbildung 3.28 zu entnehmen ist, weist die mit *Matlab* erstellte Ersatzfunktion vom Grad 3 mit 0,157 Prozent die minimalste durchschnittliche Abweichung zwischen den berechneten und den aus Versuchen gewonnenen Bulkfaktoren auf, sowie die geringste Schwankung um den Mittelwert (dunkelgrüner Punkt).

Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der Überprüfung der Ersatzfunktionen auf Basis der neuen Versuchsdaten, dass die Funktionen mit einem linearen (auch Grad 1) Funktionsansatz die minimalste durchschnittliche Abweichung (1,213%) mit einer Standardabweichung von 0,535 Prozent besitzen (hellblau und lila Rechteck).

Bei der Betrachtung beider Aspekte, zeigt sich das beste Ergebnis sowohl bei einem linearen Funktionsansatz (*Optimus*) als auch beim Funktionsansatz vom Grad 1 (*Matlab*). Zwischen dem berechneten zu den ermittelten Bulkfaktoren aus den vorangegangenen Versuchen (0,745%) bzw. neu durchgeführten Versuchen (1,213%) ist die Abweichung zueinander am geringsten (hellblau und lila). Gleichzeitig ist die Standardabweichung von den beiden Überprüfungen mit ca. 0,5 Prozent gleich groß. Aus diesem Grund kann mit Hilfe eines linearen Funktionsansatzes (*Optimus*) als auch eines Funktionsansatzes vom Grad 1 (*Matlab*) der Bulkfaktor für das Material TOHO1 am besten vorhergesagt werden. Bei einer näheren Betrachtung der beiden Funktionen ist zu erkennen, dass die Koeffizienten einer Variablen (wie zum Beispiel x1) bis zu der achten Nachkommastelle identisch sind.

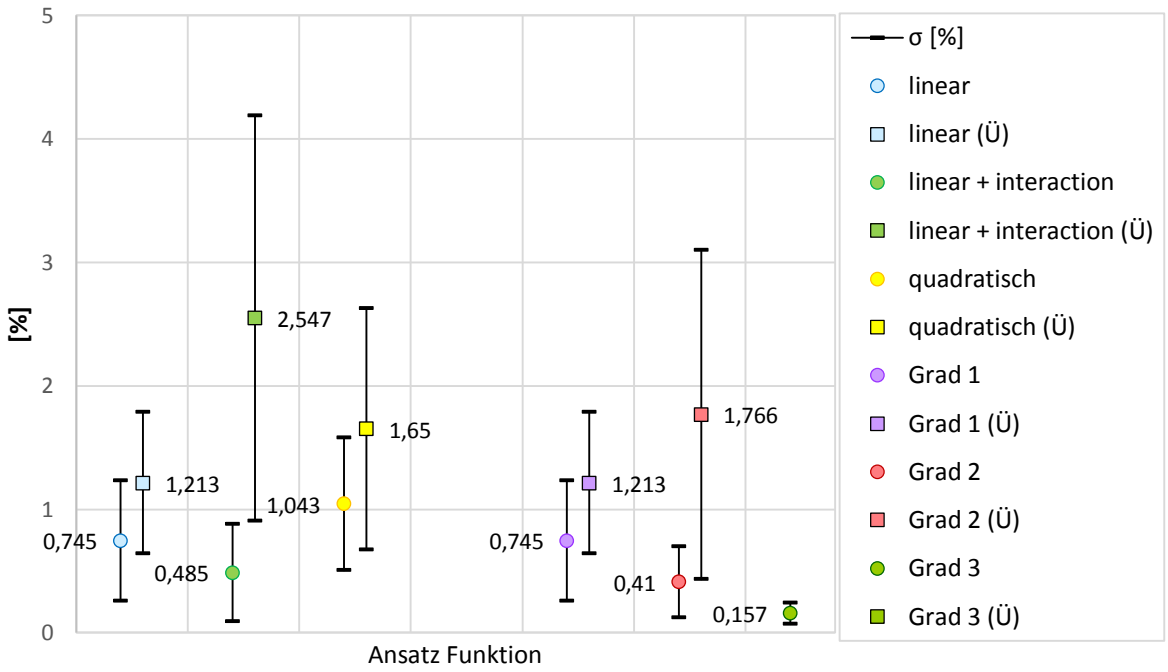


Abbildung 3.28: TOHO1 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen

Auch beim TOHO2 wurden zunächst die Funktionen mit Hilfe der für die Erstellung genutzten Versuchsdaten auf ihre Genauigkeit überprüft (siehe Abbildung 3.29). Dabei zeigte sich bei einem quadratischen Funktionsansatz (gelber Punkt, *Optimus*) als auch die über *Matlab* erstellten Funktionen des zweiten (roter Punkt) und dritten (dunkelgrüner Punkt) Grades, die minimalste durchschnittliche Abweichung zwischen den berechneten Bulkfaktoren zu denen aus Versuchen ermittelten. Diese beträgt ca. 0,3 Prozent mit einer Standardabweichung von etwa 0,23 Prozent.

Die Funktionsüberprüfung mit den neuen Bulkfaktoren, die bei der Funktionsaufstellung nicht berücksichtigt wurden, zeigt jedoch auch hier, dass das beste Ergebnis durch einen linearen Funktionsansatz (hellblaues Rechteckt, *Optimus*) oder einen Funktionsansatz vom Grad 1 (lila Rechteck, *Matlab*) wie bei dem TOHO1 vorhergesagt werden kann. Dabei beträgt die durchschnittliche Abweichung 4,50 Prozent mit einer Standardabweichung von 1,988 Prozent.

Genauso wie beim TOHO1 zeigt sich unter Einbeziehung beider Aspekte zur Überprüfung der Genauigkeit der einzelnen Funktionen, dass mit Hilfe eines linearen Funktionsansatzes (hellblau, *Optimus*) bzw. Grad 1 (lila, *Matlab*) die Bulkfaktoren am besten vorhergesagt werden können. Wie anhand der Abbildung 3.29 zu sehen ist, ist auch hier zwischen den berechneten und ermittelten

Bulkfaktoren aus den vorangegangenen Versuchen mit 0,83 Prozent bzw. den neu durchgeführten Versuchen mit 4,50 Prozent die Abweichung zu einander am geringsten. Jedoch sind die Schwankungen um den Mittelwert im Vergleich zum TOHO1 größer. Dabei ergab sich bei der Überprüfung der Funktionen mit den neu festgelegten Versuchsdaten eine Schwankung von 1,988 Prozent um den Mittelwert. Diese ist mehr als doppelt so groß wie die Schwankung der Überprüfung der Funktion mit den Versuchsdaten, auf dessen Grundlage die Funktion erstellt wurde (0,742%). Durch einen Vergleich der mit *Optimus* erstellten linearen Ersatzfunktion mit der von *Matlab* erstellten (Grad 1) lässt sich erkennen, dass bei beiden Funktionen die Koeffizienten der Variablen identisch sind.

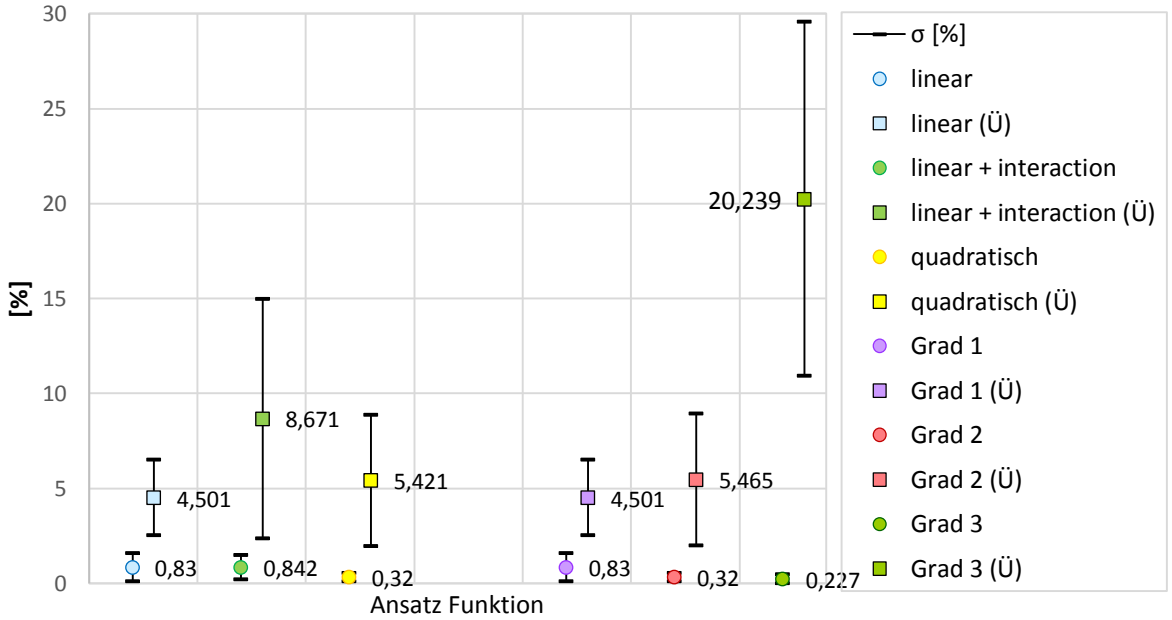


Abbildung 3.29: TOHO2 – arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen

Abschließend wird auf die Genauigkeitsüberprüfung des SAE3 eingegangen. Die Überprüfung der Funktionen mit den für die Erstellung genutzten Versuchsdaten hat mit der von *Matlab* erstellten Ersatzfunktion vom dritten Grad das beste Ergebnis ergeben (dunkelgrüner Punkt). Dabei ist die Abweichung zwischen den berechneten Bulkfaktoren zu den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktoren gleich null (vgl. Abbildung 3.30).

Die Genauigkeitsüberprüfung der Funktionen mit Hilfe der aus neuen Versuchen gewonnenen Bulkfaktoren zeigt jedoch, dass die mit *Optimus* erstellte Ersatzfunktion „linear + interaction“ mit einem Mittelwert von 1,149 Prozent die minimalste durchschnittliche Abweichung zwischen den berechneten und den aus den Versuchen ermittelten Bulkfaktoren besitzt. Die Standard-abweichung der berechneten Bulkfaktoren vom Mittelwert beträgt 0,645 Prozent.

Zum Schluss wird die Genauigkeitsüberprüfung der Funktionen unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus der Funktionsüberprüfung mit Hilfe von den aus neuen Versuchen gewonnenen Bulkfaktoren und den Erkenntnissen der Funktionsüberprüfung mit den für die Erstellung genutzten Versuchsdaten betrachtet. Im Gegensatz zu den beiden anderen Materialien kann der Bulkfaktor mit Hilfe des Funktionsansatzes „linear + interaction“ am besten berechnet werden. Zwischen dem berechneten und den ermittelten Bulkfaktoren aus den vorangegangenen Versuchen (1,344%) bzw. den neu erstellten Versuchen (1,149%) ist die Abweichung zueinander

am geringsten (hellgrün). Die Standardabweichung der beiden Überprüfungen ist mit ca. 0,7 Prozent gleich groß.

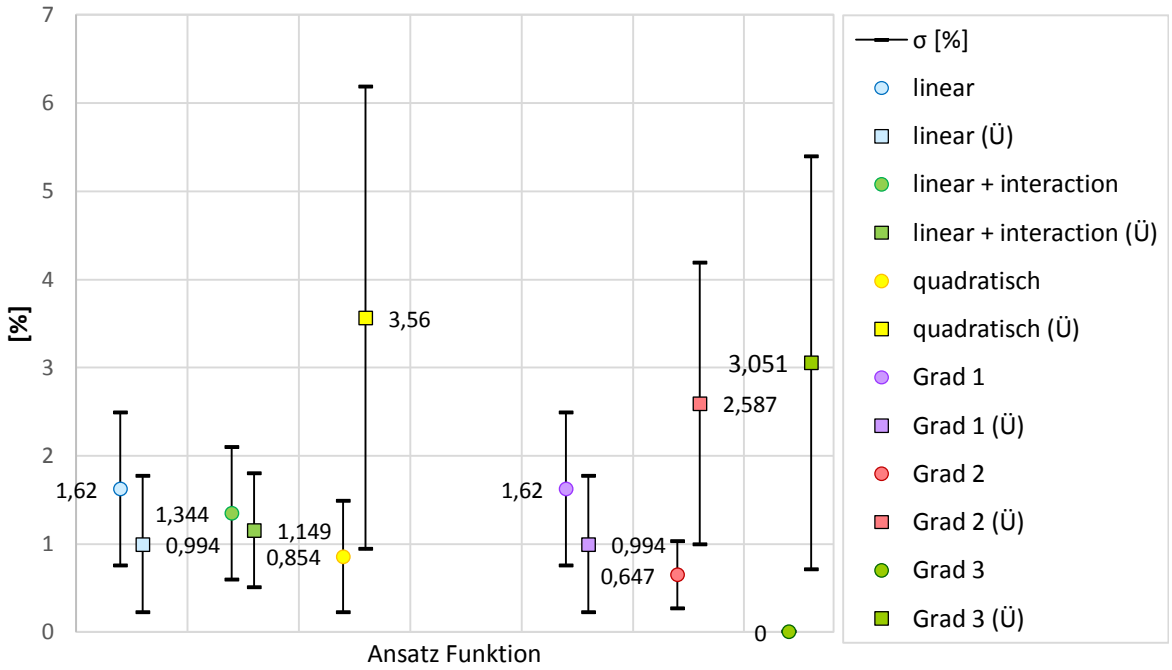


Abbildung 3.30: SAE3 – arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen

3.2.7 Zwischenfazit

Die Genauigkeitsüberprüfung der verschiedenen erstellten Funktionen eines Materials hat ergeben, dass mit einem linearen Funktionsansatz für die Materialien TONO1 und TOHO2 und mit dem Funktionsansatz „linear + interaction“ für das Material SAE3 der Bulkfaktor mit der geringsten Abweichung zum Versuchswert berechnet werden kann.

Neben der Genauigkeitsüberprüfung der Funktionen wurde die Haltbarkeit der Materialien überprüft. Dabei zeigte sich durch die Wiederholung von schon gefahrenen Parameterkombinationen, dass das TOHO2 nach dem Ablaufen der Haltbarkeit Abweichungen zwischen den Bulkfaktoren aufweist. Somit kann die Genauigkeitsüberprüfung, die mit Hilfe von den neuen Versuchsdaten durchgeführt wurde, ebenfalls Abweichungen aufweisen, die wiederum zu falschen Schlussfolgerungen führt. Die Materialüberprüfung der TOHO1 und SAE3 ergab keine Abweichungen.

Wie auch bei der Genauigkeitsüberprüfung der Ersatzfunktionen wurde durch die Verwendung der Versuchsdaten der neuen Versuche die Gegenüberstellung der Einflussparameter zum Bulkfaktor überprüft. Auch hier zeigten sich Abweichungen sowie noch unerklärliche Trendlinienverläufe bei dem TOHO2. Dasselbe wurde auch beim SAE3 festgestellt. Lediglich das TOHO1 wies keine ungewöhnlichen Trendlinienverläufe auf. Da zwei der untersuchten Materialien Abweichungen aufweisen, wird die Erstellung der Ersatzfunktionen auf der Grundlage der Versuchsdaten erstellt, die bei den vorangegangenen Versuchen ermittelt wurden. Zu diesem Zeitpunkt der Versuche war das Haltbarkeitsdatum der Materialien noch nicht überschritten. Da beim TOHO1 im Vergleich zu den anderen Materialien die meisten Parameterkombinationen gefahren worden sind und sich auch bei der Gegenüberstellung der Einflussparameter zum Bulkfaktor plausible Trendlinien-

verläufe zeigten, wird im Folgenden ausschließlich mit den Versuchsdaten von dem TOHO1 gearbeitet.

Im nächsten Schritt soll untersucht werden, wie viele und welche Parameterkombinationen mindestens in die Programme für die Funktionserstellung eingeladen werden müssen, um die minimalste Abweichung zwischen dem berechneten und den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktor zu erhalten.

3.3 Identifikation des minimalsten Versuchsaufwandes

Um eine Ersatzfunktion für ein Material aufstellen zu können, müssen zunächst Versuche gefahren werden. Dadurch wird zu jeder Parameterkombination ein Bulkfaktor ermittelt. Auf Grundlage dieser Parameterkombinationen mit den zugehörigen Versuchsergebnissen kann eine Ersatzfunktion erstellt werden. Um jedoch dabei den Versuchsaufwand so gering wie möglich zu halten, soll analysiert werden, wie viele und welche Parameterkombinationen eingeladen werden müssen, um ein gutes Ergebnis bei der Ersatzfunktion zu erhalten. Gleichzeitig muss dabei analysiert werden, mit welchem Funktionsansatz die Abweichung zwischen den berechneten Bulkfaktoren zu den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktor am geringsten ist. Im Folgenden werden diese Untersuchungen mit den zur Verfügung stehenden Parameterkombinationen und dem zugehörigen Bulkfaktor aus den vorangegangenen Versuchen durchgeführt. Die Analyse der Datenbank zum TOHO1 (Abschnitt 3.1.2) zeigte, dass bei den vorangegangenen Versuchen 16 von 27 Parameterkombinationen der Versuchsmatrix gefahren wurden. Im Vergleich zum TOHO2 und SAE3 wurden die meisten Parameterkombinationen in den Versuchen berücksichtigt, sowie zeigten sich die schlüssigsten Trendlinienverläufe bei der Gegenüberstellung der Einflussparameter zum Bulkfaktor. Des Weiteren ergab die Analyse des TOHO1, dass alle Parameterkombinationen mit einer Lagenanzahl von acht Lagen in Versuchen durchgeführt wurden. Auch bei der Temperatur von 140 °C sind ebenfalls alle Parameterkombinationen gefahren worden.

Tabelle 3.6: Versuchsmatrix – alle Kombinationen mit 8 Lagen und 140 °C

Alle mit 8 Lagen			Alle mit 140 °C		
Lagenanzahl *n* [-]	**Druck** *p* [bar]	**Temperatur** *T* [°C]	**Lagenanzahl** *n* [-]	**Druck** *p* [bar]	**Temperatur** *T* [°C]
8	1	105	4	1	140
8	1	120	4	3	140
8	1	140	4	5	140
8	3	105	8	1	140
8	3	120	8	3	140
8	3	140	8	5	140
8	5	105	12	1	140
8	5	120	12	3	140
8	5	140	12	5	140

Auf der Grundlage von den neun Parameterkombinationen mit einer Lagenanzahl von acht Lagen sowie einer Temperatur von 140 °C (siehe Tabelle 3.6) wird jeweils eine Ersatzfunktion erstellt. Dabei werden zunächst einmal nur die Funktionen mit einem lineare Funktionsansatz aufgestellt und die Versuchsparameter der bereits durchgeführten Kombinationen der Versuchsmatrix in die Ersatzfunktionen eingesetzt. Die berechneten Bulkfaktoren werden anschließend mit den Bulkfaktoren, die bei den Versuchen ermittelt wurden, verglichen.

In der Abbildung 3.31 sind die Bulkfaktoren grafisch abgebildet. Anhand von diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen den berechneten und aus Versuchen ermittelten Bulkfaktoren bei den Parameterkombinationen am geringsten sind, auf dessen Basis die Ersatzfunktionen erstellt wurden (BF24h_w8, BF24h_w140). Bei den restlichen Parameterkombinationen, die bei der Aufstellung der Ersatzfunktionen nicht verwendet wurden, weisen die berechneten Bulkfaktoren zu den Vergleich-Bulkfaktoren eine sehr viel größere Differenz auf (BF24h_w8Ü, BF24h_w140Ü).

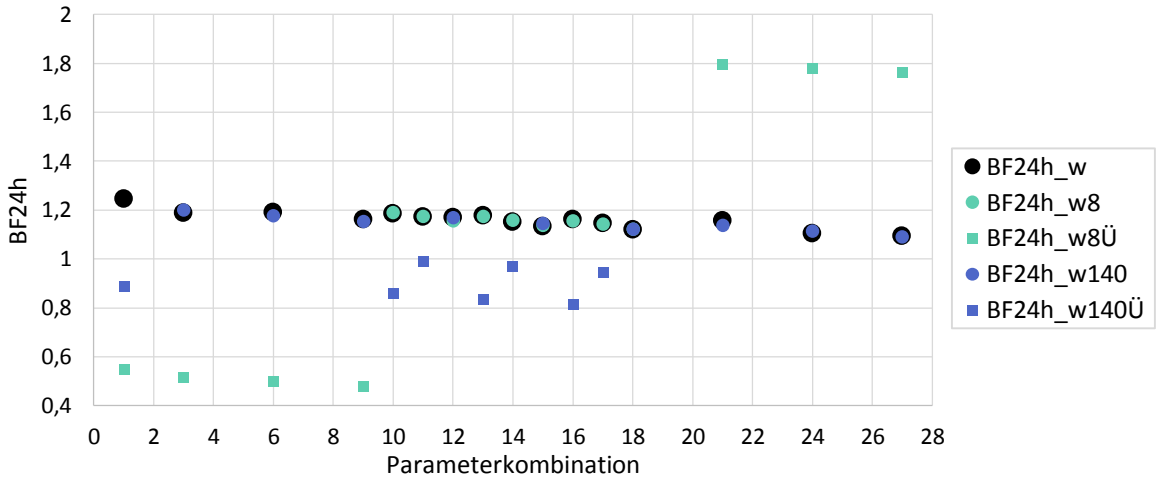


Abbildung 3.31: Verlauf der BF_{24h} von „alle mit 8 Lagen“ und „alle mit 140 °C“

Somit muss bei der Erstellung einer Ersatzfunktion beispielsweise bei den Parametern mehr als nur eine Lagenanzahl oder Temperatur verwendet werden. Unter Anwendung dieser Erkenntnis werden drei weitere Kombinationen aus den Parametern zusammengestellt. Die Kombination „Kombi 1“ besteht aus neun Parameterkombinationen, die in der Tabelle 3.7 aufgelistet sind. Da jedoch die Versuchsmatrix vom TOHO1 Lücken aufweist, muss die anfänglich aufgestellte „Kombi 1“ dementsprechend angepasst werden. Somit werden die in der Tabelle rot markierten Parameterkombinationen entsprechend angepasst. Bei den zwölf Lagen wurden je Druck ausschließlich nur Kombinationen mit einer Temperatur von 140 °C gefahren. Dasselbe zeigte sich auch bei den Parameterkombinationen mit vier Lagen. Die angepasste „Kombi 1“ ist ebenfalls in der Tabelle zu sehen.

Tabelle 3.7: Versuchsmatrix – Kombi 1

Art Parameter-kombination	Geplante Kombi			Angepasste Kombi		
	Lagenanzahl *n* [-]	Druck *p* [bar]	Temperatur *T* [°C]	Lagenanzahl *n* [-]	Druck *p* [bar]	Temperatur *T* [°C]
Kombi 1	4	1	105	4	1	105
	4	1	120	4	3	140
	4	1	140	4	5	140
	8	3	105	8	3	105
	8	3	120	8	3	120
	8	3	140	8	3	140
	12	5	105	12	1	140
	12	5	120	12	3	140
	12	5	140	12	5	140

Die zweite Kombination „Kombi 2“ wurde auf drei Parameterkombinationen beschränkt. Hier wurden jeweils die kleinen Parameter (4 Lagen, 1 bar und 105 °C) zu einer Parameterkombination zusammengestellt sowie die mittleren und die größten (vgl. Tabelle 3.8). Da dies nur drei Parameterkombinationen sind, müssen die ungemittelten Bulkfaktoren mit den zugehörigen Parametern in *Optimus* eingeladen werden, damit eine Ersatzfunktion aufgestellt werden kann (Minimum linear = 4).

Tabelle 3.8: Versuchsmatrix – Kombi 2

Art Parameter-kombination	Lagenanzahl *n* [-]	Druck *p* [bar]	Temperatur *T* [°C]
Kombi2	4 8 12	1 3 5	105 120 140

Wie in der Tabelle 3.9 zu sehen ist, besteht die letzte Kombination „Kombi 3“ aus sechs Parameterkombinationen. Jedoch musste auch hier die anfänglich aufgestellte „Kombi 3“ angepasst werden, da die Parameterkombination zwölf Lagen, 1 bar und 105 °C nicht gefahren wurden.

Tabelle 3.9: Versuchsmatrix – Kombi 3

Art Parameter-kombination	Geplante Kombi			Angepasste Kombi		
	Lagenanzahl *n* [-]	Druck *p* [bar]	Temperatur *T* [°C]	Lagenanzahl *n* [-]	Druck *p* [bar]	Temperatur *T* [°C]
Kombi 3	4 4 8 8 12 12	1 5 1 5 1 5	105 140 105 140 105 140	4 4 8 8 12 12	1 5 1 5 1 5	105 140 105 140 140 140

Im nächsten Schritt werden auf Basis der Kombinationen die Ersatzfunktionen mit unterschiedlichen Funktionsansätzen aufgestellt und anschließend deren Genauigkeit bei der Berechnung der Bulkfaktoren überprüft.

3.3.1 Überprüfung der Genauigkeit der Ersatzfunktionen

Wie schon bei der Überprüfung von den vorherigen Ersatzfunktionen, wird hier nach demselben Prinzip vorgegangen. Nach der Berechnung der Bulkfaktoren, wird die prozentuale Abweichung zu den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktoren bestimmt, sowie der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung.

Als erstes wird auf die Erkenntnisse der Genauigkeitsüberprüfung von der „Kombi 1“ eingegangen. Das einsetzen aller durchgeführten Parameterkombinationen des TOHO1 in die Ersatzfunktionen hat ergeben, dass bei einem linearen Funktionsansatz die Abweichungen zwischen den Bulkfaktoren am geringsten sind (vgl. Abbildung 3.32). Sowohl die Abweichungen der durch Versuche ermittelten Bulkfaktoren zu den berechneten Bulkfaktoren, auf dessen Parameterkombinationen die Ersatzfunktion erstellt wurde, als auch zu den berechneten Bulkfaktoren, auf dessen Parameterkombinationen die Ersatzfunktion überprüft wird. Bei der Überprüfung von der

Funktionsaufstellung ergab sich eine durchschnittliche prozentuale Abweichung von 1,171 Prozent mit einer Standardabweichung von 0,703 Prozent. Ähnliche Werte ergaben sich bei der Funktionsüberprüfung. Die durchschnittliche prozentuale Abweichung beträgt 1,512 Prozent mit einer Streubreite von 0,852 Prozent. Die Berechnung der Bulkfaktoren mit den restlichen Funktionen der „Kombi 1“ weist eine geringere Genauigkeit auf, was der Abbildung zu entnehmen ist.

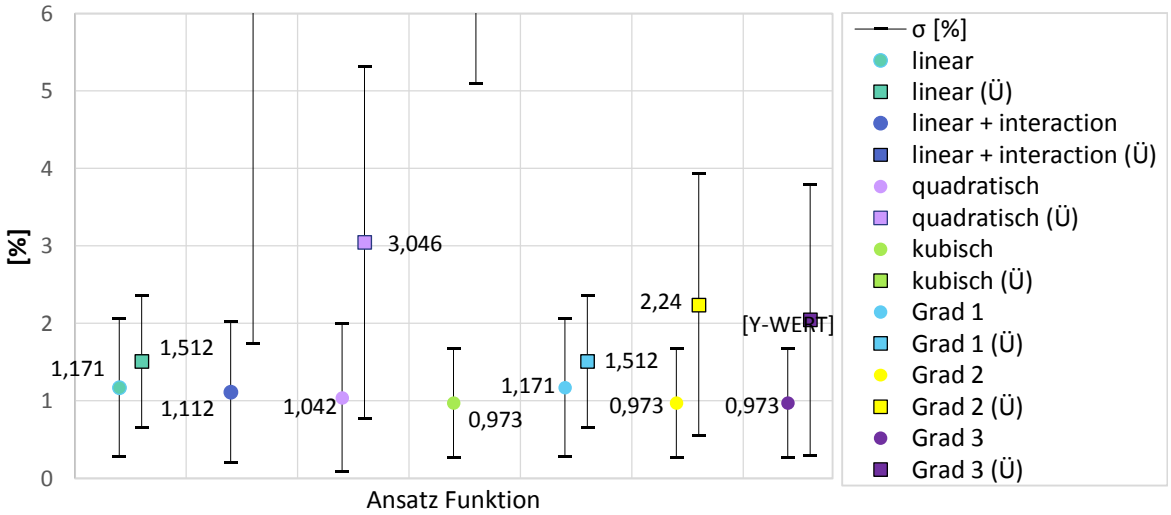


Abbildung 3.32: Kombi1 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen

In der Abbildung 3.33 sind die Erkenntnisse der Genauigkeitsüberprüfung der Ersatzfunktionen, die auf der Grundlage von der „Kombi 2“ aufgestellt wurden, grafisch abgebildet. Wie dabei zu erkennen ist, ist die Abweichung der durch Versuche ermittelten Bulkfaktoren zu den berechneten Bulkfaktoren, auf dessen Parameterkombinationen die Ersatzfunktionen überprüft werden, sehr groß. Dieses Ergebnis zeigt sich sowohl bei den mit *Matlab* als auch den mit *Optimus* erstellten Ersatzfunktionen. Für die Funktionsansätze quadratisch und kubisch konnte keine Funktion aufgestellt werden, da zu wenig Parameterkombinationen in der „Kombi 2“ für höhere Funktionsansätze enthalten sind. Da die durchschnittlichen prozentualen Abweichungen zwischen den berechneten Bulkfaktoren zu den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktoren sowie die Standardabweichung zu groß sind, werden diese in der Abbildung nicht mit dargestellt.

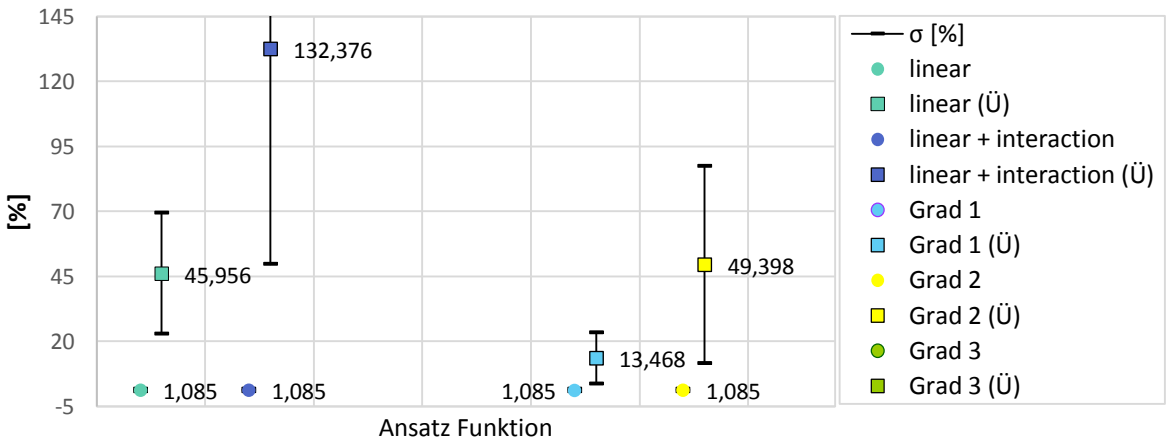


Abbildung 3.33: Kombi2 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen

Abschließend wird noch auf die Genauigkeitsüberprüfung von der „Kombi 3“ eingegangen. Wie schon bei den vorherigen Genauigkeitsüberprüfungen, zeigte sich auch hier die minimalste Abweichung zwischen den Bulkfaktoren bei einem linearen Funktionsansatz (vgl. Abbildung 3.34). Mit einer durchschnittlichen prozentualen Abweichung von 0,717 Prozent von den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktoren zu den berechneten. Diese wurden mit den Parameterkombinationen der „Kombi 3“ bestimmt. Die Standardabweichung beträgt 0,715 Prozent. Die Überprüfung der Ersatzfunktion mit den Parameterkombinationen, welche bei der Funktionsaufstellung nicht mitberücksichtigt wurden, ergab eine durchschnittliche prozentuale Abweichung von 2,102 Prozent mit einer Standardabweichung von 1,269 Prozent. Mit der Menge an enthaltenen Parameterkombinationen der „Kombi 3“ ist es mit Optimus nicht möglich eine Funktion mit kubischen Funktionsansatz zu bestimmen. Bei Matlab konnte eine Funktion dritten Grades bestimmt werden, jedoch sind die Abweichungen zwischen den berechneten Bulkfaktoren zu den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktoren zu groß. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse grafisch nicht abgebildet.

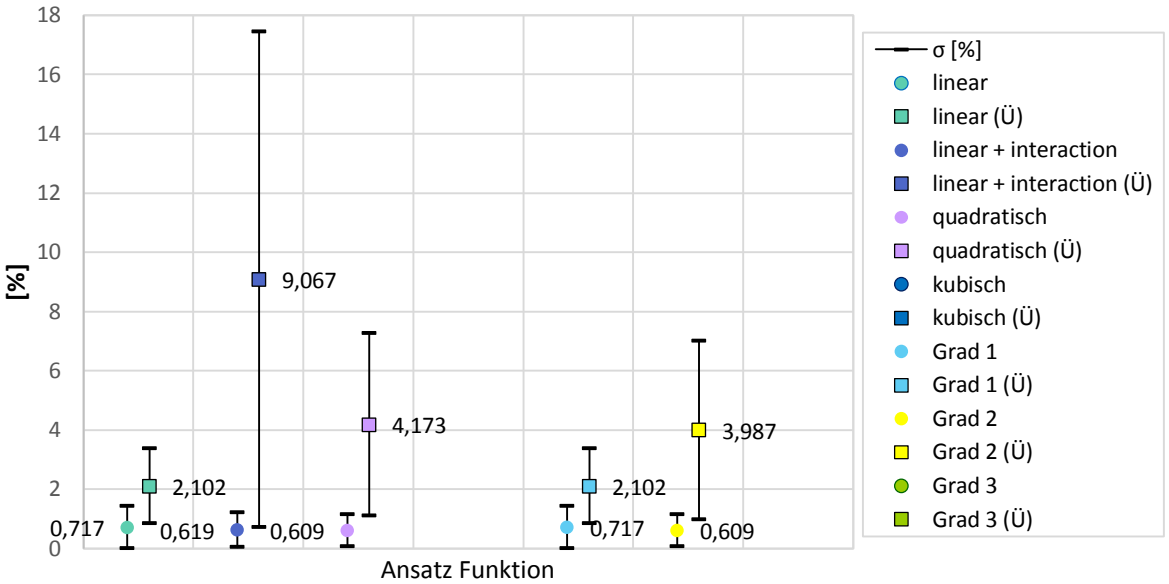


Abbildung 3.34: Kombi3 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen

Im Anhang I sind zu jeder Kombination der arithmetische Mittelwert mit der zugehörigen Standardabweichung tabellarisch aufgelistet.

3.3.2 Auswertung und Folgerung

Mit Hilfe der Genauigkeitsüberprüfung von den erstellten Funktionen wurde die Menge sowie die Kombinationen an Parametern definiert. Gleichzeitig wird dadurch der maximale Versuchsaufwand für die Erstellung einer Ersatzfunktion beschrieben.

Wie sich bei der Analyse der berechneten Bulkfaktoren zeigte, sollten jeweils der kleinste und der größte Wert eines Parameters von der Lagenanzahl, dem Druck und der Temperatur in der Versuchsmatrix bei der Erstellung einer Ersatzfunktion berücksichtigt werden. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu großen Abweichungen zwischen den Bulkfaktoren. Des Weiteren bestätigte sich auch hier, dass für die Erstellung einer Ersatzfunktion ein linearer Funktionsansatz das beste Ergebnis zur Berechnung des Bulkfaktors bringt.

Um den geringsten Versuchsaufwand für die Erstellung einer Ersatzfunktion zu definieren, wurden Versuchsmatrizen mit unterschiedlichen Anzahlen an Parameterkombinationen erstellt. Dabei zeigte sich bei einer Versuchsmatrix, die aus sechs Parameterkombinationen besteht, dass der Bulkfaktor mit einer geringen prozentualen Abweichung zu den aus Versuchen ermittelten Bulkfaktor berechnet werden kann. Das bedeutet, dass zum Beispiel bei einer Matrix mit 27 Parameterkombinationen nur ein Viertel von diesen in Versuchen gefahren werden muss, um eine Ersatzfunktion aufstellen zu können.

3.4 Veränderung des Versuchsablaufes

Neben der Bestimmung einer Ersatzfunktion wurden auch neue Versuchsabläufe bei der Kompaktierung untersucht. Dabei wurden ausschließlich Änderungen bei der Starttemperatur als auch bei der Anzahl der Kompaktierungszyklen vorgenommen. Um die Ergebnisse untereinander Vergleichen zu können, werden alle Versuche mit dem Material TOHO3 bei einer Lagenanzahl von acht Lagen, einem Druck von 3 bar und einer Temperatur von 130 °C gefahren. Durch einen Vergleich der Ergebnisse mit denen des bisher gefahrenen Versuchsablaufes bei der Kompaktierung, sollen mögliche Veränderungen festgestellt werden. Im Folgenden wird näher auf die veränderten Versuchsabläufe bei der Kompaktierung eingegangen.

3.4.1 Varianten

Bei dem Versuchsablauf von der Variante 1 erfolgt lediglich eine Veränderung bei der Starttemperatur. Somit wird diese von 31 °C auf die Prozesstemperatur von 130 °C hochgesetzt. Aus diesem Grund findet die gesamte Kompaktierungsphase des Lagenstapels unter dem Einwirken von Druck und Temperatur statt. Mit dem Erreichen des Endes von der Kompaktierungsphase erfolgt die Abkühlung des Lagenstapels unter der Einwirkung des anfänglich eingestellten Druckes auf eine Temperatur von 31 °C. Wenn die Temperatur von 31 °C erreicht ist, wird der Prüfstand automatisch wieder aufgefahren. Da sich die Heizplatten für die nächste Kompaktierung selbstständig auf die eingestellte Starttemperatur aufheizen, muss der Prüfling zügig von der unteren Heizplatte entnommen werden, um ein Wiederaufwärmen zu vermeiden. Insgesamt wird dieser Versuchsablauf einmal gefahren.

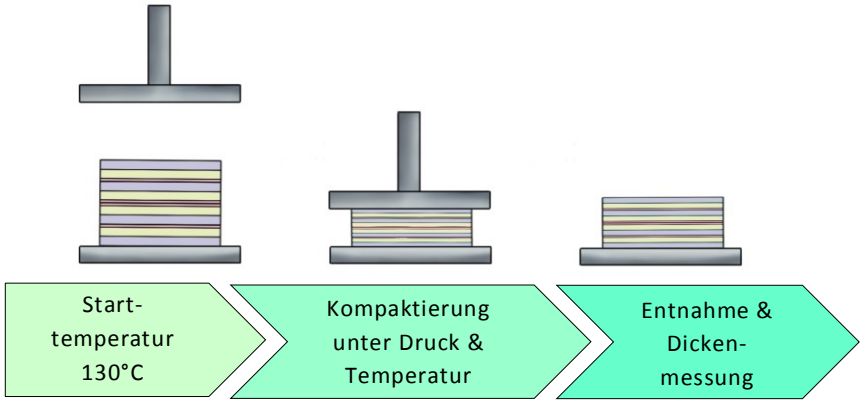


Abbildung 3.35: Versuchsablauf der Variante 1

Wie auch bei der Variante 1 wird bei der Variante 2 die Starttemperatur der Kompaktierung von 31 °C auf die Prozesstemperatur von 130 °C erhöht, wodurch die Kompaktierungsphase ebenfalls unter dem Einwirken von Druck und Temperatur abläuft. Nach der Kompaktierung wird der Lagenstapel unter der Einwirkung von Druck wieder auf 31 °C runter gekühlt. Wie schon bei der

vorherigen Variante muss auch bei dieser der Prüfling zügig von der Heizplatte entnommen werden, um ein Wiederaufwärmen des Prüflings zu vermeiden. Nach der Kompaktierung wird am Langzeitprüfstand die Dicke der Preform gemessen, bevor der nächste Kompaktierungszyklus nach dem beschriebenen Ablauf gefahren werden kann. Doch zunächst müssen die Heizplatten auf die eingestellte Starttemperatur aufgeheizt sein, erst dann kann der Preform zwischen diesen platziert werden und der zweite Zyklus gestartet werden. Insgesamt werden drei Kompaktierungszyklen hinter einander gefahren.

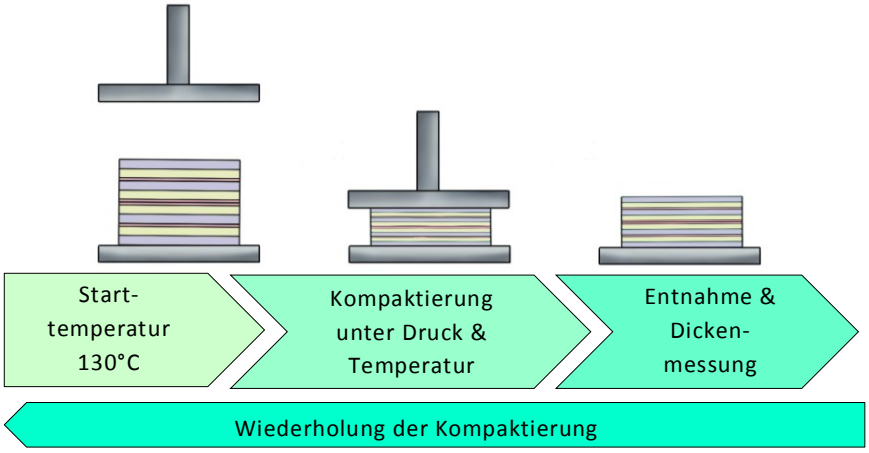


Abbildung 3.36: Versuchsablauf der Variante 2

Die letzte Variante (Variante 3) erfolgt nach demselben Prinzip, wie bei den bisher gefahrenen Kompaktierungen. Als erstes wird der Lagenaufbau für die Dauer der Druckhaltezeit mit Druck von 3 bar versehen. Nach dem Ablauf der Druckhaltezeit, heizen die Heizplatten von der Starttemperatur (31 °C) auf die eingestellte Zieltemperatur auf bis diese erreicht ist. In dieser Phase wird der Lagenaufbau für die festgelegte Temperaturhaltezeit unter dem gleichzeitigen Einwirken von Druck und Temperatur kompaktiert. Mit dem Ende von der Temperaturhaltezeit muss die Probe wieder auf 31 °C abgekühlt werden. Dies wird über einen Luftstrom realisiert. Mit dem Erreichen der 31 °C wird der Prozess automatisch beendet. Nach der Kompaktierung wird an dem Langzeitprüfstand die Preformdicke ermittelt. Wie schon bei der Variante 2 werden bis zu drei Kompaktierungszyklen hintereinander gefahren und zwischen jeder Kompaktierung die Preformdicke ermittelt.

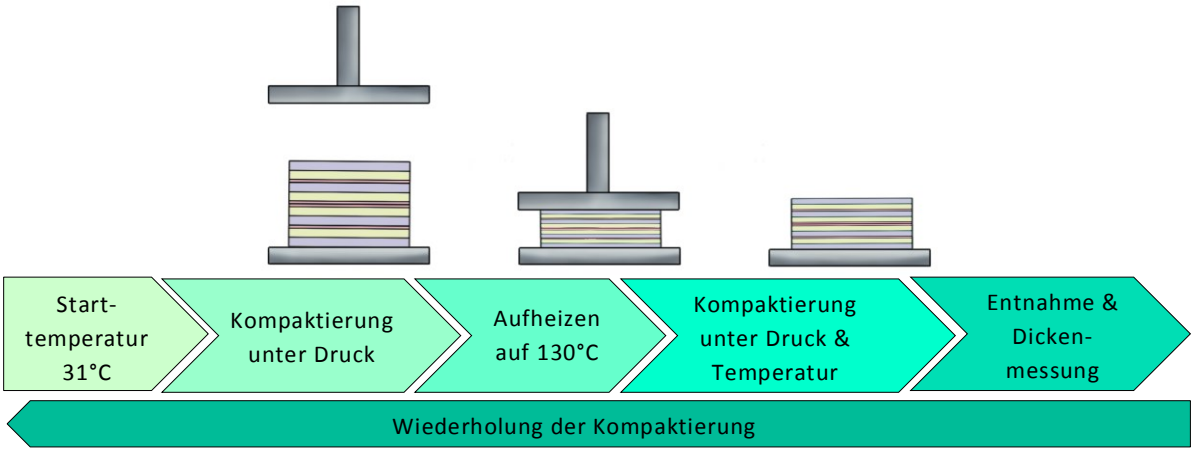


Abbildung 3.37: Versuchsablauf der Variante 3

3.4.2 Auswertung

Der Versuchsaufwand wurde zunächst auf insgesamt drei Versuche begrenzt. Das bedeutet, dass für jede Variante nur ein Versuch gefahren wurde, um zu analysieren, wie sich die Versuchsergebnisse zu dem bisherigen Versuchsablauf (852, 853 und 854) einordnen. Dazu werden die Relaxationsverläufe der unterschiedlichen Varianten nach der Beendigung von der 24 Messung-Messung in einem Diagramm eingetragen und ausgewertet.

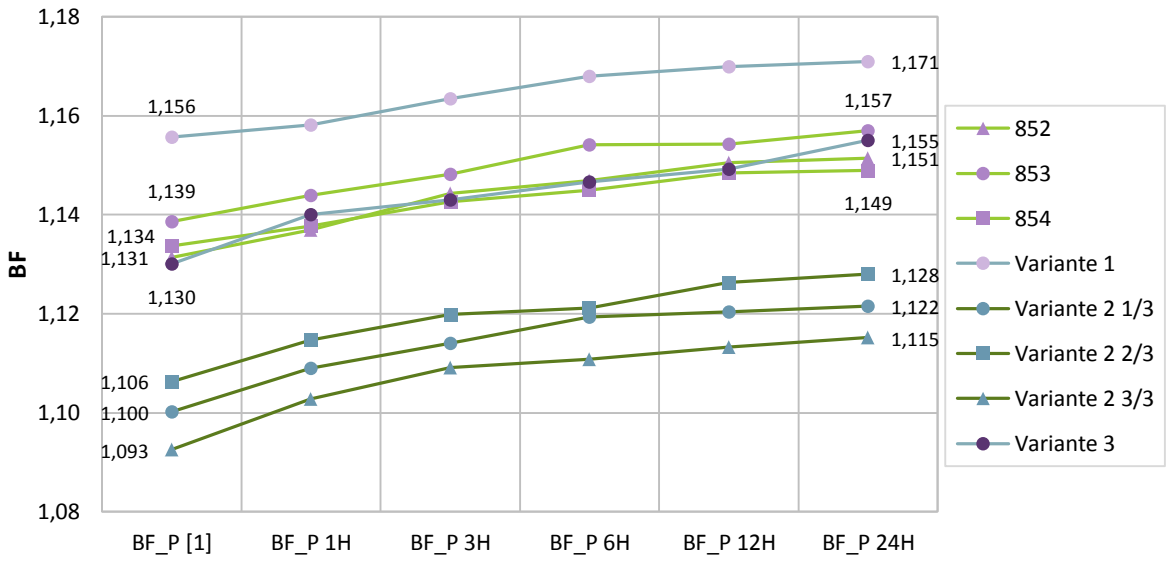


Abbildung 3.38: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Versuchsabläufen zum bisherigen Versuchsablauf

Wie in der Abbildung 3.38 zu sehen ist, haben die Veränderungen der Versuchsabläufe unterschiedliche Einflüsse auf das Kompaktierungsverhalten von den Preformen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass alle Preformen eine durchschnittliche Relaxation von 2 Prozent aufweisen. Das heißt, dass diese in der Zeitspanne vom Ende der Kompaktierung (BF_P [1]) bis zum Ende der 24 Stunden-Messung (BF_P 24H) um ca. 2 Prozent aufdicken. Der Vergleich der Versuchsergebnisse von der Variante 1 mit den Ergebnissen des bisherigen Versuchsablaufes weist eine um zwei Prozent schlechtere Kompaktierung auf. Aus diesem Grund wurde für die Variante 1 keine weiteren Versuche durchgeführt.

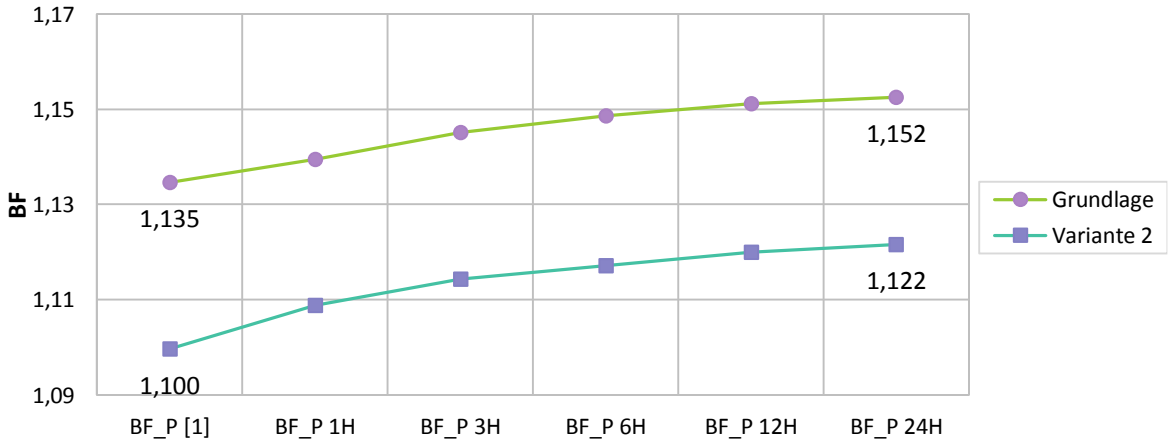


Abbildung 3.39: Gegenüberstellung der gemittelten Versuchsdaten der Variante 2 zum bisherigen Versuchsablauf

Die Variante 3 zeigt bei dem Relaxationsverlauf einen ähnlichen Verlauf wie die zum Vergleich herangezogenen Versuche. Da sich auch hier keine Veränderung bei dem Kompaktierungsverhalten zeigt, werden keine weiteren Versuche erfolgen. Abschließend wird noch auf die Versuchsergebnisse von der Variante 2 eingegangen. Anhand von der Gegenüberstellung der Variante 2 1/3 mit denen zum Vergleich herangezogenen Versuchen zeigt sich mit einer Differenz von 3 Prozent eine stärkere Kompaktierung. Aus diesem Grund wurden zwei weitere Versuche durchgeführt, um ein Minimum an statistischer Sicherheit zu erhalten. Durch einen Vergleich der gemittelten Versuchsdaten von der Variante 2 mit denen des bisherigen Versuchsablaufes zeigt, dass durch den Versuchsablauf der Variante 2 eine stärkere Kompaktierung der Preform zu realisieren ist als mit dem bisherigen Versuchsablauf (vgl. Abbildung 3.39).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wurde eine Ersatzfunktion für die Berechnung des Bulkfaktors von trockenen, bebinderten multiaxialen Kohlenstofffaser-Gelegen bestimmt und validiert. Dazu wurde auf der Grundlage von einer Datenbankanalyse für die untersuchten Materialien Ersatzfunktionen mit unterschiedlichen Funktionsansätzen unter der Verwendung von den Programmen *Matlab* und *Optimus* erstellt. Für die Genauigkeitsüberprüfung der Ersatzfunktionen wurden weitere Versuche mit Parameterkombinationen durchgeführt, die bei der Erstellung der Funktionen nicht mitberücksichtigt wurden. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass aufgrund des überschrittenen Haltbarkeitsdatums der Materialien die Ergebnisse verfälscht wurden.

Im nächsten Schritt erfolgte die Erstellung von Ersatzfunktionen und deren Genauigkeitsüberprüfung auf Basis der vorhandenen Versuchsdaten aus der Datenbank. Dabei wurde der minimalste Versuchsaufwand für die Erstellung einer Ersatzfunktion analysiert. Zum einen, da die Versuchsmatrix der untersuchten Materialien lückenhaft ist und zum anderen, um den Zeitaufwand bei der Versuchsdurchführung so gering wie möglich zu halten. Zusätzlich wurde untersucht, welche Parameterkombinationen für die Funktionsaufstellung in *Matlab* und *Optimus* eingeladen werden müssen. Diese Analyse erfolgte mit dem TOHO1, da sowohl die meisten Parameterkombinationen in vorangegangenen Versuchen durchgeführt wurden, als auch die aussagekräftigsten Verläufe bei der Gegenüberstellung der Einflussparameter zum Bulkfaktor vorlagen. Auf Grundlage der unterschiedlichen Parameterkombinationen und Anzahlen an verwendeten Kombinationen wurden Funktionen mit unterschiedlichen Funktionsansätzen erstellt. Die Genauigkeitsüberprüfung der Funktionen erfolgte mit den bei der Funktionsaufstellung nicht mit berücksichtigten Parameterkombinationen aus der Versuchsdatenbank. Dabei zeigte sich die minimalste Abweichung zwischen dem berechneten Bulkfaktoren zu den aus Versuchen ermittelten bei einem linearen Funktionsansatz. Des Weiteren müssen mindestens sechs Parameterkombinationen, bestehend aus dem kleinsten und dem größten Wert des Variantionsbereiches der Einflussparametern, für die Funktionserstellung eingeladen werden. Dafür können sowohl die gemittelten als auch die ungemittelten Versuchsdaten verwendet werden, da die Koeffizienten der Variablen eines Funktionsansatzes identisch sind.

Abschließend wurden noch andere Versuchsabläufe betrachtet. Dazu wurde die Starttemperatur und die Anzahl an Kompaktierungszyklen verändert. Durch die Erhöhung von der Starttemperatur, sowie mehreren Zyklen hintereinander, konnte die Preform im Vergleich zu dem bisherigen Versuchsablauf um drei Prozent stärker kompaktiert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Arbeit zur Erstellung einer Ersatzfunktion (linearer Funktionsansatz) mit dem minimalsten Versuchsaufwand sollte als nächstes an einem neuen Material angewendet werden. Durch weitere Versuche muss diese Funktion dann auf die Genauigkeit zur Berechnung des Bulkfaktors überprüft werden. Des Weiteren sollten auch mit diesem Material die veränderten Versuchsabläufe analysiert werden, bei dem die Starttemperatur auf die Prozesstemperatur erhöht wird und ein bzw. mehrere Kompaktierungszyklen hintereinander durchgeführt werden.

Anhang

A. Gängigste Filamentanzahlen

Roving	Bezeichnung
1000 Filamente	1 K
3000 Filamente	3 K
6000 Filamente	6 K
12000 Filamente	12 K
24000 Filamente	24 K
50000 Filamente	50 K

B. Versuchsmatrix TOHO1

Versuchsnr.	Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	Druck **p** [bar]	Temperatur **T** [°C]	$BF_{P24h,w}$	$BF_{P24h,w,m}$
609	1	4	1	105	1,232	1,245
611					1,239	
610					1,266	
	2			120		
543	3			140	1,176	1,188
544					1,185	
545					1,201	
	4		3	105		
	5			120		
509	6			140	1,169	1,189
508					1,187	
253					1,212	
	7		5	105		
	8			120		
551	9			140	1,159	1,160
261					1,160	
364					1,163	
230	10	8	1	105	1,181	1,186
229					1,188	
546					1,189	
246	11			120	1,162	1,171
547					1,168	
245					1,183	
232	12			140	1,162	1,168
548					1,163	
549					1,178	
510	13		3	105	1,154	1,178
217					1,170	
218					1,208	
512	14			120	1,131	1,150
511					1,157	
222					1,162	
224	15			140	1,118	1,133
225					1,128	
513					1,154	
554	16		5	105	1,153	1,160
552					1,156	
553					1,172	
555	17			120	1,134	1,146
242					1,147	
241					1,157	
557	18			140	1,104	1,118
240					1,120	
556					1,131	
	19	12	1	105		
	20			120		
550	21			140	1,153	1,156
247					1,154	
270					1,159	
	22		3	105		
	23			120		
514	24			140	1,093	1,105
228					1,101	
515					1,120	
	25		5	105		
	26			120		
273	27			140	1,080	1,093
272					1,089	
558					1,111	

C. Versuchsmatrix TOHO2

Versuchsnr.	Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	Druck **p** [bar]	Temperatur **T** [°C]	$BF_{P24h,w}$	$BF_{P24h,w,m}$
	1	4	1	105		
	2			120		
469	3			140	1,270	1,275
467					1,272	
468					1,282	
	4		3	105		
	5			120		
391	6			140	1,265	1,274
392					1,271	
472					1,285	
	7		5	105		
	8			120		
559	9			140	1,247	1,251
475					1,249	
453					1,256	
459	10	8	1	105	1,209	1,214
460					1,213	
470					1,220	
463	11			120	1,209	1,217
462					1,211	
461					1,232	
457	12			140	1,202	1,209
456					1,208	
455					1,217	
385	13		3	105	1,165	1,189
503					1,199	
471					1,202	
	14			120		
505	15			140	1,162	1,170
384					1,170	
382					1,177	
448	16		5	105	1,165	1,176
447					1,172	
446					1,190	
440	17			120	1,173	1,189
561					1,192	
560					1,203	
444	18			140	1,140	1,164
474					1,160	
562					1,191	
	19	12	1	105		
	20			120		
464	21			140	1,178	1,182
466					1,184	
465					1,186	
	22		3	105		
	23			120		
473	24			140	1,143	1,154
506					1,155	
389					1,166	
	25		5	105		
	26			120		
449	27			140	1,117	1,129
450					1,124	
563					1,146	

D. Versuchsmatrix SAE3

Übersicht Versuchsergebnisse SAE3						
Versuchsnr.	Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	Druck **p** [bar]	Temperatur **T** [°C]	$BF_{P24h,w}$	$BF_{P24h,w,m}$
533	1	4	1	105	1,080	1,100
534					1,105	
70					1,115	
	2			120		
	3			140		
62	4		3	105	1,122	1,153
517					1,165	
516					1,173	
	5			120		
	6			140		
86	7		5	105	1,145	1,160
485					1,157	
486					1,179	
	8			120		
	9			140		
65	10	8	1	105	1,073	1,080
63					1,082	
64					1,086	
	11			120		
94	12			140	1,065	1,072
75					1,065	
76					1,085	
142	13		3	105	1,086	1,111
141					1,105	
527					1,143	
	14			120		
	15			140		
	16		5	105		
488	17			120	1,058	1,063
88					1,059	
89					1,072	
374	18			140	1,030	1,036
92					1,035	
137					1,043	
68	19	12	1	105	1,056	1,069
205					1,066	
66					1,083	
	20			120		
182	21			140	1,037	1,048
183					1,051	
542					1,055	
	22		3	105		
	23			120		
	24			140		
83	25		5	105	1,038	1,069
491					1,079	
492					1,089	
	26			120		
190	27			140	1,022	1,033
493					1,031	
494					1,046	

E. TOHO1 Gegenüberstellung (tabellarisch)

Lagenanzahl

TOHO1 alt		
Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	$BF_{P24h,w,m}$
1	4	1,245
3	4	1,188
6	4	1,189
9	4	1,160
10	8	1,186
11	8	1,171
12	8	1,168
13	8	1,178
14	8	1,150
15	8	1,133
16	8	1,160
17	8	1,146
18	8	1,118
21	12	1,156
24	12	1,105
27	12	1,093

TOHO1 alt	
Lagenanzahl **n** [-]	Mittelwert
4	1,196
8	1,157
12	1,118

Druck

TOHO1 alt		
Parameter-kombination	Druck **p** [bar]	$BF_{P24h,w,m}$
1	1	1,245
3	1	1,188
10	1	1,186
11	1	1,171
12	1	1,168
21	1	1,156
6	3	1,189
13	3	1,178
14	3	1,150
15	3	1,133
24	3	1,105
9	5	1,160
16	5	1,160
17	5	1,146
18	5	1,118
27	5	1,093

TOHO1 alt	
Druck **p** [bar]	Mittelwert
1	1,186
3	1,151
5	1,136

Temperatur

TOHO1 alt		
Parameter-kombination	Temperatur **T** [°C]	$BF_{P24h,w,m}$
1	105	1,245
10	105	1,186
13	105	1,178
16	105	1,160
11	120	1,171
14	120	1,150
17	120	1,146
3	140	1,188
6	140	1,189
9	140	1,160
12	140	1,168
15	140	1,133
18	140	1,118
21	140	1,156
24	140	1,105
27	140	1,093

TOHO1 alt	
Temperatur **T** [°C]	Mittelwert
105	1,192
120	1,156
140	1,146

F. TOHO2 Gegenüberstellung (tabellarisch)

Lagenanzahl

TOHO2 alt		
Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	$BF_{P24h,w,m}$
3	4	1,275
6	4	1,274
9	4	1,251
10	8	1,214
11	8	1,217
12	8	1,209
13	8	1,189
15	8	1,170
16	8	1,176
17	8	1,189
18	8	1,164
21	12	1,182
24	12	1,154
27	12	1,129

TOHO2 alt	
Lagenanzahl **n** [-]	Mittelwert
4	1,266
8	1,191
12	1,155

Druck

TOHO2 alt		
Parameter-kombination	Druck **p** [bar]	$BF_{P24h,w,m}$
3	1	1,275
10	1	1,214
11	1	1,217
12	1	1,209
21	1	1,182
6	3	1,274
13	3	1,189
15	3	1,170
24	3	1,154
9	5	1,251
16	5	1,176
17	5	1,189
18	5	1,164
27	5	1,129

TOHO2 alt	
Druck **p** [bar]	Mittelwert
1	1,220
3	1,197
5	1,182

Temperatur

TOHO2 alt		
Parameter-kombination	Temperatur **T** [°C]	$BF_{P24h,w,m}$
10	105	1,214
13	105	1,189
16	105	1,176
11	120	1,217
17	120	1,189
3	140	1,275
6	140	1,274
9	140	1,251
12	140	1,209
15	140	1,170
18	140	1,164
21	140	1,182
24	140	1,154
27	140	1,129

TOHO2 alt	
Temperatur **T** [°C]	Mittelwert
105	1,193
120	1,203
140	1,201

G. SAE3 Gegenüberstellung (tabellarisch)

Lagenanzahl

SAE3 alt		
Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	$BF_{P24h,w,m}$
1	4	1,100
4	4	1,153
5	4	1,149
7	4	1,160
10	8	1,080
12	8	1,072
13	8	1,111
16	8	1,079
17	8	1,063
18	8	1,036
19	12	1,069
21	12	1,048
25	12	1,069
27	12	1,033

SAE3 alt	
Lagenanzahl **n** [-]	Mittelwert
4	1,141
8	1,073
12	1,055

Druck

SAE3 alt		
Parameter-kombination	Druck **p** [bar]	$BF_{P24h,w,m}$
1	1	1,0999764
10	1	1,08017107
12	1	1,07168066
19	1	1,0687123
21	1	1,04761588
4	3	1,15301644
5	3	1,14947629
13	3	1,11117424
7	5	1,1600154
16	5	1,07858397
17	5	1,06319746
18	5	1,03598148
25	5	1,06867364
27	5	1,03300313

SAE3 alt	
Druck **p** [bar]	Mittelwert
1	1,07363126
3	1,13788899
5	1,07324251

Temperatur

SAE3 alt		
Parameter-kombination	Temperatur **T** [°C]	$BF_{P24h,w,m}$
1	105	1,100
4	105	1,153
7	105	1,160
10	105	1,080
13	105	1,111
16	105	1,079
19	105	1,069
25	105	1,069
5	120	1,149
17	120	1,063
12	140	1,072
18	140	1,036
21	140	1,048
27	140	1,033

SAE3 alt	
Temperatur **T** [°C]	Mittelwert
105	1,103
120	1,106
140	1,047

H. Nummern der Parameterkombinationen

Nr. Parameter-kombination	Lagenanzahl **n** [-]	Druck **p** [bar]	Temperatur **T** [°C]
1	4	1	105
2	4	1	120
3	4	1	140
4	4	3	105
5	4	3	120
6	4	3	140
7	4	5	105
8	4	5	120
9	4	5	140
10	8	1	105
11	8	1	120
12	8	1	140
13	8	3	105
14	8	3	120
15	8	3	140
16	8	5	105
17	8	5	120
18	8	5	140
19	12	1	105
20	12	1	120
21	12	1	140
22	12	3	105
23	12	3	120
24	12	3	140
25	12	5	105
26	12	5	120
27	12	5	140

I. Arithmetischer Mittelwert und die Standardabweichung der Kombinationen Kombi 1, Kombi 2 und Kombi 3

Art Funktionsansatz	Kombi1		Kombi2		Kombi3	
	a_i [%]	σ [%]	a_i [%]	σ [%]	a_i [%]	σ [%]
Linear **Linear (Ü)**	1,171 1,512	0,892 0,852	1,085 45,956	0,465 23,314	0,717 2,102	0,715 1,269
Linear + interaction **Linear + interaction (Ü)**	1,112 13,938	0,909 12,203	1,085 132,376	0,465 82,786	0,619 9,067	0,582 8,360
Quadratisch **Quadratisch (Ü)**	1,042 3,046	0,959 2,269	- -	- -	0,609 4,173	0,537 3,083
Kubisch **Kubisch (Ü)**	0,973 11,838	0,700 6,751	- -	- -	- -	- -
Grad 1 **Grad 1 (Ü)**	1,171 1,512	0,892 0,852	1,085 13,468	0,465 9,851	0,717 2,102	0,715 1,269
Grad 2 **Grad 2 (Ü)**	0,973 2,240	0,700 1,692	1,085 49,398	0,465 38,004	0,609 3,987	0,537 3,020
Grad 3 **Grad 3 (Ü)**	0,973 2,045	0,700 1,751	>1000000 >1500000	≈12000 ≈900000	≈100000 ≈110000	≈900 ≈5500

Symbol- und Indexverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	%	Abweichung
a_b		Arithmetischer Mittelwert
CPT	-	Verhältnis der Dicke des Fasermaterials zur Normaldicke des ausgehärteten Bauteils
d_t	mm	Dicke Fasermaterials
FAW	g/m^2	Flächengewicht
	g	Gewicht
	h	Stunde
n	-	Lagenanzahl
p	bar	Druck
ρ	g/cm^3	Dichte
T	°C	Temperatur
t	s	Zeit
t_p	s	Druckhaltezeit
t_T	s	Temperaturhaltezeit
tex	-	Fadenfeinheit
φ	%	Faservolumengehalt
σ		Standardabweichung

Indizes

Index	Bezeichnung
b	Anzahl der Messwerte
ber	berechnet
p	Druck
T	Temperatur
m	gemittelt
24h	24 Stunden
w	Auf Basis des Gewichtes

Ü	Überprüfung
8	Alle Parameterkombinationen mit 8 Lagen
140	Alle Parameterkombinationen mit 140 °C

Abkürzungsverzeichnis

	Abkürzung	Beschreibung
B		
	BF	Bulkfaktor
C		
	CF	Kohlenstofffasern
	CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
	CoPA	
D		
	DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
E		
	EP-Harze	Epoxidharze
F		
	FAW	Flächengewicht
	FEM	Finite Elemente Methode
	FKV	Faserkunststoffverbund
G		
	GF	Glasfaser
I		
	ICE	Inter City Express
L		
	li	links
N		
	NCF	Non-crimp fabrics (deutsch: Fasern liegen in gestreckter Form vor)
P		
	PAN	Polyarcylnitril
	PES	
	PF-Harze	Phenolharze
	Pkw	Personenkraftwagen
R		
	re	rechts
	RTM	Resin transfer mouling (deuts. Harzinjektionsverfahren)
S		
	SAE3	Material von der Firma *Saertex*
T		
	TOHO1	Material von der Firma *Toho Tenax*
	TOHO2	Material von der Firma *Toho Tenax*
	txt	Text
U		
	UP-Harze	Polyesterharze
X		
	x_1	Lagenanzahl
	x_2	Druck
	x_3	Temperatur
	3D	dreidimensional

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Herstellung von Kohlenstoff-Fasern aus PAN 4

Abbildung 2.2: UD-Gelege (0°), biaxial Gelege (±45°), triaxial Gelege (±45°/0°) (von li nach re) 5

Abbildung 2.3: Fransenbindung (links) [ECC19] und Trikotbindung (rechts) [SGL19] 5

Abbildung 2.4: Herstellung einer Preform 7

Abbildung 2.5: Injektion einer Preform mit dem Matrixwerkstoffs 7

Abbildung 2.6: Preform unkompaktiert (1), kompaktiert (2), relaxiert (3) (von li nach re) 8

Abbildung 2.7: Versuchsablauf Kompaktierung und Relaxation 10

Abbildung 2.8: Abkürzung der Versuchsbezeichnung 12

Abbildung 2.9: Kompaktierungsprüfstand 12

Abbildung 2.10: Phasen bei der Kompaktierung 13

Abbildung 3.1: TOHO1 – Gegenüberstellung der Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 20

Abbildung 3.2: TOHO1 – Gegenüberstellung des Druckes *p* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 21

Abbildung 3.3: TOHO1 – Gegenüberstellung der Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 21

Abbildung 3.4: TOHO2 – Gegenüberstellung der Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 22

Abbildung 3.5: TOHO2 – Gegenüberstellung des Druckes *p* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 22

Abbildung 3.6: TOHO2 – Gegenüberstellung der Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 23

Abbildung 3.7: SAE3 – Gegenüberstellung der Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 23

Abbildung 3.8: SAE3 – Gegenüberstellung des Druckes *p* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 24

Abbildung 3.9: SAE3 – Gegenüberstellung der Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 1) 24

Abbildung 3.10: Aufbau einer txt-Datei für Optimus 25

Abbildung 3.11: Optimus – Ausgabe der Funktion als txt-Datei 26

Abbildung 3.12: Matlab – Einladen der Daten zur Funktionsaufstellung 27

Abbildung 3.13: Ausgabeform der ermittelten Ersatzfunktion in Matlab 27

Abbildung 3.14: Aufbau der Excel-Tabelle für die Berechnung BF_{24h} (Teil 1) 28

Abbildung 3.15: Aufbau Excel-Tabelle für die Berechnung BF_{24h} (Teil 2) 29

Abbildung 3.16: TOHO1 – Überprüfung des Materials 31

Abbildung 3.17: TOHO2 – Überprüfung des Materials 31

Abbildung 3.18: SAE3 – Überprüfung des Materials 32

Abbildung 3.19: TOHO2 - Gegenüberstellung Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 2) 33

Abbildung 3.20: TOHO2 – Gegenüberstellung Druck *p* zum BF_{24h_w} (Teil 2) 33

Abbildung 3.21: TOHO2 – Gegenüberstellung Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 2) 34

Abbildung 3.22: SAE3 - Gegenüberstellung Lagenanzahl *n* zum BF_{24h_w} (Teil 2) 34

Abbildung 3.23: SAE3 – Gegenüberstellung Druck *p* zum BF_{24h_w} (Teil 2) 35

Abbildung 3.24: SAE3 – Gegenüberstellung Temperatur *T* zum BF_{24h_w} (Teil 2) 35

Abbildung 3.25: Vergleich der auf Basis der ungemittelten und gemittelten Versuchsdaten erstellten Funktionen am Beispiel des TOHO1 (linear) 36

Abbildung 3.26: Auswertung auf Basis der gewählten Versuchsdaten (Kreis) 37

Abbildung 3.27: Auswertung auf Basis der neuen Versuchsdaten (Quadrat) 37

Abbildung 3.28: TOHO1 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen 38

Abbildung 3.29: TOHO2 – arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen 39

Abbildung 3.30: SAE3 – arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen 40

Abbildung 3.31: Verlauf der BF_{24h} von „alle mit 8 Lagen“ und „alle mit 140 °C“ 42

Abbildung 3.32: Kombi1 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen 44

Abbildung 3.33: Kombi2 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen 44

Abbildung 3.34: Kombi3 - arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung von den verschiedenen Funktionsansätzen 45

Abbildung 3.35: Versuchsablauf der Variante 1 46

Abbildung 3.36: Versuchsablauf der Variante 2 47

Abbildung 3.37: Versuchsablauf der Variante 3 47

Abbildung 3.38: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Versuchsabläufen zum bisherigen Versuchsablauf 48

Abbildung 3.39: Gegenüberstellung der gemittelten Versuchsdaten der Variante 2 zum bisherigen Versuchsablauf 48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Industriezweige und Anwendungsbeispiele 7

Tabelle 2.2: Größen Halbzeugzuschnitte 11

Tabelle 2.3: Parameter für die Wärmedehnung 11

Tabelle 2.4: Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen TOHO1 und TOHO2 14

Tabelle 2.5: Gemeinsamkeiten SAE3 zu TOHO1 und TOHO2 15

Tabelle 3.1: Inhalt der Kompaktierungsdatenbank (Auszug) 18

Tabelle 3.2: Versuchsparameter mit Variationsbereich 19

Tabelle 3.3:Funktionsansätze und die notwenige Anzahl an Parameterkombinationen (Optimus) 26

Tabelle 3.4: Versuchsmatrix 30

Tabelle 3.5: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der verschiedenen Funktionsansätze 37

Tabelle 3.6: Versuchsmatrix – alle Kombinationen mit 8 Lagen und 140 °C 41

Tabelle 3.7: Versuchsmatrix – Kombi 1 42

Tabelle 3.8: Versuchsmatrix – Kombi 2 43

Tabelle 3.9: Versuchsmatrix – Kombi 3 43

Literaturverzeichnis

[ALU19] alumag

Suchbegriff: trikot gelege

https://alumag.com/wp-content/uploads/2013/11/RCOM11.2011SAERTEXLecture.pdf

Abfragedatum: 06.März.2019

[AVK10] AVK – Industrievereinigung verstärkter Kunststoffe e.V. (Hrsg.)

Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung

Vieweg+Teubner, 3. Auflage, Wiesbaden, 2010

[BK95] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.)

Dubel – Taschenbuch für den Maschinenbau

Springer Verlag, 18. Auflage, Berlin, 1995

[Bon14] Bonnet, M.

Kunststofftechnik – Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele

Springer Verlag, 2. Auflage, Wiesbaden, 2014

[CC00] Chen, B.; Chou, T.-W.

Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation

Paper, Composites Science and Technology 60 2223-2231, 2000

[CC99] Chen, B.; Chou, T.-W.

Compaction of woven-fabric preforms inliquid composite molding process: single-layer deformation

Paper, Composites Science and Technology 59 1519-1526, 1999

[CCC01] Chen, B.; Cheng, A. H.-D.; Chou, T.-W.

A nonlinear compaction model for fibrous preforms

Paper, Coposites: Part A 32 701-707, 2001

[ECC19] ecc

Suchbegriff: multiaxialgelege

https://www.ecc-fabrics.de/produkte/multiaxiale-gelege.html

Abfragedatum: 06.März.2019

[EUR19] euro-rtm-group

Suchbegriff: RTM Anwendungsfelder

http://www.euro-rtm-group.de/de/anwendungen.html

Abfragedatum: 05.März.2019

[Hun18] Hunger, R.

Untersuchung ebener, bebinderter Kohlenstoffpreforms und Konzeptionierung eines L-Winkel-Prüfstandes

Bachelorarbeit, DLR Stade, 2018

[IPA19] ipa-Fraunhofer

Suchbegriff: Leichtbau

https://www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/leichtbau.html

Abfragedatum: 06.März.2019

[KMF91] Kim, Y. R.; McCarthy, S. P.; Fanucci, J. P.

Compressibility and relaxation of Fiber Reinforcements During Composite Precessing

Paper, POLYMER COMPOSITES Vol. 12 No.1, 1991

[LHKYS10] Lee, S. H.; Han, J. H.; Kim, S. Y.; Youn, J. R.; Song, Y. S.

Compression and Relaxation Behavoir of Dry Fiber Preforms for Resin Transfer Molding

Paper, Journal of COMPOSITE MATERIALS Vol. 44 No. 15, 2010

[Mül18] Müller, J.

Untersuchung des Kompaktierungs- und Relaxationsverhalten von trockenen, bebinderten Kohlenstofffaser-Preformen

Masterarbeit, DLR Stade, 2018

[Nez15] Nezami, F.N.

Automatisiertes Preforming von Kohlefaserhalbzeugen mit aktiven Materialführungssystemen zur Herstellung komplexer Faserverbundstrukturen

Dissertation, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2015

[NMB14] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.

Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung

Hanser Verlag, 2. Auflage, München, 2014

[PRK19] prk-ill

Suchbegriff: Anwendung Injektionsverfahren

https://www.prk-ill.de/index.php?RTM--Resin-Transfer-Moulding

Abfragedatum: 06.März.2019

[RG19] r-g

Suchbegriff: Kohlenstofffaser Lösung

https://www.r-g.de/w/images/9/94/AVK_Kohlenstoff-Fasern.pdf

Abfragedatum: 23.April.2019

[SGL19] Sglcarbon

Suchbegriff: trikot

https://www.sglcarbon.com/pdf/SGL-Broschuere-Die-Drapierbaren-DE_01.pdf

Abfragedatum: 06.März.2019

Lebenslauf

Angaben zur Person

Name	Sarah Graichen
Anschrift	Grüner Weg 11, 14469 Potsdam
Geburtsdatum	23.11.1991
Geburtsort	Potsdam
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

Ausbildung und berufliche Tätigkeiten

1998 - 2004	Karl-Förster-Grundschule
2004 – 2011	Leibniz-Gymnasium
2011 - 2012	Biotechnologiestudium (Bachelor) an der Hochschule Anhalt, Köthen (Wechsel der Studienrichtung)
2012 - 2017	Maschinenbaustudium (Bachelor) an der Hochschule Anhalt, Köthen
Seit 2017	Maschinenbaustudium (Master) an der Hochschule Anhalt, Köthen