



Jochen MARX, BSc.

ENTWICKLUNG EINES PRÜFSTANDES ZUR EXPERIMENTELLEN ERMITTLUNG MECHANISCHER EIGENSCHAFTEN VON BANDAGEN

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz
Institut für Mechanik

Betreuer:

Dipl.-Ing. Stefan HAAS
Institut für Technische Mechanik, Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Dr.techn. Mathias MAIR
Institut für Technische Mechanik, Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard WEILHARTER
ELIN Motoren GmbH.

Graz, im März 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meines Masterstudiums Maschinenbau an der Technischen Universität Graz. Ich möchte dieses Vorwort nutzen um all jenen zu danken, die am Abschluss dieser Arbeit und meines Studiums maßgeblichen Anteil hatten.

Zunächst gilt ein besonderer Dank der Firma ELIN Motoren GmbH in Preding/Weiz für den Anstoß zur Aufgabenstellung und die Gelegenheit meine Diplomarbeit durchzuführen. Dabei richtet sich mein Dank vor allem an die MitarbeiterInnen aus TE-S und TE-I. Allen voran bei meinen Betreuern und Ansprechpersonen seitens ELIN Motoren: Herrn DI Dr.techn. Georg Ofner, Herrn DI Dr.techn. Hermann Lang und Herrn DI Dr.techn. Bernhard Weilharter möchte ich mich sowohl für die kollegiale Aufnahme in einem angenehmen Arbeitsklima, als auch die allzeitliche Unterstützung meiner Tätigkeiten mit fachlichem und organisatorischem Input bedanken.

Des Weiteren gilt ein großer Dank dem Institut für technische Mechanik der TU Graz und seinen MitarbeiterInnen: Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann für die Ermöglichung der Durchführung der Diplomarbeit, Herrn Ing. Helmut Siegl für die Unterstützung in der Werkstätte bei den Vorbereitungen der Versuche und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Haas für die Durchsicht und Korrektur der Diplomarbeit. Besonders bedanken möchte ich mich hier bei meinem Betreuer seitens der Technischen Universität Graz, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Mathias Mair, für die fachliche Unterstützung bei der Durchführung.

Meiner Freundin Melanie möchte ich für die entgegengebrachte Geduld, ihre Mithilfe in meinem Alltag und ihr Verständnis danken.

Schlussendlich gebührt ein großer Anteil an Dank meiner Familie und allen voran meinen Eltern, die mir mein Studium erst ermöglicht haben und mich nicht nur dabei sondern in meinem gesamten Werdegang bestmöglich unterstützt und gefördert haben.

Gleisdorf, im März 2018

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Methode zur experimentellen Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Bandagen, wie sie bei rotierenden elektrischer Maschinen zum Einsatz kommen.

Der Anstoß hierbei war die Forderung einer besseren Kenntnis der mechanischen Eigenschaften in ebensolchen Bandagen nach dem in mehreren Schritten durchgeführten Applikationsprozess.

Dabei wurde in der Entwurfs- und Konstruktionsphase großer Wert auf die Entwicklung und Gestaltung nach den Konstruktionsrichtlinien der VDI gelegt. In diesen wird nach einer Analyse und Definition der Aufgabenstellung zunächst das Problem auf Teilprobleme und Teilfunktionen heruntergebrochen. In weiteren Schritten werden aus den gefundenen Teillösungen mehrere Varianten an Gesamtlösungskonzepten entwickelt, gegenübergestellt und bewertet um das bestmögliche Konzept auszuwählen, zu detaillieren und auszuarbeiten.

Im experimentellen Teil der Arbeit sollen mit dem ausgearbeiteten Konzept Versuche durchgeführt werden, um eine Aussage über die Größe der mechanischen Eigenschaften der applizierten Bandagierung treffen zu können.

Abstract

The thesis deals with the development of a method for experimental determination of mechanical properties of bandages used in rotating electrical machinery.

The starting impulse hereby was the demand for a better knowledge of the mechanical properties in just such bandages after the application process was carried out in several steps.

In the phases of design and construction, there has been the demand to give a great value to following the design guidelines of the VDI. According to the rules of these guidelines, the problem is first defined and analysed, before it is broken down in several partial tasks. In further steps, there should be found one or more partial solutions to each of these tasks, to combine them into different variations of solutions to the initial problem. These variations are then evaluated against each other, in order to choose and work out the best possible solution.

The experimental part of this thesis consists in the practical application of the chosen solution, to give a first statement for the range of the mechanical properties and tensile force in given bandages.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Aufgabenstellung.....	3
1.3	Stand der Technik	3
1.3.1	Faserverbundkunststoffe	3
1.3.2	Experimentelle Spannungsermittlung	15
2	Grundlagen	17
2.1	Konstruktionsmethodik und Richtlinien.....	17
2.1.1	Entwicklung und Konstruktion nach VDI-Richtlinien	18
2.1.2	VDI Richtlinie 2222 Blatt 1	21
2.2	Bewertung technischer Produkte.....	24
2.2.1	Nutzwertanalyse	25
2.3	Vorgespannte Strukturen	26
2.3.1	Grundlagen vorgespannter Schraubenverbindungen	26
2.3.2	Einfluss der Steifigkeiten.....	26
2.3.3	Einfluss der Krafteinleitung	27
2.4	Fehleranalyse und Fehlerabschätzung	28
2.4.1	Systematische Fehler	28
2.4.2	Statistische Fehler	28
2.5	Versuchsplanung.....	30
3	Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus	31
3.1	Aufgabenstellung für den Entwurf	31
3.2	Anforderungsliste	31
3.3	Funktionen und Funktionsstruktur	34
3.3.1	Aufgliederung der Ebenen	34
3.4	Lösungsprinzipien und prinzipielle Lösungen.....	39
3.4.1	Teilfunktion Vorbereitung	39
3.4.2	Teilfunktion Vorspannung einbringen.....	40
3.4.3	Teilfunktion Fixierung der Bandagenproben	40

3.4.4 Teilfunktion Prüfung.....	41
3.5 Vorstellung der prinzipiellen Lösungsvarianten	41
3.6 Bewertung der prinzipiellen Lösungsvarianten	46
4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung	47
4.1 Konstruktive Gestaltung	47
4.1.1 Probenaufnahme	47
4.1.2 Probenvorbereitung	50
4.1.3 Prüfaufbau	51
4.2 Festigkeitsrechnungen der Maschinenelemente	53
4.2.1 Welle.....	53
4.2.2 Bolzenverbindung	60
4.3 Festigkeitsrechnungen mittels Methode der finiten Elemente	63
4.3.1 Aufbau der Simulationsgeometrie	63
4.3.2 Verwendete Kontakte.....	66
4.3.3 Ergebnisse.....	66
5 Prüfaufbau und Messung	70
5.1 Grundsätzliche Überlegungen.....	70
5.1.1 Einflussgrößen im Messsystem	72
5.1.2 Abschätzung der Größenordnung der Einflüsse	73
5.2 Verwendete Messmethoden.....	78
5.2.1 Messung der Dehnung an der Probenaufnahme	78
5.2.2 Öffnender Kontakt.....	79
5.2.3 Wegmesssensoren	80
5.3 Testmessungen.....	81
5.3.1 Testmessungen mit DMS und Kontakten.....	81
5.3.2 Testmessungen mit Wegmesssensoren	85
6 Exemplarische Auswertung	86
6.1 Versuchsplanung und Übersicht durchgeführter Messreihen.....	86
6.2 Gegenüberstellung mehrerer identisch durchgeführter Versuche einer Messreihe.....	87
6.2.1 Aufgenommene Kraft-Weg-Kurven.....	87
6.2.2 Statistische Auswertung.....	89
6.2.3 Reproduzierbarkeit und Aussagekräftigkeit	92

7	Zusammenfassung	94
8	Literaturverzeichnis	95
9	Linkverzeichnis	97

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Rotor mit bandagiertem Wickelkopf	2
Abb. 1-2: Prinzipieller Aufbau von FVK	4
Abb. 1-3: Fertigungsverfahren 'Wickeln'	6
Abb. 1-4: E-Modul in Abhängigkeit von Faserwinkel und Faseranordnung	7
Abb. 1-5: Zu Abb.1-4 gehörige Zuordnung der Faseranordnung.....	7
Abb. 1-6: Anisotrope Werkstoffcharakteristik.....	8
Abb. 1-7: Bestimmungsgleichungen für Konstanten einer UD-Schicht.....	9
Abb. 1-8: Orthotropie einer Einzelschicht und eines Laminats	10
Abb. 1-9: Schematischer Ablauf der CLT	10
Abb. 1-10: Zugstab nach DIN ISO 527-4; Probekörper der Form 3.....	12
Abb. 1-11: Bänderspannzeug	13
Abb. 1-12: Aufbau des Split-Disc-Test.....	14
Abb. 1-13: Prinzipieller Aufbau beim Hydro-Burst-Test	14
Abb. 1-14: Hydro-Burst-Test, Detail der Dichtung	15
Abb. 1-15: Aufbau DMS.....	15
Abb. 1-16: Prinzip des induktiven Wegaufnehmers	16
Abb. 2-1: Schritte des Konstruktionsprozess	18
Abb. 2-2: Grundgerüst der VDI Richtlinien.....	19
Abb. 2-3: Arbeitsplan und Phasen der VDI2221	20
Abb. 2-4: Quellen für Anforderungen.....	21
Abb. 2-5: Bilden einer Funktionsstruktur.....	23
Abb. 2-6: Schematische Darstellung eines morphologischen Kasten.....	24
Abb. 2-7: Darstellung einer Nutzwertanalyse.....	25
Abb. 2-8: Zustände einer Schraubenverbindung	26
Abb. 2-9: Einfluss der Steifigkeiten	27
Abb. 2-10: Einfluss der Kräfteinleitung	27
Abb. 2-11: Normalverteilung	29
Abb. 3-1: Funktionsstruktur, Ebene 0	34
Abb. 3-2: Funktionsstruktur, Ebene 1	34
Abb. 3-3: Funktionsstruktur, Ebene 2 - "Bandagenproben vorspannen"	35
Abb. 3-4: Funktionsstruktur, Ebene 2 - "Prüfung"	36
Abb. 3-5: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Vorbereiten der Probenaufnahme"	37
Abb. 3-6: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Vorspannen der Bandagen"	37
Abb. 3-7: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Optionaler Zwischenschritt Tränken"	38
Abb. 3-8: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Härten der Prüflinge".....	38
Abb. 3-9: Teilfunktionen beim „Vorbereiten“	39
Abb. 3-10: Teilfunktion "Bandagenproben vorspannen auf Probenaufnahme"	40
Abb. 3-11: Teilfunktion "Fixierung der Bandagenproben"	40
Abb. 3-12: Teilfunktion „Prüfung“	41
Abb. 3-13: Prinzipielle Lösungsvariante 1	42
Abb. 3-14: Prinzipielle Lösungsvariante 2	42
Abb. 3-15: Prinzipielle Lösungsvariante 3	43
Abb. 3-16: Prinzipielle Lösungsvariante 4	44
Abb. 3-17: Prinzipielle Lösungsvariante 5	44
Abb. 3-18: Prinzipielle Lösungsvariante 6	45
Abb. 3-19: Prinzipielle Lösungsvariante 7	45
Abb. 4-1: Konstruktive Ausführung Probeaufnahme, 3D Modell.....	48
Abb. 4-2: Detail zur Variation der Breite	49

Abb. 4-3: Konstruktive Ausführung Probeaufnahme , Ansichten	49
Abb. 4-4: Konstruktive Ausführung, Anordnung Bandagierung	50
Abb. 4-5: Befestigung der Bandagenenden	50
Abb. 4-6: Prüfaufbau, Konzept	51
Abb. 4-7: Prüfaufbau, tatsächlicher Aufbau	52
Abb. 4-8: Bandagieren, Lastsituation.....	54
Abb. 4-9: Welle, Geometrieschema und Auflagereaktionen	54
Abb. 4-10: Zugehöriges Schnittbild.....	57
Abb. 4-11: Verlauf des Sicherheitsfaktors	59
Abb. 4-12: Lastsituation am Bolzen	60
Abb. 4-13: Übernommene Geometrie für die Simulation	63
Abb. 4-14: Randbedingungen und Lasten	64
Abb. 4-15: FEM-Netz	65
Abb. 4-16: Übersicht der Elementqualität	66
Abb. 4-17: Vergleichsspannung der Probeaufnahme (a).....	67
Abb. 4-18: Vergleichsspannung der Probeaufnahme (b).....	67
Abb. 4-19: Detail der Stelle mit maximaler Spannung in der Halbscheibe.....	68
Abb. 4-20: Vergleichsspannung der Laschen	69
Abb. 4-21: Vergleichsspannungen im Verbindungsbolzen	69
Abb. 5-1: Messsystem der Universalprüfmaschine.....	70
Abb. 5-2: Schema des erwarteten Kraft-Weg-Verlaufs.....	71
Abb. 5-3: Serienschaltung von Federn, Modellschema	72
Abb. 5-4: Biegeverformung Probeaufnahme, Modellschema	73
Abb. 5-5: Indikator für Weg nahe der Trennebene	74
Abb. 5-6: Simulationsergebnisse für FV=40kN.....	74
Abb. 5-7: Simulationsergebnisse für FV=80kN.....	75
Abb. 5-8: Erläuterungen zur Verformung der Scheibe	76
Abb. 5-9: Relative Abweichungen.....	76
Abb. 5-10: Biegemoment an der Trennebene Quelle:[11]	77
Abb. 5-11: Positionen der angebrachten Dehnmessstreifen	78
Abb. 5-12: Prinzip des Öffners und erwarteter Signalverlauf	79
Abb. 5-13: Ausgeführter öffnender Kontakt	79
Abb. 5-14: Schematische Darstellung der Wegmesssensoren.....	80
Abb. 5-15: Messung mit DMS und Kontakten (exemplarisch)	83
Abb. 5-16: Dehnungen in Zugrichtung (Y), Position Nahe der Trennebene	84
Abb. 5-17: Dehnungen Quer zur Zugrichtung (Z), Position Nahe der Trennebene...	84
Abb. 5-18: Dehnung in Zugrichtung (Y), Position mittig am oberen Rand	84
Abb. 5-19: Messung mit Wegmesssensoren (exemplarisch).....	85
Abb. 5-20: Messung mit Wegmesssensoren (exemplarisch) - Detailbereich.....	85
Abb. 6-1: Aufgenommene Kraft-Weg-Kurven für eine Messreihe.....	87
Abb. 6-2: Detailbereich der aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven.....	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Werteskala.....	25
Tabelle 2: Anforderungsliste für den Prüfaufbau	33
Tabelle 3: Übersicht der Bewertung der Lösungsvarianten	46
Tabelle 4: Parameter für die Berechnung der Welle	53
Tabelle 5: Parameter für die Berechnung der Bolzen	60
Tabelle 6: Erläuterungen zu den auftretenden Kräften	65
Tabelle 7: Übersicht der geplanten und durchgeführten Versuche.....	86
Tabelle 8: Daten der Messreihe.....	89

1 Einleitung

In diesem ersten Kapitel soll ein Einstieg in die Thematik dieser Diplomarbeit und ein Überblick über den Stand der Technik gegeben werden. Anschließend werden die Motivation und die sich daraus ergebende Aufgabenstellung genauer erläutert, welche die Grundlagen für die weitere Herangehensweise an die Problemstellung bilden.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen der verwendeten Entwurfs- und Konstruktionsmethodik, mit welcher im Folgenden gearbeitet wird, und auch die durchgeführten Arbeitsschritte allgemein erklärt. Die Anwendung dieser Methodik wird in Kapitel 3 beschrieben und detaillierter ausgeführt. In Kapitel 4 erfolgt die Umsetzung der erarbeiteten Lösung für die Problemstellung.

Kapitel 5 beschreibt den Aufbau und die Durchführung der Messungen mit der umgesetzten Variante aus dem vorherigen Abschnitt. Im letzten Abschnitt werden exemplarische Ergebnisse aus den Versuchen dargestellt und ausgewertet.

1.1 Motivation

Drehgeneratoren als Vertreter rotierender elektrischer Maschinen werden zur Wandlung von mechanischer in elektrische Energie verwendet und nutzen dabei das von Michael Faraday entdeckte Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Dabei wird durch die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld eine Spannung induziert. Diese Induktion der Bewegung beruht darauf, dass in einem Magnetfeld auf bewegte Ladungen (stromdurchflossener Leiter) eine Kraft ausgeübt wird. [ELMASCH S.25 ff.]

Die Umsetzung dieses Prinzips erfolgt dabei durch die Einbringung mechanischer Energie über die Generatorwelle und der daraus folgenden Bewegung des im Rotor, durch einen Permanentmagneten oder eine Erregerwicklung, hervorgerufenen Magnetfeldes. Die Umlaufbewegung des Magnetfeldes induziert in weiterer Folge eine Spannung in den Statorwicklungen. Dabei sind die Rotorwicklungen und insbesondere die Wicklungsköpfe an den Enden der Rotoren enormen Fliehkräften ausgesetzt. Ein beispielhafter Rotor ist in Abb. 1-1 zu sehen.

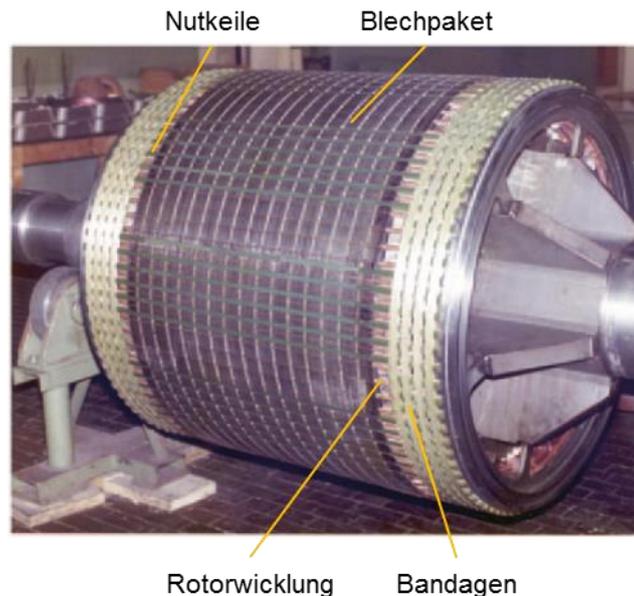


Abb. 1-1: Rotor mit bandagiertem Wickelkopf
Quelle: [EMA, S.586]

Bei Generatoren kommen hierbei verschiedene konstruktive Ausführungen zur Sicherung der Wicklungsköpfe gegen das Abheben vom Wicklungsträger und unzulässige Verformungen zum Einsatz.

Je nach Baugröße und Ausführung werden diese Aufgaben von sogenannten Wickelkopfbandagen übernommen [ELMASCH, S.303]. Diese Bandagen sind im Wesentlichen längsorientierte Glasfaserbänder, welche mit thermohärtendem Polyesterharz im B-Zustand (*B-Stage*: Zustand der unvollständigen Polymerisation, hervorgerufen durch gezielten Abbruch des Aushärtprozesses in der Herstellung des Bandes, [KAW, S.29 ff.]) imprägniert werden und unter ständiger Zugkraft im Band um die Wickelköpfe gewunden werden.

Für die Beherrschung hoher Fliehkräfte kommen vor allem Verbundwerkstoffe aus Glasfaser- und für höchste Ansprüche Kohlefaser, eingebettet in eine Epoxidharz-Matrix, als Werkstoff für diese Bandagen zum Einsatz. Bei sehr hohen Umfangsgeschwindigkeiten ist die Festigkeit der Glasfaserbandagen nicht mehr ausreichend, um die Wicklungen sicher am Wicklungsträger zu fixieren. Bandagen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen bieten mit maximal ertragbaren Spannungen im Faser-Matrix-Verbund von $\sigma_{t,lim} = 1500 \text{ N/mm}^2$ eine höherwertige Alternative. [3]

Nach diesem Vorspannen wird der bandagierte Wickelkopf anschließend optional noch imprägniert und abschließend im Ofen vollständig ausgehärtet. Die Hauptproblematik hierbei liegt darin, dass während diesem Verarbeitungsprozess ein nicht bekannter Anteil an Vorspannung verloren geht.

Hauptziel und Motivation dieser Arbeit war somit die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur experimentellen Bestimmung der verbleibenden Restspannung in den Bandagen, nach dem vollständigen Applikationsprozess, unter Variation des Prozesses und verschiedener Parameter.

1.2 Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll in den ersten Schritten ein Prüfkonzept entwickelt werden, welches es ermöglicht die Restspannung in den Bandagen in Abhängigkeit ausgewählter Parameter zu bestimmen. Als Restspannung sei hier die in der Bandage verbleibende Zugkraft verstanden, welche nach dem vollständig durchlaufenden Applikationsprozess noch erhalten bleibt, somit die Struktur des Wickelkopfes auf den Rotor vorspannt und ihn so gegen das Abheben durch die Fliehkraft im Betrieb sichert.

Die Entwicklung des Prüfkonzeptes soll hierbei methodisch nach den Richtlinien des VDI geschehen und entsprechend dokumentiert werden. Nach Beschreibung der Ausgangssituation und Präzisierung der Aufgabenstellung bildet die daraus entstandene Anforderungsliste an den Prüfstand die Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte. Nach den Richtlinien der methodischen Konstruktion sollen verschiedene prinzipielle Lösungsvarianten erarbeitet und bewertet werden. Den Abschluss der Konstruktionsphase bildet die Festlegung auf eine optimierte Variante für den Prüfaufbau, der anschließend ausgearbeitet und gefertigt werden soll.

Mit diesem soll es möglich sein, im weiteren Verlauf Versuche mit Variation verschiedener Parameter durchzuführen und die Messungen aufzuzeichnen. Aus den Aufzeichnungen und Auswertungen der einzelnen Versuche soll bestmöglich zu erkennen sein, welche Parameter einen Einfluss auf die verbleibende Restspannung haben können, und in welchem Ausmaß sich diese bemerkbar machen.

1.3 Stand der Technik

Im Folgenden sollen technische Randbedingungen und Vorkenntnisse, die sich durch bereits im Einsatz befindliche Technologien ergeben, erläutert werden. Dabei wird zunächst auf die Werkstoffgruppe der Faserverbundkunststoffe mit seinen Zusammensetzungen, Eigenschaften und Aufbau eingegangen. Weiters werden verschiedene Prüfverfahren zur Ermittlung einiger Kennwerte dieser Werkstoffe beschrieben. Abschließend werden in Verwendung befindliche Methoden zur experimentellen Spannungsermittlung aufgezeigt.

1.3.1 Faserverbundkunststoffe

Es sollen hier einige Grundlagen zum Aufbau und dem Verhalten von Faserverbundkunststoffen (kurz FVK) näher gebracht werden.

1.3.1.1 Aufbau

Faserverbundkunststoffe entstehen durch die Kombination von 2 oder mehr Werkstoffen miteinander, wobei hier zwischen Verstärkungsstoffen (Füllstoffen oder Fasern) und Matrixwerkstoffen (Bettungsmassen) zu unterscheiden ist. Das Grundlegende Prinzip der Zusammenführung der Ausgangsmaterialien zum FVK ist in Abb. 1-2 zu erkennen.

1 Einleitung

Dabei sei auch die Unterscheidung in der Reihenfolge und Anordnung der einzelnen Schichten innerhalb eines Mehrschichtverbundes hervorgehoben. Die Ausrichtung der Fasern in einem Mehrschichtverbund hat wesentlichen Einfluss auf die Belastbarkeit und Festigkeit des gesamten Verbundes. [RoMa, S.305ff]

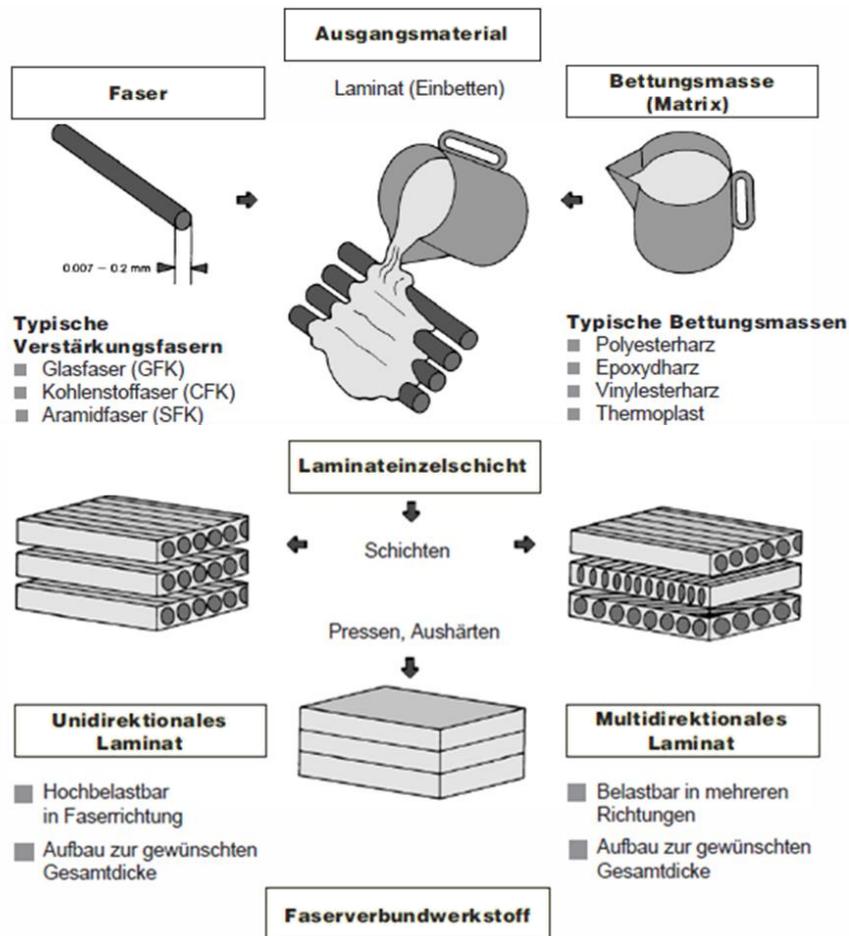


Abb. 1-2: Prinzipieller Aufbau von FVK
Quelle: [2]

Mehrschichtverbunde müssen dabei nicht zwangsweise aus UD-Schichten aufgebaut sein, sondern können auch aus Schichten mit verschiedenen Faserrichtungen bestehen. Der Vorteil bei multidirektionalen Mehrschichtverbunden besteht darin, dass diese meistens in mehr als eine Richtung belastbar sind.

Anm.: UD = Unidirektionale Schicht: Fasern verlaufen idealerweise gerade und parallel, sind gleichmäßig über den Querschnitt verteilt (die geometrische Anordnung wird dabei Faserpackung genannt) und es treten unter Belastung keine Relativbewegungen zwischen Matrix und Faser auf (ideale Haftung)) [KFVK, S.14ff]

Die Zusammensetzung und Ausrichtung der einzelnen Schichten zueinander ist Grundvoraussetzung für die Auslegung und Berechnung von FVK.

- **Verstärkungsstoffe und Füllstoffe**

Fasern gehören hierbei zu den gebräuchlichsten verwendeten Werkstoffen. Sie lassen sich aus bekannten Materialien wie Metallen, Kunststoffen oder Keramiken herstellen. Ihr Zweck im Verbund ist die Erhöhung von Festigkeit und Steifigkeit.

Die Form der gelieferten Fasern kann dabei stark variieren. Dabei unterscheidet man hinsichtlich Länge zwischen Kurzfasern und Endlosfasern. Diese können im Vorhinein schon in der Form von Gewebematten oder Rovings (Glasspinnfäden, meist mit aushärtbarem Kunststoff getränkt (Prepreg oder B-Stage)) verarbeitet sein. Als Faserwerkstoffe kommen hierbei meist Glas, Kohlenstoff, Bor oder Aramid. [RoMa, S.304ff]

- **Matrixwerkstoffe**

Die in Verwendung befindlichen Matrixmaterialien sind ebenso verschiedenste bekannte Werkstoffe, die meist im flüssigen oder teigigen Zustand mit kompatiblen Fasern kombiniert und im Anschluss ausgehärtet werden. Es kommen hierbei vor allem organische Kunststoffe, keramische Werkstoffe oder auch Metalle zum Einsatz.

Wegen ihrer einfachen Verarbeitbarkeit und Handhabbarkeit haben hier die duroplastischen Kunststoffe wie beispielsweise Phenol-, Polyester- und Epoxidharze am weitesten Verbreitung gefunden, die mit entsprechenden Fasern zu GFK (Glasfaserverstärkte Kunststoffe) und CFK (Kohlefaserverstärkte Kunststoffe) verarbeitet werden. Für eine Verwendung von thermoplastischen Kunststoffen spricht vor allem ihre erhöhte Recyclingfähigkeit.

Eine Verwendung von Metallen und Keramiken als Matrixwerkstoff kann bei sehr hohen Einsatztemperaturen (über 200°C) in Betracht gezogen werden. Diese Kombinationen (MMC - Metal Matrix Composite und CMC - Ceramic Matrix Composite) sind für höchste Temperaturen geeignet, und erhalten durch die Fasern erhöhte Duktilität und Risszähigkeit. [RoMa, S.304ff]

Roos und Maile schreiben in ihrem Buch über Werkstoffkunde [RoMa, S.307] dem Matrixwerkstoff folgende wesentlichen Aufgaben zu:

- Einbettung und Fixierung der Fasern mit möglichst idealer Haftung, sodass die Übertragung der Last über die Fasern erreicht wird
- Schutz der Fasern gegen chemische, thermische oder mechanische Einflüsse aus der Umgebung sowohl während Herstellung als auch Verwendung

1.3.1.2 Herstellung

Bei Verstärkung mit Endlosfasern oder Matten ist eine Großserienfertigung oft schwierig, da häufig für verschiedene Arbeitsgänge Handarbeit erforderlich ist. Dagegen können mit Kurzfaserverstärkung auch größere Serien gefertigt werden. Jedes Fertigungsverfahren erfordert die folgenden Schritte [BERGMANN]:

- Einbetten der Fasern in das Harzsystem (bei Prepregs schon geschehen);
- Aufbau des Laminates durch Ablegen von Einzelschichten auf einem Formwerkzeug;
- Aushärtung des Harzsystems mit oder ohne Druck- und Wärmezufuhr;
- Nachbearbeitung und Zusammenbau (optional, wenn erforderlich)

Die gebräuchlichen Verfahren nach [DUBBEL, S.F25] und [HVB, S.311ff.] sind beispielsweise:

- Handlaminieren
- Wickeln
- Aufspritzen
- Spritzgießen
- Pressverfahren

Als geeignetes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bandagierungen aus vorgefertigten Bändern sei hier in Abbildung 1-3 das Wickeln dargestellt.

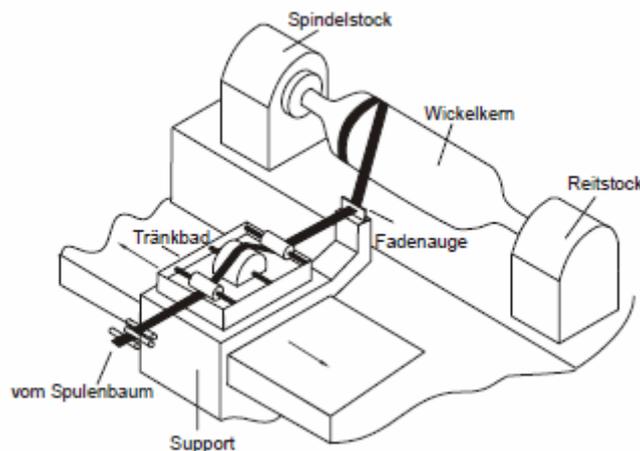


Abb. 1-3: Fertigungsverfahren 'Wickeln'
Quelle: [RoMa, S.312]

Beim Wickeln werden die oft vorimprägnierten Fasern oder Laminat-Einzelschichten (Bänder, im B-Stage oder Prepreg, siehe Kapitel 1.1 Motivation) um einen vorhandenen Wickelkern gewunden, welcher dem Bauteil seine spätere Gestalt verleiht. Bei diesem Verfahren können die einzelnen Fasern oder auch vorgefertigte Bänder sehr eng und straff aneinander liegend und mit hoher Maßgenauigkeit positioniert werden. Dieser Prozess wird oft mit einem anschließendem Tränkungsprozess und einem darauf folgenden Aushärteschritt gekoppelt. [BERGMANN]

1.3.1.3 Mechanische Eigenschaften

FVK besitzen hohe Festigkeit und Steifigkeit im Verhältnis zum Eigengewicht. Bei mechanischen Eigenschaften von FVK ist wiederum zu unterscheiden, ob man sich auf eine UD-Schicht bezieht, oder die Eigenschaften eines fertigen Laminates beschreiben möchte. Auf das Festigkeitsverhalten faserverstärkter Verbundwerkstoffe haben verschiedene Faktoren Einfluss: [RoMa, S.309ff]

- Faserlänge: Größere Faserlänge bedeutet höhere Festigkeiten
- Faserdurchmesser: kleinere Faserdurchmesser ergeben höhere Festigkeiten in der der Faser.
- Faserorientierung: ungeordnet, unidirektional, kreuzweise, multidirektional. Die Orientierung der Fasern im Werkstoff bestimmt die Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften des Verbundwerkstoffes. Die Maximalwerte hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit für eine UD-Schicht werden bei einachsiger Zugbelastung erreicht.

Abb. 1-4 zeigt hierzu den E- Modul in Abhängigkeit von der Faseranordnung und der Richtung der Fasern relativ zur Krafteinleitungsrichtung. Die zugeordneten Faseranordnungen enthält Abb. 1-5

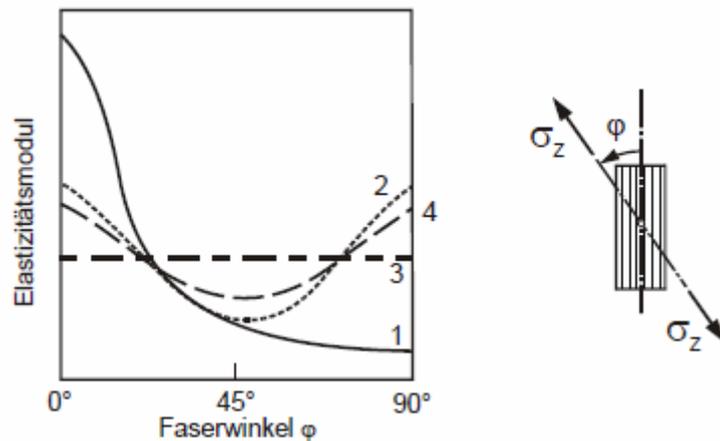


Abb. 1-4: E-Modul in Abhängigkeit von Faserwinkel und Faseranordnung
Quelle: [RoMe, S.310]

Typ	Faseranordnung	Skizze
1	[0°] (UD-Schicht)	
2	[0°/90°] (Gelege)	
3	[0°/60°/120°] (quasiisotropes Gelege)	
4	Gewebe	

Abb. 1-5: Zu Abb.1-4 gehörige Zuordnung der Faseranordnung
Quelle: [RoMe, S.309]

1 Einleitung

Entsprechend der Faserorientierung ergeben sich stark unterschiedliche Festigkeitseigenschaften bei äußeren Belastung in Faserrichtung und quer zur dazu. Diese Anisotrope Werkstoffcharakteristik ist in Abb.1-6 dargestellt.

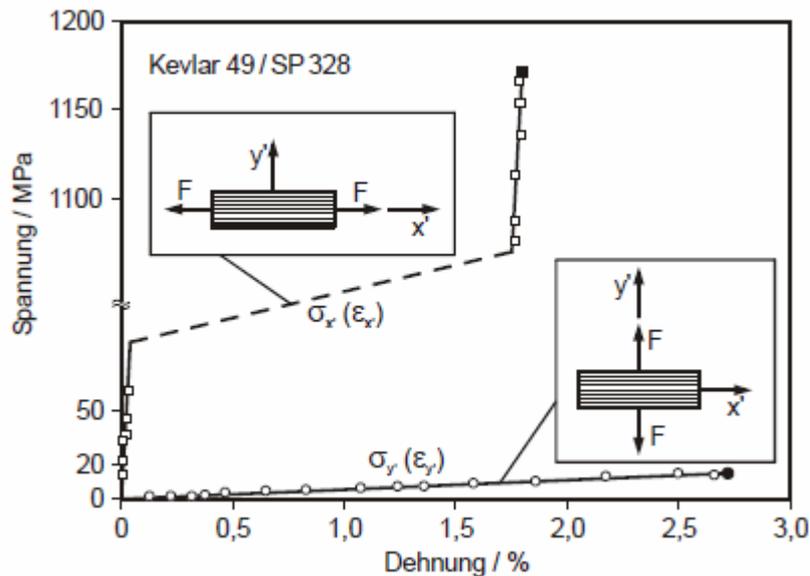


Abb. 1-6: Anisotrope Werkstoffcharakteristik
Quelle: [RoMe, S.310]

- Faservolumenanteil φ_F :
Der Faservolumenanteil entspricht dem Verhältnis des Volumenanteils der Fasern am Gesamtvolumen

$$\varphi_F = \frac{V_F}{V_{ges}}$$

Mechanische Eigenschaften und Berechnung einer Unidirektionalen Einzelschicht:

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul E , Querkontraktionsziffer μ , Gleitmodul G) einer unidirektionalen Einzelschicht ist nur dann möglich, wenn auch die entsprechenden Eigenschaften der kombinierten Werkstoffe (Faser F , Matrix M) sowie deren Massen- und Volumenanteile bekannt sind. Die entsprechenden Eigenschaften des Verbundes lassen sich dann durch das Modell von Serien- bzw. Parallelschaltung kleiner Federn errechnen. [RoMa, S. 308]

In der Literatur finden sich meist halbempirische Gleichungen zur Berechnung der Eigenschaften, wie sie in Abb.1-7. Aufgelistet sind. Bei den Indizes bezieht sich der erste Index hierbei auf die Richtung der Kontraktion, der zweite Index beschreibt die Wirkung der Kraft. Ebenso unterscheidet man hierbei zwischen Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit in Faserrichtung und senkrecht dazu. Dies hat den Zweck, eventuell auftretende Anisotropien im Werkstoffverhalten zu berücksichtigen, wie sie zum Beispiel bei Glasfasern oder Aramidfasern auftreten. [HVB, S.303]

Die berechneten Festigkeitswerte sind dabei meist nicht zufriedenstellend, da schon kleine Fehler im Herstellungsverfahren großen Einfluss haben können. (z.B.: Faserbruch während des Einbettens). Diese Einflüsse sind rechnerisch nicht zu

1 Einleitung

erfassen, weshalb diese in praktischen Versuchen gemessen werden müssen. Bei Vorliegen von Werten einer unidirektionalen Einzelschicht für einen bestimmten Faservolumenanteil, können diese auf andere Anteile umgerechnet werden. Mit den so erhaltenen Werten kann dann in weiteren Schritten eine Festigkeits- bzw. Steifigkeitsanalyse durchgeführt werden [HVB,S.304]

$$\begin{aligned} E_{\parallel} &= \varphi \cdot E_{F\parallel} + (1 - \varphi) \cdot E_M \\ E_{\perp} &= \frac{E_M (1 + 0,85 \varphi^2)}{\varphi \cdot \frac{E_M}{E_{F\perp}} + (1 - \varphi)^{1,25}}; \quad E_M^* = \frac{E_M}{1 - \nu_M^2} \\ G_{\perp\parallel} &= \frac{G_M (1 + 0,6 \varphi^{0,5})}{\varphi \cdot \frac{G_M}{G_{F\perp\parallel}} + (1 - \varphi)^{1,25}} \\ \nu_{\perp\parallel} &= \varphi \cdot \nu_{F\perp\parallel} + (1 - \varphi) \nu_M \\ \nu_{\parallel\perp} &= \nu_{\perp\parallel} \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}} \end{aligned}$$

Abb. 1-7: Bestimmungsgleichungen für Konstanten einer UD-Schicht
Quelle: [HVB, S.303]

Den rechnerischen Umgang mit mehrschichtigen Laminaten, und wie diese aufgefasst werden können, enthält der nächste Abschnitt.

Mechanische Eigenschaften und Berechnung mehrschichtiger Lamine:

Lamine können hinsichtlich ihres Verhaltens als Werkstoff sehr Verschieden im Vergleich zu anderen, isotropen, Werkstoffen sein. Aus [HFVB, S.304] ist hierbei zu entnehmen, dass eine UD-Schicht stets als orthotrope Struktur aufgefasst werden kann, wobei ihre beiden Orthotropieachsen parallel und senkrecht zur Faserrichtung verlaufen. Ein Schichtverbund aus mehreren UD-Schichten kann hingegen nur dann als orthotrop angesehen werden, wenn der Laminataufbau hinsichtlich der Schichtverteilung in Bezug auf die Mittelebene symmetrisch aufgebaut ist, und bei einer Drehung um 180° ein identer Schichtaufbau vorliegen würde. [HFVB, S.304ff.]

Ein Beispiel für den Aufbau eines orthotropen Laminates ist in Abb.1-8 zu erkennen. Der Aufbau mit den Orientierungen (0°/-45°/+45°/+45°/-45°/0°) ist ein ortotropes Laminat, nicht aber die Anordnung (0°/-45°/+45°/-45°/+45°/0°), da diese unsymmetrisch aufgebaut ist. Bei nicht-ortotropen Laminaten kann somit auch eine einachsige Belastung zu mehrachsigen Verformungen führen. Ein solches Verhalten ist in der Regel nicht erwünscht, da beispielsweise ebene Platten, welche im Fertigungsprozess ausgehärtet werden, sich danach noch durch Eigenspannungen ungünstig verformen können. [HFVB, S.304ff.]

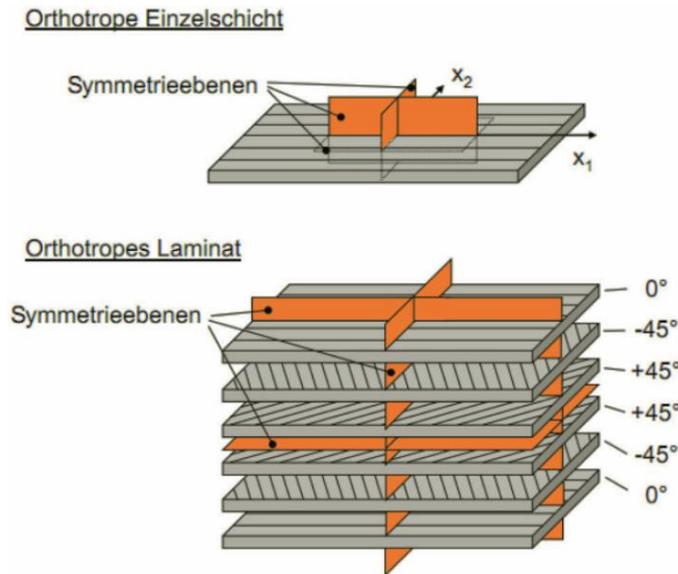


Abb. 1-8: Orthotropie einer Einzelschicht und eines Laminats
Quelle: [HVB, S.305]

Zur Berechnung mehrschichtiger Laminats gibt es mehrere Verfahren, welchen die vereinfachte Annahme zugrunde liegt, die Einzelschichten als homogen zu betrachten. Dazu gehören vor allem die Kontinuumsmechanik und die klassische Laminattheorie (CLT). Die CLT berücksichtigt sowohl nichtlineares als auch nicht-orthotropes Werkstoffverhalten der Laminats, und lässt somit eine weiterreichende Analyse hinsichtlich Verformungsverhalten und Festigkeitsanalyse zu. Ihr wesentlicher Vorteil liegt darin, dass mit der CLT auch die Spannungen und Verformungen in den einzelnen Schichten des Laminats berechnet werden können. Der schematische Ablauf ist in Abb.1-9 zu sehen, und wird im anschließenden Absatz kurz erläutert. [KOKE S.21] und [HVB, S305-308]

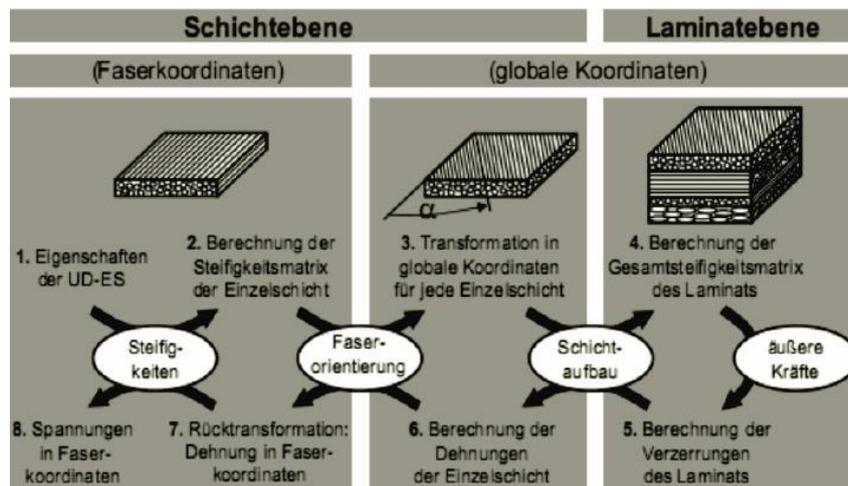


Abb. 1-9: Schematischer Ablauf der CLT
Quelle: [HVB, S.306]

Dabei wird ausgehend von den Eigenschaften der Komponenten des FVK im Ersten Schritt die Berechnung der Eigenschaften für jede Einzelschicht durchgeführt (Abb.1-9, Schritt 2). Die dadurch erhaltenen Steifigkeitsmatrizen müssen dann mittels Transformationsmatrix in das Koordinatensystem des Laminats transformiert werden. Die Transformationsmatrix muss dabei für jede Einzelschicht extra gebildet

1 Einleitung

werden (Abb.1-9, Schritt 3). Mit dem zugehörigen Schichtaufbau bestehend aus Schichtdicken und deren Reihenfolge, kann die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Laminates zusammengesetzt werden. (Abb.1-9, Schritt 4). Mit der z-Koordinate und dem Abstand der einzelnen Schichten zur Mittelebene des Gesamtlaminates (gewissermaßen als Hebelarm aufgefasst) können Verformungseffekte durch Biege- und Drillverformung berücksichtigt werden.

Bei Betrachtung auf Laminebene können die äußeren Lasten aufgebracht werden. Mit Hilfe der Gesamtsteifigkeitsmatrix können dann die Verzerrungen der Bezugsebene des Gesamtlaminates ermittelt werden (Abb.1-9, Schritt 5). Mit der Annahme fest miteinander verbundener Schichten lassen sich diese in die Verzerrungen der Einzelschichten errechnen, und wieder in die Faserkoordinaten rücktransformieren (Abb.1-9, Schritt 6 und 7).

Mit der Steifigkeitsmatrix der Einzelschicht kann man schließlich auf die Spannungen der Einzelschicht in Faserkoordinaten rückgerechnet werden. (Abb.1-9, Schritt 8). Diese Spannungen werden schließlich benötigt, um sie in das Festigkeitskriterium einzusetzen, mit dem die Werkstoffbeanspruchung in jeder Schicht überprüft wird.

Für eine genauere Erläuterung und detailliertere mathematische Ausführung sei in diesem Fall auf weiterführende Literatur wie beispielsweise [HVB, Kap. 5.2.4], [KFVK, Kap. 10, Kap.15] und [KOKE, S.21/22] verwiesen.

1.3.1.4 Prüfen von Faserverbundkunststoffen

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften eines Faserverbundkunststoffes werden je nach Anwendungsfall unterschiedliche Geometrien als Probekörper eingesetzt. Dabei ist diese abhängig vom Fertigungs- oder Herstellungsverfahren so zu wählen, dass sie repräsentativ für ein durch dieses Verfahren erzeugtes Bauteil ist. [KOSCHM, S.64]

Zugversuche

Für Zugversuche als gängigste Verfahren zur Ermittlung mechanischer Kennwerte ist dies meist einfach zu gestalten und in vielen Fällen schon in Normen (Beispielsweise DIN EN ISO 527: Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen) vorgeschrieben. Aus den aufgenommenen Daten von Kraft und Weg können daraus Bruchspannung(-kraft) und Bruchdehnung(-weg) herausgelesen werden, oder der E-Modul als Tangenten- oder Sekantenmodul ermittelt werden. Ein weiteres Augenmerk gilt hierbei im Besonderen der Einspannstelle der Proben in der Prüfmaschine. [HFVB, S.571ff. und 575]

Die Einspannvorrichtung des Prüfgerätes muss es zum einen ermöglichen, dass die Richtung der auf den Probekörper aufgetragenen Kraft so genau wie möglich mit der Längsachse des Probekörpers übereinstimmt, um ungewünschte Überhöhungen der Belastung durch Querkräfte oder Verdrehung zu mindern. Des Weiteren muss die Form der Einspannvorrichtung auf die Form der Probe abgestimmt sein, um eine Spannungsüberhöhung durch Kerbwirkung zu vermeiden. Für Proben aus FVK gibt die Norm (beispielsweise nach DIN ISO 527-4) daher Leitlinien mit vorgeschriebenen Geometrien für solche Zugproben vor. [KOKE, S. 19/20]

Die Prüfkörper werden dazu an den Enden mit zusätzlichen Backen (den sogenannten Aufleimern) versehen (Abb.1-10). Diese dienen dazu, mögliche Quetschungen oder das Ausrutschen aus der Einspannstelle zu verhindern.

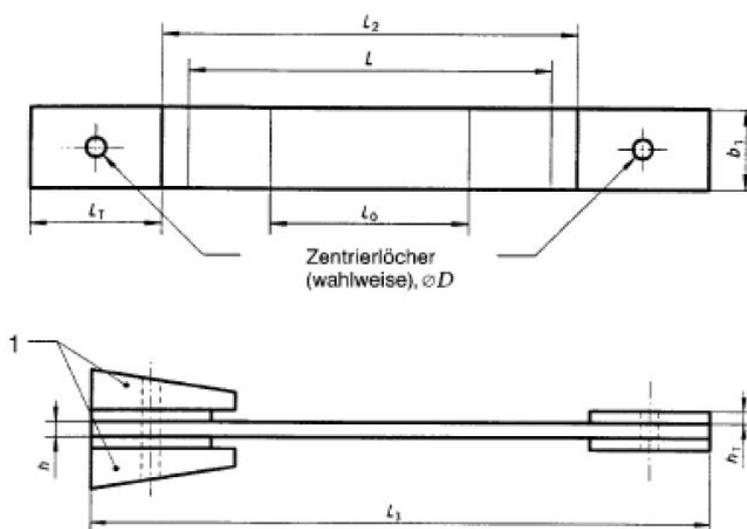


Abb. 1-10: Zugstab nach DIN ISO 527-4; Probekörper der Form 3
Quelle: [KOKE, S.19]

1 Einleitung

Im Gegensatz zu Einspannklemmen werden bandförmige Proben meist auf Rollen gewickelt (siehe Abb. 1-11). Dadurch können Spannungsspitzen durch Kerbspannungen und Quetschungen, verursacht durch die Klemmen, weitgehend vermieden werden.



Abb. 1-11: Bänderspannzeug
Quelle: [9]

NOL¹-Ring Tests und Split-Disk-Tests [KOSCHM]

Die am engsten an gewickelte Bauteile angelehnte Prüfgeometrie ist der sogenannte NOL-Ring. In dieser Probenform sind die Fasern des FVK in Umfangsrichtung orientiert, und können somit auf einfache Weise mit Hilfe einer Wickelmaschine hergestellt werden. Dazu werden üblicherweise ein oder mehrere Lagen des FVK um einen Wickelkern gewunden.

Solche ringförmigen Proben lassen sich am einfachsten mit dem sogenannten ‚Split-Disc-Test‘ prüfen, bei welchem der Ring über 2 Halbscheiben in eine Zugprüfmaschine gespannt, und bis zum Versagen geprüft wird.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass in den Randzonen, an denen die Proben an den Halbscheiben abgleiten, ein Biegemoment eingeleitet wird, und somit die eigentlich zu messende Normalspannung durch die eingebrachten Zugkräfte, wesentlich erhöht. Eine deutliche Verminderung dieser Effekte kann erreicht werden, indem die Probenform nicht exakt kreisrund ausgeführt und im Bereich des Spaltes ein tangential anschließendes, gerades Streckenstück in die Form des zu prüfenden Materials eingebracht wird. Siehe hierzu Abb.1-12 [4, S.185-187].

¹ Anm.: NOL steht hier für ‚Naval Ordnance Laboratory‘, eine ehemalige Forschungseinrichtung der United States Navy in White Oak, Maryland die bis 1. Oktober 1997 in Betrieb war und sich in unterschiedlichen Abteilungen mit angeschlossenen Labors Themen der Grundlagenforschung wie dem Magnetismus, Aerodynamik und Werkstoffentwicklung widmete. (siehe Wikipedia.org)

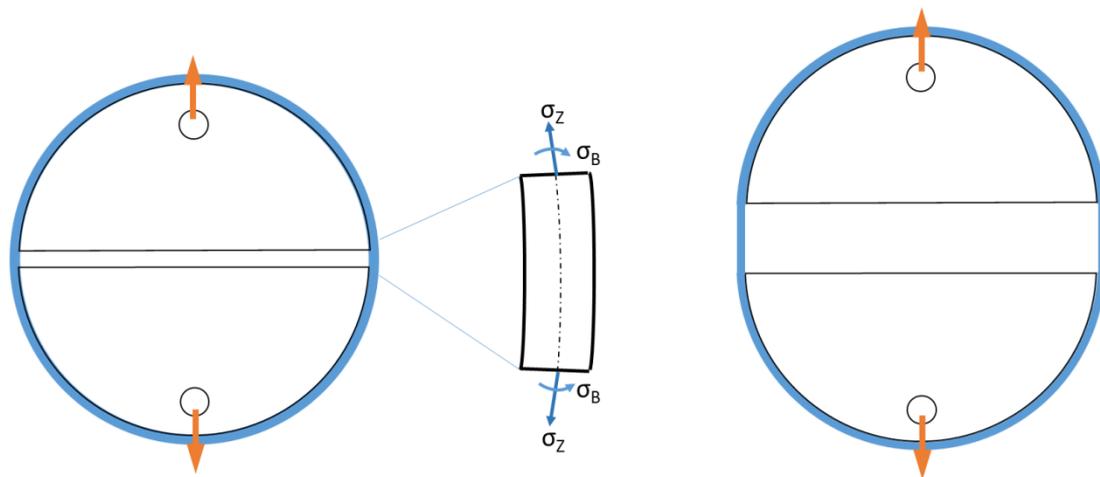


Abb. 1-12: Aufbau des Split-Disc-Test
Grundprinzip und auftretende Belastung (Links), Aufbau mit adaptierter Geometrie (Rechts)

Hydro-Burst-Testing

Beim Hydro-Burst-Testing befindet sich eine geführte Dichtung (Seal) zwischen zwei fixierten Stahlplatten. Auf der Außenseite der Dichtung wird der sogenannte Hydro-Burst-Ring angebracht, welcher aus dem zu testenden Material gefertigt bzw. gewickelt wird. (Abb. 1-13 und Abb. 1-14) [LELOS]

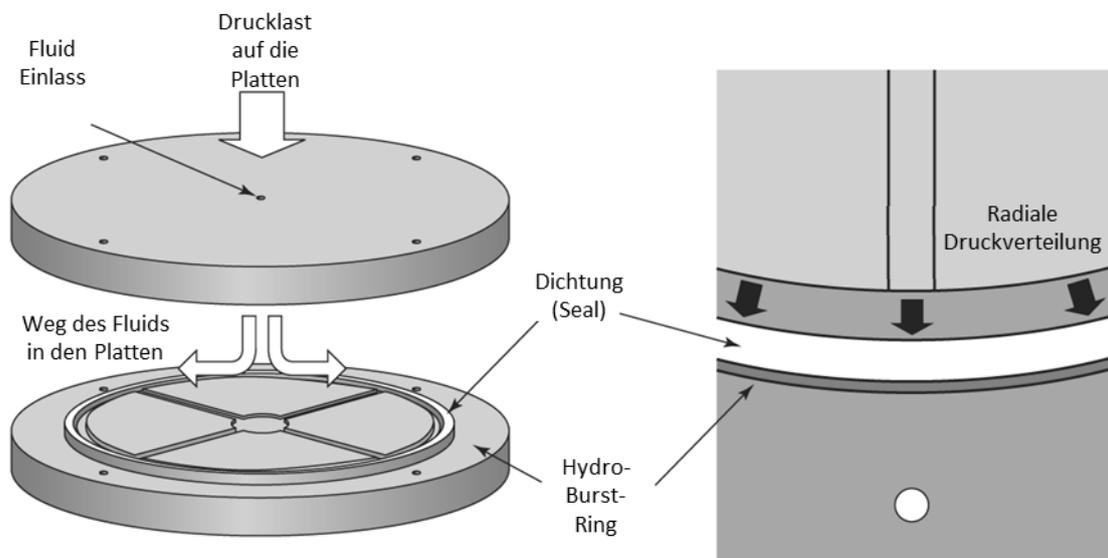


Abb. 1-13: Prinzipieller Aufbau beim Hydro-Burst-Test
[LELOS]

Durch Einleiten von Wasser unter Druck über die seitlichen Bohrungen werden in der Dichtung und in der anliegenden Probe Spannungen und Dehnungen hervorgerufen. Über die Messung der Dehnung direkt an der Probe und des Druckes bis hin zur Bruchlast können die mechanischen Parameter ermittelt werden. [LELOS]

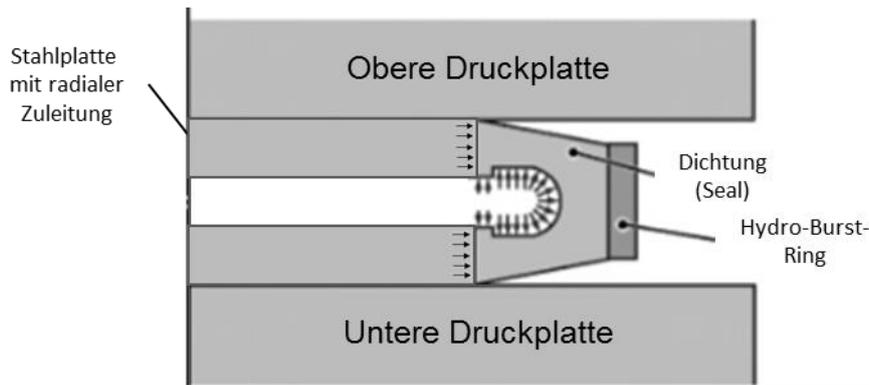


Abb. 1-14: Hydro-Burst-Test, Detail der Dichtung
In Anlehnung an [THOMPSON]

1.3.2 Experimentelle Spannungsermittlung

Mechanische Spannung bilden die Grundlage für die Auslegung und Beurteilung von Bauteilen hinsichtlich ihrer Festigkeit. Bei einfachen Beanspruchungen können über ebenso einfache Zusammenhänge gemäß $\sigma = F/A$ bzw. $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (Spannung σ , Elastizitätsmodul E , Bauteilquerschnitt A , Dehnung ε) die vorherrschenden Spannungen durch Messung von Kräften F und Dehnungen bestimmt werden. Nachstehend sollen einige verwendete Methoden in der experimentellen Spannungsermittlung aufgezeigt werden. [DUBBEL, S.W16]

1.3.2.1 Elektrische Verfahren

Die mit Hilfe elektrischer Messaufnehmer (wie beispielsweise induktiven Aufnehmern oder DMS-Aufnehmer) gemessenen Dehnungen lassen mit bekannten Bauteilwerten (Querschnittsflächen, Werkstoffdaten (E -Modul)) und äußeren Lasten (Kraft F) auf Spannungen im Bauteil schließen. Dehnmessstreifen (DMS) bestehen dabei aus einem mäanderförmigen Messgitter in einer dünnen Trägerfolie (Abb. 1-15) und wandeln Dehnungen in elektrische Widerstandsänderungen um:

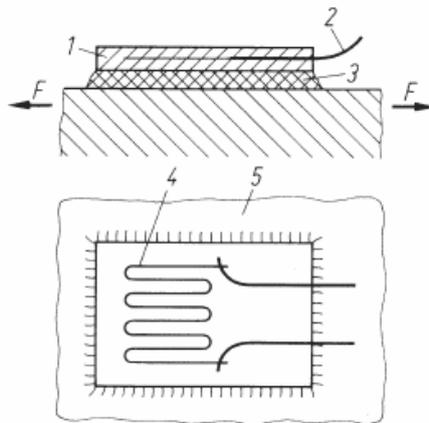


Abb. 1-15: Aufbau DMS

1 Träger (z. B. Polyamid), 2 Anschlussdrähte, 3 Kleber (z. B. Phenolharz),
4 Messdraht (z.B. Konstantan), 5 Bauteil Quelle: [DUBBEL]

Die am Bauteil angreifende Kraft F ruft dabei eine Bauteildehnung hervor, welche über den Kleber und die Trägerfolie in eine Dehnung des Messdrahtes umgewandelt wird. Diese Dehnung des Messdrahtes bewirkt in weiterer Folge eine

1 Einleitung

Widerstandsänderung ΔR des elektrischen Widerstandes des Messgitters R , welche erfasst werden kann, und mit Hilfe des einfachen mathematischen Zusammenhangs und des k-Faktors (DMS-Kennwert) $\Delta R/R = k\epsilon$ in den Wert der lokalen Dehnung umgerechnet wird. Für nähere Ausführungen sei hier auf [DUBBEL, S.W15] verwiesen.

1.3.2.2 Spannungsoptik

Die Spannungsoptik bedient sich des Effektes der Doppelbrechung von monochromatischem Licht in lichtdurchlässigen Körpern unter Belastung. Aus Kunststoff (Z.B. Epoxidharz, PMMA) hergestellte und über die Ähnlichkeitsmechanik angepasste Bauteile werden mit monochromatischem Licht bestrahlt, und mittels einer optischen Polarisator-Analysator-Anordnung untersucht. Bei der Durchstrahlung entstehen dabei Bereiche mit hellen, dunklen und farbigen Streifen (Isoklinen und Isochromaten). Die Verteilung dieser Anordnung ermöglicht Rückschlüsse auf Verteilung der mechanischen Spannungen in der Probe. [DUBBEL, S.W16]

1.3.2.3 Röntgen-Verfahren

Äußere Kräfte oder Eigenspannungen im Bauteil führen zu Änderung von Netzebenenabständen in kristallinen Werkstoffen. Diese können durch Analyse von Beugungs- oder Interferenzerscheinungen mit Hilfe von Röntgenstrahlen erfasst werden. Die Spannungskomponenten lassen sich dabei rechnerisch über die registrierten Interferenzlinien ermitteln. [DUBBEL, S.W16]

1.3.2.4 Induktive Wegmessung

Induktive Wegmesssensoren nutzen den Effekt der veränderlichen Induktion von Spulen mit eingespeister Wechselspannung, wenn sich ein magnetischer Eisenkern im entsprechenden Magnetfeld bewegt. Der gemessene Weg kann hierbei bis auf $0.1\mu\text{m}$ genau aufgelöst werden, und dabei Bereich von mehreren 100mm erfassen. Einen schematischen Aufbau eines solchen Systems mit 2 Spulen zeigt Abb.1-16. Dabei ist die zwischen den Spulen erhaltene Messspannung gemäß $U_M = c_1 \cdot U_0 \cdot \Delta s$ mit dem gemessenen Weg zusammenhängend. [DUBBEL, S.W12]

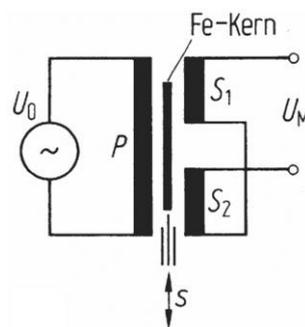


Abb. 1-16: Prinzip des induktiven Wegaufnehmers
Quelle: [DUBBEL, S.W12]

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen zunächst Grundlagen der Konstruktionsmethodik, der VDI-Richtlinien und deren Aufbau im Allgemeinen beschrieben und näher gebracht werden, um dem Leser einen ersten Überblick über die verwendeten Methoden zu geben. Im weiteren Verlauf wird dann mit der beschriebenen Methodik gearbeitet und diese auf die Entwurfsphase der Arbeit angewandt werden.

Weiters wird auf das Prinzip der Vorspannung eingegangen, welches ein zentrales Thema in der Konstruktionsphase darstellt. Den Abschluss dieses Kapitels bildet ein kurzer Einblick in die theoretische Versuchsplanung.

2.1 Konstruktionsmethodik und Richtlinien

Um konstruktive Aufgaben erfolgreich zu bewältigen und technische Problemstellung zufriedenstellend zu lösen, ist ein methodisches Vorgehen in der Lösungsfindung unumgänglich. Wichtig hierfür sind auch in Zeiten computerunterstützter Entwicklung immer noch ein hohes Maß an Eigeninitiative und Kreativität.

Pahl/Beitz schreiben in ihrem Buch [PBF] zum Verständnis der Konstruktionsmethodik:

„Unter Konstruktionsmethodik versteht man ein geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie, aber auch aus den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben haben. Hierzu gehören Vorgehenspläne zur inhaltlichen und organisatorischen Verknüpfung von Arbeitsschritten und Konstruktionsphasen, die flexibel an die jeweilige Problemlage angepasst werden.“ [PBF S.10]

Wesentliches Ziel der Konstruktionsmethodik ist es, das Finden von Lösungen zu gegebenen Problemstellungen einfacher, effizienter und nachvollziehbarer zu gestalten. Denken in größeren Zusammenhängen, pragmatisches Vorgehen und besonders die Betrachtung der Problemstellung aus verschiedenen Richtungen und Blickwinkeln sollen dabei gezielt gefördert und erleichtert werden.

Im maschinenbaulichen Konstruktionsprozess unterscheidet man die vier Hauptphasen Planen – Konzipieren – Entwerfen – Ausarbeiten nach Abb. 2-1, die herkömmlicherweise nacheinander abgearbeitet werden. [KöRö1, S. 11-12]

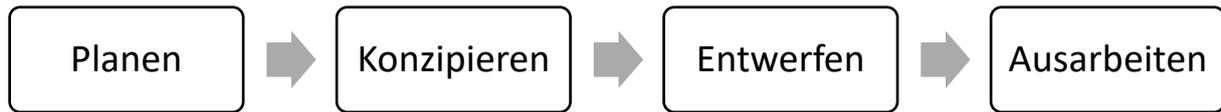


Abb. 2-1: Schritte des Konstruktionsprozess

Laut [PBF] soll eine Konstruktionsmethodik mehrere Anforderungskriterien erfüllen, um einen rationalen und nachvollziehbaren Konstruktionsprozess zu ermöglichen. Sie soll:

- ein problemorientiertes Vorgehen ermöglichen, d. h. sie muss prinzipiell bei jeder konstruktiven Tätigkeit branchenunabhängig anwendbar sein,
- erfindungs- und erkenntnisfördernd sein, d. h. sie soll das Finden optimaler Lösungen erleichtern,
- mit Begriffen, Methoden und Erkenntnissen anderer Disziplinen verträglich sein,
- Lösungen nicht nur zufallsbedingt erzeugen,
- Lösungen auf verwandte Aufgaben leicht übertragen lassen,
- geeignet sein für den Rechnereinsatz,
- lehr- und erlernbar sein,
- den Erkenntnissen der Denkpsychologie und Arbeitswissenschaft entsprechen, d. h. Arbeit erleichtern, Zeit sparen, Fehlentscheidungen vermeiden und tätige, interessierte Mitarbeit gewährleisten,
- die Planung und Steuerung von Teamarbeit in einem integrierten und interdisziplinären Produktstehungsprozess erleichtern,
- Anleitung und Richtschnur für Projektleiter von Entwicklungsteams sein

Wesentlicher Bestandteil von Konstruktionsmethoden ist das systematische Vorgehen während des gesamten Konstruktions- und Entwicklungsprozess, und somit während des gesamten Lösungsprozesses.

Das systematische Lösen von Aufgaben bzw. das Finden von Lösungen zu gegebenen Aufgabenstellungen besteht im Wesentlichen aus einer Analyse und einer Synthese.

Analyse ist prinzipiell Informationsgewinnung. Dabei geht es hauptsächlich um das Zerlegen, Gliedern und Untersuchen von Eigenschaften einzelner Elemente und den Zusammenhängen zwischen ihnen. Im Gegenteil dazu beschreibt die Synthese grundsätzlich den Vorgang der Informationsverarbeitung durch Bilden von Verkettungen und Verbindungen. [DUBBEL1, S.F4 und PBF, S.74.ff]

2.1.1 Entwicklung und Konstruktion nach VDI-Richtlinien

Die Richtlinien des VDI (Vereins Deutscher Ingenieure) werden mitunter als eine der umfangreichsten und bedeutendsten Sammlungen aktuellen Technikwissens mit Praxisorientierung angesehen. Sie stellen den aktuellen Stand der Technik dar und werden ständig den laufenden und zukünftigen Entwicklungen angepasst. Die Verfasser dieser Richtlinien arbeiten oft ehrenamtlich in unabhängigen Ausschüssen mit führenden Experten aus Wissenschaft, Forschung und Industrie zusammen. [1]

2 Grundlagen

Der Aufbau der VDI-Richtlinien zur Aufgabenstellung Entwicklung und Konstruktion (Abb.2-2) beginnt mit der übergeordneten Richtlinie VDI 2221 "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte".

Sie behandelt das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren von neuen Produkten und stellt somit die Basis des Grundgerüsts der methodischen Konstruktion nach VDI-Richtlinien dar.

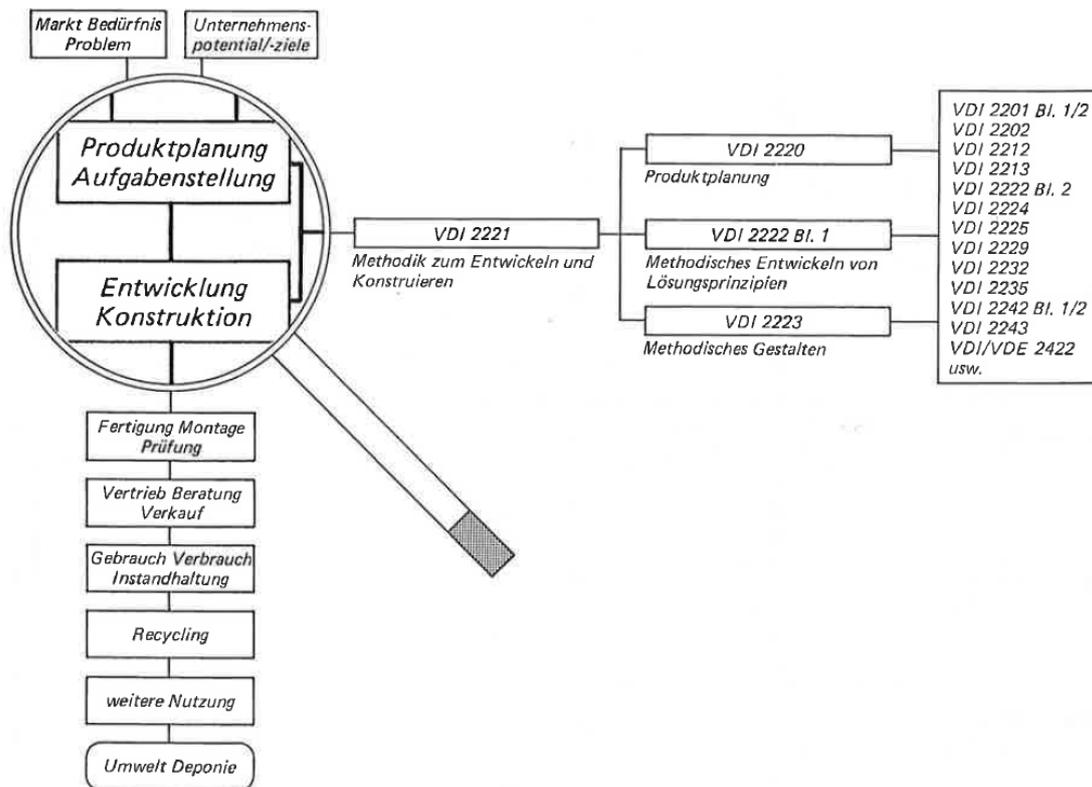


Abb. 2-2: Grundgerüst der VDI Richtlinien
Bereich Entwicklung und Konstruktion Quelle: VDI2222

Der Konstruktionsprozess in der übergeordneten Richtlinie VDI 2221 unterteilt das empfohlene Vorgehen in den vier Phasen (Planen – Konzipieren – Entwerfen – Ausarbeiten) in 7 Arbeitsschritte nach Abb.2-3:

- 1) Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung
- 2) Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen
- 3) Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen
- 4) Gliedern in realisierbare Module
- 5) Gestalten der maßgebenden Module
- 6) Gestaltung des gesamten Produktes
- 7) Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

Jeder dieser Arbeitsschritte bringt ein Teilergebnis hervor, welches als Zwischenschritt zur Lösungsfindung abgeschlossen werden soll. Je nach Art der konstruktiven Aufgabenstellung (Neu-, Weiterentwicklungs- oder Anpassungskonstruktion) werden die empfohlenen Abschnitte vollständig, partiell oder iterativ durchgeführt.

2 Grundlagen

Ein Vor- oder Zurückspringen auf einzelne Arbeitsabschnitte ist gegebenenfalls möglich, wenn es der Konstruktionsprozess erfordert.

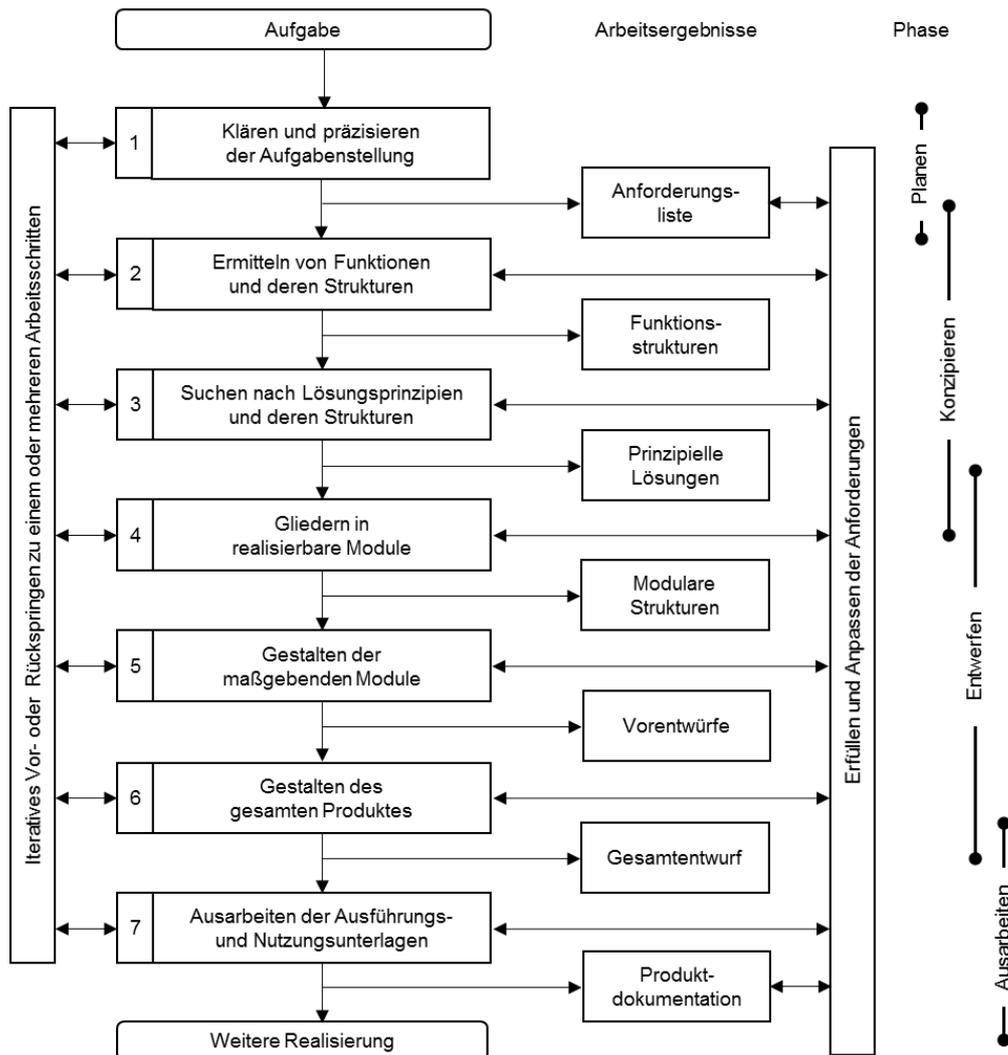


Abb. 2-3: Arbeitsplan und Phasen der VDI2221 [VDI2222]

Weitere, mit der VDI 2221 verknüpfte, Richtlinien beinhalten vertiefende und ergänzende Hilfsmittel zur methodischen Entwicklung und Konstruktion. Produktplanung und ihre Teilschritte Produktfindung, Produktplanungsverfolgung und Produktüberwachung als Vorlauf zur eigentlichen Produktentwicklung sind Bestandteil der Richtlinie VDI 2220 „Produktplanung; Ablauf, Begriffe und Organisation“.

Die Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 „Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien“ behandelt die Arbeitsschritte 1 bis 3 des empfohlenen generellen Vorgehens in der Richtlinie VDI 2221, und soll ausgehend von der Entwicklungs- und Produktionsaufgabe als Ergebnis die „Prinzipielle Lösung“ hervorbringen. Davon ausgehend kann nach der Richtlinie VDI 2223 „Methodisches Entwerfen technischer Produkte“, welche die Arbeitsschritte 4 bis 7 detaillierter beschreibt, weitergearbeitet werden.

2.1.2 VDI Richtlinie 2222 Blatt 1

Das Ziel der VDI Richtlinie 2222/Bl.1 ist es, durch eine strukturierte Vorgehensweise die Schritte 1 bis 3 des Arbeitsplans zum methodischen Konstruieren abzuwickeln, und beschäftigt sich mit den Konstruktionstätigkeiten zum Ermitteln prinzipieller Lösungsvarianten. In der Folge sollen nun die Arbeitsschritte und Hilfsmittel dieser Richtlinie näher erklärt werden.

2.1.2.1 Klären und präzisieren der Aufgabenstellung

Formulierung der Aufgabenstellung

Der erste Schritt im Konstruktionsprozess erfordert eine genaue Beschreibung der Aufgabenstellung. Dadurch werden im Wesentlichen die Hauptaufgabe (die Aufgabe, für die das Produkt überhaupt entworfen und konstruiert wird), und im weitesten Sinn auch erste Rahmenbedingungen für die Herangehensweise an die Aufgabenstellung im weiteren Konstruktionsprozess festgelegt. Als Ergebnis soll eine eindeutige Formulierung hervorgehen, welche möglichst mit einem Satz kurz und knapp beschrieben werden kann.

Problemanalyse

Neben der Hauptaufgabe sollen durch eine genauere Problemanalyse auch alle anderen Anforderungen an das Produkt hinsichtlich weiterer wesentlicher Rahmenbedingungen wie Normen, Auflagen, Fertigung, Transport und Betrieb von Anfang an berücksichtigt und erfasst werden. Durch möglichst genaue Analysen schon in frühen Stadien der Produktentwicklung können anfallende Kosten in späteren Phasen vermieden werden.

Anforderungsliste

In der Anforderungsliste werden alle Forderungen an das Produkt bzw. die Lösung der Problemstellung kategorisch zusammengetragen und gesammelt. Quellen für die Anforderungsliste (wie nach Abb. 2-4) können sowohl firmeninterne Faktoren wie zum Beispiel Ausrüstung, Werknormen oder Entwicklungsprozesse von Vorgängerprodukten, als auch firmenexterne Beeinflussung durch Konkurrenzprodukte, Markt und Kundenvorstellungen sein.

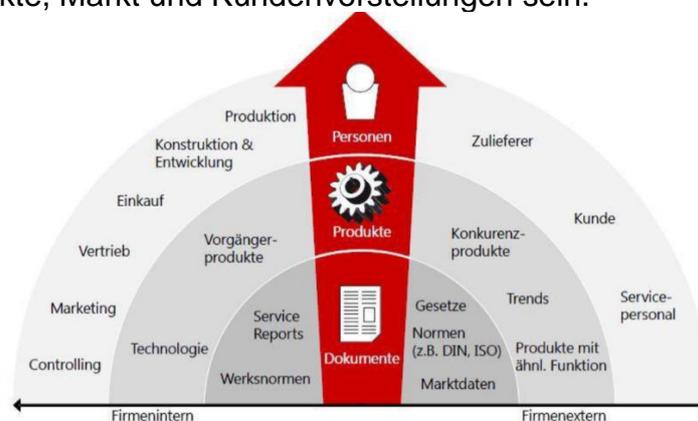


Abb. 2-4: Quellen für Anforderungen
[5, S.9]

2 Grundlagen

Grundsätzlich wird zwischen Wünschen (W) und Forderungen (F) unterschieden. Forderungen müssen vom Produkt erfüllt werden, und stellen bei Bewertungen ein eindeutiges Kriterium dar.

Sobald eine Forderung nicht erfüllt werden kann, scheidet die Variante als gültige Lösung aus. Wünsche können gewichtet werden, um ihre Bedeutung zu erfassen. Wünsche müssen nicht erfüllt werden, stellen aber bewertbare Kriterien in nachfolgenden Phasen der Lösungsfindung dar. Die Anforderungsliste kann während der Iterationsschritte im Laufe des Konstruktionsprozesses ergänzt und angepasst werden.

2.1.2.2 Ermitteln von Funktionen und Funktionsstrukturen

Abstraktion

Abstrahieren dient dazu, das Problem grundlegend zu beschreiben und das Wesentliche daran zu erkennen. Durch eine geeignete Formulierung erreicht man eine höhere Allgemeingültigkeit, und es entsteht ein größeres Spektrum an möglichen Lösungen. Die Formulierung soll dabei durch Weglassen gedanklicher Wünsche und unwesentlicher Funktionen lösungsneutral und universell erfolgen.

System und Systemgrenzen

Systeme Kennzeichnen sich dadurch aus, dass sie von ihrer Umgebung eindeutig abgegrenzt werden können. Über die Systemgrenze können dabei die Eingangs- und Ausgangsgrößen fließen. Bestehende Systeme lassen sich auch noch weiter in untergeordnete Teilsysteme zerlegen. Eine solche Zerteilung kann je nach Fragestellung und unterschiedlichsten Gesichtspunkten beliebig weit getrieben werden. Technische Gebilde sind hierbei zusammengesetzte oder eigenständige (künstliche oder konkrete) Systeme wie beispielsweise Apparate, Geräte, ganze Maschinen, Baugruppen oder auch Einzelteile. Sie bestehen aus zusammenhängenden Elementen, die über den ihnen zugeordneten Eigenschaften über Beziehungen miteinander verbunden sind. [DUBBEL, S.F1-F2]

Funktionen und Funktionsstrukturen

In technischen Systemen bestehen die Ein- und Ausgangsgrößen meist aus Energie, Stoff- und Signalumsatz (Abb.2-5). Sowohl zwischen dem Gesamtsystem und seinen Teilsystemen, als auch zwischen den Teilsystemen selbst müssen dabei eindeutige und reproduzierbare Zusammenhänge bestehen. Diese, als Funktion bezeichneten Verbindungen, sind im Sinne einer positiven Erfüllung der Aufgabenstellung gewollt und müssen daher sinnvoll und verträglich gestaltet werden.

Der Gesamtstruktur lässt sich in diesem Sinne eine Gesamtfunktion zuordnen, welche sich oft in erkennbare Teilfunktionen gliedern lässt. Über die Zusammenhänge der einzelnen Teilfunktionen miteinander und die Art und Weise, wie diese mit der Gesamtfunktion verknüpft sind, lässt sich im Allgemeinen eine detaillierten Funktionsstruktur erkennen. Aus dieser lassen sich oft mit einfachen Variationen der Funktionszuordnung Ansätze für unterschiedliche Lösungen finden. [DUBBEL, S.F1-F2]

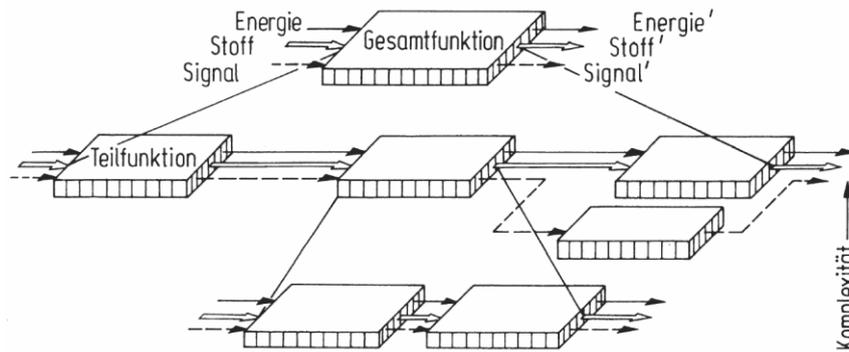


Abb. 2-5: Bilden einer Funktionsstruktur
Quelle: [DUBBEL, F2]

2.1.2.3 Lösungsprinzipien und finden prinzipieller Lösungsvarianten

Der Übergang von zusammenhängenden Funktionen und Funktionsstrukturen zu „prinzipiellen Lösungen“ ist ein entscheidender Zwischenschritt im Konstruktionsprozess auf dem Weg zur Realisierung technischer Produkte. [VDI2222]

Prinzipielle Lösungen für Teilfunktionen oder gesamte Funktionsstrukturen beschreiben den groben Zusammenhang zwischen Komponenten, welche die einzelnen zuvor gefundenen Funktionen erfüllen, in symbolhafter oder schematischer Darstellung, ohne diese bereits im Detail zu definieren (z.B.: standardisierte Schaltzeichen, Handskizzen, unmaßstäbliche Grobentwürfe oder auch freihändige Einträge in bestehenden Zeichnungen).

Der Zwischenschritt von Funktionsstrukturen zu maßstäblichen Entwürfen und Modellen über die prinzipiellen Lösungen hat den Vorteil, dass weitere wichtige Tätigkeiten noch problemlos durchgeführt werden können:

- Analyse und Beurteilung der Lösungsideen hinsichtlich:
 - der Erfüllung der Aufgabenstellung,
 - der Verträglichkeit der Teilfunktionen,
 - des Erkennens von Störeffekten
- Erzeugen von Varianten (Komponentenanordnung, alternative Strukturen)
- Erste Überlegungen zur Dimensionierung (Auslegung), Hauptabmessungen und Fertigungs- bzw. Transportmöglichkeiten

Morphologischer Kasten

Als Hilfsmittel zur methodischen Suche nach prinzipiellen Lösung wird oft ein morphologischer Kasten zur Variation verschiedener Kombinationen von Teillösungen verwendet. Der morphologische Kasten ist ein Werkzeug, mit dem sich verschiedene Teillösungen zu mehreren gesamten Wirkstrukturen und Gesamtlösungen kombinieren lassen.

Zur Ermittlung prinzipieller Gesamtlösungen werden aus jeder Zeile jeweils ein (oder mehrere) Teillösungen mit einer Teillösung aus der nächsten Zeile kombiniert. Durch

2 Grundlagen

verschieden Pfade entstehen so verschiedene prinzipielle Lösungsvarianten. Die Anzahl der möglichen Lösungsvarianten hängt dabei von der Anzahl der Teillösungen in den Zeilen und von der Verträglichkeit der Elemente untereinander ab. Das Prinzip lässt Abb. 2-6 erkennen.

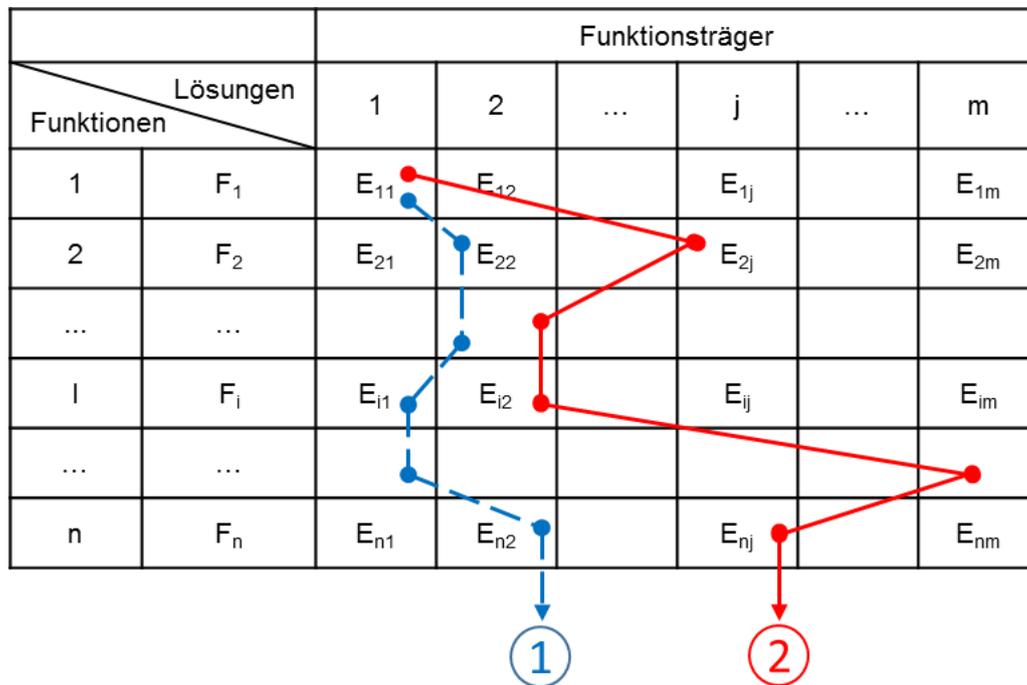


Abb. 2-6: Schematische Darstellung eines morphologischen Kastens

2.2 Bewertung technischer Produkte

Die Lösungsvarianten, welche aus dem morphologischen Kasten hervorgehen, werden mit geeigneten Bewertungsverfahren einer systematischen Bewertung unterzogen. Dabei heißt es die vorgeschlagenen Lösungen mit einem Zielsystem, der „idealen Lösung“ zu vergleichen. Diese Bewertungen dienen dazu, aus den unterschiedlichen gefundenen prinzipiellen Lösungsvarianten eine optimierte Lösung für das Problem auszuwählen, welche dann umgesetzt werden soll.

Als bewährteste Methoden der Bewertung haben sich einerseits die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach der Richtlinie VDI 2225 und andererseits die Nutzwertanalyse aus der Systemtechnik bewährt. Beim Vorgehen nach Richtlinie VDI 2225 wird versucht, in erster Linie ohne Gewichtung auszukommen, indem versucht wird, annähernd gleich bedeutende Bewertungskriterien aufzustellen. Die in dieser Arbeit verwendete Methode der Nutzwertanalyse bietet den Vorteil, durch eine Gewichtung der Bewertungskriterien, flexibler zu sein. [PBF S.166]

Bei der Auswahl der Bewertungskriterien, sollte darauf geachtet werden, dass diese sowohl technische als auch wirtschaftliche und umgebungsbedingte Gesichtspunkte berücksichtigen. Diese können aus der Anforderungsliste formuliert, oder durch andere Rahmenbedingungen wie Gesetze, Normen oder Unternehmensrichtlinien festgelegt werden.

2.2.1 Nutzwertanalyse

Bei der Nutzwertanalyse werden nach der Auswahl geeigneter Bewertungskriterien die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kategorien festgelegt. Danach wird jedes Kriterium für jede Variante über eine Werteskala eigens beurteilt. Dies geschieht in den meisten Fällen in tabellarischer Form, wie in Abb. 2-7 beispielsweise veranschaulicht wird.

Bewertungskriterium			Lösungsvariante 1		Lösungsvariante 2		Lösungsvariante 3	
Index	Bezeichnung	Gewichtungs- faktor	Wert	Gewichteter Wert	Wert	Gewichteter Wert	Wert	Gewichteter Wert
i		G_i	W_i	$G_i \times W_i$	W_i	$G_i \times W_i$	W_i	$G_i \times W_i$
1								
2								
...								
n								
Summe:		1		GW_1		GW_2		GW_3
Resultierende gewichtete Wertigkeit = Summe / max. möglicher Punktwert				WG_1		WG_2		WG_3

Abb. 2-7: Darstellung einer Nutzwertanalyse

Über die Multiplikation des Wertes W mit seiner Gewichtung G erhält man den gewichteten Gesamtwert GW . Anschließend wird die Summe der gewichteten Werte gebildet, und durch die maximal mögliche Wertigkeit dividiert um als resultierendes Beurteilungs- und Vergleichskriterium die gewichtete Wertigkeit WG zu errechnen. Diese ist im Idealfall = 1. Als abschließender Schritt der Bewertung werden die gewichteten Wertigkeiten aller Lösungsvarianten miteinander verglichen. Die Lösung mit der höchsten Punktezahl wird zur Umsetzung herangezogen. Die Basis für die Wertigkeit der Lösungen bildet hierbei eine Werteskala, wie sie Tabelle 1 zeigt.

Werteskala	
Punkte	Bedeutung
0	unbrauchbare Lösung
1	sehr mangelhafte Lösung
2	schwache Lösung
3	tragbare Lösung
4	ausreichende Lösung
5	befriedigende Lösung
6	gute Lösung mit geringen Mängeln
7	gute Lösung
8	sehr gute Lösung
9	über die Zielvorstellung hinausragende Lösung
10	Ideallösung

Tabelle 1: Werteskala
In Anlehnung an [NAEFE]

2.3 Vorgespannte Strukturen

Die Einbringung einer Vorspannung in ein bestehendes System aus unzusammenhängenden Bauteilen, ruft Reaktionskräfte und Verformungen hervor. Diese Grundlage für verspannte Strukturen findet man beispielsweise im Vorspannen des Wickelkopfes am Rotor mit definierter Vorspannung in der Bandage wieder. Eine Analogie dazu lässt sich an Hand des Beispiels einer vorgespannten Schraubenverbindung veranschaulichen.

2.3.1 Grundlagen vorgespannter Schraubenverbindungen

Über die Schraube, oder allgemein ein Verbindungsmittel, werden zwei oder mehrere unzusammenhängende Bauteile miteinander verspannt. Diese Vorspannung ruft zum einen Klemmkraft und Reibungskraft sowohl zwischen den verspannten Teilen als auch zwischen dem Verbindungsmittel und den verspannten Teilen hervor, und bewirkt zum anderen eine Stauchung bzw. Längung der Bestandteile der Baugruppe. Man spricht in diesem Zusammenhang vom Montagezustand der Verbindung. Mit dem Einbringen einer Betriebskraft bewirkt man dabei eine entsprechende Veränderung des Vorspannungszustandes. Die Betriebskraft teilt sich dabei je nach Verhältnis der Steifigkeiten und dem Angriffspunkt dieser Kraft auf und bewirkt so eine zusätzliche Verformung. Als einfachstes Beispiel sei hier die zentrische Vorspannung von zwei Platten über eine Schraube und einer direkt unter der Mutterauflage angreifenden Betriebskraft in Abb. 2-8 veranschaulicht.

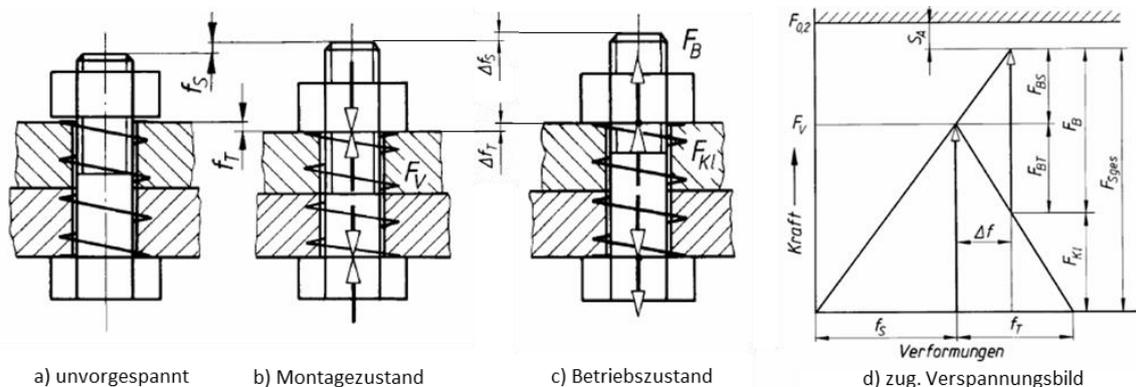


Abb. 2-8: Zustände einer Schraubenverbindung nach [RM1]

Hieraus lässt sich leicht erkennen, dass die als Zugkraft angreifende Betriebskraft der Vorspannung entgegenwirkt. Eine Erhöhung dieser Betriebskraft wird zu Folge haben, dass sich die Stauchung der Platten verringert bis die Klemmkraft auf 0 absinkt und in weiterer Folge ein Klaffen der Verbindung eintritt, sobald die Vorspannung überwunden wurde.

2.3.2 Einfluss der Steifigkeiten

Die Steifigkeiten der verspannten Teile und des Verbindungsmittels, lassen sich an den Steigungen der Geraden im Vorspannungsdreieck ablesen. Im Maschinenbau kommen zu manchen Zwecken Dehnschrauben, mit langen und schlanken Schäften zum Einsatz. Durch die Wahl dieser Geometrie wird die Steifigkeit der Schraube

2 Grundlagen

bewusst klein gehalten, und die anteilige Schraubenzusatzkraft fällt im Vergleich zur, in Abb. 2-8. verwendeten Starrschraube, deutlich kleiner aus, wie im Verspannungsdreieck in Abb. 2-9 zu erkennen ist. [STB, S.565]

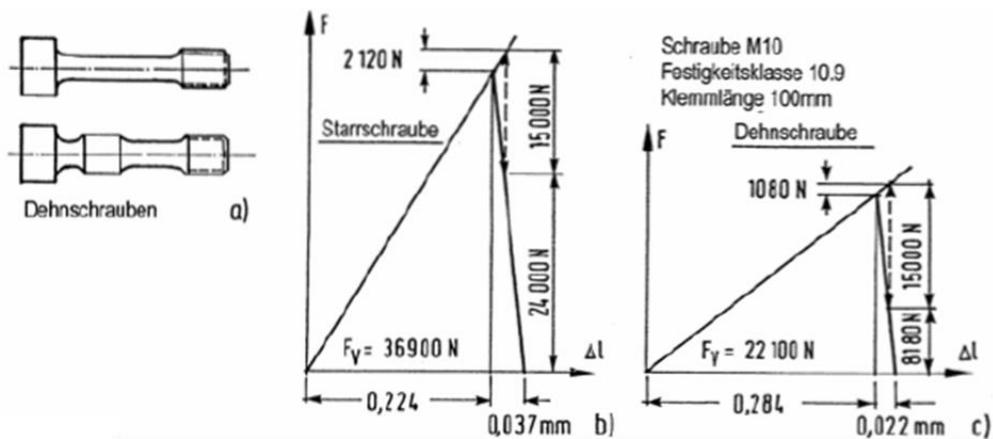


Abb. 2-9: Einfluss der Steifigkeiten
Quelle: [STB, S.565]

2.3.3 Einfluss der Krafteinleitung

Üblicherweise wird man in der Realität keine Schraubenverbindung finden, in welcher die Betriebskraft F_B in den äußersten Ebenen der verspannten Teile angreift (Abb.2-10a). Vielmehr wird die Betriebskraft im Inneren der verspannten Teile ein- bzw. ausgeleitet werden, wie es Abb.2-10b bzw. c zeigen. Dadurch entsteht ein Effekt der im Prinzip einer Reihenschaltung von Federn gleichkommt.

In den letzten beiden Fällen, wird nur jener Anteil der verspannten Teile entlastet, welcher innerhalb der Länge $n \cdot l_k$ liegt. Der Anteil der außerhalb dieser Länge liegt wird zusätzlich belastet und weiter gestaucht. Im Verspannungsschaubild bewirkt dies einerseits eine steilere Kennlinie der steifer wirkenden Schraube und gleichzeitig eine flachere Kennlinie der weicher erscheinenden verspannten Teile. [RM1, S.237]

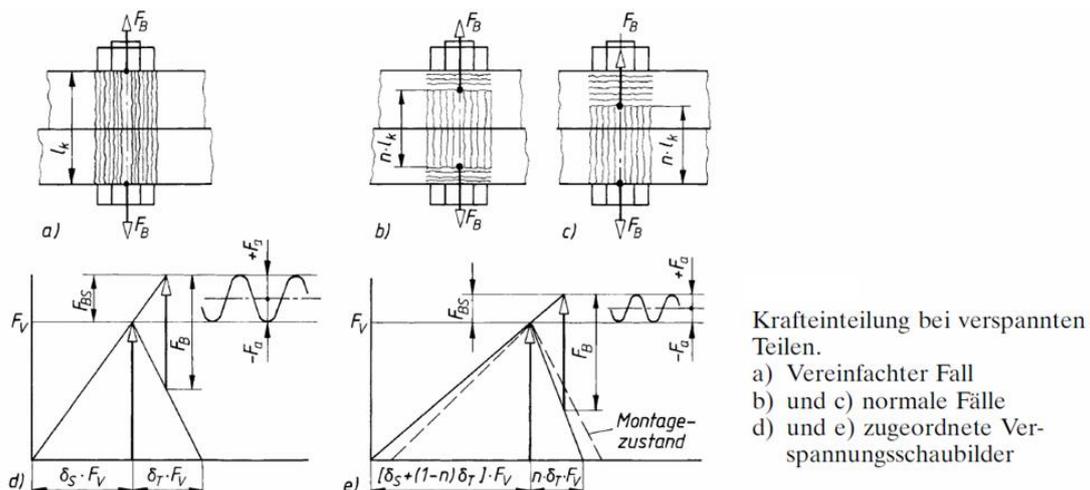


Abb. 2-10: Einfluss der Krafteinleitung
Quelle: [RM1, S.238]

2.4 Fehleranalyse und Fehlerabschätzung

Quellen: [DUBBEL, Kapitel W, Messtechnik und Sensorik],

Bei der Anwendung von Messtechniken sind neben der Auswahl von Messsystemen mit den erforderlichen Eigenschaften und Kenngrößen auch systematische Überlegungen zur Planung, Durchführung und Auswertung von Messungen anzustellen. Hierbei sind außer den technischen besonders auch ergonomische Gesichtspunkte zu beachten. Für die Durchführung einer Messung sind i. allg. mehrere Messgeräte oder Messglieder erforderlich. Die begrenzte Genauigkeit der Messgeräte verhindert hierbei, dass bei jeder Messung der identische Messwert erzielt werden kann. Bei den hierdurch verursachten Messunsicherheiten unterscheidet man dabei systematische Fehler und statistische Fehler.

2.4.1 Systematische Fehler

Systematische Fehler lassen sich dadurch erkennen, dass sie im weitesten Sinn ‚reproduzierbar‘ sind. Das heißt, dass bei wiederholter Durchführung einer Messung und auch unter leichter Abänderung der Randbedingungen der auftretende Fehler immer in der gleichen Größenordnung liegt, und immer dasselbe Vorzeichen hat. [6]

Solche Fehler sind schon meistens durch physikalische oder konstruktive Gegebenheiten unvermeidbar. Jedoch lassen sie sich durch eine geeignete Wahl der Messanordnung bzw. des Messsystems so minimieren, dass sie vernachlässigbar sind. [7]

Als Beispiele hierfür sind folgende Ursachen zu berücksichtigen:

- Fehler durch Vernachlässigungen im zugehörigen Modell
 - Vernachlässigung von Reibung
 - Näherungsrechnung
 - Unverständnis physikalischer Zusammenhänge
- Unvollkommenheiten der Messgeräte
 - Eigenverbrauch
 - Fertigungstoleranzen,
 - Innenwiderstände bei strom- und spannungsrichtiger Messung
- Unzulänglichkeiten von Seiten des Beobachters:
 - Ungenügendes theoretisches Verständnis des Messvorganges
 - mangelnde Objektivität den eigenen Messungen gegenüber
 - regelmäßige Parallaxe beim Ablesen von Zeigerinstrumenten

2.4.2 Statistische Fehler

Statistische Fehler sind Fehler, die sich bei einer Messung als zufällige Abweichung in positive oder negative Richtung zeigen. Diese zufällige Messabweichung lässt sich durch geeignete mathematische, statistische Methoden abschätzen.

2 Grundlagen

Die Bestimmung solcher Messunsicherheiten erfolgt durch die Auswertung einer Messreihe bestehend aus mehreren (voneinander unabhängigen) Einzelmessungen. [nach DUBBEL, S.W5]

Dabei erhält man den Mittelwert \bar{x} , indem man die (identisch durchgeführten) Einzelmessungen x_i aufsummiert, und durch ihre Anzahl n dividiert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Und die Standardabweichung s und Varianz V als Maß für die Streuung der Einzelmesswerte entsprechend:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$V = s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Durch die Parameter Mittelwert und Varianz/Standardabweichung lässt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x)$ angeben. Versuchsergebnisse, welche unter gleichen Testbedingungen durchgeführt werden, lassen sich hierbei in den meisten Fällen mit der Normalverteilung beschreiben. Die Funktion mit welcher der Verlauf der Normalverteilung beschrieben wird lautet:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2}$$

Die zugehörige Verteilungskurve ist in Abb.2-11 zu sehen. Die Standardabweichung s ist dabei so definiert, dass 68% aller Messwerte in einem Intervall von $[\bar{x}-s, \bar{x}+s]$ liegen. 95% aller Messwerte liegen im Intervall $[\bar{x}-2s, \bar{x}+2s]$, und 99,7% im Intervall $[\bar{x}-3s, \bar{x}+3s]$.

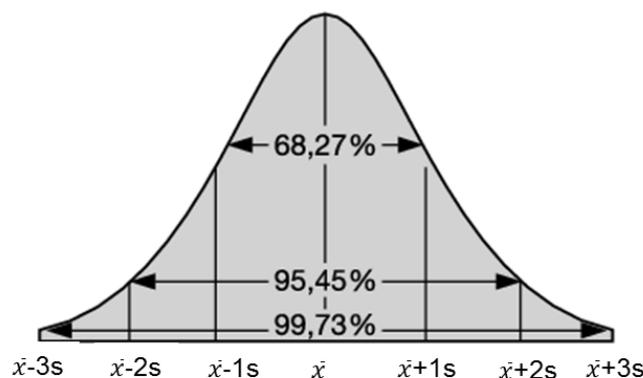


Abb. 2-11: Normalverteilung
Quelle:[10]

Aus Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung s lassen sich in weiterer Folge sogenannte ‚Vertrauensbereiche‘ für den Mittelwert angeben. Dies sind Intervalle in welcher der wahre Mittelwert μ mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit P (z.B.: 95%) tatsächlich liegt.

Bei Annahme normalverteilter Grundgesamtheit gilt dann:

$$\bar{x} - \frac{ts}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + \frac{ts}{\sqrt{n}}$$

Die Werte für t (t-Verteilung) können dabei aus Tabellen entnommen werden. Das Messergebnis kann damit angegeben werden:

$$\text{Messergebnis} = \bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{n}}$$

2.5 Versuchsplanung

Das Ergebnis einer durchgeführten Messung hängt im Allgemeinen von mehr als einem Parameter ab. Diese Parameter können das Messergebnis direkt oder indirekt über Wechselwirkung mit anderen Faktoren beeinflussen. Ziel einer Versuchsplanung sollte es deshalb sein, mit möglichst wenig Aufwand Versuchsergebnisse zu erzielen die durch eine hohe Aussagekraft über den Zusammenhang der Parameter und deren Einfluss auf das Messergebnis möglichst schnell zu einer Optimierung von Produkten und Prozessen führen können. [DUBBEL, S.S96] und [PO, S.34ff]

Bei Variation von nur einem Parameter kann auch nur der Einfluss von diesem allein auf das Messergebnis und das dazugehörige Optimum gefunden werden. Nicht berücksichtigt wird hierbei die Wechselwirkung mit anderen Parametern. Um auch diese zu erfassen, und das globale Optimum zu finden, müssen in der Versuchsplanung alle Kombinationen berücksichtigt werden. Die Methodik zur Aufstellung solcher Versuchspläne mit dem oben genannten Zielen, wird als statistische Versuchsplanung oder Design of Experiment (DoE) bezeichnet. [PO, S.34ff]

Dabei kann es auch vorkommen, dass in der Phase der Versuchsdurchführung, bzw. in den Zwischenphasen bei den Auswertungen einzelner Versuche/Messreihen, neue Parameter identifiziert werden, die in vorhergehenden Phasen (Entwurf, Versuchsplanung) entweder nicht identifiziert oder nicht ausreichend berücksichtigt wurden. In so einem Fall ist es meist notwendig die Versuchsplanung und die weiteren durchzuführenden Versuche anzupassen. Die Entscheidung, wie diese Anpassungen aussehen, ist meist davon abhängig, wie groß der Einfluss der neu identifizierten Parameter eingeschätzt wird, und in welcher Aussage für den Anwender das primäre Interesse liegt.

3 Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus

In diesem Kapitel werden die zuvor erläuterten Werkzeuge und Methoden auf die Aufgabenstellung „Entwurf des Prüfaufbaus“ angewendet. Der erste Unterpunkt beschäftigt sich mit dem Prinzip der Vorspannung und dem Einfluss unterschiedlicher Steifigkeiten der Teile in einer vorgespannten Verbindung. Ausgehend von einer Analyse der Aufgabenstellung wird dann eine Anforderungsliste erstellt, nach der in weiterer Folge die gesamte Struktur in ihre Funktionsstruktur und Teilfunktionen heruntergebrochen wird. Zu diesen Teilfunktionen werden anschließend prinzipielle (Teil-)Lösungen gesucht und zu prinzipiellen Lösungsvarianten kombiniert, und diese abschließend systematisch bewertet um als Ergebnis eine optimierte prinzipielle Lösungsvariante hervorzubringen, welche in den anschließenden Arbeitsschritten ausgearbeitet und detailliert wird.

3.1 Aufgabenstellung für den Entwurf

Die Aufgabenstellung für die Herangehensweise an die konstruktive Lösung der mit Hilfe der methodischen Konstruktion nach VDI-Richtlinien, lässt sich aus der Aufgabenstellung für diese Diplomarbeit ableiten. Die Aufgabe besteht hierbei im Entwurf und der Konstruktion eines geeigneten Prüfstandes, mit dem sich die Restspannung in Bandagen aus FVK nach einem vorbestimmten Applikationsprozess in Abhängigkeit verschiedener Parameter und verschiedener Varianten der Prozessführung ermitteln lässt.

3.2 Anforderungsliste

In der Anforderungsliste sind alle Forderungen (F) und Wünsche (W) an den zu entwerfenden Prüfstands Aufbau aufgelistet. Die nachfolgende Tabelle 2 bietet eine kategorisch unterteilte Übersicht. Diese Anforderungsliste dient als Leitfaden für die nachfolgenden Arbeitsschritte. Die Kernaussage der Punkte 1.1 bis 1.3 in Tabelle 2 liegt hierbei darin, dass die zur Prüfung vorgesehenen Proben möglichst ähnlich an den tatsächlich durchgeführten Herstellungsprozess der Bandagierung angepasst sein sollen. Weiters wurden die notwendigen funktionalen Eigenschaften der zu entwerfenden Probenaufnahme in Hinblick auf Vorbereitung und Prüfvorgang festgelegt. Die Funktionalität der Probenaufnahme sollte sowohl auf die Einflüsse im

3 Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus

Herstellungsprozess (1.8: Vorspannung, Temperatur, Handling...) als auch durch den Prüfvorgang (Aufbringen einer Last) selbst nicht beeinträchtigt werden. Anforderungen an die Struktur der Probenaufnahmen beinhalten auch, dass eine Variation von Parametern (Bandagenbreite, Vorspannkraft, Lagenzahl und Temperatureinfluss) möglich sein muss.

In Bezug auf die Durchführung der Messungen selbst muss unbedingt darauf geachtet werden, dass Nebeneffekte und systematische Fehler minimiert werden sollten. Hauptaugenmerk hierbei waren sowohl der Einfluss der Steifigkeit und der Verformung der Probenaufnahme unter Last (1.9), als auch die Verklebung von Zwischenflächen mit Harz (2.5) während der Herstellung der Proben, auf die mindestens geforderten Messgrößen Kraft und Weg (1.6). Bei der Vorbereitung der Prüflinge sollte darauf geachtet werden, dass die Montage der Probenaufnahme in Hinsicht auf Transport, Vormontage und Handhabung ohne hohen Aufwand und möglichst ohne spezielle Werkzeuge möglich sein sollte (2.2 bis 2.4).

Über Punkt 4 werden finanzielle Rahmenbedingung festgehalten, die großteils direkt aus den ersten Abschätzungen der Kosten für dieses Projekt übernommen wurden. Die unten stehende Tabelle bietet einen Überblick über die im Entwurfsprozess aufgestellten Anforderungen.

Anforderungsliste des Prüfaufbau für Bandagen					
Nr.	Art		Beschreibung	Quelle	Datum der letzten Änderung
1		Physikalisch, Technisch, Funktional			
1.1	F	Proben müssen unter Vorspannung stehen		Herstellungsprozess	28.04.2015
1.2	F	Unter Vorspannung stehende Proben können getränkt werden		Herstellungsprozess	28.04.2015
1.3	F	Getränkte Proben müssen gehärtet werden		Herstellungsprozess	28.04.2015
1.4	F	Mechanische Auslegung	Reißfestigkeit der Bandagierung, Zugkraft des Prüfstandes, Plastifizierung der Probenaufnahme,	Rechnung	22.05.2015
1.5	F	Thermische Auslegung	Maximale Temperatur	Datenblätter, Fertigung, Betrieb	28.04.2015
1.6	F	Möglichkeit der Aufzeichnung von Messgrößen	Kraft, Weg, Dehnung		28.04.2015

3 Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus

1.7	F	Variationsmöglichkeit von Parametern	Vorspannung, Bewicklungsbreite, Lagenzahl, Temperatur		28.04.2015
1.8	F	Keine Funktionsbeeinträchtigung der Komponenten und Proben durch Vorgänge im Herstellungsprozess	Ofentemperatur, Vorspannkraft, Handling...		28.04.2015
1.9	F	Keine Funktionsbeeinträchtigung der Komponenten durch Vorgänge im Prüfprozess	Struktursteifigkeit: Verformung durch Prüfkraft und Beeinflussung der Wegmessung		28.04.2015
1.10	F	Abmessungen angepasst an Prozess	Prüflingsgröße muss auf Prüfung abgestimmt sein		28.04.2015
1.11	F	Anzahl der Prüfungen pro Durchgang	Vorbereitung des Prüflings und Prüfung		28.04.2015
1.12	F	Möglichkeit zur Wiederverwendung			22.05.2015
2		Technologie, Herstellung			
2.1	F	Möglichst hoher Anteil an Nutzung firmeninterner Ressourcen			28.04.2015
2.2	W	Transport der Vorrichtung ohne Hilfsmittel (von Hand)			22.05.2015
2.3	W	Montagearbeiten ohne aufwändige Werkzeuge möglich			22.05.2015
2.4	W	Fehlerfreier Herstellungsprozess	Saubere Bewicklung, Bandführung		28.04.2015
2.5	W	Minimierung von Nebeneffekten bei Messung	Verkleben der Struktur durch Harz, Scherspannungen in Schnittfläche		22.05.2015
3		Allgemein, Intuitiv			
3.1	F	Allzeitige Gewährleistung der Sicherheit			28.04.2015
4		Wirtschaftlichkeit			
4.1	F	Materialkosten	Limit Kosten-abschätzung	Projekt-auftrag	28.04.2015
4.2	F	Fertigungskosten	Limit Kosten-abschätzung	Projekt-auftrag	28.04.2015
4.3	F	Prüfkosten	Limit Kosten-abschätzung	Projekt-auftrag	28.04.2015
4.4	F	Prüfzeit	Mindest-anforderung	Kosten-abschätz.	12.05.2015

Tabelle 2: Anforderungsliste für den Prüfaufbau

3.3 Funktionen und Funktionsstruktur

Um eine technisch sinnvolle und optimierte Lösung zu erarbeiten wird die Aufgabenstellung zunächst abstrahiert und auf mehreren Ebenen in ihre zu erfüllenden Grundfunktionen aufgeschlüsselt. Jeder Schritt mit einer weiteren Unterteilung enthält in der rechts unteren Ecke eine farbige Markierung.

3.3.1 Aufgliederung der Ebenen

3.3.1.1 Ebene 0

Die nullte Ebene bildet hier die Hauptfunktion bzw. Black-Box-Darstellung der Aufgabenstellung nach Abb.3-1.

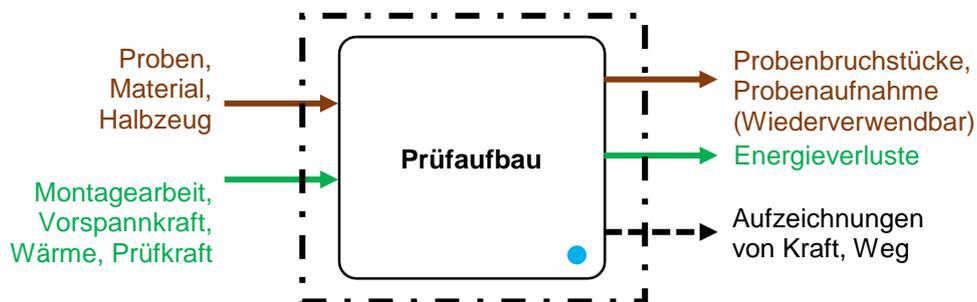


Abb. 3-1: Funktionsstruktur, Ebene 0

Die Hauptfunktion besteht hier im Wesentlichen aus dem Prüfaufbau mit seinen Ein- und Ausgangsgrößen. Nach dem Vorbereiten und Verarbeiten der eingehenden Stoffe, Energien und Signale soll am Ende des Prüfvorganges eine Aufzeichnung der gemessenen Kraft und Weggrößen vorliegen, aus denen die vorhandene Restspannung in den verarbeiteten Bandagen ermittelt werden kann.

3.3.1.2 Ebene 1

In der nächstfolgenden Ebene 1 nach Abb. 3-2 wird die erste Untergliederung der Aufgabenstellung in die Schritte „Vorbereiten der Prüflinge“ und „Prüfung“ erkennbar.

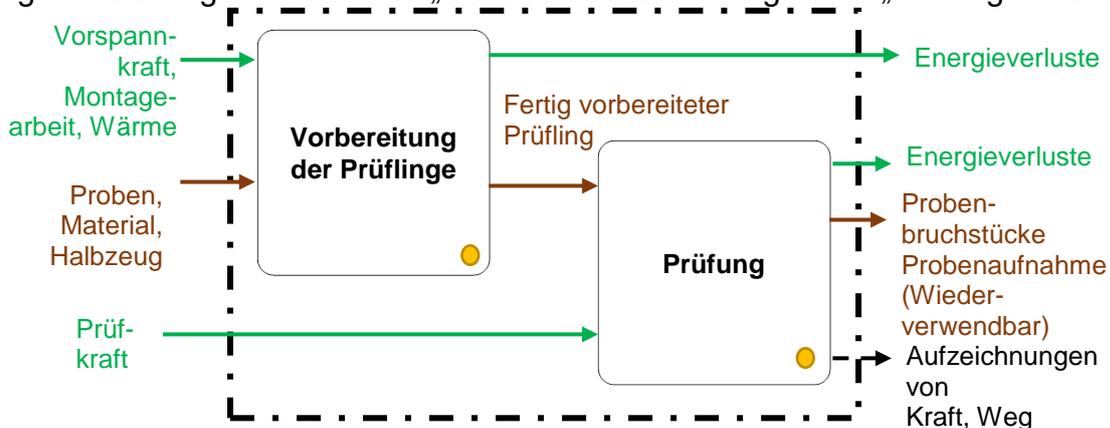


Abb. 3-2: Funktionsstruktur, Ebene 1

3 Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus

Aus den bereitgestellten Einzelteilen und Materialien soll der Prüfling so vorbereitet werden, dass die Bandagen unter Vorspannung auf einer Probenaufnahme aufgezogen werden und mit diesem den aus dem möglichen Verarbeitungsprozess entnommenen Schritten unterzogen werden können.

Die so fertig vorbereiteten Prüflinge sollen dann einer geeigneten Prüfung unterzogen werden, nach der einerseits die geforderten Aufzeichnungen von Kraft und Weg verfügbar sind und andererseits die Teile der Probenaufnahme auf jeden Fall wiederverwendbar für weitere Prüfungen bleiben.

3.3.1.3 Ebene 2

Ebene 2 im Schritt „Prüfling vorbereiten“ beinhaltet, wie in Abb. 3-3 zu erkennen, die Schritte von der Vormontage der Einzelteile zur fertigen Probeaufnahme, den Vorgang der Bandagierung unter Vorspannung und die weiteren Verarbeitungsschritte.

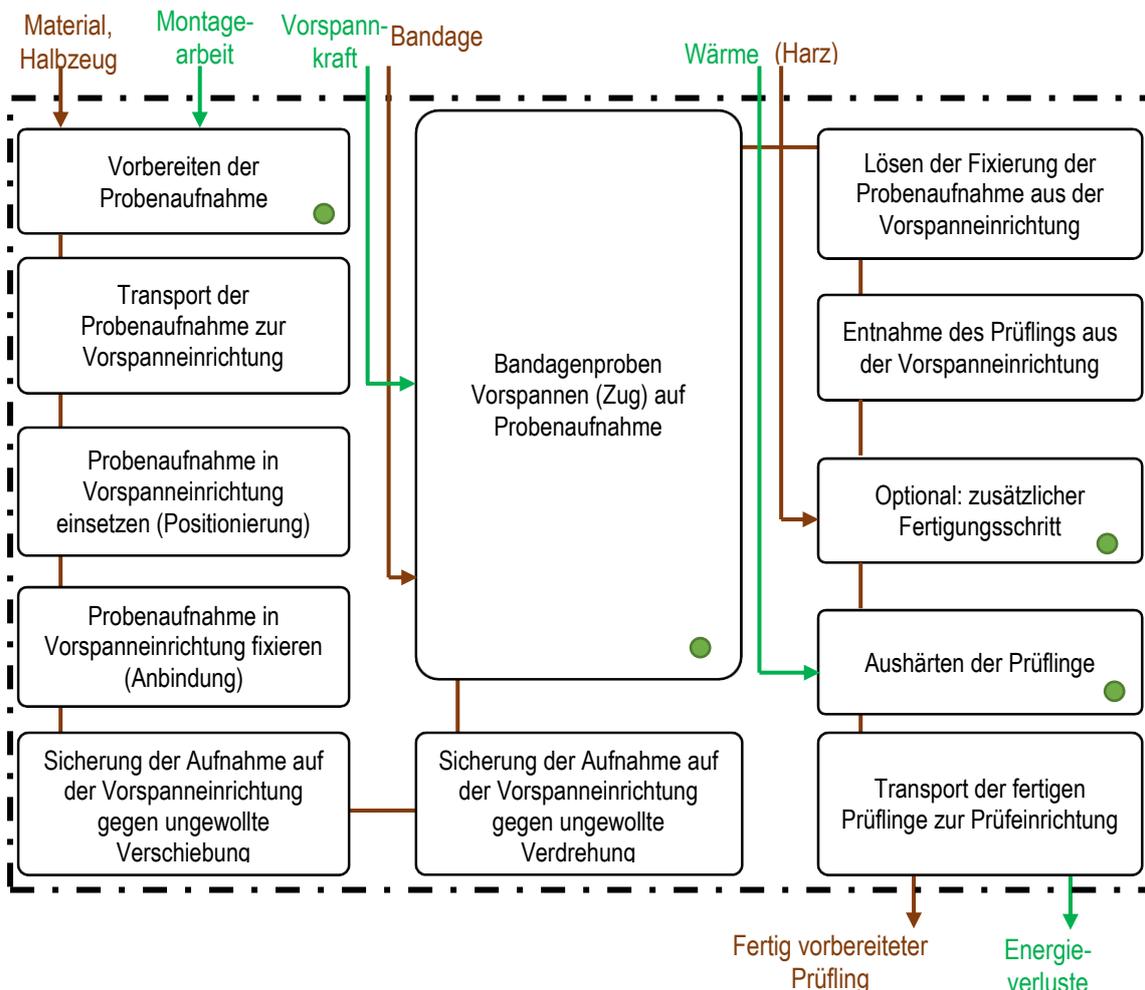


Abb. 3-3: Funktionsstruktur, Ebene 2 - "Bandagenproben vorspannen"

Im Schritt „Prüfling vorbereiten“ ist auch der für die Aufgabenstellung maßgebendste Unterpunkt enthalten, nämlich das Einbringen der Vorspannung in die Bandagen im Schritt „Bandagenproben Vorspannen (auf Zug) auf Probenaufnahme“ mit einer

3 Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus

detaillierteren Aufteilung in Ebene 3 (siehe Abbildung 3-6: „Vorspannen der Bandagen“).

Unter „Prüfung“ (Abb.3-4) fallen alle nötigen Vorgänge vom Transport des fertig vorbereiteten Prüflings zur Prüfmaschine und Fixierung des Prüflings in dieser, über die Durchführung der Prüfung und der Aufzeichnung der Messgrößen bis zur Entnahme der wiederverwendbaren Einzelteile der Probenaufnahme und der Probenbruchstücke aus der Prüfmaschine. Die Vorspannung und die Methode wie diese in die Bandagen eingebracht wird, sind entscheidende Punkte für die Form der Probenaufnahme. Die geometrische Ausführung der Probenaufnahme hat wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung der Anbindungen, sowohl auf die Bandagiervorrichtung als auch an die Prüfmaschine.

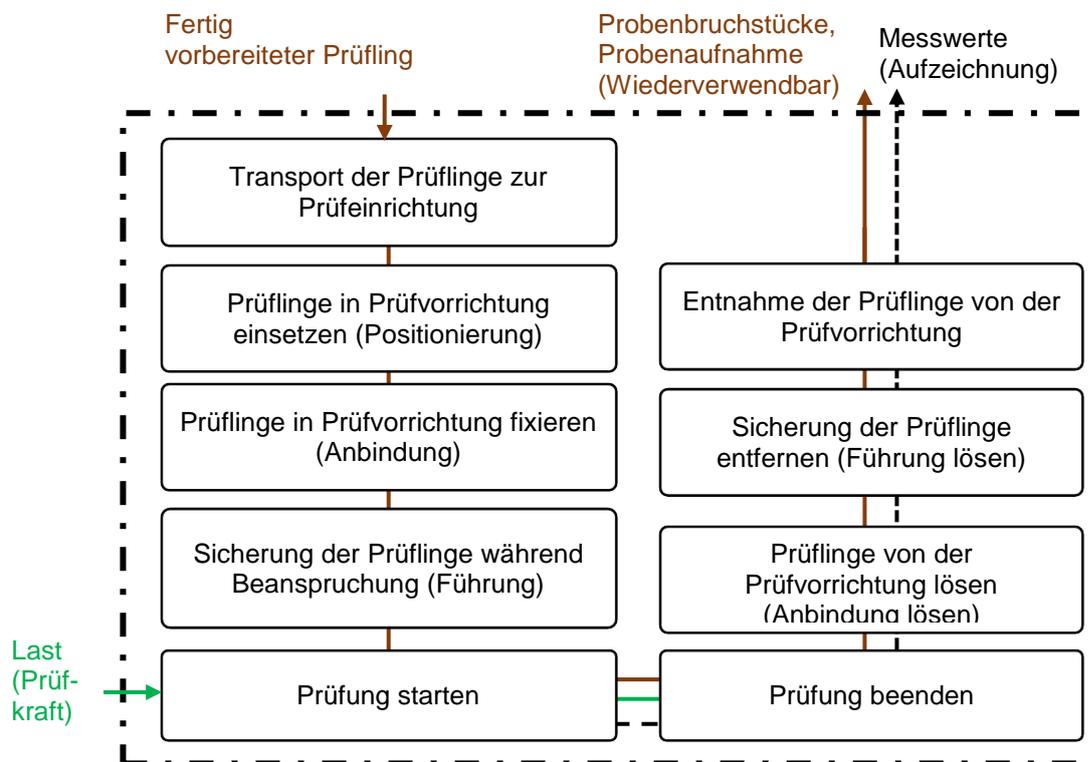


Abb. 3-4: Funktionsstruktur, Ebene 2 - "Prüfung"

Die Verbindung des Prüflings mit den relevanten Bauteilen der Prüfmaschine ist im Schritt „Prüfung“ untergebracht. Nach dem Positionieren des Prüflings in der Prüfmaschine gilt es diesen zu fixieren und gegen ungewollte Bewegungen während der Aufbringung der Belastung zu sichern.

Mit dem Startsignal für die Prüfung soll auch die Aufzeichnung der Daten beginnen und erst mit dem Stoppsignal (manueller Abbruch oder Bruch der Proben) wieder beendet werden. Nach dem Prüfungsvorgang werden die Schritte in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt.

3.3.1.4 Ebene 3

In diesem Unterpunkt sind noch die zugehörigen Grafiken zur 3. Ebene der Funktionsstruktur (Abb.3-5 bis 3-8) angeführt, und die wichtigsten zu erfüllenden Funktionen hervorgehoben und kurz erläutert.

Im Schritt der Vorbereitung der Probenaufnahme werden die vorgefertigten Einzelteile, Normteile und Halbzeuge zusammengeführt und unter Einbringung von Montagearbeit zusammengesetzt.

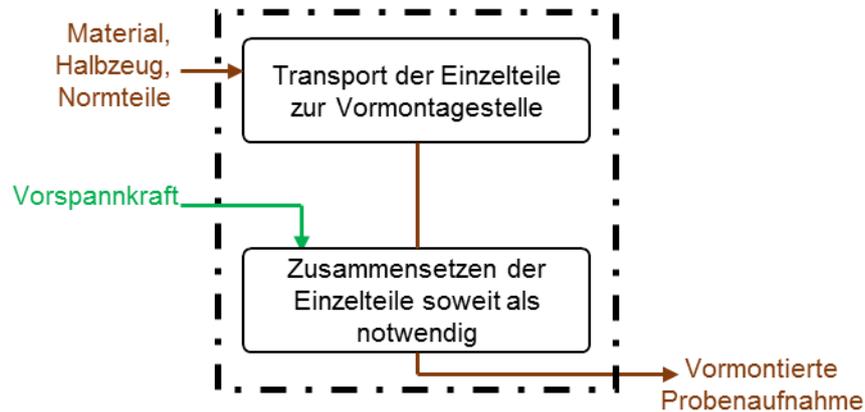


Abb. 3-5: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Vorbereiten der Probenaufnahme"

Das Vorspannen der Bandage auf der Probenaufnahme unterteilt sich in die Fixierung der beiden Enden der Bandage auf der Probenaufnahme, und dem eigentlichen Einbringen der Vorspannung in die Bandagierung.

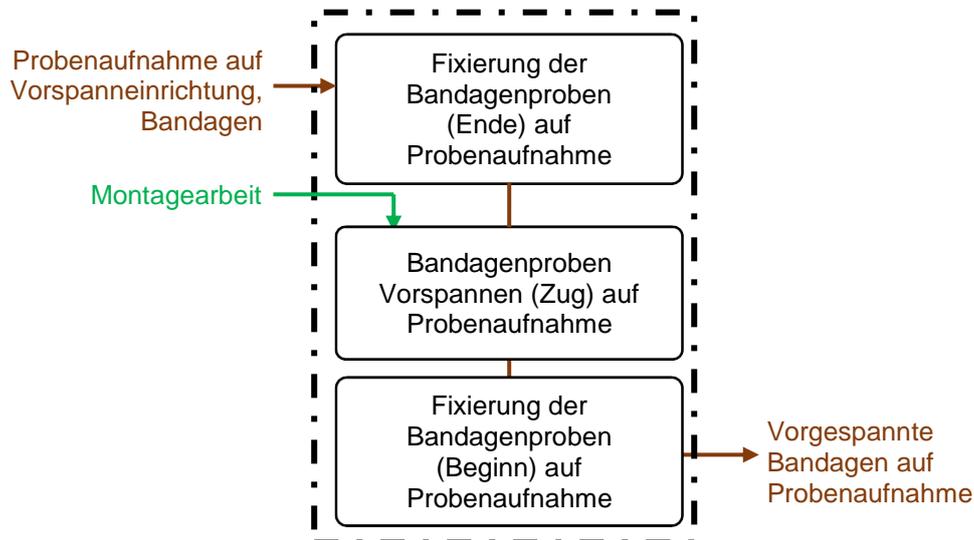


Abb. 3-6: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Vorspannen der Bandagen"

Als optionaler zusätzlicher Fertigungsschritt, kann beispielsweise von einer zusätzlichen Tränkung der Bandagierung in Harz ausgegangen werden, wie es schon im Kapitel 1.3.2 erwähnt worden ist. Während des Tränkvorganges muss unbedingt darauf geachtet werden, dass ausgewählte Flächen während der Prüfung

3 Anwendung der VDI-Richtlinie auf den Entwurf des Prüfaufbaus

nicht mit Harz benetzt werden, da dies zu Schwierigkeiten bei der Demontage oder während der Messung führen könnte.

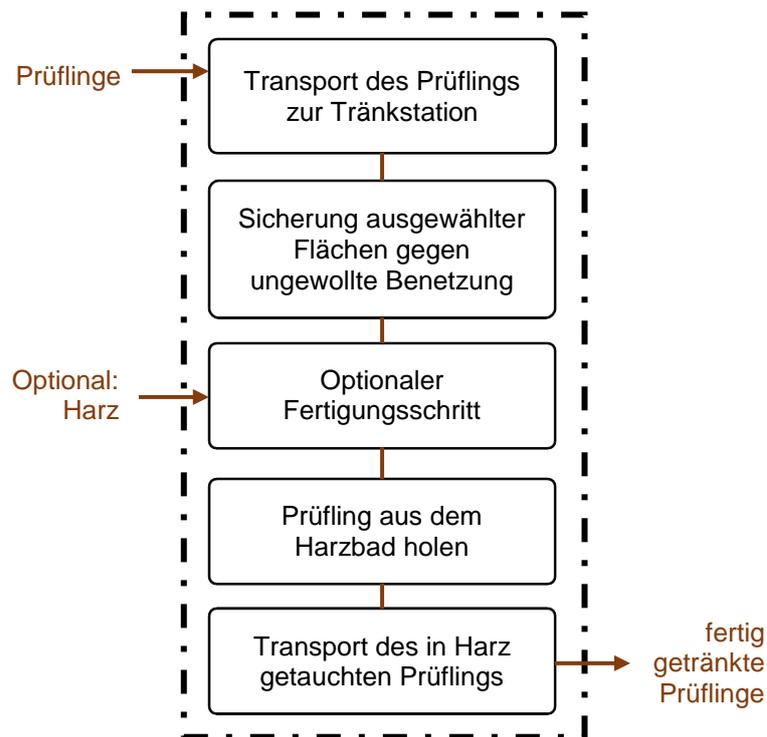


Abb. 3-7: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Optionaler Zwischenschritt Tränken"

Der letzte Schritt umfasst den Vorgang des Aushärtens des gesamten Prüflings im Ofen, und bildet so den Abschluss in der Vorbereitung der Prüflinge.

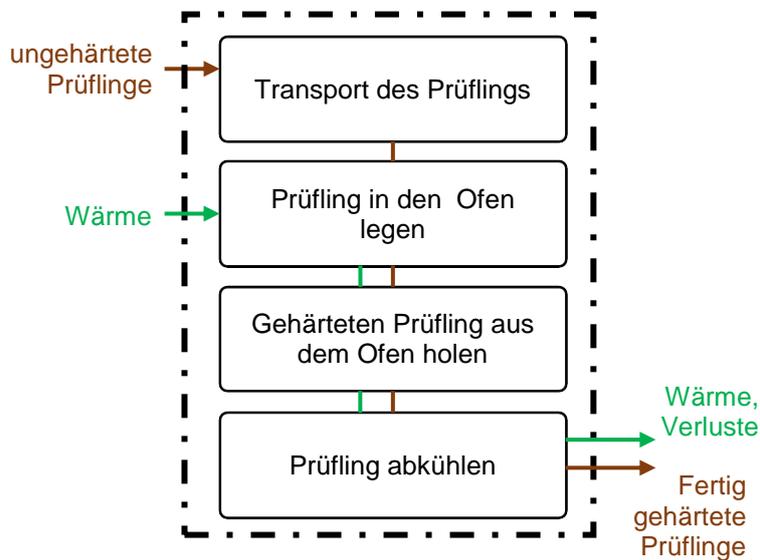


Abb. 3-8: Funktionsstruktur, Ebene 3 - "Härten der Prüflinge"

3.4 Lösungsprinzipien und prinzipielle Lösungen

Zu den in der Funktionsanalyse gefundenen Teilfunktionen und Funktionsstrukturen gilt es nun, prinzipielle Lösungen zu finden.

In den folgenden Abbildungen 3-9 bis 3-12 findet sich eine Übersicht der wichtigsten im morphologischen Kasten angeführten Funktionen, zu denen eine oder mehrere prinzipielle Lösungen gefunden und angeführt werden.

3.4.1 Teilfunktion Vorbereitung

In den Schritten der Vorbereitung der Probenaufnahme sollen die Einzelteile und Normteile der Probenaufnahme soweit zusammengesetzt werden, dass diese im nächsten Schritt als fertige Baugruppe mit den Bandagen zusammengeführt und bespannt werden können.

Dabei wird auch schon Augenmerk auf die Variation der Parameter der Breite der Bandagierung und der Lagenzahl gelegt.

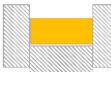
Ebene				Funktion	Teillösung				
0	1	2	3		1	2	3	4	
← Prüfaufbau →	← Vorbereitung →	Vorbereiten der Probenaufnahme	Transport der Einzelteile zur Vormontage		 von Hand	 via Hilfsmittel			
			Variation der Breite der Bandagierung ermöglichen		Führungs- & Distanz-Elemente	Verschiedene Grundkörper, auf denen die Proben aufgenommen werden	nicht durch Grundkonstruktion eingeschränkt		
			Variation der Lagenzahl ermöglichen		1 Paket Parallele Lagen				
			Parallele Ausrichtung der Lagen Sicherstellen		Seitliche Führungen		Präzise Wicklung/Auflage		
			Kinematische Verträglichkeit sicherstellen (Einbringen der Last)		Probenaufnahme in 2 Teilen		Probenaufnahme einteilig mit Angriffsplatz auf Probe direkt	3 Teilig (Aufspannung der Krafteinleitung an Grundkörper)	
			Vormontage der Probenaufnahme		händische Montage		automatisiert		

Abb. 3-9: Teilfunktionen beim „Vorbereiten“

3.4.2 Teilfunktion Vorspannung einbringen

Die Funktion „Bandagenproben Vorspannen auf Probenaufnahme“ bildet einen Kernpunkt in der Vorbereitung der Prüflinge, und hat wesentlichen Einfluss auf die Form der Probenaufnahme selbst. Diese muss auf die Art der Einbringung der Vorspannung angepasst werden.

Als Varianten für die Aufspannung der Bandagen kann die Vorspannung im Band dabei radial oder linear eingebracht werden.

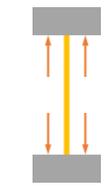
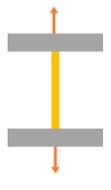
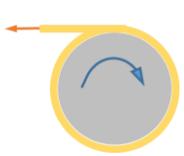
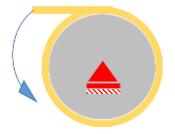
Funktion	Teillösung			
	1	2	3	4
Vorspannung einbringen	 <p>Auseinanderdrücken</p>	 <p>Auseinanderziehen</p>	 <p>Aufwicklung unter Zugkraft (Probenaufn. bewegt.)</p>	 <p>Aufwicklung unter Zugkraft (Probenaufnahme steht)</p>

Abb. 3-10: Teilfunktion "Bandagenproben vorspannen auf Probenaufnahme"

3.4.3 Teilfunktion Fixierung der Bandagenproben

Um die Vorspannung überhaupt einbringen zu können, muss die vorgespannte Bandage natürlich auf der Probenaufnahme fixiert werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Art der Fixierung mit der Kombination von Bandage und Probenaufnahme, und somit auch mit der Kombination ihrer Werkstoffe verträglich ist.

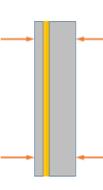
Funktion	Teillösung					
	1	2	3	4	5	6
Fixierung der Bandagenproben (Beginn/Ende) auf Probenaufnahme	 <p>Stoffschluss</p>	 <p>Anker-effekt</p>	 <p>Aufklemmen</p>	 <p>Anbinden</p>	 <p>An-laschen</p>	<p>Kombination aus 1-5</p>

Abb. 3-11: Teilfunktion "Fixierung der Bandagenproben"

3.4.4 Teilfunktion Prüfung

Die Umsetzung der Teilfunktion „Prüfung“ zielt darin ab, aus dem Zusammenhang von Kraft und Weg einen Rückschluss auf die verbleibende Restspannung zu ermöglichen. Die dafür in Frage kommenden Messprinzipien beruhen darauf, diese über die in Kapitel 1.1.3 erwähnten Wirkungen der Vorspannung zu ermitteln.

Funktion	Teillösung	
	1	2
Prüfung	Rückschluss über Messung der Reaktionskräfte (Klemmkraft zwischen verspannten teilen): Aufbringen einer Last in die verspannten Teile, und Messung der Kraft im Abhebepunkt	Rückschluss über Messung der Verformung unter Vorspannung: Vergleich der Verformung der verspannten Probenaufnahme nach der Bandagierung und nach der Fertigstellung

Abb. 3-12: Teilfunktion „Prüfung“

Aus der Kombination der sinnvollsten und verträglichsten prinzipiellen Lösungen zu einzelnen Funktionen und Funktionsstrukturen wurden nun mehrere Varianten einer prinzipiellen Gesamtlösung entwickelt.

3.5 Vorstellung der prinzipiellen Lösungsvarianten

In diesem Kapitel sollen die entwickelten Lösungen kurz vorgestellt, mit jeweils einer Abbildung (Abb.3-13 bis 3-19) dargestellt, und auf einige Details eingegangen werden.

Prinzipielle Lösungsvariante 1

Bei dieser Lösungsvariante wird die Probenaufnahme als kreisrunde Scheibe mit einer radial gerichteten, durch den Mittelpunkt verlaufenden Trennebene ausgeführt. Als Hilfsmittel für die Bandagierung wird eine Welle benötigt, um die Bandagen mit Vorspannung auf der Scheibe aufzuwickeln. Die Variation der Breite soll dabei über seitliche Einlagen und Führungselemente geschehen. Die Lagenzahl kann über die Höhe der Bandagierung variiert werden.

Als Prüfkonzept soll hier ein Zugversuch umgesetzt werden, bei dem aus der gemessenen Kraft-Weg-Kurve die Kraft im Abhebepunkt bestimmt werden soll. Die Anbindung an die Zugprüfmaschine soll dabei mit einem System aus Laschen und Bolzen erfolgen. Die grundlegenden Überlegungen zur Probenform und der Durchführung des Prüfungsvorganges hierbei stammen aus dem erwähnten ‚Split-Disc-Test‘. (Vgl. Kapitel 1.3)

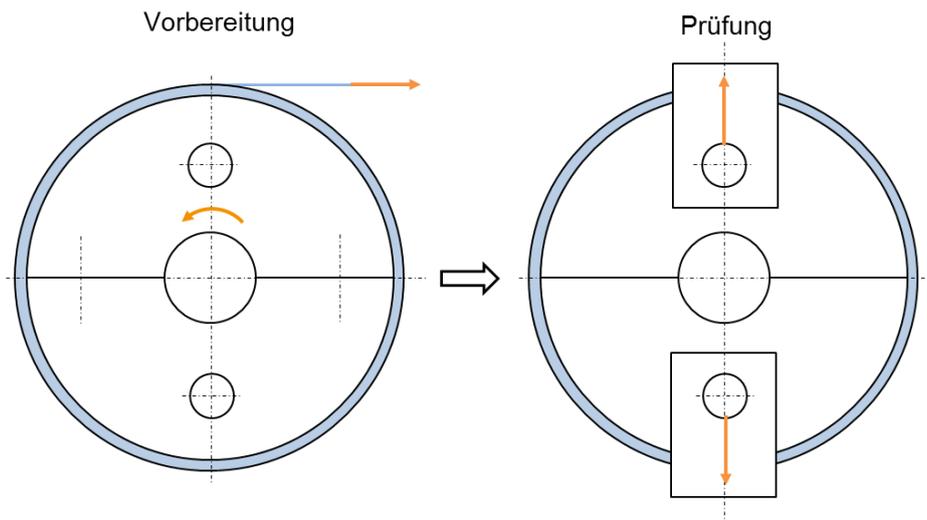


Abb. 3-13: Prinzipielle Lösungsvariante 1

Prinzipielle Lösungsvariante 2

Das umgesetzte Prüfkonzept bei dieser Variante entspricht wieder dem Zugversuch, wie es schon in der ersten Variante angedacht war.

Ein wesentlicher Unterschied hierbei ist aber die Form der Probenaufnahme, und der Ablauf im Einbringen der Vorspannung in die Bandagen. Nach der lockeren Aufbringung der Bandagenlagen über zwei Langbolzen, wird die Vorspannung mit Hilfe einer Spindel erzeugt, welche die geführten Bolzen auseinanderdrücken soll.

Die Langbolzen sollen dabei auch direkt einen Teil der Anbindung an die Zugprüfmaschine mittels Laschen und Bolzen erfüllen.

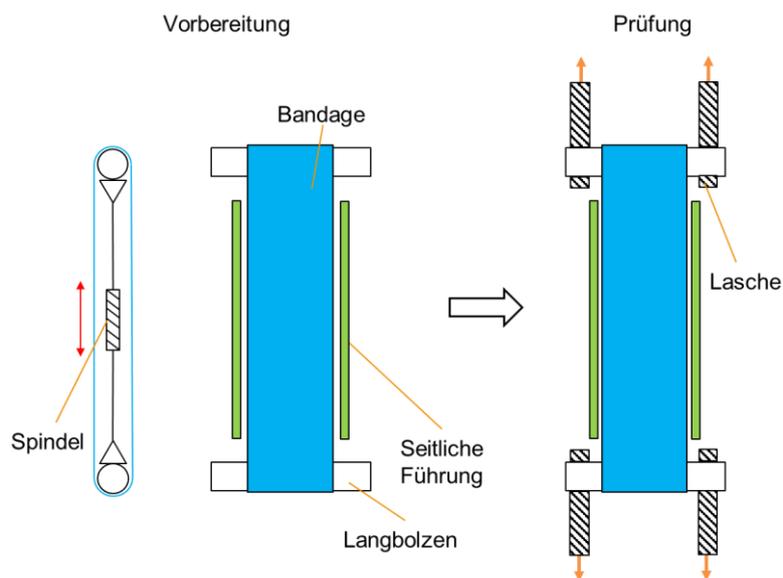


Abb. 3-14: Prinzipielle Lösungsvariante 2

Prinzipielle Lösungsvariante 3

Der Aufbau dieser Variante bestand im Wesentlichen aus einem anpassungsfähigen Gestell-Rahmen, bei dem die Vorspannung linear in das Band eingebracht wird. Die Bandage wird zuerst in eine Aufhängung geklemmt, welche in den Rahmen von oben eingehängt wird. Nach dem Aufbringen der Vorspannung kann das andere Ende der Bandage wieder mit einer Klemm-Vorrichtung auf der anderen Seite des Rahmens eingehängt werden.

Die eigentliche Prüfung soll hierbei wieder auf einer Zugprüfmaschine erfolgen. Die Einleitung der Kraft von der Zugmaschine über die Aufhängung in die Bandage kann dabei wieder mit einem System aus Laschen und Bolzen konzipiert werden.

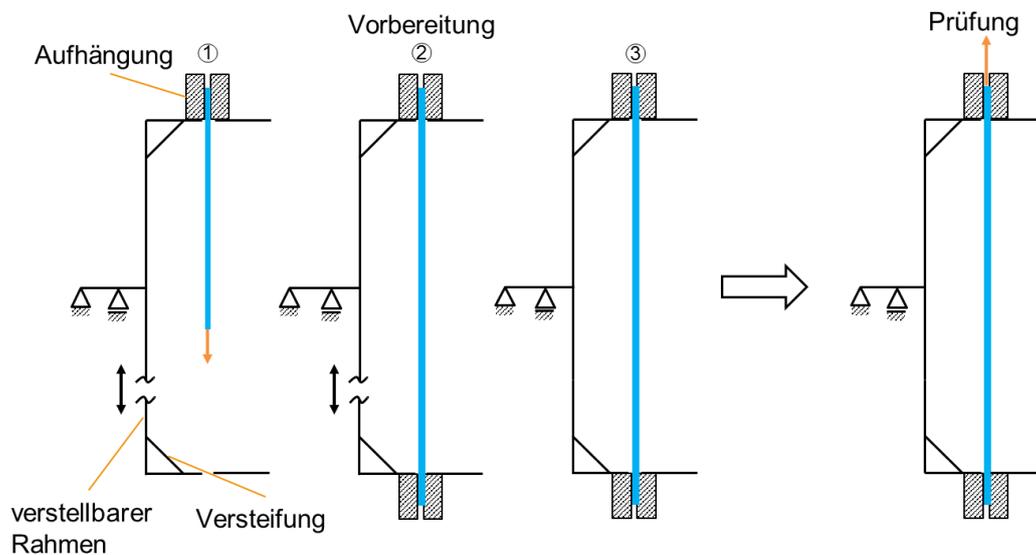


Abb. 3-15: Prinzipielle Lösungsvariante 3

Prinzipielle Lösungsvariante 4

Lösungsvariante 4 gleicht bezüglich Aufbau und dem Vorbereitungsprozess völlig der Variante 3. Der Wesentliche Unterschied zu den bisher aufgezeigten Varianten besteht hier im Prinzip der Ermittlung des Anteils an verbleibender Restspannung über ihre Wirkung der Verformung im Bauteil.

Der Rahmen wird in dieser Variante ohne Versteifung ausgeführt, um den Effekt der Verformung etwas mehr auszuprägen. Bei dieser Variante soll die Durchbiegung am Gestellrahmen zwischen den jeweiligen Produktionsschritten über eine Abstandsmessung ermittelt werden.

Zustand 0 entspricht hierbei dem Ausgangszustand vor dem Aufbringen der Vorspannung, Zustand 1 wird sich nach dem Vorspannen einstellen, und Zustand 2 entspricht dem Zustand nach dem Durchlauf des gesamten Herstellungsprozess inklusive optionalem Tränken und Aushärten.

Der Aufwand einer weiteren Prüfung durch Lasteinbringung entfällt hier somit.

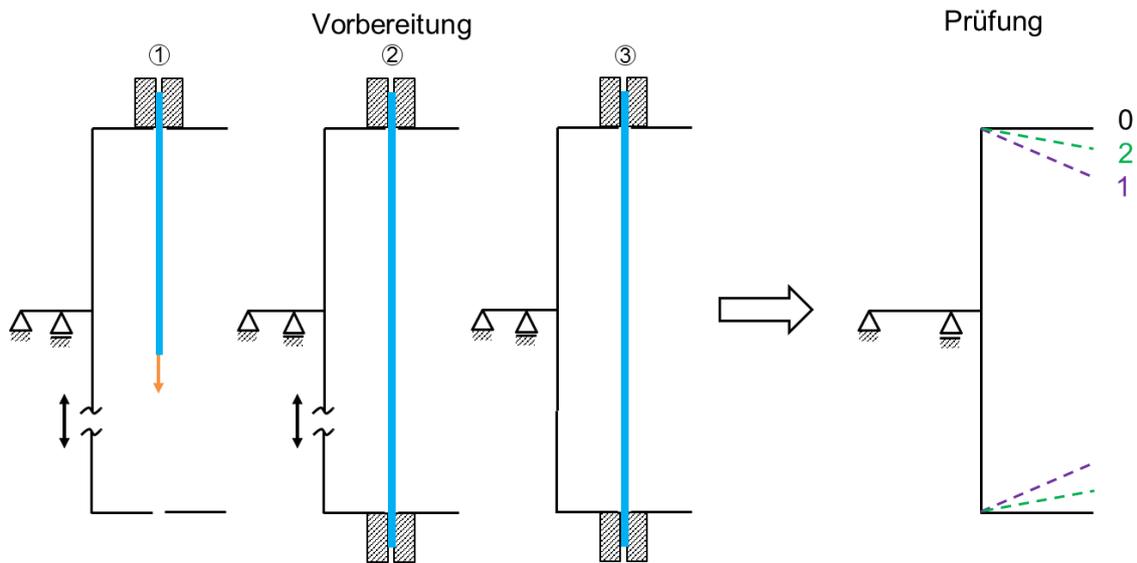


Abb. 3-16: Prinzipielle Lösungsvariante 4

Prinzipielle Lösungsvariante 5

Das Prüfprinzip in Variante 5 entspricht demselben wie in den Varianten 1 bis 3. Die Vorbereitung ist dabei leicht abgeändert, indem die Vorspannung hier über die Aufwicklung der Bandagenlagen auf drehbar gelagerten Bolzen eingebracht wird, welche nach ihrer Fixierung in weiterer Folge wieder als Teil der Anbindung an die Prüfmaschine verwendet werden.

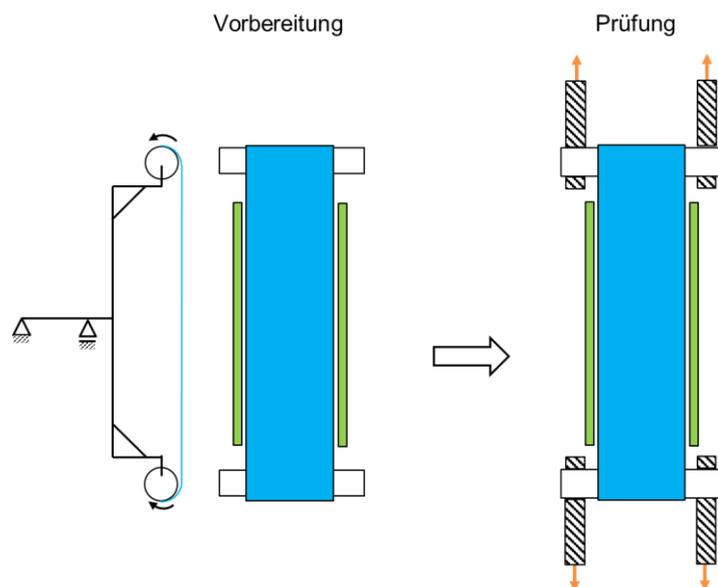


Abb. 3-17: Prinzipielle Lösungsvariante 5

Prinzipielle Lösungsvariante 6

Die Variante entstand in der Folge aus einer Kombination der Überlegungen zu Variante 4 und Variante 5. Während der Prozess der Vorbereitung von Variante 4 übernommen wurde, kommt in diesem Fall das Prüfprinzip aus Variante 5, der Rückschluss auf die Restspannung über die Verformung des Gestells der Probenaufnahme zum Einsatz.

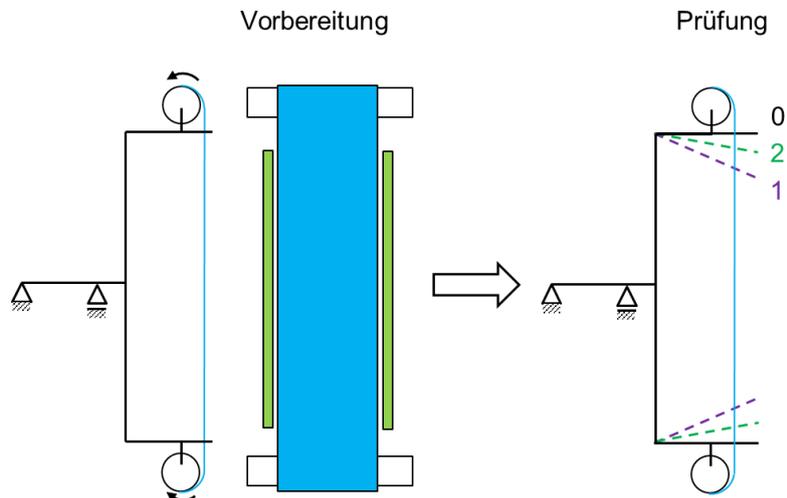


Abb. 3-18: Prinzipielle Lösungsvariante 6

Prinzipielle Lösungsvariante 7

Bei dieser Variante sollte ein zusätzlicher Aufbau an einem scheibenförmigen Testobjekt angebracht werden, welcher im Wesentlichen aus mehreren, über den Umfang gleichmäßig verteilten, auskragenden Bolzen bestand. Diese Bolzen sollten mit einer entsprechenden Ausnehmung versehen sein, welche als Auflagefläche und Führung für die Bandagierung dienen sollten. Die Ermittlung der verbleibenden Restspannung sollte nun wieder über das Prinzip der Distanzmessung zwischen gegenüberliegenden Bolzen erfolgen. Dies stellt eine Abwandlung der Varianten 4 und 6 dar, welche mit dem Fertigungsprozess besser kompatibel ist.

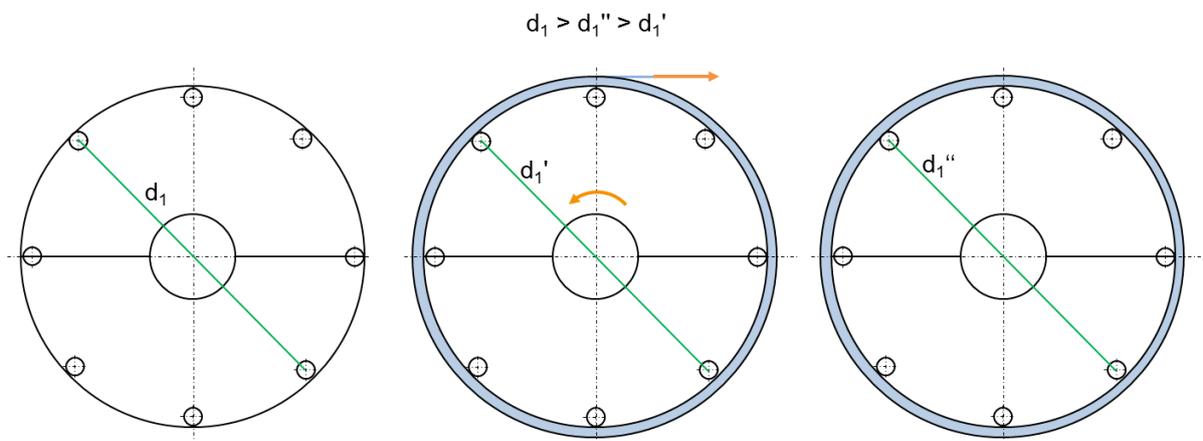


Abb. 3-19: Prinzipielle Lösungsvariante 7

3.6 Bewertung der prinzipiellen Lösungsvarianten

Bei der Bewertung der prinzipiellen Lösungsvarianten mit der Nutzwertanalyse wurde darauf geachtet, dass die zu bewertenden Kriterien, welche die PLV erfüllen sollten, sinnvoll ausgewählt wurden.

Die Kriterien sollten sich auf die durchzuführenden Schritte des gesamten Prozesses zur Ermittlung der Restspannung in den Bandagen verteilen, und sich gleichzeitig mit den Forderungen aus der zuvor erstellten Anforderungsliste decken. Die Bewertung selbst wurde von mehreren an dem Projekt beteiligten Mitgliedern jeweils anonym durchgeführt. Die unten stehende Tabelle 3 bietet eine Zusammenfassung der Auswertung, entstanden durch die Mittelwertbildung der jeweiligen Bewertungen der einzelnen Personen.

Index	Bewertungs-kriterium	Gewichtung	Mittelwert der gewichteten Bewertungen						
			Lösungsvariante						
i		G_i	1	2	3	4	5	6	7
1	Handling und Transport	0.05	0.38	0.28	0.30	0.30	0.29	0.29	0.31
2	Anteil Eigenfertigung	0.05	0.23	0.15	0.18	0.18	0.15	0.15	0.19
3	Montageaufwand	0.05	0.38	0.24	0.20	0.19	0.21	0.21	0.37
4	Einbringung der Vorspannung	0.15	1.30	0.40	0.33	0.33	0.58	0.50	1.20
5	Aufwand für optional zusätzlichen Fertigungsschritt	0.15	1.23	0.90	0.93	0.93	0.93	0.93	1.23
6	Aufwand für Härteprozess	0.15	1.30	0.95	0.98	0.98	0.98	0.98	1.20
7	Benötigte Hilfsmittel	0.1	0.45	0.42	0.42	0.40	0.40	0.40	0.63
8	Prüfungsaufwand	0.1	0.58	0.50	0.48	0.45	0.50	0.45	0.57
9	Messung	0.1	0.85	0.48	0.28	0.23	0.38	0.32	0.45
10	Variation der Parameter	0.1	0.82	0.58	0.45	0.45	0.42	0.42	0.65
Summe		1.00	7.52	4.91	4.53	4.43	4.83	4.63	6.79

Tabelle 3: Übersicht der Bewertung der Lösungsvarianten

Als Resultat der Bewertung der Prinzipiellen Lösungsvarianten geht hervor, dass Variante 1 als mit 7.52 Punkten als höchstwertige Lösungsvariante den Beurteilungsbereich zwischen „gute Lösung“ und „sehr gute Lösung“ erreicht. Variante 1 wird deshalb als beste Lösung für die Umsetzung vorgeschlagen.

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

In diesem Kapitel soll die konstruktive Umsetzung der ausgewählten Lösungsvariante erläutert werden. Ausgehend vom Konzept werden die Rahmenbedingungen für die tatsächliche Gestaltung und den Konstruktionsprozess abgeklärt, und die Detailierung schrittweise durchgeführt.

4.1 Konstruktive Gestaltung

Bei der konstruktiven Gestaltung galt es, den gesamten Prozess und seine Teilschritte (Vormontage, Bandagieren, Härten, Auskühlen, Prüfvorgang und auch den Transport zwischen den einzelnen Stationen) bezüglich seiner Randbedingungen und den auftretenden Belastungen zu berücksichtigen und auszulegen. Es sind somit die in der Funktionsanalyse aufgegliederten Einzelfunktionen nicht alle neu zu erfinden, sondern an die bestehende Umgebung anzupassen.

4.1.1 Probenaufnahme

Aus der Umsetzung des Prinzips zur experimentellen Ermittlung der Restspannung mit Lösungsvariante 1 gilt die geometrische Form einer Kreisscheibe mit einer radial orientierten und durch den Mittelpunkt verlaufenden Trennebene als Grundform für den Prüfkörper. In der Vormontage der Probenaufnahme soll eine zusammenhängende Form hervorgehen, die es erlaubt das Bandagieren möglichst ähnlich dem tatsächlichen Fertigungsprozess zu gestalten und gleichzeitig die Teilbarkeit der Scheibenhälften während des Prüfvorganges auf der Zugprüfmaschine sicherstellt. Dies wurde durch eine Verschraubung über jeweils vier an den beiden Scheibenhälften angeschweißte Blechwinkel verwirklicht (Abb.4-1).

Die genaue Ausrichtung der beiden Scheibenhälften zueinander wurde durch Zylinderstifte erreicht, welche in der Trennebene liegend an drei Positionen zwischen den beiden Scheibenhälften eingefügt wurden. Die nötigen konstruktiven Details an der Probenaufnahme zur Erfüllung der Funktionen des Bandagierens finden sich in mehreren Merkmalen wieder. Die zentrische Bohrung durch den Mittelpunkt der resultierenden Vollscheibe mit eingefräster Passfedernut, ist erforderlich um die Welle an der Bandagiermaschine mit den Scheiben formschlüssig und lösbar zu verbinden.

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

Die konzentrisch zur Mittelbohrung liegenden, spanend bearbeitenden, Planflächen auf den Stirnseiten der Scheibe ermöglichen eine genaue Positionierung auf der Welle in axialer Richtung mittels Distanzhülsen.

Allgemein:

- Silikonpaste an vorgegebenen Flächen (Benetzung mit Harz nicht erwünscht)
- Markierungen auf zusammengehörigen Scheibenhälften

Seitliche Führungsringe:

- 3 Breitenvarianten
- 8 x Durchsteckverbindung M8

Durchgangsbohrung für Bolzen

Verschraubung:

- Passstifte zur Ausrichtung während Vormontage
- 4 x Blechwinkel je Halbscheibe
- 4 x Sechskantschraube je Scheibe

Mittelbohrung:

- Passfedernut zur Drehmomentübertragung auf Welle f. Bandagierung
- Eindrehung 1 mm beidseitig: Definierte Tolerierungsfläche für Abstände auf Welle

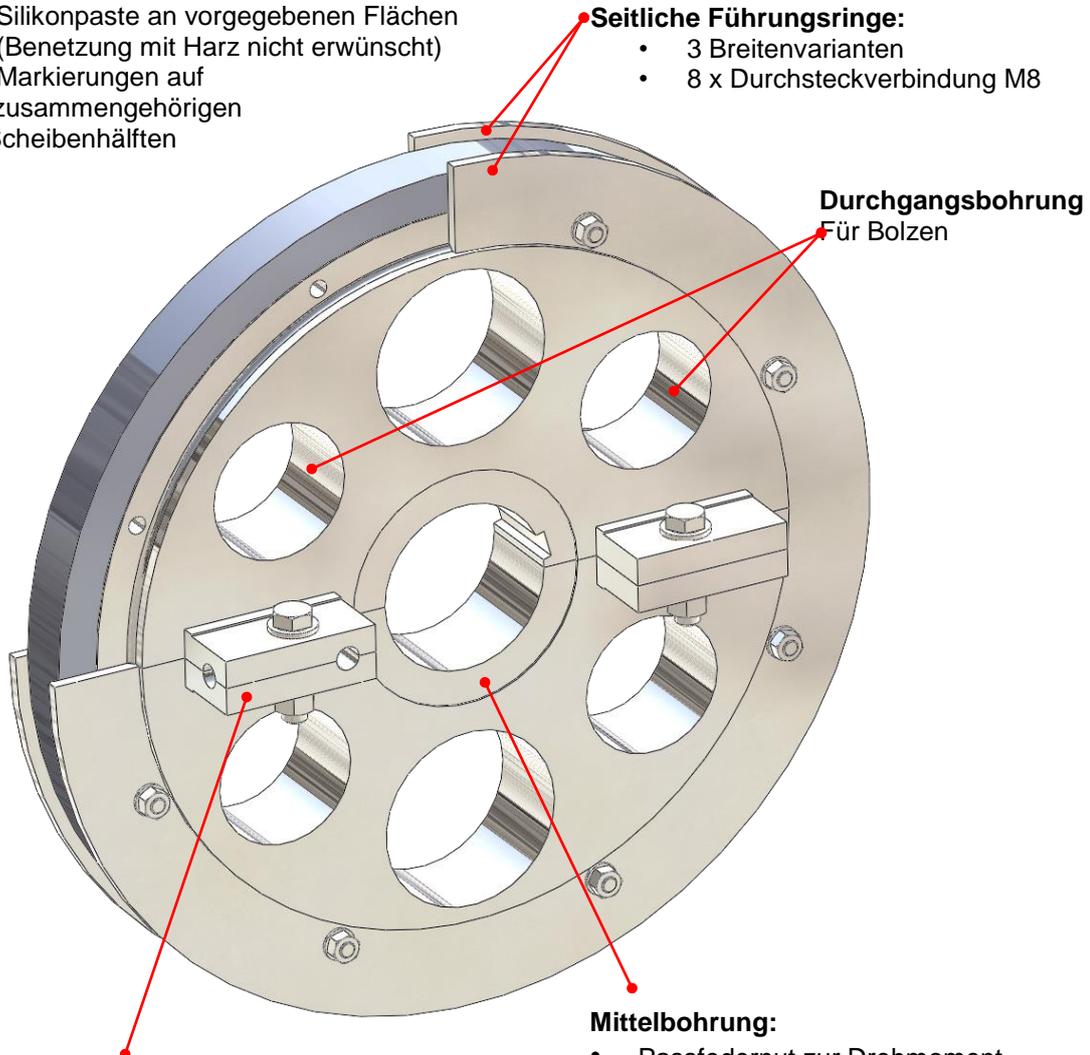


Abb. 4-1: Konstruktive Ausführung Probeaufnahme, 3D Modell

Über den Umfang verteilt wurde die Scheibe mit Durchgangsbohrungen für Sechskantschrauben versehen, die zur Montage von seitlichen Führungsringen dienen. Diese Führungsringe stellen die genaue Führung der Bandagen auf der Scheibe während des Bandagiervorganges auf der Welle sicher und ermöglichen durch ihre Ausführung in drei verschiedenen Stärken die Variation der Breite der Bandagen (Abb.4-2).

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

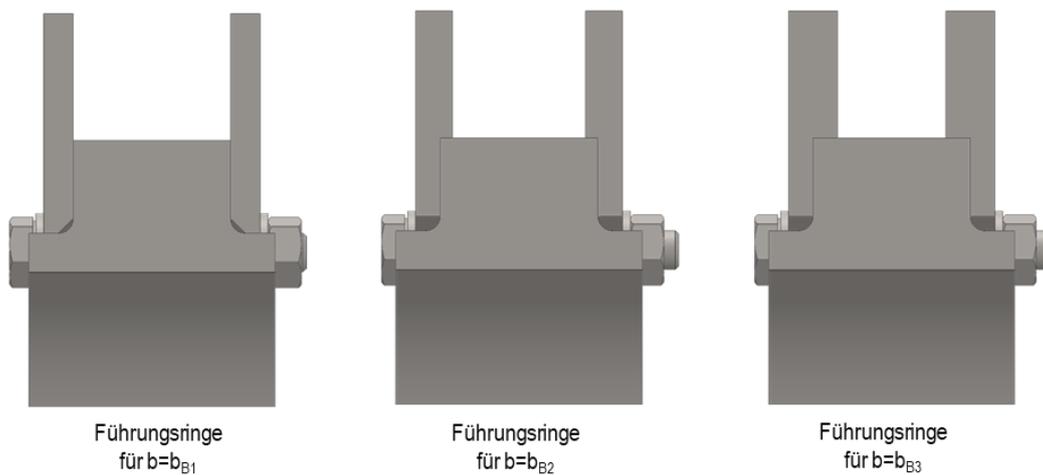


Abb. 4-2: Detail zur Variation der Breite

Beim Entwurf der Probenaufnahme wurde diese auch mit Hilfe der Finite-Elemente Methode auf eine Optimierung hinsichtlich Eigengewicht und Handling in Zusammenhang mit dem möglichen Lastbereich ausgelegt. Eine genauere Erläuterung hierzu erfolgt in Kapitel 4.3: Festigkeitsrechnungen mittels Methode der finiten Elemente.

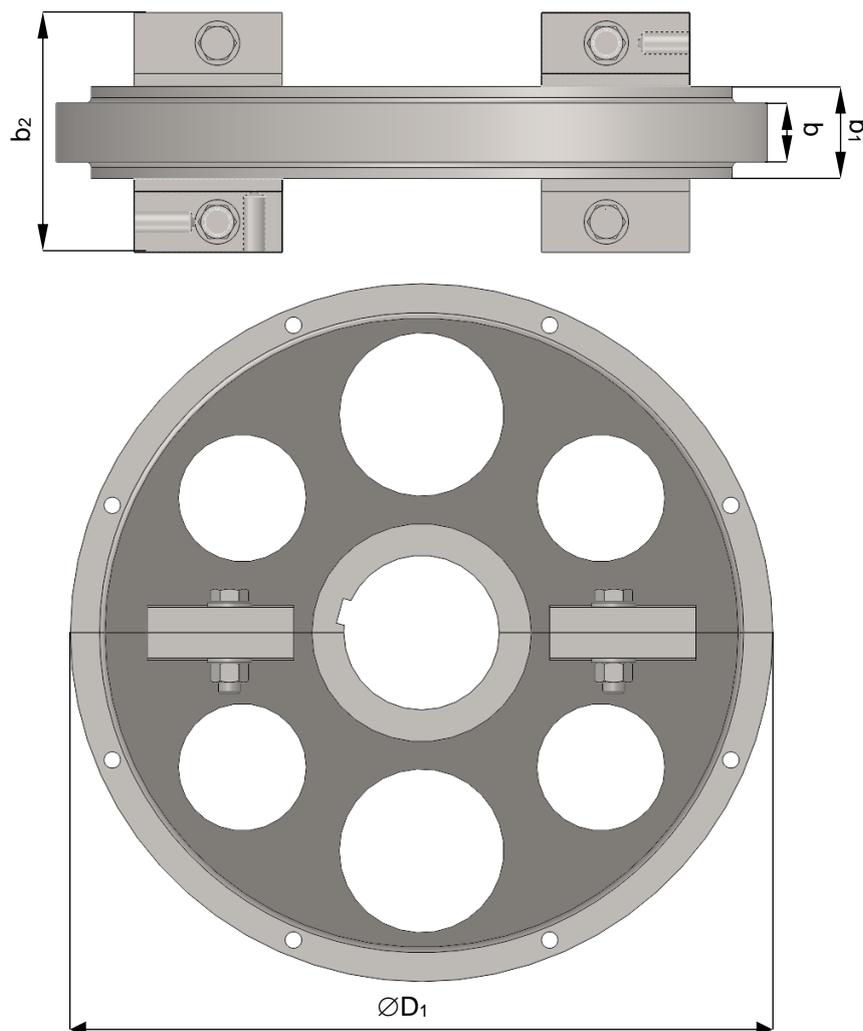


Abb. 4-3: Konstruktive Ausführung Probeaufnahme , Ansichten

4.1.2 Probenvorbereitung

Um die Vorbereitung der Proben möglichst ähnlich zu dem tatsächlich durchgeführten Fertigungsverfahren zu gestalten sollte die Bandagierung auf den vorhandenen Maschinen und zugehörigen Vorrichtungen in den Werkstätten erfolgen.

Bandagieren:

Wegen des geringen Eigengewichtes der gesamten Baugruppe „Scheiben auf Welle“, wie sie Abb. 4-4 zeigt, wurde die Bandagierung auf einer Bandagiereinheit eingeplant, auf welcher die Welle zwischen einem 3-Backen-Spannfutter und einer Pinole geführt werden kann, um ein Herausspringen der Welle aus der Lagerung aufgrund des Bandzuges zu verhindern. Das 3-Backen-Spannfutter übernimmt hier auch die Funktion der Übertragung des Drehmomentes auf die Welle und somit die Aufbringung der Vorspannung in die Bandage. Die Aufbringung der Vorspannkraft in das Band erfolgt mit der parallel zur Welle verschiebbaren Bandagiereinheit.

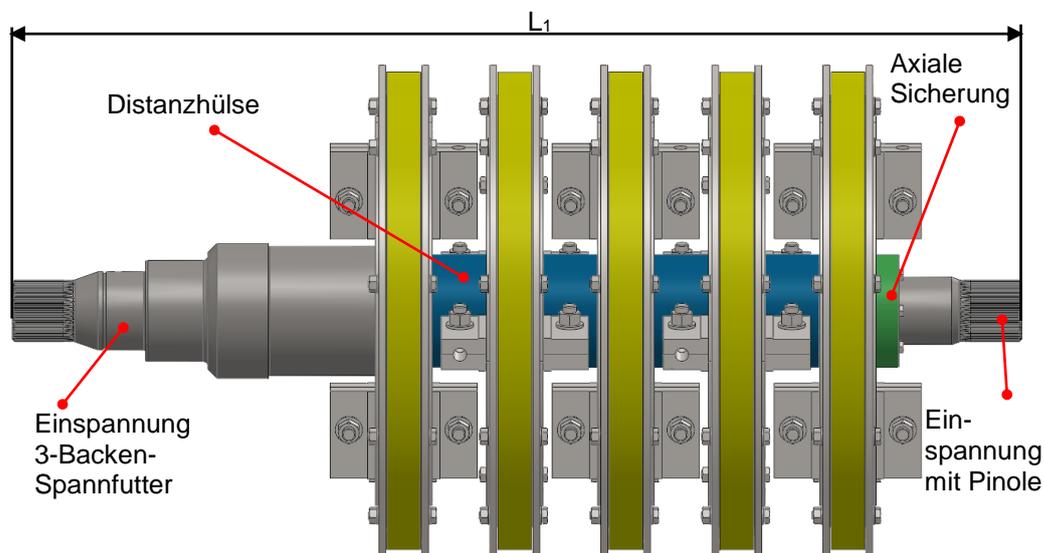


Abb. 4-4: Konstruktive Ausführung, Anordnung Bandagierung

Deutlich zu erkennen ist in der unten angeführten Bildreihe auch die Umsetzung der Funktionen zur Befestigung der Bandagenenden auf der Probenaufnahme. Der Beginn der Bandage wird vor dem Vorspannen im Zwischenspalt der geteilten Führungsringe verankert. Das Ende der Bandage wird, nach dem Aufbringen der letzten Windung, durch Abstreifen und Verkleben mit dem ausquellendem Matrixmaterial auf den unteren Lagen fixiert. (Abb.4-5)



Abb. 4-5: Befestigung der Bandagenenden

Härten:

Die Kopplung an den Ofen, um die Prüflinge aushärten zu lassen, wurde über eine eigens angefertigte Adapterscheibe ermöglicht, welche in einer Gewindebohrung an der Stirnseite der Welle verschraubt wurde.

4.1.3 Prüfaufbau

In der Entwurfsphase des Prüfaufbaus wurden verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich der Verfügbarkeit einer Zugprüfmaschine (oder ähnlicher Einrichtungen), welche die geforderten Prüfkräfte aufbringen konnten, in Erwägung gezogen. Schlussendlich fiel die Wahl auf die Universalprüfmaschine der TVFA des Instituts für Materialprüfung und Bautechnologie der technischen Universität Graz. Die Hydraulische Universalprüfmaschine Modell „Amsler“ verfügt über einen Lastbereich von bis zu 1000 kN und entspricht der Genauigkeitsklasse 1 gemäß ISO7500-1.

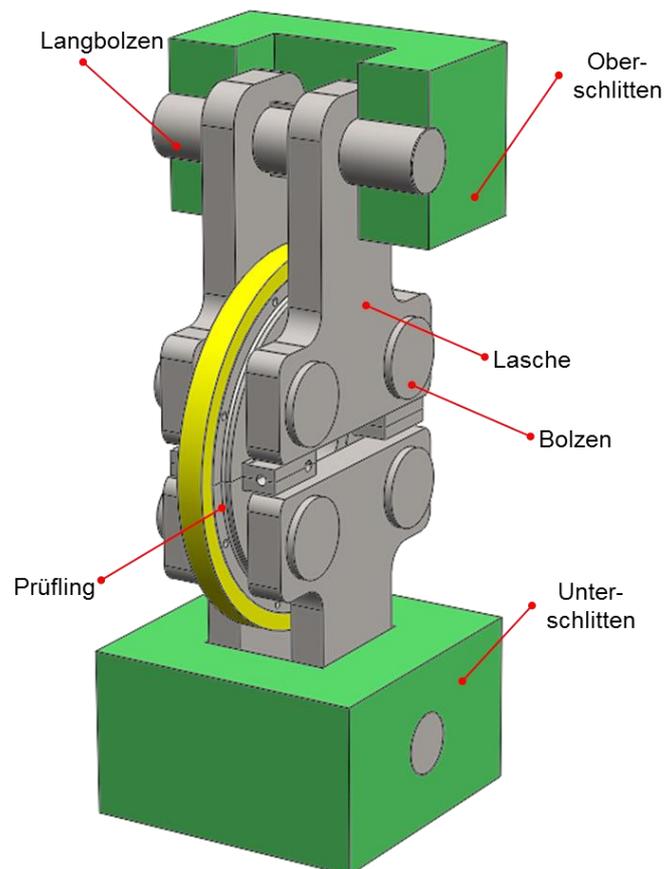


Abb. 4-6: Prüfaufbau, Konzept

Die Anbindung der Prüfkörper an die Prüfmaschine erfolgt über ein System aus Laschen und Bolzenverbindungen. Die Verbindung zur Seite der Prüfmaschine erfolgt über jeweils einen Bolzen durch die vorhandenen Bohrungen im beweglichen Schlitten und im feststehenden Sockel der Prüfmaschine.

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

Über die Laschen können je Scheibenhälfte zwei Bolzen durch die vorhandenen Bohrungen am Prüfkörper geschoben werden. (Abb.4-6: Konzept und Abb.4-7: Ausführung)

Die Laschen werden, zur besseren Führung während des Aufbringens der Zugkraft, mit Distanzbuchsen auf den Langbolzen auf passendem Abstand zwischen den Seitenwänden von Schlitten und Sockel gehalten.

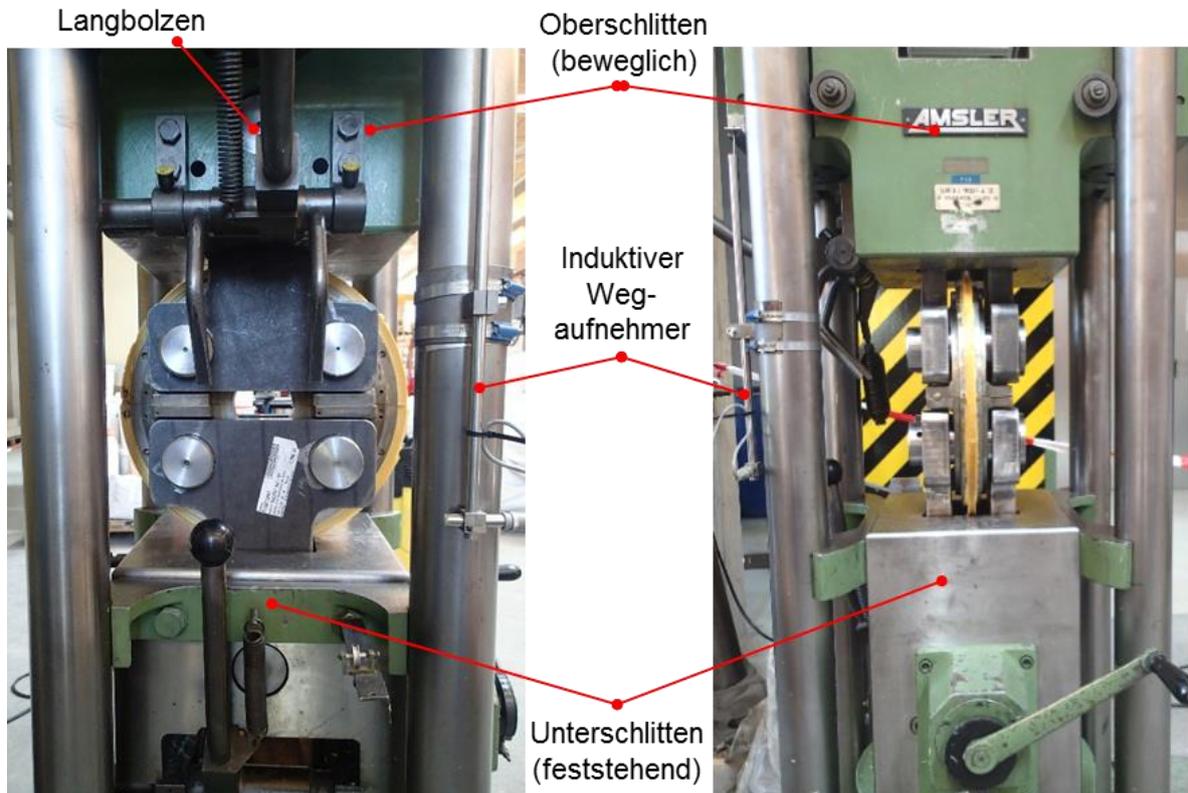


Abb. 4-7: Prüfaufbau, tatsächlicher Aufbau

4.2 Festigkeitsrechnungen der Maschinenelemente

In diesem Unterkapitel soll eine Kontrollrechnung der Festigkeit und der Nachweis über ausreichende Sicherheiten für jene Bauteile erbracht werden, welche als klassische Maschinenelemente kategorisierbar sind.

Für solche Bauteile sind typische Ausführungsformen und die zugehörigen Berechnungsgrundlagen schon bekannt, und können aus der Literatur übernommen werden.

4.2.1 Welle

Die verwendete Welle war eine ausgeschiedene verzahnte Welle welche zur Wiederverwendung mechanisch bearbeitet wurde. Für die Welle wurde mittels der Berechnungssoftware MDESIGN (Roloff/Matek-Edition), der Festigkeitsnachweis entsprechend des Ablaufplans für einen vereinfachten statischen Festigkeitsnachweis nach [RM1, S.63] erbracht.

Als Randbedingungen war von folgenden Annahmen auszugehen:

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Quelle
$F_{VB,max}$	Maximale Vorspannung im Band	N	Bandagiermaschine
m_{Sch}	Masse einer Scheibe	kg	Abschätzung, CAD
m_W	Masse der Welle	kg	Abschätzung, CAD
l_1		mm	Wellengeometrie
l_2		mm	Wellengeometrie
l_3		mm	Wellengeometrie
l_4		mm	Wellengeometrie
l_5		mm	Wellengeometrie
l_6		mm	Wellengeometrie
l_7		mm	Wellengeometrie
r_w	Windungsradius	mm	Ann. Lauffläche + 40 Windungen
d_x	Nenndurchmesser des untersuchten Querschnittes	mm	Wellengeometrie
l_x	Untersuchte Stelle	mm	<i>mittlere Scheibe</i>
t	Tiefe der Passfedernut	mm	Wellengeometrie
$R_{e,min}$	Mindeststreckgrenze	N/mm ²	Wellenzeichnung
$R_{m,min}$	Mindestzugfestigkeit	N/mm ²	Wellenzeichnung
d_{roh}	Rohteildurchmesser	mm	Wellenzeichnung

Tabelle 4: Parameter für die Berechnung der Welle

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

In den folgenden Bildern ist die Lastsituation für die Bandagierung der mittleren Scheibe, sowie das Geometrieschema der verwendeten Welle, inklusive der Passfedernuten zur Übertragung des Drehmoments ersichtlich.

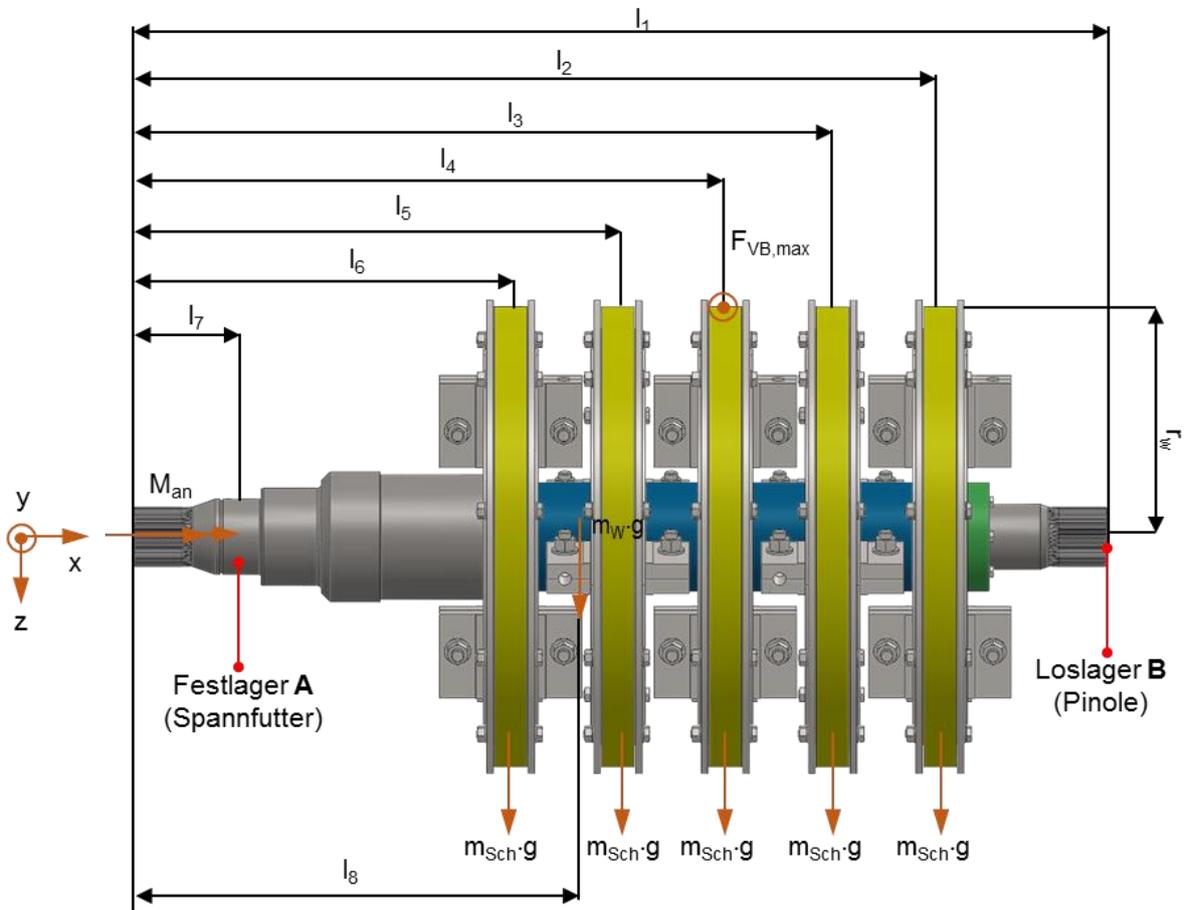


Abb. 4-8: Bandagieren, Lastsituation

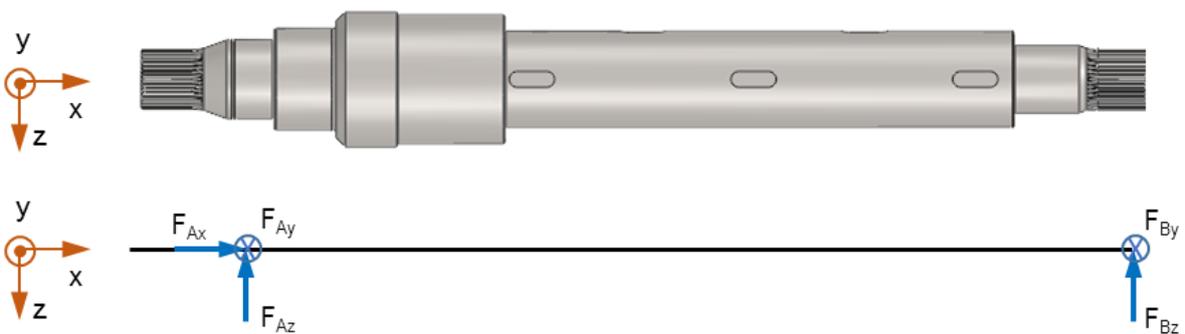


Abb. 4-9: Welle, Geometrieschema und Auflagerreaktionen

Rechengang für den Festigkeitsnachweis der Welle

Als erster Schritt zur Vorbereitung des Festigkeitsnachweises wird der zugehörige technologische Größenfaktor K_t und die zugehörigen Bauteilfestigkeiten ermittelt werden.

$$K_t = 1 - 0,26 \cdot \lg\left(\frac{d_{roh}}{16}\right)$$

Biegefließgrenze:

$$\sigma_{bF} = 1,2 \cdot R_{p0,2} \cdot K_t$$

Torsionsfließgrenze:

$$\tau_{tF} = 1,2 \cdot R_{p0,2} \cdot K_t / \sqrt{3}$$

Weiters werden zur Ermittlung der vorhandenen Spannungen die Widerstandsmomente als Kenngrößen des vorhandenen Querschnittes benötigt. Als Bezug gilt hier der kreisförmige Vollquerschnitt mit dem um die Tiefe t der Passfedernut reduzierten Durchmesser.

Widerstandsmoment:

$$W = d^3 \cdot \pi / 32$$

$$W = (d_x - t)^3 \cdot \pi / 32$$

Polares Widerstandsmoment:

$$W_t = W \cdot 2$$

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

Aus den Gleichgewichtsbedingungen für Kräfte und Momente können die Auflagerreaktionen in den Lagern A und B errechnet werden.

Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte:

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Ax} = 0$$

$$\sum F_y = -F_{Ay} - F_{By} + F_{VB,max} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-F_{Ay} - F_{By} + F_{VB,max} = 0$$

$$\sum F_z = 0$$

$$F_{Az} + F_{Bz} - 5 \cdot m_{Sch} \cdot g - m_W \cdot g = 0$$

Gleichgewichtsbedingungen der Momente:

$$\sum M_{x(A)} = 0$$

$$M_{an} - F_{VB,max} \cdot r_w = 0$$

$$\sum M_{y(A)} = 0$$

$$F_{Bz} \cdot (l_1 - l_7) - m_{Sch} \cdot g \cdot (l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 - 5 \cdot l_7) - m_W \cdot g \cdot (l_8 - l_7) = 0$$

$$\sum M_{bz(A)} = 0$$

$$F_{VB,max} \cdot (l_x - l_7) - F_{By} \cdot (l_1 - l_7) = 0$$

Aus diesem Gleichungssystem mit 6 Gleichungen lassen sich die 6 unbekannt GröÙen F_{Ax} , F_{Ay} , F_{Az} , F_{By} , F_{Bz} und M_{an} für eine bestimmte Angriffsposition der Vorspannkraft im Band (also den Positionen der Scheiben auf der Welle) einfach ermitteln.

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

Mithilfe der gefundenen Auflagerreaktionen und dem zugehörigem Schnittbild an einer ausgewählten Stelle x lassen sich somit die Schnittgrößen im zu untersuchenden Querschnitt ermitteln.

Nachfolgend wird der Rechenweg exemplarisch für jenen Fall angeschrieben, in welchem die Schnittstelle einer Position kurz vor der mittleren Scheibe entspricht.

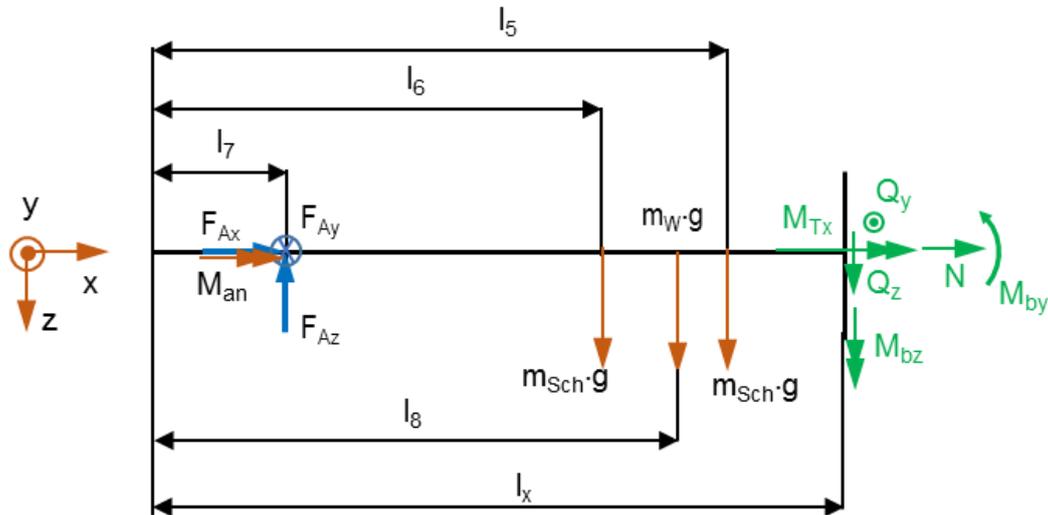


Abb. 4-10: Zugehöriges Schnittbild

Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte:

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{Ax} + N = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-F_{Ay} + Q_y = 0$$

$$\sum F_z = 0$$

$$F_{Az} - Q_z - 2 \cdot m_{Sch} \cdot g - m_W \cdot g = 0$$

Gleichgewichtsbedingungen der Momente:

$$\sum M_{x(x)} = 0$$

$$M_{an} + M_{Tx(x)} = 0$$

$$\sum M_{y(x)} = 0$$

$$M_{by(x)} - m_{Sch} \cdot g \cdot (2 \cdot l_x - l_5 - l_6) - F_{Az} \cdot (l_x - l_7) - m_W \cdot g \cdot (l_x - l_8) = 0$$

$$\sum M_{z(x)} = 0$$

$$M_{bz(x)} - F_{Ay} \cdot (l_x - l_7) = 0$$

Aus diesem Gleichungssystem mit 6 Gleichungen lassen sich die 6 unbekanntenen Größen N , Q_y , Q_z , M_{by} , M_{bz} und M_{Tx} wieder einfach ermitteln. Aus diesen lässt sich noch das resultierende Schnittmoment bilden:

$$M_{b,res} = \sqrt{M_{by}^2 + M_{bz}^2}$$

Die vorhandenen Spannungen im Querschnitt betragen damit:

Biegespannung:

$$\sigma_{b,max} = M_{b,res}/W$$

Torsionsspannung:

$$\tau_{t,max} = M_{Tx}/W_t$$

Damit ist es nun möglich, für den vereinfachten statischen Festigkeitsnachweis, die Sicherheit gegen Fließen zu errechnen.

$$S_F = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{b,max}}{\sigma_{bF}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t,max}}{\tau_{tF}}\right)^2}}$$

Nachstehende Abbildung 4-11 zeigt den Verlauf für den errechneten Sicherheitsfaktor für die verschiedenen Fälle des Angriffspunktes der Vorspannkraft im Band in den Positionen 1, 3 und 5. Diese entsprechen den Extremfällen der Lasteinbringung.

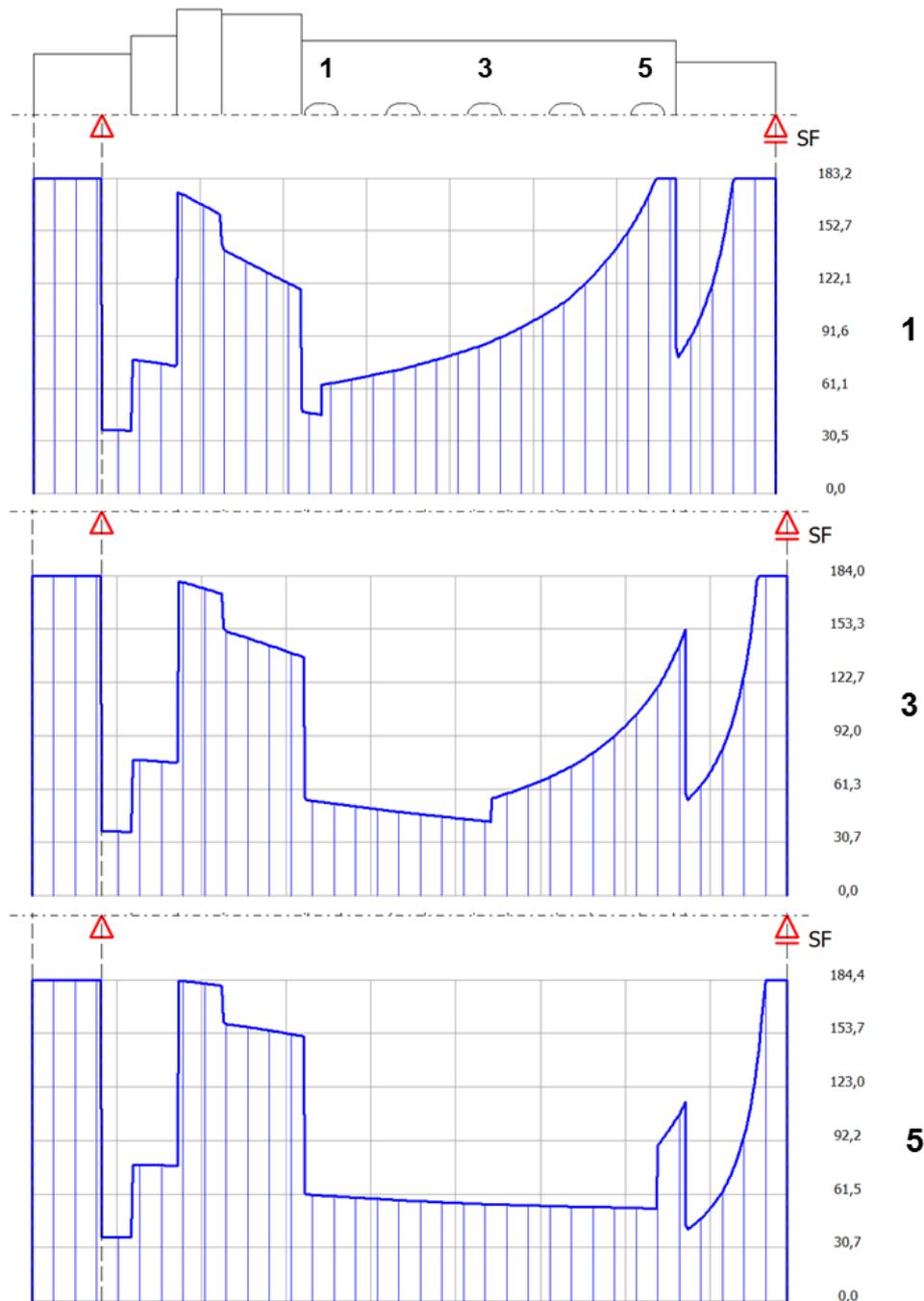


Abb. 4-11: Verlauf des Sicherheitsfaktors

Man erkennt dabei deutlich, dass für dies Fälle des Lastangriffs auch der niedrigste zu findende Sicherheitsfaktor größer als 30 und damit jedenfalls größer als die laut [RM1,S.63] geforderte Mindestsicherheit $S_{F,min} = 1.5$ ist.

Die statische Sicherheit der Welle gegen Fließen beim Bandagieren ist somit als ausreichend zu bemessen, wodurch auf einen genaueren Festigkeitsnachweis verzichtet werden kann. Dennoch ist aus dem überhöhten resultierenden Sicherheitsfaktor nicht unbedingt eine unwirtschaftliche Arbeitsweise abzulesen, da wie oben schon erwähnt, eine bereits ausgeschiedene Welle wiederverwendet werden konnte.

4.2.2 Bolzenverbindung

Die Auslegung der Bolzenverbindung für die Anbindung des Prüflings an die Laschen erfolgte nach den Richtlinien von [RM1, Kap. 9]. Da die Prüflinge und die Anbindung nach jeder Messung wiederverwendet werden sollten, wurden die Passungen zwischen den Bolzen und den Bohrungen in Laschen und Scheibe als Spielpassungen ausgeführt, um die Montage zu erleichtern.

Für den Festigkeitsnachweis der Bolzenverbindung (Abb.4-12) nach [RM1] kommt daher Einbaufall 1 zur Anwendung.

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Quelle
F_{PM}	Maximale Kraft der Prüfmaschine	kN	Auslegung
F_{B1}	Kraft auf einen Bolzen	kN	Lastsituation
d	Bolzendurchmesser	mm	Konstruktion
t_s	Laschenbreite	mm	Konstruktion
t_M	Scheibenbreite	mm	Konstruktion
s	Spiel	mm	Konstruktion
$R_{e,min}$	Mindeststreckgrenze	N/mm ²	Anforderung
$R_{m,min}$	Mindestzugfestigkeit	N/mm ²	Anforderung
S_M	Sicherheitsfaktor	-	[RM1]

Tabelle 5: Parameter für die Berechnung der Bolzen

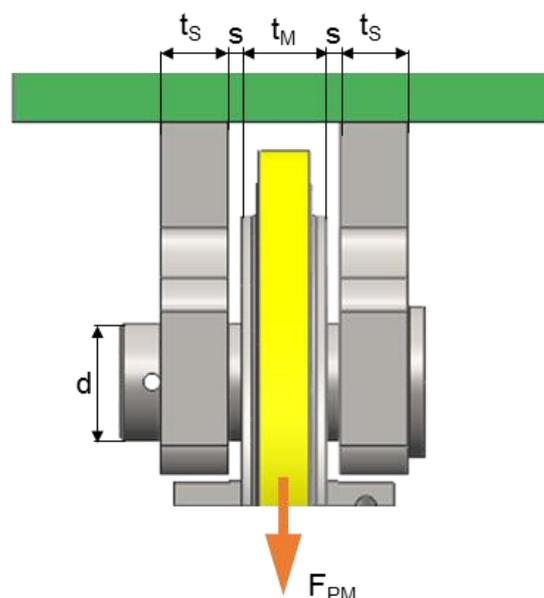


Abb. 4-12: Lastsituation am Bolzen

Rechengang für den Festigkeitsnachweis der Bolzenverbindung

Errechnen der vorhandenen Spannungen

Kraft auf einen Bolzen

$$F_{B1} = \frac{F_{PM}}{2}$$

Maximales Biegemoment

$$M_{b,max} = \frac{F_{B1} \cdot (t_M + 2 \cdot t_S + 4 \cdot s)}{8}$$

$$M_{b,max} = 6581250 \text{ Nmm} \triangleq 6581.25 \text{ Nm}$$

Widerstandsmoment

$$W = \frac{d^3 \cdot \pi}{32}$$

$$W = 33674 \text{ mm}^3$$

Biegespannung

$$\sigma_b = \frac{M_{b,max}}{W}$$

$$\sigma_b = 195.44 \text{ N/mm}^2$$

Querschnittsfläche

$$A_s = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

Scherspannung

$$\tau_a = \frac{F_{B1}}{2 \cdot A_s}$$

$$\tau_a = 42.3 \text{ N/mm}^2$$

Lochleibung Lasche

$$\sigma_{l,a} = \frac{F_{B1}}{2 \cdot d \cdot t_S}$$

$$\sigma_{l,a} = 58.04 \text{ N/mm}^2$$

Lochleibung Scheibe

$$\sigma_{l,M} = \frac{F_{B1}}{d \cdot t_M}$$

$$\sigma_{l,M} = 92.85 \text{ N/mm}^2$$

Errechnen der zulässigen Spannungen

Zulässige Biegespannung

$$\sigma_{b,zul} = 0.8 \cdot R_e / S_M$$

$$\sigma_{b,zul} = 229.1 \text{ N/mm}^2$$

Zulässige Scherspannung bei $\alpha = 0.6$ für Werkstoffklasse 5.6 des Bolzen

$$\tau_{a,zul} = \alpha \cdot R_e / S_M$$

$$\tau_{a,zul} = 171.8 \text{ N/mm}^2$$

Zulässige Lochleibungsspannung

$$\sigma_{l,zul} = 1.5 \cdot R_e / S_M$$

$$\sigma_{l,zul} = 429 \text{ N/mm}^2$$

Für den Festigkeitsnachweis sind nun abschließend noch die Vergleiche der vorhandenen Spannungen mit den zulässigen Spannungen zu überprüfen, und der Interaktionsnachweis zu führen.

Spannungsvergleich

$$\sigma_b \leq \sigma_{b,zul}$$

$$\tau_a \leq \tau_{a,zul}$$

$$\sigma_{lmax} \leq \sigma_{l,zul}$$

$$195.44 \text{ N/mm}^2 \leq 229.1 \text{ N/mm}^2$$

$$42.3 \text{ N/mm}^2 \leq 171.8 \text{ N/mm}^2$$

$$92.85 \text{ N/mm}^2 \leq 429 \text{ N/mm}^2$$

Interaktionsnachweis

$$\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{b,zul}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{a,zul}} \right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{195.44}{229.1} \right)^2 + \left(\frac{42.3}{171.8} \right)^2 \leq 1$$

$$0.788 \leq 1$$

Für die maßgebenden Stellen der Bolzenverbindung sind alle Bedingungen des Festigkeitsnachweises somit erfüllt.

4.3 Festigkeitsrechnungen mittels Methode der finiten Elemente

Die Festigkeitsrechnungen für die Bestandteile des Prüfaufbaus wurden (ausgenommen der Verbindungsbolzen von Prüfkörper zur Lasche) mit der Berechnungssoftware ANSYS® Mechanical™, Release 15.0 durchgeführt.

Kernpunkt der Auslegung war hier eine Optimierung der Bauteile hinsichtlich maximal möglicher Prüfkraft bei einem geringen Eigengewicht der Einzelteile. Das Ziel hierbei war es, das Handling des Prüflings und die Montage des Prüfaufbaus möglichst einfach zu halten, und dennoch ein breites Spektrum an möglichen Versuchsvarianten zu erhalten. Ein weiteres Augenmerk galt der Minimierung der Nachgiebigkeit des gesamten Prüfaufbaus und der Probenaufnahme, um den Einfluss auf die Wegmessung zu verringern. Genauere Überlegungen hierzu finden sich in Kapitel 5.

4.3.1 Aufbau der Simulationsgeometrie

In die Simulation wurde die Geometrie etwas vereinfacht übernommen. Die seitlichen Winkel für die Verschraubung wurden vernachlässigt. Weiters wurde die Modellierung der Geometrie nach den Überlegungen zur Symmetrie nur vom Oberschlitten bis hin zu den unteren Verbindungsbolzen übernommen, wie in Abb.4-13 dargestellt. Die Geometrie der Halbscheiben (Prüfling) wurde hierbei schon im 3D-Modell so unterteilt und vorbereitet, dass einzelne Bereiche (im Speziellen Mittelbohrung und Bolzenlöcher) passend vernetzt und gezielt verfeinert werden konnten. Die Modellierung der bandagierten Lagen erfolgte dabei als einzelner, dünnwandiger Ring.

Als E-Modul wurde für alle Bauteile aus Stahl der vorgegebene Wert von 200000 N/mm² eingesetzt. Allein für die Bandagen wurde nach Literaturrecherche ein E-Modul von 100000 N/mm² angenommen.

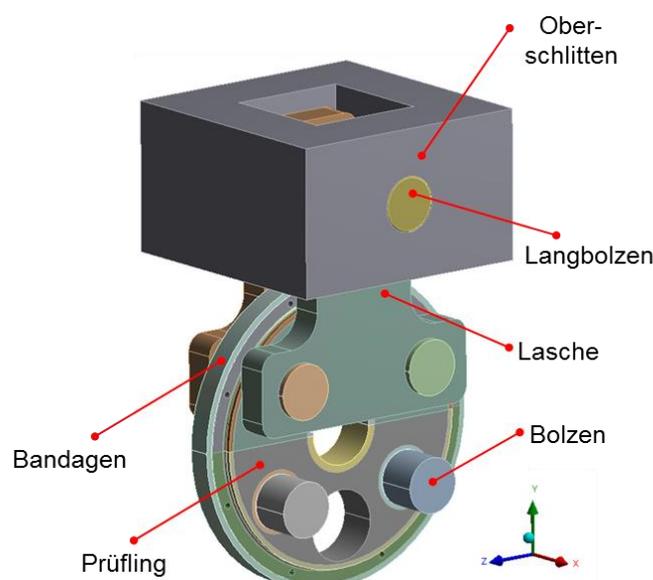


Abb. 4-13: Übernommene Geometrie für die Simulation

4.3.1.1 Randbedingungen und Lasten

Als Randbedingungen wurden die beiden unteren Verbindungsbolzen fest eingespannt (fixierte Lagerung). Die Aufprägung der am Oberschlitten angreifenden Kraft erfolgte in mehreren Lastschritten bis hin zur 1.15-fachen Auslegungslast, um genügend Sicherheit zu haben. Die Innenflächen der Verbindungslaschen, und die Stirnflächen der Bolzen wurden mit einer Reibungsfreien Lagerung versehen, da die auftretenden Seitenkräfte als vernachlässigbar gering eingestuft wurden. Für die Simulation der Vorspannung wurde eine Temperatur-Randbedingung auf die Bandagen aufgebracht.

Sowohl die Bandagen als auch der Verbindungsbolzen zur Prüfmaschine wurden zusätzlich mit einer zylindrischen Lagerung versehen, um ein Verdrehen zu verhindern und den Rechenaufwand zu verringern. Eine grafische Übersicht bietet Abb. 4-14.

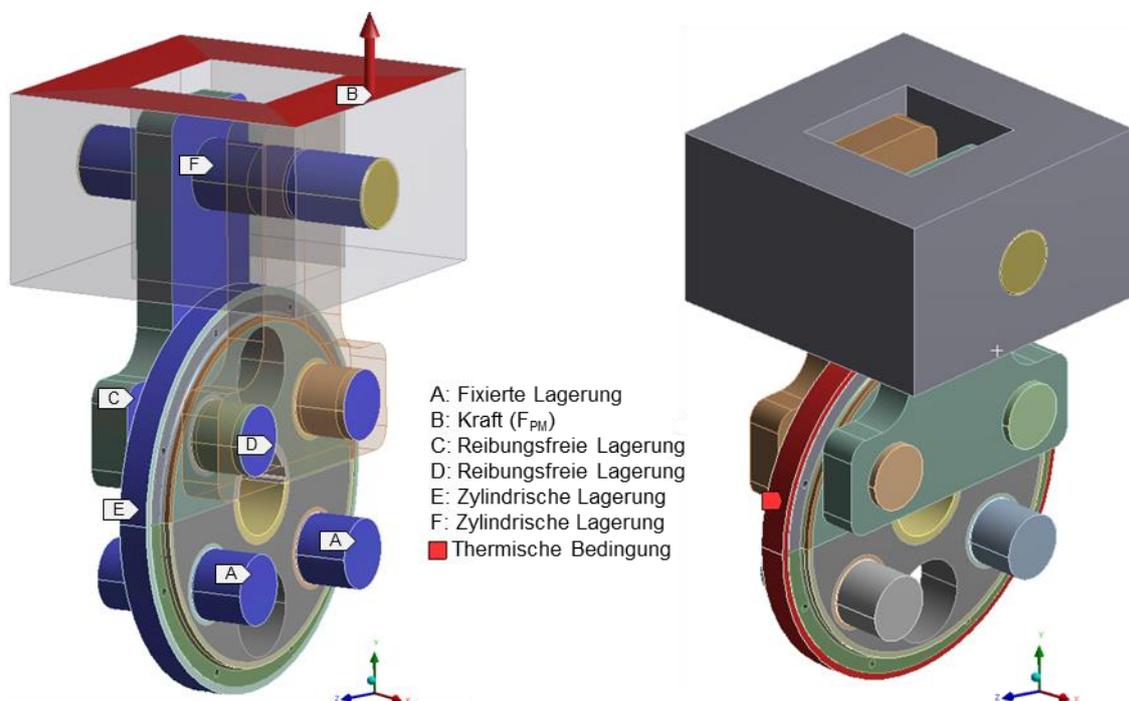


Abb. 4-14: Randbedingungen und Lasten

Über die Maximallast lässt sich auch noch ein Grenzbereich der möglichen Versuchsvarianten abschätzen. Bei bekannter Auslegungslast kann man mit den nachstehenden Formeln auf die möglichen Grenzwerte der Kombinationen aus Lagenzahl und Breite der Bandagierung rückrechnen.

Die Bruchlast der Bandagierung bzw. die auftretenden Kräfte im Abhebe- und Anschlagpunkt errechnen sich formell über die folgenden Gleichungen:

$$F_{PM} = k_S \cdot 2 \cdot R_{m, Bandagen} \cdot n \cdot b$$

$$F_{ab} = a_R \cdot 2 \cdot F_{VB, max} \cdot n$$

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Quelle
F_{PM}	Maximale Kraft der Prüfmaschine	N	Auslegung
F_{ab}	Kraft im Abhebepunkt	N	
$F_{VB,max}$	Maximale Kraft der Bandagiereinheit	N	Fertigung
a_R	Schätzfaktor Anteil Restspannung	-	Hersteller
k_S	Sicherheitsfaktor	-	
n	Anzahl bandagierter Windungen	-	
b	Bandagierte Breite	cm	
$R_{m,Bandagen}$	Reißfestigkeit der Bandagen	N/cm,Breite	Datenblatt d. Herstellers

Tabelle 6: Erläuterungen zu den auftretenden Kräften

4.3.1.2 Finite-Elemente Netz

Allgemein wurde die Geometrie für die Simulation so aufbereitet, dass eine vollständige Vernetzung mittels Sweep-Elementen möglich war, um eine geeignete Netzqualität für die mechanische Analyse zu erhalten. Dabei wurden die Bereiche der Bohrungen für die Bolzen und der Bereich um die Mittelbohrung inkl. der Passfedernut als eigens modellierte Geometrie eingefügt, sodass in diesen Bereichen eine Verfeinerung des Netzes möglich war. Details hierzu sind in Abb.4-15 zu sehen.

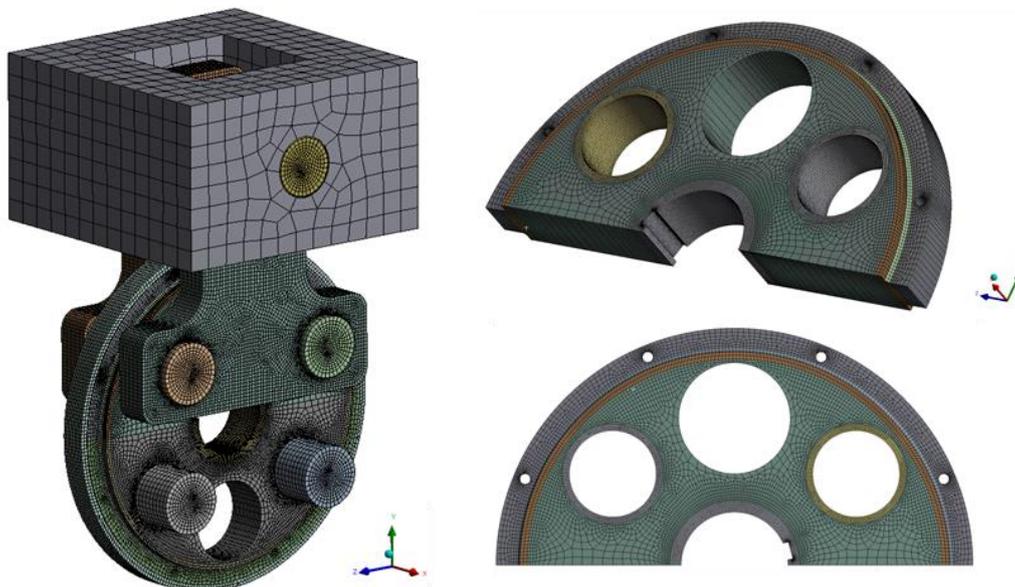


Abb. 4-15: FEM-Netz

Links: Mesh für den gesamten Aufbau,
Rechts: Details der Verfeinerung und Veranschaulichung der Sweep-Elemente

Sweep-Elemente entstehen hierbei durch eine Vernetzung in 2 Schritten. Zuerst wird die Grundfläche mit 2D-Elementen vernetzt. Diese werden im zweiten Schritt zu 3D-Elementen aufgezogen („extrudiert“), sodass daraus Hexaeder Elemente entstehen.

Abb.4-16 bietet eine Übersicht der Übersicht der verwendeten Elemente und der Netzqualität im resultierenden FEM-Netz. Wie man erkennen kann besteht das Netz fast ausschließlich aus ‚Hex20‘ Elementen besteht, die dem Ansys Elementtyp SOLID186 entsprechen.

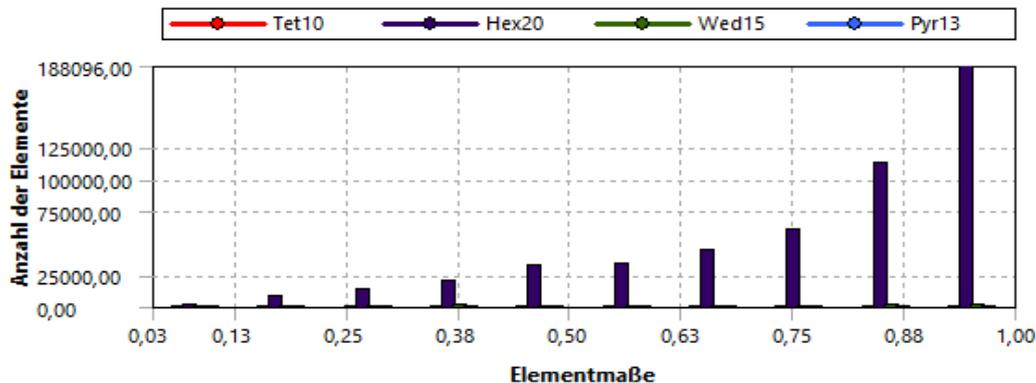


Abb. 4-16: Übersicht der Elementqualität

4.3.2 Verwendete Kontakte

Die Kontakte wurden als Reibungsbehaftet mit einem Reibwert von 0.15 eingefügt. Einzig die Kontakte in der Zwischenfläche der Trennebene, und die Auflageflächen der Bandagen wurden als Reibungsfrei definiert, da diese auch am realen Versuchsaufbau mit einem Trennmittel versehen werden sollten.

4.3.3 Ergebnisse

Die folgenden dargestellten Ergebnisse entsprechen der Auswertung der Vergleichsspannung nach vonMises in Ansys®. Die Auswertung wird dabei für die Halbscheibe mit Passfedernut, die Laschen der Aufhängung und den Verbindungsbolzen zur Prüfmaschine durchgeführt.

4.3.3.1 Ergebnisse der Scheibe

Im Laufe des Konstruktionsprozesses wurden Abmessungen und Belastung iterativ angepasst bis schlussendlich eine zufriedenstellende Lösung gefunden werden konnte. Dabei wurden primär die Position und Größe der Bohrungen für die Bolzen, als auch der Durchmesser der Scheibe variiert. Die Beurteilung der Zulässigkeit der Lösung erfolgte aus den Ergebnissen der Vergleichsspannung aus der zuvor dargestellten Analyse, wie sie die nachstehenden Abbildungen zeigen.

Als Werkstoff wurde ein unlegierter Baustahl mit ausreichend hohen Werten für Streckgrenze und Bruchfestigkeit gewählt. Dieser ist schweißfähig und dabei noch relativ kostengünstig.

Zu erkennen sind die auftretenden Spannungsspitzen in den Bohrungen für die Durchsteckverbindungen (Abb.4-18) und im Bereich des Absatzes über den Bohrungen für die Bolzen. Die Bohrungen schwächen dabei das Material. In allen

4 Ausgeführte Lösungsvariante und Detailplanung

Bereichen der Halbscheibe befindet sich die errechnete Spannung aber genügend weit unter der Streckgrenze des Materials.

Zusätzlich ist zu beachten, dass jene Bereiche die überhöhte Spannung aufweisen hauptsächlich dem Druck der aufliegenden Bandagen ausgesetzt sind und weitgehend von tragendem Material mit deutlich niedrigeren Spannungen umgeben sind.

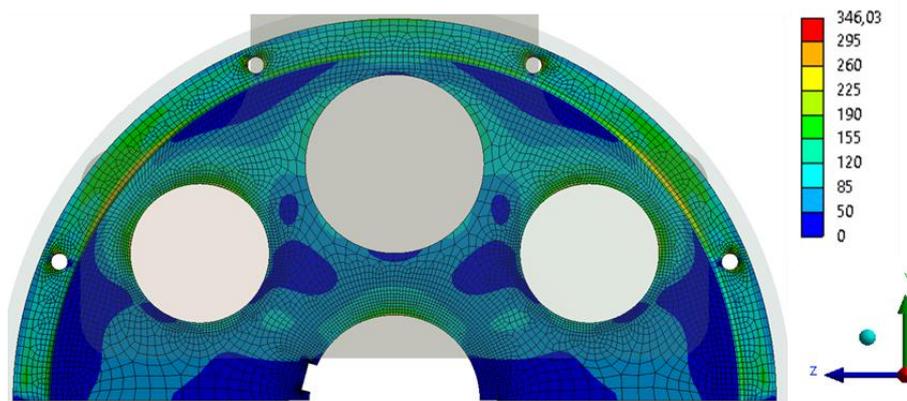


Abb. 4-17: Vergleichsspannung der Probenaufnahme (a)

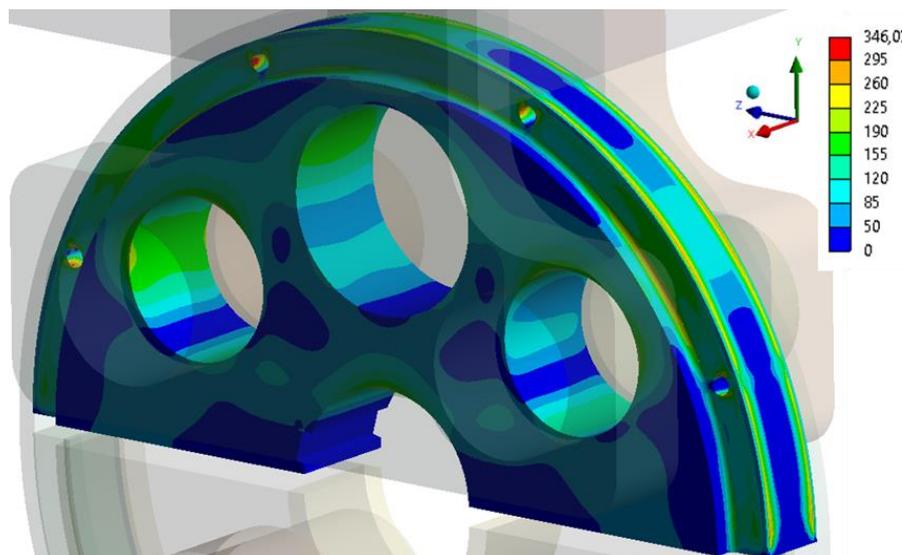


Abb. 4-18: Vergleichsspannung der Probenaufnahme (b)

Die Abbildungen 4-17 und 4-18 zeigen die Ergebnisse der errechneten Vergleichsspannung für die verwendeten Halbscheiben der Probenaufnahme. Zu erkennen sind die Bereiche mit erhöhten Spannungen (gelb bis rot auf der verwendeten Farbskala) in den Bohrungen für Durchsteckverbindung und in den Absätzen in der Breite im Bereich schräg über den Bohrungen für die Bolzen. Weiters ist die oben angesprochene vergleichsweise niedrige Spannung im Material um die lokal begrenzten Stellen mit hoher Spannung zu erkennen.

Die nachstehende Abbildung (4-19) zeigt die Stelle mit der höchsten auftretenden Spannung in der Bohrung für die Durchsteckverbindung zur Befestigung der

seitlichen Führungsringe im Bereich schräg über der Bohrung für die Bolzenverbindung.

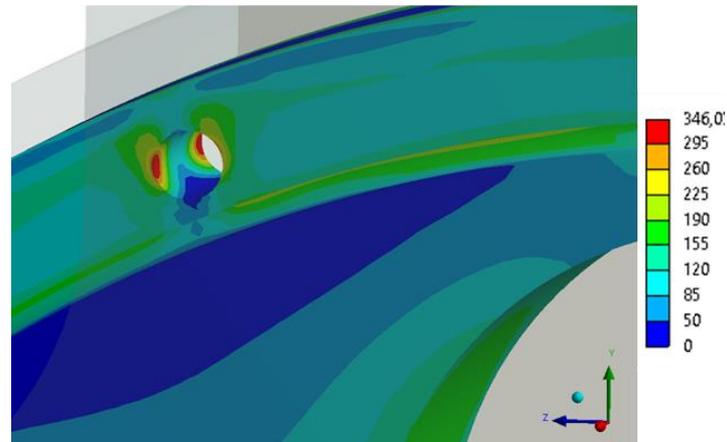


Abb. 4-19: Detail der Stelle mit maximaler Spannung in der Halbscheibe

Mit der Annahme einer ausreichenden Stützwirkung des umgebenden Materials, wurde eine Lösung mit zufriedenstellender Maximallast und einer optimierten Verhältnis von Masse/Außenmaßen übernommen.

4.3.3.2 Ergebnisse der Laschen

Die Analyse der Laschen ergab eine erhöhte Spannung in den Randbereichen der Bohrungen für den Verbindungsbolzen zur Prüfmaschine (Abb.4-20). Eine analytische Nachrechnung der Nennspannung im Bereich der Bohrung für den Verbindungsbolzen zur Prüfmaschine ergab eine Nenn(Zug)Spannung von rund 125 N/mm² (Aufprägung der halben Zugkraft auf den um die Bohrung verminderten Rechteckquerschnitt der Lasche).

Da die Simulation mit der 1.15-fachen Auslegungslast durchgeführt wurde, fällt auch die maximale Spannung im Bereich der einfachen Auslegungslast unter die vom Werkstoff ertragbare Spannung. Für eine Fertigung der Laschen aus S355J2 wurde dies als zulässig erachtet, da eine Schädigung in Form von Kantenbruch an dieser Stelle als wenig einflussreich auf die Funktionalität der Konstruktion beurteilt wurde.

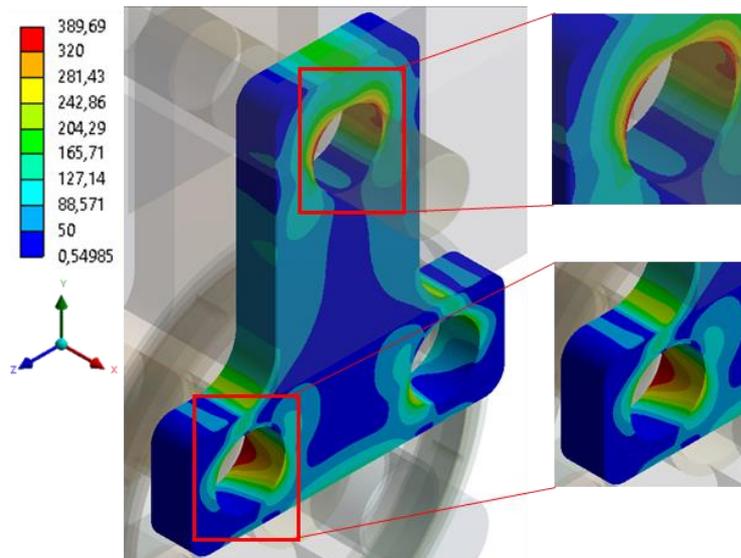


Abb. 4-20: Vergleichsspannung der Laschen

Vergleichsspannung der Laschen nach von Mises (Links), Detailansicht mit den Stellen der auftretenden maximalen Spannungen (Rechts)

4.3.3.3 Verbindungsbolzen zur Prüfmaschine

Auch für den Bolzen (Abb.4-21) wurden die Spannungsspitzen wie erwartet in der Nähe der Anschlussstellen zu den anderen Bauteilen gefunden. Eine analytische Nachrechnung der Vergleichsspannung (Biegung + Abscherung) bei 1.15-facher Auslegungslast ergab etwa 490N/mm^2 . Für die Ausführung des Vollbolzens aus hochfestem Stahl mit einer Mindeststreckgrenze von $R_{e,\min}=750\text{N/mm}^2$ und einer Mindestbruchfestigkeit von $R_{m,\min}$ im Bereich von 900 N/mm^2 wurden diese Spannungsspitzen als zulässig beurteilt.

Die vergleichsweise deutlich geringeren Ergebnisse der FE-Rechnung lassen sich darauf zurückführen, dass der analytischen Nachrechnung ein 1-D Problem zugrunde liegt.

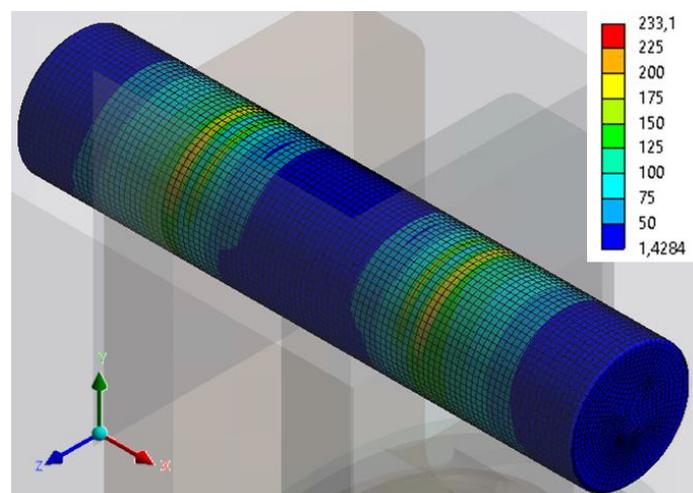


Abb. 4-21: Vergleichsspannungen im Verbindungsbolzen

5 Prüfaufbau und Messung

In diesem Kapitel sollen Methoden und verwendete Werkzeuge im Messaufbau näher gebracht werden. Dabei soll auch eine Abschätzung möglicher systematischer Fehler und deren Einflüsse auf das Messergebnis erläutert und beurteilt werden.

5.1 Grundsätzliche Überlegungen

Als Mindestanforderung für den Messaufbau, gilt die geforderte Aufzeichnung von Kraft und Weg während des Aufbringens einer Betriebskraft auf die vorgespannte Verbindung, um aus dem resultierendem Verlauf den Abhebepunkt, und somit die Restklemmkraft zu ermitteln.

Die verwendete Universalprüfmaschine der TFVA der TU Graz bietet die Möglichkeit zur Aufnahme der eingebrachten Prüfkraft über die Erfassung des Öldruckes im Hubkolben des beweglichen Oberschlittens (Abb.5-1).

Die Aufnahme des Weges erfolgt hier über einen extern angebrachten induktiven Wegmesser, welcher seitlich an den stützenden Führungszylindern befestigt und mit dem Oberschlitten verbunden wird. Als gemessenen Weg erhält man somit direkt den gesamten Fahrweg der Traverse.

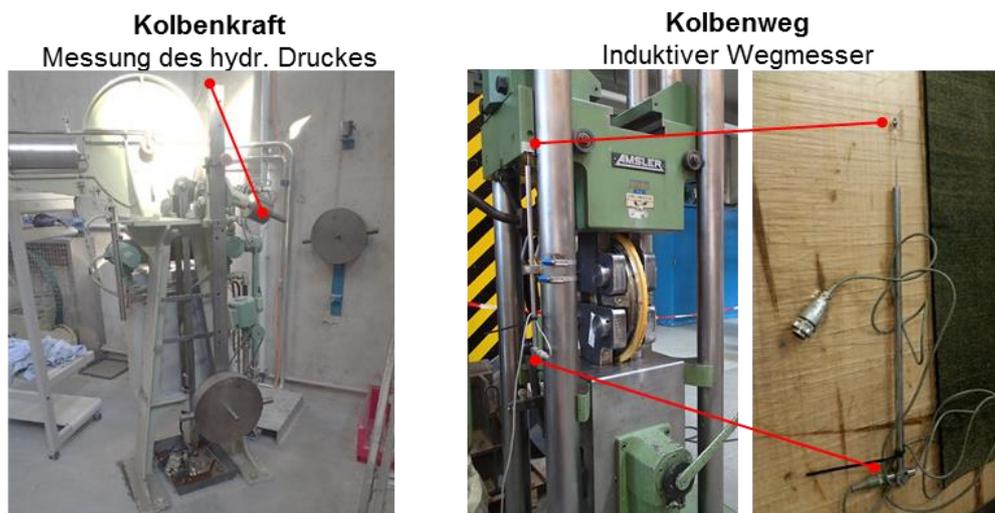


Abb. 5-1: Messsystem der Universalprüfmaschine

Der auf diese Weise gemessene Weg besteht jedoch aus Anteilen, welche einen fehlerhaften Einfluss auf das Messergebnis haben. Eine genauere Betrachtung dieser Anteile findet sich in den nächsten Unterkapiteln.

Die grundsätzliche Überlegung hierbei war, dass ab dem Detektieren des Aufklaffens der Trennebene, ein Übergang im Anstieg des Kurvenverlaufs und somit eine Änderung der Steifigkeit erkennbar sein sollte. Eine Analogie zu den Abschnitten mit unterschiedlicher Steigung im Kraft-Weg-Diagramm kann hierbei in den unterschiedlichen Steigungen der Geraden im Verspannungsdreieck für Schrauben aus Kapitel 2.3 gefunden werden.

Abb.5-2 stellt den gedachten Verlauf einer beispielhaften Messung bis hin zum Bruch der Bandagen dar. Der gesamte Weg, welchen der Kolben zurücklegen wird (X_T), setzt sich dabei aus mehreren Bereichen zusammen. Zuerst wird sich das konstruktiv bedingte Zwischenspiel in einem Bereich mit fast waagrechter Steigung (kein Kraftanstieg, Bereich X_{Setz}) setzen. Danach wird die Prüfkraft in die verspannten Stahlscheiben eingeleitet und ein (vom hohen E-Modul des Stahlwerkstoffes dominierter) Bereich mit starkem Anstieg (X_{St}) wird erkennbar, wobei die Vorspannung bis hin zum Abheben abgebaut wird.

Der Abhebepunkt beschreibt jenen Punkt, in welchem die Vorspannung überwunden wurde, und nur mehr die Bandagen als Verbindungsmittel die abgehobenen Schebenhälften tragen. Dieser wird bedingt durch die (wenn auch geringe) Verformbarkeit der Scheibe und Reibungseffekte Unstetigkeiten im Kontaktverhalten und nichtlineare Verläufe zeigen.

Nach dem die Scheiben abgehoben sind wird die Kraft nur mehr direkt über die Bandagen übertragen, was im Bereich X_{Bandagen} durch eine deutlich geringere, durch den Bandagen-Werkstoff dominierte Steigung, im Kraft-Weg-Diagramm zu erkennen sein sollte.

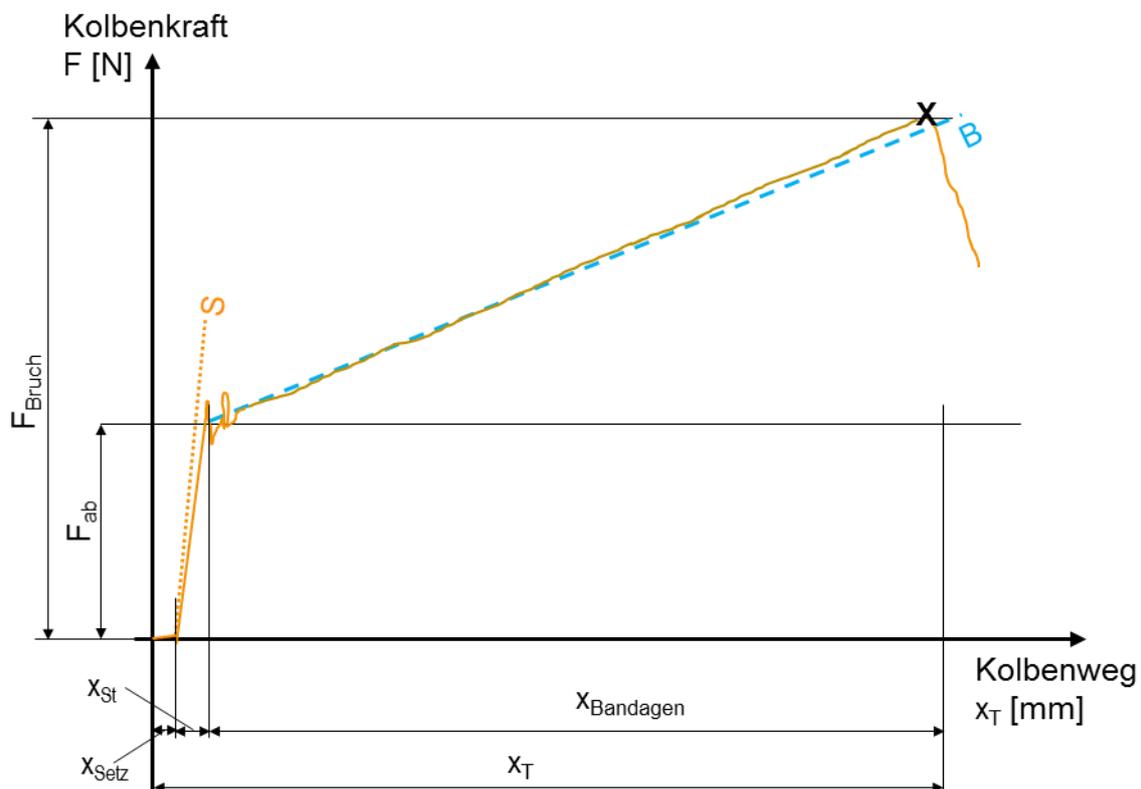


Abb. 5-2: Schema des erwarteten Kraft-Weg-Verlaufs

5.1.1 Einflussgrößen im Messsystem

Bei der genaueren Betrachtung des gewählten Prüfaufbaus und des gewählten Messaufbaus ist ersichtlich, dass sowohl die Einbringung der Vorspannung in die Probenaufnahme, die Aufbringung einer Prüfkraft durch die Universalprüfmaschine und das Vorhandensein von Spielraum zwischen den Verbindungsstellen (Spiel zwischen Bohrungen und Bolzen durch gewählte Passungen) einen systematischen Einfluss auf die Messung des Weges haben.

5.1.1.1 Einfluss des Zwischenspiels auf die Wegmessung

Das Zwischenspiel wird sich im aufgenommenen Kraft-Weg-Verlauf durch einen kurzen, sehr flachen Anstieg im Verlauf bemerkbar machen. Die zusammengefügte Bauteile des Systems aus Laschen und Bolzen werden unter geringem Kraftaufwand bis zum Kontaktaufbau belastet. Es lässt sich aus der Kurve entfernen, wenn man eine sehr geringe Kraft als Vorlast aufbringt, und die Bauteile so vor der eigentlichen Prüfung in Kontakt bringt.

5.1.1.2 Einfluss der Vorspannung auf die Verformung der Scheiben

Durch die Einbringung der Vorspannung beim Bandagieren, wird sich die Probenaufnahme verformen. Im Idealfall der Modellvorstellung wirkt durch die Vorspannung in den Bandagen eine über den Umfang verteilte, gleichmäßige Radiallast auf die Kreisscheibenform der Probenaufnahme, worauf diese sich in radialer Richtung stauchen, und gleichzeitig auch in Richtung der gedachten Zylinderachse dehnen wird. Für die Wegmessung in der Universalprüfmaschine ist es daher von Bedeutung, zu überprüfen um welchen Betrag sich die Scheibe unter Vorspannung in Richtung der Prüfkraft bzw. in Richtung der Wegmessung verformt.

5.1.1.3 Einfluss der Prüfkraft auf die Verformung der Scheiben

Zuerst ist anzumerken, dass die Prüfkraft nicht direkt unter der Bandage angreift, sondern mit den Bolzen über die obere Halbfäche der Bolzenbohrung innerhalb der Geometrie der Probenaufnahme eingeleitet wird. Dadurch wirkt ein Teil der Probenaufnahme wie eine Feder, welche den tragenden Bandagen in Serie geschaltet wird. Eine schematische Modellvorstellung hierzu liefert Abb. 5-3.

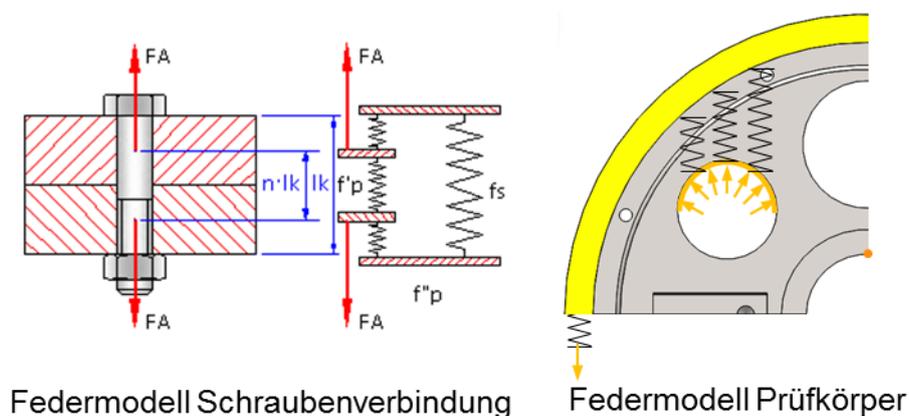


Abb. 5-3: Serienschaltung von Federn, Modellschema

Als zweiter Punkt hinsichtlich der Verformung ist die Verformung der voneinander abhebenden Halbscheiben zu betrachten. Als Gedankenmodell lässt sich hier in erster Näherung eine der Halbscheiben als bogenförmiger Biegeträger mit radialer Streckenlast und symmetrisch liegender Lagerung in Abb.5-4 veranschaulichen.

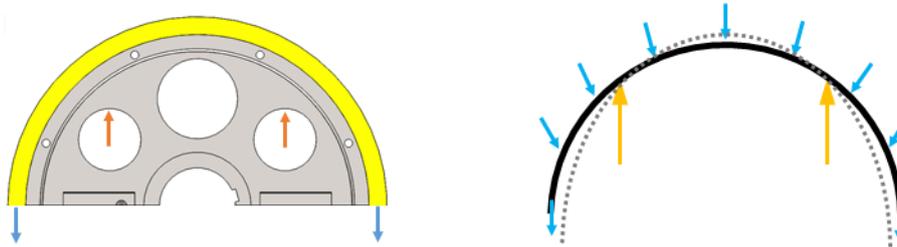


Abb. 5-4: Biegeverformung Probenaufnahme, Modellschema

Die Probenaufnahme wird sich dabei in Richtung der Wegmessung so verformen, dass der mittig gemessene Weg größer sein wird als jener, der an den äußersten Punkten der Trennebene gemessen wird. Zusätzlich werden sich die abgehobenen Halbscheiben auch quer zur Zugrichtung stauchen.

5.1.1.4 Einfluss des Abhebens auf die Spannung in den Bandagen

Ein Vergleich zum Split-Disc-Test in Kapitel 1.3 zeigt, dass durch das Abheben der beiden Scheiben voneinander und der Krümmung der Bandagen ein zusätzliches Biegemoment in die Bandagierung eingebracht wird. Dadurch entsteht im Bereich der Trennebene ein Bereich mit höherer Spannung, da hier Normalspannung und Biegespannung überlagert werden.

5.1.2 Abschätzung der Größenordnung der Einflüsse

Es soll hier eine Abschätzung über die Größenordnung der zuvor definierten Einflussgrößen auf die aufgenommenen Messgrößen am Prüfaufbau gemacht werden.

5.1.2.1 Zwischenspiel im Prüfaufbau

Die als Spielpassung/Übergangspassung ausgeführten Verbindungsstellen in der Aufhängung (Bohrungen für Bolzen in Scheibe und Laschen) beträgt schon aus konstruktiver Hinsicht nur wenige Zehntelmillimeter und kann dadurch eine geringe Vorlast am Zugprüfstand eliminiert werden.

5.1.2.2 Verformung der Scheibe unter Vorspannung

Für die Abschätzung der Verformungen der Halbscheibe durch Vorspannung und dem Einleiten einer Prüfkraft wurde in ANSYS im ersten Lastschritt eine Vorspannung durch Anlegen einer negativen Temperatur an die Bandagierung, aufgebracht. In weiteren Lastschritten wurde die Prüfkraft schrittweise erhöht und dabei die Verschiebungen in der Nähe der Trennebene (Abb.5-5) ausgewertet.

Eine Stauchung der Scheibe bedeutet dabei, dass sich beispielsweise Punkt in der oberen Halbscheibe aus seiner lastfreien Lage in Richtung der Trennebene verschieben würde. Dies resultiert für Punkte aus der oberen Halbscheibe darin, dass die relative Verschiebung nach dem Aufbringen der Vorspannung negativ ist.

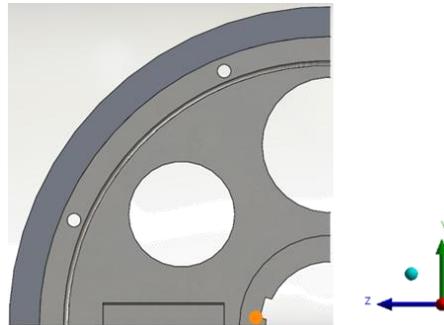


Abb. 5-5: Indikator für Weg nahe der Trennebene

Die nachstehenden Diagramme in Abb.5-6 zeigen die Simulationsergebnisse für eingestellte (Rest-)Vorspannkkräfte von etwa 40 kN. Hierbei wurde die eingeleitete Kraft über die Position eines ausgewählten Punktes nach dem Aufbringen der Vorspannung bis hin zum Bereich des Abhebens aufgetragen.

Ersichtlich ist hier, dass der zurückgelegte Weg durch die Einbringung der Vorspannung mit etwa $2.5\mu\text{m}$ sehr gering ausgeprägt ist. Der Weg vom Beginn der Lasteinbringung bis zum Abheben (Kennzeichnung durch rote Gerade im Diagramm) entspricht dem Weg X_{St} nach Abb. 5-2. Die Simulation bestätigt zum einen die angenommene Dominanz der Steifigkeit der Halbscheiben aus Stahl, und liefert in gleichem Zug auch eine erste Abschätzung für die Größe dieses Bereichs mit etwa 0.01mm .

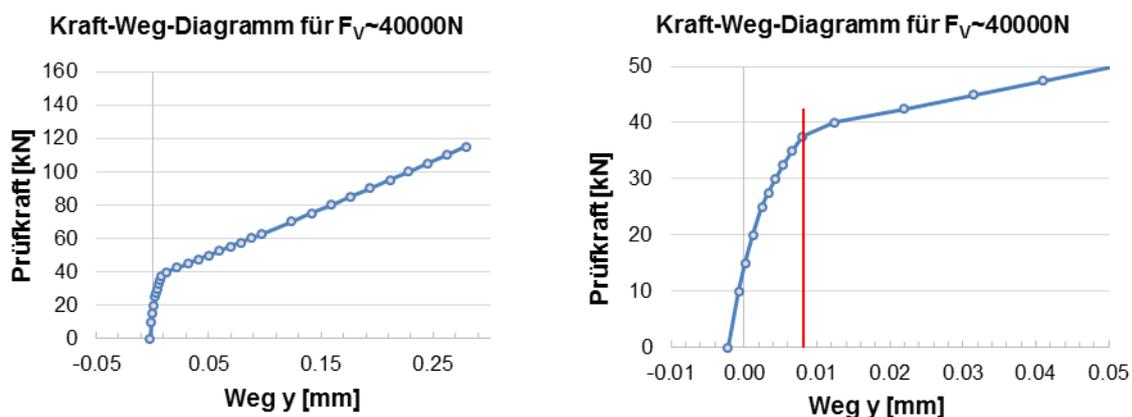


Abb. 5-6: Simulationsergebnisse für $F_V=40\text{kN}$

Zum Vergleich wurde dieselbe Simulation auch für eine angenommen verbleibende (Rest-)Vorspannung von 80 kN durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich in Abb.5-6 sehen.

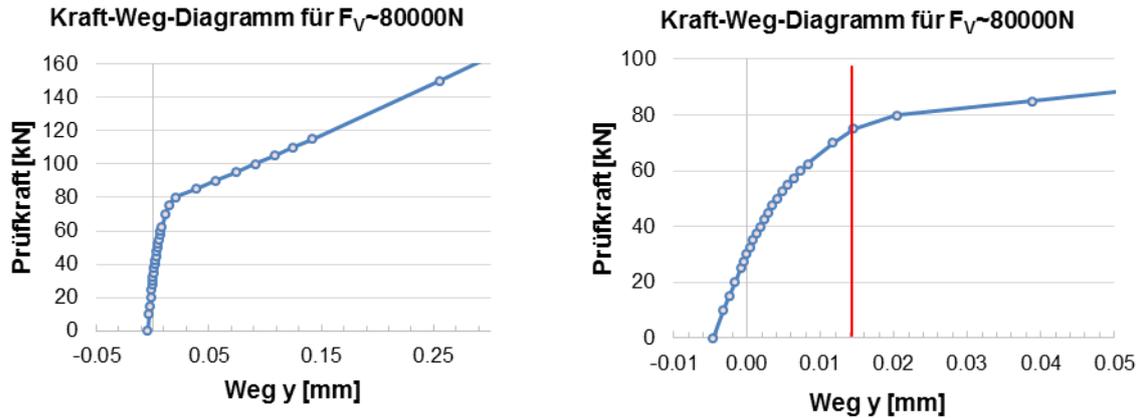


Abb. 5-7: Simulationsergebnisse für $F_V=80\text{kN}$

Die Simulation mit höherer eingestellter Vorspannung zeigt die gleichen Charakteristiken wie im vorherigen Absatz beschrieben. Die Dominanz des Stahls ist wieder zu erkennen und die Weganteile bis zum Abheben fallen entsprechend größer aus, was anzunehmen war.

5.1.2.3 Verformung der Scheibe unter Prüfkraft

Für die Abschätzung des Einflusses der Verformung der Halbscheiben, quer und normal zu Zugrichtung, auf die Wegmessung wurde ebenfalls ein Vergleich der auftretenden Verschiebungen unter Last durchgeführt. Die Simulation wurde in jedem Fall bis zur Höchstlast der Auslegung durchgeführt, wobei hier zusätzlich eine Variation des E-Moduls der Bandagierung vorgenommen wurde. Der Grund hierfür waren die stark schwankenden Daten für die Werte des E-Modules der ausgehärteten Bandagen. Als Grenzwerte für die Variation wurden 50000 N/mm^2 als Minimalwert (Literatur, Vgl. [KFVK, S.29]) und 200000 N/mm^2 als Maximalwert (Annäherung an Stahl) gewählt. Um eine Aussage über den Effekt der Durchbiegung treffen zu können, wurden die Verschiebungen der Randpunkte einer Halbscheibe (ΔL_A) an der Trennebene mit der Verschiebung eines Punktes in der rechtwinklig zur Trennebene liegenden Symmetrieebene (ΔL_M) verglichen. Eine Übersicht dazu liefert Abb. 5-8.

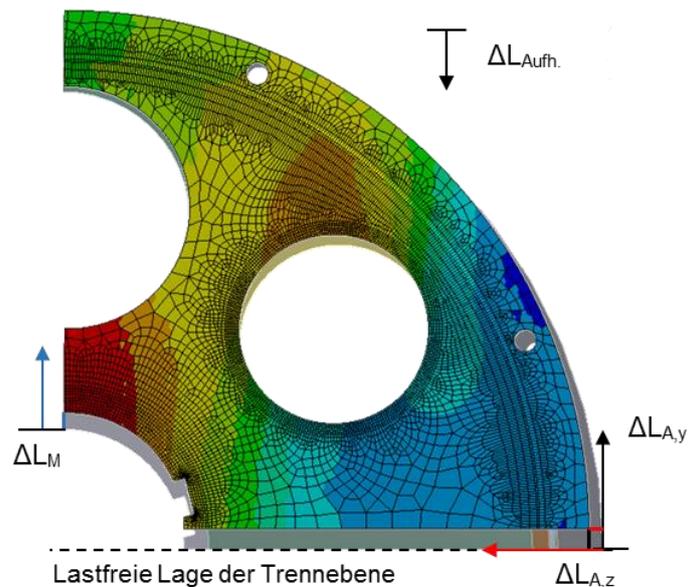


Abb. 5-8: Erläuterungen zur Verformung der Scheibe

Aus den ausgewerteten Daten kann damit für eine Betrachtung der Halbscheibe alleine, eine relative Abweichung gemäß

$$e_{rel} = \frac{\Delta L_{A,y} - \Delta L_M}{\Delta L_{A,y}}$$

ermittelt werden. Wird für die Auswertung auch noch die endliche Steifigkeit des Systems aus Laschen und Bolzen (und somit die Verschiebung der Aufhängung = $\Delta L_{Aufh.}$) berücksichtigt, ändert sich dies zu

$$e_{rel,res} = \frac{(\Delta L_{A,y} - \Delta L_{Aufh.}) - (\Delta L_M - \Delta L_{Aufh.})}{(\Delta L_{A,y} - \Delta L_{Aufh.})}$$

Das nachstehend eingefügte Diagramm in Abb.5-9 zeigt die Auswertung dieser Abweichungen bei verschiedenen Werten für den E-Modul der Bandagen.

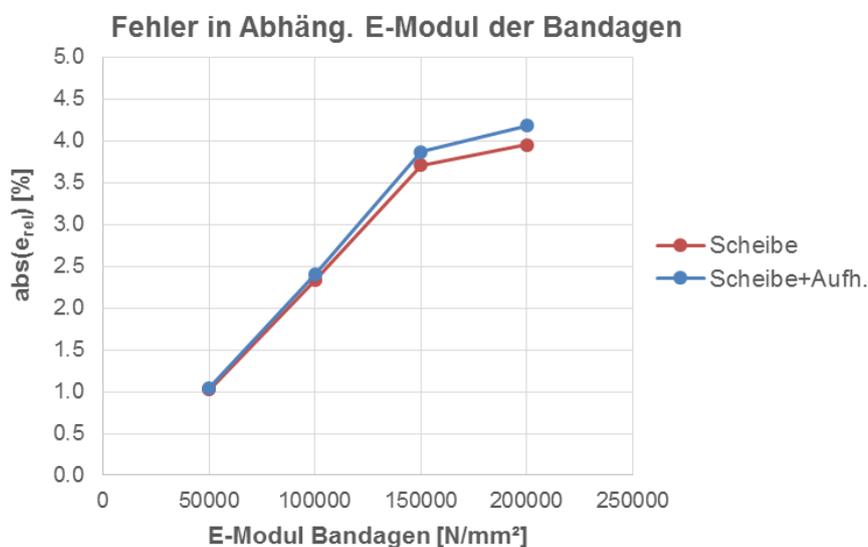


Abb. 5-9: Relative Abweichungen

Es zeigt sich hierbei, dass die relative Abweichung auch bei einer Belastung bis zur Maximallast in einem Bereich zu erwarten ist, der auf jeden Fall kleiner als 5% bleibt. Vergleicht man hierzu noch die Angaben aus Literatur [KFVK] und der Hersteller solcher Bandagen, findet man dort den E-Modul am ehesten in Wertebereichen von 50000-130000 N/mm². Somit ist mit großer Wahrscheinlichkeit eine Abweichung von nur etwa 1-3% zu erwarten. Verschiedene Hersteller geben hier auch Werte im Bereich von 50-70000N/mm² an, sodass sich der Fehler im gemessenen Weg hier auf etwa 1-1.7% beschränken würde. Die Verformung in Querrichtung $\Delta_{L,A,z}$ in diesem Lastbereich beträgt dabei etwa 0.05% vom Durchmesser der Scheibe.

Aufgrund der geringen Größen dieser Abweichungen, kann das Abheben in erster Näherung als eine Parallelverschiebung der Halbscheiben betrachtet werden.

5.1.2.4 Einfluss des Abhebens auf die Spannung in den Bandagen

Laut [11] kann die Biegespannung, welche der Normalspannung aus der eingeleiteten Zugbelastung überlagert wird für verwendete NOL-Ringe (siehe Kapitel 1.3.1.4) bis zu 50% der nominalen Zugspannung betragen. Die Biegespannung ist auf entstehende Biegemomente M_{CL} an den Stellen der Trennebene am höchsten und kann mit Verwendung von Abb.5-10 und nebenstehenden Formeln analytisch berechnet werden.

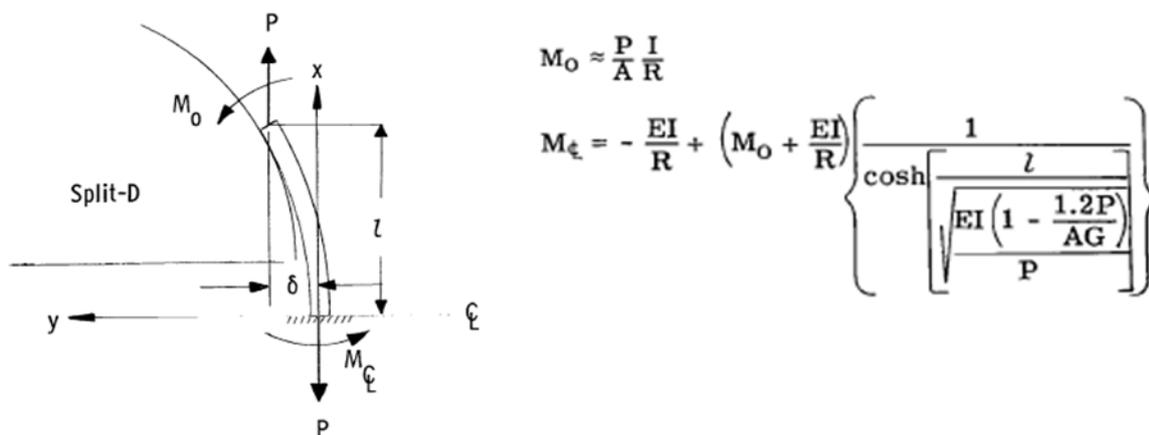


Abb. 5-10: Biegemoment an der Trennebene
Quelle:[11]

Das Biegemoment und die daraus entstehende Biegespannung sind dabei abhängig vom Radius R der Scheiben, den Abmessungen der aufgebracht Bandagen (b, t) und von einer angenommenen Länge l. Die Länge l entspricht dabei jener Distanz von der gedachten Lage der Trennebene bis hin zum Auflagepunkt der Bandagen auf den Halbscheiben.

Eine analytische Berechnung der auftretenden Biegespannungen nach [11] mit den Abmessungen und Lastbereichen der durchgeführten Versuche ergab eine Größenordnung der Biegespannung in Bezug auf die eingeleitete Zugspannung von etwa 20% bei kleinen Lagenzahlen und etwa 5% bei größeren. Der Abfall des Anteils der Biegespannung lässt sich dabei rechnerisch mit dem kubischen Zusammenhang des Flächenwiderstandes mit der Höhe der Bandagen gemäß $I=b \cdot t^3/12$ begründen. Weiters ist aus den angegebenen Formeln ersichtlich, dass

zwar die Biegemomente abnehmen je größer der Radius des Ringes ist, die Normalspannung resultierend aus der Zugbelastung $\sigma = P/A = P/(h \cdot t)$ vom Radius unabhängig ist. Der Einfluss der eingeleiteten Biegespannung auf die Bruchspannung wäre somit eigentlich nicht zu vernachlässigen. Da die am Wickelkopf aufgetragenen Bandagierungen ähnlichen Lastsituationen (Umlenkungen an den Auflageflächen der Nutkeile) ausgesetzt ist, sind die resultierenden Resultate für die Bruchlasten durchaus als nutzbar anzusehen.

5.2 Verwendete Messmethoden

Um die aus der Simulation hervorgehenden Ergebnisse zu bestätigen, war es notwendig diese mit geeigneten Methoden am tatsächlich aufgebauten Prüfstand nachzuprüfen.

5.2.1 Messung der Dehnung an der Probenaufnahme

Um die Größenordnung der Verformung der Scheibe während des Prüfvorganges zu verifizieren, wurden an ausgewählten Positionen Dehnmessstreifen (DMS) angebracht (Abb.5-11).

Mit dem Vertikalen Eingitter-DMS (DMS_V), am oberen Rand der Halbscheibe in der Symmetrieebene liegend, sollte der Einfluss der Stauchung in diesem Bereich durch die eingeleitete Prüfkraft innerhalb der Geometrie aufgenommen werden. Im Bereich der Trennebene zwischen den Halbscheiben, wird einseitig die Dehnung in horizontaler und vertikaler Richtung über zwei um 90° zueinander verdrehten DMS auf einer DMS-T-Rosette gemessen (DMS_Tross_H und DMS_Tross_V). Weiters wurde auf der der DMS-Rosette gegenüberliegenden Seite ebenfalls die Dehnung in horizontaler Richtung aufgenommen (DMS_H). Dies zielte darauf ab, die (unter Vernachlässigung des Einflusses der Passfedernut) symmetrische Verteilung der Beanspruchung zu bestätigen.

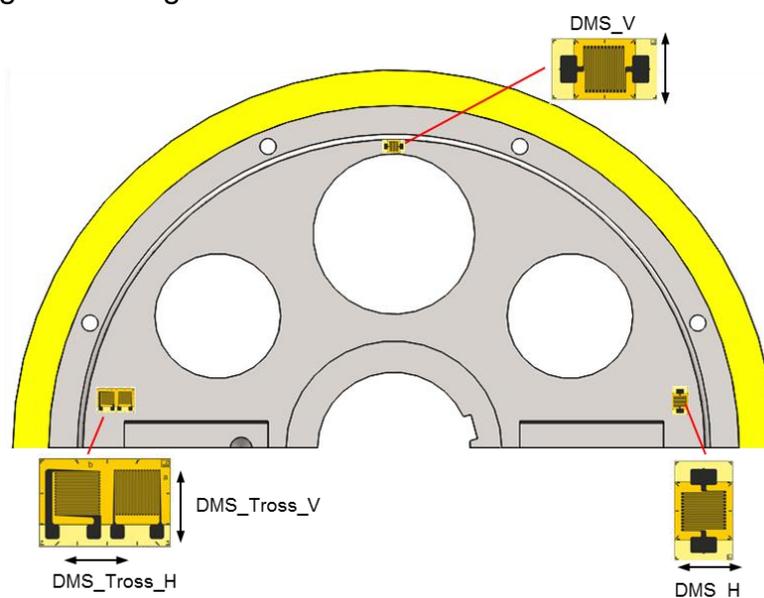


Abb. 5-11: Positionen der angebrachten Dehnmessstreifen

5.2.2 Öffnender Kontakt

Das Abheben der Scheibe, welches dem Überwinden der verbliebenen Restklemmkraft entspricht, sollte im Idealfall durch ein eindeutiges Signal erkennbar gemacht werden.

Die Grundidee hierbei war es, einen öffnenden Kontakt in der Nähe der Trennebene anzubringen, welcher im Abhebepunkt einen geschlossenen Stromkreis unterbrechen, und somit im aufgenommenen Signalverlauf einen sprunghaften Abfall hervorrufen sollte, wie es in Abb. 5-12 zu erkennen ist.

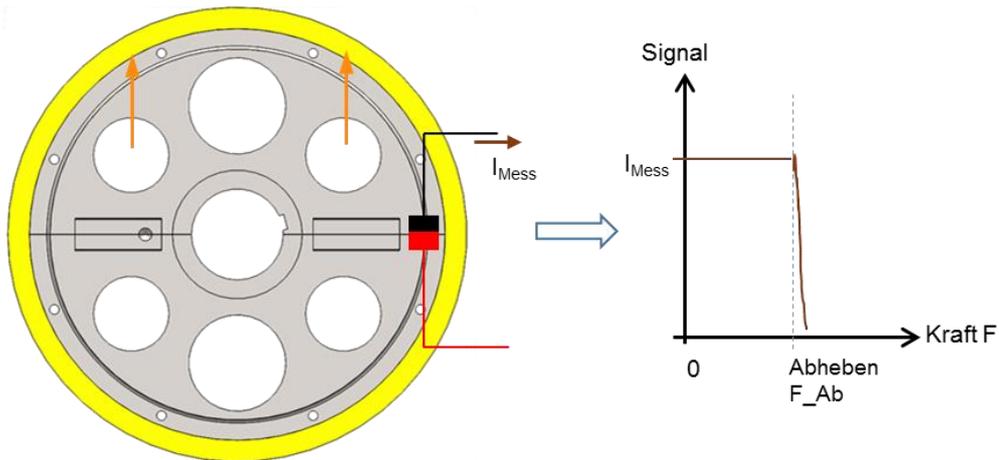


Abb. 5-12: Prinzip des Öffners und erwarteter Signalverlauf

Die Umsetzung dieses Prinzips erfolgte durch anbringen von zwei dünnen Streifen aus Stahlfolie an den Randpunkten der Trennebene, welche am Prüfstand selbst noch mit einer Sollbruchstelle (Einschnitt) versehen wurden. Diese wurden zwischen Flachstücken aus Hartgewebe-Kunststoff aufgeklemt, um den Prüfling gegen den Messstrom zu isolieren, wie Abb. 5-11. Zeigt. Die Anbringung der Kontakte erfolgte dabei unter leichter Vorspannung vor der Bandagierung, sodass die Streifen ebenfalls den Effekt der Stauchung der Stahlscheibe durch die Vorspannung der Bandagen mitmachen.



Vorbereitetet Kontakt



Anschluss am Prüfstand

Abb. 5-13: Ausgeführter öffnender Kontakt

5.2.3 Wegmesssensoren

Im Zuge der ersten Messungen zeigte sich, dass das Messsystem der Stahlstreifen mit Sollbruchstelle nicht die erhoffte Effizienz zeigte. (Erläuterungen siehe nächstes Kapitel)

Als Verbesserung des Systems wurde auf Basis der Auswertungen der ersten Messreihe, die Messung eines Stromsignals durch die Anbringung von Wegmesssensoren an den Randpunkten der Scheibe ersetzt. Dabei wurde darauf geachtet, den kurzen Messbereich der Sensoren möglichst nahe der Trennebene zu legen. Eine schematische Darstellung mit erwartetem Signalverlauf zeigt Abb.5-14.

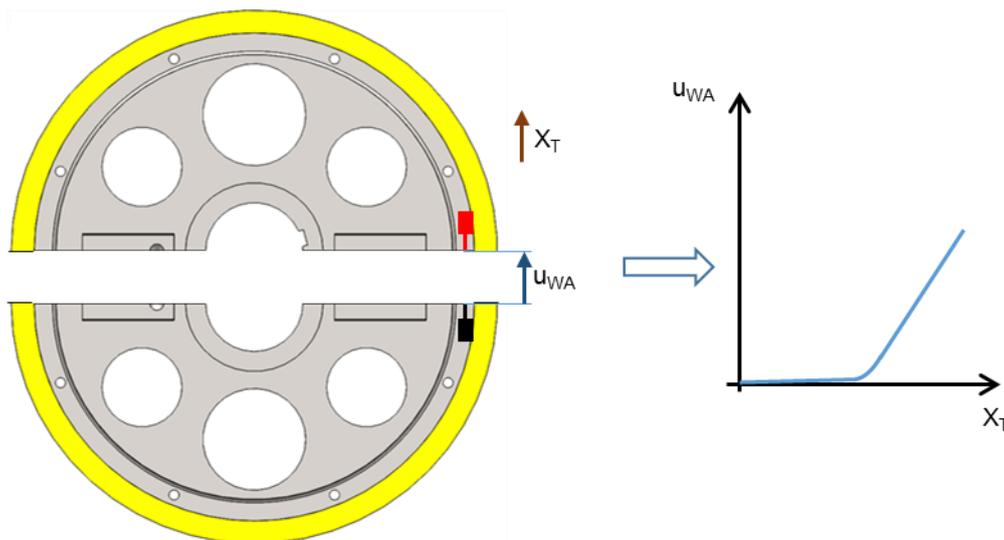


Abb. 5-14: Schematische Darstellung der Wegmesssensoren

Dabei war der Grundgedanke, dass sich die Verformung der Scheibe unter Vorspannung über die ganze Scheibe aufteilt, der Anteil im Bereich um die Trennebene aber so gering bleibt, dass sich in diesem Fall ein möglichst eindeutiger Abhebepunkt aus dem Offset der aufgenommenen Messkurve ablesen lässt.

Vergleichend hierzu sei hier noch einmal an die Abb. 5-3, mit der Modellvorstellung der Federwirkung in der verspannten Halbscheibe verwiesen. Der mit dem Kräfteinleitungsfaktor reduzierte Anteil der federnden Klemmlänge $l_{k,red} = n \cdot l_k$ wird umso kleiner, je näher der betrachtete Kraftangriffspunkt an der Trennebene der verspannten Teile liegt.

5.3 Testmessungen

Um die Wirksamkeit der angedachten Methoden zu Überprüfen wurden mehrere Versuche mit den oben genannten Methoden durchgeführt um das bestmögliche Messsystem für weiter Versuche zu finden.

5.3.1 Testmessungen mit DMS und Kontakten

Die erste Messreihe mit fünf gefertigten Prüflingen wurde teilweise, wie im Kapitel 5.2.1 beschrieben, mit Dehnmessstreifen bestückt. Die Kurven der aufgenommenen Dehnungsmessungen sind auf der rechten Ordinate abzulesen, und sind namentlich der entsprechenden Abb. 5-11 in Kapitel 5.2.1 zuzuordnen.

5.3.1.1 Messung

Zusätzlich wurden in dieser Messreihe noch die in Kapitel 5.2.2 erwähnten Stahlfolien als Kontakte an den zwei Randpositionen auf einer Seite für jede Scheibe angebracht. Diese sind im unten stehenden Diagramm mit den gestrichelten Linien von ‚Kontakt A‘ und ‚Kontakt B‘ zu sehen. Diese Messmethode erwies sich als nicht zuverlässig, da die Kontakte an den Seiten oft nicht gleichzeitig, sondern (wie in diesem Beispiel anhand der weit auseinander liegenden Abfällen der Strommessungen über die Kontakte zu in Abb. 5-14 sehen) an verschiedenen Punkten der Messung den Strom unterbrechen, und somit kein eindeutig zuordenbares Ergebnis lieferten.

Die am Prüfstand aufgenommene Kurve der Prüfkraft ist durchgehend in schwarz dargestellt. Auffällig sind bei dieser Kurve vier Bereiche, in welche sich die Kurve augenmerklich einteilen lässt (siehe die farblichen Markierungen unterhalb des Diagramms in Abb.5-14):

- **Bereich 1:** Wenig Kraftsteigerung im Vergleich zum zurückgelegten Weg. In diesem Bereich setzt sich das restliche Zwischenspiel in den Verbindungsstellen und anteilig auch die Ausgleichsvorgänge in der hydraulischen Kraftaufbringung.
- **Bereich 2:** Kurzes Wegstück mit steilem Anstieg der Kraft. Durch das Rückbilden der Verformung der Scheibe, und die Einleitung der Kraft in die Probengeometrie, ist die Steigung in diesem Bereich stark vom Stahlwerkstoff dominiert, wie es schon in Kapitel 5 angesprochen wurde.
- **Bereich 3:** Dieser Bereich ist geprägt von nichtlinearen Effekten. Es ist hierbei anzunehmen, dass die in der Simulation vernachlässigten Reibungseffekte und die Unstetigkeiten im Kontaktverhalten, welche auch durch die kleinen Durchbiegungseffekte der Halbscheiben zustande kommen, einen größeren Einfluss auf den Bewegungsablauf während des Abhebens haben als angenommen. Zusätzlich können auch Anteile an nichtlinearen Effekten durch das poröse Bruchverhalten des ausgehärteten Matrixmaterials vermutet werden, welches sich akustisch durch häufiges „Knacken“ während des Prüfvorganges bemerkbar machte.

- **Bereich 4:** Dem Übergang von Bereich 3 in Bereich 4 ist hier besonderes Augenmerk zu schenken. Dieser Punkt stellt einen Übergang im Verlauf der Messkurve dar, ab welchem die Steigung abfällt, sich vom Stahl dominierten Bereich deutlich unterscheidet und bis zum Bruch hin als konstant anzusehen ist. Ab diesem Punkt lässt sich daher vermuten, dass nur mehr die Bandagen die Belastung tragen, und der Spalt definitiv geöffnet ist.

Ein weiterer Punkt lässt sich auch in anderen durchgeführten Messung erkennen. Jener Punkt, an dem der starke Anstieg des vom Stahl dominierten Bereiches beginnt abzuknicken und in ein flacheres Stück übergeht, stellt ein wiederkehrendes Merkmal dar, welches in weiteren zukünftigen Messungen als signifikanter Punkt S_1 ausgewertet werden kann (im Diagramm als brauner Punkt mit Beschriftung gekennzeichnet). Über das Auslesen der zugehörigen Kraft F_{S1} aus dem Diagramm kann bei einer genügend großen Anzahl von Messungen versucht werden, ein Zusammenhang zwischen diesem Punkt und den variierten Parametern zu erfassen.

Die Messungen mittels DMS bestätigen die Annahmen betreffend des federnden Verhaltens der Probenaufnahme. Die Messung der vertikalen Dehnung in der Symmetrieebene, über dem Kraftangriffspunkt (DMS_Vertikal, im Diagramm als grüne Linie dargestellt) zeigt den Verlauf der steigenden Stauchung vom Beginn des Einleitens der Prüfkraft bis hin zum wieder Absinken, wenn sich der Spalt öffnet. An der Trennebene (DMS_Tross_V, dunkelblau) lässt sich ebenfalls die angenommene Charakteristik erkennen, die durch die Wirkung der Durchbiegung bis zum Abheben zeigt (Randzonen der Scheibe heben zuletzt ab).

Die beiden DMS-Messungen in horizontaler Richtung (quer zur Zugrichtung) in der Nähe der Trennebene (welche im Diagramm als durchgehende gelbe und hellblaue Linien eingefügt sind), weisen eine sehr ähnliche Charakteristik auf, was auf ein symmetrisches Abheben schließen lässt.

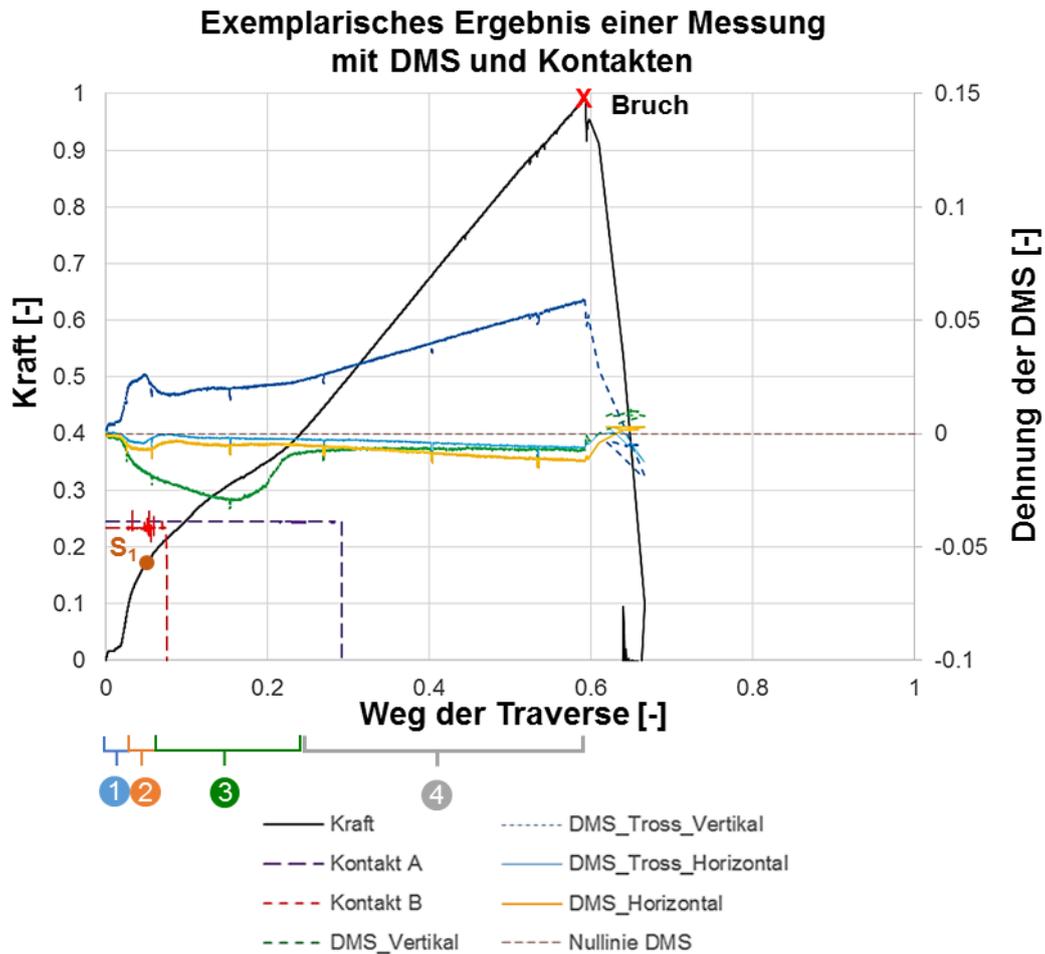


Abb. 5-15: Messung mit DMS und Kontakten (exemplarisch)

5.3.1.2 Vergleich mit Simulation

Im Zuge der Festigkeitsrechnungen mit der Finiten Elemente Methode (Kapitel 4.3) wurden auch die Dehnungen der Scheibe während des Prüfvorganges ausgewertet, wie sie in den folgenden Abbildungen zu erkennen sind. Es sollen Ergebnisse der Simulation mit gemessenen Daten aus Abb.5-15 verglichen werden.

Die Dehnungen quer zur Zugrichtung (DMS_Horizontal, DMS_Tross_Horizontal) und die Dehnung in Zugrichtung an der Position am oberen Rand der Halbscheibe (DMS_Vertikal) liegen bei Bruchlast etwa bei $-0.01\% \pm 1 \cdot 10^{-5}$. Ein Vergleich mit der Simulation zeigt in Abb.5-17 und Abb.5-18 eine Übereinstimmung hinsichtlich dieser Größenordnung.

Die Dehnung in Zugrichtung an der Position der Trennebene steigt bei Erreichen der Bruchlast auf $0.05\% \pm 5 \cdot 10^{-5}$ an. Auch hier zeigt ein Vergleich mit den Ergebnissen in Abb.5-16 eine gute Übereinstimmung.

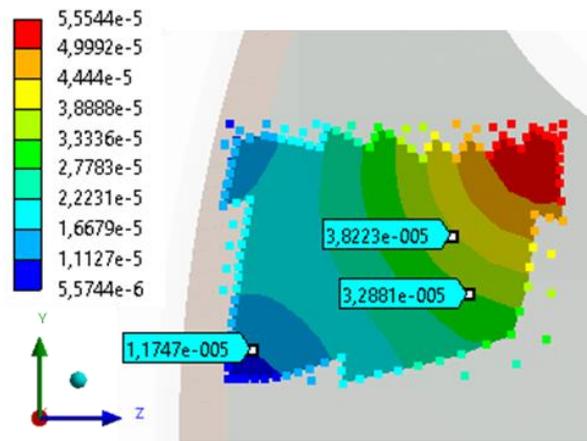


Abb. 5-16: Dehnungen in Zugrichtung (Y), Position Nahe der Trennebene

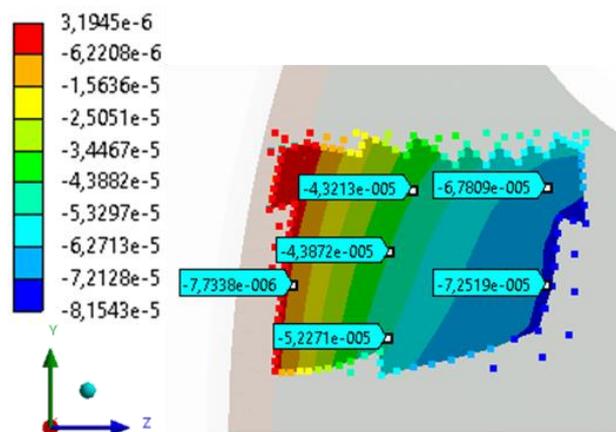


Abb. 5-17: Dehnungen Quer zur Zugrichtung (Z), Position Nahe der Trennebene

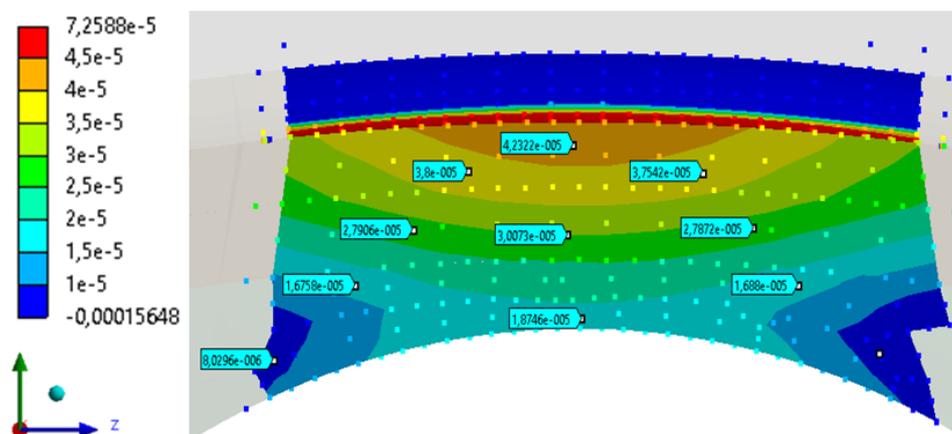


Abb. 5-18: Dehnung in Zugrichtung (Y), Position mittig am oberen Rand

Die Messungen hinsichtlich der Verformung der Probenaufnahme unter Vorspannung und der Belastung während des Prüfvorganges entsprechen somit den Erwartungen, und fallen auch hinsichtlich Größenordnung so aus, dass sie als sehr wenig relevant für die Wegmessung erachtet werden können.

5.3.2 Testmessungen mit Wegmesssensoren

Da sich die Detektion des Abhebepunktes mit den öffnenden Kontakten als wenig zuverlässig erwies wurde in einer weiteren Testmessung auf die erwähnte Methode der induktiven Sensoren erweitert. (Vgl. dazu Abb. 5-14). Ein beispielhaftes Ergebnis einer Messung mit diesem Setup ist in Abb. 5-19 dargestellt.

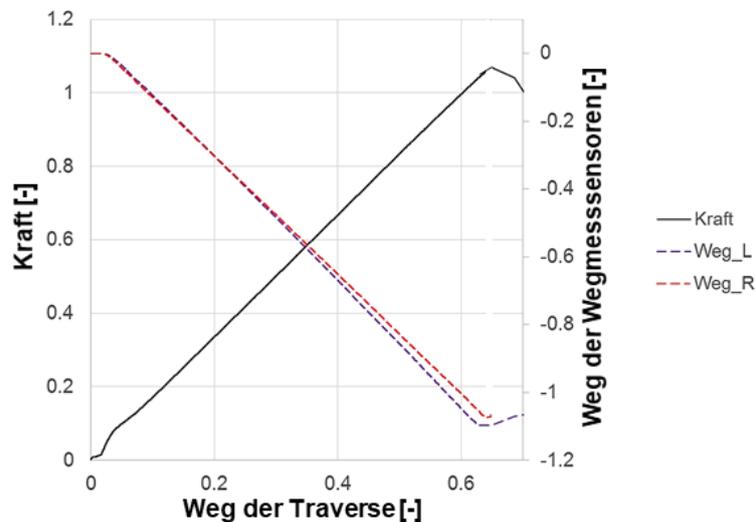


Abb. 5-19: Messung mit Wegmesssensoren (exemplarisch)

Erkennlich ist hierbei, dass der Beginn des Abhebens in den Kurven der Wegmesssensoren einen etwas deutlicheren Knick hervorruft. Wenn man allerdings den Bereich dieses Knicks näher betrachtet wird klar, dass auch dieser den Abhebevorgang nicht exakt in einem Punkt erfassen kann. Der nichtlineare Übergangsbereich zwischen den beiden Geradenstücken mit unterschiedlicher Steigung kann wiederum mit zwei weiteren Punkten (S_2 , S_3) charakterisiert werden, die dem Diagramm in Abb. 5-20. eingefügt wurden.

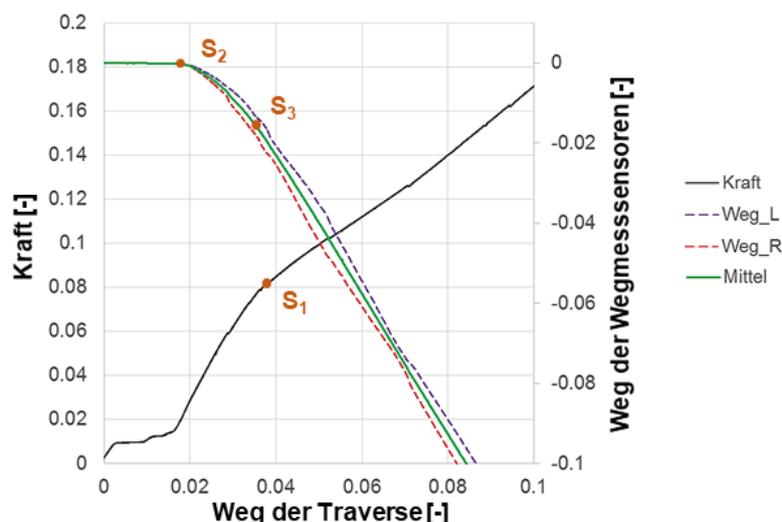


Abb. 5-20: Messung mit Wegmesssensoren (exemplarisch) - Detailbereich

Zusammengenommen kann man aus den ersten Messungen erkennen, dass sich diese drei signifikanten Punkte S_1 , S_2 und S_3 als wiederkehrende Merkmale in den Kurvenverläufen zur Detektion des Abhebens und somit zur Ermittlung der Restklemmkraft anbieten.

6 Exemplarische Auswertung

In diesem Kapitel soll eine beispielhafte Auswertung von durchgeführten Versuchen gezeigt werden, und dabei auf erste Erkenntnisse und weitere Notwendige Maßnahmen eingegangen werden.

6.1 Versuchsplanung und Übersicht durchgeführter Messreihen

Die ursprünglich konzipierte Versuchsmatrix beinhaltete eine umfangreiche Variation von Parametern, angefangen bei der Abwandlung des Fertigungsprozesses in der Probenvorbereitung selbst, bis hin zur Variation einzelner Parameter wie Bandzug (Vorspannkraft beim Bandagieren), Temperatur, Lagenzahl und der Bandagenbreite.

Durch die Einschränkung zeitlicher Ressourcen wurde diese Arbeit auf die Untersuchung eines Teilbereiches dieser ursprünglichen Versuchsmatrix eingeschränkt. Die Untersuchungen in dieser Arbeit sahen nach einer ersten Testreihe (Messreihe MR01) eine Variation im Fertigungsprozess und in der Lagenzahl vor, wie sie in Tabelle 7 zu sehen ist.

MR-Index	Bandagenbreite	Vorspannkraft	Lagenzahlen	Fertigungsvariante
01	b ₁	F _{v1}	n ₁ , n ₁ , n ₁ , n ₂ , n ₂	Variante 1
02	b ₂	F _{v2}	n ₃ , n ₄ , n ₅ , n ₆ , n _{1b}	Variante 2
03	b ₂	F _{v2}	n ₇ , n ₃ , n ₄ , n ₅ , n ₆	Variante 3R
04	b ₂	F _{v2}	n ₅ , n ₆ , n* ₇ , n* ₈ , n* ₉	Variante 3
05	b ₂	F _{v2}	n ₅ , n ₆ , n ₇ , n ₈ , n ₉	Variante 3
06	b ₂	F _{v2}	n ₅ , n ₆ , n ₇ , n ₈ , n ₉	Variante 3R
07	b ₂	F _{v2}	n ₈ , n ₈ , n ₈ , n ₈ , n ₈	Variante 3R

Tabelle 7: Übersicht der geplanten und durchgeführten Versuche

Die mit einem (*) gekennzeichneten Versuche waren in diesem Fall aufgrund eines Fertigungsfehlers nicht gültig, und wurden verworfen.

6.2 Gegenüberstellung mehrerer identisch durchgeführter Versuche einer Messreihe

In diesem Unterkapitel sollen einige Messwerte dargestellt, miteinander verglichen und anschließend ausgewertet werden.

6.2.1 Aufgenommene Kraft-Weg-Kurven

Im Folgenden sollen die Ergebnisse einer Messreihe, bestehend aus 5 Scheiben, welche allesamt dem gleichen Vorbereitungsprozess unterzogen wurden, dargestellt und verglichen werden. Alle Proben der hier exemplarisch ausgewerteten Messreihe wurden mit derselben Lagenzahl bandagiert, und im Zuge der Vorbereitung mit dem gleichen Bandzug (Vorspannung im Band) aufbereitet. Des Weiteren wurden alle Proben während ihrer Vorbereitung den gleichen Prozessschritten unterworfen, sodass die einzeln durchgeführten Experimente untereinander vergleichbar sind.

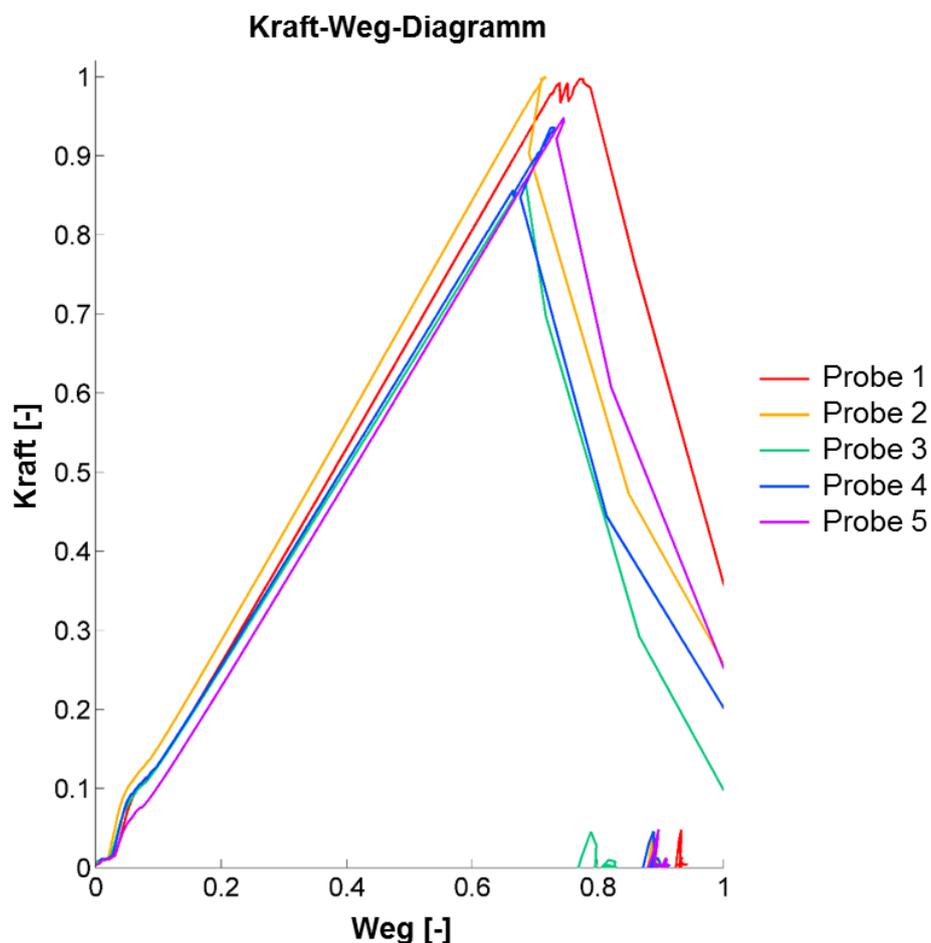


Abb. 6-1: Aufgenommene Kraft-Weg-Kurven für eine Messreihe

6 Exemplarische Auswertung

In Abb. 6-1 sind die vollen aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven für die durchgeführten Versuche der angesprochenen exemplarischen Messreihe zu sehen.

Zu erkennen ist im Bereich des Koordinatenursprungs deutlich der angenommene Verlauf, mit Setzbereich, starkem Anstieg im Bereich der wirksamen Vorspannung mit einem nichtlinearen Übergangsbereich (Abb.6-2) und schließlich der vermutete flachere und lineare Bereich bis hin zum Bruch.

Die Ergebnisse für die Bruchkraft können direkt aus dem Diagramm abgelesen werden, und die verbleibende Restspan(kraft) kann wie im vorherigen Kapitel über die Auswertung der Punkte S_1 abgeschätzt werden.

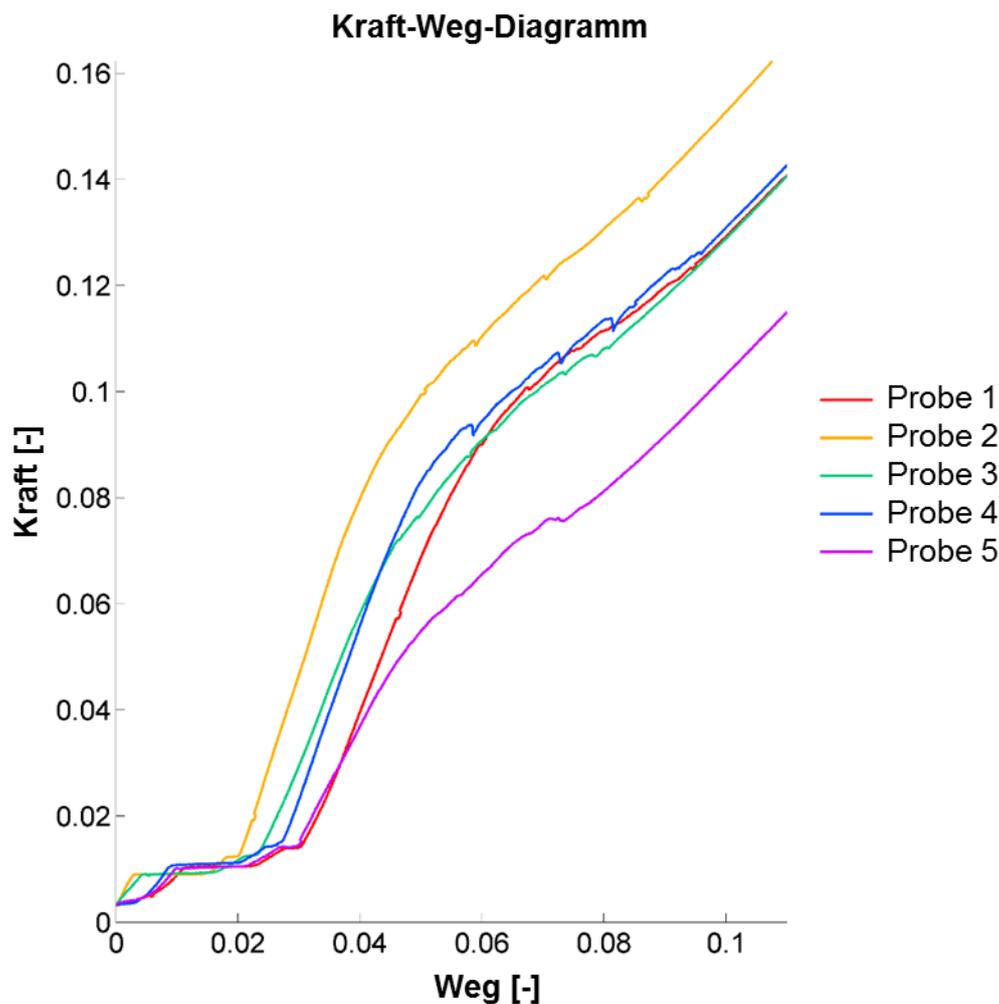


Abb. 6-2: Detailbereich der aufgenommenen Kraft-Weg-Kurven

6.2.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung hinsichtlich Mittelwert, Streuung und Vertrauensintervall wird hier für die Bruchkraft und die ermittelte Restspannung durchgeführt. Die statistische Signifikanz wird mit der Annahme einer Normalverteilung der Versuchsergebnisse mit Hilfe des bekannten Einstichproben-t-Tests für den Mittelwert und des χ^2 -Test (Chi-Test) für die Varianz berechnet. (für näheres siehe [DUBBEL, W4] oder [IMATH4, S.280ff])

Für die ermittelte Restspannung und die gemessene Bruchlast erhält man in der durchgeführten Messreihe folgenden Daten nach Tabelle 8:

Nr.	MR	Bruchkraft	Restspannung
1	7	1.00	0.12
2	7	1.00	0.14
3	7	0.87	0.13
4	7	0.94	0.13
5	7	0.95	0.08
Mittelwert \bar{x}		0.95	0.12
Standartabweichung s		0.055	0.023
Varianz		0.003	0.001

Tabelle 8: Daten der Messreihe

Die Tests liefern für die Parameter einer Normalverteilung (Mittelwert μ und Varianz σ^2) ein Vertrauensintervall zu einem Signifikanzniveau P . Die Durchführung dieses Tests erfolgt dabei nach [IMATH4, Kapitel 7, S.280ff]. Die Werte für t (t -Verteilung) und χ^2 wurden dabei aus [IMATH4, S.356, Tabelle 2 und Tabelle 3] entnommen.

- Stichprobenumfang: $n=5$
- Gewähltes Signifikanzniveau für die Tests:
 $P=0.90$

$$P=(1-\alpha) = 0.90 \rightarrow \alpha = 0.10 \rightarrow \alpha/2 = 0.05 \rightarrow (1-\alpha/2)=0.95$$

- t -Wert laut Tabelle:
 $t_{n-1,(1-\alpha/2)} = t_{4,0.95} = 2.132$
 $t_{n-1,(1-\alpha)} = t_{4,0.90} = 1.533$
 $t_{n-1,(\alpha)} = t_{4,0.1} = -t_{4,0.90} = -1.533$
- χ^2 -Werte laut Tabelle:
 $\chi^2_{n-1,(1-\alpha/2)} = \chi^2_{4,0.95} = 9.488$
 $\chi^2_{n-1,(\alpha/2)} = \chi^2_{4,0.05} = 0.711$

6.2.2.1 Bruchkraft:

Vertrauensintervall für den Mittelwert μ :

$$\begin{aligned}\bar{x} - \frac{t_{n-1,(1-\alpha/2)} \cdot s}{\sqrt{n}} &< \mu < \bar{x} + \frac{t_{n-1,(1-\alpha/2)} \cdot s}{\sqrt{n}} \\ 0.95 - \frac{2.132 \cdot 0.055}{\sqrt{5}} &< \mu < 0.95 + \frac{2.132 \cdot 0.055}{\sqrt{5}} \\ 0.95 - 0.0524 &< \mu < 0.95 + 0.0524\end{aligned}$$

Das Vertrauensintervall, in dem der wahre Mittelwert mit 90% Sicherheit liegen würde, kann damit angegeben werden:

$$\text{Vertrauensintervall Mittelwert } \mu_{\text{Bruch}} = 0.95 \pm 0.0524 \cong 95 \pm 5.5\%$$

T-Test für den Mittelwert:

$H_0: \mu_B \geq 0.95$ gegen $H_1: \mu_B < 0.95$

Testwert T:

$$T = \frac{\bar{x} - \mu_B}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.95 - 0.95}{0.055/\sqrt{5}} = 0$$

Prüfung: H_0 wird verworfen, wenn $T \leq t_{n-1,(\alpha)}$

Ergebnis: $0 > -1.533$

Die Hypothese, dass der wahre Mittelwert größer als 0.95 ist, kann demnach bestätigt werden.

Vertrauensintervall für die Standardabweichung σ :

$$\begin{aligned}s \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1,(1-\alpha/2)}^2}} &< \sigma < s \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1,(\alpha/2)}^2}} \\ 0.055 \cdot \sqrt{\frac{5-1}{9.488}} &< \sigma < 0.055 \cdot \sqrt{\frac{5-1}{0.711}} \\ 0.0357 &< \sigma < 0.1304\end{aligned}$$

Das Vertrauensintervall, in dem die wahre Standardabweichung mit 90% Sicherheit liegen würde, kann damit angegeben werden:

$$\text{Vertrauensintervall Standardabweichung } \sigma_{\text{Bruch}} = [0.0357, 0.1304]$$

6.2.2.2 Restspannung:

Vertrauensintervall für den Mittelwert μ :

$$\begin{aligned}\bar{x} - \frac{t_{n-1,(1-\alpha/2)} \cdot s}{\sqrt{n}} &< \mu < \bar{x} + \frac{t_{n-1,(1-\alpha/2)} \cdot s}{\sqrt{n}} \\ 0.12 - \frac{2.132 \cdot 0.023}{\sqrt{5}} &< \mu < 0.12 + \frac{2.132 \cdot 0.023}{\sqrt{5}} \\ 0.12 - 0.0219 &< \mu < 0.12 + 0.0219\end{aligned}$$

Das Vertrauensintervall, in dem der wahre Mittelwert mit 90% Sicherheit liegen würde, kann damit angegeben werden:

$$\text{Vertrauensintervall Mittelwert } \mu_{Rest} = 0.12 \pm 0.0219 \cong 0.23 \pm 18\%$$

T-Test für den Mittelwert:

$H_0: \mu_R \geq 0.1$ gegen $H_1: \mu_R < 0.1$

Testwert T:

$$T = \frac{\bar{x} - \mu_R}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.12 - 0.1}{0.023/\sqrt{5}} = -0.9515$$

Prüfung: H_0 wird verworfen, wenn $T \leq t_{n-1,(\alpha)}$

Ergebnis: $1.944 > -1.533$

Die Hypothese, dass der wahre Mittelwert größer als 0.1 ist, kann demnach bestätigt werden.

Vertrauensintervall für die Standardabweichung σ :

$$\begin{aligned}s \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1,(1-\alpha/2)}^2}} &< \sigma < s \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1,(\alpha/2)}^2}} \\ 0.023 \cdot \sqrt{\frac{5-1}{9.488}} &< \sigma < 0.023 \cdot \sqrt{\frac{5-1}{0.711}} \\ 0.0149 &< \sigma < 0.0545\end{aligned}$$

Das Vertrauensintervall, in dem die wahre Standardabweichung mit 90% Sicherheit liegen würde, kann damit angegeben werden:

$$\text{Vertrauensintervall Standardabweichung } \sigma_{Rest} = [0.0149, 0.0545]$$

6.2.3 Reproduzierbarkeit und Aussagekräftigkeit

6.2.3.1 Kurvenverläufe

Bei genauerer Betrachtung der Kurven in Abb.6-1 und Abb. 6-2 lässt sich erkennen, dass alle Kurven dieser Messreihe charakteristisch ähnlich sind, bezüglich ihres Verlaufes. Alle Kurven haben einen starken Anstieg mit nichtlinearem Übergangsbereich und einen anschließenden flacheren Anstieg der Kurven bis hin zum Bereich des Bruchs. Der Bereich des Abhebens (Übergang der Steifigkeiten) überdeckt sich bei drei der fünf Kurven sehr gut, lediglich Probe 2 und Probe 5 weichen in ihrer Position etwas davon ab. Eine weitere sehr gute Übereinstimmung lässt sich in den Anstiegen der Geraden nach dem Abheben beobachten. Diese sind nahezu parallel verlaufend, und lassen sich gut reproduzieren.

Die statistische Streuung der Bruchkraft von etwa 5% fällt gering aus, und kann damit ebenfalls als gut reproduzierbar eingestuft werden. Die ermittelten Werte für die Restspannung hingegen schwanken mit $\pm 18\%$ doch sehr deutlich. Mögliche Erklärungen für eine derart große Schwankungsbreite könnten dabei beispielsweise sein:

- Nicht identifizierte Parameter während der Probenvorbereitung, die einen größeren Einfluss haben, als angenommen
- Nicht identifizierte (übersehene) Fehler während der Probenvorbereitung (handwerklicher Fehler in der Durchführung)
- Große Schwankungsbreite in der Qualität des verwendeten Bandmaterials
- Große Abweichungen in der Objektivität der Auswertung (Ablesen der S1-Punkte)

An dieser Stelle kann noch nicht exakt bestimmt werden, ob die Große Schwankungsbreite auf Grund des Herstellungsprozesses zustande kommt, auf die Bandqualität zurückzuführen ist oder ob diese Schwankungsbreite durch andere Einflüsse zustande kommt.

6.2.3.2 Beurteilung des Einflusses der systematischen Fehler

Der Einfluss der systematischen Fehler soll hier noch einmal zusammengefasst werden. Der Einfluss der Durchbiegung der Halbscheiben unter Prüflast konnte über die Messung der Dehnungen mittels DMS verifiziert werden, und kann dahingehend beurteilt werden, dass der Abhebevorgang als Parallelverschiebung der beiden Scheibenhälften betrachtet werden kann, und somit sowohl für die Messung der Restspannung als auch der Bruchkraft keinen relevanten Einfluss auf das Messergebnis hat.

Der Einfluss der Verformung der Probenaufnahme (Halbscheiben) unter der Last der eingebrachten Vorspannung wurde über die angebrachten Kontakte und die Messung des Weges über zusätzliche Wegmesssensoren überprüft. Bei genauerer Betrachtung der Kurven im Bereich mit hoher Steifigkeit zeigt sich, dass die steilere Gerade doch über einen etwas größeren gemessenen Weg ansteigt, als in der Simulation errechnet. Der Einfluss auf die Messung von Kraft und Weg bleibt jedoch gering, und kann für die Ermittlung der Restspannung vernachlässigt werden.

6.2.3.3 Theoretisch notwendiger Stichprobenumfang

Um eine bessere statistische Signifikanz, und somit eine wesentlich bessere Aussage über die Gültigkeit der ermittelten (statistischen) Werte zu erhalten ist es notwendig deutlich mehr Versuche unter gleichen Bedingungen durchzuführen, auszuwerten und zu vergleichen.

Die Länge des Vertrauensintervalls für ein Vertrauensniveau $1 - \alpha/2$ für einen theoretisch ermittelten Mittelwert und bekannter Standardabweichung σ beträgt allgemein nach [IMATH4, S.281] mit der Standardisierung der Normalverteilung $u = (x - \mu) / \sigma$:

$$L = 2 \cdot \frac{u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$$

Beziehungsweise umformuliert auf den Stichprobenumfang ergibt sich:

$$n = \left(2 \cdot \frac{u_{1-\alpha/2} \cdot \sigma}{L} \right)^2$$

Daraus erkennt man, dass sich allgemein für ein festes Vertrauensniveau und gleichbleibender Standardabweichung erst bei einer Vervierfachung des Stichprobenumfangs n , die Länge des Vertrauensbereichs halbiert.

Einbeziehung der Verwendung des t-Tests:

Bei Messungen mit unbekanntem σ kann man für eine gute Schätzung $\sigma = s$ setzen, und es führt bei der Verwendung des t-Tests auf:

$$L = 2 \cdot \frac{t_{n-1, (1-\frac{\alpha}{2})} \cdot s}{\sqrt{n}} \triangleq 2 \cdot e$$

Beziehungsweise umformuliert auf den Stichprobenumfang ergibt sich wiederum:

$$n = \left(2 \cdot \frac{t_{n-1, (1-\frac{\alpha}{2})} \cdot s}{L} \right)^2$$

Da der t-Wert aber vom Stichprobenumfang n abhängig ist, ist hier für die Umrechnung auf ein höheres Signifikanzniveau (z.B. $1 - \alpha = 1 - 0.01 = 0.99$) eine Iterationsrechnung notwendig. Für den Mittelwert μ_{Rest} der ermittelten Restspannung ergab sich in dieser Arbeit ein Vertrauensintervall der Länge $L_{\text{ist}} = 2 \cdot 0.0439 = 0.087$ (vgl. Kap. 6.2.2.2).

Man erkennt aber, dass nach [IMATH, S.356, Tabelle 2] für $n=11$, $\alpha=0.01$ und einem t-Wert von $t_{n-1, (1-\alpha/2)} = t_{10, 0.995} = 3.106$ sich wiederum ein $L_{\text{neu}} = 0.088$ ergeben würde. Man würde also für ein annähernd gleichbleibendes Vertrauensintervall zu einem höheren Signifikanzniveau, mehr als doppelt so viele Versuche benötigen.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde mit Hilfe der methodischen Konstruktion nach den Richtlinien der VDI ein Prüfkonzept entwickelt, mit dem es möglich ist mechanische Eigenschaften von Bandagen aus Faserverbundkunststoff, wie sie in elektromagnetischen rotierenden Maschinen verwendet werden, zu ermitteln.

In der Entwurfsphase wurde dabei hoher Bedacht auf die Möglichkeit zur Variation verschiedener Parameter (Bandagenbreite, Lagenzahl, Temperatur, Prozessführung in der Probenvorbereitung) gelegt. Das Ergebnis bestand aus einer aus zwei Halbscheiben bestehender Probenaufnahme mit Führungsringsen. Mit dieser konnten im Anschluss an die Vorbereitungen der Probenkörper, die Messung der verbleibenden Restspannung und der Bruchlast der Bandagierung durch Untersuchungen auf einer Zugprüfmaschine in durchgeführten Testmessungen ermittelt werden. Diese ergaben einen ersten Überblick über den Aufwand für die Versuchsdurchführung und die weiteren Möglichkeiten dieses Prüfaufbaus. Dabei wurde mit geeigneten Methoden auch der Einfluss systematischer Fehler (Verformung der Probenaufnahme) auf die Messung überprüft.

Im Zuge weiterer Untersuchungen könnte eine größere Anzahl an Versuchen durchgeführt werden, um mögliche Zusammenhänge der verbleibenden Restspannung mit verschiedenen Parametern des Applikationsprozess (Breite der Bandagierung, Vorspannung im Band, Lagenzahl und Temperatur bzw. Verweilzeit im Ofen während des Aushärtens) zu erfassen.

Für die Durchführung weiterer Messreihen muss auch an eine statistische Aussagefähigkeit der Messergebnisse gedacht werden. Wie gezeigt wurde bedeutet dies, dass einzelne Messungen unter gleichen Bedingungen öfter wiederholt werden müssen, um eine zufriedenstellende Aussage über die statistische Signifikanz zu erreichen. Dabei darf auch der wirtschaftliche Faktor des Aufwandes für die Herstellung der Prüflinge und der zeitliche Aufwand für die Durchführung der eigentlichen Versuche auf der Zugprüfmaschine nicht außer Acht gelassen werden.

In der Literatur und in den Datenblättern der Hersteller solcher Bandagen, findet man Vorschriften für die Prozessführung, für die eine verbleibende Restspannung von bis zu 60% nach dem Aushärten erreichbar bleiben soll. (Vergleiche [8] und [KEM, S.388]) Bei hinreichender Kenntnis des Einflusses der erwähnten Parameter auf die Höhe der erreichbaren Restspannung nach dem Applikationsprozess kann versucht werden den Prozess in Richtung der maximal möglichen Restspannung zu optimieren.

8 Literaturverzeichnis

[EMA] BINDER A.: Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen und Betriebsverhalten, Berlin, Heidelberg: Springer 2012

[KAW] KAW Autar K.: Mechanics of Composite Materials, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2006

[ELMASCH] FISCHER R.: Elektrische Maschinen, 16. Auflage, Hanser, München 2013

[HFVB] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V., Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 4. Auflage, Wiesbaden, Springer 2013

[RoMa] ROOS E., MAILE K.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung., 2. Auflage, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2005

[BERGMANN] Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile. Carl-Cranz-Gesellschaft, CCG / BW, Braunschweig, 1991

[KOKE] KOKE I.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kenngrößen von Faserverbundwerkstoffen, Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2005

[LELOS] V. Lelos, S.M. Manifold, J.J. Granier: "Structural properties and testing of a composite banding used in high-speed rotors," 13th Electromagnetic Launch Technology Symposium, Potsdam (Berlin), Germany, May 22-25, 2006, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 1, January 2007, pp. 250-253.

[DUBBEL1] GROTE, KARL-HEINRICH; FELDHUSEN, JÖRG: *DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014.

[NAEFE] NAEFE, PAUL: „Einführung in das Methodische Konstruieren“, Springer, 2012

[PBF] PAHL, GERHARD; BEITZ, WOLFGANG; FELDHUSEN, JÖRG; GROTE, KARL-HEINRICH: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.

[KöRö1] KÜNNE, B.: Köhler/Rögnitz–Maschinenteile 1, 10. Aufl. Vieweg, 2007

[KöRö2] KÜNNE, B.: Köhler/Rögnitz–Maschinenteile 2, 10. Aufl. Vieweg, 2008

[RM1] MUHS, DIETER; WITTEL, HERBERT; JANNASCH, DIETER; VOßIEK, JOACHIM: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2007.

[VDI2222] Richtlinie VDI 2222 : *Konstruktionsmethodik*. Blatt 1: *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Düsseldorf : VDI, 1997

[KOSCHM] M. Koschmieder: Verarbeitung und Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen mit Elastomermatrix, Aachen, Dissertation, 1999

[VDI2230] Richtlinie VDI 2230 Blatt 1: *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Düsseldorf: VDI, 2003

[STB] PETERSEN, C.: Stahlbau. Grundlagen, Berechnung und bauliche Ausbildung von Stahlbauten., Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013

[KFVK] SCHÜRMANN, HELMUT: Konstruieren mit Faser-Kunststoffverbunden, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007

[KEM] WIEDEMANN, EUGEN; KELLENBERGER, WALTER: Konstruktion elektromagnetischer Maschinen. Berlin, Heidelberg: Springer, 1967.

[THOMPSON] Thompson, R. C., Pak, T. T., and Rech, B. M., "Hydroburst Test Methodology for Evaluation of Composite Structures," *Composite Materials: Testing and Design 14. Volume, ASTM STP 1436*, C. E. Bakis, Ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

[OP] PIENING, O.: Untersuchung einer alternativen kraftschlüssige Verbindung von Gurtschlosskappen mittels der Six Sigma Methode und der statistischen Versuchsplanung. Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Fakultät Technik und Informatik, Department Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau, Hamburg, 2010

[IMATH4] Timischl W., Kaiser G.: Ingenieur-Mathematik 4, Dorner-Verlag, E.Dorner GmbH., Wien, 2001

9 Linkverzeichnis

[1] <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/produkt-und-prozessgestaltung/ueberblick-richtlinien/>, Datum des Zugriffs 17.10.2015, 15:22 Uhr

[2] <http://www.swiss-composite.ch/pdf/i-FVW-Einfuehrung.pdf>,
Datum des Zugriffs 19.06.2016 17:10 Uhr

[3] https://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Publikationen/Download/Documents/MCMS/H_ochtourigeAntriebeText1.pdf,
Datum des Zugriffs 02.11.2015, 10:18

[4] <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19680004493.pdf>,
Datum des Zugriffs 29.11.2015 19:30 Uhr

[5] <http://ikt.rwth-aachen.de/assets-www/files/Downloads/KL1/V01%20-%20Anforderungsermittlung.pdf>,
Datum des Zugriffs 10.01.2015, 15:51

[6] https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydro-wissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/iaa/systemanalyse/studium/folder.2009-01-29.lehre/folder.2009-04-03.at/AT%206.pdf
Datum des Zugriffs 29.03.2016, 14:49

[7] <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/pci/fehlerrechnung.pdf>
Datum des Zugriffs 29.03.2016, 15:05

[8] http://sibel.bg/upl_doc/Polyglass%20H200.pdf
Datum des Zugriffs 03.04.2016, 15:28

[9] http://www.test-gmbh.com/fileadmin/content/produkte/universalpruefmaschinen/zubehoer/Spannmittel_gesamt.pdf
Datum des Zugriffs 24.06.2016, 15:23

[10] <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/normalverteilung.html>
Datum des Zugriffs 28.06.2016, 11:23

[11] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19690010564.pdf>
Datum des Zugriffs 20.10.2016, 11:39