

Beanspruchungsgerechte Gestaltung von Faserformprodukten am Beispiel einer Unterarmorthese

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ulrike Willms

aus Westrhauderfehn

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Willibald Kreis

Mündliche Prüfung:

06. Dezember 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Problemstellung und Zielsetzung.....	3
2.1	Allgemeines.....	3
2.2	Faserformprodukte.....	3
2.3	Faserstoffe.....	6
2.4	Faserformverfahren.....	8
2.5	Bindungsmechanismen im Papier	10
2.6	Orthesen.....	11
2.7	Zielsetzung und Vorgehensweise	12
3	Stand der Technik.....	14
3.1	Faserformverfahren.....	14
3.1.1	Historie des Pappengusses	14
3.1.2	Herstellungsprinzip der Faserformprodukte	22
3.2	Auslegungskriterien für Faserformprodukte.....	33
3.2.1	Allgemeine Auslegungs- und Dimensionierungsvorschriften	33
3.2.2	Auslegungskriterien für Faserformprodukte und Verpackungen.....	34
3.3	Fixationen der oberen Extremität	40
3.3.1	Orthopädietechnische Hilfsmittel	40
3.3.2	Individuelle Stützverbände	42
3.3.3	Patentsituation.....	47
3.4	Zusammenfassende Betrachtung.....	54
4	Untersuchung der auftretenden Belastungen.....	55
4.1	Geometrie und Kinematik.....	55
4.2	Aufbau der Versuchseinrichtung und Versuchsprogramm	60
4.2.1	Beschreibung des Versuchsprogramms und -durchführung	60
4.2.2	Aufbau der Versuchseinrichtung	61
4.2.3	Reihenuntersuchungen	62
5	Faserform-Versuchsanlage.....	65
5.1	Voraussetzungen	65
5.2	Aufbau der Faserform-Versuchsanlage.....	66
5.3	Anformwerkzeug	67
5.4	Presswerkzeugsatz	69
5.5	Nachweis der Funktionsfähigkeit	70

6	Theoretische Grundlagen zu Festigkeit und Steifigkeit.....	73
6.1	Allgemeine Betrachtungen, Begriffsklärung, Bezug zu DIN-Normen	73
6.2	Ermittlung der Werkstoffkennwerte für Biegebelastung.....	79
6.3	Widerstandsmomente, Zusammenhang Zug-Druck und Biegung.....	84
6.4	Berechnung der Biegelinie für den Vierpunkt-Versuch.....	90
6.5	Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung und -auswertung.....	92
6.6	Einfluss von Pressvorgängen auf die Belastbarkeit	92
7	Beschreibung der Versuchseinrichtungen	98
7.1	3-D-Scanner zur Erfassung der Geometriedaten	98
7.1.1	Allgemeines.....	98
7.1.2	Kalibrierung der Messeinrichtung.....	102
7.2	Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung für Flachproben	109
7.3	Vorrichtung zur Ermittlung des Pressverhaltens	112
7.4	Vierpunkt-Biegeprüfung für Funktionsteile.....	115
8	Versuchsdurchführung	117
8.1	Voraussetzungen.....	117
8.2	Untersuchungen an Flachproben.....	117
8.2.1	Versuchsprogramm	117
8.2.2	Probenparameter.....	118
8.2.3	Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung	123
8.2.4	Versuchsergebnisse	125
8.3	Untersuchungen an Funktionsteilen.....	135
8.3.1	Versuchsprogramm	135
8.3.2	Funktions- bzw. belastungsgerechte Gestaltung der Faserformorthese	136
8.3.3	Versuchsergebnisse der Faserformorthesen	138
9	Gestaltungsregeln	140
10	Zusammenfassung	146
11	Literaturverzeichnis	148

1 Einleitung

Die Dimensionierung von Produkten spielt für deren technische Verwendbarkeit und ihre Zuverlässigkeit eine entscheidende Rolle. Damit die Funktionsfähigkeit gewährleistet werden kann, müssen die Produkte für die jeweilige Belastung zunächst ausgelegt werden, d. h. sie müssen belastungsgerecht gestaltet und hinreichend dimensioniert werden; im Anschluss daran erfolgt die Nachrechnung der Festigkeit und Steifigkeit, beispielsweise in Form des Spannungsnachweises. Zur Auslegung von Maschinenelementen, Bauteilen, Produkten o. ä. müssen zum einen die wirkenden Belastungen und zum anderen die Werkstoffkennwerte des eingesetzten Materials bekannt sein. Oftmals wird diese Dimensionierung nur überschlägig durchgeführt, was häufig eine Überdimensionierung zur Folge hat. Vorteile dieser Vorgehensweise sind eine höhere Sicherheit und ein geringerer Berechnungsaufwand, jedoch ist ein größerer Materialeinsatz und damit verbunden ein höheres Gewicht vorhanden. Eine einwandfreie Dimensionierung mit entsprechender Berechnung setzt dagegen die Kenntnis entsprechender Dimensionierungsvorschriften voraus.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Werkstoffeigenschaften von Faserformprodukten untersucht, um für diesen Bereich geeignete Werkstoffkennwerte zur Auslegung und Nachrechnung dieser Produkte zu bekommen. Faserformprodukte sind dreidimensionale Formkörper, die aus Papierstoffen hergestellt werden. Der größte Anwendungsbereich liegt zur Zeit bei Verpackungen. Für die Untersuchung von Packmitteln und Packhilfsmitteln gibt es zahlreiche Prüfverfahren, z. B. die Kantenstauchprüfung, die Berstprüfung und die Untersuchung des Stapelstauchwiderstands. Charakteristisch ist, dass die dabei ermittelten Kennwerte auf das fertige Produkt bzw. ein Halbzeug, nicht jedoch auf dessen Werkstoff bezogen sind. Ein Ansatz für eine Kenngröße, die auch zur Auslegung genutzt werden kann, ist die breitenbezogene Steifigkeit. Hierbei handelt es sich um einen Kennwert für das Halbzeug, beispielweise Wellpappe. Alle genannten Kennwerte können nur die Eignung des Packmittels für die speziell geprüfte Eigenschaften und die dabei vorhandenen Belastungen sowie unter Beachtung der jeweiligen Prüfbedingungen erfassen. Die Auslegung und Nachrechnung einer beliebigen Verpackung ist hiermit nicht möglich: Beispielsweise kann mittels Falltests ein Packmittel auf das zu verpackende Produkt (Packgut) abgestimmt werden; die ermittelten Ergebnisse können aber nicht ohne weiteres auf andere Packmittel übertragen werden.

Sollen Faserformprodukte auch für technische Anwendung außerhalb des Verpackungsbereichs eingesetzt werden können, sind entsprechende Werkstoffkennwerte unerlässlich. Zu diesen Größen zählen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte, insbesondere die ertragbaren Spannungen und der Elastizitätsmodul. Gelingt es, diese Kennwerte zu ermitteln, können sie auf andere Anwendungsfälle weitgehend problemlos, d. h. ohne Einbeziehung von Randsystemen, übertragen werden.

Im Idealfall lassen sich Kennwerte, die eine Aussage über die Steifigkeit und Festigkeit des eingesetzten Werkstoffes unter definierten Belastungen angeben, unabhängig von der jeweiligen Geometrie bestimmen und sind dann auf Bauteile beliebiger Größe und Gestaltung zu übertragen. Real ist dies nicht der Fall, so dass beispielsweise baugrößenabhängige Beeinträchtigungen der Festigkeit durch Größenfaktoren berücksichtigt werden; konstruktive Kerben werden durch Kerbfaktoren erfasst. Die Ermittlung dieser Werte setzt umfangreiche Untersuchungen und ggf. aufwändige theoretische Betrachtungen voraus.

tungen, wie FEM-Berechnungen o. ä., voraus. Die Untersuchung dieser Kenngrößen ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die Werkstoffkennwerte unter idealen Randbedingungen bereits bekannt sind, was bei Faserformprodukten nicht der Fall ist.

Die beschriebene Problematik soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden. Hiermit soll erstmalig versucht werden, Werkstoffkennwerte für Faserformprodukte zu ermitteln. Es ist dabei grundsätzlich erforderlich, den Umfang so zu begrenzen, dass eine sinnvolle Bearbeitung erfolgen kann. Aus diesem Grunde sollen Kennwerte an Proben ermittelt werden, und es soll überprüft werden, inwieweit sich diese Größen auf reale Bauteile übertragen lassen. Hierzu ist ein geeigneter Anwendungsfall zu finden.

Für die vorliegende Arbeit soll als praktischer Anwendungsfall eine Unterarmorthese gewählt werden. Grundgedanke ist dabei, ein Produkt, das zur Zeit hauptsächlich aus Duroplasten hergestellt wird, durch ein erheblich umweltverträglicheres Faserformprodukt zu ersetzen.

Die betrachtete Orthese wird im wesentlichen auf Biegung belastet. Folglich ist es sinnvoll, die Biegefestigkeit und den Biege-Elastizitätsmodul des Faserformwerkstoffs zu ermitteln. Diese Werte sollen zunächst an definierten Werkstoffproben gemessen werden. Zu beachten ist dabei, dass stets nur eine Kombination aus Festigkeit, Größenbeiwert, Oberflächenbeiwert und Kerbfaktor ermittelt werden kann, nicht jedoch jede dieser Kenngrößen einzeln. In einem nächsten Schritt soll daher geprüft werden, ob bei realen Bauteilen, im vorliegenden Fall also bei den Unterarmorthesen, vergleichbare Größen vorliegen.

Die Eigenschaften von Faserformprodukten unterliegen beispielsweise abhängig vom eingesetzten Material, vom Herstellprozess und von der Luftfeuchtigkeit großen Schwankungen. Bei der Ermittlung der Kennwerte ist daher auch der Einfluss des Herstellungsprozesses und der sonstigen Randbedingungen mit zu berücksichtigen. Insbesondere können die Festigkeit und die Steifigkeit der Faserformprodukte durch die Rohstoffauswahl, den Anformvorgang und durch nachgeschaltete Pressvorgänge besonders stark beeinflusst werden. Folglich sollen die bei Herstellung der Bauteile vorliegenden Parameter soweit wie möglich erfasst und bei den Untersuchungen mit einbezogen werden.

Ziel der Untersuchungen soll insgesamt sein, allgemeingültige und auf beliebige Bauteile übertragbare Kenngrößen für Faserformbauteile unter Biegebelastung zu bestimmen. Hierdurch soll es erstmalig ermöglicht werden, entsprechende Faserformteile nach den im Maschinenbau üblichen Vorgehensweisen zu konstruieren, d. h. zunächst überschlägig zu dimensionieren und nach erfolgreicher Gestaltung den entsprechenden Spannungsnachweis zu führen.

2 Problemstellung und Zielsetzung

2.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit werden am Beispiel von Unterarmorthesen, die aus pflanzlichen Rohstoffen hergestellt werden, Kennwerte für die Auslegung und Berechnung von Faserformprodukten ermittelt. Diese Unterarmorthesen sollen für medizinische Anwendungen eingesetzt werden; sie dienen beispielsweise zur postoperativen Ruhigstellung des Handgelenks. Im Gegensatz zum Stand der Technik sollen diese Orthesen mit Hilfe des Faserformverfahrens hergestellt werden. Für diese Orthesen sollen die während der Verwendung wirkenden Belastungen ermittelt werden, und die Produkte sollen durch entsprechende belastungsgerechte Gestaltung optimiert werden. Aus den gewonnenen Ergebnissen sollen allgemeingültige Gestaltungs- bzw. Berechnungsvorschriften für Faserformteile abgeleitet werden.

Zur Durchführung der erforderlichen Untersuchungen müssen entsprechende Unterarmorthesen nach dem Faserform- bzw. Fasergussverfahren hergestellt werden. Dies erfordert den Aufbau einer Faserform-Versuchsanlage sowie der entsprechenden Formwerkzeuge. Zur Ermittlung der wirkenden Kräfte und Momente im Handgelenk muss ebenfalls eine entsprechende Versuchseinrichtung entwickelt und aufgebaut werden. Mit Hilfe dieser Belastungsvorrichtung sollen darüber hinaus die Unterarmorthesen geprüft und ihre Belastungsgrenzen ermittelt werden. Basierend auf den ermittelten Kennwerten der Unterarmorthesen ist die belastungsgerechte Gestaltung sowie die Ermittlung und Bestimmung der spezifischen Faserformkennwerte vorzunehmen. Hierdurch sollen soweit wie möglich Berechnungsgrundlagen sowie Gestaltungsregeln für Faserformprodukte geschaffen werden.

2.2 Faserformprodukte

Diese Produkte werden nach dem Faserformverfahren aus chemisch oder mechanisch gewonnenen Halbstoffen aus Holz, Altpapier oder einer Mischung hieraus hergestellt. Neben diesen Faserstoffen sind weitere Füll- und Hilfsstoffe denkbar, z. B. zur Färbung, zur Imprägnierung o. ä. Als Halbstoffe bzw. als Papierfaserstoff werden Fasermaterialien, meist pflanzlichen Ursprungs, bezeichnet, die durch verschiedene Verfahren zu Papier und Pappe verarbeitet werden können, vgl. DIN 6730 /DIN00a/. Außer den Halbstoffen aus Holz sind in /DIN00a/ weiterhin Halbstoffe aus Einjahrespflanzen, Getreidestroh, Hadern sowie Halbzellstoff und halbgebleichter Halbstoff benannt.

In früherer Zeit wurden Faserformprodukte zunächst als Verpackungen für Lebensmittel, wie z. B. Obst, Gemüse, Früchte und Eier, verwendet. Aufgrund vieler Vorteile dieser Produkte wurde später der Einsatz auf Verpackungen für technische Produkte erweitert: Faserformprodukte sind z. B. umweltverträglich und in vieler Hinsicht logistik-, verkaufs- und entsorgungsgerecht konzipiert. Bei den Faserformprodukten handelt es sich häufig um Verpackungsteile, die zur Lage- und Transportfixierung der zu verpackenden Produkte eingesetzt werden. Teilweise ersetzen sie die bisher eingesetzten Verpackungen aus Polystyrol (EPS) oder auch aus Wellpappe. **Bild 2.1** zeigt links und in der Mitte eine Tonerkartusche, die Verpackungsteile aus Faserform aufweist. Wettbewerbsprodukte der Faserformverpackungen stellen z. B. Verpackungen aus Wellpappe dar, siehe **Bild 2.1** rechts.



Bild 2.1: Tonerkartusche in Faserformverpackung (links und Mitte) und in Wellpappenverpackung (rechts)

Im Gegensatz zu Anwendungen, bei denen die Faserformverpackungen direkt als Verkaufsverpackung eingesetzt werden können, wird im dargestellten Anwendungsfall die Tonerkartusche noch von einer Transportverpackung, beispielsweise einem Karton, umschlossen. Dieser Karton besteht meistens aus gefalteter Wellpappe. Als Beispiel hierfür ist in **Bild 2.1** Mitte die aufgeschnittene Tonerverpackung dargestellt. Die Wellpappe weist Aussparungen und Laschen auf, die ineinander greifen und somit die Teile verbinden. Zur Herstellung der Verpackung wird die Wellpappe entsprechend zugeschnitten und gefaltet. Das Falten der Wellpappe, das der Herstellung der dreidimensionalen Geometrie dient, wird als Aufrichten bezeichnet und erfolgt in der Regel manuell.

Bild 2.1 zeigt rechts eine aufgerichtete Verpackung aus Wellpappe. Der Vorteil dieser Verpackung besteht darin, dass sie relativ schnell und einfach aus einem ebenen Halbzeug hergestellt werden kann. Die Herstellung einer entsprechenden Faserformverpackung ist dagegen erheblich aufwändiger. Die Faserformverpackung ist allerdings exakter auf das zu verpackende Produkt abzustimmen und weist bereits die dreidimensionale Geometrie auf. Folglich entfällt das personal- und kostenintensive Aufrichten gegenüber den flach angelieferten Zuschnitten aus Wellpappe.



Bild 2.2: Gegenüberstellung von Verpackungsteilen aus Polystyrol (EPS) und Faserform

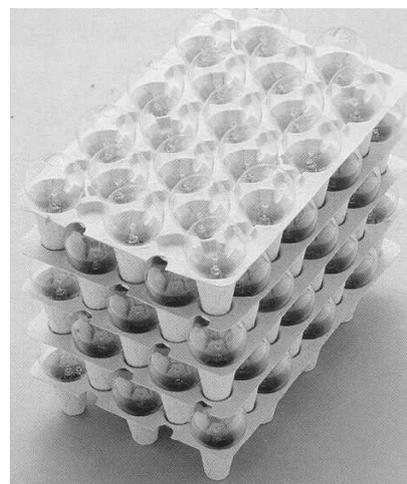


Bild 2.3: Befüllte und gestapelte Faserformverpackungsteile /HAR/

Bild 2.2 zeigt jeweils eine Styropor- und eine Faserformverpackung für Tuben, z. B. für Senf, Tomatenmark o. ä. Sie wird direkt als Verkaufsverpackung eingesetzt. Aufgrund der geringen Wandstärke und der vorgesehenen Neigungen lassen sich die Verpackun-

gen platzsparend ineinander stapeln, d. h. sie sind nestfähig. Oftmals können sowohl die leeren als auch die befüllten Faserformverpackungen gestapelt werden, siehe **Bild 2.3**. Dieser Vorteil wird besonders deutlich im Vergleich zu den großvolumigen Teilen aus EPS.

Die in **Bild 2.2** und **2.3** dargestellten Faserformverpackungen weisen eine bessere Oberflächenqualität auf als die Verpackung für Tonerkartuschen, siehe **Bilder 2.6, 2.7**. Dies liegt daran, dass die Verpackung in einem anschließenden Pressprozess auf beiden Seiten geglättet worden ist. Folglich lassen sich die Verpackungen besser stapeln und beanspruchen daher weniger Platz für die Lagerhaltung. Aufgrund der Verwendung von recyclingfähigen Materialien entstehen bei Faserformprodukten geringere Entsorgungskosten im Vergleich zu den Materialien aus Kunststoffen.

Bei der Betrachtung der Faserformprodukte sind die charakteristischen Merkmale, die durch das Herstellungsverfahren hervorgerufen werden, sofort erkennbar. Die nach dem Faserformverfahren hergestellten Produkte zeichnen sich durch eine relativ glatte, von einer Siebstruktur geprägte Seite, siehe **Bild 2.4**, und durch eine mehr oder weniger unregelmäßig geformte, zerklüftete und unstrukturierte Seite aus, siehe **Bild 2.5**. In den vergrößert dargestellten Ausschnitten, **Bild 2.6** und **Bild 2.7**, sind die charakteristischen Merkmale deutlicher zu erkennen.

Faserformprodukte besitzen meist eine Dicke von einigen wenigen Millimetern (ca. 1 mm bis 5 mm). Die Oberflächenqualität ist abhängig von den gestellten Anforderungen an das Produkt und den damit verbundenen nachfolgenden Bearbeitungsschritten.

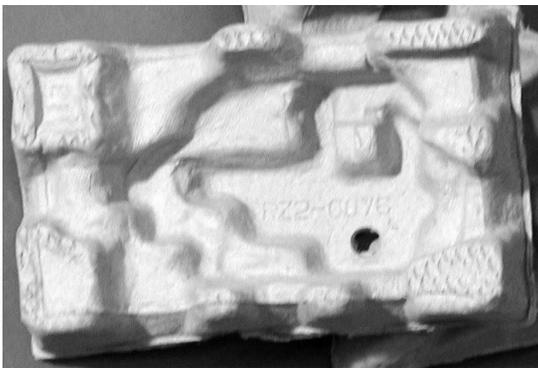


Bild 2.4: Siebseite

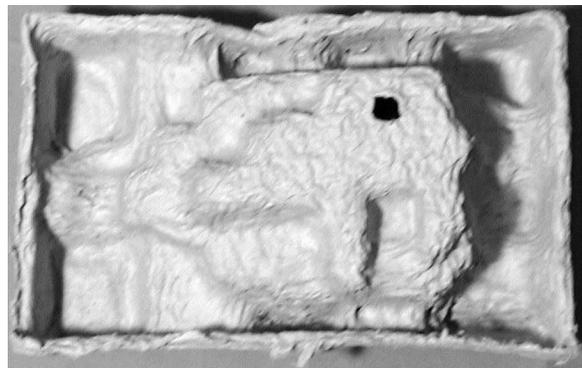


Bild 2.5: Sieb-abgewandte Seite

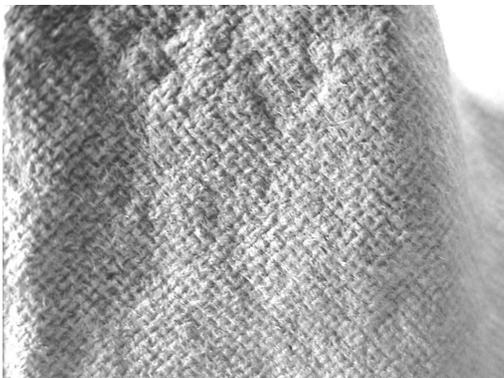


Bild 2.6: Ausschnitt aus der Siebseite

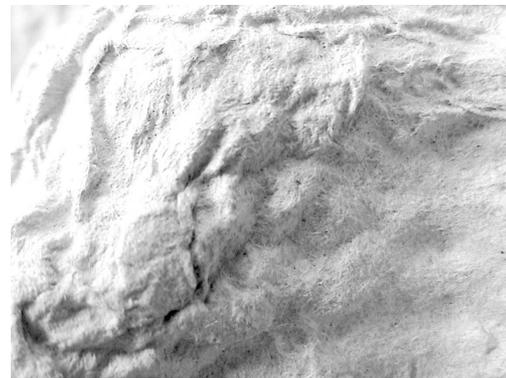


Bild 2.7: Ausschnitt aus der Sieb-abgewandten Seite

Die glatte, durch die Siebmarkierung gekennzeichnete Seite wird oftmals für das Bedrucken bzw. Bekleben genutzt, und die unregelmäßig geformte, unstrukturierte Seite ist

den zu verpackenden Produkten zugewandt. Bei der Tonerkartusche sind die Ansprüche an die Genauigkeit, die zur Fixierung der Tonerkartuschen in der Faserformverpackung erforderlich sind, relativ hoch, daher wird hier die glatte, siebstrukturierte Seite dem zu verpackenden Produkt zugewandt. In diesem Fall werden gar keine Ansprüche an die dem Produkt abgewandte Seite gestellt; die Produktinformationen werden auf den umschließenden Karton aufgedruckt. Welche Seite dem zu verpackenden Produkt zugewandt wird, ist abhängig von den gestellten Anforderungen.

2.3 Faserstoffe

Die beschriebenen charakteristischen Merkmale beruhen auf dem Herstellungsprinzip. Aufgrund der Tatsache, dass als Rohstoff ebenso wie bei der Papierherstellung pflanzliche Fasern eingesetzt werden, ist der Aufbau einer Faserformanlage prinzipiell der Papiermaschine sehr ähnlich. Zur Rohstoffgewinnung können Primärstoffe, z. B. Holz und Einjahrespflanzen, oder Sekundärstoffe, insbesondere Altpapier, eingesetzt werden. **Bild 2.8** zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Faserstoffe, die zur Papier- und Pappenerzeugung grundsätzlich eingesetzt werden können.

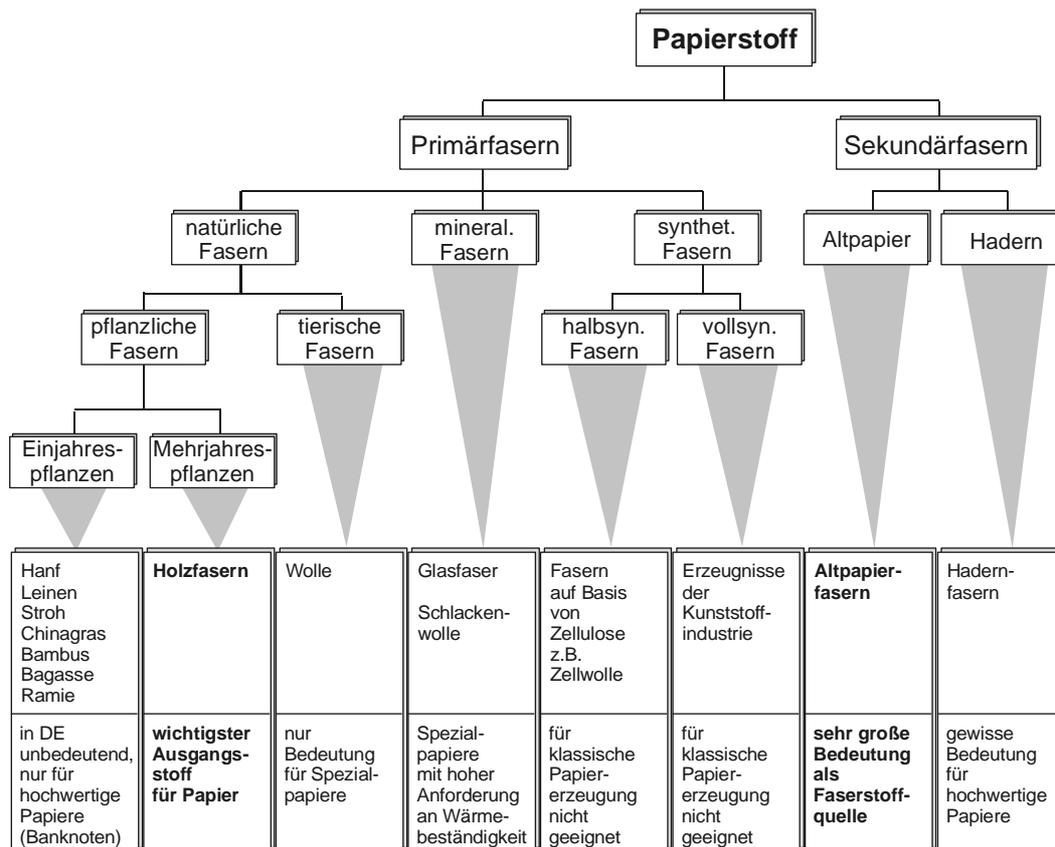


Bild 2.8: Faserstoffe der Papierindustrie /KAI00/

Die Gewinnung der Primärstoffe erfolgt durch den chemischen oder mechanischen Aufschluss der Fasern. **Bild 2.9** zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Aufschlussverfahren. Chemisch gewonnene Rohstoffe werden als Zellstoff, mechanisch gewonnene Rohstoffe als Holzstoff oder Holzschliff bezeichnet, siehe **Bild 2.10**.

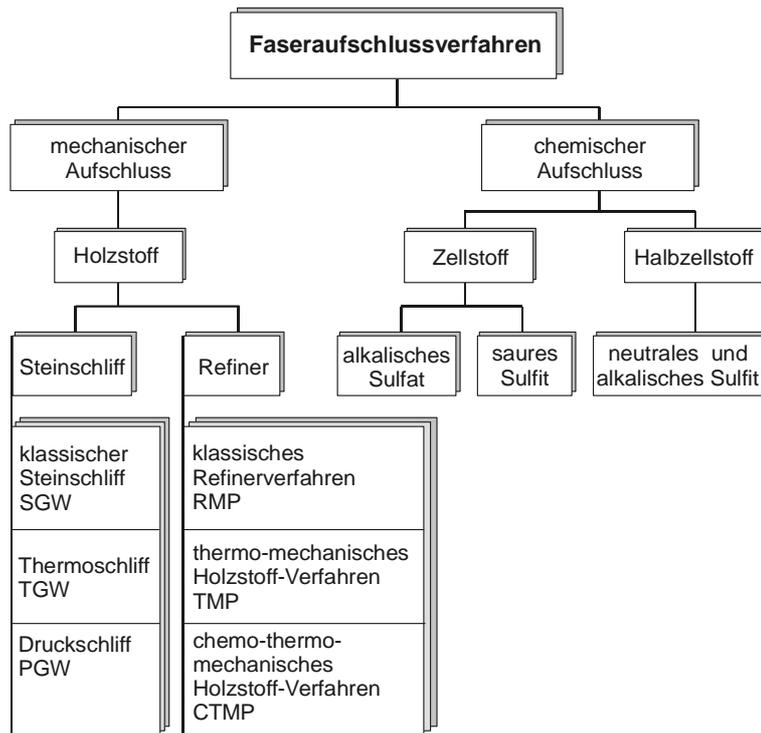


Bild 2.9: Aufschlussverfahren für Primärfasern (nach /KAI00/)

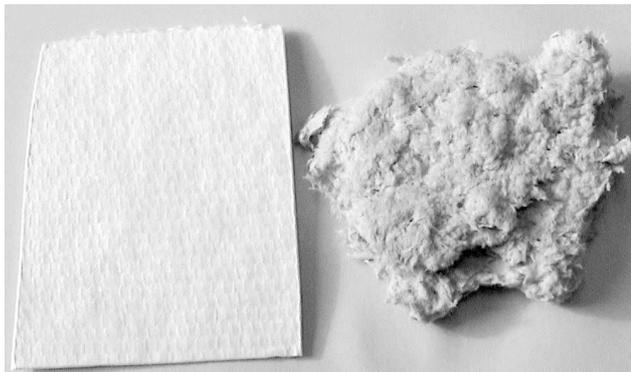


Bild 2.10: Zellstoff links, Holzstoff rechts



Bild 2.11: Vergrößerte Ausschnitte

Die Zellstoffbogen (z. B. 845 x 760 mm) werden in Ballen verpackt und versandt. Die Bestimmungen über das Handelsgewicht von Zellstoffbogen in Ballen sind in DIN EN ISO 801-1 /DEI96b/ festgelegt. Der Trockengehalt der Zellstoffprobe wird in % angegeben. Der Trockengehalt eines versandfertigen Zellstoffbogens beträgt ca. 80 – 90 % o/ro, d. h. 80 bzw. 90 Massenanteile sind ofentrockene Fasern und 20 bzw. 10 Massenanteile Wasser.

Bild 2.11 zeigt links vergrößerte Teilbereiche des Zellstoffes; auch hier sind Markierungen zu erkennen, die ebenfalls durch den Herstellprozess bedingt sind. Zellstoff wird kaum noch in Deutschland produziert; dagegen wird der in **Bild 2.11** rechts vergrößert dargestellte Holzstoff oftmals direkt in den Papierfabriken hergestellt. Dieses Material hat üblicherweise einen Trockengehalt von ca. 35 %.

Der Begriff Trockengehalt einer Zellstoffprobe ist in DIN 6730 /DIN00a/ definiert; er gibt das Verhältnis der getrockneten Masse zur Masse der nassen Probe in Prozent an. Die Bestimmung des Trockengehaltes ist in DIN EN 20 638 /DEN93a/ genormt. Die

ofentrockene Masse eines Werkstoffs ist die Masse, die nach Trocknung bei (105 ± 2) °C im Wärmeschrank vorliegt, siehe /DIN00a/. Zur Bestimmung der Stoffdichte nach DIN EN ISO 4119 /DEI96a/ muss ebenfalls die Trockenmasse der Probe bestimmt werden; die entsprechende Durchführung ist in /DEI96a/ genormt.

Als Sekundärstoffe werden alle Stoffe bezeichnet, die bereits den Papierherstellungsprozess durchlaufen haben. Im Gegensatz zur Papierherstellung werden beim Faserformverfahren dreidimensionale Produkte hergestellt, und als Rohstoff wird oftmals 100 % Altpapier eingesetzt.

Zur Herstellung des Rohstoffes wird das Ausgangsmaterial (Zellstoff, Holzstoff, Altpapier) in einer wässrigen Fasersuspension aufgelöst. Die Stoffdichte der Fasersuspension beträgt beim Einsatz in Papiermaschinen ca. 0,1 bis 1,5 % /GÖT90/, beim Faserformverfahren ist die Stoffdichte meistens höher; sie liegt bei ca. 1 bis 5 %. Die Bestimmung der Stoffdichte ist in /DEI96a/ genormt; nach dieser Internationalen Norm wird die Stoffdichte als Massenanteil in Prozent angegeben [% (m/m)]. Eine einprozentige Fasersuspension enthält 1 kg ofentrockenes Material auf 99 kg Wasser (1 Teil Faserstoff und 99 Teile Wasser ergeben die Fasersuspension). Die Stoffdichte ist das Verhältnis der Trockenmasse (ofentrocken) zur Masse der Faserstoffsuspension (siehe DIN EN ISO 4119).

2.4 Faserformverfahren

Im Gegensatz zu Faserformprodukten ist das Faserformverfahren, das zur Herstellung dieser Produkte dient, relativ unbekannt. Es ist prinzipiell dem Verfahren zur Papierherstellung ähnlich. Beim Faserformverfahren können die gleichen Faserstoffe eingesetzt werden, die auch für die Papierherstellung geeignet sind. Die Aufbereitung der Faserstoffe ist vom eigentlichen Fertigungsprozess unabhängig und somit von der Faserformanlage getrennt. Beide Verfahren beinhalten die Verfahrensschritte Bildung des Faserproduktes, Pressen und Trocknen. Der wesentliche Unterschied zur Papierherstellung ist der Anformprozess, der zur Bildung des Faserproduktes dient. Während bei der Papierherstellung das Produkt auf einem umlaufenden Sieb gefertigt wird, wird zur Bildung der Faserformprodukte eine entsprechende Form benötigt, die der Form des herzustellenden Produktes entspricht. Entgegen der Papierherstellung handelt es sich bei Faserformprodukten um dreidimensionale Produkte, deren dritte Dimension bis zu 200 mm und mehr aufweisen kann.

Aus der wässrigen Fasersuspension wird bei der Papiermaschine das Papier und beim Faserformverfahren das gewünschte dreidimensionale Faserformteil hergestellt. Sollen Faserformprodukte erstellt werden, muss zunächst die Geometrie festgelegt werden. Hierauf basierend wird ein entsprechendes Anformwerkzeug entwickelt, das die gewünschte 3D-Kontur aufweist. Dieses Anformwerkzeug wird auf der Faserformanlage aufgebaut und beim Anformvorgang von dieser in einen Behälter mit der gelösten Fasersuspension eingetaucht. Damit sich die hierin gelösten Fasern an der Oberfläche des Anformwerkzeuges anlagern können, müssen sie aus der Fasersuspension herausgelöst werden. Somit müssen die Anformwerkzeuge konstruktiv wasserdurchlässig und faserundurchlässig gestaltet werden, d. h. es muss eine Siebfunktion gewährleistet sein, siehe **Bild 2.12**. Zur Erfüllung dieser Siebfunktion wird ein handelsübliches Drahtgewebe

verwendet; zur Aufnahme der wirkenden Kräfte wird das Sieb durch einen entsprechend geformten und mit Löchern versehenen Grundkörper unterstützt.



Bild 2.12: Prinzipieller Aufbau eines Faserformwerkzeuges

Die Anlagerung der Fasern an der Siebseite des Anformwerkzeuges wird durch das Aufbringen einer Druckdifferenz zwischen Werkzeugoberfläche und -innenraum erreicht. Üblicherweise erfolgt dieses durch Anlegen eines Unterdrucks („Vakuum“) an der Werkzeuginnenseite. Durch die Anlagerung der Fasern wird das nasse Faserformprodukt gebildet, und die Fasern bzw. das Faserformprodukt erhalten den Abdruck des verwendeten Siebes. Nach dem Anformprozess wird das Anformwerkzeug mit dem angelagerten, noch nassen Faservlies aus dem Behälter herausgenommen. Die Abnahme dieses nassen Faservlieses vom Anformwerkzeug erfolgt meistens mit einem entsprechend geformten Oberwerkzeug.

Die Trocknung erfolgt in einem Trocknungsofen und/oder in beheizten Trocknungswerkzeugen. Die Trocknungs- und Pressprozesse sind abhängig von der gewünschten Oberflächenqualität des fertigen Faserformproduktes. **Bild 2.13** zeigt eine Faserformanlage, wie sie beispielsweise von der Firma Markhorst, Niederlande, gebaut und vertrieben wird. Die dargestellte Faserformanlage enthält eine Anformstation und drei beheizte Presswerkzeuge. Verfahrbare Oberwerkzeuge transportieren das Faserformprodukt jeweils zur nächsten Station. Das fertige Faserformprodukt hat einen Trocknungsgehalt von ca. 98 % otro. Sowohl Faserformprodukte als auch Papier haben keinen konstanten Feuchtigkeitsgehalt, vielmehr ändert sich dieser abhängig von der Papiersorte und von den regionalen Klimabedingungen. Darüber hinaus ist eine geringe Feuchtigkeit für die Festigkeitseigenschaften von Bedeutung.

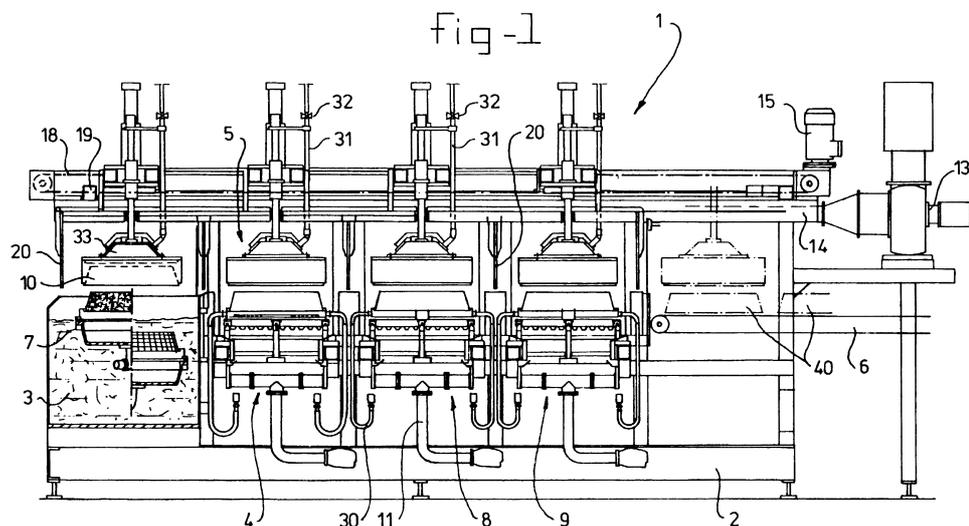


Bild 2.13: Faserformanlage mit drei nachfolgenden Pressstationen /MAR98/

2.5 Bindungsmechanismen im Papier

Die hohe Festigkeit erhält das Papier aufgrund der chemischen Bindungen zwischen Wasser und Zellulose, die durch sogenannte Wasserstoffbrücken hervorgerufen werden. Wasserstoffbrücken sind überall im Wasser vorhanden und entstehen aufgrund der Anziehungskraft von benachbarten Wassermolekülen, indem das elektrisch positiv geladene Wasserstoffatom (H^+) des einen das elektrisch negativ geladene Sauerstoffatom (O^-) des anderen Wassermoleküls anzieht. Bei Papier bilden sich diese Wasserstoffbrücken zwischen den Wasserstoffatomen des Wassers und den Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) der im Rohstoff vorhandenen Zellulosemoleküle. Diese Zellulosemoleküle sind Kettenmoleküle, deren „Kettenglieder“ aus Glucoseeinheiten gebildet werden, die jeweils OH-Gruppen besitzen. Die OH-Gruppen des Zellulosemoleküls sind im **Bild 2.14** fett dargestellt. Je wässriger die Fasersuspension ist, desto geringer sind die Bindungskräfte der Wasserstoffbrücken und desto geringer ist somit die Festigkeit des Papiers. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Bindungen im Wasser jederzeit wieder auflösen lassen, ist der Vorgang der Wasserstoffbrückenbildung reversibel; diese Tatsache bedingt die Recycelfähigkeit des Papiers. **Bild 2.14** zeigt schematisch die Struktur eines Zellulosemoleküls, wie es in der wässrigen Fasersuspension enthalten ist.

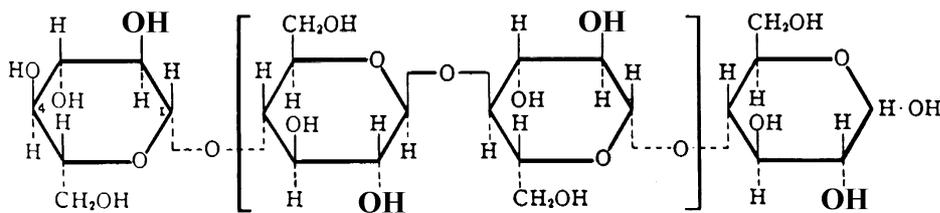


Bild 2.14: Struktur eines Zellulosemoleküls schematisch dargestellt /GÖT90/

Eine sehr wässrige Fasersuspension zeigt **Bild 2.15**. Zwischen den OH-Gruppen des Zellulosemoleküls (im Randbereich) sind noch mehrere Wassermoleküle vorhanden, die untereinander Wasserstoffbrücken zwischen den Fasern bilden; daher sind die Bindungskräfte dieser wässrigen Fasersuspension sehr gering. Dagegen sind in **Bild 2.16** die Wasserstoffbrücken bereits reißverschlussartig zum Zellulosemolekül angeordnet; sie sind nur durch eine monomolekulare Wasserschicht voneinander getrennt, wodurch die Bindungskräfte wesentlich stärker ausgeprägt sind. Das Vorhandensein von Wasser ist somit für die Festigkeit des Papiers von entscheidender Bedeutung; ca. 5 – 10 % der Gewichtsanteile des Papiers sind Wasser /GÖT90/.

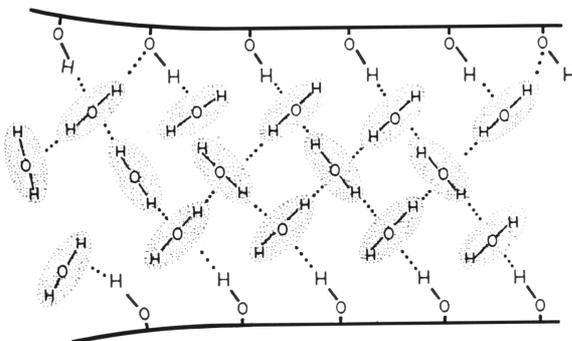


Bild 2.15: Wässrige Fasersuspension /GÖT90/

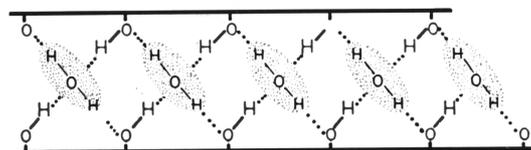


Bild 2.16: Getrocknete Papierbahn /GÖT90/

2.6 Orthesen

Orthesen sind technische Hilfsmittel der Orthopädie; sie werden zur Unterstützung des Heilungsprozesses eingesetzt. Sie finden beispielsweise bei Störungen des Bewegungsapparates Verwendung und dienen zur Ruhigstellung von verletzten Körperteilen. Die Ursachen für die Ruhigstellung könnten z. B. die Heilung von Wunden nach einer Operation oder bei Entzündungen, die Linderung von Wundschmerzen oder die konservative Behandlung von Knochenbrüchen sein, d. h. also nichtoperative Behandlungen. Zur Gewährleistung der Feuchtigkeitsaufnahme und des Wärmeaustausches werden Orthesen üblicher Weise zusätzlich mit Polstermaterial versehen. Darüber hinaus sollen durch die Polsterung lokale Druckstellen vermieden werden.

Die Orthesen werden mitsamt Polstermaterial von außen an die vorhandenen Körperbereiche angepasst und mit einem entsprechenden Stützverband an den Gliedmaßen fixiert. Hieraus resultiert auch die Bezeichnung „orthopädisches Passteil“. Auf diese Weise unterstützen die Orthesen die Funktion der fehlenden statischen und/oder dynamischen Körperfunktionen. Bei auftretenden Belastungen ist nicht eindeutig feststellbar, welcher Anteil vom vorhandenen Körperteil und welcher von der Orthese übernommen wird. Die Bestimmung der auftretenden Belastungen ist somit schwierig. Im Gegensatz zu Orthesen ersetzen Prothesen fehlende Körperteile und übernehmen somit die Gesamtfunktion des fehlenden Körperteils; sie müssen daher für die volle Belastung ausgelegt werden. Prothesen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet. Orthesen werden in aktive und passive Orthesen unterteilt. Aktive Orthesen werden für die Bewegung eingesetzt, passive dienen zur Lagerung und Korrektur.

Bei den im Rahmen der durchzuführenden Untersuchungen zu betrachtenden Unterarmorthesen handelt es sich um passive Gliedmaßenorthesen, die z. B. zur Ruhigstellung des Handgelenks eingesetzt werden sollen. Dabei soll das Handgelenk beispielsweise während eines Heilungsprozesses immobilisiert werden. Die Tragdauer einer derartigen Orthese ist abhängig von der Erkrankung und liegt im Bereich von einigen Wochen oder auch Monaten. Während dieser Zeit muss sie ständig getragen werden, abgesehen von Verbandswechsels bei Kontrolluntersuchungen o. ä. Die für diesen Anwendungsfall eingesetzten Orthesen müssen das Bewegungsmaß im Handgelenkbereich möglichst vollständig einschränken, daher müssen derartige Orthesen starr und gelenklos aufgebaut sein.

Die derzeit für diesen Anwendungsfall eingesetzten Orthesen werden entweder vollständig aus formbaren Materialien individuell an das jeweilige Handgelenk anmodelliert oder aus bereits vorgefertigtem Schienenmaterial, z. B. aus Aluminium (z. B. Böhlerschienen) oder Drahtgeflechschienen (sogenannte Cramerschienen), an die jeweiligen Gliedmaßen und Körperformen angepasst. Bei den individuell gefertigten Schienen kommen Materialien wie Gips oder synthetische Stützverbände aus Materialien wie Polyester-, Polypropylen- und Fiberglasgewebe zum Einsatz. Während der Aushärtphase dieser Materialien wird Wärme frei, und während dieser Zeit muss der Patient die verletzten Gliedmaßen ruhig halten. Nach der Aushärtung sind keine Korrekturen mehr möglich.

Die im Rahmen der durchzuführenden Untersuchungen zu entwickelnde Orthese soll diese Nachteile beheben, indem sie für eine definierte Gruppe auf die körperbezogenen Formen und Abmessungen abgestimmt wird. Hierdurch ist es möglich, eine vorgefertig-

te, standardisierte und lagerungsfähige Orthese für den Unterarm herzustellen. Folglich muss die Schiene nur noch an die Gliedmaßen angelegt und mit einem Stützverband an den Gliedmaßen fixiert werden. Diese Unterarmorthesen sollen nach dem Faserformverfahren hergestellt und durch entsprechende Untersuchungen belastungsgerecht optimiert werden. Derzeit sind keine Orthesen bekannt, die nach dem Faserformverfahren hergestellt werden. Gegenüber bestehenden Produkten können sie jedoch mittels des Faserformverfahrens kostengünstiger und umweltfreundlicher als bisher hergestellt werden. Darüber hinaus können sie umweltschonend und kostengünstig wieder entsorgt werden.

Aufgrund des verwendeten Rohstoffes Papier ist die Schiene sehr umweltfreundlich und kann mit einer Verbandsschere geringfügig zugeschnitten und dann angepasst werden. Diese Schiene bietet einerseits hohe Stabilität bei geringem Materialverbrauch, und andererseits ist sie elastisch genug, um sich im Randbereich optimal an die jeweilige Körperform anzupassen. Durch die belastungsgerechte Gestaltung der Faserform-Unterarmorthese hat sie ein geringes Gewicht; dies verspricht einen höheren Tragkomfort für den Patienten. Darüber hinaus lässt sie sich wesentlich schneller applizieren, und im Gegensatz zu den herkömmlichen Schienen sind hierfür keine zusätzlichen Hilfsmittel erforderlich. Außerdem entsteht bei der Verarbeitung eine wesentlich geringere Menge an Schmutz. Nach der Versorgung kann die Schiene sofort belastet werden. Der angelegte Verband kann jederzeit wieder für Korrekturen o. ä. gelöst und neu angelegt werden. Durch die hier genannten Vorteile lässt sich die Belastungen der Patienten während der Versorgung der Extremität auf ein Minimum reduzieren. Im Alltag macht sich das geringere Gewicht deutlich bemerkbar und erhöht den Tragkomfort im Gegensatz zu den anderen Orthesen deutlich; es verbessert so die krankheitsbezogene Lebensqualität. Durch die bessere Atmungsaktivität sowie das bessere hygroskopische Verhalten, d. h. die Möglichkeit der Feuchtigkeitsaufnahme durch die Schiene, wird der Juckreiz an der Haut sowie die Mazeration, d. h. das Aufquellen bzw. das Erweichen der Haut, im Wesentlichen vermieden. Bei der Röntgenkontrolle ist aufgrund der besseren Strahlentransparenz der neuartigen Orthese eine wesentlich geringere Strahlendosis erforderlich. Hierdurch wird die Strahlenbelastung der Patienten wesentlich reduziert.

Die Behandlungsdauer, die für die Versorgung der Extremität erforderlich ist, wird durch die schnellere Applikation deutlich reduziert. Dies wird durch die Verwendung der vorgefertigten, auf die Körperform bereits abgestimmten Schiene erreicht; hierdurch fällt das Anpassen und ggf. Aushärten des Materials weg, was zu einer deutlichen Reduzierung von Arbeitszeiten und ggf. Wartezeiten führt. Weiterhin muss das medizinische Hilfspersonal nur wenig Routine beim Anlegen der Schiene aufweisen. Auch die Entfernung der angelegten Materialien nach dem Heilungsprozess ist wesentlich einfacher und schneller realisierbar. Bedingt durch diese Vorteile ergeben sich erhebliche Kostenreduzierungen, die sowohl behandelnden Ärzten als auch Krankenkassen und Patienten zugute kommen können.

2.7 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zur Herstellung und Untersuchung der umweltfreundlichen Faserform-Unterarmorthesen ist es erforderlich, zunächst die wirkenden Beanspruchungen im Handgelenk zu ermitteln. Hierzu muss der Aufbau des Handgelenkes näher betrachtet

werden. Zur Ermittlung der vorhandenen Beanspruchungen muss eine entsprechende Vorrichtung zur Aufnahme der wirkenden Kräfte und Momente entwickelt werden. Diese Werte werden an gesunden Unterarmen ermittelt, daher sind sie voraussichtlich wesentlich höher als die im tatsächlichen Anwendungsfall auftretenden. Die angelegte Orthese muss die vom Patienten aufgebrachten Kräfte und Momente sowie die von außen aufgebrachten Belastungen aufnehmen können. Wie hoch diese sind, lässt sich nicht ohne Weiteres bestimmen. Im Normalfall wird der Patient mit den verletzten Gliedmaßen seine Bewegung ohnehin in diesem Bereich einschränken, um zusätzliche Schmerzen zu verhindern. Daher wird die Orthese nur einen geringen Teil der am gesunden Unterarm ermittelten Momente übertragen müssen.

Zur Lösung der beschriebenen Problemstellung soll wie folgt vorgegangen werden: Zunächst werden der Stand der Technik beim Faserformverfahren sowie die verfahrensbedingten Randbedingungen beim Faserformprozess betrachtet. Weiterhin ist der Stand der Technik bezüglich der derzeit für diesen Anwendungsfall eingesetzten Orthesen zu untersuchen. Die Herstellungsmethoden der individuell gefertigten Orthesen werden hier ebenfalls behandelt.

In einem weiteren Kapitel werden die auftretenden Belastungen im Handgelenk untersucht und die relevanten Abmessungen betrachtet bzw. ermittelt. Zur Messung der wirkenden Kräfte und Momente sind entsprechende Versuchseinrichtungen zu entwickeln.

Für die Herstellung der gewünschten Orthesen auf Papierbasis soll eine Versuchsanlage mit entsprechender Möglichkeit zur Rohstoffaufbereitung und mit den entsprechenden Herstellwerkzeugen aufgebaut werden. Diese Faserformanlage kann ggf. für die eingeschränkten Anforderungen vereinfacht ausgeführt werden. Außerdem müssen besonders die Anformwerkzeuge näher untersucht werden. Die Versuchsanlage sollte hinreichend automatisiert werden, damit Produkte reproduzierbar hergestellt werden können. Als Ausgangsmaterial soll dabei Zellstoff oder Holzstoff eingesetzt werden, der zur Herstellung der Fasersuspension nur noch aufgelöst werden muss.

Im nächsten Schritt sollen Proben aus handelsüblichen Faserformteilen entnommen und mit Hilfe einer hierfür zu erstellenden Biegeprüfmaschine belastet werden. Die sich hierbei ergebenden Festigkeits- und Steifigkeitswerte sollen mit Kennwerten von Produkten verglichen werden, die mittels der Faserform-Versuchsanlage selbst hergestellt wurden. Im nächsten Schritt sind Orthesen zu erstellen, an denen dann die Übertragbarkeit der an den Proben ermittelten Kennwerte untersucht werden soll.

Die produzierten Orthesen sind hinsichtlich ihrer Festigkeit zu untersuchen und mit den Orthesen nach dem Stand der Technik zu vergleichen. Hierzu sind entsprechende Versuchseinrichtungen aufzubauen und die ermittelten Werte auszuwerten. Aus den am Beispiel der Unterarmorthese durchzuführenden Untersuchungen sollen Kennwerte ermittelt werden, die möglichst allgemeingültig als Berechnungsgrundlage für Faserformprodukte verwendbar sein sollen.

3 Stand der Technik

3.1 Faserformverfahren

3.1.1 Historie des Pappengusses

Die Entwicklung des Werkstoffes Papier und dessen Herstellung kann auf eine lange Geschichte zurückblicken. Aus dieser Entwicklung sind viele Produkte und Verfahren entstanden, die auch heute noch Bestand haben.

Zunächst wurde der Rohstoff für Papier aus Lumpen (Hadern) gewonnen, indem diese zerrissen und mit Stampfwerken in eine breiige Masse verwandelt wurden. Die erste in Deutschland bekannte Fertigungsstätte für Papier war 1389 die von Ulmann Stromer betriebene Gleismühle bei Nürnberg /FPZ61/. Die weitere Entwicklung betraf die Rohstoffaufbereitung, 1672 entwickelten holländische Papiermacher den Holländer. Der Holländer besaß ein walzenförmiges Mahlwerk und wurde 1710 in Deutschland an Stelle von Stampfwerken zur Stoffaufbereitung der Hadern eingesetzt /FPZ61/. Durch die Erfindung der Langsieb-Papiermaschine durch den Franzosen Nicolas Louis Robert wurde im Jahre 1799 die Papierherstellung in endlosen Bahnen ermöglicht. Hierdurch wurde das Schöpfen der einzelnen Bogen auf einem Sieb ersetzt. Aufgrund der Rohstoffknappheit beschäftigte sich Friedrich Gottlob Keller 1840 mit der Herstellung eines Rohstoffes aus Holz /FPZ61/. Durch das Schleifen von Holz unter Zusatz von Wasser gelang der mechanische Aufschluss der Fasern. Dieses Verfahren wurde 1845 in Sachsen patentiert; der entsprechend hergestellte Faserbrei wurde zur Papierherstellung eingesetzt.

In der weiteren Entwicklung wurden hieraus auch andere Produkte gefertigt. Die Herstellung und die Verwendung von Papiermaché sowie die Herstellung der entsprechenden Formen wird 1847 von Schmidt in /SCH47/ beschrieben. Zur Herstellung von Puppenköpfen, Kinderspielzeug, architektonischen Verzierungen, Masken usw. wurde die aufbereitete Masse von Hand in die Formen gefüllt und zu Gegenständen geformt.

Als nächstes gelang der chemische Aufschluss des Holzes 1855 (Natronzellstoff) und 1866 (Sulfitzellstoff) in Amerika. Aufgrund dieser Entwicklungen und der noch anhaltenden Weiterentwicklung und Verbesserung der Aufbereitung der Rohstoffe, Herstellungstechnik sowie der Bedrucktechnik ergaben sich auch zahlreiche neue Anwendungsbereiche.

In der Patenschrift DE 24946 /SMT83/ vom 14. März 1883 wird z. B. die Herstellung von Gegenständen aus einer flüssigen Papiermasse beschrieben. Das hier behandelte Verfahren wird teilweise auch heute noch zur Herstellung von Faserformprodukten eingesetzt. Die Form zur Herstellung der Gegenstände besteht in /SMT83/ aus einem Gestell aus Drahtstangen, die mit einem Metallsieb überzogen werden. Nach dem Eintauchen der Form in ein mit dem Faserstoff gefülltes Becken wird unterhalb dieser Form mit einer Saugpumpe o. ä. eine Saugwirkung erzeugt. Hierdurch lagern sich die Fasern an der Form ab. Nach dem Herausnehmen aus dem Becken wird die Saugwirkung zur Entwässerung weiter aufrecht erhalten. Die weitere Trocknung kann laut /SMT83/ an der Luft oder in geheizten Räumen erfolgen.

In der weiteren Patentschrift DE 61832 /OZO90/ vom 26. August 1890 wird ein Verfahren zur Herstellung von Krügen, Behältern und Hohlkörpern aller Art aus Papierstoffen behandelt. Als Stand der Technik wird hier das Ansaugen des Papierstoffes an einer mit Drahtgewebe überzogenen Form beschrieben. In dieser Patentschrift wird die Form aus Harzstoffen hergestellt, in die anschließend kleine Löcher gebohrt werden. **Bild 3.1** zeigt die Figur 1 der Patentschrift; als Beispiel wird hier die Form für eine Büste gezeigt. Die Form wird in einen Behälter B eingesetzt; durch das Saugen durch das Rohr F lagern sich die im Behälter A gelösten Papierstoffe an die Form an. Das nachträgliche Pressen der Gegenstände stellt das Besondere dieser Patentschrift dar. **Bild 3.2** zeigt eine Presse G, die aus einer Metallform J und einem elastischen Gummibeutel H besteht. Der aus Papierstoff hergestellte Gegenstand wird in die Metallform eingelegt, und durch das Füllen des elastischen Gummibeutels H mit Dampf-, Luft- oder Wasserdruck legt sich dieser an die in der Metallform befindliche Büste aus Papierstoff an und glättet diese somit. Hierdurch wird ein genauer, gleichmäßiger Abdruck der Büste hergestellt.

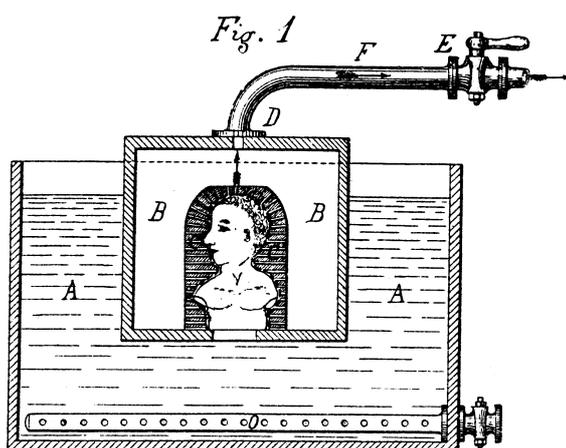


Bild 3.1: Formung durch Saugen /OZO90/

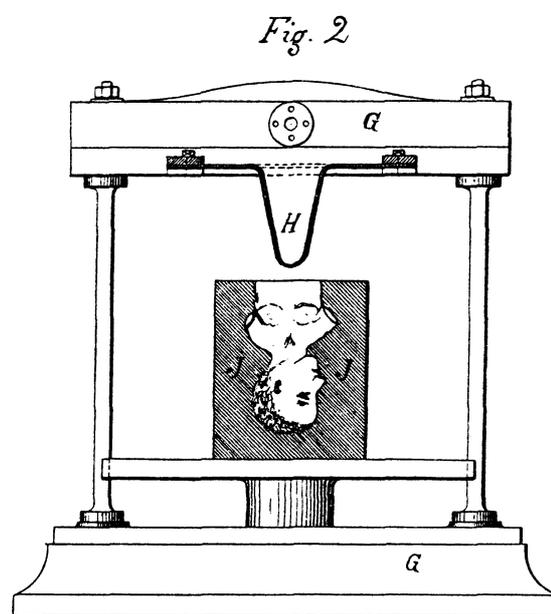


Bild 3.2: Presse /OZO90/

Genauere Aussagen über die Herstellung der Formen sind in der Patentschrift nicht enthalten; um den aus Papierstoffen hergestellten Gegenstand entformen bzw. in die Pressform einlegen zu können, müssen die Formen jedoch in jedem Fall mindestens zweiteilig ausgeführt werden. Nähere Angaben hierüber liegen nicht vor.

Sowohl damals als auch heute wird dieses Know-how fast ausschließlich durch entsprechende Schutzrechte geschützt und kaum in anderen Publikationen, wie Zeitschriften, wissenschaftlichen Aufsätzen oder Büchern, veröffentlicht und verständlich dargestellt. Eine der wenigen Veröffentlichungen stellt das Buch von Louis Edgar Andés aus dem Jahre 1900 /AND00/ dar. Im Wesentlichen beinhaltet dieses Buch die Herstellung und Verarbeitung von Papiermaché. In zwei Textstellen wird die Herstellung von Hohlkörpern beschrieben. Zunächst wird unter der Überschrift „Geschlossene Hohlkörper aus Papiermaché“ ein Herstellverfahren dargestellt, bei dem die Papiermasse mit Hilfe einer Zentrifuge an die Innenwand einer zerlegbaren und durchlöchernten Siebform angelagert wird. Zur Verdichtung der Masse wird komprimierte Luft in die Form geblasen. Darüber hinaus sei es erforderlich, die Form in zwei Achsen rotieren zu lassen, damit die gleichmäßige Anlagerung der Papiermasse in der ganzen Form gewährleistet wird. Die

Herstellung der Formkörper mit Hilfe einer Zentrifuge erscheint allerdings sehr unwahrscheinlich, da die erzeugte Schleuderkraft sehr gering ist, siehe /KÜN02b/. Darüber hinaus erfordern die Realisierung der zwei drehbaren Achsen und das zusätzliche Einbringen von Druckluft eine sehr komplizierte Vorrichtung, die konstruktiv nur sehr aufwändig zu realisieren ist.

„Verfahren zur Herstellung von Papierstoffgegenständen mittels weicher Formen“ lautet die Überschrift der zweiten Textstelle in /AND00/. Das hier beschriebene Verfahren zur Herstellung von Gegenständen aus Papierstoffen beinhaltet größtenteils identische Textpassagen aus der Patentschrift DE 61832 /OZO90/ vom 26. August 1890. Die in der Patentschrift dargestellten Figuren 1 und 2, siehe **Bild 3.1** und **Bild 3.2**, wurden nur geringfügig verändert. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Patentschrift dem Autor vorlag; eventuell waren Patentschriften über Papiererzeugnisse die Grundlage für dieses Buch. Genaueres hierüber ist allerdings nicht bekannt; ein entsprechender Quellenverweis erfolgte nicht.

Eine weitere Veröffentlichung von Winzer aus dem Jahre 1907 /WIN07/ beinhaltet ebenfalls im Wesentlichen die Herstellung und Verarbeitung von Papiermaché. Unter der Überschrift „Herstellung von Hohlkörpern mittels Zentrifuge“, wird das Herstellen der Produkte durch das Schleudern beschrieben, und als Anwendungsbeispiel wird das in der Patentschrift DE 61832 /OZO90/ bzw. in /AND00/ behandelte Verfahren vorgestellt. Bei der Beschreibung des Zentrifugalverfahrens sind wiederum Satzteile identisch mit dem in /AND00/ bereits veröffentlichten Text. Darüber hinaus wurde hier ein falscher Zusammenhang zu /OZO90/ geschlossen. Die Beschreibung des Verfahrens in DE 61832 /OZO90/ beinhaltet ebenfalls identische Textpassagen aus dieser Schrift. Daher liegt hier die Vermutung nahe, dass beide Veröffentlichungen dem Autor vorgelegen haben; ein entsprechender Quellenverweis liegt auch hier nicht vor.

Die entsprechend nach diesem Verfahren hergestellten Produkte wurden allgemein als Pappengussteile bezeichnet. In den 20er und 30er Jahren wurde das Verfahren immer weiter entwickelt; gemäß Ebers /EBE52/ waren Produktionsstätten für Pappengussverpackungen in Ländern wie z. B. Deutschland, England, Frankreich, Italien und der Schweiz vorhanden. Das Prinzip der Anlagen war identisch, nur die konstruktive Umsetzung wich stark voneinander ab und wurde oftmals durch Schutzrechte geschützt. In Deutschland produzierte die Pappenguß Gesellschaft für Zellstofffabrikate GmbH in Berlin-Spandau z. B. Lautsprechermembranen und andere Pappenguss-Produkte /EBE52/. Kurz vor dem Krieg wurde die Pappenguß Gesellschaft von Günther Wagner übernommen. Darüber hinaus hat die Firma Henkel eine Pappengussanlage besessen und für den eigenen Verbrauch z. B. Ata-Verpackungen, siehe **Bild 3.3**, hergestellt. Die Anlage der Firma Henkel ist die einzige, die nach 1945 neu aufgebaut wurde /EBE52/.



Bild 3.3: ATA-Flasche

Aufgrund der hohen Investitionskosten der Pappengussanlagen und des zu kleinen in Deutschland vorhandenen Marktes für die in aller Welt gefertigten Eiereinsätze und Verpackungen für Flaschen sind die Anlagen, die durch den Krieg zerstört wurden, nicht wieder aufgebaut worden oder verblieben im Osten des geteilten Deutschlands. In

England wurden z. B. Pappenguss-Verpackungen für Whisky-Flaschen hergestellt /PAI67/. Ursache für das Aussterben der Pappguss-Verpackungen waren sicherlich auch die zunehmend höheren Ansprüche an die Verpackungen. Henkel produzierte z. B. die ATA-Flasche von ca. 1925 bis 1956 in Düsseldorf /KÜC95/.

Die Firma Dr. Kurt Müller in Krefeld trat die Nachfolge der Pappenguß GmbH an und entwickelte das FIBRIT-Verfahren. Die nach diesem Verfahren hergestellten Produkte besaßen höhere Formgenauigkeit, Härte und Festigkeit als die nach den Pappenguss-Verfahren hergestellten Produkte. Es wurden technische Produkte für die Automobilindustrie gefertigt, wie z. B. Batteriedeckel, Handschuhkästen sowie Koffergehäuse für Radiogeräte, Schreibmaschinen o. ä. /EBE52/.

In der Schweiz wurde 1925 die Firma Cartofont gegründet, dies geht aus einem Unternehmensprospekt vom Mai 1975 der Firma Cartofont anlässlich des 50jährigen Firmenjubiläums /CAR75/ hervor. Der Firmengründer war der Direktor des aargauischen Kantonsospitals Dr. med. Konrad Frey; dessen Söhne Adolf und Walter Frey wirkten später im Unternehmen mit. Der Firmenname entstand aus der zur Herstellung benötigten Cartofont-Masse, die aus Zellulose und Holzschliff sowie weiteren Zusätzen bestand. Während der Kriegsjahre expandierte die Firma weiter, da die Beschaffung von Holzschliff und Zellulose leicht war. **Bild 3.4** zeigt als Beispiele eine Büste und weitere interessante Formgebungen und gibt somit eine Übersicht darüber, welche Teile hergestellt werden konnten. **Bild 3.4** und **Bild 3.5** stammen aus einem alten Firmenprospekt, vermutlich aus der Gründerzeit /CAR/.

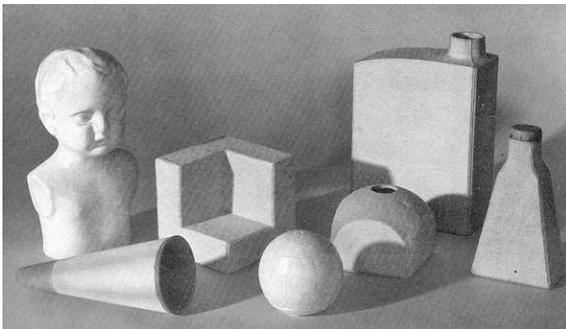


Bild 3.4: Produktübersicht /CAR/



Bild 3.5: Behälter aus Pappenguss /CAR/

Gemäß Kücherer /KÜC95/ wurden bei der Firma Cartofont jährlich Millionen von Flaschen, Dosen und Trommeln, ggf. einschließlich Deckel, als Monostofflösung hergestellt. Darüber hinaus waren Imprägnierungen und Beschichtungen aus Mischungen von Wachs, Latex, Paraffin, Salmiak oder Bitumen möglich. Die entsprechende Beschichtungstechnik stellte ebenfalls das Know-how von Cartofont dar.

Hergestellt wurden durch Cartofont Dosen und Flaschen für Nahrungsmittel, wie z. B. Senf, Majonäse, Gurken und anderes Gemüse in Essig und Obstkonzentraten, sowie für alkoholische Getränke /CAR/. Weiterhin konnten Chemikalien, z. B. Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel, Säuren sowie Mineralöle, Klebstoffe und Pulver aller Art, verpackt werden. Flaschen konnten z. B. mit großen Durchmessern und relativ kleinen Gießöffnungen und mit bis zu sieben Litern Fassungsvermögen produziert werden. Als Verschluss konnten Stülpedeckel, Korkenzapfen oder Schraubdeckel eingesetzt werden. Vorteilhaft gegenüber Glasbehältern war das geringe Gewicht von einem Fünftel des Glasbehälters sowie die Entsorgungsmöglichkeit durch Verbrennung.

Im dem Zeitraum von 1925 bis 1970 wurden von Cartofont Produkte aus Pappenguss hergestellt /CAR75/. 1947 begann bereits die Produktion von technischen Produkten aus Thermoplasten durch den Kunststoffspritzguss. Walter Frey verstarb 1960, und unter der Leitung seines Schwiegersohns Hans Gautschi wurden in den Jahren 1959 bis 1969 die Pappenguss-Verpackungen nach und nach durch Kunststoffprodukte ersetzt. Hans Gautschi lebt derzeit in der Schweiz und ist noch einer der wenigen Zeitzeugen, die mit dem Pappenguss-Verfahren gearbeitet haben. Die Produktion von Pappenguss-Produkten wurde 1970 ganz eingestellt; alle Anlagen wurden verschrottet, lediglich alte Prospektunterlagen und einige Verpackungen existieren noch. **Bild 3.6** zeigt die ursprüngliche Dose aus Pappenguss sowie das entsprechende Kunststoffprodukt. Die Firma Cartofont produziert bis in die heutige Zeit noch Produkte aus Kunststoff.

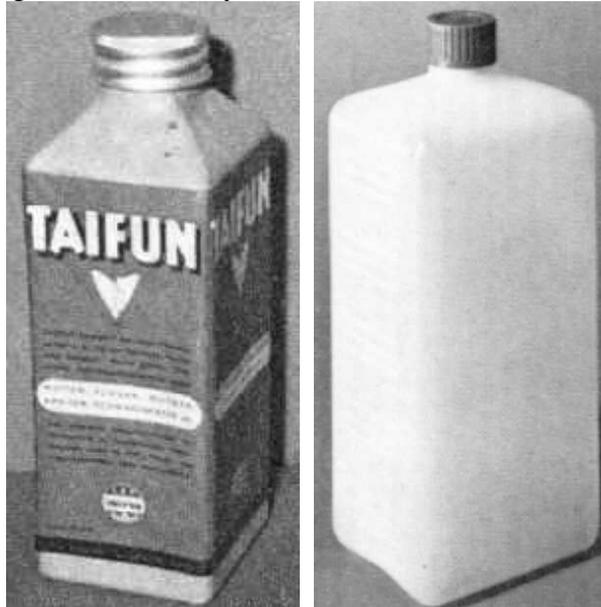


Bild 3.6: Gegenüberstellung Pappenguss - Kunststoff /CAR75/

1917 wurde die Firma Brødrene Hartmann gegründet; das Unternehmen produziert bereits seit 1936 bis heute Verpackungen für Eier /SAM96/. Das Know-how dieses Unternehmens ist ebenfalls durch entsprechende Schutzrechte geschützt und damit für die Öffentlichkeit nicht nutzbar. Die Informationen über dieses Unternehmen stammen weitgehend aus Veröffentlichungen neueren Datums. In diesen werden Produkte aus Papierstoffen nicht mehr als Pappenguss-Produkte bezeichnet, sondern nach und nach wurde der Begriff Faserguss bzw. Faserform gebildet.

In den Artikeln /PRP89/ und /SAM96/ wird die Produktion bei der Firma Brødrene Hartmann, Dänemark, beschrieben. Gemäß /SAM96/ wurden 1996 im Bereich der Eierverpackungen täglich ca. drei Millionen Verpackungen in Dänemark produziert. Hier lag auch gemäß /PRP89/ der Schwerpunkt mit ca. 90 % der Produktion, den Rest stellten Verpackungen für Obst sowie Schalen für den medizinischen Bereich dar. Darüber hinaus lag ein weiterer Schwerpunkt im Export der Produkte; gemäß /PRP89/ wurden 96 % der gesamten Produktion in europäische Märkte exportiert. Die Vorteile der Faserformprodukte werden mit logistik-, verkaufs-, und entsorgungsgerecht beschrieben. Weiterhin werden flexible Anlagen mit geringeren Formkosten genannt, die eine Produktion in geringer Stückzahl ermöglichen sollen. Als Rohstoff werden gemäß /SAM96/ ca. 140 Tonnen Zeitungen und Zeitschriften täglich zu Verpackungen verarbeitet, wobei 1,5 Tonnen mit 16 m³ Wasser die Fasersuspension ergeben. Dies entspricht einer Stoffdichte nach DIN EN ISO 4119, siehe /DEI96a/, als Massenanteil in Prozent von ca. 0,1 %. Dies erscheint relativ gering, da bei der Papierherstellung Material mit einer Stoffdichte von 0,1 bis 1,5 % /GÖT90/ verarbeitet wird und von anderen Herstellern von Faserformprodukten Stoffdichten von 1 % bis 5 % angegeben werden.

Die gewachsenen Ansprüche an Verpackungen und Produkte und die parallele Entwicklung neuer Werkstoffe, z. B. Kunststoff, sowie die relativ aufwändige Fertigung der Fa-

serformprodukte waren die Ursachen für das Ersetzen der bestehenden Produkte. Hierzu trug ebenfalls die Entwicklung von expandiertem Polystyrol (EPS) im Jahre 1930 durch die BASF in Ludwigshafen bei. Auf der Düsseldorfer Kunststoffmesse 1952 wurde der Öffentlichkeit erstmals expandierbares Polystyrol unter dem eingetragenen Warenzeichen Styropor® vorgestellt /IZK94/.

Diese Entwicklung sowie das Kunststoffspritzverfahren verdrängten das Faserformverfahren und dessen Produkte. Die Kunststoffprodukte konnten mit höherer Genauigkeit und geringerem Aufwand gefertigt werden. Heutzutage gewinnt der Umweltschutz immer mehr an Bedeutung, wodurch Faserformprodukte wieder interessant werden. Besonders seit dem Inkrafttreten der Verpackungsverordnung werden mehr Verpackungen auf Papierbasis eingesetzt. Die Verpackungsverordnung verpflichtet die Hersteller, die Entsorgungskosten für die eingesetzten Verpackungen zu übernehmen. Die Faserformprodukte können problemlos ohne umweltbelastende Folgen durch die Deponierung, Kompostierung oder Verbrennung entsorgt werden. Die Verbrennung ist z. B. ohne die Entwicklung schädlicher Nebenprodukte möglich. Aufgrund der biologischen Abbaubarkeit des eingesetzten Werkstoffs können Faserformprodukte kompostiert werden, bis sie zu Humus zerfallen. Darüber hinaus steht durch das Altpapiererfassungssystem bereits ein funktionierendes Stoffkreislaufsystem zur Verfügung, hierdurch wird die Wiederverwertung des Materials gewährleistet.

Ebmeyer /EBM94b/ beschreibt die Besonderheiten der Fasergussprodukte. In dieser Veröffentlichung wird der Begriff Faserguss statt Faserform eingesetzt. Derzeit gibt es noch keine eindeutigen Vereinbarungen (Normen o. ä.) bezüglich der Benennung derartiger Produkte. Seit Inkrafttreten der Verpackungsverordnung werden Produkte aus umweltfreundlichen Materialien bevorzugt. Bekannt wurde Faserform durch den Einsatz bei vorverpackten Waren für Fleisch, Gemüse usw. Ebmeyer beschreibt, dass die Formteile aus Altpapier ohne funktionelle Einbußen herkömmliche Kunststofflösungen aus z. B. expandiertem Polystyrol (EPS) oder Tiefziehteile aus Kunststoff ersetzen können. Als Vorteil gegenüber EPS werden z. B. die Stapelbarkeit der Faserformprodukte genannt. Der erforderliche Lagerraum verringert sich; dies bedeutet gleichzeitig auch Kostenvorteile. Dem gegenüber stehen die Formkosten, die für Faserformprodukte erheblich höher sind als die Kosten für die Styroporformen, so Ebmeyer. Weitere Vorteile der Faserformverpackung werden in den recycelbaren Materialien gesehen. Da das Altpapier leicht verrotten kann, kann es mit Abfällen o. ä. kompostiert werden. Viele Hersteller fordern eine Monostoffverpackung; dies leistet die Faserformverpackung in Verbindung mit Wellpappe. Die Faserformverpackung kann allerdings auch über ein Scharniergelenk mit einem klappbaren Deckel versehen werden; in diesem Fall ist keine zusätzliche Wellpappe erforderlich. Ferner ist das Etikettieren oder Bedrucken der Produkte möglich. Die Entsorgungskosten für Papierprodukte sind geringer als für Kunststoffe.

Die Veröffentlichungen /EBM94a/ und /EBM94b/ weisen auf den geringen Bekanntheitsgrad von Faserformprodukten hin. Um Informationen hierüber zu erhalten, hat sich das Informationszentrum Fibro-Care in München gegründet. Dabei soll es sich um einen Zusammenschluss von Herstellern handeln. Ebmeyer weist in /EBM94c/ auf den Vorteil der Faserformverpackung gegenüber der Wellpappe hinsichtlich der Handlingkosten hin. Diese beziehen sich auf die arbeitsintensiven Faltvorgänge der Wellpappe zur Realisierung des dreidimensionalen Verpackungsteils. Hinsichtlich weiterer Produkteigenschaften und der Herstellungsverfahren der Faserformprodukte werden gegenüber der Veröffentlichung /EBM94b/ keine neuen Aussagen getroffen.

Die Veröffentlichung /VBE94a/ beinhaltet Aussagen des Marketingleiters der Firma Brødrene Hartmann, Asger Domingo. Erwähnt wird das steigende Interesse an problemlos recycelbaren Verpackungen. Nach Gebrauch können die von Brødrene Hartmann aus Altpapier hergestellten Faserformverpackungen entweder wie Altpapier in den Rohstoffkreislauf eingefügt oder kompostiert werden. Darüber hinaus können sie laut Aussage von Herrn Domingo ohne Entstehung schädlicher Nebenprodukte verbrannt werden. Als Einsatzgebiete der dreidimensionalen Faserformverpackungen werden Einlagen in Kartonverpackungen sowie der Einsatz als Transport- und Verkaufsverpackungen genannt. Ein Beispiel für eine Verpackung, die sowohl als Transportverpackung als auch als Verkaufsverpackung eingesetzt werden kann, ist eine Brillenbox. Diese wurde von Brødrene Hartmann für das dänische Unternehmen Benetton konzipiert. **Bild 3.7** zeigt die Brillenbox, die Brille wird durch diese Verpackung während des Transports geschützt und kann im Verkaufsraum als Display ausgelegt werden.



Bild 3.7: Brillenbox /Brødrene Hartmann/

Erwähnt wird weiterhin die Hauptaufgabe der Verpackungen, der Schutz vor Stößen und Erschütterungen. Die wirtschaftliche Produktion einer Faserformverpackung kann erst ab einer Mindeststückzahl von etwa 100.000 erfolgen; als Grund wird hier die erforderliche Form genannt, die für jede herzustellende Verpackung benötigt wird. Konkretere Aussagen bezüglich der erforderlichen Herstellungsformen bzw. -werkzeuge und Verfahren werden nicht getroffen. Hinsichtlich der Produkteigenschaften wird auf die glatte, helle Oberfläche der Produkte hingewiesen, insbesondere genügen sie ästhetischen, praktischen und umweltverträglichen Kriterien. Die Oberflächen eignen sich zum Anbringen von Logos, Firmennamen usw. Die Produkte weisen eine gleichmäßige Wandstärke auf, sind stapelbar und somit auch platzsparend. Für die Herstellung der von Hartmann beschriebenen Verpackungen sind sicherlich mehrere Formen erforderlich, z. B. für nachträgliche Pressvorgänge. Zur Aufbereitung des Altpapiers wird auf den Einsatz einer Deinking-Anlage hingewiesen, die mit Hilfe von warmem Wasser und Seife dem Altpapier die Druckerschwärze und Farben entzieht. Die Verwendung von Chlor sei dabei nicht nötig. Die Stabilität und Belastbarkeit der Verpackungen wird durch entsprechende von Hartmann entwickelte Testverfahren gemessen, hierzu werden die einzelnen Verpackungen überprüft. Kontrollen für die Lebensmittelverpackungen werden durch die Technische Hochschule Darmstadt durchgeführt. Die Verpackungen von Hartmann erfüllen die Empfehlung des Bundesgesundheitsamtes für Lebensmittel-

verpackungen. Nähere Aussagen zum Prüfverfahren u. ä. werden allerdings nicht getroffen. Eine Erweiterung der Hartmann-Produktpalette soll durch Minderung der Dominanz des Kunststoff-, Blister- und Styroporverpackungsmarktes erfolgen, indem die Verpackungen für Industrieprodukte teilweise durch Faserformverpackungen ersetzt werden sollen. Wesentliche Aussagen der zuvor beschriebenen Veröffentlichung werden auch in der Veröffentlichung /NVP94/ und /VRU94/ wiederholt.

/VRU00a/ beschreibt eine neue umweltfreundliche Lebensmittelverpackung aus Faserform: Dualpack. Diese Lebensmittelverpackung wurde von dem schwedischen Akkreditierungsinstitut Normpack geprüft und für Lebensmittel zugelassen. Die umweltfreundliche Faserformschale ist mit einem dünnen Barrierefilm aus Kunststoff umschlossen und stellt somit eine Kombinationslösung dar. Laut Aussage des Business Development Managers Michael Roschmann wird Dualpack von Brødrene Hartmann zunächst auf den Markt für Fertiggerichte gebracht und soll später auch in anderen Bereichen Verwendung finden. Es handele sich dabei um eine neue Produktionsmethode; die Menüschalen seien in der Anzahl der Kammern und der Kammertiefe sowie in der Form und Größe variabel, wobei genauere Aussagen nicht getroffen werden. Das Faserformteil muss nach Fertigung und vollständiger Trocknung noch einen weiteren Bearbeitungsschritt durchlaufen. Als vorteilhaft wird dabei die Einstufung als Packmittelkombination (separierbare Verpackung) durch das Duale System Deutschland (DSD) erwähnt, was geringere Gebühren bei der Entsorgung bedeute. An der Herstellungsmethode der Faserformschalen hat sich vermutlich nichts geändert. Die neue Produktionsmethode bezieht sich vermutlich auf das Verfahren, die Faserformschalen anschließend mit einer Kunststofffolie zu laminieren. Nähere Informationen hierzu sind in der Patentanmeldung EP 1145822 bzw. WO 0174564 enthalten, siehe /HAR01/.

Styroporverpackungen werden von Großgeräteherstellern gegenüber Faserformverpackungen bevorzugt, dagegen verwenden die Hersteller von Kleingeräten vorzugsweise Faserformverpackungen; dies geht aus der Veröffentlichung /EBM92/ hervor. Als Vorteile der Faserformverpackungen gegenüber den Styroporverpackungen werden der geringere Platzbedarf, die Kompostierbarkeit, die Realisierung einer Monostoffverpackung und die damit verbundenen Vorteile bei der Entsorgung genannt. Ebmeyer /EBM92/ berichtet weiterhin über den Besuch bei der Firma Stabernack Jr. & Partner sowie deren Produktionsbesichtigung. Produziert werden z. B. Staubsaugerverpackungen aus Faserform für die Firma Miele. Die Größe der Verpackung und die herzustellende Genauigkeit sei dabei wesentlich höher als bei den bisher produzierten Faserformverpackungen. Darüber hinaus sei die Firma Miele eines der ersten Unternehmen, die Faserformverpackungen im großen Maßstab einsetzen. Im Bereich der Kleingeräte wurden bereits bei der Firma Rowenta einige Styroporverpackungen durch entsprechende Faserformverpackungen ersetzt. Konkretere Aussagen über den Fertigungsprozess bei der Firma Stabernack Jr. & Partner, Auslegungsgrößen für Verpackungen oder Kosten werden nicht genannt. Erwähnt werden nur die besonderen Leistungen der Firma Stabernack Jr. & Partner im Bedrucken von Wellpappe, in diesem Zusammenhang werden mehrere Druckverfahren genannt.

Nach /VBE93c/ werden zur Herstellung von Faserformprodukten bis zu 100 % Altpapier eingesetzt. Der jährliche Altpapier-Einsatz der Verbandsmitglieder des europäischen Industrieverbandes für Faserform-Verpackungen Fibro Care lag nach dessen Deutschland-Sprecher, Hans-Joachim Mohr, bei über 200.000 Tonnen pro Jahr. Herge-

stellt werden diese Verpackungen z. B. für Obst, Gemüse, Eier, Weinflaschen und Elektrogeräte. Durch den vorwiegenden Einsatz von Altpapier als Rohstoff gegenüber der ursprünglichen Verwendung von Holzschliff wurde der Verbrauch von Energie und Wasser im Produktlebenszyklus der Faserformprodukte gesenkt. Damit handele es sich bei Faserformverpackungen um Kreislaufprodukte, für deren stoffliche Verwertung ein gut funktionierendes Sammelsystem für Altpapier zur Verfügung steht. Die Verpackungen können zusammen mit dem Altpapier eingesammelt und einer erneuten rohstofflichen Verwertung zugeführt werden. Darüber hinaus können die Altpapierprodukte kompostiert und so dem Stoffkreislauf entzogen werden. Aufgrund von Abfallgesetzverordnungen in vielen europäischen Ländern steige vermutlich der Altpapierrücklauf, und ein Wachstum im Bereich der Industrieverpackungen wird erwartet. Die Verwendung von Altpapier sei für die Konsumenten ein wichtiges Kaufargument von Eierverpackungen. Weitergehende Aussagen zu Kennwerten von Faserformteilen werden nicht getroffen.

In der Veröffentlichung /VBE93a/ werden die Ergebnisse einer Studie des niederländischen Marktforschungsinstituts AGB vorgestellt. Von französischen Verbrauchern wurden drei Verpackungstypen für Eier beurteilt. Die Kriterien der Umweltverträglichkeit wurden bei der Faserformverpackung als sehr positiv bewertet. Auch die Stabilität wurde von Verbrauchern mit sehr gut bewertet. Konkrete Aussagen bzw. Untersuchungen hinsichtlich Stabilität und Festigkeiten werden nicht genannt bzw. liegen vermutlich auch nicht vor.

3.1.2 Herstellungsprinzip der Faserformprodukte

Das Herstellungsprinzip der dreidimensionalen Faserformprodukte basiert darauf, aus einer wässrigen Fasersuspension das entsprechende Formteil zu bilden. In DIN EN ISO 4119 /DEI96a/ und DIN 6735 /DIN00b/ ist die Fasersuspension als eine wässrige Suspension definiert, die aus einem oder mehreren Fasermaterialien (Halbstoffen) bestehen kann. Oftmals sind dies Rohstoffe pflanzlicher Herkunft oder Sekundärstoffe, wie Altpapier, siehe **Bild 2.8**. Die Suspension kann darüber hinaus weitere Füllstoffe und Hilfsmittel enthalten. Als Füllstoffe können Stoffe mineralischen Ursprungs eingesetzt werden, z. B. Kaolin (Porzellanerde) und Calciumcarbonat (Kreide); hierdurch können die Eigenschaften des Papiers, z. B. Bedruckbarkeit, Weißgrad, Porosität und Oberflächenglätte, verbessert werden /GÖT90/. Hilfsmittel bzw. Hilfsstoffe werden zur Verbesserung der Papierqualität eingesetzt. Zur Steigerung der Festigkeit werden z. B. Stärke oder wasserlösliche Polymere genannt, und zur Verbesserung der Nassfestigkeit werden in /GÖT90/ Nassfestharze, wie z. B. Harnstoff-Formaldehyd-Harze und Melamin-Formaldehyd-Harze, erwähnt. Durch die Beimengung von Füll- und Hilfsstoffen können die Eigenschaften des Endproduktes verändert und der Fertigungsprozess beeinflusst werden. Diese Einflussfaktoren können im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig berücksichtigt werden. Die Aufbereitung der Fasersuspension stellt einen separaten Bereich dar und ist normalerweise von der Faserformanlage entkoppelt. Die wässrige Suspension muss entsprechend zu der Anlage transportiert werden.

Die Faserstoffzusammensetzung ist in DIN 6730 /DIN00a/ definiert und gibt Art und Anteil der Faserstoffe bezogen auf die Trockenmasse, als Massenanteil in Prozent ofentrocken (% otro), an. Die Bestimmung der Stoffdichte einer wässrigen Fasersuspension erfolgt gemäß DIN EN ISO 4119 /DEI96a/. Die Stoffdichte ist als das Verhältnis der Trockenmasse zur Masse der Probe (Fasersuspension) definiert und wird als Massenanteil

teil in Prozent angegeben. Rezepturen für die Fasersuspensionen stellen das Know-how der Unternehmen dar und sind nicht öffentlich zugänglich. Zur Papierherstellung werden gemäß /GÖT90/ Stoffdichten von 0,1 % [m/m] bis 0,5 % [m/m] eingesetzt. Weitere Informationen stammen aus Patentschriften; z. B. werden in /BRD81/ zwei Beispiele beschrieben, deren Fasersuspensionen bei einer Stoffdichte von 0,2 % [m/m] und 0,4 % [m/m] liegen. Gemäß /CMC94/ sollte die Stoffdichte zwischen 0,1 % [m/m] und 3 % [m/m] betragen, und als bevorzugte Stoffdichte wird 0,6 % [m/m] angegeben.

Formwerkzeug

Zur Bildung der Formteile aus der wässrigen Fasersuspension müssen alle Faserformanlagen über ein entsprechendes Formwerkzeug verfügen, wie es prinzipiell bereits 1883 in /OZO90/ beschrieben wurde. Das Formwerkzeug muss einerseits die Geometrie des herzustellenden Faserformproduktes und andererseits eine durchlöchernte Struktur aufweisen, damit die im Wasser gelösten Fasern herausgefiltert werden können. Das Anlagern der Fasern wird bewirkt, indem zwischen der Oberseite und der Unterseite des Formwerkzeuges eine Druckdifferenz herrscht. Hierdurch wird erreicht, dass die Suspension von dem höheren Druckbereich in den niedrigeren Druckbereich strömt, und bei dieser Durchströmung des Formwerkzeuges lagern sich die in der Suspension gelösten Fasern an der Form- und Siebseite des Werkzeugs ab. Somit wird an der Siebseite des Formwerkzeuges nach und nach das zunächst noch sehr nasse Produkt hergestellt.

Bild 3.8 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Formwerkzeuge.

Die Formseite des Formwerkzeuges muss eine fein durchlöchernte Struktur aufweisen, damit möglichst alle Fasern sich anlagern und nicht durch das Formwerkzeug strömen und dieses ggf. verstopfen. Üblicherweise wird hierfür ein Drahtgewebe aus Metall eingesetzt, ein Sieb; daher wird die Formseite des Werkzeugs auch als Siebseite bezeichnet. Beim Endprodukt wird ebenfalls die Seite, die während des Anformprozesses mit der Siebseite (Formseite) des Werkzeugs in Kontakt stand, als Siebseite bezeichnet. Sie ist leicht durch die entsprechenden Siebmarkierungen des Endproduktes erkennbar, die durch das Eindringen des Metallsiebes in das zunächst nasse Produkt entstanden sind.

Die Gegenseite des Formwerkzeuges muss hinreichende Stabilität aufweisen, damit die aus der Druckdifferenz resultierenden Kräfte abgestützt werden können. Zunächst wirkt am Formwerkzeug der Atmosphärendruck von $p_{\text{atm}} = 1$ bar. Abhängig davon, auf welcher Seite der Atmosphärendruck wirkt, gestaltet sich der Druck der Gegenseite. Wirkt p_{atm} auf der Formseite, dann muss auf der Gegenseite des Formwerkzeuges ein Unterdruck, möglichst ein Vakuum, erzeugt werden, d. h. der Druck in der Saugleitung würde im günstigsten Fall null bar betragen. Tatsächlich liegt der Druck in der Saugleitung zwischen $p_1 = 0,1$ bar und $p_1 = 0,5$ bar.

$$\frac{F}{A} = p_{\text{atm}} - p_1 = (1 - 0,1) \text{ bar} = 0,9 \text{ bar} = 9 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{F}{A} = 0,5 \text{ bar} = 5 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

Zur Veranschaulichung soll die folgende Betrachtung dienen:

Die Kraft, die auf eine Fläche von einem DIN A4-Blatt (21 cm x 29,7 cm = 623,7 cm²) wirkt, beträgt bei $p_1 = 0,1$ bar dann 5613,3 N (bzw. bei $p_1 = 0,5$ bar 3118,5 N). Dies entspricht einer Belastung mit einer Masse von 561,33 kg (bzw. 311,85 kg).

Die Firma Markhorst in Hardenberg, Niederlande, nennt für die nach dem Saugprinzip arbeitende Faserformanlage einen Wert von 0,9 bar. Dagegen wird in /CMC94/ ein Bei-

spiel genannt, bei dem mit einem Druck von 0,7 bar gearbeitet wurde. Die dabei wirkenden Kräfte kann ein Drahtgewebe nicht alleine aufnehmen, daher muss für eine zusätzliche Unterstützung gesorgt werden, die so gestaltet sein muss, dass das Wasser ungehindert durchströmen kann.

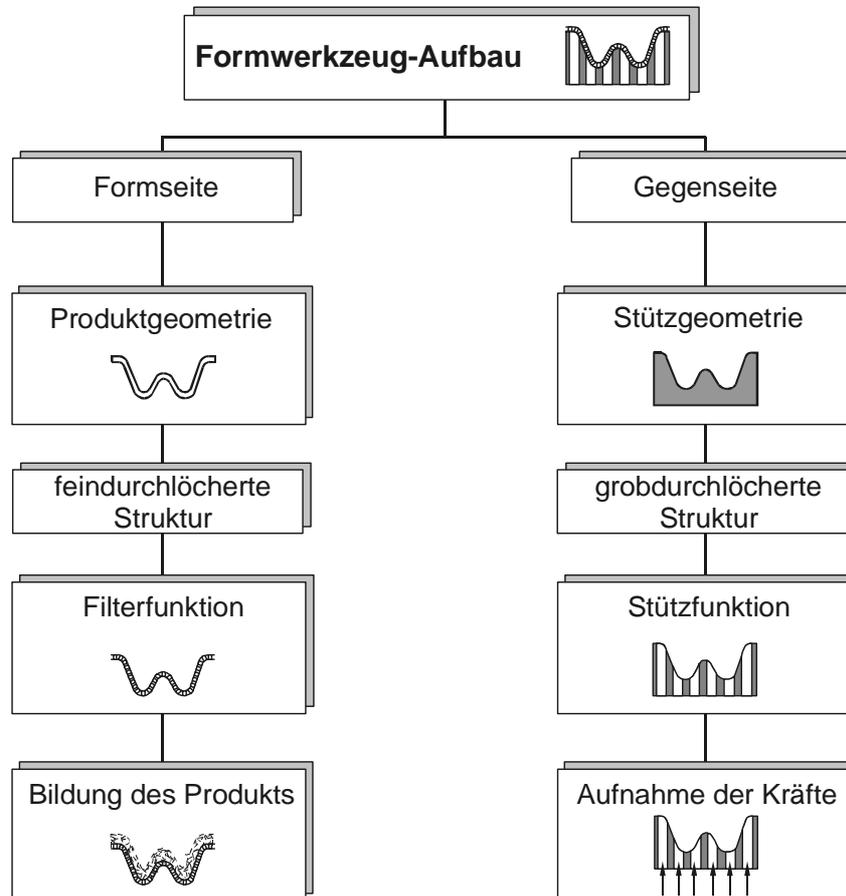


Bild 3.8: Aufbau der Formwerkzeuge

Anformmechanismus

Der Anformmechanismus ist abhängig davon, auf welcher Seite des Formwerkzeuges der Atmosphärendruck herrscht, bedingt durch die Wirkung eines Unterdrucks (Saugverfahren $p_1 < p_2$; $p_2 = p_{\text{atm}}$) oder eines Überdrucks (Druckverfahren $p_2 < p_1$; $p_1 = p_{\text{atm}}$). Beim Saugverfahren kann ein Druck von $p_2 = 0,9$ bis $0,5$ bar durch einen entsprechenden Unterdruckgenerator erzeugt werden. Hierzu müssen eine entsprechende Saugleitung und ein entsprechender Saugraum auf der Unterseite des Formwerkzeugs angebracht werden.

Beim Überdruckverfahren herrscht an der Formseite (Siebseite) ein Überdruck ($p_2 > p_1$; $p_1 = p_{\text{atm}}$); daher muss sich das Formwerkzeug in einem abgeschlossenen Druckraum befinden, dessen Öffnung zum Atmosphärendruck das Formwerkzeug darstellt. Der Überdruck liegt zwischen 2 und 4 bar und kann mittels Kompressor erzeugt werden. In /PAI67/ wird ein Druck von ca. 3,5 bar genannt.

Bild 3.9 zeigt die Anformmechanismen, wobei die Kombination aus Saugen und Drücken weniger üblich und sehr aufwändig ist. Darüber hinaus könnte der Druck (wie dargestellt) mittels eines Kolbens aufgebracht werden. Dabei könnte das Formteil zusätzlich verdichtet werden, wenn der Kolben die Form des Produkts aufweist. Auf Grund des hierfür erforderlichen hohen Aufwandes der Werkzeuge und der Maschine sowie der nur geringfügigen Erhöhung der Druckdifferenz ist eine solche Lösung kaum wirtschaftlich sinnvoll.

Der Transport des Formwerkzeuges in den Behälter mit der Fasersuspension bestimmt die unterschiedlichen Anform- und Anlagenprinzipien. **Bild 3.10** zeigt das jeweilige Anformprinzip und das daraus abgeleitete Anlagenprinzip.

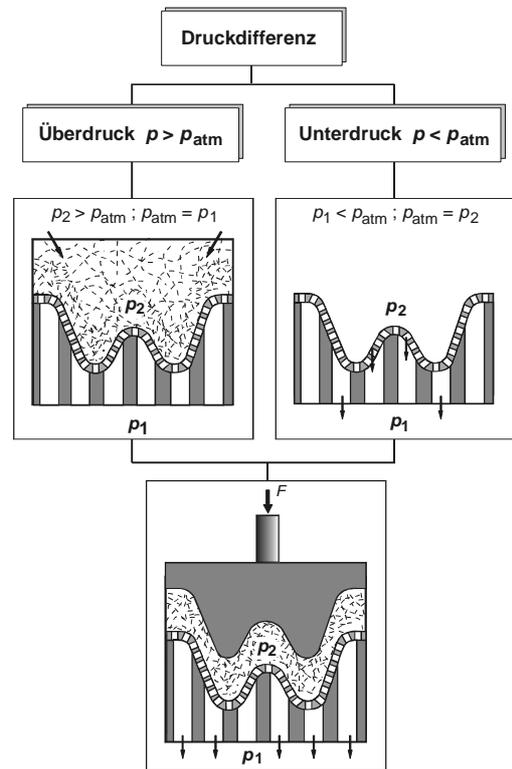


Bild 3.9: Anformmechanismus

Anform- und Anlagenprinzipien

Damit die in der Fasersuspension gelösten Fasern sich an der Oberfläche der Formwerkzeuge anlagern, muss zwischen der Oberseite des Formwerkzeuges und der Unterseite eine Druckdifferenz herrschen. Der Druck auf der Oberseite des Formwerkzeuges wird mit p_2 , der auf der Unterseite mit p_1 und der Atmosphärendruck wird mit p_0 bezeichnet. Befindet sich der mit der Fasersuspension gefüllte Behälter in der Umgebungsatmosphäre, ist somit $p_2 = p_0$; in diesem Fall muss unter dem Formwerkzeug ein Unterdruck herrschen und $p_1 < p_2$ sein. Dies entspricht dem in /OZO90/ beschriebenen Saugverfahren, dem heutzutage hauptsächlich eingesetzten Verfahren. Die Anlage kann nach dem Vertikal- oder Rotationsprinzip arbeiten.

Beim Überdruckverfahren kann nur das Vertikalprinzip eingesetzt werden, da ein abgeschlossener Druckraum benötigt wird; dies kann beim Rotationsprinzip nicht ohne Weiteres realisiert werden. Durch das Überdruckverfahren können allerdings relativ einfach Hohlteile hergestellt werden. Durch die höheren Drücke kann das Anformen sowie das Entwässern des Bauteils schneller erfolgen. Nachteilig ist allerdings der erforderliche abgeschlossene Druckraum, der zur Entnahme der Bauteile geöffnet werden muss. Darüber hinaus müssen die höheren Kräfte, die auf das Werkzeug einwirken, abgestützt werden.

Im Nachfolgenden sollen die Anlagen- und Anformprinzipien kurz beschrieben werden. Diese Prinzipien und das eingesetzte Formwerkzeug stellen das Know-how der auf diesem Gebiet arbeitenden Unternehmen dar. In wissenschaftlichen Artikeln sowie in Buchveröffentlichungen sind auch hierüber kaum konkrete Angaben vorhanden. Das meiste Know-how liegt auch hier in Form von Schutzrechten vor.

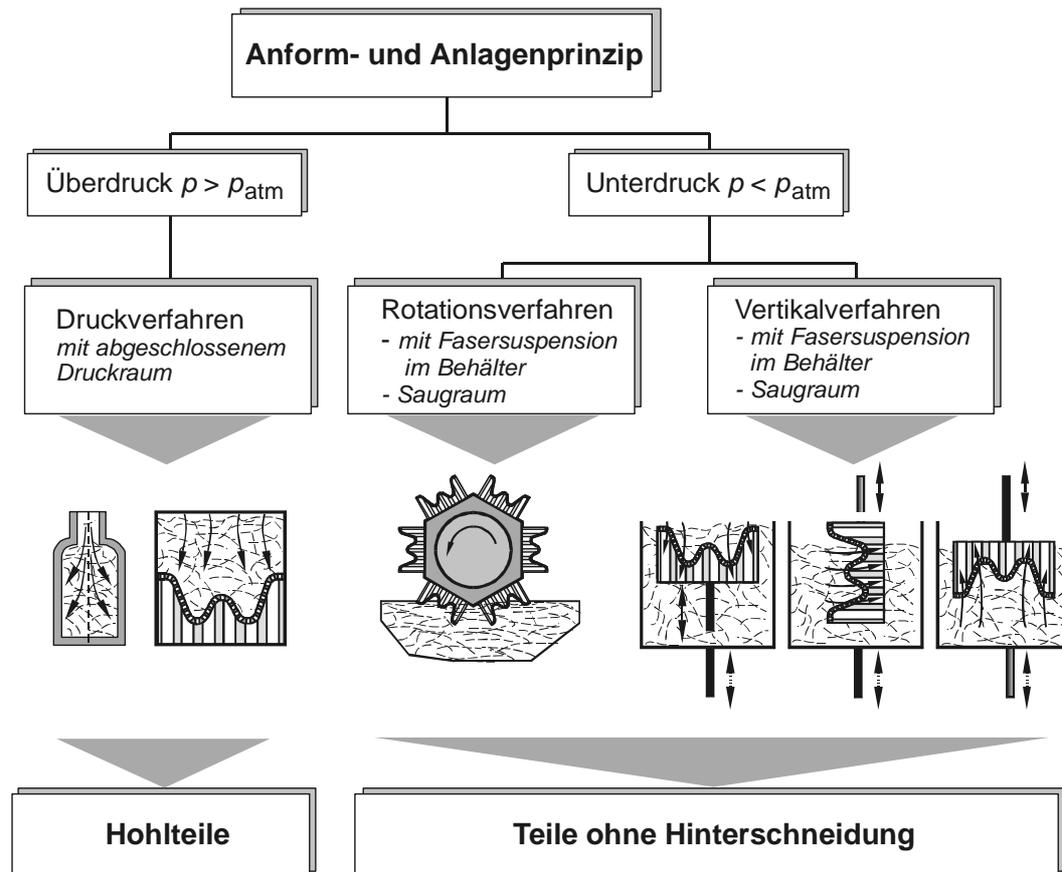


Bild 3.10: Anform- und Anlagenprinzip

Vertikalprinzip / Saugen

Ein Anlagenhersteller dieses Prinzips ist z. B. die Firma Markhorst in Hardenberg, Niederlande. Die Firma Heinrich Buhl GmbH aus Neuenkirchen ist ein Anwender solcher Maschinen. Für die Herstellung und den Vertrieb von Faserformprodukten hat Buhl im Januar 1997 den Geschäftsbereich Buhl Paper-Form gegründet.

Die Heinrich Buhl GmbH beschreibt in der Veröffentlichung /PRP97/ die Produkteigenschaften und die Herstellung von Faserformprodukten. Hergestellt werden hochwertige Produkte, die in allen Bereichen der Verpackungstechnik einsetzbar sind. Beispiele hierfür sind Verpackungen für technische Geräte und Teile, wie z. B. für Handys und Telefone. Faserform sei eine Alternative zu Formteilen aus expandiertem Polystyrol und Kunststofftieftieftteilen. Buhl ersetzte für die Firma Hengstenberg ein Wellpappentray durch ein Faserform-Tray. Diese Faserform-Trays können 15 Senf- bzw. Tomatenmarktuben aufnehmen. Hierdurch werden die Trays insgesamt mit einer Masse von drei Kilogramm, und damit relativ hoch, belastet. Inwieweit die Verpackung im Vorfeld auf die hohe Belastung entsprechend ausgelegt wurde bzw. wie die Festigkeit und Steifigkeit dieser Trays ermittelt wurde, wird nicht ausgesagt. Der Vorteil gegenüber den ursprünglichen Trays aus Wellpappe wird mit einer höheren Standfestigkeit bezeichnet. Darüber hinaus ermöglicht das Faserform-Tray die maschinelle Bestückung sowie die Stapelbarkeit der bestückten Trays ohne zusätzliche Verpackung. Durch die gelbe und rote Einfärbung der Faserform-Trays können die unterschiedlichen Produkte von den Kunden besser unterschieden werden. Ohne die Beeinträchtigung der Recyclingfähigkeit werden die Produkte durch die Verwendung eines Hydrophobierungsmittels auf Wachsbasis wasserfest imprägniert.

/VRU96/ beschreibt, dass Faserform eine Verpackungsalternative für hochwertige technische Güter ist; darüber hinaus strebt Buhl an, Faserform im Bereich der Blisterverpackungen einzusetzen. Eine Blisterverpackung aus Faserform, zum Verpacken von Insektizid, wurde in /VRU99b/ vorgestellt. Die Kunststoffhaube wurde dabei durch eine Faserformhaube ersetzt. /VRU98/ beinhaltet ein Interview mit Herrn Buhl; hier werden einige Fragen zur FachPack`97 und zu Faserform beantwortet.

Bezüglich des Herstellungsprozesses verweist /PRP97/ auf die Verwendung einer Faserformanlage von Markhorst. Diese Anlage zeichnet sich durch drei Trocknungsstationen aus, wobei die oberen Formen elektrisch und die unteren mit Gas beheizt werden. Hierdurch können Teile mit beidseitig glatten Oberflächen, mit geringen Wandstärken und hoher Stabilität hergestellt werden. Nähere Aussagen bezüglich der Stabilität werden auch hier nicht getroffen. Das Nesten und Entnesten der Faserformprodukte, d. h. das Ineinanderstapeln bzw. die Entnahme der Produkte, ist aufgrund der glatten Oberflächen in Magazinen durch Handlingautomaten möglich. Die Produktion von geringen Stückzahlen ist mittels dieser Maschine möglich, da zwei verschiedene Produkte gleichzeitig hergestellt werden können. **Bild 3.11** zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Vertikalanlage von Markhorst. Insgesamt werden für die Bestückung dieser Anlage 16 Formwerkzeuge benötigt, die unterschiedlich geartet sein müssen.

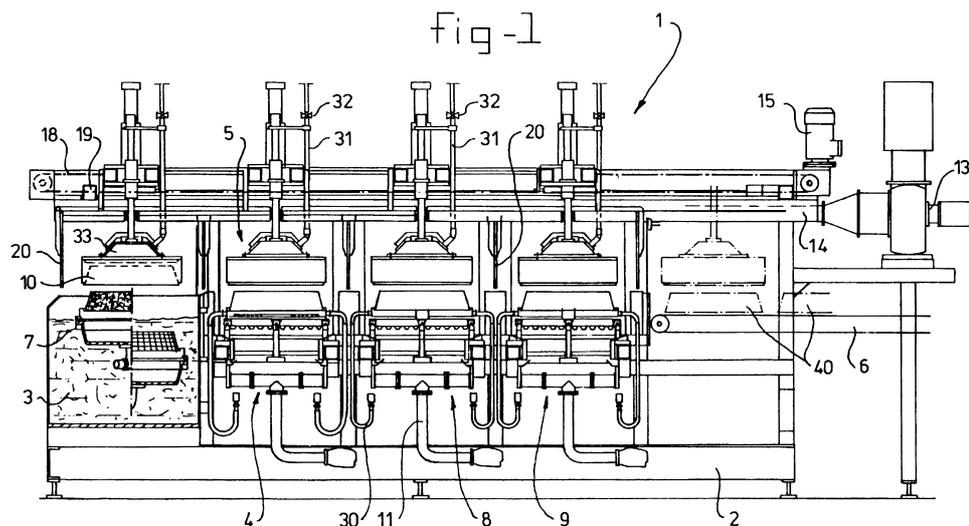


Bild 3.11: Vertikalanlage mit drei nachfolgenden Pressstationen /MAR98/

Bei der Herstellung von zwei verschiedenen Formteilen werden zwei unterschiedliche Anformwerkzeuge sowie die dazugehörigen Oberwerkzeuge benötigt, die das nasse Formteil an die Pressstation übergeben. Die drei Pressstationen benötigen wiederum sechs Oberwerkzeuge und sechs Unterwerkzeuge. Die Presswerkzeuge sind auch nicht identisch, da die Materialstärke des Formteils nach dem Anformen wesentlich dicker ist als die des fertigen Formteils. Die Materialstärke kann z. B. bis auf ein Fünftel der ursprünglichen Wandstärke komprimiert werden; somit nimmt der Spalt zwischen den zusammengefahrenen Pressformen von der ersten bis zur letzten Pressstation ab. Das Oberwerkzeug muss um den Betrag der Materialstärke größer sein als das Unterwerkzeug. Die Feuchtigkeit verdampft in den geschlossenen Pressformen und wird abgesaugt.

Die Anlage von Markhorst ist gemäß /PRP97/ nur 18 Meter lang, und ein Nachpressen der Teile im trockenen Zustand ist nicht mehr erforderlich. Das Pressen im trockenen Zustand begünstigt das Brechen der Fasern und verursacht eine raue Oberfläche. Kon-

krete Aussagen über Kosten, wirtschaftlich zu produzierende Stückzahlen, Werkstoffkenngrößen sowie zur Stabilität und Festigkeit sind in der Veröffentlichung nicht enthalten.

Rotationsprinzip / Saugen

Von Brødrene Hartmann wird das Rotationsverfahren eingesetzt; in /SAM96/ werden zehn Faserformmaschinen erwähnt, die entsprechend mit Rohstoff versorgt werden müssen. Jede Faserformanlage besitzt mehrere Formwerkzeuge, die um eine Achse rotieren. Die Anzahl der Formwerkzeuge ist abhängig von der Produktionsmenge. Sie werden in den Rohstoff eingetaucht und durch Anlegen eines Unterdrucks mit dem Rohstoff befüllt. Das Entformen der nassen Verpackung erfolgt an einer zweiten, entgegengesetzt rotierenden Anlage. Bis auf eine Restfeuchte von 7 % werden die Produkte anschließend bei 160 C° getrocknet, diese Restfeuchte ist für das Nachpressen erforderlich. Aussagen über Dimensionierungsvorschriften oder Kennwerte für Faserformverpackungen werden in /PRP89/ und /SAM96/ nicht genannt.

Bild 3.12 zeigt die Abbildung einer Hartmann-Anlage. Über die Breite der Anlage angeordnet befinden sich jeweils sechs Werkzeuge, die an zehn Stellen am Umfang drehbar befestigt sind. Die Abbildung zeigt die Abnahme- bzw. Übergabestation, mit deren Hilfe die Produkte vom Anformwerkzeug genommen werden. Die Anformanlage befindet sich vermutlich darunter und ist somit nicht erkennbar.

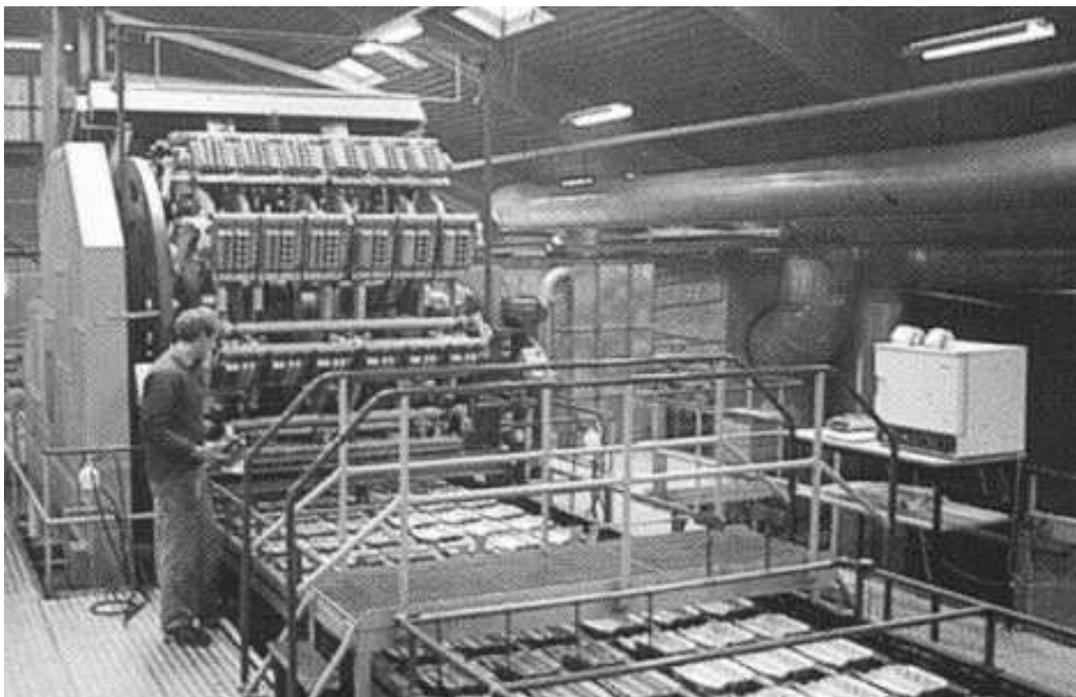


Bild 3.12: Rotationsanlage von Brødrene Hartmann /HAR95/

Die in **Bild 3.13** mit der Nummer 26 gekennzeichnete Abnahme- bzw. Übergabestation legt die gefertigten Faserformprodukte direkt auf ein Transportband. Bei einer Umdrehung werden somit 60 Faserformprodukte hergestellt. Insgesamt müssten für diese Anlage 120 Formwerkzeuge vorliegen. Die Formteile werden hierbei allerdings nur geringfügig gepresst, geglättet und entwässert. Eine zusätzliche Trocknung in einem Trocknungsofen ist hier noch erforderlich. Die Pressung und Trocknung in Presswerkzeugen hat den Vorteil, dass die Formteile eine bessere Oberflächenqualität aufweisen und kei-

ne Schrumpfung mehr stattfinden kann. Nachteile des Veredelungsprozesses Pressen liegen in dem weiteren Bearbeitungsschritt und den hierfür zusätzlich benötigten Presswerkzeugen (Ober- und Unterwerkzeug). Die Kosten eines Faserformproduktes sind abhängig von der Produktionsstückzahl, je größer die Stückzahl, desto geringer werden die Formkosten pro Einheit.

Gemäß /APK92/ beträgt die Umrüstzeit der Bronzeformen 8 bis 10 Stunden. Die Anzahl der auszutauschenden Formen wird nicht angegeben, aber somit ist die Produktion von hohen Stückzahlen für die Wirtschaftlichkeit von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der geringeren Anzahl an Formwerkzeugen ist die Umrüstzeit bei dem Vertikalverfahren erheblich kürzer, jedoch können auch nur kleinere Stückzahlen produziert werden.

Bild 3.13 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer rotatorischen Faserformanlage, die zur Herstellung von Faserform-Menüschalen, siehe /VRU00a/, eingesetzt wird. Das Laminiieren der Kunststoffschalen erfolgt durch einen zweiten Prozessschritt. Der prinzipielle Aufbau dieser Anlage ist in **Bild 3.14** gezeigt. **Bild 3.15** zeigt die gefertigte Menüschale, wobei zunächst noch mehrere Menüschalen verbunden sind.

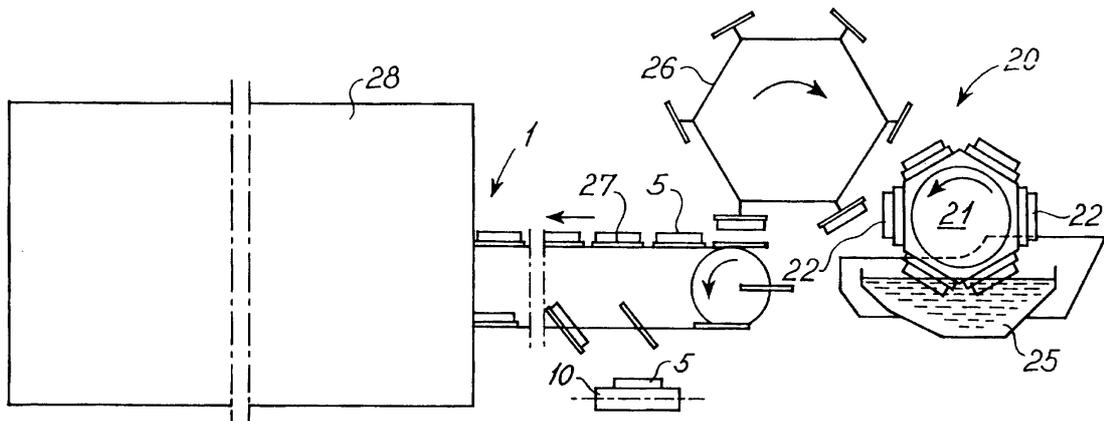


Bild 3.13: Prinzip der Rotationsanlage /HAR01/

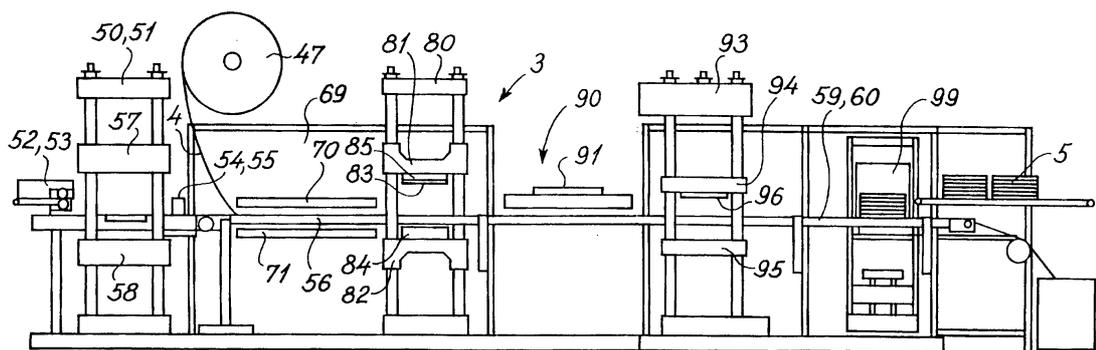


Bild 3.14: Laminiereinheit /HAR01/

Die Lebensmittelverpackungen Fiber Pac der Firma AssiDomän sind nach Aussage von Henry Alioth gegenüber Kunststoffverpackungen gleichwertig, aber wesentlich umweltfreundlicher /VRU99a/. Konkrete Daten und Fakten werden hier nicht genannt. Weitere Aussagen von Henry Alioth von AssiDomän betreffen die starke Nachfrage nach umweltfreundlichen Produkten, da immer mehr Länder Umweltgebühren einführen und eine erweiterte Produkthaftung auf die Lebensdauer des Produktes und deren Verpackung beziehen. Zur Fertigungstechnologie wird der Einsatz eines völlig neuen und rationellen

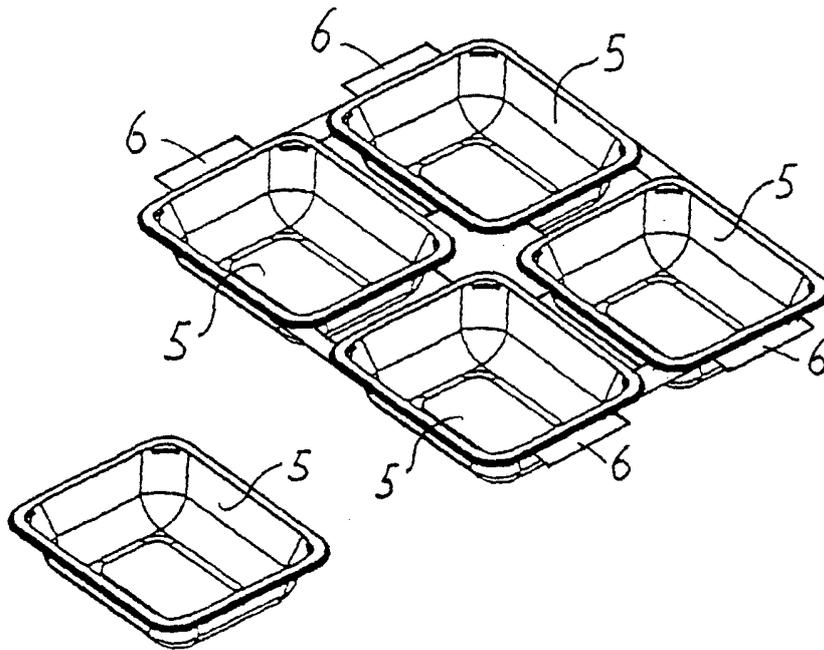


Bild 3.15: Menüschale von Brødrene Hartmann /HAR01/

Formgebungsverfahren genannt. Hierdurch sei die Herstellung kleiner Serien möglich, und der Austausch der Formwerkzeuge würde nur noch einen Tag statt wie sonst üblich eine Woche dauern. Konkrete Aussagen über die Fertigungstechnologie der Faserformprodukte werden nicht getroffen.

/VRU00a/ nennt alleine für das Unternehmen Brødrene Hartmann einen jährlichen Anfall an produzierten Faserformverpackungen in Höhe von drei Milliarden Stück. Dabei werden nur Verpackungen, nicht jedoch Funktionsteile berücksichtigt; außerdem wird lediglich ein Hersteller betrachtet. Damit ist die jährlich Produktionsmenge als ein Vielfaches dieses Wertes anzusehen.

Vertikalprinzip / Drücken

Beim Anformen durch Überdruck wird das Vertikalprinzip eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, das früher insbesondere zur Herstellung von Hohlteilen verwendet wurde. Kücherer beschreibt in /KÜC95/ das Herstellverfahren und die entsprechenden Blaswerkzeuge, die bis 1970 von der Firma Cartofont in Aarau in der Schweiz zur Herstellung von z. B. Flaschen, Dosen und Eimern /KÜC93/ eingesetzt wurden. Zur Herstellung von Hohlkörpern ist es erforderlich, die Formwerkzeuge klappbar bzw. geteilt zu gestalten, anderenfalls ist das zerstörungsfreie Entfernen der Hohlkörper nicht möglich. Laut /KÜC95/ bestanden die Formwerkzeuge aus vier am oberen Ende drehbar gelagerten Klappen. Entsprechende Einsätze in den Klappen erhielten die Form des herzustellenden Produktes, und durch das Austauschen der Einsätze konnten unterschiedliche Produkte hergestellt werden. Durch das Öffnen der Klappen und das Verfahren der Bodenplatte nach unten konnten die gefertigten Produkte entnommen werden. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Produkte einen Wassergehalt von 60 bis 70 %, dies erforderte die anschließende mehrstündige Trocknung im Trockenkanal bei ca. 90 °C. Für einen erneuten Anformprozess wurde die Bodenplatte nach oben gefahren, die Klappen geschlossen und verriegelt. Zur Entwässerung waren 0,4 – 0,5 mm große Öffnungen vorgesehen, an denen sich die Fasern absetzten und durch die das Wasser hindurch gelangte.

Für die Einspeisung des Rohstoffes in 12 Blasstationen stand bei der Firma Cartofont ein Behälter mit 3.000 bis 4.000 Litern Fassungsvermögen zur Verfügung. Das Umrühren des Rohstoffes verhinderte das Absetzen, und durch die Beimengung von 16 prozentigem in Wasser gelösten Aluminiumsulfat wurden die Produkte wasserabstoßend. Der Zufluss des Faserbreis wurde entsprechend dosiert und über einen Stellhahn unterbrochen. In das Werkzeug wurde ein Luftstrahl von sechs bar und 200 °C eingeleitet, hierdurch lagerten sich die Fasern an der Wandung des Werkzeuges ab. Abhängig von der Größe des herzustellenden Produktes dauerte der Anformvorgang 20 bis 60 Sekunden. Kleinere Flaschen wurden z. B. in einer Doppelform hergestellt, um die Leistung der Anlage entsprechend zu verdoppeln. Bei einem Arbeitstag von 8 Stunden und einer Taktzeit von 60 Sekunden konnten pro Anlage demnach 480 Produkte und bei einer Taktzeit von 20 Sekunden somit die dreifache Leistung, 1440 Produkte, hergestellt werden. Ein Grat am oberen Rand wurde durch Schleifen entfernt.

In /PAI67/ wird ebenfalls ein Druckverfahren beschrieben, bei dem die Formteile mit einem Luftdruck von 3,5 bar und einer Temperatur von 480 °C angeformt werden. Nach dem Anformprozess beträgt die Feuchtigkeit der Produkte ca. 45 bis 50 %. Beim Saugverfahren wird bei /PAI67/ eine höhere Feuchtigkeit von 85 % angegeben. Als Einsatzbeispiel wird die Verpackung für Whiskyflaschen für den Export genannt.

Nach dem heutigen Stand der Technik wird das Verfahren von der Kao Corporation, Tokio, eingesetzt. In /VRU00b/, /VRU01a/ und /VRU01b/ wird von der Kao Corporation, Tokio, eine neuartige Papierflasche vorgestellt. Kao ist der Mutterkonzern vom Haarpflegespezialisten Goldwell GmbH, Darmstadt. Aufgrund von Umweltauflagen müssen Verpackungen aus Papier oder Kunststoffen in Japan zurückgenommen und recycelt werden. Darüber hinaus sind die Entsorgungskosten pro Kilogramm Kunststoff fast viermal so hoch wie die für ein Kilogramm Papier. Die Herstellung der Faserformflasche erfolgt durch einen vierstufigen Prozess. Im ersten Schritt wird die Form vor-entwässert, im zweiten Schritt wird mit Luft und im dritten Schritt mit Dampf entwässert. In einem letzten Schritt wird das Bauteil mit einem Gummischlauch gepresst. Genauere Angaben über das Fertigungsverfahren werden in /VRU00a/ nicht getroffen, lediglich die Dauer eines Anformprozesses wird mit ca. 30 Sekunden beziffert. Laut /VRU00a/ gingen aus dieser Erfindung 17 Patente hervor, die gegenüber 150 Verfahren überprüft wurden. Eine durchgeführte Patentrecherche lieferte als Ergebnis mehrere europäische und internationale Patentanmeldungen. Bei diesen Verfahren bestehen sehr viele Ähnlichkeiten zu dem bereits 1925 eingesetzten Verfahren der Firma Cartofont, darüber hinaus ist das Nachpressen der Produkte mit einem Gummibeutel o. ä. bereits 1890 für /OZO90/ patentiert worden.

Gegenüberstellung Vertikal- und Rotationsprinzip

Beim Vertikalprinzip werden die Formteile durch einen getakteten, un stetigen Prozess stückweise hergestellt. Beim Rotationsverfahren werden die Formteile im Durchlaufverfahren hergestellt und geringfügig gepresst. Das Pressen von räumlich gestalteten Formteilen erfordert Presswerkzeuge, die aus einem Ober- und Unterwerkzeug bestehen und die Kontur des fertigen Formteils aufweisen müssen. Demnach muss eine Positiv- und eine Negativform hergestellt werden. Im geschlossenen Zustand ist der Spalt zwischen beiden Pressformen die herzustellende Materialdicke des entsprechenden Formteils. Folglich kommt jeder Bereich des Formteiles mit dem Bereich des Presswerkzeuges in Berührung, damit das Formteil über den ganzen Bereich gepresst wird. Bei vertikal verfahrenen Presswerkzeugen ist das Pressen problemlos möglich.

Das Pressen im Rotationsverfahren bzw. Durchlaufverfahren ist ohne Weiteres nicht möglich. Da die Pressformen auf einer Kreisbahn ineinander und auseinander fahren müssen, sind sie mit Zahnrädern vergleichbar. Die Zähne des einen Zahnrades stellen dabei die Positivform (Zahn) und die Gegenform des andern die Negativform (Zahnlücke) dar. Im jeweiligen Berührungspunkt (Presspunkt) müssen die Zahnräder und Pressformen die selbe Geschwindigkeit aufweisen, sonst würden sie ineinander eindringen bzw. voneinander abheben. Damit diese Bedingung erfüllt wird, muss die Kontur das allgemeine Verzahnungsgesetz erfüllen, d. h. die Senkrechte (Normale) im jeweiligen Berührungspunkt (Presspunkt) muss durch den Wälzpunkt C laufen /KÜN01/. Zu den Konturen, die in dieser Form lauffähig sind, gehören die Evolventen- und Zykloidenverzahnungen, weitere Sonderverzahnungen haben heute praktisch keine Bedeutung. Wenn Zahnräder das Presswerkzeug darstellen, würde die herzustellende gepresste Kontur das Bezugsprofil darstellen, d. h. ein Profil mit geradlinig verlaufenden Flanken, die unter dem Eingriffswinkel $\alpha = 20^\circ$ geneigt sind. Alle Werkzeuge, deren Teilbereiche von diesem Profil abweichen, müssen hier großes Spiel aufweisen und können in diesem Bereich nicht pressen. Das Pressen von komplizierten, räumlichen Teilen ist somit nicht möglich, sondern erfordert eine vertikale Pressrichtung.

Die Veröffentlichungen von Ebmeyer /EBM94b/ beinhalten Aussagen über die Herstellungstechnologie der Faserformprodukte. Die meisten anderen Veröffentlichungen treffen hierüber keine konkreten Aussagen; auch Bilder über Formwerkzeuge und Anlagen zur Herstellung dieser Produkte sind sehr selten und stellen das Firmen Know-how dar. Ebmeyer beschreibt die Abhängigkeit des eingesetzten Verfahrens von der Auflagenhöhe. Prinzipiell werde aber bei allen Verfahren die Papiermasse angesaugt; dies erfordere eine entsprechende Siebform. Bei großen Auflagen, dies sei z. B. bei der Herstellung von Obst oder Gemüseschalen der Fall, werde das Rotationsverfahren eingesetzt. Die entsprechenden Siebformen befinden sich dabei auf einer rotierenden Achse und werden nacheinander in einen Behälter mit der Papiermasse getaucht. Die Fasern werden angesaugt, und nach dem Auftauchen wird dem nassen Teil die Feuchtigkeit weiter entzogen. An der Übergabestation befindet sich ebenfalls eine rotierende Achse mit entsprechenden Gegenformen, hier wird das Teil übergeben und kann weiteren Trocknungsprozessen zugeführt werden.

Weiterhin unterscheidet Ebmeyer das horizontale und vertikale Schöpfverfahren. Das Prinzip aller Verfahren sei dabei gleich; nur der Aufbau der Maschinen würde stark variieren und beruhe laut Ebmeyer oft auf Eigenkonstruktionen. Die erzielten Oberflächengüten sind vom Verfahren unabhängig. Die Teile weisen immer auf der der Siebseite des Formwerkzeuges zugewandten Seite eine relativ glatte Oberfläche auf, wogegen die andere Seite relativ unregelmäßig geformt und rau ist. Um dennoch eine höhere Qualität in Form von beidseitig glatten Oberflächen, gleichmäßigen Wandstärken und genaueren Toleranzen zu realisieren, müssen die Teile nachgepresst werden. Die Häufigkeit der Nachpressvorgänge ist dabei entscheidend für die Qualität. Dieser zusätzliche Arbeitsgang bedeutet höhere Qualität und mehrere Formen und somit höhere Kosten. Hierdurch wird deutlich, warum Brødrene Hartmann /VBE94a/ die wirtschaftliche Produktion der Faserformprodukte erst ab einer Stückzahl von 100.000 ermöglichen kann. Dies bedeutet zwangsläufig, dass die Herstellung von Musterteilen und Prototypen nicht ohne Weiteres wirtschaftlich möglich ist. Hinsichtlich der Eignung und Prüfung der Verpackungen nennt Ebmeyer in /EBM94b/ die Anwendung von Transporttests oder Fallversuche. Hierdurch werden allerdings Aussagen über das spezielle getestete Pro-

dukt getroffen und nicht über den verwendeten Werkstoff. Konkretere Aussagen über diese Untersuchungen werden auch hier nicht getroffen.

Nachfragen bezüglich der Fertigungstechnologie bei der Firma Stabernack Jr. & Partner im März 2002 ergaben folgendes: Das Faserformverfahren wurde im Zeitraum von 1992 bis ca. 1996 zur Herstellung von Verpackungen, z. B. für Miele Bodenstaubsauger, und für die Firma Grundig (Verpackungen für Videogeräte) eingesetzt. Die Kosten für die Verpackung lagen geringfügig über den Kosten von EPS-Verpackungen. Der Rohstoff wurde seinerzeit aus den durch die eigene Produktion der Wellpappe entstandenen Überresten hergestellt. Der eingesetzte Rohstoff war relativ hochwertig und konnte ohne Probleme verarbeitet werden. Nach dem Anformprozess wurden einige Produkte im Trocknungsofen und einige in zusätzlichen Presswerkzeugen getrocknet. Dies war aufgrund der geforderten Qualität bei den Staubsaugerverpackungen der Fall. Problematisch waren die Schrumpfungen des Materials bei der Trocknung und die Herstellung der geforderten Qualität. Zur Untersuchung der Verpackung wurden Falltests nach DIN mit dem verpackten Teil durchgeführt. Aufgrund der sehr hohen Produktionskosten, die von der Werkzeugentwicklung und -fertigung bis hin zur Trocknung der nassen Formteile entstanden, wurde die Faserformproduktion eingestellt. Die vorhandenen Anlagen von der Firma Markhorst (Vertikalprinzip) sowie Tomlinson-Anlagen (Rotationsprinzip) wurden verkauft.

3.2 Auslegungskriterien für Faserformprodukte

3.2.1 Allgemeine Auslegungs- und Dimensionierungsvorschriften

Die hinreichende Auslegung und Dimensionierung eines Bauteils, Maschinenelements o. ä. ist für dessen ordnungsgemäßen Einsatz bzw. Anwendung von entscheidender Bedeutung. Ist ein Bauteil nicht hinreichend dimensioniert, so kann es den wirkenden Belastungen nicht stand halten, d. h. die Steifigkeit oder Festigkeit ist nicht ausreichend. Dies führt zu Verformungen oder zur Zerstörung des Bauteils.

Ein Bauteil ist hinreichend dimensioniert, wenn die wirkenden Belastungen kleiner als die zulässigen Belastungen des Bauteils sind. Zur Auslegung und Dimensionierung müssen somit die wirkenden Belastungen, im Wesentlichen Kräfte und Momente, bekannt sein; diese hängen allerdings vom jeweiligen Einsatzfall bzw. der Verwendung ab. Zur Bestimmung der zulässigen Belastungen eines Bauteils ist die Kenntnis der bauteilspezifischen Kennwerte erforderlich. Hierzu gehören beispielsweise die Geometrie und die Werkstoffkennwerte. Bei der Konstruktion eines technischen Produkts ist es oftmals schwierig, die Abmessungen bzw. die Geometrie der Bauteile abhängig von den wirkenden Belastungen auszulegen. Um hier zunächst Anhaltswerte zu schaffen ist es üblich, die Bauteile zunächst überschlägig auszulegen und an die jeweiligen Randbedingungen anzupassen und erst danach durch genauere Berechnung zu überprüfen. Dies trifft z. B. für die Auslegung von Achsen und Wellen und auch für die Auslegung von Zahnrädern zu /KÜN01/. Mit Hilfe überschlägiger Berechnungsformeln wird die Geometrie der Bauteile zunächst grob ausgelegt; danach erfolgt die Gestaltung und Festlegung der endgültigen Geometrie. Hieran anschließend wird die Nachrechnung vorgenommen, wobei insbesondere die Überprüfung der Bauteile, inwieweit den wirkenden Belastungen stand gehalten werden kann, durchgeführt wird. Falls die Nachrechnung keine hinreichende Dimensionierung liefert, sind ggf. Korrekturen hinsichtlich der Geo-

metrie bzw. der Materialauswahl erforderlich. **Bild 3.16** zeigt eine Übersicht über die prinzipielle Vorgehensweise bei der Auslegung und Dimensionierung von Produkten.

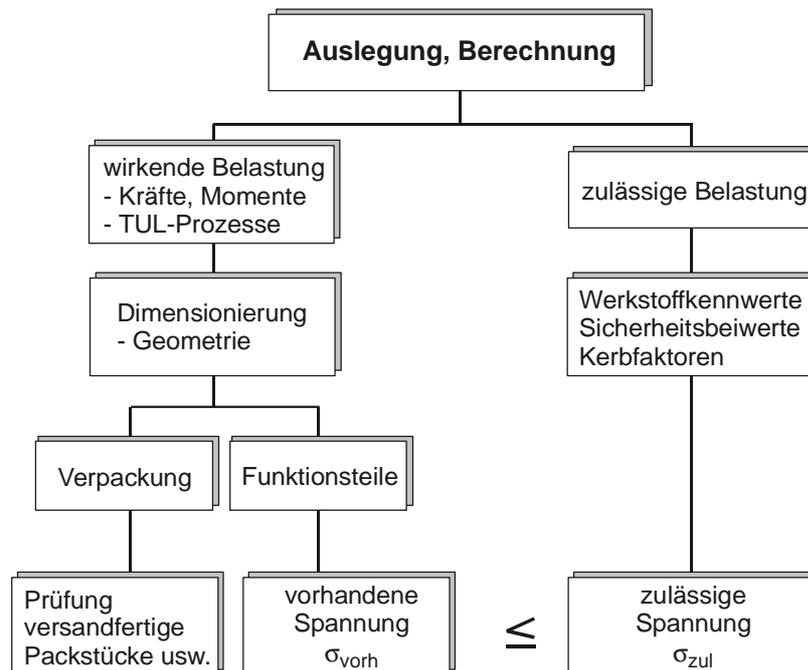


Bild 3.16: Vorgehensweise bei der Auslegung und Dimensionierung

Bei metallischen Werkstoffen bestehen genormte Verfahren zur Untersuchung der jeweiligen Werkstoffkennwerte. Diese Kennwerte sind für nahezu alle metallischen und auch für die meisten Kunststoffe bekannt; sie eignen sich zur Auslegung bzw. Dimensionierung. Darüber hinaus sind die Abmessungen vieler Halbzeuge und Maschinenelemente, wie Zahnräder, Wälzlager usw., genormt. Die Auslegungsvorschriften basieren auf Normen oder Herstellerangaben; sie liefern eine Grundlage, die dann mit großer Wahrscheinlichkeit eine hinreichende Dimensionierung verspricht. Hierdurch wird bereits in der Konstruktionsphase das Bauteil entsprechend ausgelegt.

Der heutige Hauptanwendungsbereich der Faserformteile liegt bei Verpackungen. Für diesen Anwendungsfall ist es insbesondere schwierig, die wirkenden Belastungen zu ermitteln, da diese z. B. stark von der jeweiligen Art des Transports, Umschlags und der Lagerung der Verpackung abhängig sind. Ein weiterer großer Einflussfaktor bei Verpackungen ist sicherlich auch der allgemeine Umgang mit der Verpackung, der nicht ohne Weiteres abschätzbar ist.

3.2.2 Auslegungskriterien für Faserformprodukte und Verpackungen

Zur Auslegung von Produkten in der Entwicklungsphase müssen zunächst die wirkenden Belastungen bestimmt oder abgeschätzt und mit den zulässigen Werten verglichen werden, vgl. **Bild 3.16**. Dies erfordert die Kenntnis der nötigen Kennwerte, die abhängig vom Anwendungsfall und den eingesetzten Werkstoffen sind. Bei Verpackungen ist dies besonders schwierig, da ein Zusammenspiel von jeweiligen Packstoff, Packmittel und Packgut vorliegt. **Bild 3.17** zeigt eine Übersicht über diese Begriffe des Verpackungswesens und deren Bedeutung.

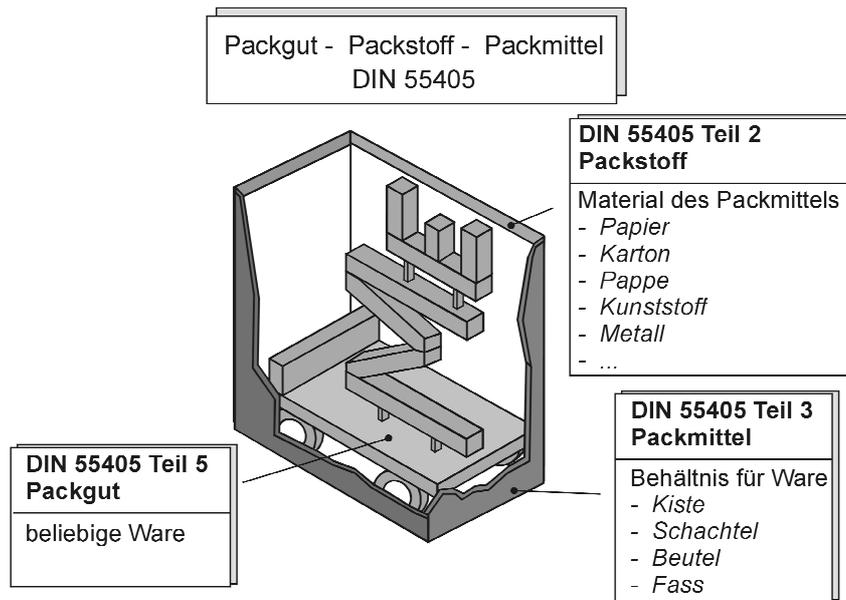


Bild 3.17: Begriffe des Verpackungswesens

Die entsprechenden Begriffe sind in DIN 55405 genormt. Unter dem Packgut versteht man danach das „Gut, das zu verpacken oder verpackt ist“. Dagegen handelt es sich beim Packmittel um ein „Erzeugnis aus Packstoff, das dafür bestimmt ist, das Packgut zu umhüllen oder zusammenzuhalten, damit es versand-, lager- und verkaufsfähig wird.“. Beim Packstoff handelt es sich um einen „Werkstoff, aus dem Packmittel und Packhilfsmittel hergestellt werden.“.

Um eine Aussage über die Eignung einer Verpackung treffen zu können, gibt es einige genormte Verpackungsprüfungen. DIN 55 405 Teil 1 /DIN88a/ stellt eine Übersicht über die technologischen Verpackungsprüfungen dar. Nachteil dieser Verpackungsprüfungen ist die Durchführung der Untersuchungen am Endprodukt, oftmals stellt dieses das versandfertige Packstück dar. Ist die Verpackung nicht hinreichend dimensioniert, so muss basierend auf den Ergebnissen neu dimensioniert und gefertigt werden; erst im Anschluss hieran können die Produkte neuen Tests unterzogen werden. Eine separate Untersuchung des Packmittels, Packstoffes bzw. Packhilfsmittels ist kaum möglich. Diese Problematik wird an mehreren Stellen der Literatur, beispielsweise in /KAß95a/, beanstandet.

In /KAß95a/ werden der Schutz stoß- und schwingungsempfindlicher Güter sowie die Lagefixierung während der TUL-Prozesse (Transport, Umschlag, Lagerung) als Aufgaben von Packhilfsmitteln beschrieben. Bei hinreichend dimensionierten Packhilfsmitteln führt dies zur Schadensminimierung. Allerdings wird das Fehlen von exakten Richtlinien zur Dimensionierung von Polsterstoffen bemängelt, zumindest in den meisten Fällen liegt hierfür kein Regelwerk vor. Darüber hinaus existieren laut dieser Veröffentlichung keine Zahlen und Berechnungsformeln über Transportbelastungen und Absorptionsvermögen der Polsterstoffe. Zur Realisierung der Polstereigenschaft bzw. -wirkung der Polsterstoffe werden in der Veröffentlichung drei Möglichkeiten genannt: Die erste beruht auf der Kompression und Expansion von Luft; hierzu zählen z. B. Luftpolsterfolien sowie geschlossenporige Schaumstoffe aus PE, PS und PUR. Die Polsterwirkung der Verpackungen ist dabei von der Materialdicke abhängig. Bei PE, PS und PUR handelt es sich um Kurzzeichen für Kunststoffe, die nach DIN EN ISO 1043-1 /DEI02/ genormt sind (PE = Polyethylen, PS = Polystyrol, PUR = Polyurethan).

Die zweite Polstervariante beruht auf mechanischen Federeigenschaften der Verpackungen; hier werden Beispiele genannt wie Federn aus Metall und Vollpolster aus Wellpappe. Auf die grundsätzliche Unterscheidung der Dimensionierungsvorschriften von EPS (expandiertem Polystyrol) nach DIN 55 471 /DIN83a/ und die der federnden Verpackungen wird hingewiesen. Bei der Berechnung von Stahlfedern wird Bezug auf die Federberechnung des allgemeinen Maschinenbaus genommen. Abhängig von der jeweiligen konstruktiven Lösung der federnden Verpackungen beeinflusst die Materialdicke das Dämpfungsvermögen.

Die konstruktive Gestaltung der Verpackung wird als dritte Möglichkeit, eine Polsterwirkung zu erzielen, angegeben. Als Verpackungsbeispiel werden hier Faserformteile genannt. Zur Dimensionierung der Faserformverpackungen wird auf die erforderliche Kenntnis der Steifigkeiten und Widerstandsmomente sowie auf deren gegenseitige Beeinflussung in den drei Raumkoordinaten hingewiesen. Die Fertigungsschwankungen, die während des Herstellungsprozesses von Faserformverpackungen entstehen, müssen bei der Auslegung berücksichtigt werden. Konkretere Aussagen über Werkstoffkennwerte und Fertigungsverfahren werden nicht getroffen. Die Schwankungen bei der Fertigung können durch unterschiedliche Materialzusammensetzungen und durch unterschiedliche Parameter im eigentlichen Fertigungsprozess entstehen. Die Fertigungstechnologie der Faserformverpackungen ermöglicht es dabei kaum, exakt gleiche Teile herzustellen. Wie groß diese Schwankungen sind und welche Auswirkungen sie haben ist derzeit noch nicht wissenschaftlich untersucht worden; weder in /KAß95a/ noch in weiteren Veröffentlichungen sind hierüber Angaben enthalten.

In /KAß95a/ wird weiterhin die Kompensierung der fehlenden Berechenbarkeit der Verpackungen durch Tests an Fertigungsmustern mit Hilfe der üblichen Methoden der Packstückprüfung erwähnt. Weitere Aussagen betreffen die Zusammenwirkung zwischen dem Packgut und der Verpackung sowie die dabei auftretenden Einflüsse seitens der Außenwelt während Transport, Umschlag und Lagerung. Als Belastungen zwischen Verpackung und Packgut werden Druck, Stoß, Temperatur, relative Feuchtigkeit und die jeweilige Dauer oder Anzahl der Lastimpulse sowie deren Intensität genannt. Weiterhin bemängelt werden fehlende Kennwerte hinsichtlich der zu erwartenden Belastungen, die als Lastannahmen angesetzt werden könnten, sowie fehlende Aussagen über die Empfindlichkeit der Verpackungen auf unterschiedliche Belastungen. Diese Kenngrößen sind für eine belastungsgerechte Gestaltung jedoch unbedingt erforderlich.

In /KAß95a/ werden auch Richtwerte für Beschleunigungen in Abhängigkeit vom Packgut sowie die Häufigkeit von Fallhöhen abhängig von der Umschlagsart angegeben, die aus anderen Literaturstellen übernommen worden sind. Bei der Beurteilung der Stoßbelastung wird darauf hingewiesen, dass die Fallhöhe und der entsprechende Aufprallboden dabei von Bedeutung sind. Die Fallhöhe ist dabei stark von dem manuellen oder maschinellen Umschlag abhängig. Es werden weiterhin die Zusammenhänge der genannten Einflussgrößen betrachtet, eine Ableitung von Festigkeits- und Steifigkeitsparametern, die für eine rechnerische Auslegung von Produkten erforderlich wären, erfolgt dagegen nicht.

DIN 55471, Teil 2, /DIN87/ gibt Kennwerte für die Berechnung und Gestaltung von Verpackungsformteilen aus Polystyrol-Schaumstoff in Abhängigkeit von den jeweiligen Rohdichten des EPS an. Das dargestellte Rechenverfahren eignet sich nur für Verpackungspolster und setzt die Kenntnis des Stoßfaktors G des jeweiligen Packgutes vor-

aus. Darüber hinaus enthält /DIN87/ zulässige Druckspannungen sowie spezifische Polsterdaten, weitere mechanische Kenndaten sind nicht enthalten bzw. nicht auf Faserformprodukte übertragbar.

Donga /DON01/ untersucht die Belastungen von Faltschachteln aus Wellpappe. Dabei werden sowohl die klimatischen Einflüsse als auch Belastungen, wie z. B. Schwingungen und Stöße, die bei Transportvorgängen vorkommen, mit berücksichtigt. Darüber hinaus wird erstmalig ein Berechnungsansatz zur Dimensionierung von Faltschachteln und Verpackungen aus Wellpappe abgeleitet. Auf Faserformprodukte sind die Ergebnisse nicht übertragbar.

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften von Faserformprodukten bestehen mehrere DIN-Normen: DIN 55405 beschreibt Begriffe für das Verpackungswesen. In Teil 7 dieser Norm sind Eigenschaften und Prüfverfahren genormt. Im Wesentlichen werden dabei Begriffsdefinitionen durchgeführt; nähere technische Angaben zu den einzelnen Prüfverfahren werden dagegen nicht gemacht. DIN EN ISO 25651 /DEN93b/ definiert Maßeinheiten zum Bezeichnen von Eigenschaften für Papier, Pappe und Zellstoff. Die angebenen Einheiten sind insbesondere auf Bahnen definierter Dicke zugeschnitten und mit Werkstoffeigenschaften im Sinne des Maschinenbaus nicht zu vergleichen. Die Unterteilung in der Norm erfolgt nach den jeweiligen Eigenschaften, wie z. B. Festigkeits-, Biege- und Oberflächeneigenschaften usw. Zu jeder Eigenschaft ist die Maßeinheit sowie das in der Internationalen Norm beinhaltete Prüfverfahren angegeben. **Bild 3.18** zeigt eine Übersicht über genormte Verpackungsprüfungen.

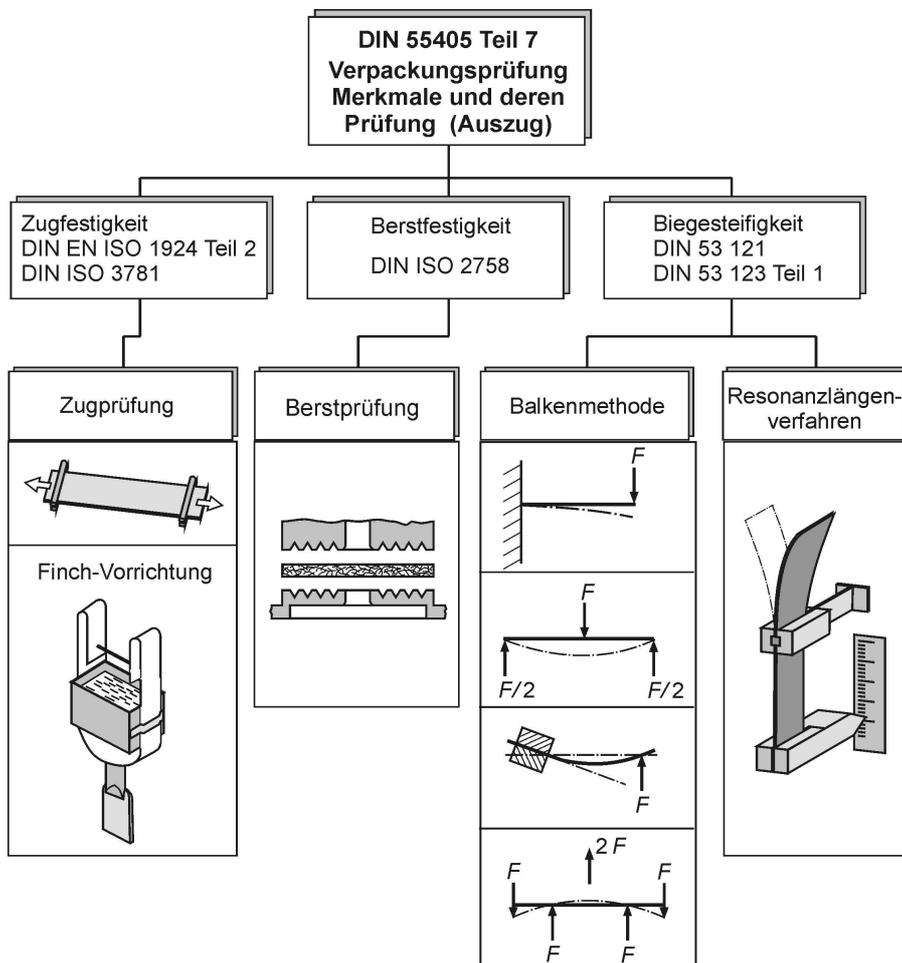


Bild 3.18: Übersicht über technologische Verpackungsprüfungen

DIN EN ISO 1924 Teil 2 /DEI95/ gibt an, wie unter Zugbelastung die breitenbezogene Bruchkraft und der Elastizitätsmodul bestimmt werden können. Weiterhin werden Prüfgeräte und Versuchsdurchführung beschrieben. DIN ISO 3781 beschreibt die Parameter, die erforderlich sind, um die entsprechenden Kennwerte nach dem Eintauchen in Wasser zu ermitteln.

Die Berstfestigkeit von Papier und Pappe wird in DIN ISO 2758 /DIO02a/ und DIN ISO 2759 /DIO02b/ betrachtet; DIN ISO 3689 /DIO94b/ behandelt die Bestimmung dieser Kenngröße nach dem Eintauchen in Wasser. Auch in diesen Normen sind, wie auch in den oben erläuterten Normen zur Zugfestigkeit, keine Angaben verfügbar, die auf die vorliegende Problemstellung mit ausschließlicher Biegebelastung übertragen werden können.

Die Ermittlung der Biegesteifigkeit kann nach der Balkenmethode gemäß DIN 53121 /DIN96a/ oder nach dem Resonanzlängenverfahren gemäß DIN 53123 /DIN78a/ durchgeführt werden. Beide Normen gelten für die Prüfung von Papier und Pappe. In DIN 53121 /DIN96a/ wird die Biegesteifigkeit auf die Breite des Prüfkörpers bezogen. Als Prüfverfahren werden das Zweipunkt-Verfahren, insbesondere auch mit drehbarer Einspannung, das Drei- und das Vierpunkt-Verfahren beschrieben. Diese Prüfverfahren dienen wiederum zur Untersuchung von bahn- bzw. plattenförmigen Prüfkörpern und sind daher kaum auf den im vorliegenden Fall zu untersuchenden dreidimensionalen Körper übertragbar. Das Zweipunkt-Verfahren mit drehbarer Einspannung erscheint jedoch prinzipiell erfolgsversprechend, um am zu untersuchenden Objekt, der Unterarmorthese, die Belastungen zu simulieren, die im realen Anwendungsfall auftreten. Die Konzeptionierung einer entsprechenden Versuchsanlage soll daher in Anlehnung an die hier beschriebene Anordnung erfolgen.

Beim Resonanzlängen-Verfahren DIN 53123 /DIN78a/ wird die Probe in eine Zugklemme eingespannt und durch eine Schwingklemme hindurch gezogen. Die Schwingklemme wird mit einer Frequenz von 25 Hz bei einer Amplitude von maximal 0,2 mm beaufschlagt. Durch die Messung der Resonanzfrequenz der Probe kann die Biegesteifigkeit S in N mm berechnet werden. Darüber hinaus lässt sich der Elastizitätsmodul E rechnerisch ermitteln.

Die in der DIN-Normen beschriebenen Kenngrößen sowie die Verfahren zu deren Ermittlung sind nicht ohne weiteres auf die vorliegende Problemstellung zu übertragen: Aufgrund der Betrachtung von bahnenförmigen Produkten, wie sie in der Papierindustrie vorliegen, ergeben sich Kenngrößen, die für Funktionsteile nicht anwendbar sind. In der weiteren Betrachtung bleibt daher keine andere Möglichkeit, als die entsprechenden zu prüfenden Bauteile definierten Belastungen auszusetzen und die dabei auftretenden Verformungen sowie die Bruchfestigkeit zu ermitteln. Die Ermittlung der Kenngrößen kann dann mit elementaren Berechnungsmethoden der Mechanik erfolgen.

Die Artikel /EBM94a/ und /EBM94c/ liefern Aussagen zur Stapelbarkeit und zur Stoßfestigkeit, insbesondere am Beispiel von 6er-Eiertrays, 10er-Einheiten und 30er-Trays, wobei auch in dieser Veröffentlichung lediglich auf Stapeltest und Transporttest verwiesen wird; bemängelt wird jedoch, dass keine effektiven Messwerte erzielt werden können, insbesondere auch im Hinblick auf die Festigkeit des Werkstoffs. Der Schwerpunkt wird in der Vergleichbarkeit von Verpackungsalternativen gesehen; dabei werden Faserformverpackungen mit unterschiedlichen Stoffzusammensetzungen untersucht. Die Er-

gebnisse können dann als Entscheidungshilfen herangezogen werden. In /EBM94a/ weist Ebmeyer auf die Schwankungen der Qualität der Faserformprodukte hin, die in der Fertigungstechnologie und der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials begründet sind. Eine Aussage darüber, wie entscheidend diese Parameter hinsichtlich der Werkstoffuntersuchungen sind, kann nicht getroffen werden, da hierüber bisher keine Untersuchungen bekannt sind.

In /HEE92/ werden von der Firma Grundig, Fürth, eingesetzte Faserformverpackungsformteile beschrieben, wobei wesentliche Aussagen des Grundig-Vorstandschefs Pieter Harmsen genannt werden. Heene beschreibt den Ersatz von Styroporverpackungen durch Faserformverpackungen im Bereich der Unterhaltungselektronik. In Kombination mit Transportkartons aus Wellpappe sollen Videorecorder, Satelliten-Receiver und Car-Audio-Geräte in diesen zu 100 % recycelbaren und biologisch abbaubaren Materialien verpackt werden. Laut Aussage von Manfred Ferger vom Verfahrens- und Umweltlabor der Firma Grundig haben Testreihen gezeigt, dass auch unter extremen Transport- und Lagerverhältnissen gegenüber expandiertem Polystyrol keine Nachteile entstehen und der optimale Warenschutz während des Transportes erhalten bleibt. Dies beweisen auch sowohl externe als auch von Grundig durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich der Druck- und Wechselbelastungen sowie Tests zur Stapelsicherheit, die bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt wurden. Aufgrund der Bezeichnung der Belastungen, die keine in der Technik üblichen Begriffe wie z. B. Zug- oder Druckbelastung, Biegebelastung o. ä. darstellen, kann hier auch nur vermutet werden, dass es sich bei diesen Untersuchungen um die üblichen Fallversuche usw. handelt.

Das eingesetzte Material wird vom Verfahrens- und Umweltlabor der Firma Grundig als sehr verträglich, atmungsaktiv, saugfähig und hygienisch eingestuft. Durchgeführte Marktstudien belegen, dass Verpackungsmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen gegenüber Materialien aus Kunststoffen bevorzugt werden. Vorteilhaft gegenüber expandiertem Polystyrol wird außerdem das platzsparende Ineinanderstapeln der Faserformteile genannt; diese Möglichkeit besteht sowohl vor als auch nach dem Gebrauch. Das bestehende gut funktionierende Sammelsystem von Altpapier führt zur Schonung knapper Rohstoffe und zur Wiedergewinnung der natürlichen Rohstoffe. Aussagen zum Herstellungsprinzip und zu Kosten werden in /HEE92/ nicht getroffen.

Luxenhofer /LUX96/ bezieht sich auf das Ergebnis einer Lebenswegbilanz von Papier-Fasergussverpackungen im Vergleich mit EPS-Verpackungen. Die Untersuchungen wurden von der Interdisziplinären Forschungsgemeinschaft InFo-Kunststoff e. V. in Berlin durchgeführt und in /INF95/ veröffentlicht. In dieser Untersuchung wurden jedoch die Eignung hinsichtlich verpackungstechnischer Kriterien sowie die Kosten nicht berücksichtigt. Um eine Beurteilung hinsichtlich der Eignung der Verpackung zu bekommen, seien nur die Transporttests usw. bekannt. Eine ökologische Beurteilung von Faserformprodukten sei ebenfalls nicht vorgenommen worden, da die Technik der Faserformproduktion noch nicht ausgereift und optimiert sei und hier mit Problemen bei der Erfassung der Basisdaten zu rechnen sei. Luxenhofer kritisiert, dass keine Aussagen über die konkret verglichenen Packmittel getroffen werden. Weiterhin beanstandet er, dass die Dichten der Faserformpackmittel von 250 kg/m^3 und 350 kg/m^3 ermittelt wurden. Diese Kritik begründet er damit, dass die Angaben über die Dichte eines Faserformproduktes noch nicht einmal bei den Herstellern von Eierverpackungen vorlägen. In /INF95/ wird in der Zusammenfassung erwähnt, dass aus der durchgeführten Untersu-

chung keine allgemeingültigen Aussagen für den Vergleich von Faserform und EPS möglich seien. Hierdurch zeigt sich wiederum deutlich, dass kaum Kennwerte vorliegen, die eine Berechnung und somit einen Vergleich zulassen würden.

Rekittke beschreibt in /REK93/ ein neues Herstellungsverfahren, durch das Verpackungen auf Papierbasis hergestellt werden, die z. B. Styroporverpackungen ersetzen könnten. Zunächst werden die Papierabfälle zerkleinert und mit Wasser in einem Pulper aufgefasernt; anschließend wird das Material in Formen gefüllt und in Pressanlagen zu den gewünschten Verpackungen verpresst. Als Pressform könnten auch Formen verwendet werden, die bisher zur Herstellung von Styropor® eingesetzt würden. Bei diesem Verfahren der Firma CONDUX/Hanau handelt es sich nicht um das Faserformverfahren. Bei der Lebenswegbilanz von Papier-Fasergussverpackungen und im Vergleich mit EPS-Verpackungen /INF95/ werden die in /REK93/ angegebenen Leistungsangaben für die eingesetzten Zerkleinerungsaggregate als Berechnungsgrundlage genommen.

In /VRU96 /, /VRU99b/ und /VRU98/ werden die Leistungen der Firma Heinrich Buhl GmbH aus Neunkirchen/Siegerland und hier insbesondere die der Tochtergesellschaft PaperForm genannt. Die Artikel enthalten weder konkrete Aussagen über Festigkeitseigenschaften noch über die Fertigungstechnologie der Produkte. Lediglich in /APK00/ wird die gute Schutzwirkung der Faserformverpackungen beschrieben, insbesondere wird ausgesagt, dass Faserformverpackungen sehr hohen Stauchbelastungen stand halten und somit den unbeschadeten Transport der verpackten Güter garantieren. Darüber hinaus würden Faserformverpackungen bei intensiver Hitze- und Kälteeinwirkungen die Form nicht verlieren. Genauere Aussagen über durchgeführte Tests u. ä. sind nicht enthalten.

Im Vorhergehenden wurde gezeigt, dass es praktisch keine Auslegungs- und Dimensionierungsvorschriften gibt, die in der Planungs- und Entwicklungsphase Gültigkeit haben. Dies gilt insbesondere für Faserformprodukte, die als technische Funktionsteile eingesetzt werden sollen, d. h. für Teile, deren Funktion von der einer Verpackung grundsätzlich verschieden ist.

3.3 Fixationen der oberen Extremität

3.3.1 Orthopädietechnische Hilfsmittel

Im Folgenden sollen Unterarmorthesen beschrieben werden, die als Vergleichsprodukte herangezogen werden können. Orthesen sind technische Hilfsmittel der Orthopädie, die mit Körpersegmenten verbunden werden, um deren Funktion zu unterstützen oder zu ersetzen. Weiterhin werden sie während eines Heilungsprozesses eingesetzt, wobei sie entweder nur vorübergehend Verwendung finden oder dauernd, falls ein irreparabler Schaden vorliegt /KRI82/. Eine eindeutige, normgerechte Bezeichnung oder Abgrenzung zwischen Orthesen, Schienen, Bandagen existiert derzeit nicht. **Bild 3.19** zeigt die Übersicht und Einteilung der Orthopädisch-technischen Heil- und Hilfsmittel gemäß DIN 58320 /DIN72/.

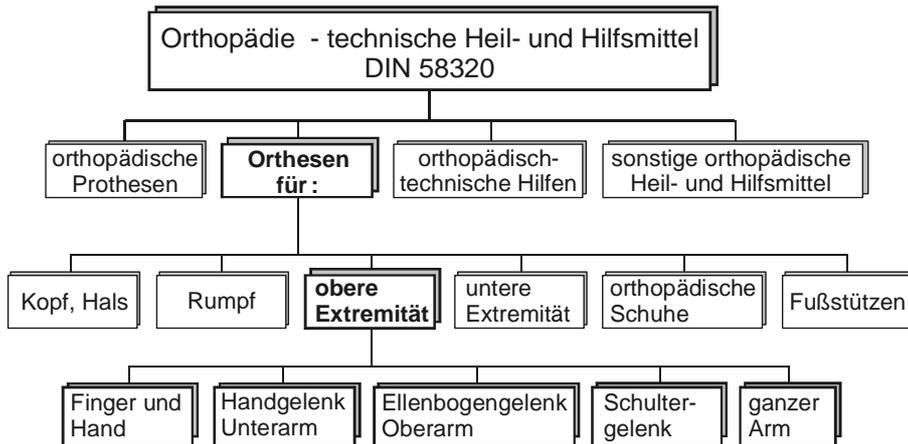


Bild 3.19 Orthopädisch-technische Heil- und Hilfsmittel nach DIN 58320 /DIN72/

Von der DIN 58320 existiert seit 1983 ein Entwurf /DIN83b/, diese Norm wurde gegenüber der derzeit gültigen Norm /DIN72/ nur geringfügig geändert, z. B. wurden Bandagen mit aufgenommen und dem Bereich sonstige orthopädische Heil- und Hilfsmittel zugeordnet. Die DIN EN 12523 /DEN99/ beinhaltet folgende Definition: „(Externes) orthetisches Hilfsmittel: externe Orthese: Extern angebrachte Vorrichtung, die aus einem einzelnen Bauteil oder einer Baugruppe besteht und obere und untere Gliedmaßen, Rumpf, Kopf oder Hals und deren Zwischengelenke ganz oder teilweise erfasst, um die neuromuskulären und skelettalen Systeme zu beeinflussen.“



Bild 3.20 Handgelenkbandagen (Auszug)

Bild 3.20 zeigt einige Handgelenkbandagen. Diese Übersicht stellt nur einen kleinen Auszug dar, das Produktangebot ist wesentlich größer und wird ständig erweitert.

3.3.2 Individuelle Stützverbände

Nahezu bei allen Stützverbänden übernehmen belastungsgerecht geformte Schienen in den Belastungszonen die wirkenden Kräfte und Momente. Sie werden entweder individuell gefertigt und an die Gliedmaßen angepasst oder bei Verwendung von bereits vorgefertigten Schienenmaterialien nur noch geringfügig angepasst. Die Schienen können dabei aus unterschiedlichen Materialien wie z. B. Gips, Kunststoffen oder auch Metallen bestehen.

Zur Vermeidung von Druckstellen und zum Schutz der Haut (z. B. Festkleben von Körperhaaren, Vermeidung von Juckreizen usw.) müssen geeignete Polstermaterialien eingesetzt werden. Hierzu gehören z. B. gestrickte Baumwollschläuche o. ä., die sich dehnbar und somit faltenfrei an die jeweiligen Gliedmaßen anschmiegen lassen /HÄR98/. Derartige Materialien sind in unterschiedlichen Breiten im Handel erhältlich. Zur Fixierung der Schienen wird ein zirkulär angebrachter Verband verwendet. Dieser Verband kann aus einer elastischen Binde, Gipsbinde oder synthetischen Kunststoffen bestehen.

Das Anlegen eines derartigen Stützverbandes erfolgt durch einen Arzt oder entsprechendes medizinisches Fachpersonal. Nachteilig ist dabei die Routine, die beim Anlegen eines entsprechenden Stützverbandes erforderlich ist, sowie die Kenntnis über die belastungsrechte Konstruktion eines derartigen Stützverbandes, d. h. die belastungsgerechte Formgebung und entsprechende Anordnung der Materialien. Darüber hinaus sind oftmals zusätzliche Geräte, Behandlungsräume und sonstige Hilfsmittel erforderlich. In Abhängigkeit vom eingesetzten Material unterscheiden sich die Trocknungszeiten und somit die Verweilzeit in den Behandlungsräumen sowie die Dauer bis zur vollständigen Belastung des Verbandes.

Gipsverbände

Beim Gipsverband werden die Schienen z. B. durch vorgefertigte Gipslonguetten hergestellt. Entsprechende Längsfäden in den Longuetten können die Biege- und Zugbelastungen aufnehmen, und der eigentliche Gips nimmt die wirkenden Druckbelastungen auf /HÄR98/. Longuetten bestehen aus mehreren übereinander angeordneten Gipsbinden und sind bereits abgepackt in verschiedenen Breiten und Längen im Handel erhältlich. Longuetten können allerdings auch selbst aus entsprechenden Binden hergestellt werden. Fixiert werden die Longuetten in Abhängigkeit von der Indikation durch einen zirkulären Gipsverband oder durch elastische Binden /HÄR98/. Verstärkungsmaterialien im Gips vermindern die Homogenität des Gipses und verringern somit die Stabilität; sie sind daher nicht notwendig.

Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ist Calciumsulfat mit zwei Molekülen Wasser im Kristallgitter und liegt als Gestein vor. Durch entsprechende Erhitzung zerfällt der Gipsstein zu Gipspulver. Durch die Wasseraufnahme wird der Abbindevorgang (Hydratation) unter Wärmeentwicklung ausgelöst, und innerhalb von 5 bis 7 Minuten entsteht die ursprüngliche chemische Struktur des Gipssteins. Der abgebundene Gips kann hohe Druckkräfte aufnehmen und weist eine gewisse Porosität auf, die aufgrund der Zwischenräume der ineinander verwachsenden Kristalle besteht /HÄR98/.

Die Abbindezeit des Gipses ist abhängig von der Tauchwassertemperatur und Sauberkeit des Wassers. Tauchwassertemperaturen über 30 °C sollten vermieden werden, da einerseits die Wärmeentwicklung auf der Haut zu groß ist und andererseits der Abbindeprozess (Hydratation) nicht vollständig abläuft und eine geringere Endfestigkeit erreicht wird. Als Abbindezeit bzw. offene Zeit wird die Arbeitszeit bezeichnet, die zwischen dem Eintauchen und dem letztem Modellieren liegt. Die Trocknungszeit beträgt in Abhängigkeit von der Dicke des Gipses zwischen 24 und 48 Stunden /HÄR98/.

Bei Gipsverbänden sind die relativ langen Trocknungszeiten sowie das erforderliche Ruhighalten der entsprechenden Gliedmaßen während dieser Zeit von Nachteil. Für Röntgenkontrollen muss der Gips entfernt werden, da Gips für Röntgenstrahlen nicht durchlässig ist. Weiterhin ist das relativ hohe Gewicht nachteilig. Das Entfernen erfolgt mit Hilfe einer Gipsfräse; das oszillierende, runde Sägeblatt schneidet zwar nur in harten Materialien, aber durch die Reibung im Material wird das Sägeblatt erwärmt und auf ungeschützter Haut besteht Verbrennungsgefahr /HÄR98/. Der Vorteil des Gipses ist der relativ geringe Preis; in Abhängigkeit von der Breite und Länge der Binden betragen die Kosten pro Stück (2 eingesiegelte Binden) etwas 1 € bis zu 3,30 €.

Synthetischer Stützverband

Die synthetischen Binden bestehen aus einem Trägermaterial (Glasfasergewebe, Baumwollnetz, Polyestergerewebe o. ä.) das mit einem Harz (Polyurethan o. ä.) benetzt wird. Kunststoffgetränkte Verbände werden statt Gipsbinden zur Fixierung von entsprechenden Schienenmaterialien verwendet. Dabei werden beim zirkulären Kunststoffverband als verstärkendes Schienenmaterial sowohl Longuetten aus Kunststoffen als auch andere Materialien z. B. Metall o. ä. eingesetzt. Die Applikation von Kunststoffverbänden ist im Vergleich zum Gipsverband zwar sehr ähnlich, allerdings etwas schwieriger. Aufgrund des schnelleren Abbindens der Kunststoffe ist das faltenfreie Applizieren der klebrigen Kunststoffverbände schwieriger. Darüber hinaus müssen bei der Verarbeitung Handschuhe getragen werden, und die Kleidung muss vor Verschmutzung geschützt werden, das Polyurethanharz kann z. B. weder von der Haut noch von der Kleidung wieder entfernt werden. Durch das schnellere Abbinden bzw. Polymerisieren der Kunststoffe können sie im Gegensatz zu Gips früher belastet werden, in Abhängigkeit vom verwendeten Kunststoff nach etwa 15 bis 30 Minuten. Hierdurch verkürzt sich der Aufenthalt in den Behandlungsräumen deutlich. Darüber hinaus besitzt Kunststoff eine bessere Röntgentransparenz, ist wasserfest und kann somit bei Verschmutzung leicht gereinigt werden; der Stützverband hält bei nassem Wetter länger. Außer der schwierigeren Applikation sind der relativ hohe Preis sowie die wenig umweltfreundliche Entsorgung gegenüber Gips von Nachteil /HÄR98/. Die Kosten für einen synthetischen Stützverband sind abhängig von der Breite (zwischen 50 mm und 120 mm), der Länge (zwischen 3 m bis 4 m) und dem Hersteller; er kostet pro Stück ca. 12 € bis zu 17 €.

Kunststoffe besitzen eine höhere Stabilität als Gips, daher können sehr dünne Stützverbände mit einem geringen Gewicht hergestellt werden. Eine angefangene Binde kann allerdings nicht weiter verarbeitet werden, da diese relativ schnell abbindet bzw. polymerisiert. Die Kunststoffe können entweder direkt aus der Verpackung appliziert und nachträglich mit Wasser benetzt werden, z. B. durch das Auflegen einer nassen Binde, oder durch das Eintauchen in Wasser aktiviert und dann appliziert werden. Hierdurch verringert sich allerdings die Applikationszeit /HÄR98/. Das Entfernen des Kunststoffverbandes ist abhängig vom verwendeten Kunststoff, entweder kann der Verband noch mit ei-

ner Schere durchtrennt werden, oder der Verband wird mit der Gipsfräse mit einem gehärteten Fräserblatt aufgeschnitten.

Zur Herstellung von Kunststoffstützverbänden können alle Sorten von Kunststoffen verwendet werden. **Bild 3.21** zeigt einen Stützverband, der aus zwei unterschiedlichen synthetischen Kunststoffbinden der Firma 3M besteht. Der rote zirkulär angebrachte Verband besteht aus einem Elastomer, da dieser nach dem Aushärten noch flexibel ist. Dagegen ist die in den Stützverband eingearbeitete Schiene aus einem höherfesten Material, das nach dem Aushärten starr und somit nicht elastisch verformbar ist. Weiterhin ist auf dem **Bild 3.21** links und rechts am Bildrand das Polstermaterial, das zum Schutz der Haut eingesetzt wurde, erkennbar.

Bild 3.22 zeigt eine derartige, in einen Stützverband eingebrachte, dorsale (auf dem Handrücken applizierte) Schiene. Die Markierung auf der Schiene zeigt den Bereich, der eine hohe Festigkeit und Steifigkeit haben muss, um das Handgelenk hinreichend zu stützen und ruhigzustellen.

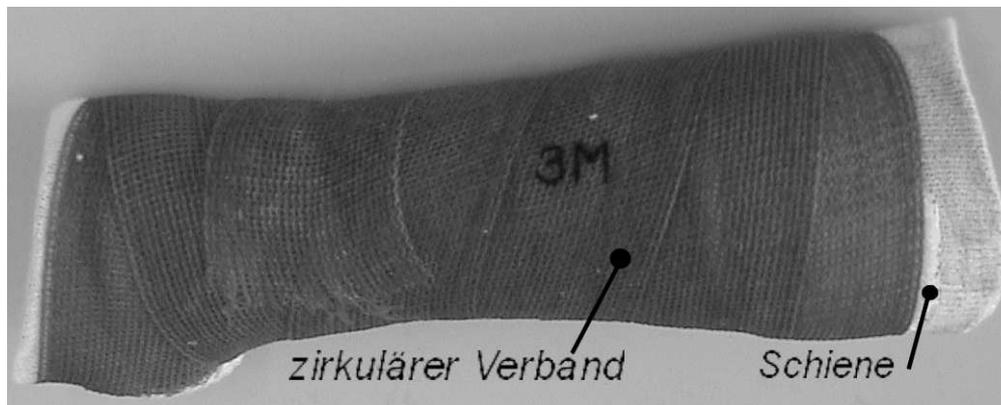


Bild 3.21 Synthetischer Stützverband



Bild 3.22 Schiene aus synthetischen Kunststoff hergestellt

Kunststoffe werden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften nach DIN 7724 in Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere und thermoplastische Elastomere eingeteilt /DIN93b/. Die Herstellung von Kunststoffen erfolgt durch die Erzeugung von künstlichen Makromolekülen durch Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition. Polymerisation ist ein exothermer Prozess, der durch äußere Einflüsse (z. B. Wärme) angeregt wird /DOM86/. Die Anlagerung von Grundmolekülen zu Makromolekülen erfolgt ohne Abspaltung von Nebenprodukten. Bei der Polykondensation vereinigen sich verschiedene Grundmoleküle unter Abspaltung eines Nebenproduktes (meistens Wasser) zu einem Makromolekül. Polyaddition ist die Bildung eines Makromoleküls durch ver-

schiedene Komponenten, hierbei werden ebenfalls keine Nebenprodukte abgespalten /DOM86/.

Thermoplaste (Polyethylen PE, Polyvinylchlorid PVC, Polystyrol PS) bestehen aus linearen oder verzweigten Makromolekülen (Fadenmoleküle), deren Moleküle unvernetzt nebeneinander liegen, daher besitzen sie keine festen chemischen Bindungen. Durch Erwärmung wird der thermoplastische Kunststoff plastisch formbar, bzw. kann er bis zum Fließen erwärmt werden. Bei Raumtemperatur bzw. Gebrauchstemperatur besitzen Thermoplaste wieder Formstabilität. Oberhalb des Gebrauchstemperaturbereichs können Thermoplaste beliebig oft umgeformt werden. Thermoplaste besitzen eine amorphe oder teilkristalline Struktur und können über die Schmelze erneut verarbeitet werden; sie sind somit recycelbar und wiederverwertbar. Darüber hinaus sind Thermoplaste schweißbar, quellbar und lösbar /DOM86/. Nach DIN 7724 sind Thermoplaste polymere Werkstoffe, die im Gebrauchstemperaturbereich meistens stahlelastisches Verhalten aufweisen /DIN93b/.

Thermoplastische Schienen können aus plattenförmigen oder dünnen gewebeartigen Materialien hergestellt werden, indem sie z. B. durch die Erwärmung in einem Dampfbad plastisch verformt und an die jeweiligen Gliedmaßen angepasst werden können.

Bild 3.23 zeigt ein Beispiel für eine volare (auf der Hohlhandseite bzw. Handinnenfläche applizierte) Schiene für den linken Unterarm. Die Schiene wird aus zunächst plattenförmigem thermoplastischen Material der Firma KREWI[®] Medical Produkte GmbH, in Willich geformt, indem die Schiene in einem Dampfbad erwärmt und somit verformbar und anpassbar wird. Darüber hinaus ist die Schiene bereits mit einem Polstermaterial versehen worden und kann so durch einen zirkulären Verband an dem linken Unterarm fixiert werden.

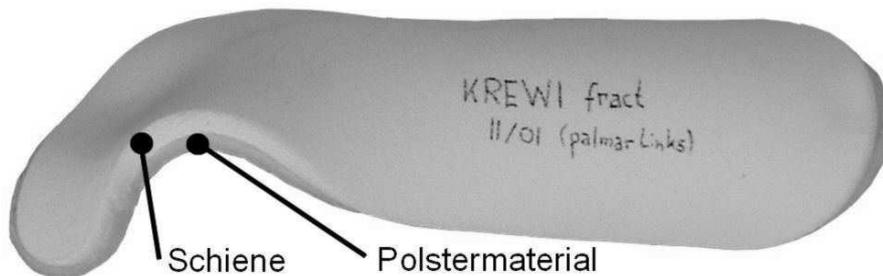


Bild 3.23 Schiene aus thermoplastischem Kunststoff mit Polstermaterial, Ansicht von unten

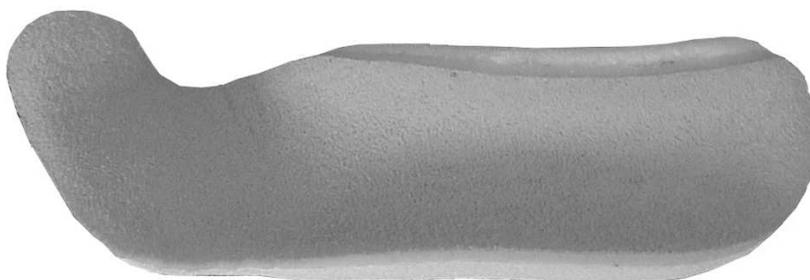


Bild 3.24 Schiene aus thermoplastischem Kunststoff mit Polstermaterial, Ansicht von oben

Ein weiteres Beispiel für Verwendung von thermoplastischen Material ist das von der Firma Runlite S. A. in Micheroux, Belgien hergestellte und von der Firma Triamed in Lüdinghausen vertriebene gewebeartige Material. Hierbei handelt es sich um einen Baumwollstoff, der mit thermoplastischen Harz überzogen wurde. Erhältlich ist dieses

Material sowohl in abgepackten Rollen zum Anlegen eines zirkulären Verbands als auch in unterschiedlichen Abmessungen in Platten zur Herstellung von Schienen. **Bild 3.25** zeigt einen aus derartigem Material hergestellten Stützverband, das verwendete Rollenmaterial muss hierfür ca. eine Minute lang in ein 70 °C heißes Wasserbad gelegt werden. Hierdurch wird das thermoplastische Material ca. 3 bis 7 Minuten formbar und kann an mit Polstermaterial versorgten Gliedmaßen appliziert werden /TRI02b/. Das Rollenmaterial ist in den Farben weiß, hellgrün und hellgrau in einer Länge von 1,8 m und in den Breiten (50, 75, 100, 125 und 150) mm erhältlich. Rollen von 50 mm x 1,8 m sind z. B. zu 20 Rollen verpackt und kosten 132,21 €, 10 Rollen 150 mm x 1,8 m kosten dagegen 160,13 € /TRI02a/.

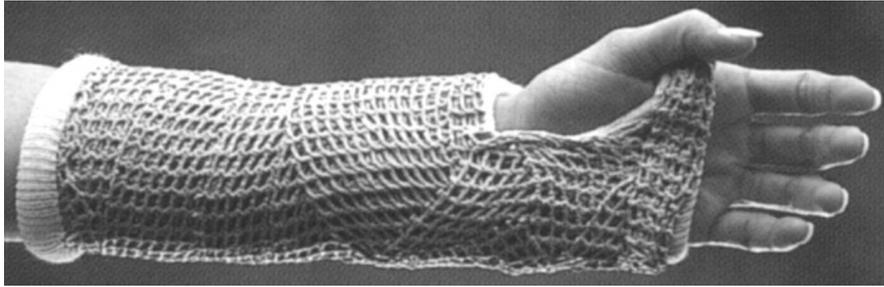


Bild 3.25 Stützverband aus X-LITE™ /TRI02b/

Weitere Schienen aus Metall sind z. B. die in **Bild 3.26** dargestellten Cramerschiene, die von der Firma Dr. Paul Koch, Neuffen, hergestellt werden. Das Bild zeigt links drei Varianten und rechts einen vergrößerten Ausschnitt.

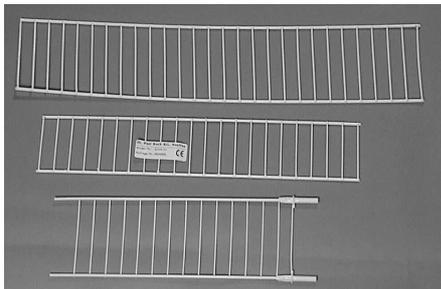
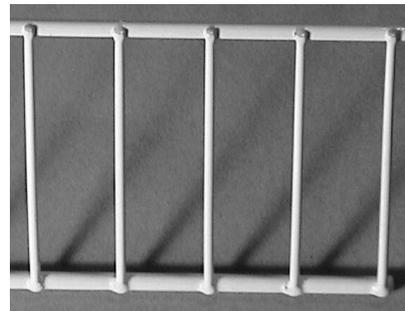


Bild 3.26 Cramerschiene



Darüber hinaus gibt es unterschiedliche aus Aluminium bestehende und mit einer Schaumstoffschicht versehene Schienenmaterialien. Ein Beispiel derartiger Produkte zeigt **Bild 3.27**. Diese Schiene wird unter dem Namen LIGASANO® geführt und von der Firma Schwab Metallwarenfabrik in Hersbruck hergestellt. Die in **Bild 3.27** dargestellte LIGASANO®-Schiene besteht aus einem 1 mm dicken Aluminiumband, das mit einer ca. 20 mm dicken LIGASANO®-Polyesterschaumstoffauflage beschichtet ist. Die Schienen sind in unterschiedlichen Abmessungen erhältlich, die hier dargestellte Schiene weist eine Breite von 80 mm und eine Länge von 400 mm auf.

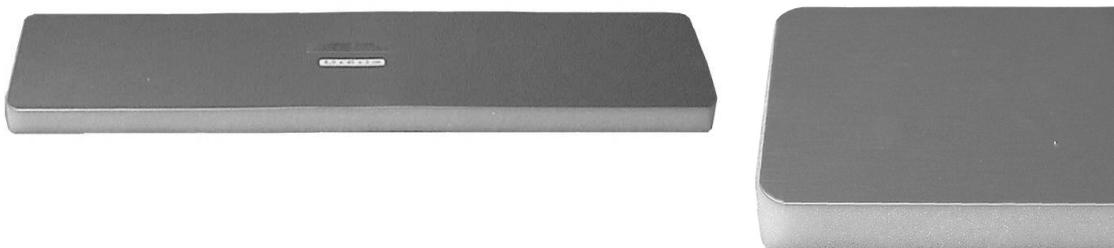


Bild 3.27 Aluminiumschiene LIGASANO®

Derartige wie in **Bild 3.26** und **3.27** dargestellte Schienen haben den Nachteil, dass sie keine gute anatomische Formbarkeit besitzen, somit eine mangelnde Passgenauigkeit haben und daher stark gepolstert werden müssen, um Druckstellen zu vermeiden. Die Schiene besitzt vermutlich weniger Tragkomfort. Das Applizieren von solchen Schienenmaterialien ist aufgrund der genannten Probleme arbeits- und zeitintensiv.

Im Gegensatz zum derzeitigen Stand der Technik handelt es sich bei der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Schiene um eine entsprechend den wirkenden Belastungen gestaltete Schiene. Darüber hinaus deckt sie einen bestimmten anatomischen Bereich ab und kann als derartig standardisierte Schiene bevorratet werden. Die entsprechende Schiene kann direkt mit Hilfe einer elastischen Binde an die jeweiligen Gliedmaßen appliziert werden. Sie besitzt somit bereits die belastungsgerechte Formgebung und kann schnell und einfach appliziert werden, der Patient muss die Gliedmaßen nur für eine kurze Zeit ruhighalten, und das lange Blockieren von Behandlungsräumen entfällt hiermit. Darüber hinaus sind keine besonderen Geräte oder Hilfsmittel erforderlich, für das Applizieren bedarf es keiner besonderen Routine, noch entstehen Dämpfe, Stäube oder Wärme auf der Haut. Das Entfernen kann auf schnelle und einfache Weise erfolgen. Durch die Herstellung der Schiene bzw. Orthese durch das Faserformverfahren und die Verwendung von Papier handelt es sich um eine leichte, atmungsaktive und wesentlich kostengünstigere Schiene gegenüber dem Stand der Technik.

3.3.3 Patentsituation

Im Rahmen des durchgeführten Vorhabens wurde eine Patentanmeldung vorgenommen, die eine Schiene bzw. eine Orthese aus faserigem Werkstoff betrifft /KÜN02/. Neben der Beschreibung wurden sechs Patentansprüche formuliert. Diese Patentansprüche betreffen im einzelnen:

- 1 Die Orthese wird dadurch hergestellt, dass mittels einer Druckdifferenz an einen siebartigen, wasserdurchlässigen Formkörper das Material aus einer wässrigen Lösung herausgefiltert und angelagert wird und dabei die Geometrie der Schiene gebildet wird,
- 2 eine angepasste Steifigkeit an die Erfordernisse im entsprechenden Anwendungsfall,
- 3 das Erreichen dieser angepassten Steifigkeit mittels Rippen oder Sicken höherer Materialstärke, höherer Verdichtung des Materials oder eingelagerter Verstärkungselemente,
- 4 eine Imprägnierung, um die Feuchtigkeitsaufnahme möglichst regulieren zu können,
- 5 Markierungen auf der Schiene, so dass die Schiene entsprechend zugeschnitten werden kann,
- 6 die Verwendung einer geeigneten Polsterung.

Bei der Patentanmeldung wurde gleichzeitig ein Rechercheantrag gestellt. Im Rahmen der vom Patentamt in München durchgeführten Recherche wurden insgesamt sechs Druckschriften ermittelt. Das Patentamt weist diesen Druckschriften die Kategorie X und/oder Y zu. Bei der Kategorie X wird durch die vorliegende Druckschrift die Neuheit oder das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit (Recherche nach § 43 PatG) bzw. bei Gebrauchsmustern eines erfinderischen Schrittes (Recherche nach § 7 GebrMG) allein in Frage gestellt.

Die Neuheit besagt, dass die ermittelte Druckschrift bereits die wesentlichen Elemente der vorliegenden Erfindung beinhaltet und somit die Inhalte der vorliegenden Anmeldungen als bekannt vorausgesetzt werden können. Das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit besteht nur, wenn die betreffende Erfindung unter der Voraussetzung, dass die Inhalte der Entgegenhaltung bekannt sind, nicht ohne weiteres hieraus abgeleitet werden können und somit nicht naheliegend sind.

Die Kategorie Y stellt zusammen mit anderen Druckschriften das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit (Recherche nach § 43 PatG) bzw. bei Gebrauchsmustern eines erfinderischen Schrittes (Recherche nach § 7 GebrMG) in Frage. Mit dem Ergebnis der ermittelten Druckschrift benennt das Patentamt die gesamte Druckschrift oder die relevanten Stellen, die nach Auffassung des Patentamtes gegen eine Patentierung der vorliegenden Anmeldung sprechen. Die Gründe hierfür werden durch die Angabe der Kategorie angegeben. Darüber hinaus werden die nach Ansicht des Patentamtes davon betroffenen Patentansprüche der vorliegenden Anmeldung benannt. Im folgenden werden die Inhalte der betroffenen Stellen bzw. die gesamte Druckschrift sowie die Relevanz näher erörtert.

Gelenkige Stabilisierungsvorrichtung DE 68919961 T2

Bei der Patentschrift DE 68919961 T2 /SER93/ handelt es sich um die deutsche Übersetzung der europäischen Patentschrift EP 0 359 635 B1, die in französischer Sprache verfasst wurde. Bei dieser Anmeldung wird die Priorität auf ein am 08.09.1988 in Frankreich angemeldetes nationales Patent mit dem Aktenzeichen 88 11 759 in Anspruch genommen. Aufgrund dieses Prioritätsrechts hat der Anmelder die Möglichkeit, innerhalb eines Jahres die nationale Anmeldung auf weitere Nationen auszuweiten. Dies wurde einerseits durch die Anmeldung des Europäischen Patent am 07.09.1989 unter Benennung von 12 Vertragsstaaten (AT, BE, CH, DE, ES, FR, GB, IT, LI, LU, NL, SE) erreicht, d. h. in diesen Staaten kann dann ggf. der Rechtsanspruch geltend gemacht werden. Darüber hinaus wurde am 07.09.1989 ein nationales amerikanisches Patent (US 51 95 944) angemeldet.

Die Veröffentlichung der deutschen Übersetzung erfolgte am 04.05.1995 durch das Patentamt. Eine durchgeführte Rechtsstandfeststellung zeigte, dass das Schutzrecht aufgrund der Nichtzahlung der Jahresgebühr am 01.07.2000 erloschen ist. Die Anmeldung gilt somit als zurückgenommen, der Anmelder hat keinen Rechtsanspruch mehr. Die in der Druckschrift offenbarte Erfindung gehört hiermit allerdings zum Stand der Technik. Für die behandelten Inhalte kann somit kein Schutzrecht mehr erwirkt werden. Bei der im Vorhaben durchgeführten Recherche nennt das Patentamt bei der Patentanmeldung DE 689 19 961 T2 die Kategorie Y und stellt das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit in Anspruch 1 der im Vorhaben durchgeführten Patentanmeldung in Frage. D. h. unter der Voraussetzung, dass die Inhalte der Entgegenhaltung bekannt sind, soll der Patentanspruch 1 des im Vorhaben angemeldeten Patent naheliegend sein und soll somit keine erfinderische Tätigkeit haben. Inwieweit dies zutrifft, prüft das Patentamt erst beim gestellten Prüfantrag. Das Rechercheergebnis gibt dem Anmelder die Möglichkeit zu prüfen, inwieweit die recherchierten Entgegenhaltungen der eigenen Patentanmeldung widersprechen.

Die Erfindung wird als gelenkige Stabilisierungsvorrichtung bezeichnet; dabei soll diese Schiene insbesondere bei der Erstversorgung zur Stabilisierung der verletzten Körperteil-

le eingesetzt werden, um einen möglichst schmerzfreien Transport vom Unfallort zur Klinik zu ermöglichen. Diese Schiene soll gegenüber dem Stand der Technik einfacher anzuwenden und kostengünstiger herzustellen sein. Durch den Einsatz von Karton (Wellpappe) ist die Stabilisierungsschiene röntgenstrahlendurchlässig und luftdurchlässig. Die Schiene wird aus Wellpappe entsprechend dem Einsatzfall zugeschnitten und anhand der Faltnen aufgerichtet. Dabei wird die einfache Verbindungstechnik der Wellpappe (siehe Tonerkartusche) genutzt. Durch entsprechende Laschen und Aussparungen lassen sich die Elemente untereinander schnell und einfach befestigen.

Die Schiene wird durch das Falten entlang der Faltnen hergestellt und besteht aus einem Bodenteil, zwei Seitenelementen und einem Deckel. Der Deckel und die ihm gegenüberliegende Seite weisen entsprechende Befestigungslaschen bzw. Aussparungen auf, die durch das Zusammenstecken mit Hilfe von Klappen o. ä. zusammengefügt werden. **Bild 3.28** zeigt z. B. eine aufgefaltete Stabilisierungsschiene für den Arm. Dieses Bild entspricht der Figur 4 der Patentanmeldung.

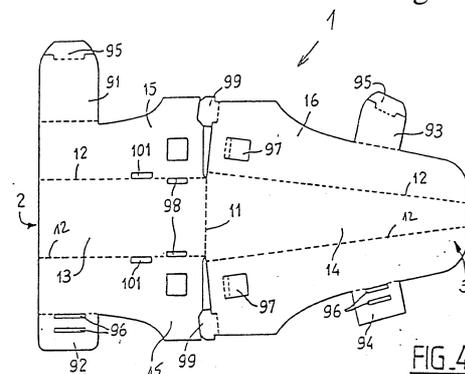


Bild 3.28 Figur 4 Stabilisierungsschiene für den Arm (Unterarm/Oberarm) /SER93/

In den acht Patentansprüchen werden im Wesentlichen die Ausführungen der Schiene mit Boden, Seitenteil und Deckel, die Anordnung und Ausführung der Befestigungselemente mit Aussparungen, Laschen usw. sowie die Ausführungsform einer Schiene für ein Schultergelenk siehe Bild 3.29 beschrieben.

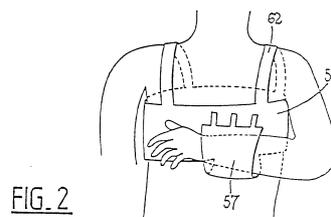


Bild 3.29 Figur 2 Angelegte Stabilisierungsschiene für das Schultergelenk/Arm /SER93/

Im Gegensatz zu der im Vorhaben entwickelten Orthese /KÜN02a/ handelt sich in der Patentschrift DE 686 19 961 T2 /SER93/ um eine Schiene, die nicht für den Heilungsprozess eingesetzt werden soll, sondern für die Erstversorgung am Unfallort, z. B. für den Transport ins Krankenhaus. Für eine Ruhigstellung während des Heilprozesses ist diese Schiene nicht gedacht. Darüber hinaus wird die Schiene z. B. aus Wellpappe durch entsprechendes Knicken und Falten hergestellt und individuell, mit Hilfe von unterschiedlichen Laschen und Aussparungen, an die Gliedmaßen angepasst. Die im Vorhaben betrachtete Orthese wird nach dem Faserformverfahren hergestellt, entsprechend gepolstert und durch elastische Verbände an die Gliedmaßen des Patienten angelegt. Die Schiene ist in standardisierten Größen vorhanden und braucht nicht mehr angepasst zu werden. Die im Vorhaben beschriebene Orthese unterscheidet sich gegenüber der Entgegenhaltung DE 68 91 961 T2 sowohl durch das Herstellungsverfahren als auch in dem Verwendungszweck.

Verfahren zur Herstellung von Unterstützungsschienen für Bein- und Armbrüche DE 1 45 816 C

Die Patentschrift DE 1 45 816 C wurde im Deutschen Reich am 16.11.1902 patentiert /KOC02/. Das Schutzrecht für ein Patent beträgt maximal 20 Jahre, daher liegt hier kein Schutzrecht mehr vor. Das Patentamt nennt bei diesem Patent die Kategorie Y und stellt das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit, in Anspruch 1 und 2 der vorliegenden Patentanmeldung, in Frage.

Die Erfindung wird wie folgt bezeichnet: Verfahren zur Herstellung von Unterstützungsschienen für Bein- und Armbrüche. In der Patentschrift wird auf einer Seite die Beschreibung der Erfindung und ein Patentanspruch beschrieben. Zeichnungen besitzt diese Patenschrift nicht. Anmelder ist die Firma Dr. Paul Koch in Neuffen, diese Firma beschäftigt sich auch heute noch mit der Herstellung von Schienen, z. B. ist sie derzeit der bekannteste Hersteller von Cramerschienen (siehe **Bild 3.26**).

Die in der Patentschrift beschriebene Erfindung soll die nur sehr ungenau an die Gliedmaßen des Patienten anpassbaren Pappschienen ersetzen. Darüber hinaus soll die beschriebene Schiene auch zur Schienung von gebrochenen Gliedmaßen eingesetzt werden und bereits vorhandene Schienen aus Metall und das damit verbundene zeitintensive Anpassen ersetzen. Dies soll erreicht werden, indem bereits vorgefertigte Schienen aus Pappe eingesetzt und in einem nachfolgenden Behandlungsschritt durch die Einbringung von Dampf aufgeweicht werden. Anschließend werden die Pappschienen unter Druck in bis auf 100 °C erhitze Pressformen gepresst. Die Formen sind dabei auf die Formgebung der jeweiligen Gliedmaßen abgestimmt. Nach dem Verdampfen der Feuchtigkeit hat die Pappschiene eine veränderte Formgebung und die ursprüngliche Festigkeit wiedererlangt. Darüber hinaus können Druckstellen erneut mittels Wasser angefeuchtet und durch Anpressen an die verletzten Gliedmaßen nachgeformt werden.

Die Herstellung der vorgefertigten Pappschiene ist in der Patentschrift nicht näher ausgeführt. Vermutlich handelt es sich hierbei auch um tiefziehfähige Pappe, die ebenfalls in Pressformen entsprechend vorgeformt wurde. Die Herstellung der Schienen mittels des Faserformverfahrens o. ä. ist in dieser Entgegenhaltung nicht offenbart. Der Patentanspruch der Patentschrift DE 1 45 816 beschreibt das Herstellungsverfahren der vorgeformten Pappschiene sowie die Korrekturmöglichkeit bei vorhandenen Druckstellen. Aufgrund dieser Patentschrift stellt das Patentamt das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit in Anspruch 1 und 2 der vorliegenden Patentanmeldung in Frage. Der Anspruch 1 beschreibt die Herstellung der Schiene durch das Faserformverfahren, die Schiene erhält hierdurch bereits die Formgebung. Das Herstellungsverfahren unterscheidet sich daher wesentlich und geht nicht unmittelbar aus der hier betrachteten Entgegenhaltung hervor, daher liegt eine erfinderische Tätigkeit gegenüber der Patentschrift 1 45 816 vor. Der Patentanspruch 2 beschreibt die Möglichkeit, die Faserformschiene je nach den jeweiligen Anforderungen mit Bereichen unterschiedlicher Steifigkeiten auszuführen.

Schiene für Beinfrakturen Offenlegungsschrift DE 24 47 703 A1

Die Offenlegungsschrift DE 24 47 703 A1 /HAN74/ wurde am 07.10.1974 angemeldet und besitzt eine Unionspriorität auf eine bereits am 19.10.1973 in den USA erfolgte Anmeldung mit der Prioritäts- Nr. 4 07 869. Der Anmelder dieser Patentschrift hat hier ebenfalls die Möglichkeit in Anspruch genommen, die nationale US-Anmeldung innerhalb eines Jahres auf weitere Nationen auszuweiten.

Die durchgeführte Rechtsstandfeststellung zeigte, dass für die deutsche Anmeldung das Schutzrecht wegen Nichtzahlung der Jahresgebühren am 09.04.80 erloschen ist. Das Patentamt stellt aufgrund dieser Entgegenhaltung wiederum das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit in Anspruch 1-3 der vorliegenden Patentanmeldung in Frage, dies entspricht wiederum der Kategorie Y. In der Offenlegungsschrift DE 24 47 703 A1 /HAN74/ wird eine Schiene für Beinfrakturen beschrieben, die durch das Zusammenfallen einer entsprechend zugeschnittenen Wellpappe o. ä. hergestellt wird. Die Erfindung

enthält 12 Zeichnungen und fünf Patentansprüche. **Bild 3.30** zeigt z. B. eine aufgefaltete Beinschiene. Dieses Bild entspricht der Figur 1 der Patentanmeldung. Die fünf Patentansprüche beschreiben die Verwendung des faltbaren Materials und die Herstellung der Beinschiene durch das Zusammenfallen der entsprechend angeordneten Elemente. Darüber hinaus wird die geometrische Form und Anordnung der Bauteil- und Befestigungselemente sowie die Ausführung und Anordnung von klappbaren Elementen in der gebrauchsfertigen Beinschiene, siehe **Bild 3.31**, beschrieben. Die klappbaren Elemente könnten z. B. als Griffe dienen.

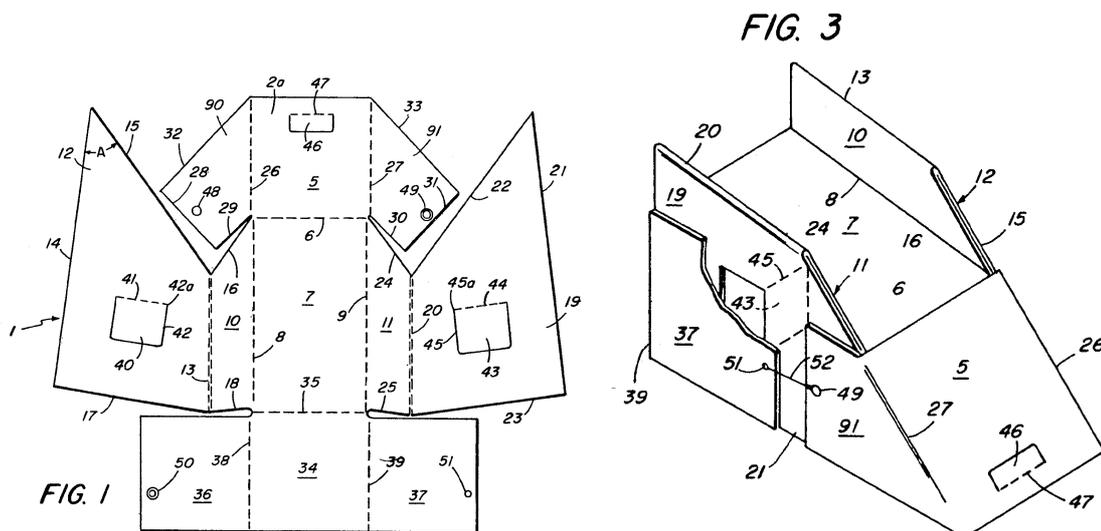


Bild 3.30 Figur 1: Zugeschnittene Wellpappe, Karton **Bild 3.31** Figur 3: Gebrauchsfertige Schiene /HAN74/

Im Gegensatz zu der betrachteten Schiene handelt es sich jedoch um einen Körper, der im Wesentlichen aus einem ebenen Rohteil (z. B. Wellpappe) durch Falzen, Knicken und Verbinden hergestellt wird. Der Patentanspruch 1 der gestellten Patentanmeldung beschreibt die Herstellung der gesamten Geometrie nach dem Faserformverfahren. Die Patentansprüche 2 und 3 beschreiben die Möglichkeit, die Schiene mit Bereichen unterschiedlicher Steifigkeiten auszuführen. Die Inhalte der Patentansprüche 1 - 3 sind nicht Gegenstand dieser Entgegenhaltung.

Verformbares Schienenband zur Herstellung einer medizinischen Schiene sowie Verfahren zur Herstellung des Schienenbandes DE 44 17 329

HTS Industrie GmbH, in Freiburg, hat am 18.05.1994 die Offenlegungsschrift DE 44 17 329 /HTS95/ angemeldet. Aufgrund der Nichtzahlung der Jahresgebühren gilt die Anmeldung als zurückgenommen, und es kann kein Schutzrecht mehr geltend gemacht werden. Durch diese Entgegenhaltung stellt das Patentamt das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit in Frage und benennt die Kategorie Y. Insbesondere sollen in der Spalte 1 die Zeilen 27 - 48 gegen eine erfinderische Tätigkeit in Patentanspruch 3 der vorliegenden Patentanmeldung sprechen. Der Patentanspruch 3 der im Vorhaben angemeldeten Erfindung beschreibt die Erhöhung der Steifigkeit der Faserformschiene durch die Anbringung von Rippen, Sicken oder Einlagerung von Verstärkungselementen sowie die höhere Verdichtung des faserigen Materials.

Die Zeilen 27-48 der Spalte 1 des beschreibenden Teils der Offenlegungsschrift DE 44 17 329 erläutern, wie z. B. aus einem flachen Aluminiumband eine medizinische Schiene zur Abstützung von entsprechenden Gliedmaßen oder auch eine Halskragenschiene

zur Wirbelsäulenabstützung hergestellt werden kann. Als vorteilhaft wird dabei die leichte Handhabbarkeit dargestellt, da das Material von einer Rolle abgerollt und eine versteifende Formgebung durch die Einbringung von Sicken, Rippen, Kanten o. ä. erreicht werden kann. Nach Gebrauch kann das Material wieder geglättet und aufgerollt werden. In der Entgegenhaltung werden die nachträgliche leichte Einbringung bzw. Glättung der versteifenden Maßnahmen und die hieraus resultierenden Vorteile beschrieben. Bei der im Vorhaben betrachteten Schiene erfolgt zwar ebenfalls die Erhöhung der Steifigkeit durch die Anformung von Sicken, Rippen o. ä., diese werden jedoch nicht nachträglich eingebracht, sondern an entsprechend belasteten Stellen durch das Faserformverfahren hergestellt. Der Aufbau der Schienen sowie die Herstellung unterscheiden sich in der Entgegenhaltung und in der betrachteten Anmeldung wesentlich. In der Anmeldung „Verformbares Schienenband zur Herstellung einer medizinischen Schiene sowie Verfahren zur Herstellung des Schienenbandes“ sind fünf Patentansprüche formuliert worden. Zeichnungen besitzt diese Anmeldung keine.

Die Patentansprüche beschreiben die Besonderheiten der beidseitig aufgetragenen Schaumstoffschicht, die z. B. Aufwülstungen, Rillen, Noppen o. ä. aufweisen kann. Weiterhin kann die Schaumstoffschicht eine Beschriftung o. ä. aufweisen und mit einer schmutz- und/oder wasserabweisenden Schicht kaschiert werden. Darüber hinaus werden die entsprechenden Besonderheiten des Herstellverfahrens, wie z. B. die Spritzgussform, der verwendete Zweikomponenten-Schaum sowie der Einsatz des Schaum-Spritz-Verfahrens, behandelt.

Die durch das in der Entgegenhaltung beschriebene Verfahren hergestellte Schiene wird grundsätzlich für einen ähnlichen Einsatzfall verwendet, wird aber auf andere Weise hergestellt und hat andere Vorzüge als die im Vorhaben betrachtete Faserformschiene.

Chirurgische Schiene US 2 409 195

Die Patentschrift US PS 2409195 /CRA46/ stammt von 1943. Das Patentamt nennt die Kategorie Y und zweifelt somit das Vorliegen einer erfinderischen Tätigkeit an. Es wird insbesondere die Figur 1 genannt, die eine erfinderische Tätigkeit der Patentansprüche 1 und 5 der betrachteten Patentanmeldung /KÜN02a/ beeinträchtigen. In der Patentschrift /CRA46/ wird eine chirurgische Schiene beschrieben, die insbesondere zur Ersten Hilfe eingesetzt werden soll und anwendbar für Oberarm, Unterarm, Bein, Knöchel, Fuß oder auch Rücken und Nacken ist.

Bild 3.32 zeigt die Figur 1 der Patentschrift. Das flache ebene Material (Pappe, Karton o. ä.) soll auf einer Seite entsprechende Markierungen und eine Anleitung zur Erstellung der jeweiligen Schiene aufweisen. Abhängig von der Faltung und Einschneidung können verschiedene Schienenformen hergestellt werden. **Bild 3.33** und **3.34** (Figur 4 und 5) zeigen entsprechend gefaltete Schienen, die an einen Unterarm angelegt wurden. **Bild 3.34** zeigt die Schiene mit Stoffstreifen an einen Unterarm fixiert. Die Patentansprüche beschreiben die besonderen Ausführungen der Schiene, die Einteilung der Schiene in bestimmte Bereiche sowie die Anbringung entsprechender Einkerbungen usw.

Der Patentanspruch 1 beschreibt die Herstellung der Schiene bzw. Orthese durch das Faserformverfahren. Die in /CRA46/ beschriebene Schiene ist für die Erstversorgung und somit für einen anderen Einsatzzweck konstruiert. Darüber hinaus wird die Schiene durch entsprechende Faltvorgänge gebildet und besteht zunächst aus einem ebenen Material. Der Patentanspruch 5 beschreibt Markierungen, die zwecks Größenanpassung auf

der nach dem Faserformverfahren hergestellten Schiene angebracht werden sollten, um das Zuschneiden unterschiedlicher Größen zu erleichtern.

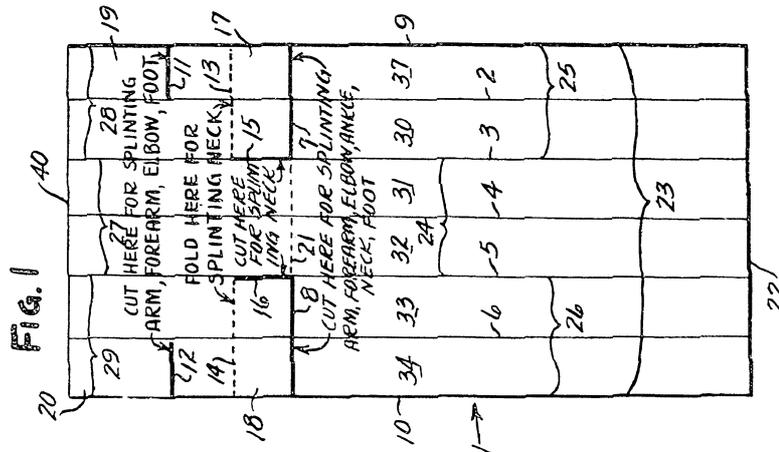


Bild 3.32 Ausgangsmaterial der Schiene /CRA46/

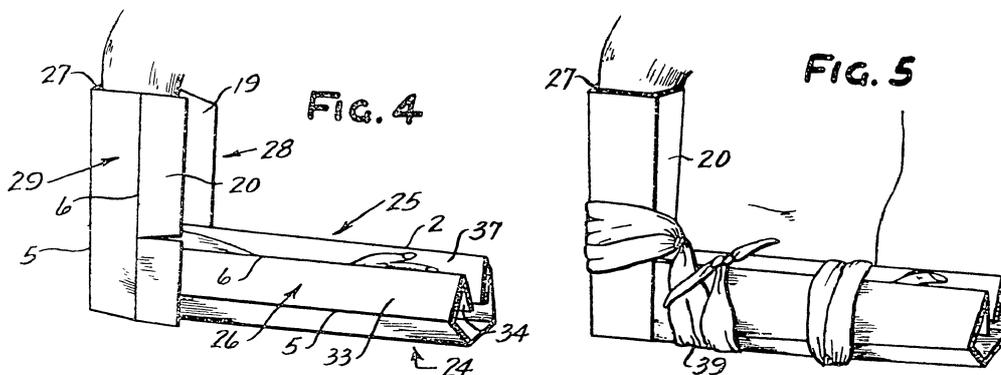


Bild 3.33 Ausgangsmaterial der Schiene /CRA46/ Bild 3.34 Ausgangsmaterial der Schiene /CRA46/

Vorgefertigtes Polster für chirurgische Anwendungen und dergleichen, sowie das Herstellungsverfahren für dieses US 3040740

Die Patentschrift /SFR62/ beschreibt ein besonders dehnbares Polstermaterial, das z. B. zur Polsterung unter einem Gipsverband vorgesehen werden kann. Das Material besteht einerseits aus weitmaschigem, stark dehnbarem Gewebematerial und andererseits aus einem Polstermaterial. Die Ausführung des Polstermaterials ist in der Spalte 7 näher beschrieben. Es können zerkleinerte Materialien (1 bis 10 mm) aus Zellulosefasern, Lappen, Wolle, Schaumgummi o. ä. auf einem dehnbaren Gewebe 10, 11, 12 befestigt werden. Bild 3.35 (Figur 13) zeigt das aus zwei Schichten (13, 14) bestehende Polstermaterial, das mit zwei unterschiedlich dehnbaren Gewebematerialien 10, 11 und mit einem Kleber (15) versehen wurde.

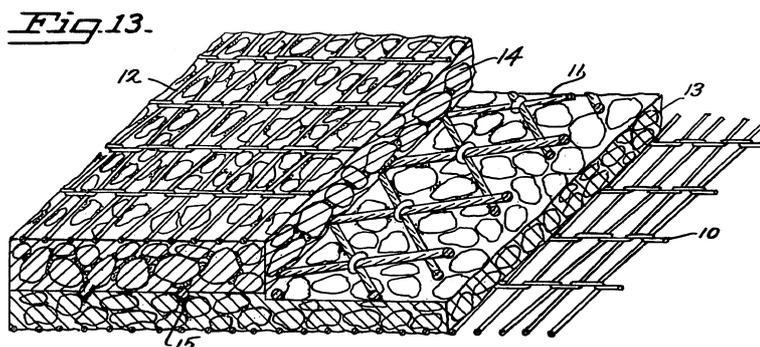


Bild 3.35 Polstermaterial aus zwei Schichten Polster (13, 14) mit Gewebematerial 10, 11, 12 /SFR62/

Darüber hinaus kann das Polstermaterial wie in **Bild 3.36** (Figur 20) dargestellt aus faltigem Papier 16 und dem Gewebematerial 11 bestehen, die an verschiedenen Punkten 17 verklebt wurden.

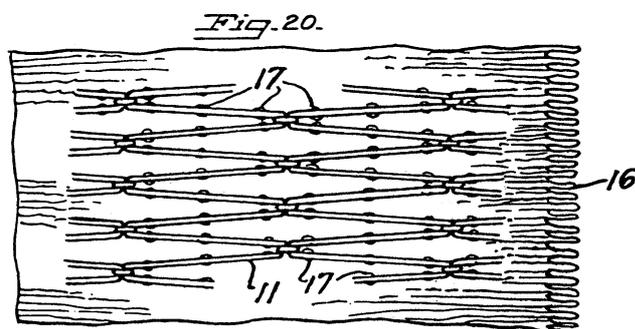


Bild 3.36 Polstermaterial aus faltiger Matte 17 mit Gewebematerial 11 /SFR62/

Die Spalten 13 und 14 /SFR62/ beschreiben weitere Ausführungsbeispiele des Polstermaterials sowie die eingesetzten Materialien. Der Patentanspruch 31 beschreibt den Aufbau des Polstermaterials aus dehnbarem elastischem Gewebematerial und weichem, dämpfendem Zwischenmaterial, die entsprechend miteinander verbunden sind.

3.4 Zusammenfassende Betrachtung

Bei der Untersuchung des Standes der Technik wurde zunächst das Faserformverfahren betrachtet, um hieraus Hilfsmittel zur Erstellung der benötigten Versuchsanlage und der Versuchswerkstücke abzuleiten.

Nach dem Stand der Technik bestehen auf dem Gebiet der Faserformprodukte keine Auslegungskriterien, wie sie beispielsweise im allgemeinen Maschinenbau üblich sind. Die einzigen Ansätze zum Tragfähigkeitsnachweis der Produkte liegen in Form von Untersuchungsergebnissen am fertigen Produkt, z. B. bei Fallversuchen, vor. Eine derartige Vorgehensweise ist insbesondere bei der Dimensionierung von Funktionsteilen, zu denen auch die zu entwickelnde Unterarmorthese zählt, nicht akzeptabel. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass durch mehrere Fachleute die Forderung nach geeigneten Kenngrößen gestellt wird, so dass hierdurch der Bedarf für die durchzuführenden Untersuchungen eindeutig nachgewiesen werden konnte.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Bauformen von Orthesen zur Fixation der oberen Extremitäten hat gezeigt, dass weder vergleichbare noch in ihrer Funktionsweise und in ihrem Aufbau ähnliche Produkte bekannt bzw. am Markt verfügbar sind. Auch zeigt die Analyse der Patentsituation unabhängig von der Patentfähigkeit des zu betrachtenden Produktes, dass ein hinreichender Entwicklungsbedarf vorhanden ist.

Insgesamt konnten damit der Bedarf und die Notwendigkeit der im Folgenden durchzuführenden Untersuchungen eindeutig belegt werden.

4 Untersuchung der auftretenden Belastungen

4.1 Geometrie und Kinematik

Zur Auslegung und Dimensionierung der Faserform-Unterarmorthese ist es erforderlich, die wirkenden Belastungen zu erfassen und mit den zulässigen zu vergleichen. Zur Ermittlung der wirkenden Belastungen sind die auftretenden Kräfte und Momente, die auf die Unterarmorthese wirken, zu bestimmen. Dies sind einerseits die Kräfte und Momente, die durch den Bewegungsapparat des Menschen auf die Orthese aufgebracht werden. Zusätzlich können noch von außen Kräfte, die z. B. durch einen Sturz verursacht werden, einwirken. Diese müssen sowohl vom Unterarm als auch von der Orthese aufgenommen werden. Da die Orthese nur stützend wirkt, sind die Kräfteanteile nicht eindeutig zu beziffern. Darüber hinaus ist es schwierig, diese Kräfte genau bezüglich ihres Angriffspunkts und ihrer Größe anzugeben. Daher sollen hier zunächst die auftretenden Belastungen, die aus dem Bewegungsapparat des Menschen resultieren, bestimmt werden.

Hinsichtlich der Festigkeit eines orthetischen Hilfsmittels beschreibt DIN EN 12523 /DEN99/, dass die während des normalen Gebrauchs auftretenden Belastungen bzw. zu erwartenden Verformungen aufgenommen werden müssen. Darüber hinaus wird in /DEN99/ die Biegeprüfung von Prothesen für die oberen Extremitäten, für Ellbogen- und/oder Schultereinheiten, beschrieben. Hinsichtlich der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften für orthetische Hilfsmittel werden Verfahren für Kniegelenkbaugruppen der unteren Gliedmaßen genannt, die bei deren Auswahl unterstützen sollen; sie sind nicht für die Prüfung vollständiger Orthesen vorgesehen. Andererseits sollten die Kräfte, die auf die Weichteile des menschlichen Körpers durch die prothetischen bzw. orthetischen Hilfsmittel ausgeübt werden, nicht unangenehm hoch werden, damit die Drücke und Spannungen auf und im Körpergewebe nicht zu groß werden. Durch entsprechende konstruktive Maßnahmen soll dies verhindert werden. Eine Aussage über die wirkenden oder zulässigen Drücke, Spannungen, Kräfte oder Momente wird in /DEN99/ nicht getroffen.

In /KLE00/ wird die Größe der Kraft pro Muskelquerschnittsfläche unter normalen Bedingungen mit steigendem Querschnitt des Muskels mit 40 bis 100 N/cm² angegeben. Weiterhin ist die aufzubringende Kraft zeitbegrenzt, da der Muskel ermüdet und dieses um so schneller erfolgt, je größer die Belastung ist.

Die Ausführung von Bewegungen erfolgt durch den aktiven (Muskulatur) und den passiven Bewegungsapparat (Knochen, Knorpel, Bänder) des Menschen. Die Muskeln sind über Sehnen mit den jeweiligen Knochen verbunden. Abhängig von der Art der Tätigkeit werden die Muskeln in Beugemuskeln (Flexoren), Streckmuskeln (Extensoren), Anziehmuskeln (Adduktoren, zum Körper hin), Abziehmuskeln (Abduktoren, vom Körper weg) sowie Rollmuskeln (Rotatoren) unterschieden. Durch die innere Wirkung der Muskulatur entsteht die äußere Kraftwirkung, die im hier betrachteten Fall auf die Unterarmorthese wirkt. Die Größe der aufzubringenden Kraft ist abhängig von der inneren Geometrie des Bewegungsapparates; hierzu gehören die Gelenk Konstruktion und die Lage der Gelenkachse, die Hebelarme der Muskulatur sowie die Größe (Querschnitt) und die Länge des Muskels.

Zur Bestimmung der wirkenden Kräfte wird im Folgenden der Bewegungsapparat von Hand und Unterarm näher betrachtet. Die Hand besteht aus 27 einzelnen Knochen sowie mehreren Sesambeinen (*Ossa sesamoidea*) und wird in die Bereiche Finger (*Digitus manus*), Mittelhand (*Meta carpus*) sowie Handwurzel (*Carpus*) eingeteilt. Die Bezeichnung der einzelnen Knochen beinhaltet oftmals die Lage der jeweiligen Knochen zum Körper bzw. Rumpf. Knochen oder auch aus mehreren Knochen bestehende Skelettabschnitte bzw. -bereiche werden mit dem Zusatz proximal benannt, wenn deren Lage sich näher zum Körper bzw. Rumpf befindet. Knochen, deren Benennung den Zusatz distal beinhaltet, liegen dementsprechend körper- bzw. rumpffern. Die Angabe der Lage (proximal, distal) wird in der Medizin auf unterschiedliche Bereiche bzw. Skelettabschnitte bezogen. Dies hat zur Ursache, dass die Bezeichnungen proximal und distal z. B. sowohl bei der Benennung der einzelnen Fingerknochen (*Ossa digitorum manus*) als auch bei der Benennung der Handwurzelknochen (*Ossa Carpi*) verwendet werden. Die Ansicht (Vorder- und Unteransicht) auf Hand und Unterarm wird mit dorsal bezeichnet, wenn die Seite bzw. Ansicht des Handrückens betrachtet wird; die Bezeichnung ist palmar oder auch volar, wenn auf die Hohlhandseite von Hand und Unterarm gesehen wird.

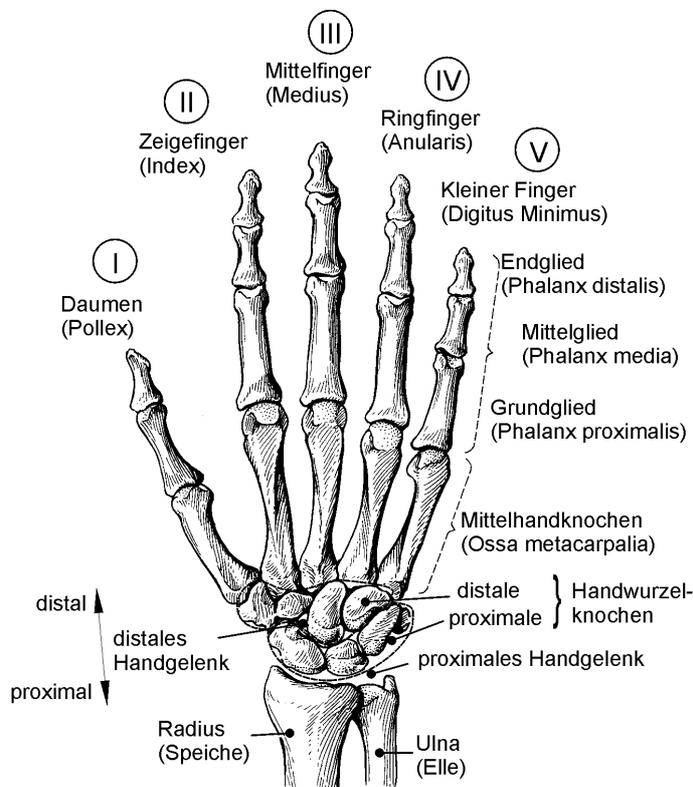


Bild 4.1 Prinzipieller Aufbau von Hand und Handgelenk (nach /VOS83/, /ROS01/)

Finger (*Digitus manus*)

Die Finger (*Digitus manus*) werden beginnend vom Daumen mit römischen Ziffer durchnummeriert: Daumen (Pollex) I, Zeigefinger (Index) II, Mittelfinger (Medius) III, Ringfinger (Anularis) IV sowie der kleine Finger (*Digitus Minimus*) V. Die Finger bestehen aus jeweils drei Gliedern (Phalanges), den Endgliedern (*Phalanges distalis*), den Mittelgliedern (*Phalanges media*) und den Grundgliedern (*Phalanges proximalis*). Im Gegensatz zu den Fingern besteht der Daumen (Pollex) nur aus zwei Gliedern, nämlich dem Grund- und Endglied (*Phalanx proximalis* und *distalis*); hier fehlt das Mittelglied (*Phalanx media*). Die Gelenkverbindung zwischen den Fingergliedern ist ein durch Bänder verstärktes Scharniergelenk.

Mittelhand (Metacarpus)

Die Mittelhand (Metacarpus) wird aus fünf langen Mittelhandknochen (Ossa metacarpalia I-V) gebildet, die über Kugelgelenke und verstärkende Bänder mit den jeweiligen Grundgliedern (Phalanx proximalis) der Finger verbunden sind. Die Mittelhandknochen bilden die breite Struktur der Hand. Sie liegen genau wie die Handwurzelknochen nicht in einer Ebene, sondern bilden eine räumliche, zur Hohlhandseite (palmar) konkav geformte Gewölbekonstruktion. Insgesamt besteht der Bereich von Fingern und Mittelhand aus 19 Knochen. Die Mittelhand ist wiederum mit dem dritten Bereich der Hand, der Handwurzel (Carpus), verbunden.

Handwurzel (Carpus)

Acht Handwurzelknochen (Ossa Carpi), die in zwei Reihen zu jeweils vier Knochen angeordnet sind, bilden die Handwurzel (Carpus), **Bild 4.2**. Diese Reihen ergeben das distale und das proximale Handgelenk. Die distale Reihe ist körper- bzw. rumpffern und somit näher zu den Mittelhandknochen angeordnet. Dagegen ist die proximale Reihe körper- bzw. rumpfnah zum Unterarm, somit zur Elle (Ulna) und Speiche (Radius), gelegen. Die Anordnung der Handwurzelknochen ist ebenfalls räumlich, und zwar sind sie dorsal (zum Handrücken) konvex und palmar (zur Hohlhandseite) konkav geformt. Die Handwurzelknochen werden untereinander durch Bänder zusammengehalten. Die Verbindungen der Mittelhandknochen mit den distalen Handwurzelknochen sind weitgehend unbewegliche, durch Bänder gesicherte Gelenkverbindungen (Amphiarthrosen).

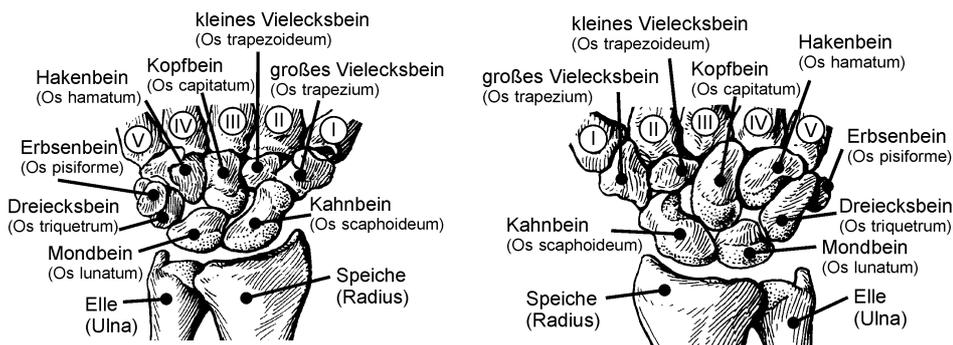


Bild 4.2 Handwurzel (nach /VOS83/)

Proximale Handwurzelknochen

Beginnend vom Daumen bzw. von der Speiche (Radius) befinden sich in der proximalen Reihe das Kahnbein (Os scaphoideum), das Mondbein (Os lunatum), das Dreiecksbein (Os triquetrum) und das Erbsenbein (Os pisiforme). Beim Erbsenbein handelt es sich um ein Sesambein, das nur von der Hohlhandseite vollständig zu sehen ist, da es auf dem Dreiecksbein (Os triquetrum) aufliegt /VOS83/. Sesambeine sind kleine Knöchelchen, die vollständig in Sehnen oder Bändern eingelassen sind. Das Erbsenbein (Os pisiforme) ist in die Sehne des M. flexor carpi ulnaris eingelagert /ROS01/.

Distale Handwurzelknochen

In der distalen Reihe befinden sich beginnend vom Daumen bzw. der Speiche (Radius) das große Vielecksbein (Os trapezium), das kleine Vielecksbein (Os trapeziodeum), das Kopfbein (Os capitatum) und das Hakenbein (Os hamatum), das einen zur Hohlhand (palmar) gerichteten Haken (Hamulus ossis hamati) aufweist.

Handgelenk (Articulationes manus)

Das proximale Handgelenk (Articulatio radiocarpalis) ist ein Ellipsoidgelenk (Articulatio ellipsoidea), das durch die Speiche (Radius) und den proximalen (rumpfnahen)

Handwurzelknochen gebildet wird. Das Kahnbein (*Os scaphoideum*), das Mondbein (*Os lunatum*) und das Dreiecksbein (*Os triquetrum*) bilden den konvex geformten Gelenkkopf, dagegen stellt der distale Bereich der Speiche (*Facies articularis*) und der im Bereich der Elle liegende Teil (*Discus articularis*) die konkave Gelenkpfanne dar.

Die proximalen Handwurzelknochen sind untereinander leicht verschieblich. Die räumliche Anordnung ist dorsalwärts (am Handrücken) konvex, dementsprechend palmarwärts (Hohlhandseite) konkav. **Bild 4.3** zeigt die räumliche Anordnung der proximalen Reihe der Handwurzelknochen einer linken Hand.

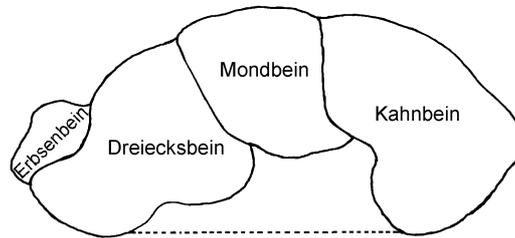


Bild 4.3 Proximale Reihe nach /GÜN50/

Das durch die ellipsenförmigen konkaven und konvexen Gelenkflächen gebildete Gelenk besitzt zwei Freiheitsgrade. Hierdurch ist die Bewegung um zwei Hauptachsen möglich, die senkrecht aufeinander stehen. Das Ellipsoidgelenk besitzt eine von der Speiche (*Radius*) zur Elle (*Ulna*) verlaufende konkav geformte Fläche, deren lange Achse entsprechend von der Speiche zur Elle verläuft /VOS83/. Hierdurch ist die Beugung bzw. Flexion, d. h. die Bewegung der Hand zur palmar Seite des Unterarms (*Palmarflexion*), sowie die Streckung bzw. Extension (*Dorsalflexion*), d. h. die Bewegung der Hand in Richtung der dorsalen Seite des Unterarms, möglich. Diese Bewegung wird in der Medizin auch als Flächenbewegung bezeichnet.

Bei der Beugung und Streckung (Flächenbewegung) um die lange Achse erfolgt die Drehbewegung um die stärker konvex gekrümmte Fläche des Ellipsoidgelenks, daher besitzt das Gelenk in dieser Richtung eine größere Bewegungsfreiheit. In /SHI87/ werden für die Beugung (*Palmarflexion*) etwa 80 Grad und für die Streckung (*Dorsalflexion*) etwa 70 Grad angegeben, dagegen werden in /VOS83/ für die Beugung (*Palmarflexion*) Werte zwischen 35 und 60 Grad und für die Streckung (*Dorsalflexion*) Werte zwischen 50 und 60 Grad erwähnt.

Der zweite Freiheitsgrad des Ellipsoidgelenks ermöglicht sowohl die Bewegung der Hand zur Daumenseite (*Radialabduktion*) als auch zur Kleinfingerseite (*Ulnarabduktion*); diese Bewegung zu den Rändern der Hand wird auch als Rand- bzw. Abduktionsbewegung bezeichnet, siehe **Bild 4.4**. Die Drehbewegung erfolgt um die kleine Achse des Ellipsoidgelenks, die senkrecht zu der langen Achse verläuft. Die konvexe Fläche des Ellipsoidgelenks weist eine geringere Krümmung auf. Die Bewegungsfreiheit zum Daumen (*Radialabduktion*) wird in /SHI87/ mit 15 Grad und in /VOS83/ mit 23 bis 30 Grad angegeben. Die maximal mögliche Bewegung zur Kleinfingerseite (*Ulnarabduktion*) wird in /SHI87/ mit einem Winkel von 40 Grad und in /VOS83/ mit einem Winkel zwischen 30 und 40 Grad beziffert.

Das distale bzw. mittlere Handgelenk (*Articulatio mediocarpalis*) ist die Verbindung zwischen der distalen und proximalen Handgelenkreihe. Aufgrund des S-förmigen Gelenkspaltes befinden sich zwei Gelenke unmittelbar nebeneinander, wobei der Gelenkkopf auf der Seite der Speiche (*Radiusseite*) vom proximalen Handwurzelknochen (*Kahnbein*) und die entsprechende Gelenkpfanne vom distalen Handwurzelknochen (*großes und kleines Vielecksbein*) gebildet wird /VOS83/, siehe **Bild 4.4**. Auf der Seite der Elle (*Ulnarseite*) wird die Gelenkpfanne von den proximalen Handwurzeln (*Kahn-*,

Mond-, Dreiecksbein) und dementsprechend der Gelenkkopf von dem distalen Handwurzelknochen (Kopf-, Hakenbein) gebildet /VOS83/. Das distale Handgelenk wird daher auch als verzahntes Scharniergelenk bezeichnet (/SHI87/, /ROS01/).

An der Palmarseite (Hohlhandseite) besitzt dieses Gelenk aufgrund der Gelenkshemmung kaum Bewegungsmöglichkeiten, dagegen ist die Dorsalseite (Handrückenseite) relativ beweglich. Folglich wird das Handgelenk überwiegend bei der Dorsalextension bewegt, wobei die Palmarflexion im proximalen Handgelenk erfolgt, vgl. **Bild 4.4** (/VOS83/, /SHI87/, /GÜN50/). Die Randbewegung zur Daumenseite (Radialabduktion) sowie die Streckung (Dorsalextension) werden hauptsächlich im distalen Handgelenk durchgeführt /VOS83/. Bei der Betrachtung der Funktion können beide Handgelenke als ein einheitliches Gelenk dargestellt werden /VOS83/, da die Drehachsen ohnehin sehr dicht zusammen liegen. Durch die Kombination der Bewegungen in den beiden Freiheitsgraden ist das Handkreisen (Zirkumduktion) möglich.

Funktionelle Drehachse und Bewegung (Resultierende Betrachtung)

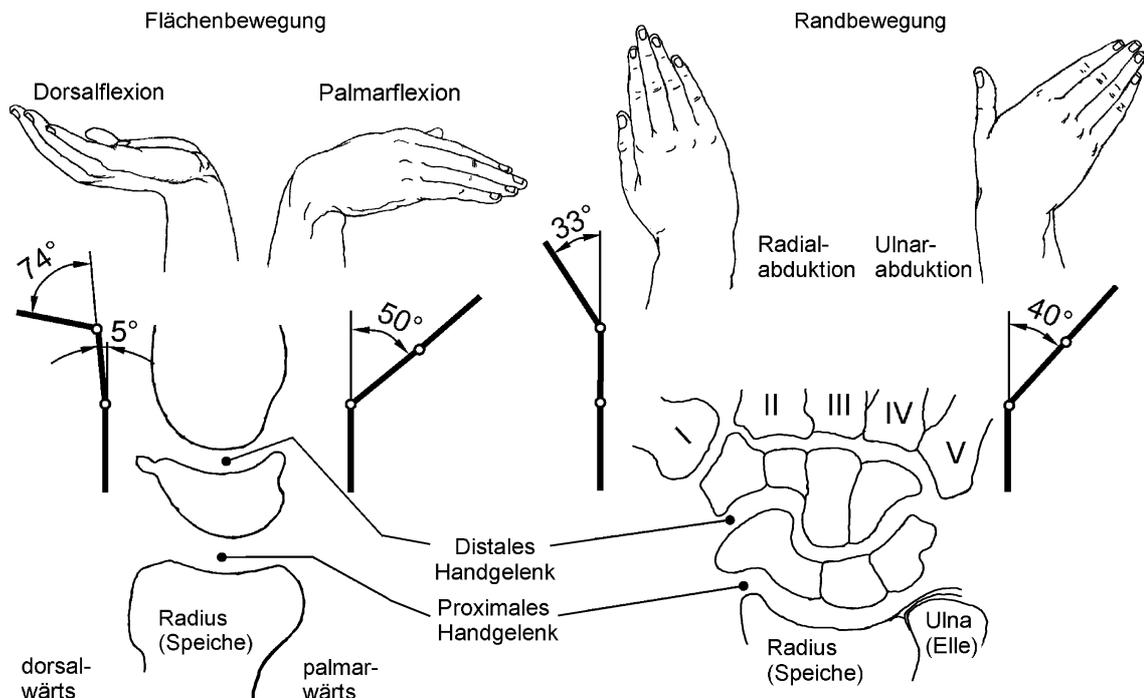


Bild 4.4 Bewegungsmöglichkeiten des Handgelenks (nach /SHI87/, /VOS83/, /GÜN50/)

Die Beugung (Palmarflexion) und die Streckung (Dorsalextension) der Hand bewirken ein Biegemoment in der auf den Handrücken und den Unterarm applizierten Schiene. Die Randbewegung der Hand zur Kleinfingerseite (Ulnarabduktion) und zur Daumenseite (Radialabduktion) bewirkt ebenfalls ein Biegemoment auf die Schiene, dessen Drehachse senkrecht zur ersten Achse verläuft. Die Bewegungsfreiheit ist bei der Randbewegung wesentlich geringer als bei der Flächenbewegung (Beugung, Streckung); darüber hinaus wird die Beugung (Palmarflexion) durch das Eigengewicht der Hand unterstützt. Für die Untersuchung der Schiene müssen die Biegemomente um diese Achsen simuliert werden. Hierzu werden zunächst die Bewegungen um das proximale und distale Gelenk vereinfachend durch eine Bewegung um eine Achse ersetzt, die näherungsweise als Gerade durch die beiden hervorstehenden Bereiche von Elle und Speiche, die auch von außen gut erkennbar sind, verläuft.

Das Biegemoment um die Randbewegung soll im Folgenden nicht weiter betrachtet werden; zum einen ist das hier aufzubringende Moment erheblich kleiner als bei der Flächenbewegung. Zum anderen weist die Schiene in dieser Richtung ein erheblich höheres Biege widerstandsmoment auf. Eine Simulation der kombinierten Bewegung um beide Achsen, wie sie bei der Kreisbewegung (Zirkumduktion) des Handgelenks auftritt, würde den experimentellen Aufwand erheblich vergrößern und bezüglich der Ermittlung der Biegefestigkeit der Orthese kaum weitere Erkenntnisse liefern.

Hinsichtlich der zu erwartenden Biegemomente konnten der einschlägigen Fachliteratur keine zuverlässigen Kennwerte entnommen werden. Lediglich in den Untersuchungen von Nicol /NIC00/ wurden Durchschnittswerte in Höhe von 7 Nm bei Spitzenwerten von 12,5 Nm ermittelt, diese wurden bei typischen Greifaufgaben sowie bei Positionierungsaufgaben gemessen.

Im Folgenden wird eine entsprechende Versuchseinrichtung entwickelt, mit der einerseits die durch den Bewegungsapparat des Menschen in Abhängigkeit vom Beugungs- bzw. Streckungswinkel aufzubringenden Biegemomente ermittelt werden können. Andererseits soll die Einrichtung auch die Möglichkeit bieten, an Dummies applizierte Orthesen zu untersuchen.

4.2 Aufbau der Versuchseinrichtung und Versuchsprogramm

4.2.1 Beschreibung des Versuchsprogramms und -durchführung

Zur Auslegung der Faserform-Unterarmorthese ist es erforderlich, die wirkenden Biegemomente, die im Handgelenk aufgebracht werden können, zu erfassen.

Muskeln (Hebelarm, Muskelquerschnitt)

Das im Handgelenk erzeugte Biegemoment ist abhängig vom wirkenden Hebelarm sowie der Querschnittsgröße und der Länge des Muskels. In /KLE00/ wird die Größe der Kraft in Abhängigkeit vom Muskelquerschnitt mit 40 bis 100 N/cm² angegeben. Der Muskelquerschnitt ist eine innere Größe und somit nicht ohne weiteres zu erfassen; daher soll stattdessen der größte Umfang am Unterarm erfasst werden; üblicherweise befindet sich dieser direkt unterhalb des Ellengelenks. Gemäß DIN 33402 /DIN86/, /DIN78d/ wird der Ellbogen-Griffachsen-Abstand mit erfasst, der prinzipiell die Wirklänge angibt. Als weiteres Längenmaß wird die in /DIN86/, /DIN78d/ angegebene Handflächenlänge mit ermittelt, diese wird von der Handwurzel bis zum III. Mittelhandknochen (Ossa metacarpalia III) gemessen.

Drehachse (proximales Handgelenk)

Als Drehachse für die Beugung (Palmarflexion) und Streckung (Dorsalflexion) wird näherungsweise das Ellipsoidgelenk am proximalen Handgelenk betrachtet; daher sollen hier zur näheren Spezifikation der Drehachse die Breite des Handgelenks zwischen Elle und Speiche sowie dessen Höhe und zusätzlich der Umfang erfasst werden. Die Breite und Höhe charakterisieren die Halbachsen des Ellipsoidgelenks. Die Handgelenkbreite könnte weiterhin bei der Auslegung, d. h. Festlegung der Abmessungen und Größenklassen, der Orthesen eine wertvolle Information darstellen.

Die Kraft- bzw. Momentenmessung erfolgt bei Palmar- und Dorsalflexion; die Messwerte werden in Abhängigkeit des Winkels erfasst. Bei der Ermittlung des Drehmomentes wird das Handgelenk innerhalb der Versuchseinrichtung fluchtend zu dieser Drehachse ausgerichtet. Die Drehachse des Handgelenks wird bei den jeweiligen Probanden durch das Ertasten des Gelenkspaltes am proximalen Handgelenk ermittelt, dieser befindet sich direkt unterhalb einer sich bei starker Dorsalflexion (Streckung) bildenden Hautfalte. Mit dem Einverständnis der Probanden wird diese Drehachse mit einem wasserlöslichen Filzstift auf dem Handgelenk markiert und mit der Drehachse der Versuchseinrichtung in Übereinstimmung gebracht. Die Hand und der Unterarm werden mit Hilfe einer geeigneten Manschette in dieser Lage an der Versuchseinrichtung fixiert.

Anthropologische Daten

Die mit Hilfe der Versuchseinrichtung ermittelten Werte sind voraussichtlich abhängig von der körperlichen Verfassung des jeweiligen Probanden. Damit der jeweilige Körperbau Berücksichtigung findet, werden die relevanten anthropologischen Daten erfasst. Darüber hinaus wird der jeweilige Trainingszustand des Probanden aufgenommen. Dies ist messtechnisch nicht ohne Weiteres möglich; der jeweilige Trainingszustand wird qualitativ nach eigener Einschätzung der Probanden in die folgenden drei Kategorien eingeteilt und festgehalten: Gut, mittelgut und weniger gut. Zur Auswertung der ermittelten Messwerte werden insgesamt die folgenden Daten der Probanden erfasst:

- Geschlecht, Alter, Gewicht, Körperhöhe
- qualitativer Trainingszustand: gut, mittelgut, weniger gut
- Handgelenkumfang, -höhe, -breite, Handlänge, -flächenlänge, Muskelumfang Unterarm
- Maximaler Beuge- und Streckwinkel

Vor Beginn jedes Versuchs werden zunächst die genannten Daten ermittelt. Anschließend werden die Messwerte für das Beugen (Palmarflexion) und Strecken (Dorsalflexion) über einen Winkelbereich von $+50^\circ$ bis -50° in 10° Schrittweite ermittelt, d. h. es erfolgen 22 Messungen pro Proband (11 Beugen, 11 Strecken). Zwischen den einzelnen Messungen werden kurze Erholungspausen für die beanspruchte Muskulatur eingelegt. Darüber hinaus wird der Proband zur Höchstleistung motiviert, damit möglichst das maximal aufbringbare Moment gemessen werden kann; allerdings sollten dabei keine Schmerzen zu verspüren sein.

4.2.2 Aufbau der Versuchseinrichtung

Mit Hilfe der in **Bild 4.5** dargestellten Versuchseinrichtung werden die Drehmomentmessungen im Handgelenk über einen Winkelbereich von $+50^\circ$ bis -50° durchgeführt. An der Versuchseinrichtung ist jeweils eine geeignete Auflagefläche für den Unterarm und für die Handfläche angebracht. Die Auflagefläche für die Hand ist gegenüber der feststehenden Unterarmauflage an einer drehbar gelagerten Welle (Handantriebswelle) befestigt. Mit Hilfe einer geeigneten Messtechnik werden die aufgebrachten Drehmomente ermittelt. Hierzu werden zwei handelsübliche Digitalwaagen, insbesondere deren Anzeigentafeln sowie deren Biegebalken mit der gesamten Auswertelektronik, verwendet. Die mit Dehnungsmessstreifen beklebten Biegebalken werden am unteren Ende eines Hebelarms befestigt, so dass sich die Biegebalken versetzt gegenüber stehen.

Das andere Ende des Hebelarms wird mit der drehbar gelagerten Handantriebswelle der Handauflage verbunden. Zur Schaffung von definierten Kraftangriffspunkten werden die Biegebalken einseitig mit einer kleinen Kugel beklebt. Die Kugeln stoßen bei der Verdrehung der Handantriebswelle auf einen ihnen gegenüberstehenden weiteren Hebelarm, der an seinem Ende mit zwei Hartmetallplättchen beklebt ist. Dieser zweite Hebelarm ist mit einer weiteren Welle (Antriebswelle) und über eine entsprechend ausgelegte Zahnradstufe mit dem Antrieb verbunden. Der Antrieb dient einerseits zum Verfahren der Handauflage in die gewünschte Winkelposition und andererseits als Bremse für die an der Handauflage aufgebrachtene Drehmomente. Indem die Anschlussklemmen des Motors im stromlosen Zustand miteinander verbunden werden, wird ein relativ großes Bremsmoment aufgebracht; dieses wird zusätzlich noch durch die nachfolgende Getriebeübersetzung von $i = 495$ vergrößert.



Bild 4.5 Drehmomentmessung im Handgelenk

Versuchsdurchführung

Die Drehachse des Handgelenks wird in Übereinstimmung mit der Drehachse der Handauflage ausgerichtet. Die Hand bzw. der Unterarm des Probanden wird mittels einer an der Versuchseinrichtung angebrachten Luftdruckmanschette mit der beweglichen Handauflage bzw. der feststehenden Armauflage verbunden. Zur Versuchsdurchführung wird die Handauflagefläche durch das Einschalten des Getriebemotors in die gewünschte Winkelposition verfahren. Nach dem Ausschalten des Motors kann der Proband an der Handauflage das Drehmoment einleiten. Dies bewirkt die Verdrehung der Handauflagewelle und des hieran befindlichen Hebelarms. Der an seinem Ende befestigte Biegebalken stützt sich dabei an dem gegenüberliegenden jetzt feststehenden (bzw. gebremsten) Hebelarm der Antriebswelle ab. Hierdurch wird der belastete Biegebalken abhängig von der wirkenden Kraft verformt. Mit Hilfe der Auswertelektronik der Digitalwaagen kann die aufgeprägte Kraft gemessen werden und über die Hebellängen in ein Drehmoment umgerechnet werden. Je nach Krafrichtung (Beugen oder Strecken) wird einer der beiden Biegebalken belastet.

4.2.3 Reihenuntersuchungen

Bei der durchgeführten Drehmomentmessung im Handgelenk wurden zwanzig männliche und zwanzig weibliche Probanden im Alter von 19 bis 60 Jahren untersucht. **Bild 4.6, 4.7, 4.8** sowie **4.9** zeigen die ermittelten Drehmomente in Abhängigkeit von den Winkelpositionen (Drehwinkeln). Der obere bzw. untere Wert gibt jeweils das maximal und minimal erreichte Drehmoment an. Das arithmetische Mittel der Momente der untersuchten Probanden ist in dem jeweiligen Bild aufgetragen und der errechnete Wert mit einem Punkt kenntlich gemacht. Die einzelnen Punkte sind mit einer geglätteten

ten Kurve miteinander verbunden. Zwischen den arithmetischen Mitteln und dem Maximal- bzw. Minimalwert ist die Standardabweichung für den gesamten Messbereich angegeben.

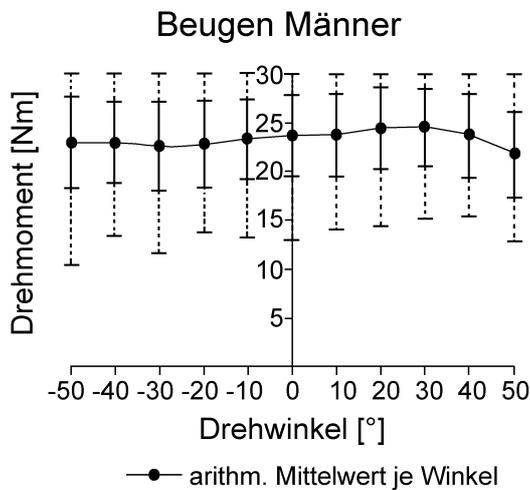


Bild 4.6 Beugung, Mittelwerte, Männer

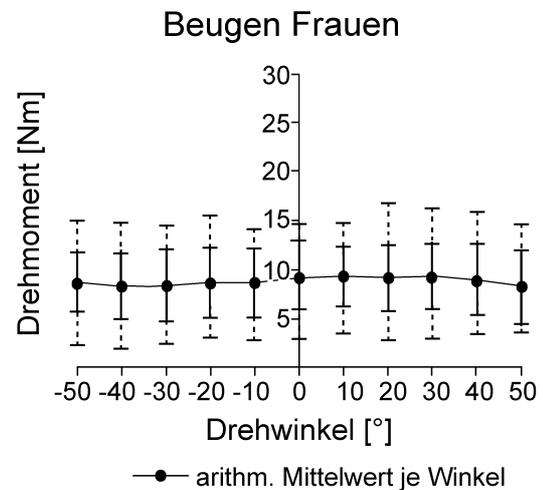


Bild 4.7 Beugung, Mittelwerte, Frauen

Beugen (Palmarflexion)

Die Ergebnisse beim Beugen (Palmarflexion) zeigt **Bild 4.6** für männliche und **Bild 4.7** für weibliche Probanden. In **Bild 4.6** ist erkennbar, dass der Maximalwert beim Beugen bei den Männern in allen Winkelpositionen konstant 30 Nm erreicht. Da das maximal messbare Drehmoment aufgrund der Messanordnung 30 Nm beträgt und dieser Wert von zwei Probanden in jeder Winkelposition erreicht wurde, erklären sich diese Messwerte. Unter der Annahme, die Abweichungen vom Mittelwert wären in positiver und negativer Richtung betragsmäßig gleich groß, hätten die beiden Probanden ein Drehmoment von bis zu 34 Nm aufgebracht. **Bild 4.7** zeigt die erreichten Drehmomente der Frauen. Im Gegensatz zu den Männern liegen diese Werte deutlich niedriger. Gemäß der Auswertung können die stärksten Frauen gerade die Werte der schwächsten Männer erreichen. Die ermittelten Drehmomente verteilen sich bei den Frauen, **Bild 4.7**, etwas gleichmäßiger als bei den Männern, **Bild 4.6**. Bezogen auf die arithmetischen Mittelwerte sind die Abweichungen erstaunlich konstant, die Männer erreichen beim Beugen einen arithmetischen Mittelwert von ca. 23,3 Nm, bei den Frauen beträgt dagegen dieser nur 8,8 Nm.

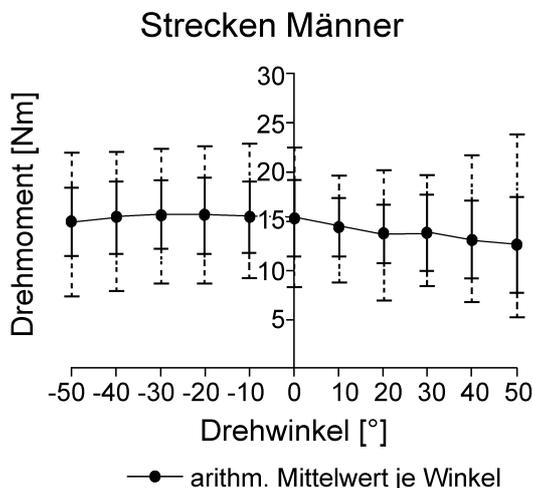


Bild 4.8 Streckung, Mittelwerte, Männer

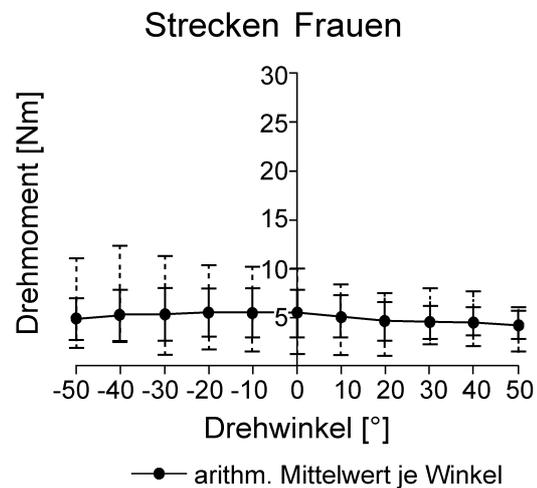


Bild 4.9 Streckung, Mittelwerte, Frauen

Strecken (Dorsalflexion)

Die erzielten Messwerte beim Strecken (Dorsalflexion) sind in **Bild 4.8** für männliche und in **Bild 4.9** für weibliche Probanden dargestellt. Auch diese Auswertung zeigt, dass die Werte der stärksten Frauen gerade an die der schwächsten Männer heranreichen. Von keinem sowohl der männlichen als auch der weiblichen Probanden wurde beim Strecken das maximale Drehmoment erreicht. Die erreichten Drehmomente waren sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen beim Strecken deutlich geringer als beim Beugen. Der arithmetische Mittelwert des Drehmoments liegt bei den Männern bei 14,5 Nm und bei den Frauen bei 4,9 Nm.

Zusammenfassung der Ergebnisse

In den betragsmäßig großen Winkelpositionen wurden sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen geringere Drehmomente erreicht; dies gilt sowohl für das Beugen als auch das Strecken. Bei den untersuchten männlichen Probanden sind besonders bei den Winkelpositionen (-50°, -40° und 50°, 40°) größere Schwankungen zwischen den Maximal- und Minimalwerten zu finden als bei den weiblichen Probanden. Dagegen ist bei den weiblichen Probanden die Schwankung zwischen Maximal- und Minimalwert eher gering.

Die folgende Tabelle beinhaltet die arithmetischen Mittelwerte der Drehmomente beim Beugen und beim Strecken. Darüber hinaus ist der jeweilige Faktor angegeben, der das Verhältnis der Werte von Männern und Frauen beim Beugen und Strecken berücksichtigt.

	Beugen	Strecken	Beugen/Strecken
Männer	23,3 Nm	14,5 Nm	1,6
Frauen	8,8 Nm	4,9 Nm	1,8
Männer/Frauen	2,7	2,96	

Bei den Männern sind die erbrachten arithmetischen Mittelwerte der Drehmomente um den Faktor 2,7 beim Beugen und um den Faktor 2,96 beim Strecken höher.

Faserformprodukte

Durch die Messreihen wurden die aufbringbaren Drehmomente im menschlichen Handgelenk bei gesunden Probanden erfasst. Eine Faserformorthese müsste somit für männliche Patienten bezüglich der Belastbarkeit fast auf das Dreifache ausgelegt werden im Vergleich zu Schienen für weibliche Patienten. Weiterhin ist zu beachten, dass die ermittelten Drehmomente an gesunden männlichen und weiblichen Probanden durchgeführt wurden. Wenn eine Verletzung in diesem Bereich vorläge, würden die Ergebnisse sicherlich anders ausfallen.

Bei entsprechenden Biegeprüfungen der Faserformschienen können diese ermittelten Werte dann mit den von der Schiene ertragbaren Biegemomenten verglichen werden. Inwieweit eine Dorsalschiene bzw. eine Palmarschiene die Belastungen besser ertragen kann, d. h. welche Momentenrichtung sich besser oder schlechter auswirkt, kann an dieser Stelle noch nicht beurteilt werden.

5 Faserform-Versuchsanlage

5.1 Voraussetzungen

Um einerseits Versuchsmuster erstellen zu können und andererseits die Verfahrensparameter so variieren zu können, dass ihr Einfluss auf die Eigenschaften des fertigen Produktes untersucht werden kann, ist es erforderlich, eine Faserform-Versuchsanlage zu erstellen. Diese Anlage muss so aufgebaut sein, dass der in industriellen Anlagen ablaufende Fertigungsprozess möglichst zuverlässig abgebildet werden kann; auf kostenintensive Automatisierungen dieses Prozesses kann jedoch verzichtet werden. Damit scheidet das Rotationsprinzip für die Versuchsanlage aus; es soll daher das Vertikalprinzip nachgebildet werden.

Industrielle Anlagen dieser Bauform weisen bis zu drei Pressstationen auf, um die Teile auf die gewünschten Oberflächen und Genauigkeiten kalibrieren zu können. Hierauf soll bei der Versuchsanlage vollständig verzichtet werden. Da jedoch für die zu untersuchenden Orthesen bzw. Schienen ebenfalls die Eigenschaften in Abhängigkeit vom Pressvorgang untersucht werden sollen, müssen separate Presswerkzeuge erstellt werden, die durch geeignete Hilfsmittel beheizt und unter einer hydraulischen Universalpresse eingesetzt werden können. Die Pressstation ist somit nicht in die Faserformanlage integriert; ihre Beschickung wird nicht automatisiert durch Transfer- bzw. Übergabewerkzeuge vorgenommen, sondern erfolgt aus wirtschaftlichen Gründen manuell. Damit besteht die Möglichkeit, beliebig viele Pressvorgänge mittels unterschiedlicher Presswerkzeugsätze, jeweils bestehend aus Ober- und Unterwerkzeug, zu simulieren. **Bild 5.1** zeigt den prinzipiellen Aufbau der Faserform-Versuchsanlage.

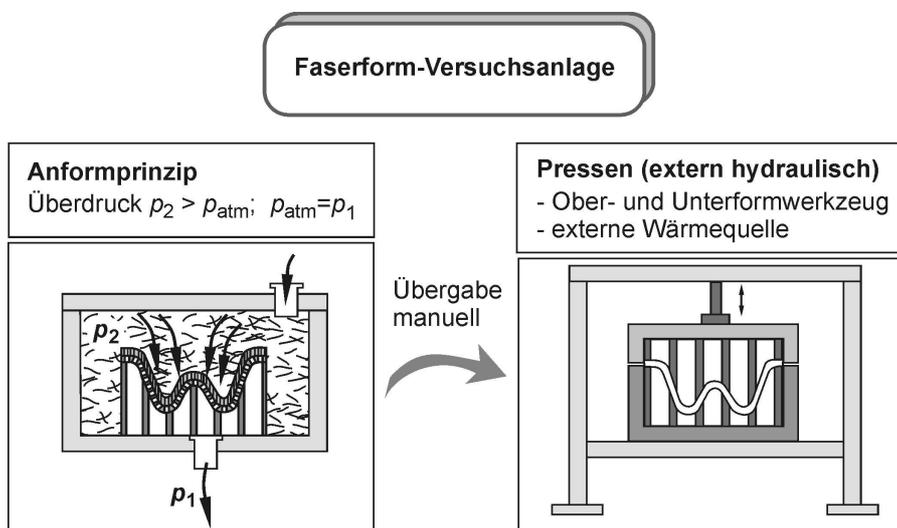


Bild 5.1 Prinzipieller Aufbau der Faserform-Versuchsanlage

Die Anlagerung der im Rohstoff gelösten Fasern an das Formwerkzeug erfolgt durch das Wirken einer Druckdifferenz zwischen der Formseite (Siebseite) und der Gegenseite (Unterseite) des Formwerkzeugs. Bezüglich des Anformprinzips kann zwischen dem Überdruck- und dem Unterdruckverfahren unterschieden werden. Aus wirtschaftlichen Gründen, insbesondere zur Vermeidung eines aufwändigen Unterdrucksystems, wird für den Anformvorgang das Überdruckprinzip angestrebt. Damit ist die Bereitstellung eines geschlossenen Druckraums oberhalb des Faserformwerkzeuges und die Erzeugung eines Drucks erforderlich, wobei beispielsweise ein herkömmlicher Kompressor eingesetzt

werden kann. Die Anlage ist damit zwar für das Überdruckverfahren ausgelegt, kann aber auch bei Öffnung des oberen Raumes und Anschluss einer Unterdruckeinrichtung an die Unterseite des Formwerkzeuges nach dem Unterdruckprinzip betrieben werden.

Damit sind insgesamt drei Themenbereiche zu bearbeiten, nämlich die Faserform-Versuchsanlage selbst, das Anformwerkzeug und die Presswerkzeuge, wobei zunächst nur ein einziger Presswerkzeugsatz erstellt werden soll.

5.2 Aufbau der Faserform-Versuchsanlage

Für die Versuchsanlage wird das Überdruckverfahren angewendet. Zum einen ist der erzeugte Druck wesentlich höher als beim Saugverfahren, zum anderen ist das Druckverfahren die kostengünstigere Variante. Der Anformdruck beträgt ca. 4 bar und wird mit einem Kompressor erzeugt. Zwecks Entwässerung kann das Formteil mit maximal 6 bar beaufschlagt werden, um den Entwässerungsvorgang zu beschleunigen und die Restfeuchtigkeit zu verringern.

Bild 5.2 zeigt den Aufbau des Druckraums, der aus einem Ober- und einem Unterkasten besteht. Beide Kästen sind aus einzelnen miteinander verschraubten Aluminiumplatten mit einer Materialstärke von 20 mm gefertigt und werden mittels geeigneter Spannelemente (nicht dargestellt) gegeneinander verspannt, so dass der Druckraum verschlossen wird. Weiterhin sind entsprechende Einfüll- und Ablassstutzen sowie Druckanschlüsse zum Anformen und Abformen vorhanden. Auf dem Unterkasten wird das Formwerkzeug verschraubt, siehe **Bild 5.3**. Es ist an der Unterseite mit einem Ablassstutzen verbunden, in dem der Umgebungsdruck herrscht. Alle Anschlüsse sind mittels geeigneter Ventile verschließbar.

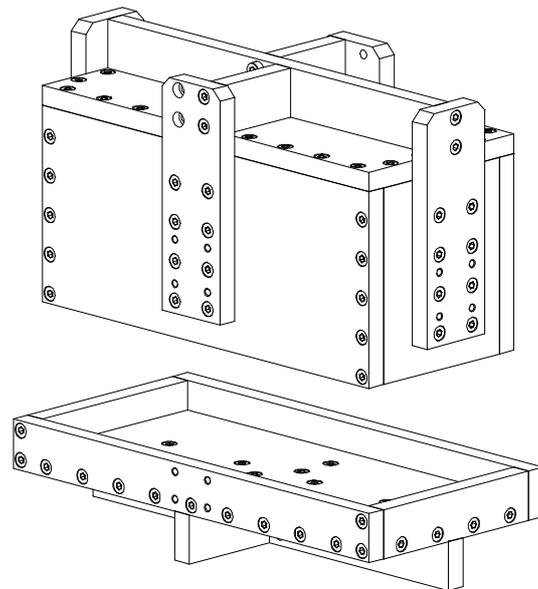


Bild 5.2 Druckkasten



Bild 5.3 Unterkasten mit aufgesetztem Faserformwerkzeug für Unterarmorthesen

Bild 5.4 zeigt die Faserformversuchsanlage mit allen erforderlichen Anschlüssen. Der Druckraum ist auf ein entsprechendes Gestell aufgebaut. Darüber hinaus ist die Anlage mit vier Schaugläsern versehen, um den Anformprozess beobachten zu können.

Der Druckraum wird durch vier Spannelemente manuell verschlossen. Am Oberkasten befinden sich der Einfüllstutzen sowie zwei Druckanschlüsse, wobei der Luftdruck beim Anformen mittels einer der Zuleitungen über ein Druckbegrenzungsventil begrenzt werden kann. Zur Entwässerung wird der Luftdruck über die zweite Zuleitung ungedrosselt zugeleitet. Unterhalb des Druckkastens befindet sich die Ablassleitung, an die ebenfalls eine Druckleitung angeschlossen ist. Nach dem Anformen und dem Öffnen des Druckraums wird durch die Ablassleitung erneut Druckluft eingeleitet, um die Entformung des nassen Faserformteils zu unterstützen. Die Abnahme des nassen Faserformteils erfolgt dabei aus Wirtschaftlichkeitsgründen manuell.

In **Bild 5.5** ist der Querschnitt der Faserformanlage dargestellt, wobei die Anschlüsse eingezeichnet und bezüglich ihrer Funktion beschrieben sind.

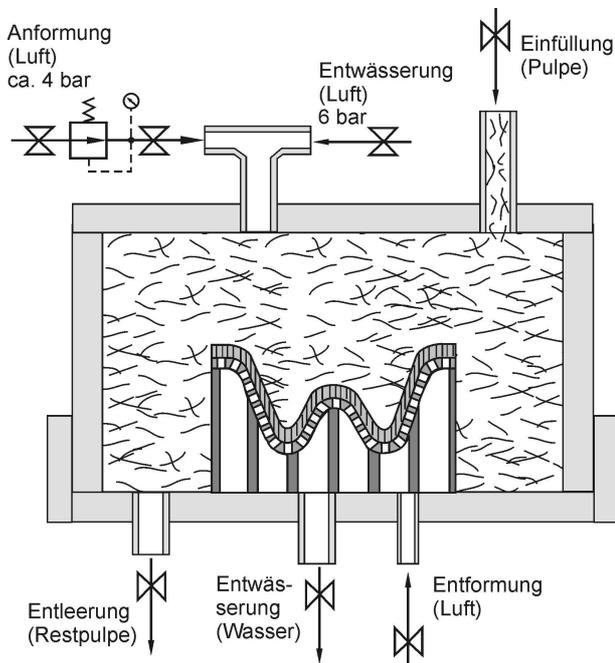


Bild 5.5 Querschnitt der Faserformanlage, Anschlüsse

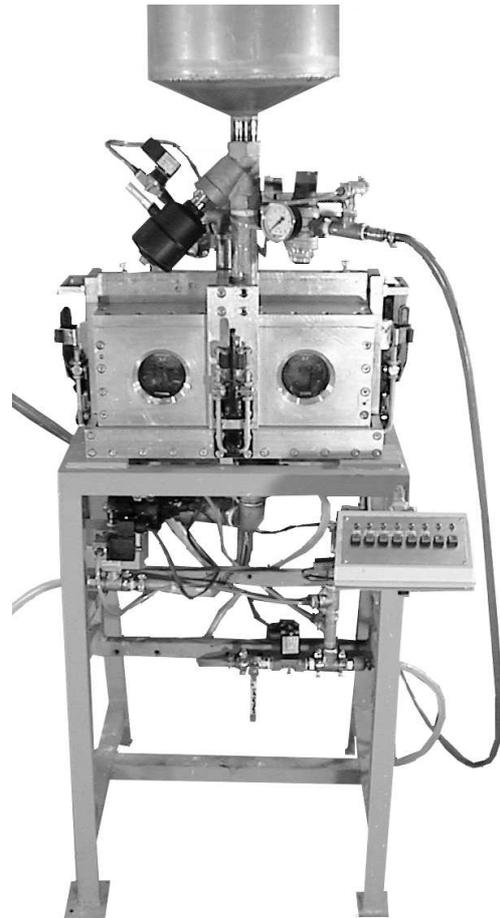


Bild 5.4 Faserformversuchsanlage

5.3 Anformwerkzeug

Wie bereits im Stand der Technik, Kapitel 3, beschrieben, muss das Werkzeug einerseits die wirkenden Kräfte aufnehmen (Stützfunktion), andererseits durch Filterung der im Rohstoff gelösten Fasern das zunächst nasse Formteil bilden (Filterfunktion). Das Formwerkzeug soll zur Fertigung einer Unterarmorthese dienen. Es wird wie folgt hergestellt: Zunächst wird ein menschlicher Unterarm mit Gips abgeformt, so dass eine Negativform entsteht, die prinzipiell bereits die Innenkontur der Unterarmorthese aufweist. Diese Negativform wird mit einem geeigneten Trennmittel beschichtet und an der Innenkontur erneut mit Gips abgeformt, so dass eine Positivform gebildet wird, die dem Unterarm entspricht. Zur einfacheren Handhabung wird nur der Bereich ausgebildet, an den später die Orthese angelegt werden soll. Durch das erneute Abformen dieser Gips-Positivform mit einer geeigneten Kunststoffplatte aus einem thermoplastischen Material

wird nun die wasserfeste Stützgeometrie des Formwerkzeuges hergestellt, die Bestandteil des späteren Stützkörpers wird. Zur Herstellung der grobdurchlöcherten Struktur werden in diese Kunststoffform entsprechende Bohrungen eingebracht.

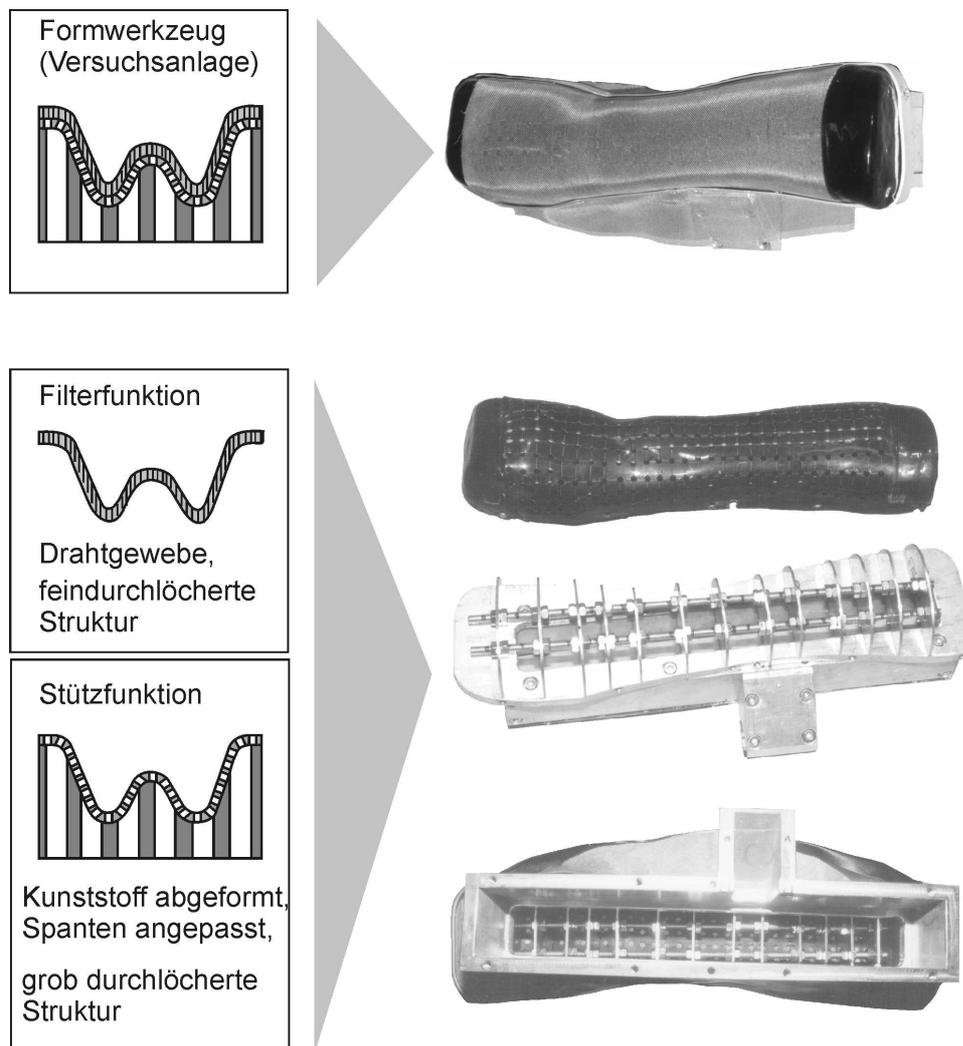


Bild 5.6 Faserformwerkzeug für Unterarmorthesen

Um die wirkenden Kräfte ohne Beschädigungen aufnehmen zu können, wird die relativ dünne Kunststoffform zusätzlich durch Spanten unterstützt; diese werden mittels Schablonen an die Kunststoffform angepasst und untereinander auf Gewindestangen verschraubt. Die relativ dünne Kunststoffform und die Spanten nehmen die wirkenden Kräfte auf und übernehmen somit gemeinsam die Stützfunktion. Der gesamte Stützkörper wird auf eine in der Geometrie angepasste, 10 mm dicke Stützplatte aus Aluminium aufgesetzt, deren Außenkontur der Kunststoffform entspricht und die im mittleren Bereich eine größere Aussparung zur Ableitung der Flüssigkeit aufweist. Diese Stützplatte wird über einen Distanzrahmen mit dem Unterkasten des Druckraumes verschraubt.

Die Filterfunktion wird bei diesem Formwerkzeug durch ein handelsübliches Drahtgewebe realisiert. Zur Herstellung der gewünschten Geometrie wird dieses Sieb über die Kunststoffform geformt; da es sich bei dem Unterarm um eine relativ einfache Geometrie handelt, ist dies problemlos möglich. Im Gegensatz zu komplizierteren Geometrien, bei denen mehrere einzelne tiefgezogene Siebelemente miteinander verschweißt oder verlötet werden müssen, besteht das Sieb in diesem Fall nur aus einem einzigen Element. Das entsprechend geformte Sieb wird über die Kunststoffform gelegt und mittels

eines umlaufenden verschraubten Aluminiumbandes an der Stützplatte fixiert. Der überstehende Teil des Siebs wird abgetrennt, und die nicht zum Anformen des Werkstücks benötigten Bereiche werden mittels Klebeband abgedeckt. **Bild 5.6** zeigt den Aufbau des Formwerkzeuges für die Faserform-Unterarmorthese.

5.4 Presswerkzeugsatz

Zur Oberflächenvergütung und Trocknung werden die Faserformteile nach dem Anformvorgang in beheizten Formwerkzeugen gepresst. Üblicher Weise wird die Geometrie der Presswerkzeuge durch CNC-Fräsen hergestellt. In die Presswerkzeuge werden danach entsprechende Heizelemente eingebracht, die eine Oberflächentemperatur von etwa 120 °C bewirken. Zur Abführung des Wassers bzw. des Wasserdampfes müssen die Werkzeuge Entwässerungsöffnungen aufweisen. Für die Versuchsanlage werden dagegen aus Kostengründen die Presswerkzeug aus Kunststoff hergestellt, wobei ein Epoxidharz verwendet wird, das durch Tempern auf eine Temperaturbeständigkeit bis zu 230 °C gebracht wird. Die Presswerkzeuge werden wiederum durch das Abformen der Gipsformen hergestellt: Zunächst wird die Gips-Negativform mit Kunststoff ausgefüllt, so dass die Positiv-Pressform entsteht. Diese wird durch Aufbringen eines Schrumpfschlauchs, dessen Wandstärke der gewünschten Bauteil-Wandstärke entspricht, angepasst. Die so präparierte Positiv-Pressform wird nun wiederum abgeformt, wodurch die Negativ-Pressform entsteht; diese befindet sich in einem Rahmen, der aus einer Rechteckrohrkonstruktion mit stirnseitigen Blechplatten gebildet wird. Die Positivform wird mit einer Aluminiumplatte verschraubt, die über zwei Stifte gegenüber dem Gehäuse zentriert ist. Beide Formteile werden mit Entwässerungsbohrungen versehen.

Vor dem Pressvorgang wird die Pressform mittels eines Ofens auf die gewünschte Temperatur erwärmt. Sie wird aus dem Ofen entnommen und geöffnet, um das angeformte und noch nasse Faserformteil einlegen zu können. Nun erfolgt der Pressvorgang unter einer hydraulischen Universalpresse. **Bild 5.7** zeigt die Positiv-Pressform aus faserverstärktem und wärmebeständigem Kunststoff; deutlich sind die Entwässerungsbohrungen der Pressform zu erkennen. In **Bild 5.8** ist die Negativ-Pressform abgebildet, die ebenfalls Entwässerungsbohrungen aufweist.



Bild 5.7 Positiv-Pressform



Bild 5.8 Negativ-Pressform

Bild 5.9 zeigt das geschlossene Presswerkzeug. Zum Pressen wird das erwärmte Presswerkzeug mit dem dazwischen befindlichen nassen Formteil unter die hydraulische Presse gelegt, so dass die untere Aluminiumplatte nahezu vollständig aufliegt. Über das obere Rechteckrohr wird ein Stahlprofil mit rechteckigem Querschnitt gelegt, damit sich die Belastungen gleichmäßig verteilen. Durch den Pressvorgang wird das Formteil verdichtet, geglättet und getrocknet. Der Transport des Presswerkzeugs vom Ofen zur Presse sowie das Einlegen der Faserformteile erfolgen manuell.

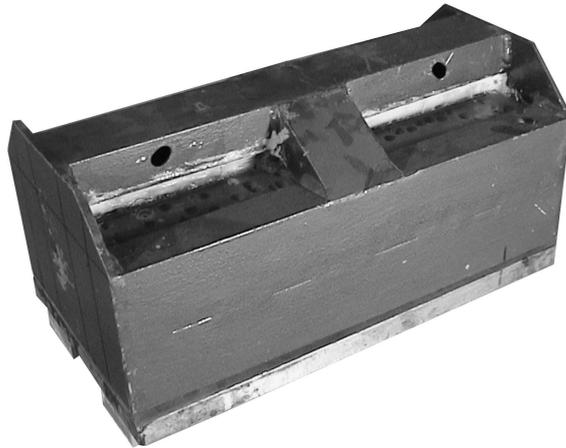


Bild 5.9 Presswerkzeug, geschlossen

5.5 Nachweis der Funktionsfähigkeit

Nachdem die Versuchsanlage mit den erforderlichen Werkzeugen erstellt worden ist, muss im nächsten Schritt nachgewiesen werden, dass die Anlage grundsätzlich funktionsfähig ist. Hierzu wird zunächst der Druckraum mit 10 dm^3 einer Pulpe mit einem Fasergehalt von 2 % o/ro gefüllt. Im nächsten Schritt wird der Druckraum mit Druckluft beaufschlagt; der Druck beträgt 4 bar. Um ein Absetzen der gelösten Fasern zu verhindern, erfolgen beide Vorgänge unmittelbar nacheinander, wobei der Zeitverzug so klein wie möglich gehalten wird. Ebenfalls so schnell wie möglich wird nun das Entwässerungsventil geöffnet, so dass die Flüssigkeit abfließen kann, während sich die Fasern an dem Sieb ablagern und das Werkstück bilden. Nachdem das Wasser nahezu vollständig abgeflossen ist, wird über weitere 15 Sekunden Druckluft durch das entstandene Werkstück gedrückt, um dieses zu trocknen. Im Anschluss hieran wird die Restpulpe entleert, und der Druckraum wird geöffnet. **Bild 5.10** zeigt das auf diese Art entstandene Werkstück, das sich noch an der Form befindet.



Bild 5.10 Faserformwerkzeug nach dem Anformprozess

Die Abnahme des nassen Formteils vom Formwerkzeug erfolgt unmittelbar nach dem zuvor beschriebenen Anformvorgang manuell; sie wird durch Zuleitung von Druckluft an der Unterseite des Formwerkzeuges erleichtert. In **Bild 5.11** ist die so entstandene getrocknete ungespreste Faserformorthese abgebildet, wobei die vergrößert dargestellten

Ausschnitte rechts im Bild den Unterschied in der Oberflächengüte der beiden Seiten zeigen.

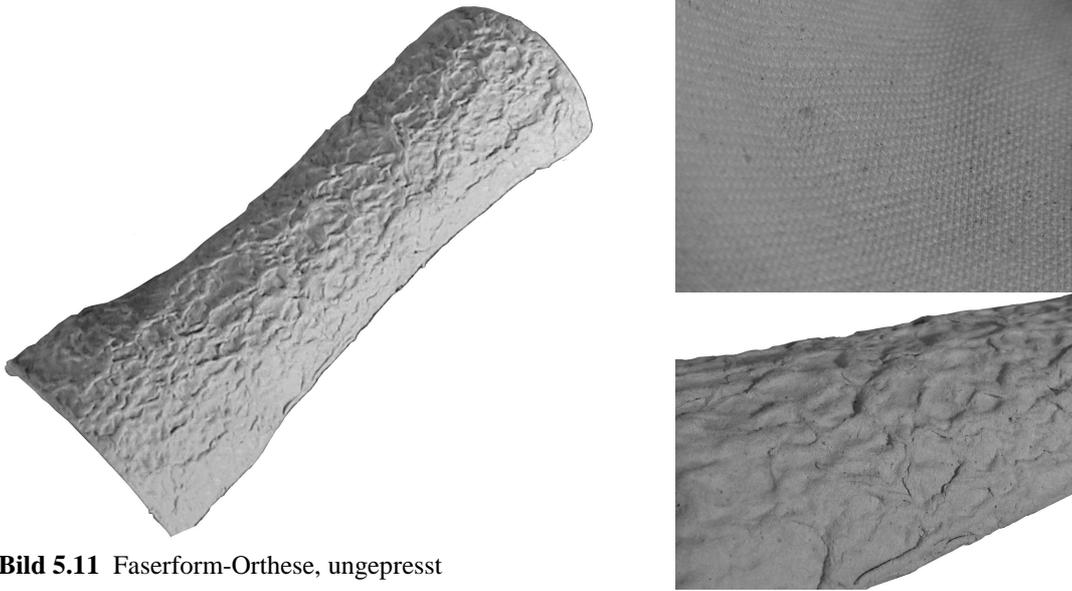


Bild 5.11 Faserform-Orthese, ungespresst

Damit eine gleichmäßigere und relativ glatte Oberfläche erzeugt wird, muss das Formteil in einem nachgeschalteten Pressprozess verdichtet werden. Hierbei werden die Hohlräume zwischen den Fasern komprimiert, und es bildet sich eine innigere Verbindung der Fasern untereinander aus. Voraussetzung hierfür ist, dass sich der Werkstoff noch verformen lässt und dass noch die Bildung der Wasserstoffbrücken erfolgen kann. Es muss also eine gewisse Restfeuchte des Bauteils vorhanden sein, die im Rahmen der Funktionsprüfung der Anlage zunächst empirisch gewählt wird.

Es wird nur der beschriebene Presswerkzeugsatz verwendet, d. h. es wird nur ein einmaliges Pressen der Bauteile simuliert. Im Rahmen von zwei Versuchen werden unterschiedliche Presskräfte angewendet. Die Pressform wird in einem Ofen auf 120 °C erhitzt, aus dem Ofen entnommen und geöffnet. Die Werkstücke werden auf die Positiv-Pressform aufgelegt, und die Pressform wird geschlossen. Mittels der hydraulischen Presse wird im ersten Versuch eine Kraft von 10.000 N aufgebracht, im zweiten Versuch beträgt die Kraft 20.000 N.

Bild 5.12 zeigt die mit der geringeren Kraft gepresste Orthese. Deutlich erkennbar ist, dass der Pressvorgang erfolgreich durchgeführt werden konnte: Die Wandstärke ist reduziert, und es ergibt sich eine geglättete Oberfläche. Die typische Struktur der siebabweandten Seite ist zwar noch sichtbar, jedoch sind die Oberflächenerhebungen eingeebnet. Probleme bestehen in dem Bereich, der einen zu geringen Neigungswinkel gegenüber der Pressrichtung (sog. Formschrägung) aufweist; hier ist das Material abgeschert bzw. abgerissen, so dass sich Löcher gebildet haben.

Der zweite Versuch wird mit einer Presskraft von 20.000 N durchgeführt; das dabei entstandene Werkstück ist in **Bild 5.13** gezeigt. Hierbei ist eine nochmals deutlich geglättete Oberfläche entstanden, die zahlreiche Erhebungen aufweist; in den entsprechenden Bereichen sind die Entwässerungsöffnungen des Presswerkzeuges angeordnet, in die das Material hineingedrückt wurde. Ähnliche Markierungen sind auch an handelsüblichen Faserformteilen vorhanden. Die Erhebungen sind sowohl auf der konvexen als auch auf der konkaven Seite der Orthese erkennbar.

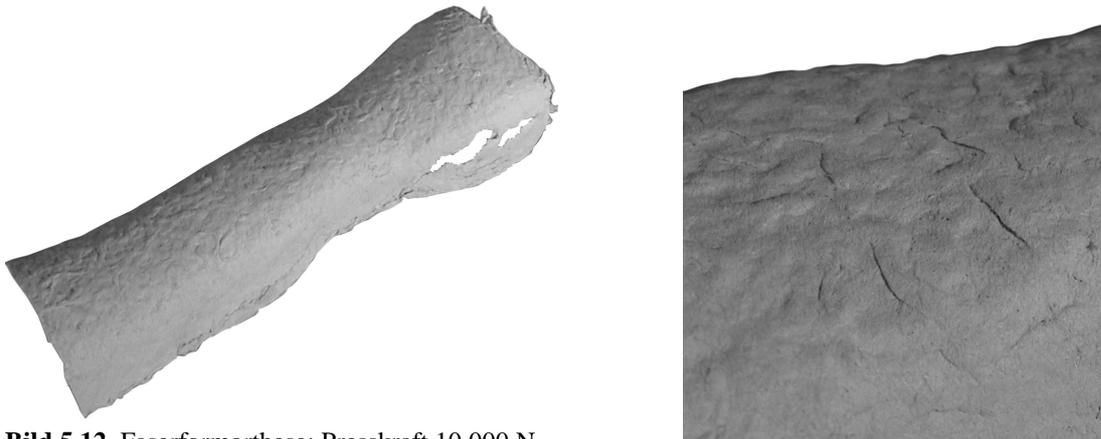


Bild 5.12 Faserformorthese; Presskraft 10.000 N

Auch hier ist der Problembereich zu erkennen. Es sind jedoch nur geringere Schäden vorhanden; dies ist darauf zurückzuführen, dass während des Anformvorgangs vermutlich lokal weniger Material angelagert worden ist. Daher sind die beim Pressen entstehenden Zug- und Scherkräfte und folglich auch die daraus resultierenden Schäden kleiner als beim ersten Versuch. In Bild 5.14 sind die Beschädigungen gegenübergestellt.

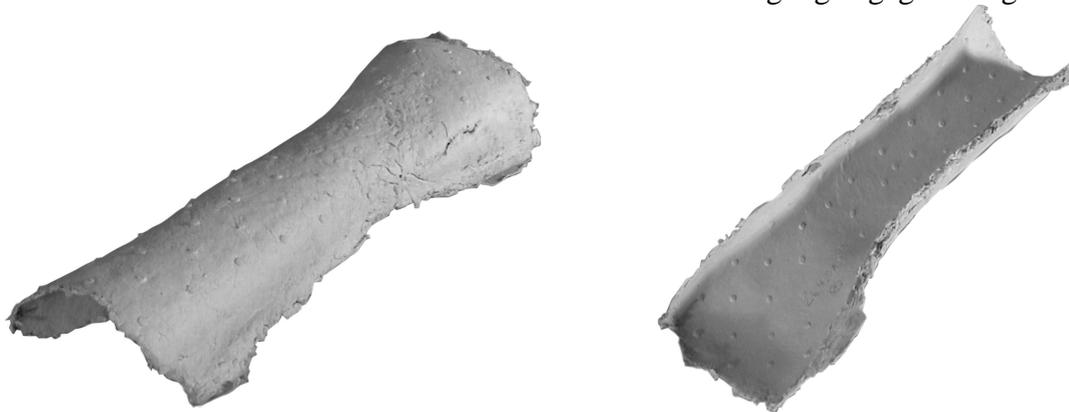


Bild 5.13 Faserformorthese, Presskraft 20.000 N

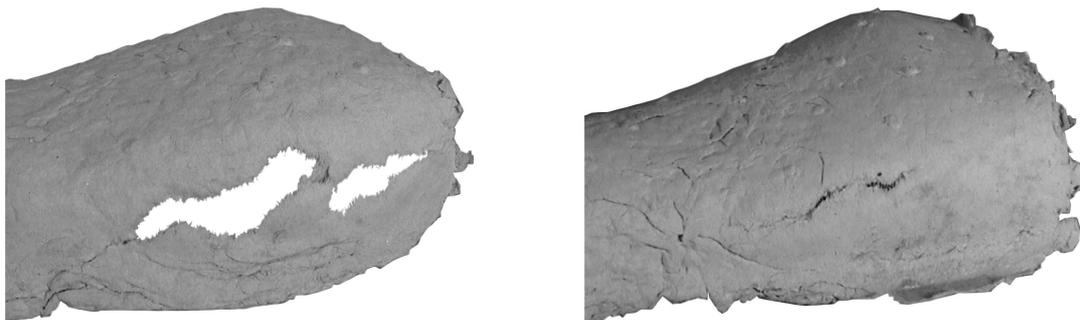


Bild 5.14 Schäden im Bereich zu geringer Formschrägung; Presskraft links 10.000 N, rechts 20.000 N

Insgesamt haben die durchgeführten Vorversuche folgende Ergebnisse gezeigt: Die Faserform-Versuchsanlage, das Anformwerkzeug und der Presswerkzeugsatz sind voll funktionsfähig und dazu geeignet, entsprechende Werkstücke zu produzieren. Die bei der Herstellung der Musterteile vorliegenden Verfahrensparameter wurden zunächst nur grob abgeschätzt bzw. grob gewählt. Für reproduzierbare Ergebnisse sind auch reproduzierbare Verfahrensparameter erforderlich. Die beim Pressen aufgetretenen Schäden sind auf eine zu geringe Formschrägung zurückzuführen; der beobachtete Effekt ist prinzipiell bekannt. Um derartige Schäden zu vermeiden, müssen die Presswerkzeuge im betreffenden Bereich nachgearbeitet werden; dies soll bei der Anpassung der Orthesengeometrie an späterer Stelle erfolgen.

6 Theoretische Grundlagen zu Festigkeit und Steifigkeit

6.1 Allgemeine Betrachtungen, Begriffsklärung, Bezug zu DIN-Normen

Im Rahmen der durchzuführenden Untersuchungen sollen Festigkeitskennwerte für Faserformprodukte ermittelt werden; dabei soll insbesondere die Biegebelastung betrachtet werden. Im Folgenden sollen daher zunächst theoretische Betrachtungen zu den entscheidenden Kenngrößen, zu deren Ermittlung gemäß entsprechender DIN-Normen und zu den hierfür wesentlichen Einflussfaktoren durchgeführt werden.

Bisher wurden Faserformprodukte überwiegend für Verpackungszwecke eingesetzt; die Realisierung von Funktionsprodukten erfordert dagegen die Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften, um so die Berechnung der Faserformkonstruktionen zu ermöglichen. In Rahmen dieser Arbeit werden die Werkstoffkennwerte für eine Unterarm-Orthese ermittelt. Das Werkstoffverhalten ist allerdings abhängig von der äußeren Beanspruchung und wird durch die jeweiligen mechanischen Werkstoffeigenschaften gekennzeichnet. Als Grundbeanspruchungen werden in der Festigkeitslehre Zug bzw. Druck, Schub, Biegung und Torsion unterschieden. Zur Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften existieren insbesondere für metallische Werkstoffe entsprechend genormte Prüfverfahren (Zugversuch, Härteprüfung usw.), dagegen sind entsprechende Verfahren für Faserformprodukte nicht bekannt. Es existieren lediglich Methoden zur Prüfung von Papier, Pappe und Wellpappe.

Die zu untersuchende Unterarmorthese wird im Wesentlichen auf Biegung beansprucht. Aus diesem Grunde und um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, werden lediglich Untersuchungen bezüglich der Biegefestigkeit und der Biegesteifigkeit im Sinne der im Maschinenbau üblichen Bedeutung durchgeführt.

Die „Biegesteifigkeit“ nach DIN 53121 /DIN96a/ wird bei Papier, Karton und Pappe im elastischen Verformungsbereich bestimmt. Es wird das Prinzip des Biegebalkens angewendet, der mittels des Dreipunktverfahrens bzw. bei Wellpappe des Vierpunktverfahrens belastet wird. Diese Biegesteifigkeit ist für Papier ein Kriterium für die Stabilität in der Druckmaschine sowie für die Weiterverarbeitung /STE02/. Karton, Pappe und Wellpappe sind Packstoffe, aus denen z. B. Schachteln hergestellt werden. Die Belastung durch das Packgut könnte das Beulen der Seitenwände nach innen oder außen bewirken; daher ist die Biegesteifigkeit ein Maß für die Belastbarkeit einer Schachtel /WIL99a/, /WIL99b/. Nach /TAC99/ ist die Belastbarkeit von Einwegtrays aus Vollpappe abhängig vom Flächengewicht und von der Biegesteifigkeit. Bei Papier und Pappe bzw. Wellpappe handelt es sich um ein prinzipiell weitgehend zweidimensionales bzw. ebenes Produkt, das erst durch entsprechende Faltung zu einem dreidimensionalen Produkt (Schachtel o. ä.) aufgerichtet bzw. geformt wird. Die Geometrie der Wellpappe bzw. Pappe selbst bleibt dabei unverändert und entspricht derjenigen, die auch im Versuch vorgelegen hat.

Für die jeweiligen Probenkörper, insbesondere diejenigen aus Wellpappe o. ä., ist die Erfassung der Geometrie und damit des Flächenträgheitsmomentes nicht ohne Weiteres möglich. Schwankungen des Flächenmomentes 2. Grades, die durch den Herstellungsprozess bedingt sind, müssen ebenfalls unberücksichtigt bleiben. Daher kann auch der Elastizitätsmodul der Proben nicht bestimmt werden. Statt dessen wird aus der wirken-

den Kraft und der daraus resultierenden Durchbiegung in Abhängigkeit von der Breite der Proben eine breitenbezogene Biegesteifigkeit bestimmt, die zur Dimensionierung von Wellpappe eingesetzt werden kann. Im realen Anwendungsfall wird die Wellpappe einer ähnlichen Belastung ausgesetzt; die Geometrie der Wellpappe bleibt prinzipiell unverändert, ggf. werden allenfalls mehrere Schichten übereinander angeordnet. Im Gegensatz zu Faserformprodukten erhält das Wellpappenprodukt die dreidimensionale Gestalt erst durch entsprechendes Falten und Knicken der ebenen Elemente sowie durch Verbindungen mittels Laschen und Aussparungen.

Aus diesem Grunde wird nach DIN 53121 die „Breitenbezogene Biegesteifigkeit S “ als anwendungsbezogene Kenngröße ermittelt, die eine Kombination aus dem Werkstoffkennwert (Elastizitätsmodul E) und den Geometrie Größen (Breite b , Flächenträgheitsmoment I) darstellt: $S = (E \cdot I) / b$. Eine Ermittlung einer einzelnen der kombinierten Größen ist hiermit jedoch nicht möglich und in der Norm auch nicht vorgesehen.

Als „Biegesteifigkeit“ wird nach /DIN80/ das Produkt aus dem Elastizitätsmodul E und dem Flächenträgheitsmoment I bezeichnet. Auch diese Norm sieht eine gesonderte Ermittlung der einzelnen Größen nicht vor.

Eine Besonderheit von Faserformprodukten besteht in der Möglichkeit, ein individuelles dreidimensionales Produkt aus Papier zu gestalten. Insbesondere bei Funktionsteilen sollte dabei so vorgegangen werden, wie im Maschinenbau üblich: Zunächst sollte ein iterativer Prozess durchgeführt werden, der aus der Gestaltung, der jeweiligen Berechnung mit Durchführung des Spannungsnachweises und der anschließenden Korrektur der Gestaltung besteht /KÜN01/. Hierzu ist es jedoch erforderlich, die entsprechenden Werkstoffkenngrößen zu kennen; anwendungsbezogene Größen, die für ebene Halbzeuge wie Papier und Pappe gelten, sind weder brauchbar noch übertragbar. Außerdem unterscheidet sich das Herstellungsverfahren der Faserformprodukte insbesondere bei der Trocknung und Verdichtung von der Papier- und Pappeherstellung, so dass hierfür ermittelte Kennwerte, wenn sie denn überhaupt verfügbar sind, auch aus diesem Grunde nicht übertragen werden können.

Zu beachten ist weiterhin, dass alle Produkte aus Papier vermutlich sehr starken Streuungen der Werkstoffeigenschaften unterliegen, die auf der Inhomogenität des Werkstoffes beruhen. Außerdem werden die Kennwerte stark von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit beeinflusst.

Im Folgenden sollen nun einige verwendete Begriffe erläutert werden:

Belastung

Nach DIN 13316 /DIN80/ sind äußere Kräfte und Momente bzw. Lasten und Lastmomente Belastungen, die von außen auf einen Körper bzw. ein Bauteil einwirken. Die Lagerreaktionen sind ebenfalls äußere Kräfte, die zur Dimensionierung der Lager von Bedeutung sind. Durch die wirkenden Belastungen entstehen im Werkstoff innere Spannungen, die innerhalb des Werkstoffs übertragen werden müssen. Diese Spannungen verteilen sich über die Schnittfläche und sind nur im Gleichgewicht, wenn an beiden Schnittufern die Kräfte und Momente gleich groß, aber entgegengesetzt sind.

Beanspruchung

Die Beanspruchung eines Körpers bzw. Bauteils bei Belastung ist von der Größe der belasteten Schnittfläche abhängig, auf die sich die Belastung verteilt. Als Maß für die Beanspruchung eines Werkstoffs ist in DIN 13316 /DIN80/ die mechanische Spannung für Normal- und Schubspannungen als Differentialquotient Kraft durch Fläche definiert. Äußere Belastungen eines Körpers in Form von Kräften und Momenten bewirken im Werkstoff innere Schnittkräfte und -momente, die über die jeweils belastete Fläche übertragen werden müssen. In Abhängigkeit vom Werkstoff und dessen Fähigkeit, in der Schnittfläche die jeweilige Belastung (Zug, Druck, Biegung, Scherung, Torsion) zu übertragen, lässt sich die maximale Beanspruchbarkeit (Grenzspannung) bestimmen. Zum Versagen eines Körpers bzw. Bauteils führt es, wenn die durch die Belastung hervorgerufene innere Beanspruchung höher ist als die maximal zulässige Beanspruchung des Werkstoffs. Die Ermittlung der zulässigen Grenzspannung erfolgt experimentell durch entsprechende Werkstoffprüfungen.

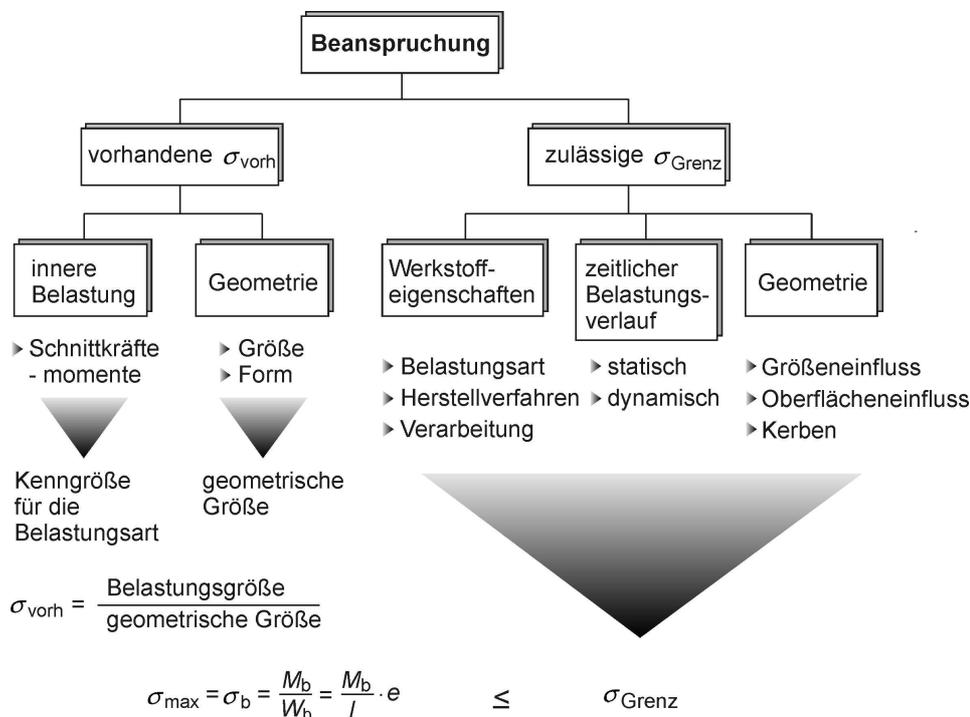


Bild 6.1: Einflussfaktoren für vorhandene und zulässige Spannung

Mechanische Prüfverfahren

Zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte werden entsprechende Prüfverfahren eingesetzt. Aus den Experimenten kann die zulässige Beanspruchbarkeit des Werkstoffes (zulässige Grenzspannung) und der Zusammenhang zwischen der Belastung und der Verformung ermittelt werden. Je größer die Belastung, desto größer ist die Verformung. Dieser Zusammenhang lässt sich nur experimentell bestimmen und wird als Stoff- bzw. Materialgesetz bezeichnet.

Stoffgesetz

Bei den meisten metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen ist die Verformung proportional zur Last. Gemäß DIN 13343 /DIN94b/ werden Festkörper, die nach mechanischer Belastung beliebiger Dauer und beträchtlicher Spannung nach der Entlastung ihre ursprüngliche Gestalt wieder annehmen, als reinelastische (elastische) Festkörper bezeichnet. Dabei ist der Momentanwert der Verformung nur vom Momentanwert der

Spannung abhängig. Als *Hookesche* Körper bzw. linear-reinelastische Festkörper werden Körper mit einer linearen Beziehung zwischen Spannung und Verformung bezeichnet, wobei der *Hookesche* (linear-reinelastische) Bereich bei realen Festkörpern auf kleine Spannungen und Verformungen begrenzt ist. Bei größeren Spannungen liegt die Verformung nicht mehr im elastischen Bereich, sondern sie ist plastisch.

Bei Belastung im linear-elastischen Bereich sind die Spannungen proportional zu den Verformungen. Die Proportionalitätskonstante ist abhängig vom jeweiligen Werkstoff und ist daher eine Stoff- bzw. Materialkonstante. Das *Hookesche* Gesetz beschreibt die Proportionalität zwischen der mechanischen Spannung und der Dehnung im elastischen Bereich und lautet für die oben beschriebenen einfachen Verformungen wie folgt: $\sigma = E \cdot \varepsilon$ /DIN94b/. Dabei ist E der Elastizitätsmodul (kurz E-Modul), eine Stoffkonstante; ε wird als Dehnung oder Längsverzerrung bzw. -dehnung bezeichnet. Diese Längsverzerrung bzw. Dehnung wird in DIN 13316 /DIN80/ als Verhältnis der Längsverformung zur Ausgangslänge definiert, d. h. die Längenänderung Δl , die auf den Anfangs- und Endzustand l (bzw. auf einen Momentanzustand) bezogen wird: $\varepsilon = \Delta l / l$. σ ist die auftretende Spannung im jeweiligen Festkörper.

Als homogene Werkstoffe werden diejenigen bezeichnet, deren Eigenschaften an jeder Stelle im Körper gleich sind, als isotrope Werkstoffe diejenigen, deren Eigenschaften in allen Richtungen gleich sind /DIN80/, /SNL89/. Sind die Verformungen proportional zur wirkenden Kraft- oder Temperaturänderung, handelt es sich um einen linearen Werkstoff, siehe DIN 13316 /DIN80/. Als Elastizität wird die Eigenschaft eines Werkstoffes bezeichnet, die von äußeren Kräften geleistete Arbeit reversibel in Formänderungsarbeit (elastische Energie) zu speichern, die entsprechend nach der Entlastung zurückgewonnen wird. Körper ohne innere Dämpfung werden als ideal elastisch bezeichnet /DIN80/.

Bei Holz, das die Basis der Papierherstellung darstellt, sind aufgrund der Faserung die Steifigkeiten in verschiedenen Richtungen unterschiedlich; diese Werkstoffe sind somit anisotrop /DIN80/. Die Vorzugsrichtung wird bei Holz z. B. durch die Natur vorgegeben. Beim Papier ist zusätzlich zu diesem Effekt auch noch die Ausrichtung der Fasern unterschiedlich, und zwar abhängig vom Herstellungsprozess. Nach Möglichkeit sollen nichtlineare Materialgesetze für die Rechnung durch lineare Näherungen ersetzt werden /DIN80/.

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Der Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der Dehnung ε wird im Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Hieraus lässt sich auch der E-Modul E ermitteln. Detailliertere Betrachtungen hierzu sollen im nächsten Kapitel durchgeführt werden.

Längsträger (Stab, Bogen, Balken); Flächenträger (Platte, Schale, Scheibe)

Ein gerader Längsträger wird als Stab, ein gebogener als Bogen bezeichnet. Ein senkrecht zu seiner Stabachse verformter bzw. gebogener Stab trägt die Bezeichnung Balken. Als Platte wird ein ebener Flächenträger und als Schale ein gebogener Flächenträger bezeichnet. Die Bezeichnung Scheibe wird für eine Platte gebraucht, in der ein ebener Spannungszustand parallel zur Oberfläche herrscht. Diese Definitionen beinhaltet DIN 13316 /DIN80/.

Versagen

Das Versagen eines Bauteils bedeutet, dass die Funktionsfähigkeit nicht mehr gegeben ist, z. B. wenn eine bleibende Formänderung oder eine Zerstörung des Werkstoffs durch Bruch eintritt. Nur für Problemstellungen, bei denen sich das Modell des starren Körpers rechtfertigen lässt, können die Fragestellungen nach den Regeln der Statik behandelt werden. Basierend hierauf können die äußeren Kräfte und Momente berechnet und z. B. die Dimensionierung der Lager vorgenommen werden. Zum Versagen eines Bauteils kommt es, wenn die aus den äußeren Kräften und Momenten resultierenden inneren Kräfte und Momente größer sind als diejenigen, die vom Werkstoff des Körpers bzw. Bauteils aufgenommen werden können. Daher müssen die jeweiligen Grenzwerte, die ein Werkstoff unter Belastung ertragen kann, ermittelt werden bzw. bekannt sein. Der zulässige Grenzwert im Betrieb sollte demnach unter dem Grenzwert des Werkstoffes liegen. Das Verhältnis zwischen dem Grenzwert und dem zulässigen Wert ist die Sicherheit (Formelzeichen ν oder S).

Flächenmomente ersten und zweiten Grades

Der Punkt eines Körpers, durch den die auf ihn wirkende resultierende Gewichtskraft (Summe aller Teilgewichtskräfte) hindurchgeht, wird als Schwerpunkt bezeichnet. Der Schwerpunkt ist körperfest und somit unabhängig von der Lage des Körpers im Raum. Bei zu einer oder mehreren Achsen symmetrischen Körpern liegt der Schwerpunkt auf diesen Symmetrieachsen. Mit Hilfe der statischen Momente eines Körpers kann dessen Schwerpunkt rechnerisch bestimmt werden. Die Lage des Schwerpunktes ist bei homogenen Körpern nur von seinen Abmessungen und der geometrischen Gestalt abhängig.

Die Koordinaten x_s und y_s des Schwerpunktes einer in der x - y -Ebene liegenden Fläche berechnet sich wie folgt /DIN95/:

$$x_s = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i \quad \text{bzw.} \quad x_s = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \int_A x \, dA$$

$$y_s = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i \quad \text{bzw.} \quad y_s = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \int_A y \, dA$$

Lässt sich eine Fläche, deren Schwerpunkt bestimmt werden soll, in geometrisch einfache Grundelemente zerlegen, kann die Summenbildung angewendet werden; anderenfalls muss die Berechnung mittels der Integration durchgeführt werden. Für eine Lösung der entsprechenden Integrale muss die Fläche analytisch beschreibbar sein. Ist dies nicht der Fall, kann eine Berechnung nur auf numerischem Wege mittels Rechenprogrammen durchgeführt werden. Hierbei wird die Fläche möglichst fein in geometrische Grundformen eingeteilt.

Nach DIN 1304 /DIN94a/ wird das statische Moment einer Fläche als Flächenmoment 1. Grades (H) bezeichnet. Beispielsweise gilt für das auf die x -Achse bezogene Flächenmoment 1. Grades H_x :

$$H_x = \sum y_i \cdot A_i \quad \text{bzw.} \quad H_x = \int_A y \, dA$$

Für die Berechnung des axialen Flächenmomentes 2. Grades ist die Bestimmung des Flächenschwerpunktes erforderlich.

Bei Belastung eines Querschnitts mit einem Biegemoment steigt die Dehnung der Fasern über der Querschnittshöhe linear an bzw. fällt linear ab. Bei Torsionsbelastung eines kreisrunden Querschnitts steigt die Spannung vom Mittelpunkt, in dem sie gleich Null ist, bis zum Außendurchmesser hin linear mit wachsendem Radius an. Bei Zug- oder Druckbelastung ist die Spannung gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Bei Scherbeanspruchung liegt theoretisch eine über der Querschnittshöhe parabolisch verlaufende Spannungsverteilung vor. Vereinfachend wird eine gleichmäßige Spannungsverteilung angenommen; diese Vereinfachung ist sinnvoll, weil die in einem Versuch ermittelte Abscherfestigkeit eines Werkstoffes ebenfalls unter der Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung bestimmt wird, also hierbei die gleiche Vereinfachung vorliegt /ASS99/. **Bild 6.2** zeigt die prinzipielle Spannungsverteilung abhängig von der jeweiligen Belastungsart.

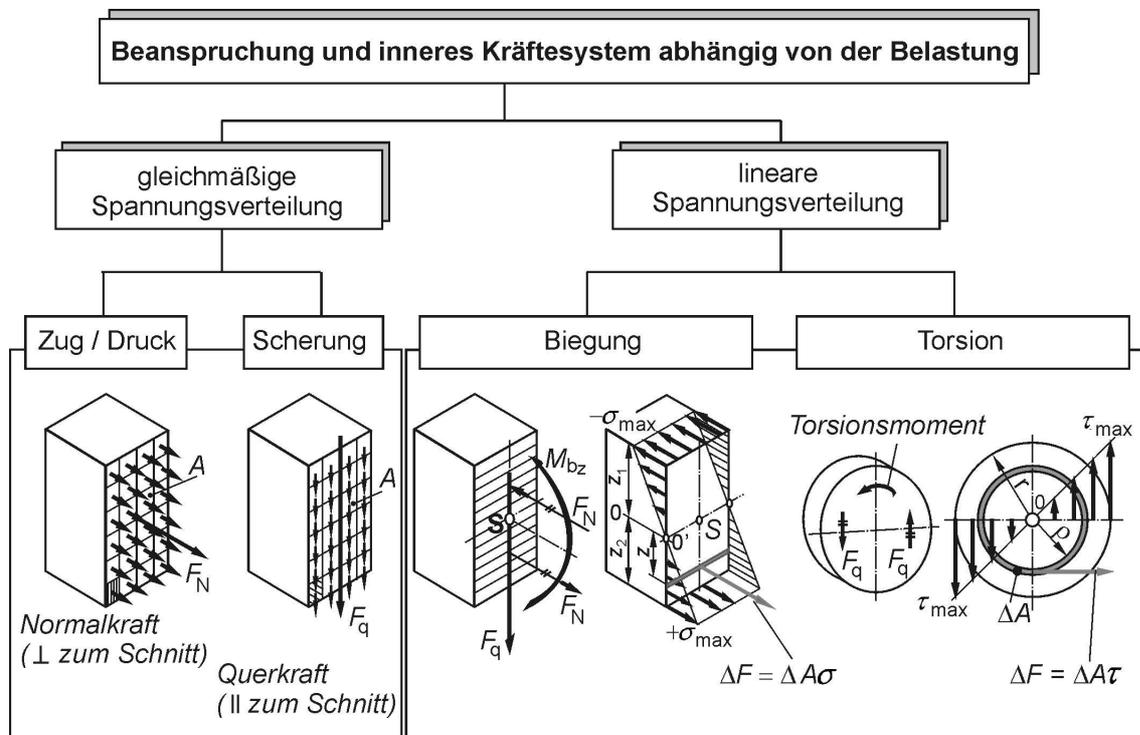


Bild 6.2: Prinzipielle Spannungsverteilung abhängig von der Belastung

Für die Biegespannung ist nicht die Fläche A entscheidend, sondern das Flächenmoment zweiten Grades, das auch als Flächenträgheitsmoment (I) bezeichnet wird. Es wird wie folgt berechnet, siehe auch DIN 13316 /DIN80/:

$$\text{Axiale Flächenmomente 2. Grades:} \quad I_y = \int_A z^2 dA \quad I_z = \int_A y^2 dA$$

$$\text{Deviationsmoment bzw. Zentrifugalmoment:} \quad I_{yz} = I_{zy} = - \int_A y \cdot z dA$$

Festigkeit

Die Festigkeit eines Werkstoffes ist seine Fähigkeit, äußere Belastungen aufzunehmen und durch den inneren Werkstoffzusammenhalt zu übertragen. Sie ist abhängig von der Belastungsart und von der jeweiligen Empfindlichkeit des Werkstoffes bezüglich dieser

Belastungsart, bezüglich innerer Kerben usw. Zu den Festigkeitskenngrößen gehören einerseits z. B. die Dehngrenze und die Streckgrenze, andererseits die Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsfestigkeit.

Als Festigkeit eines Bauteils wird im konstruktiven Bereich beispielsweise im Sinne der beanspruchungsgerechten Gestaltung die Fähigkeit des Bauteils verstanden, die wirkenden Belastungen aufzunehmen. Dieser Begriff beinhaltet eine Kombination aus der Werkstofffestigkeit und der Bauteilgeometrie, beispielsweise bei Zug der beanspruchten Fläche A oder bei Biegung des Widerstandsmomentes W . Die Festigkeit eines Bauteils ist ein Maß dafür, wann ein Bauteil versagt, z. B. bricht.

Steifigkeit

Der Widerstand des Werkstoffes gegen elastische Verformungen kennzeichnet seine Steifigkeit. Die Verformungskenngrößen werden z. B. durch die Bruchdehnung und -einschnürung angegeben. Insbesondere charakterisiert der Elastizitätsmodul die Steifigkeit von Werkstoffen. Durch experimentelle Versuche (z. B. Zugversuch, Druckversuch) kann mit Hilfe des Spannungs-Dehnungs-Diagramms die Elastizität der Werkstoffe ermittelt werden. Der Elastizitätsmodul (E) ist dabei die Proportionalitätskonstante zwischen der Spannung σ und der Dehnung ε ; er ist somit ein Maß für die Verformbarkeit des Werkstoffes. Die Steifigkeit eines Bauteils ist neben der Werkstoffsteifigkeit abhängig von der Geometrie des Bauteils, beispielsweise bei Zug der beanspruchten Fläche A . Die Biegesteifigkeit eines Bauteils ist das Produkt aus dem Elastizitätsmodul E und dem Flächenmoment 2. Grades I ($E \cdot I$), vgl. DIN 13316 /DIN80/. Das Flächenmoment 2. Grades I ist dabei die entsprechende geometrische Größe des Biegeträgers; es ist um so größer, je größer die Querschnittsfläche und deren Abstand von der neutralen Faser ist. Ein großes Flächenmoment 2. Grades bedeutet hohe Steifigkeit (Starrheit bzw. Widerstand gegen elastische Verformung). Der Elastizitätsmodul E ist dagegen eine Werkstoffkenngröße und gibt Auskunft über die Fähigkeit des Werkstoffes, sich elastisch zu verformen. Je größer der E-Modul, desto höher ist die für eine bestimmte Verformung erforderliche Belastung. Die Steifigkeit ist ein Maß dafür, welche Verformungen ein Bauteil unter gegebener Belastung erfährt, z. B. Längenänderungen.

Werkstoffprüfung

Die Prüfverfahren sind gekennzeichnet durch die Art der Beanspruchung (z. B. Zug, Druck, Biegung, Scherung, Torsion) sowie deren zeitlichen Verlauf (z. B. statisch, dynamisch, schlagartig, schwingend). Die Ermittlung dieser Werte erfolgt an Probenkörpern mit definierten und zum Teil genormten Abmessungen unter vorgegebenen Prüfbedingungen sowie unter Verwendung geeigneter Prüfmaschinen /CZI00/. Das Prüfverfahren soll möglichst genau die jeweilige Betriebsbeanspruchung nachahmen. Problematisch sind dabei häufig die fehlende Kenntnis über die in der Praxis herrschenden Beanspruchungsverhältnisse sowie die Übertragung der an den üblicherweise kleineren Proben ermittelten Werkstoffkennwerte auf die realen Verhältnisse (größere Bauteilabmessung und jeweilige Belastungen).

6.2 Ermittlung der Werkstoffkennwerte für Biegebelastung

Eine sinnvolle Ermittlung der Biegefestigkeit bei statischer bzw. quasistatischer Belastung ist auf definierte Werkstoffe beschränkt. Bei metallischen Werkstoffen beispiels-

weise wird die Biegefestigkeit nur unter schwingender Belastung im Dauerschwingversuch nach DIN 50100 /DIN78b/ ermittelt. Hierbei werden Versuche durchgeführt, deren Auswertung zum *Wöhlerschaubild* führen, aus denen Dauerfestigkeitsschaubilder nach *Smith* abgeleitet werden. Dagegen sind für Kunststoffe, Holz, Papier, Karton und Pappe in den einschlägigen DIN-Normen Verfahren zur Ermittlung der Kennwerte unter statischer Belastung genormt. Das folgende Bild zeigt eine Übersicht über die in diesem Zusammenhang relevanten DIN Normen.

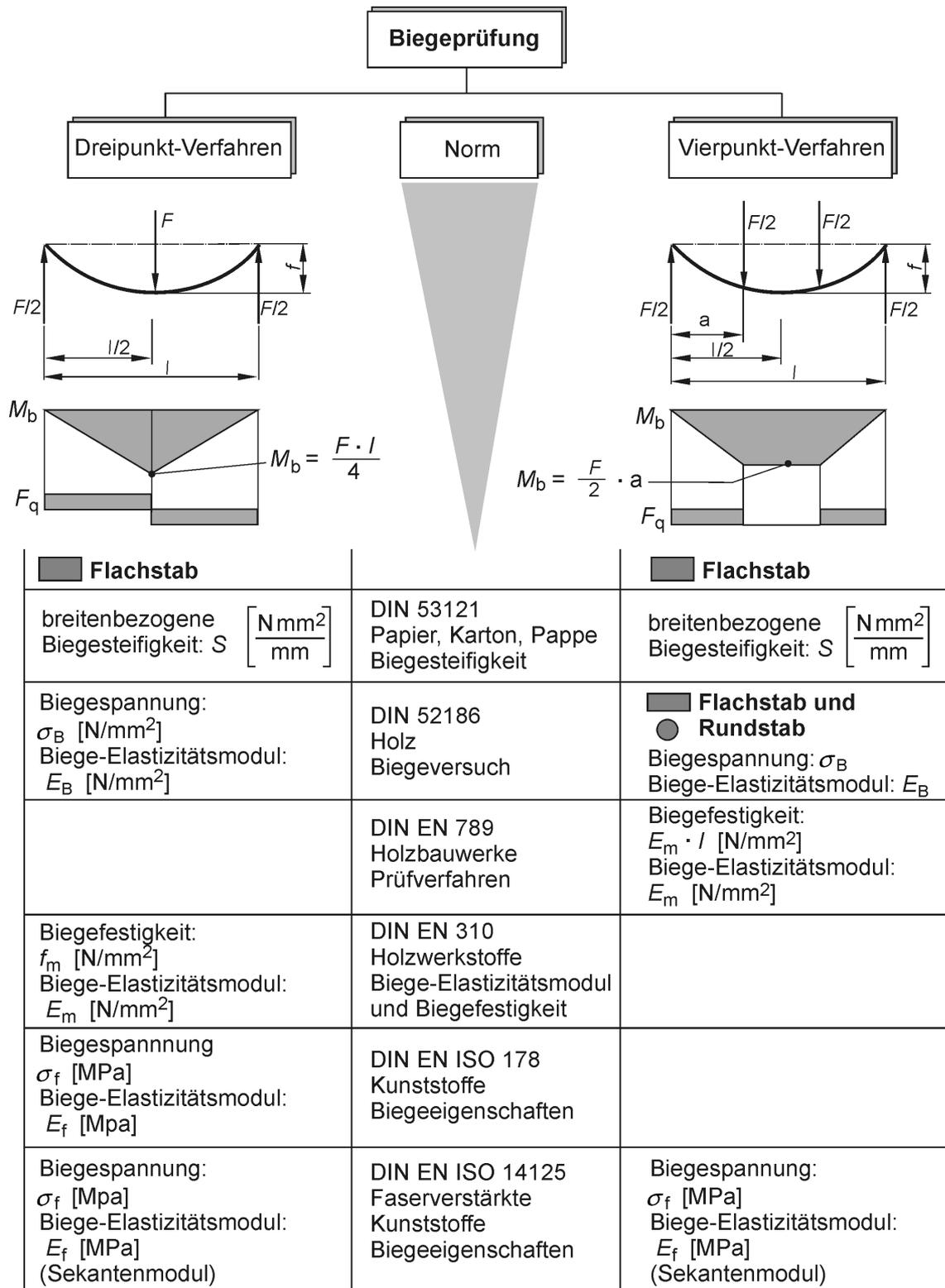


Bild 6.3: Übersicht relevanter DIN-Normen bezüglich Biegeprüfungen

Die Ermittlung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegesteifigkeit von Holz ist in DIN 52186 /DIN78c/ festgelegt. Das Dreipunkt-Verfahren mit mittigem Kraftangriffspunkt wird für fehlerfreies Holz mit möglichst quadratischem Querschnitt eingesetzt, das Vierpunkt-Verfahren mit zwei Kraftangriffspunkten wird für die Prüfung von Kantholz und Rundholz (Gebrauchsholz in Originalabmessungen) verwendet. Zur Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls E_B wird ein Kraft-Durchbiegungs-Diagramm im elastischen Verformungsbereich bis zu ungefähr einem Drittel der Höchstkraft erstellt. Aus diesem Diagramm wird eine beliebige Kraftdifferenz ΔF sowie die dazugehörige Durchbiegung Δf der jeweiligen Probe bestimmt. Durch das Einsetzen der ermittelten Werte in die jeweilige in der Norm vorgegebene Biegegleichung unter Berücksichtigung der Probenabmessungen kann der Biege-Elastizitätsmodul E_B berechnet werden.

Die Biegefestigkeit β_B ist die rechnerisch größte Biegespannung σ_B , die beim Bruch der Probe auftritt. Dabei soll die maximale Kraft innerhalb einer Zeit von $(1,5 \pm 0,5)$ Minuten gleichmäßig und stoßfrei aufgebracht werden. Die Berechnung der Biegefestigkeit erfolgt nach den Formeln der Mechanik aus dem Quotienten des Biegemoments M_b zu dem Widerstandsmoment W . Darüber hinaus benennt DIN 52186 /DIN78c/ die verschiedenen Prüfeinrichtungen und deren Genauigkeit. Es soll eine Universalprüfmaschine nach DIN 51221 verwendet werden, die die Messung der Kraft auf 1% ermöglicht. Das Längenmessgerät zur Bestimmung der Durchbiegung sollte diese auf 0,1% der Probenhöhe genau ermöglichen. Die Querschnittsmessung der Probe sollte auf 0,5% ermöglicht werden, z. B. mit einer Bügelmessschraube o. ä. Die Abstände der Stützweite und Kraftangriffspunkte sollten ebenfalls auf 0,5% bestimmt werden. Weitere Angaben der DIN betreffen z. B. die Ausführung und Form der Proben.

DIN EN 310 /DEN93b/ dient ebenfalls zur Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit von Holzwerkstoffen. Diese Norm ist DIN 52186 /DIN78c/ sehr ähnlich, dient jedoch zur Prüfung von Strangpressplatten, Hohlraumplatten und Sperrholz, die eine Dicke von 3 mm und größer aufweisen. Im Gegensatz zur DIN 52186 /DIN78c/ beinhaltet DIN EN 310 nur das Dreipunkt-Verfahren.

DIN EN 789 /DEN96b/ behandelt Prüfverfahren für handelsübliche Holzwerkstoffe in tragenden Holzbauwerken zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften für Zug-, Druck- und Biegebelastung. Bei der Durchführung der Biegeprüfung wird lediglich das Vierpunkt-Verfahren beschrieben. Die Vorgehensweise und Berechnung der Kennwerte ist prinzipiell identisch mit der in DIN 52186 /DIN78c/ beschrieben.

Das hier angewendete Verfahren sowie dessen Auswertung erscheinen für die Anwendung auf Faserformwerkstoffe prinzipiell gut geeignet, jedoch bestehen wesentliche Unterschiede in den Abmessungen der Proben, da für Faserformprodukte nur geringe Wandstärken realisierbar sind. Außerdem kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass für Faserformprodukte ein linearer Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung, d. h. ein konstanter Elastizitätsmodul, erwartet werden kann. Dass eine Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der jeweiligen Dehnung bestehen kann, ist prinzipiell von Kunststoffen her bekannt. Die Norm DIN EN ISO 178 /DEI97/ beschreibt die Bestimmung von Biegeeigenschaften von Kunststoffen; sie kann angewendet werden auf thermoplastische und duroplastische Werkstoffe, auch mit Faserverstärkung. Die Biegeeigenschaften werden gemäß DIN EN ISO 178 /DEI97/ nach dem

Dreipunkt-Verfahren für rechteckige Proben bestimmt. Die Abmessungen und Formen der Probenkörper sind in der DIN angegeben.

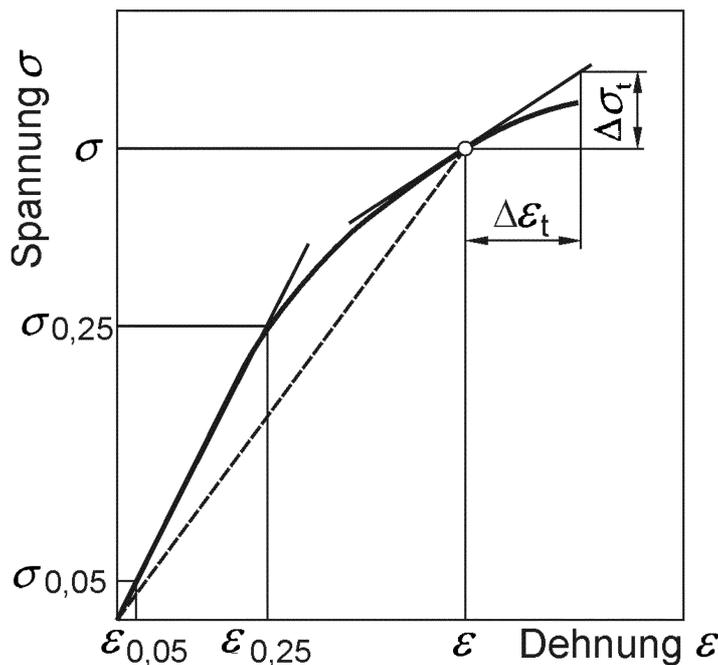
Aus Kraft und Durchbiegung werden wiederum nach den einschlägigen Formeln der Mechanik die Biegespannung σ_b und der Elastizitätsmodul für Biegebelastung E_f ermittelt. Für die Berechnung des Biegemoduls werden zwei Durchbiegungen s_1 und s_2 bei gegebenen Randfaserdehnungen $\varepsilon_{f1} = 0,05\%$ und $\varepsilon_{f2} = 0,25\%$ nach einer in der Norm angegebenen Gleichung bestimmt. Aus diesen Dehnungen und den zugehörigen Biegespannungen σ_{f1} und σ_{f2} wird der Biegemodul $E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1})$ berechnet. Es handelt sich dabei um einen Sekantenmodul für kleine Dehnungen, da die entsprechenden Gleichungen nur für das lineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten gelten, worauf auch in der Norm hingewiesen wird.

Gegenüber der DIN EN ISO 178 /DEI97/ gilt die DIN EN ISO 14125 /DEI98/ sowohl für das Dreipunkt-Verfahren als auch für das Vierpunkt-Verfahren. Die Norm beinhaltet die Abmessungen der Probenkörper, die Angabe der Prüfgeschwindigkeiten sowie die Stützweiten für das Dreipunkt- und Vierpunkt-Verfahren in Abhängigkeit vom Werkstoff. Während der Versuchsdurchführung wird die auf den Probenkörper aufgebrachte Kraft und die entsprechende Durchbiegung gemessen.

Bestimmt wird nach der DIN EN ISO 14125 der Sekantenmodul E_f aus dem Quotienten der Differenz der Spannungen (σ_f'' , σ_f') und den dazugehörigen Dehnungen ($\varepsilon_f'' = 0,0025$ und $\varepsilon_f' = 0,0005$), vergleiche DIN EN ISO 178 /DEI97/. Mit Hilfe der entsprechenden Formel wird bei gegebenen Dehnungen ($\varepsilon_f'' = 0,0025$ und $\varepsilon_f' = 0,0005$) die betreffende Durchbiegung (s'' , s') ermittelt. Durch das Einsetzen dieser Werte in die Gleichung für den Biegemodul E_f kann dieser berechnet werden. Darüber hinaus beinhaltet die DIN EN ISO 14125 eine Formel zur Bestimmung der Biegespannung in den Randfasern (σ_f), die ihre Gültigkeit für große Durchbiegungen hat.

Demgegenüber ist es in der einschlägigen Fachliteratur, z. B. Erhard /ERH93/ und Ehrenstein /EHR95/, üblich, den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Dehnung anzugeben. Außerdem werden für jeden Dehnungswert zwei Kennwerte verwendet: Der Tangentenmodul E_t ergibt sich aus der Steigung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die jeweilige Dehnung. Der Sekantenmodul E_s dagegen ergibt sich aus der Steigung der Sekante vom Nullpunkt zum Diagrammpunkt für die betreffende Dehnung, **Bild 6.4**.

Der Elastizitätsmodul E_0 oder auch Nullpunktsmodul kennzeichnet den Widerstand gegen Verformung im linearen Bereich, in dem das *Hookesche* Gesetz Gültigkeit hat. Aus messtechnischen Gründen wird der Elastizitätsmodul als Sekante zwischen $\varepsilon = 0,0005$ und $\varepsilon = 0,0025$ ermittelt. Der Elastizitätsmodul E_0 dient hauptsächlich für den Vergleich mit anderen Werkstoffen. Die Kunststoffe werden allerdings über den linearen Bereich hinaus beansprucht, daher kennzeichnet der Sekantenmodul das Werkstoffverhalten zwischen dem Nullpunkt und einer beliebigen Dehnung über den linearen Bereich. Der Tangentenmodul E_t kennzeichnet die Steigung an einem Punkt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Somit beschreibt der Tangentenmodul das Steifigkeitsverhalten von belasteten Körpern bei weiterer Belastung /EHR95/.



Elastizitätsmodul:

$$E_0 = \frac{\sigma_{0,25} - \sigma_{0,05}}{\varepsilon_{0,25} - \varepsilon_{0,05}}$$

Sekantenmodul:

$$E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Tangentenmodul:

$$E_t = \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta\varepsilon_t}$$

Bild 6.4 Elastizitätsmoduln bei Kunststoffen nach /EHR95/

Vorgehensweise für Faserformprodukte

Zur Ermittlung der Kennwerte bei Faserformprodukten erscheint keines der betrachteten Verfahren problemlos übertragbar. Als Prüfeinrichtung sollte eine Vierpunkt-Biegeeinrichtung verwendet werden, damit im mittleren Bereich die Biegespannung konstant gehalten wird. Hierdurch wird vermieden, dass die Proben nur an einer Stelle mit dem maximalen Biegemoment belastet werden, während eventuell eine geringere Biegefestigkeit bzw. Steifigkeit fertigungsbedingt an einer anderen Stelle vorhanden ist. Mit dem Faserformverfahren kann weder eine konstante Materialstärke über die Probenlänge noch eine hinreichend glatte Oberfläche hergestellt werden; somit besteht keine konstante Probendicke h . Daher muss für den Bereich, in dem der Bruch erwartet wird, das minimale Flächenmoment zweiten Grades bestimmt werden, und es muss nach dem Bruch überprüft werden, ob der Bruch tatsächlich an der entsprechenden Stelle aufgetreten ist.

Bei den durchzuführenden Untersuchungen sollen in einem ersten Schritt die Werkstoffkennwerte anhand von definierten Proben ermittelt werden. Hierbei soll es sich um Proben mit weitgehend rechteckigem Querschnitt handeln, die einerseits aus bereits bestehenden Fremdprodukten herausgeschnitten werden, und andererseits um selbstgefertigte Proben. Die hieran gewonnenen Ergebnisse sollen eingesetzt werden, um ein technisches Produkt, hier exemplarisch eine Unterarmorthese, zu dimensionieren.

Das Verhalten dieses Produktes, insbesondere seine Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit unter Aufbringung eines Biegemomentes und Verformung über definierte Biegewinkel, kann damit rechnerisch simuliert werden. Im nächsten Schritt sollen entsprechende Versuchsmuster des Produktes hergestellt und auf einer geeigneten Prüfanordnung der beschriebenen Belastung ausgesetzt werden. Durch Messung des Belastungsmomentes und des jeweiligen Verformungswinkels kann dann das reale Verhalten experimentell erfasst werden, so dass die simulierten Werte verifiziert werden können. Diese Werte sollen zusätzlich mit den zuvor gemessenen im Handgelenk aufgebrachten Werten verglichen werden, um die Anwendungsfähigkeit des Produktes diskutieren zu können.

Zur Ermittlung der jeweiligen Querschnittsfläche über die Probenlänge wird hier eine messtechnische Vorgehensweise gewählt. Dabei wird durchaus eine raue bzw. beliebig strukturierte, ungenaue Oberfläche zugelassen. Die entsprechende Probe wird mittels eines 3D-Scanners abgetastet. Aus den gewonnenen Messwerten werden dann die erforderlichen Geometriedaten ermittelt: Die Probenlänge, die Probenbreite, die Querschnittsflächen und die Biegegewidstandsmomente. Sollen Proben aus bereits bestehenden Produkten entnommen werden, ist es schwierig, Aussagen über die Qualität der verwendeten Werkstoffe sowie die Fertigungsverfahren zu treffen:

Entsprechende Informationen sind nicht ohne weiteres verfügbar, zumal teilweise noch nicht einmal die Hersteller der Produkte, die als einfache Verpackungsteile übernommen wurden, bekannt sind. Da die fehlenden Informationen kaum zu beschaffen sein werden, soll als Hilfsmittel zumindest der Einfluss der Verdichtung der Bauteile berücksichtigt werden, die insbesondere durch Pressvorgänge bei der Herstellung beeinflusst werden kann. Hierzu soll ein Verdichtungsgrad definiert werden, der wie folgt ermittelt werden soll: Aus dem Bauteil entnommene Proben sollen unter einer hydraulischen Presse gepresst werden. Hierbei wird erwartet, dass die Presskraft mit steigendem Verformungsweg zunächst geringfügig, dann aber überproportional ansteigt, während sich die Probe kaum noch weiter zusammenpressen lässt. Aus der sich dabei ergebenden gepressten Dicke in Relation zur Ausgangsdicke des Bauteils kann ein Verdichtungsgrad des ursprünglichen Bauteils abgeleitet werden. Inwieweit der Verdichtungsgrad des Werkstoffes ein Qualitätsmerkmal darstellt, kann hierdurch überprüft werden.

Damit sind neben der bereits beschriebenen Versuchsanordnung zur Messung der im Handgelenk aufbringbaren Momente zusätzlich die folgenden Versuchsaufbauten erforderlich:

- 3-D-Scanner zur Erfassung der Geometriedaten der Proben und der Versuchsbauteile (Orthesen) mit Berechnungsmöglichkeit der Fläche, des Flächenmoments zweiten Grades und der Widerstandsmomente der jeweiligen Querschnitte, in diskreten Schritten über die Länge verteilt.
- Vierpunkt-Biegemaschine mit Messmöglichkeit des Biegemoments und des Verformungsweges sowie mit Auswertungsmöglichkeit zur Darstellung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm.
- Pressvorrichtung, Maximalkraft 200 KN, mit Messmöglichkeit für die Kraft und für den Verfahrweg.
- Biegemaschine zur Belastung der realen Bauteile (Orthese) mit der Möglichkeit der Messung und Auswertung von Biegemoment und Verformungswinkel, nach dem Prinzip der Vierpunktbiegemaschine aufgebaut; hierzu soll nach geeigneter Ergänzung die Versuchsanordnung zur Messung der im Handgelenk aufbringbaren Momente verwendet werden.

6.3 Widerstandsmomente, Zusammenhang Zug-Druck und Biegung

Für die Berechnung der im Bauteil wirkenden Biegespannungen ist das Widerstandsmoment die entscheidende geometrische Kenngröße für eine Querschnittsfläche. Mit dem Widerstandsmoment W können die Spannungen in den Randfasern berechnet werden. Biegespannungen sind Normalspannungen, die grundsätzlich in jedem Querschnitt als Zug- und Druckspannung vorhanden sind. Aufgrund der linearen Spannungsverteilung treten die maximalen Zug- bzw. Druckspannungen nur in den Randfasern auf, sie-

Die Teilflächen A_i sind in Richtung der z -Achse um den Betrag z_{i0} verschoben. Als *Steinerscher Satz* wird die Beziehung zwischen den Flächenmomenten 2. Grades bezogen auf die Gesamtschwerachse und den hierzu parallel verschobenen Achsen bezeichnet /SNL89/. Das Flächenmoment 2. Grades bezüglich der y -Achse berechnet sich somit aus dem Flächenmoment von jeder Teilfläche (A_i) und dem *Steinerschen Anteil* wie folgt:

$$I_{y \text{ ges}} = \sum \left(\frac{b_i \cdot h_i^3}{12} + b_i \cdot h_i \cdot z_{i0}^2 \right)$$

Das Flächenmoment 2. Grades ist ein Maß für die Steifigkeit eines Körpers, d. h. für den Widerstand, den ein Querschnitt der Biegeverformung entgegensetzt. Durch $I_{y \text{ ges}}$ und die Randfaserabstände z_1 und z_2 können die Widerstandsmomente W_{b1} für die obere Randfaser und W_{b2} für die untere Randfaser bestimmt werden:

$$W_{b1} = \frac{I_{y \text{ ges}}}{z_1} \quad \text{und} \quad W_{b2} = \frac{I_{y \text{ ges}}}{z_2}$$

Das Widerstandsmoment ist ein Maß für die Festigkeit eines stabförmigen Körpers, d. h. der Widerstand des Querschnitts gegenüber einer Biegebelastung. Je größer der Randfaserabstand z ist, desto kleiner wird das Widerstandsmoment und um so größer wird die in der Randfaser wirkende Spannung. Die aus dem belastenden Biegemoment resultierenden Spannungen in den Randfasern, die als Zug- bzw. Druckspannungen wirken, lassen sich wie folgt berechnen:

$$\sigma_{b1} = \frac{M_b}{W_{b1}} \quad \text{und} \quad \sigma_{b2} = \frac{M_b}{W_{b2}}$$

Die Gültigkeit dieser Biegespannungsformel ist beschränkt auf gerade bzw. einachsige Biegung, d. h. die Achsen y und z sind Hauptachsen des Querschnitts; die durch äußere Lasten hervorgerufenen Querkräfte wirken in z -Richtung und die Momente um die y -Achse /SNL89/. In diesem Fall erfährt der Körper nur Durchbiegungen w in z -Richtungen. Schiefe Biegung oder zweiachsige Biegung liegt vor, wenn ein Körper eine Durchbiegung w in z -Richtungen und v in y -Richtungen erfährt. Dies liegt z. B. vor, wenn die Belastungsebene keine Symmetrieebene des Querschnitts darstellt, d. h. die Belastung ist unsymmetrisch, oder der Querschnitt wird in y - und z -Richtungen belastet.

Festigkeit

An welcher Stelle eine Schädigung des Bauteils auftritt ist davon abhängig, in welcher der beiden Randfaserabstände die Spannung am größten ist und ob der Werkstoff empfindlicher auf Zug- oder Druckbelastung reagiert. Hierüber werden im folgenden weiterführende Betrachtungen durchgeführt.

Untersucht man die beiden möglichen Belastungsfälle, die sich durch die Wirkrichtung des Biegemoments in positiver oder negativer Richtung ergeben, tritt jede der genannten Spannungen jeweils als Zug- oder als Druckspannung auf. Damit ergeben sich folgende Werte:

σ_{bd1} , σ_{bz2} : Obere Druck- und untere Zugspannung, aus positivem Biegemoment

σ_{bz1} , σ_{bd2} : Obere Zug- und untere Druckspannung, aus negativem Biegemoment

Dimensionierung

Die maximalen Spannungen sind für die Dimensionierung entscheidend. Mit den zulässigen Spannungen $\sigma_{d\text{ zul}}$ und $\sigma_{z\text{ zul}}$ lassen sich die Festigkeitsbedingungen aufstellen:

$$\sigma_{bd\text{ max}} = \max(\sigma_{bd1}, \sigma_{bd2}) \leq \sigma_{d\text{ zul}} \quad (\text{Bedingung für die Druckspannung})$$

$$\sigma_{bz\text{ max}} = \max(\sigma_{bz1}, \sigma_{bz2}) \leq \sigma_{z\text{ zul}} \quad (\text{Bedingung für die Zugspannung})$$

$$\text{mit} \quad \sigma_{bz1} = \sigma_{bd1} = \frac{M_b}{W_{b1}} \quad \text{und} \quad \sigma_{bz2} = \sigma_{bd2} = \frac{M_b}{W_{b2}}$$

Für Querschnitte, die zur Schwerachse spiegelsymmetrisch sind, gilt $z_1 = z_2 = z$, so dass beide Widerstandsmomente gleich sind: $W_{b1} = W_{b2} = W_b$ (beispielsweise I-Profile). Damit ist die maximale Zugspannung σ_{bz} gleich der maximalen Druckspannung σ_{bd} .

Sind die zulässigen Spannungen des eingesetzten Materials im Zug- und Druckbereich identisch und ist die betrachtete Querschnittsfläche unsymmetrisch, siehe **Bild 6.5**, dann kann die größte Spannung des Querschnitts (größter Abstand z_2 von der Biegeachse y) betrachtet werden, unabhängig davon, ob es sich hierbei um Druck- oder Zugspannung handelt.

Die Unterscheidung zwischen der größten Zug- und Druckspannung ist nur bei Werkstoffen erforderlich, die sich bei den zulässigen Spannungen im Zug- und Druckbereich unterscheiden. Weist der Werkstoff unterschiedliche zulässige Spannungen $\sigma_{d\text{ zul}}$ und $\sigma_{z\text{ zul}}$ auf (beispielsweise Gusswerkstoffe, Holz oder Beton), müssen bei unsymmetrischen Querschnitten beide Werte überprüft werden, bzw. bei symmetrischen wird die vorhandene Spannung mit der kleineren der beiden zulässigen Spannungen verglichen:

$$\sigma_b = \sigma_{bz} = \sigma_{bd} = \frac{M_b}{W_b} \quad \text{Kontrolle:} \quad \sigma_{bd} \leq \sigma_{d\text{ zul}} \quad \text{und} \quad \sigma_{bz} \leq \sigma_{z\text{ zul}}$$

$$\text{bzw.} \quad \sigma_b \leq \min(\sigma_{d\text{ zul}}, \sigma_{z\text{ zul}})$$

Wenn die Zugfestigkeit des Werkstoffes gleich der Druckfestigkeit ist (bei zähen Werkstoffen, z. B. Stählen) und wenn der Querschnitt unsymmetrisch ist, tritt die Schädigung in der Randfaser auf, an der das kleinere Widerstandsmoment $W_{b\text{ min}}$ vorliegt:

$$\sigma_{b\text{ max}} = \frac{M_b}{W_{b\text{ min}}} \leq \sigma_{b\text{ zul}} = \sigma_{z\text{ zul}} = \sigma_{d\text{ zul}}$$

In diesem Fall ist eine Ermittlung der zulässigen Biegespannung nicht erforderlich; es kann mit der zulässigen Zugspannung gerechnet werden, siehe zähes Werkstoffverhalten.

Zähes Werkstoffverhalten

Zähes bzw. duktiles Werkstoffverhalten liegt vor, wenn die Bruchspannung größer als die Fließspannung ist ($\sigma_B > \sigma_F$). Dieses Verhalten weisen die meisten Metalle und einige Kunststoffe auf. Betrachtet man Kennwerte für dynamisch ertragbare Spannungen, beispielsweise in Dauerfestigkeitsschaubildern, so ist feststellbar, dass die Werte für Biegebelastung (geringfügig) höher liegen als diejenigen für Zug- bzw. Druckbelastung. Bei der Biegebelastung treten die maximalen Spannungen nur in den Randfasern auf. Folglich wird die Streck- bzw. Quetschgrenze (R_e bzw. σ_{bF}) zuerst in den Randfasern erreicht, eine Erhöhung der Spannung bewirkt zunächst das Fließen des Materials in diesem Randbereich, siehe **Bild 6.6**. Bei weiterer Belastung kann sich die plastische De-

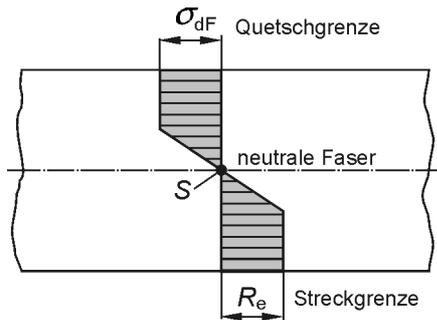


Bild 6.6: Spannungsverlauf im zähen Werkstoff bei Biegebelastung über der Streckgrenze nach /ISS95/

formation bis zur neutralen Faser hin ausbreiten. Bei Biegung lassen sich demnach zähe Werkstoffe über die Biegefließgrenze σ_{bF} belasten, ohne dass der Werkstoff bricht. Die Biegefließgrenze σ_{bF} ist deutlich höher als die im Zugversuch ermittelte Streckgrenze R_e . Die Größe der Biegefließgrenze ist allerdings vom eingesetzten Werkstoff und der Querschnittsform des Bauteils abhängig und kann nur experimentell bestimmt werden /ISS95/.

Daher ist es sinnvoll, die im Zug- bzw. Druckversuch ermittelten Kennwerte zu verwenden, zumal diese gleich sind; diejenigen aus dem Zugversuch lassen sich allerdings leichter ermitteln. Der Bruch durch Druckbelastung ist ebenfalls nicht relevant, da die Knickbeanspruchung meist unter der Bruchspannung liegt /ISS95/. Der Biegeversuch hat daher für Werkstoffe mit gleichem Zug- und Druckverhalten (zähe Werkstoffe) keine Bedeutung /DOM86/.

Im Gegensatz zum Zugversuch beginnen zähe Werkstoffe, sich an irgendeiner Stelle einzuschnüren, was eine Querschnittsabnahme zur Folge hat. Der Werkstoff wird plastisch verformt, er fließt und zwar infolge von Abgleitung (Scherung) einzelner Kristallbereiche (Gefügeteile) unter einem Winkel von 45° zur Achse /ASS99/.

Inwieweit auf eine Ermittlung der vom Werkstoff ertragbaren Biegespannungen vollständig verzichtet werden kann soll im Folgenden näher betrachtet werden.

Sprödes Werkstoffverhalten

Gegenüber den zähen Werkstoffen sind die spröden Werkstoffe (z. B. Guss, Beton) bei Zugbeanspruchung plastisch nicht verformbar /ISS95/. Sprödes Werkstoffverhalten liegt vor, wenn die Bruchspannung $\sigma_B < \sigma_F$ (σ_F = Fließspannung) ist. Dieses Verhalten weisen einige Metalle (Guss) und viele Kunststoffe sowie z. B. Naturstein, Glas und Keramik auf. Bei Zugbelastung tritt der Bruch ohne plastische Verformung ein. Aufgrund dieser geringen Verformbarkeit lassen sich die Kennwerte im Zugversuch schwer ermitteln.

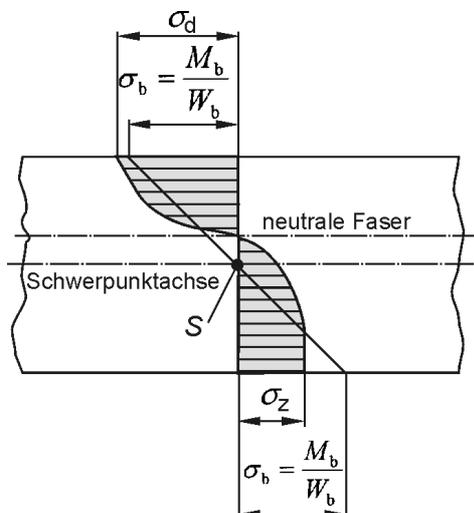


Bild 6.7: Spannungsverlauf im spröden Werkstoff bei Biegebelastung nach /DOM86/

Grauguss verhält sich bei Zug- und Druckbeanspruchung unterschiedlich; die Druckfestigkeit ist etwa drei- bis viermal so hoch wie die Zugfestigkeit /DOM86/, da es bei der Druckbelastung zu plastischen Verformungen kommt. Darüber hinaus sind die Spannungen nicht proportional zum Abstand der neutralen Faser /DOM86/. **Bild 6.7** zeigt den Spannungsverlauf in einem Bauteil aus Grauguss. Die Fähigkeit des spröden Werkstoffes, sich in den Druckzonen plastisch zu verformen, bewirkt eine Verschiebung der Spannungsverteilung, die wiederum eine Verschiebung der beanspruchungsfreien neutralen Faser zur Druckseite bewirkt /ISS95/, /DOM86/, siehe **Bild 6.7**.

Obwohl die vorhandene Spannung auf der Zugseite geringer ist als auf der Druckseite, beginnt der Bruch auf der Biegezugseite /ISS95/, /DOM86/. Die Ursache hierfür ist die geringere Zugfestigkeit von Guss aufgrund der Zug-Druck-Anisotropie, daher kann die Biegefestigkeit von Guss mit Hilfe der Zugfestigkeit R_m laut /ISS95/ wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{bB} = (2 \dots 2,5) \cdot R_m$$

Werkstoffe mit sprödem Werkstoffverhalten werden daher vorwiegend Druckbelastungen ausgesetzt, um die Drucktragfähigkeit dieser Werkstoffe auszunutzen. Beton hat eine Druckfestigkeit z. B. von 55 N/mm^2 gegenüber einer Zugfestigkeit von ca. 1 bis 10 N/mm^2 /KOH95/. Bei Biegebelastung ist Beton nur als Stahlbeton einsetzbar, indem in den Zugzonen eine Bewehrung aus Betonstählen vorgesehen wird. Aufgrund der hohen Adhäsion des Betons an der Stahloberflächen können die Zugbelastungen vom Beton auf den Stahl übertragen werden.

Zur Untersuchung spröder Werkstoffe ist der Biegeversuch geeignet. Der Druckversuch wird häufig für den Bereich des Bauwesens eingesetzt, z. B. für die Prüfung von Holz, Steinen, Zement, Beton.

Gestaltfestigkeit

Die Festigkeit des realen Bauteils wird als Gestaltfestigkeit bezeichnet. Oftmals sind die im Versuch an dem Probenkörper ermittelten Festigkeitswerte nicht ohne weiteres auf reale Bauteile übertragbar. Die Abweichungen des Prüfkörpers vom realen Bauteil beeinflussen die Gestaltfestigkeit. Die Festigkeitswerte werden z. B. durch die folgenden Einflussgrößen verändert:

- Bauteilgröße und -form sowie
- Oberflächenbeschaffenheit

Die im Versuch ermittelte Spannung wird als Nennspannung bezeichnet. Die zulässige Spannung im Bauteil ist im Allgemeinen aufgrund der genannten Einflüsse geringer. Diese müssen daher durch entsprechende Einflussfaktoren mit in die Berechnung der zulässigen Spannung einfließen.

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit ist stark von der Werkstoffzähigkeit abhängig. Bei zähen Werkstoffen können durch die Fließfähigkeit des Werkstoffes im Bereich der Kerbe die Spannungen abgebaut werden. Daher sind spröde Werkstoffe kerbempfindlicher als zähe /ASS99/. Der Kerbfaktor ist z. B. vom Werkstoff, von der Art bzw. Geometrie der Kerbe, der Belastungsart (Zug, Druck, Biegung) sowie dem zeitlichen Verlauf der Belastung (statisch, dynamisch) abhängig. Außer den Kerben (Querschnittsänderung im Bauteil) hat die Beschaffenheit der Oberfläche einen Einfluss. Hierbei handelt es sich um die Oberflächenrauheiten (kleine Kerben), die abhängig von der jeweiligen Bearbeitung sind. Die Abweichung in der Größe und Form beeinflusst die Festigkeit, da größere Bauteile mehr Inhomogenitäten aufweisen. Bei der Berechnung der zulässigen Spannung muss zusätzlich noch ein Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden; dieser ist umso größer, je geringer die Kenntnisse über die tatsächlich wirkenden Verhältnisse (Einflussfaktoren) sind.

Faserformprodukte

Für Faserformprodukte bestehen zur Zeit weder Festigkeitskennwerte, noch sind Abhängigkeiten der oben genannten Einflüsse bekannt. Inwieweit der Werkstoff eine Zug-

Druck-Anisotropie (vergleiche Guss) o. ä. aufweist, ist ebenfalls nicht bekannt. Im Rahmen der durchzuführenden Untersuchungen soll das Werkstoffverhalten unter Biegebelastung für Prüfkörper erfasst werden. Dies entspricht auch der im realen Betrieb an der als Anwendungsbeispiel dienenden Unterarmorthese auftretenden Hauptbelastung.

Inwieweit eine direkte Übertragung der ermittelten Kennwerte auf zug- oder druckbeanspruchte Bauteile (wie bei zähen Werkstoffen) oder eine Umrechnung mittels eines Faktors erfolgen kann (siehe spröde Werkstoffe), muss in weiterführenden Untersuchungen geprüft werden.

Bei der Biegeprüfung soll das Vierpunkt-Verfahren eingesetzt werden, wie es beispielsweise bei Prüfung von Holzbauwerken nach DIN EN 789 oder auch faserverstärkten Kunststoffen nach DIN EN ISO 14 125 Verwendung findet.

Das Werkstoffverhalten wird anhand des Prüfkörpers bestimmt. Als Prüfkörper soll ein Flachstab mit festgelegten Abmessungen eingesetzt werden. Ein Flachstab kommt bei den meisten Biegeprüfungen zum Einsatz, vergleiche **Bild 6.3**. Darüber hinaus werden zusätzlich Biegeprüfungen am realen Bauteil durchgeführt. Dabei wird versucht, den Einfluss der genannten Parameter durch den Vergleich des Prüfkörpers mit dem realen sowie verfahrensbedingter Faktoren (z. B. Einfluss der Siebstruktur) mit berücksichtigt.

Bei der Versuchsdurchführung wird die Durchbiegung des Prüfkörpers gemessen. Zur Bestimmung des Biegeelastizitätsmoduls muss die Gleichung der Biegelinie entsprechend umgestellt werden, daher wird im Folgenden die Biegelinie für das Vierpunkt-Verfahren näher betrachtet.

6.4 Berechnung der Biegelinie für den Vierpunkt-Versuch

Die Vierpunkt-Biegemaschine soll die Probe an zwei Stützstellen aufnehmen. Die Kräfteinleitungsstellen sollen verfahren werden können, wobei der Verfahrenweg gemessen werden kann. Die Stützstellen leiten die Kraft in eine Kraftmesseinrichtung weiter, so dass nach Kompensation der Eigengewichte der entsprechenden Messeinrichtungsteile und der Probe die belastende Kraft ermittelt werden kann. Der prinzipielle Aufbau soll **Bild 6.8** entsprechen.

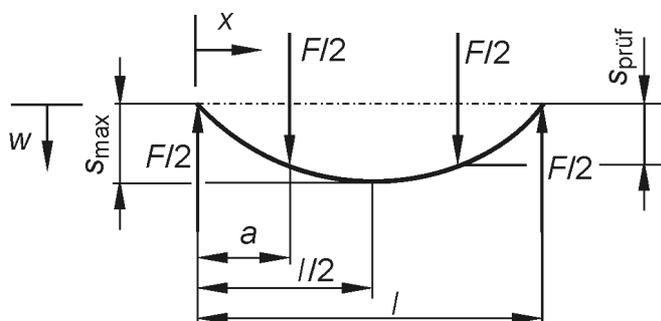


Bild 6.8: Kraft- und Geometrieverhältnisse an der Vierpunkt-Biegemaschine

Aufgrund der *Bernoullischen* Annahme vom Ebenbleiben der Querschnitte, d. h. die Balkenquerschnitte stehen sowohl vor als auch nach der Deformation senkrecht zur Balkenachse, ergibt sich die Differentialgleichung der Biegelinie wie folgt:

$$w'' = -\frac{1}{E \cdot I} \cdot M_b$$

Hieraus kann durch zweimalige Integration die Gleichung der Biegelinie $w(x)$ eines Trägers ermittelt werden. Da das Biegemoment in den Randbereichen proportional zur Koordinate x anwächst, im mittleren Bereich jedoch konstant ist, muss eine Fallunterscheidung vorgenommen werden; es ergeben sich zwei Definitionsbereiche. Die Bestimmung der Integrationskonstanten erfolgt aus den geometrischen Randbedingungen:

- In der Trägermitte muss die Biegelinie waagrecht verlaufen.
- An der Übergangsstelle zwischen den beiden Definitionsbereichen muss sich für die Durchbiegung und für die Steigung der Biegelinie nach den Gleichungen beider Definitionsbereiche jeweils derselbe Wert ergeben.

Damit ergeben sich die beiden Gleichungen der Biegelinie:

$$0 \leq x \leq a \quad M_b = \frac{F}{2} \cdot x \quad \boxed{w(x) = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{x}{l} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{a}{l} \left(1 - \frac{a}{l} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right]}$$

$$a \leq x \leq \frac{l}{2} \quad M_b = \frac{F \cdot a}{2} \quad \boxed{w(x) = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{a}{l} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{x}{l} \cdot \left(1 - \frac{x}{l} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right]}$$

Für die Durchbiegungen an den charakteristischen Stellen ($x = l/2$), entsprechend der maximalen Durchbiegung s_{\max} in Trägermitte, und ($x = a$), entsprechend der an der Kräfteinleitungsstelle gemessenen Verformung $s_{\text{prüf}}$, gilt damit:

$$s_{\max} = w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{F \cdot l^3 \cdot a}{8 \cdot E \cdot I \cdot l} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right]$$

$$s_{\text{prüf}} = w(a) = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{l} \right)$$

Damit ist der Verhältnisfaktor f_v zu berechnen, der das Verhältnis des an den Kräfteinleitungsstellen der verwendeten Vierpunkt-Biegemaschine gemessenen Verformungsweges $s_{\text{prüf}} = w(a)$ zur maximalen Verformung in Balkenmitte $s_{\max} = w(l/2)$ angibt:

$$\boxed{s_{\max} = f_v \cdot s_{\text{prüf}}} \quad \text{mit} \quad \boxed{f_v = \frac{1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{a}{l} \right)^2}{4 \cdot \frac{a}{l} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{l} \right)}}$$

Erfolgt wie bei der verwendeten Vierpunkt-Biegemaschine die Kräfteinleitung im Abstand von jeweils einem Viertel der Balkenlänge von den Auflagerpunkten entfernt, d. h. beträgt die Länge des mittleren Bereichs zwischen den Kräfteinleitungsstellen die halbe Balkenlänge, gilt:

$$f_v = \frac{11}{8} \quad \text{für} \quad a = \frac{l}{4}$$

Die maximale Durchbiegung s_{\max} beträgt also 11/8 des gemessenen Wertes $s_{\text{prüf}}$.

6.5 Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung und -auswertung

Mit Hilfe der durchzuführenden Versuche sollen die Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul der Proben bestimmt werden. Hierzu ist folgendermaßen vorzugehen:

Im Versuch werden die Kraft F und die zugehörige Durchbiegung an den Kräfteinleitungsstellen $s_{\text{prüf}} = w(a)$ gemessen. Im Bereich elastischer Verformung kann dann aus der jeweiligen gemessenen Kraft F sowie der zugehörigen Verformung sowie mit dem Flächenmoment 2. Grades I der Probe der Biege-Elastizitätsmodul E_b bestimmt werden. Im Fall des Versagens kann mit der maximal ertragbaren Kraft F und mit dem Biegegewiderstandsmoment W_b der Probe die vom Bauteil maximal ertragbare Biegespannung σ_b ermittelt werden:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad \text{mit} \quad M_b = \frac{F \cdot a}{2}$$

$$E_b = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot s_{\text{prüf}} \cdot I} \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{l}\right)$$

Das Flächenmoment 2. Grades und das Biegegewiderstandsmoment müssen zuvor numerisch wie beschrieben aus den mittels des 3-D-Scanners gemessenen Geometriedaten der Probe ermittelt werden.

6.6 Einfluss von Pressvorgängen auf die Belastbarkeit

Um die Festigkeit des Werkstoffes zu beeinflussen, den Trocknungsvorgang zu beschleunigen und um bessere Oberflächen zu erhalten, werden Faserformteile nach dem Anformvorgang häufig in beheizten Presswerkzeugen verdichtet. Dabei bleibt die Menge des faserigen Werkstoffes konstant, da kein Material zu- oder abgeführt wird. Zwischen den Partikeln verbleibt ein gewisser Anteil an Restfeuchtigkeit, der nach dem Trocknen mehr oder weniger große luftgefüllte Hohlräume im Werkstück bewirkt, die keine Kräfte übertragen können. Im Folgenden soll untersucht werden, wie Pressvorgänge und insbesondere die daraus resultierenden Veränderungen der Bauteilgeometrie die Belastbarkeit unterschiedlich belasteter Elemente beeinflussen.

Zunächst wird ein Zugträger betrachtet; es wird angenommen, dass die Fasern, die die Kraft übertragen, durch den Pressvorgang nicht beeinträchtigt werden. Damit kann der ungespreste Träger mit der Höhe h_u und der Breite b die gleiche Kraft übertragen wie der gepresste Träger mit der Höhe h_p und der gleichen Breite b , $F_u = F_p = F$, siehe **Bild 6.9**:

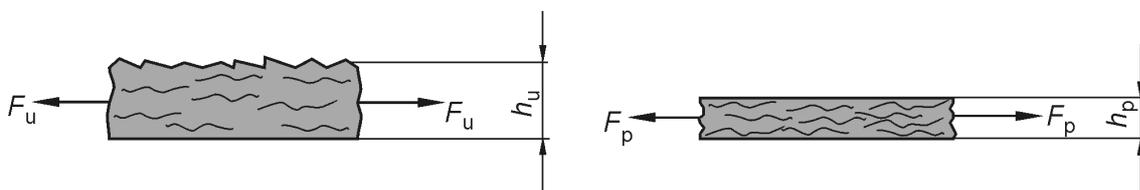


Bild 6.9: Ungesprester Zugträger (links) und gepresster Zugträger (rechts)

Um den Dickenunterschied beschreiben zu können, wird der Geometriefaktor λ_G definiert, der das Verhältnis der Bauteilhöhen angibt:

$$\lambda_G = \frac{h_u}{h_p} \geq 1$$

Betrachtet man die zulässigen Zugspannungen für beide Träger, so gilt:

$$\sigma_z = \frac{F_u}{A_u} = \frac{F_u}{b \cdot h_u} \leq \sigma_{z \text{ zul u}} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_z = \frac{F_p}{A_p} = \frac{F_p}{b \cdot h_p} \leq \sigma_{z \text{ zul p}}$$

Im Grenzfall des Bruchs, mit der Bedingung $F_u = F_p = F$ sowie mit der Definition des Geometriefaktors λ_G gilt dann:

$$F = \sigma_{z \text{ zul u}} \cdot b \cdot h_u = \sigma_{z \text{ zul p}} \cdot b \cdot h_p \quad \text{mit} \quad h_u = \lambda_G \cdot h_p$$

$$\sigma_{z \text{ zul u}} \cdot b \cdot \lambda_G \cdot h_p = \sigma_{z \text{ zul p}} \cdot b \cdot h_p$$

$$\boxed{\sigma_{z \text{ zul p}} = \lambda_G \cdot \sigma_{z \text{ zul u}}}$$

Die Zugfestigkeit erhöht sich also mit demselben Faktor, um den die Wandstärke verringert wird. Tatsächlich müssen zwei weitere Effekte berücksichtigt werden: Durch den Pressvorgang werden sich die Fasern inniger ineinander verschlingen, und die Bildung der Wasserstoffbrücken innerhalb des Werkstoffs wird begünstigt; hierdurch wird die Festigkeit um den zunächst nicht genauer zu ermittelnden Faktor λ_{H2} erhöht. Gleichzeitig wird die Festigkeit durch den Bruch einzelner Fasern um den ebenfalls zunächst nicht genauer zu bestimmenden Faktor λ_B verringert. Es gilt dann:

$$\boxed{\sigma_{z \text{ zul p}} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \sigma_{z \text{ zul u}}} \quad \text{alle } \lambda \geq 1 \quad \begin{array}{l} \lambda_G = \text{Geometriefaktor} \\ \lambda_{H2} = \text{Wasserstoffbrückenfaktor} \\ \lambda_B = \text{Faserbruchfaktor} \end{array}$$

Die genannten Faktoren sind nur durch Versuche zu bestimmen. Durch das Pressen wird die Wandstärke im Vergleich zum ungepressten Teil deutlich verringert. Folglich wird durch Pressvorgänge die Zugfestigkeit des Werkstoffs erheblich erhöht, da die Verbesserung der Wasserstoffbrückenbildung und der Faserbruch ($\lambda_G \gg \lambda_{H2}$; $\lambda_G \gg \lambda_B$) sich in einem geringeren Maße erhöhen.

Bei einem auf Biegung belasteten Träger wirken sich Pressvorgänge in zwei Richtungen aus: Zum einen wird die Festigkeit erhöht; hierzu sollen die bereits gefundenen Ergebnisse für die Zugfestigkeit als Näherung auch für die Biegefestigkeit übernommen werden. Zum Anderen wird die Bauteilhöhe reduziert, so dass das Widerstandsmoment des Trägers entsprechend verkleinert wird. Damit gilt:

$$\sigma_{b u} = \frac{M_{b u}}{W_{b u}} = \frac{M_{b u}}{\frac{b \cdot h_u^2}{6}} \leq \sigma_{b \text{ zul u}} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{b p} = \frac{M_{b p}}{W_{b p}} = \frac{M_{b p}}{\frac{b \cdot h_p^2}{6}} \leq \sigma_{b \text{ zul p}}$$

Im Grenzfall des Bruchs und mit der Bedingung für die zulässige Biegespannung gilt dann:

$$\sigma_{b\text{zul}p} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \sigma_{b\text{zul}u} \quad \text{und} \quad h_u = \lambda_G \cdot h_p$$

$$\frac{M_{b\text{p}}}{b \cdot h_p^2} = \sigma_{b\text{zul}p} \quad \text{bzw.} \quad \frac{M_{b\text{p}}}{b \cdot h_p^2} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \sigma_{b\text{zul}u}$$

$$\frac{M_{b\text{u}}}{b \cdot h_u^2} = \sigma_{b\text{zul}u} \quad \text{bzw.} \quad \frac{M_{b\text{u}}}{b \cdot (\lambda_G \cdot h_p)^2} = \sigma_{b\text{zul}u}$$

Durch Auflösung nach der Festigkeit und Gleichsetzung lässt sich das Verhältnis der maximal ertragbaren Biegemomente berechnen:

$$\sigma_{b\text{zul}u} = \frac{M_{b\text{p}}}{b \cdot h_p^2} \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_G \cdot \lambda_{H2}} = \frac{M_{b\text{u}}}{b \cdot (\lambda_G \cdot h_p)^2}$$

$$M_{b\text{p}} \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_G \cdot \lambda_{H2}} = \frac{M_{b\text{u}}}{\lambda_G^2}$$

$$M_{b\text{p}} = \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_G \cdot \lambda_B} \cdot M_{b\text{u}}$$

Unter der gleichen Voraussetzung wie oben, nämlich dass sich die Verringerung der Wandstärke stärker auswirkt als die Verbesserung der Wasserstoffbrückenbildung und der Faserbruch, wird durch Pressvorgänge die Biegebelastbarkeit eines Trägers erheblich verkleinert; die Höhenreduzierung verschlechtert das Biegewidstandsmoment so stark, dass dieser Effekt auch durch eine Festigkeitserhöhung nicht ausgeglichen werden kann.

Im nächsten Schritt sollen nun stark räumlich gestaltete Biegeträger betrachtet werden; als vereinfachtes Beispiel soll ein I-Träger mit relativ großflächigen Flanschquerschnitten und sehr schmalen Steg untersucht werden, **Bild 6.10**. Um das maximal ertragbare Biegemoment bestimmen zu können, sind zunächst das Flächenmoment 2. Grades I_u und das Widerstandsmoment gegen Biegung $W_{b\text{u}}$ für den ungepressten Träger zu berechnen:

$$I_u = 2 \cdot \left(\frac{b \cdot h_u^3}{12} + b \cdot h_u \cdot z^2 \right) + \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12}$$

Zur Vereinfachung der Rechnung werden das Flächenmoment 2. Grades der Flansche um ihre Schwerachse sowie das des Stegs vernachlässigt, so dass nur der *Steinersche* Anteil berücksichtigt wird. Für kleine Wandstärken h_u kann der Randfaserabstand $z+h_u/2$ außerdem durch den Schwerpunktsabstand z ersetzt werden. Damit kann das Widerstandsmoment des ungepressten Trägers bestimmt werden:

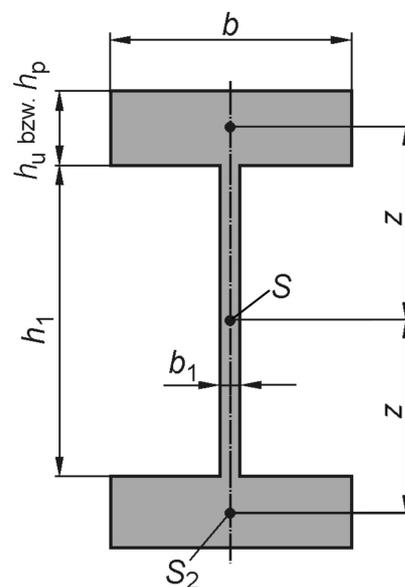


Bild 6.10: I-Träger

$$W_{b\ u} = \frac{I_u}{z + \frac{h_u}{2}} \quad \text{mit folgenden Näherungen:} \quad I_u \approx 2 \cdot b \cdot h_u \cdot z^2$$

$$z + \frac{h_u}{2} \approx z$$

$$W_{b\ u} = \frac{b \cdot h_u \cdot z^2}{z} = b \cdot h_u \cdot z$$

Analog gilt für das gepresste Bauteil mit dem Zusammenhang $h_u = \lambda_G \cdot h_p$:

$$W_{b\ p} = \frac{b \cdot h_p \cdot z^2}{z} = b \cdot h_p \cdot z = b \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot h_u \cdot z$$

Damit lassen sich die Spannungen unter Belastung mit dem Biegemoment $M_{b\ u}$ bzw. $M_{b\ p}$ berechnen:

$$\sigma_{b\ u} = \frac{M_{b\ u}}{W_{b\ u}} = \frac{M_{b\ u}}{b \cdot h_u \cdot z} \leq \sigma_{b\ zul\ u} \quad \text{und} \quad \sigma_{b\ p} = \frac{M_{b\ p}}{W_{b\ p}} = \frac{M_{b\ p}}{b \cdot h_p \cdot z} = \frac{M_{b\ p}}{b \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot h_u \cdot z} \leq \sigma_{b\ zul\ p}$$

Für die zulässige Biegespannung, die bei Bruch überschritten wird, gilt dann:

$$\sigma_{b\ zul\ p} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \sigma_{b\ zul\ u}$$

$$\sigma_{b\ u} = \frac{M_{b\ u}}{b \cdot h_u \cdot z} = \sigma_{b\ zul\ u} \quad \text{und} \quad \sigma_{b\ p} = \frac{M_{b\ p}}{b \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot h_u \cdot z} = \sigma_{b\ zul\ p} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \sigma_{b\ zul\ u}$$

Durch Auflösung nach der Festigkeit und Gleichsetzung lässt sich das Verhältnis der maximal ertragbaren Biegemomente berechnen:

$$\sigma_{b\ zul\ u} = \frac{M_{b\ p}}{b \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot h_u \cdot z} \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_G \cdot \lambda_{H2}} = \frac{M_{b\ u}}{b \cdot h_u \cdot z}$$

$$M_{b\ p} \cdot \frac{\lambda_G \cdot \lambda_B}{\lambda_G \cdot \lambda_{H2}} = M_{b\ u}$$

$$\boxed{M_{b\ p} = \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot M_{b\ u}}$$

Die Verringerung der Wandstärke bewirkt also keine Veränderung der Belastbarkeit des Trägers; lediglich die Wasserstoffbrückenbildung und der Faserbruch haben einen Einfluss.

Abschließend soll für die drei betrachteten Fälle des Zugstabes, des rechteckigen Biegeträgers und des räumlichen Biegeträgers der Einfluss der Pressvorgänge auf den E-Modul untersucht werden. Für einen Zugstab gilt das *Hookesche* Gesetz:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{F}{A} \Rightarrow E = \frac{F}{\varepsilon \cdot A}$$

Unter Berücksichtigung der drei Einflussfaktoren ergeben sich folgende Beziehungen:

$$F_p = \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot F_u \quad h_u = \lambda_G \cdot h_p \quad \text{und damit} \quad A_u = b \cdot h_u = b \cdot \lambda_G \cdot h_p = \lambda_G \cdot A_p$$

Geht man davon aus, dass sich in der ungespressten und der gepressten Probe die gleiche Fasermenge befindet, werden beide Proben näherungsweise unter Belastung die gleiche Dehnung erfahren; tatsächlich wird durch die verbesserte Wasserstoffbrückenbildung das Material steifer, d. h. die Dehnung geringer, während sich der Faserbruch entgegengesetzt auswirkt. Setzt man näherungsweise die gleichen Faktoren an, gilt:

$$\varepsilon_p \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_{H2}} \cdot \varepsilon_u$$

Damit lässt sich der E-Modul bestimmen:

$$E_u = \frac{F_u}{\varepsilon_u \cdot A_u} \quad \text{und} \quad E_p = \frac{F_p}{\varepsilon_p \cdot A_p} = \frac{\frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot F_u}{\frac{\lambda_B}{\lambda_{H2}} \cdot \varepsilon_u \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot A_u} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}^2}{\lambda_B^2} \cdot \frac{F_u}{\varepsilon_u \cdot A_u} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}^2}{\lambda_B^2} \cdot E_u$$

$$E_p = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}^2}{\lambda_B^2} \cdot E_u$$

Entsprechend kann der Biegeträger betrachtet werden. Für einen Träger der Länge l mit dem Flächenmoment 2. Grades I , auf den mittig eine Kraft F einwirkt, berechnet sich die Durchbiegung w wie folgt (Dreipunkt-Biegeversuch):

$$w = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \Rightarrow E = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w \cdot I}$$

Geht man davon aus, dass aufgrund der in der ungespressten und in der gepressten Probe gleichen Fasermenge sich beide Proben näherungsweise unter Belastung um den gleichen Weg w verformen bzw. durch die verbesserte Wasserstoffbrückenbildung das Material steifer und die Verformungen geringer werden, durch den Faserbruch das Material dagegen weicher und die Verformungen größer werden, gilt:

$$w_p \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_{H2}} \cdot w_u$$

Für das Flächenmoment 2. Grades ergibt sich mit der Beziehung $h_u = \lambda_G \cdot h_p$:

$$I_u = \frac{b \cdot h_u^3}{12} \quad \text{und} \quad I_p = \frac{b \cdot h_p^3}{12} = \frac{b \cdot h_u^3}{12 \cdot \lambda_G^3} = \frac{1}{\lambda_G^3} \cdot I_u$$

Damit lässt sich der E-Modul bestimmen:

$$E_u = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w_u \cdot I_u} \quad \text{und} \quad E_p = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w_p \cdot I_p} = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_{H2}} \cdot w_u \cdot \frac{1}{\lambda_G^3} \cdot I_u} = \lambda_G^3 \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w_u \cdot I_u}$$

$$E_p = \lambda_G^3 \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot E_u$$

Auffällig ist der sehr starke Einfluss des Geometriefaktors; es ist jedoch zu beachten, dass eine weitgehend gleichbleibende Durchbiegung w angenommen wurde. Dieses auf theoretischen Wege gefundene Ergebnis muss durch Versuche verifiziert werden.

Als letzter Fall wird der räumliche Träger unter den gleichen Bedingungen betrachtet:

$$w_p \approx \frac{\lambda_B}{\lambda_{H2}} \cdot w_u$$

$$I_u \approx b \cdot h_u \cdot z^2 \quad \text{und} \quad I_p \approx b \cdot h_p \cdot z^2 = b \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot h_u \cdot z^2 = \frac{1}{\lambda_G} \cdot I_u$$

Damit lässt sich der E-Modul bestimmen:

$$E_u = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w_u \cdot I_u} \quad \text{und} \quad E_p = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w_p \cdot I_p} = \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_{H2}} \cdot w_u \cdot \frac{1}{\lambda_G} \cdot I_u} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \frac{16 \cdot F \cdot l^3}{3 \cdot w_u \cdot I_u}$$

$$E_p = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot E_u$$

Somit konnte nachgewiesen werden, wie sich ein möglicher Pressvorgang auf die Festigkeit, auf die Belastbarkeit und auf den E-Modul auswirkt, wobei verschiedene Belastungsfälle und Trägergeometrien berücksichtigt wurden.

7 Beschreibung der Versuchseinrichtungen

7.1 3-D-Scanner zur Erfassung der Geometriedaten

7.1.1 Allgemeines

Herstellungsbedingt weisen Faserformprodukte oftmals eine sehr unregelmäßig geformte Struktur auf. Darüber hinaus können die Materialstärken variieren. Die Querschnittsmessung der jeweiligen Prüfkörper ist daher mit üblichen Messinstrumenten nicht ohne Weiteres möglich. Dies gilt insbesondere für die räumlich gekrümmten Faserformschienen. Aus diesem Gründen werden die Messungen berührungslos mit Hilfe des Lichtschnittverfahrens durchgeführt.

Die nachfolgend beschriebene Messmaschine wurde für dieses Forschungsprojekt am Fachgebiet Messtechnik der Fakultät Maschinenbau der Universität Dortmund entwickelt. Auch die Basissoftware zur Bildabtastung wurde von dort zur Verfügung gestellt /MAR02/. Die mechanische Konstruktion entstand am Fachgebiet Maschinenelemente.

Lichtschnittverfahren

Das Lichtschnittverfahren beruht auf dem Prinzip der Lasertriangulation. Bei diesem Verfahren wird ein Objekt mit einer Lichtquelle, die einen Lichtpunkt erzeugt (z. B. Laser) beleuchtet. Dabei wird der Winkel zwischen der Lichtquelle und einer Abbildungsoptik (Kamera) als Triangulationswinkel bezeichnet. Die Basislänge ist der Abstand des Sensors zum Beleuchtungspunkt. Darüber hinaus werden die trigonometrischen Beziehungen durch den Abstand zwischen dem beleuchteten Objektpunkt und dem Sensor festgelegt /BRE93/.

Beim Lichtschnittverfahren wird ein Lichtstrahl, z. B. Laserstrahl, in der Ebene stark aufgeweitet und auf das zu vermessende Objekt projiziert. Der Laserstrahl wird auf der Oberfläche des angestrahlten Objektes reflektiert. Diese Reflexionen werden von der Kamera entsprechend erfasst, indem sie durch das Objektiv auf den Bildsensor der Kamera gelangen. Die eingesetzte Videokamera besitzt einen integrierten 1/3'' Panasonic CCD Bildsensor (Charge Coupled Device). Der CCD-Bildsensor weist in horizontaler Richtung 512 Pixel (Spalten) und in vertikaler Richtung 582 Pixel (Zeilen) auf. Die Anzahl der Pixel ist eine Kenngröße für die Auflösung des CCD-Bildsensors. Durch die Belichtung der lichtempfindlichen Elemente des CCD-Bildsensors wird das projizierte Bild in elektrische Spannungssignale umgeformt. Die Videokamera wandelt das Bild in ein entsprechendes analoges Videosignal nach PAL-Norm um. Die PAL-Norm (Phase Alternation Line) ist ein standardisiertes Signal und wird zur Übertragung von Farbbildern im europäischen Raum verwendet. Das PAL-Fernsehsignal wird von einem Rechner mittels einer TV-Karte wieder in ein digitales Signal bzw. Graustufen-Bild gewandelt. Das Ergebnis ist eine Matrix aus Zeilen und Spalten, die aus einzelnen Bildelementen bzw. Pixeln (Picture Elements) besteht. Abhängig von der Lichtintensität besitzen die Pixel unterschiedliche Grauwerte von dunkelgrau bis hellgrau, wobei die hellen Bereiche das aufgenommene Videobild bzw. das Objekt wiedergeben. Dieses digitale Bild kann mit einem Auswertprogramm weiter bearbeitet werden, um die Position des Lichtstrahls zu bestimmen.

Der auf das Objekt projizierte Laserstrahl besitzt eine bestimmte Breite; darüber hinaus kann die Aufweitung des Laserstrahls ungleichmäßig erfolgen. Sowohl der Laser als

auch die Kamera sind auf einer Entfernungsebene scharf eingestellt; davor bzw. dahinter wird das Objekt unscharf abgebildet. Weiterhin hat die Oberfläche der Objekte einen entscheidenden Einfluss auf die Streuung des Signals: Je matter die Oberfläche, desto kleiner sind die Streuungen auf der Objektoberfläche. Aus diesen Gründen wird der Laserstrahl mit unterschiedlichen Intensitäten abgebildet. Zur Bestimmung der eindeutigen Position der Lasers wird ein Schwellwert bestimmt. Die Größe des Schwellwertes wird vom Programm in Abhängigkeit von den gemessenen Helligkeitswerten festgelegt. Pixel, deren Intensität oberhalb dieser Schwelle liegen, werden zusammengefasst; der entsprechende Mittelwert gibt die Mitte des Laserstrahls an. Das gesamte digitale Bild wird entsprechend verarbeitet, so dass die x -Position und die y -Position des Laserstrahls und somit der Profilschnitt des Objektes bestimmt werden können. Eine ähnliche Vorgehensweise wird auch in /HAN96/ und /FER97/ beschrieben. Der Profilschnitt des abgetasteten Objektes kann somit als Abbildung in einem Diagramm ausgegeben werden, vgl. **Bild 7.5**.

Da die geometrischen Bedingungen (Abstände und Winkel) während der Messungen konstant bleiben, bewirkt eine Höhenänderung auf dem Objekt eine Änderung des Abbildes auf dem Sensor der Kamera /LIN98/. **Bild 7.1** zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau der Einrichtung zur Vermessung von Faserformprodukten. Rechts im **Bild 7.1** ist die Reflexion des Lasers auf dem Objekt (Faserformschiene) zu erkennen.

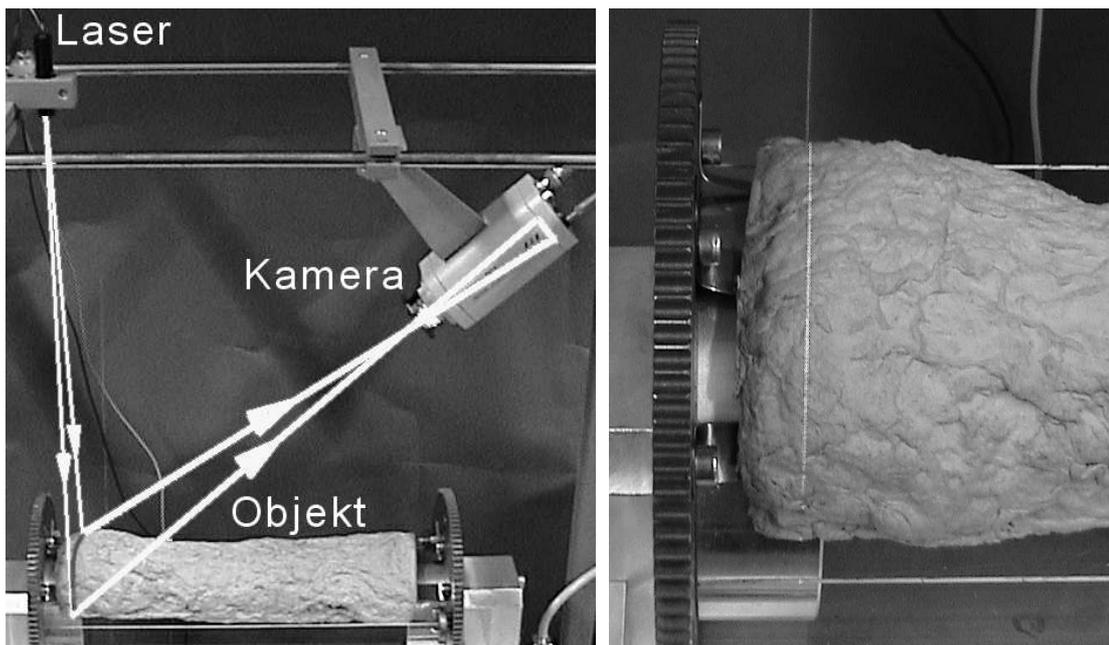


Bild 7.1: Versuchsaufbau zur Ermittlung von Geometriedaten für Faserformprodukte

Der Winkel zwischen der Kamera und der Lichtquelle (Triangulationswinkel) stellt eine Art „Messkeil“ dar. Bei sehr großen Winkeln kann es, insbesondere bei unebenen Objekten, in manchen Bereichen zu Abschattungen kommen. **Bild 7.2** zeigt eine Aufnahme aus der Blickrichtung der Kamera. Im **Bild 7.2** sind links die Bereiche der Abschattung kenntlich gemacht. Das rechte Bild zeigt den reflektierten Lichtstrahl an der Objektoberfläche, nachdem das Fremdlicht minimiert und die Einstellung der Kamera entsprechend verändert wurden, um eine scharfe Abbildung des Lichtstrahls zu ermöglichen. Die deutlich erkennbaren Unterbrechungen der Lichtlinie sind Folgen der Abschattung.

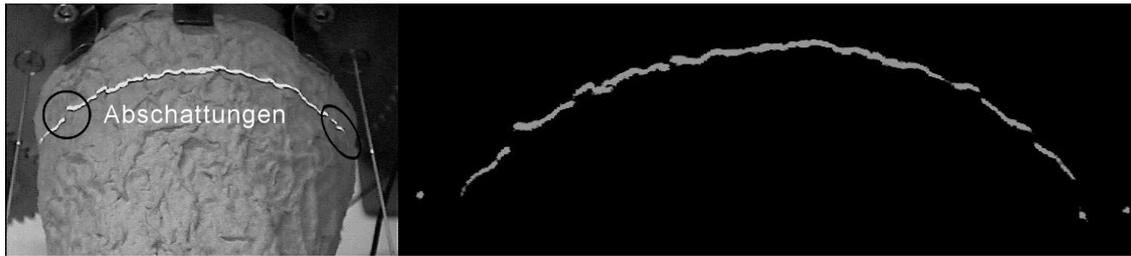


Bild 7.2: Abschattungseffekte aus Sicht der Kamera

Die vollständige Erfassung der Objektpunkte ist nur möglich, wenn sich die Achsen der Lichtquelle und der Kamera schneiden. Eine Verringerung des Triangulationswinkels mindert zwar die Abschattungseffekte, verschlechtert aber die Tiefenauflösung /LIN98/, /BRE93/. Gemäß /DIM02/ liegt der Triangulationswinkel im Allgemeinen zwischen 15° und 40° .

Zur vollständigen Erfassung der Geometrie müssen die Faserformprodukte von beiden Seiten vermessen werden. Daher werden die Produkte in eine Drehvorrichtung eingespannt. **Bild 7.3** zeigt diese Drehvorrichtung, die auf einer Linearführung aufgebaut ist. In die Drehvorrichtung kann ein Adapter zur Aufnahme von rechteckigen Prüfkörpern eingespannt werden. Auf einer seitlichen Welle sind zwei Ritzel befestigt, die jeweils mit einem Zahnrad der Einspannung im Eingriff stehen. Durch die Drehung der Ritzelwelle kann das Messobjekt um 180° gedreht werden. Zur anschließenden Festlegung befinden sich in den Zahnrädern Bohrungen, in die Rastbolzen einrasten.

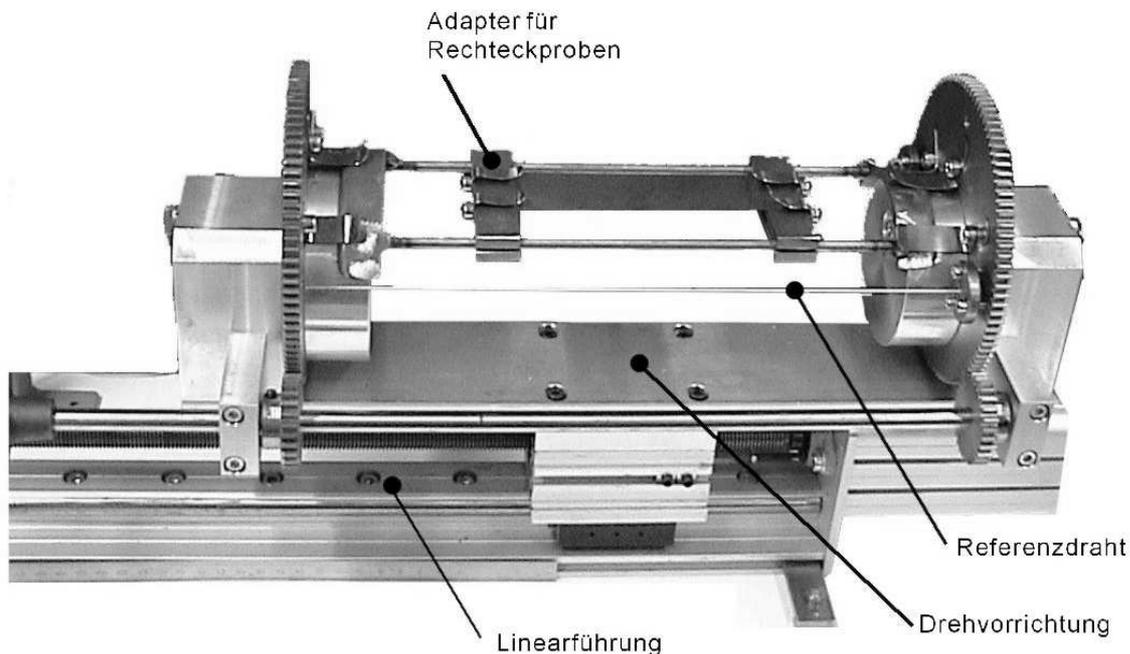


Bild 7.3: Drehvorrichtung

Bild 7.4 zeigt die Faserformschiene um 180° gedreht; wiederum wird das Objekt aus Sicht der Kamera betrachtet. Im Gegensatz zu **Bild 7.2** sind hier keine Abschattungen vorhanden. Auf beiden Bildern sind rechts bzw. links deutlich die Referenzdrähte zu erkennen. Die Drähte sind erforderlich, damit die Geometrien bei der weiteren Verarbeitung eindeutig wieder zusammengefügt werden können.



Bild 7.4: Messobjekt um 180° gedreht, aus Sicht der Kamera

Abhängig vom Abstand des Messpunktes zum Sensor der Kamera werden den entsprechenden Bildpunkten Höhenkoordinaten zugeordnet. **Bild 7.5** zeigt die beiden Messkurven in einer gemeinsamen Darstellung. Die untere Linie muss für die weitere Verarbeitung um 180° gedreht werden. Rechts bzw. links in **Bild 7.5** sind die Referenzdrähte abgebildet; die Drähte liegen bei beiden Messungen sehr genau übereinander. Die obere, konvex dargestellte Linie zeigt die Abbildung der unstrukturierten Außenseite der Faserformschiene; auch hier sind die Fehlstellen zu erkennen, die aufgrund der Abschattung entstanden sind.

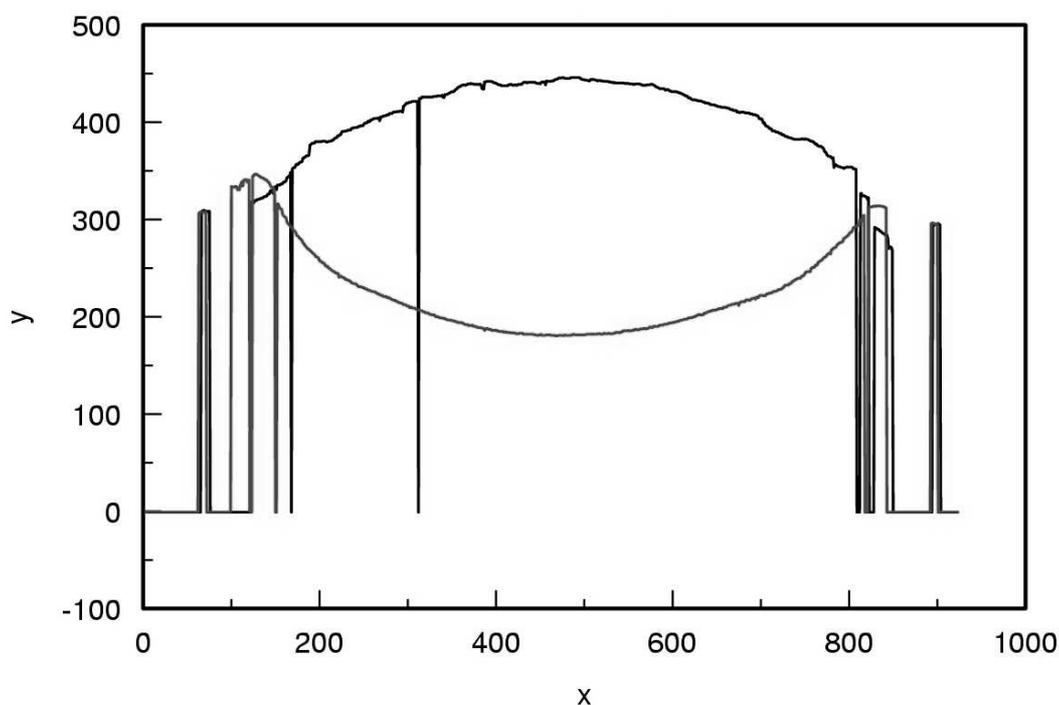


Bild 7.5: Abbildung der Faserformschiene

Bei der Weiterverarbeitung dieser Informationen muss folgendes berücksichtigt werden: Die konkave untere Abbildung der Innenseite der Faserformschiene muss um den Mittelpunkt um 180° gedreht werden, damit der Profilschnitt der Schiene erzeugt werden kann. Darüber hinaus wird das Objekt nicht in seiner wahren Größe abgebildet, da die Kamera den Profilschnitt nicht projektionsgerecht betrachtet. Die Messwerte sind somit gegenüber dem realen Objekt verzerrt. Folglich müssen die Messwerte entsprechend der Verzerrung korrigiert werden. Zur Bestimmung der entsprechenden Korrekturfaktoren wird ein geeigneter Kalibrierkörper, dessen Abmessungen bekannt sind, in die Messeinrichtung eingelegt. Im Folgenden wird nun die Kalibrierung der Messeinrichtung beschrieben.

7.1.2 Kalibrierung der Messeinrichtung

Die Geometrie des Messobjektes wird nicht in der wahren Größe des Objektes erfasst, da die Abbildungsoptik nicht normal zur Beleuchtungsachse (Projektionsebene) des Messobjektes steht, sondern verfahrensbedingt unter einem Triangulationswinkel geneigt ist. Die Verzerrung ist abhängig von der Objektbrennweite, dem Basisabstand, dem Triangulationswinkel sowie von den Verzerrungsparametern des Objektivs /HAN96/. Sowohl in /LIN98/ als auch in /HAN96/ werden für die Umrechnung der Bildkoordinaten in Objektkoordinaten Kalibrierverfahren empfohlen. Eine Kalibrierung der internen und externen Kameraparameter wird als sehr aufwändig und indirekt /HAN96/ beschrieben; denn bei der Bestimmung der internen Kameraparameter sind ebenfalls erst Kalibrierungsmessungen /HAN96/ erforderlich. Darüber hinaus müssen die externen Kameraparameter bestimmt werden. Hierzu gehören der Triangulationswinkel, die Basislänge sowie die Lage der Laserebene. In /HAN96/ wird zur Kalibrierung ein zickzackförmiger (bzw. faltenbalgartiger) Körper verwendet; in den Eckpunkten des zickzackförmigen Kalibrierkörpers können die Pixelkoordinaten den Koordinaten des Kalibrierkörpers eindeutig zugeordnet werden. Die Pixel, die in den geraden Bereichen liegen, werden linear auf den entsprechenden Kalibrierkörper verteilt. Die Auswahl eines derartigen gewählten Kalibrierkörpers sei vorteilhaft, da keine Abschattungen auftreten /HAN96/. Über den Messbereich wird jeder Bildpunkt einer Raumkoordinate zugeordnet. In einer sogenannten Lookup-table wird die entsprechende Zuordnung gespeichert; für jede Messung kann hier die entsprechende Koordinate ermittelt werden.

/FER97/ verwendet einen ebenen Kalibrierkörper aus Sperrholz, der mit entsprechenden lichtabsorbierenden Marken beklebt ist. /FER97/ hält die Kalibrierung für eine benötigte Genauigkeit von ca. 1 bis 2 mm für präzise genug. Die entsprechende Zuordnung der Koordinaten erfolgt hier ebenfalls über eine entsprechende Zuordnungstabelle (Lookup-table).

Kalibrierung der Messeinrichtung

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Kalibrierung ebenfalls an der gesamten Messeinrichtung mit Hilfe eines geeigneten Kalibrierkörpers erfolgen. Da die Abmessungen des Kalibrierkörpers bekannt sind, kann eine Umrechnung der Bildkoordinaten in Objektkoordinaten erfolgen. Als Kalibrierkörper wird eine mit Millimeterpapier beklebte Holzplatte verwendet, die definierte Referenzpunkte (Stecknadeln bzw. Nägel) aufweist. Das Millimeterpapier dient dabei zur Orientierung und Platzierung der Referenzpunkte. Die Referenzpunkte müssen einerseits im relevanten Messbereich angeordnet werden, und andererseits dürfen die Referenzpunkte untereinander keine Abschattung zur Folge haben. Aus diesen Gründen werden die Referenzpunkte versetzt angeordnet. **Bild 7.6** zeigt den verwendeten Kalibrierkörper mit den entsprechend angeordneten Referenzpunkten. Zur Aufnahme des Kalibrierkörpers in der Messeinrichtung wird er auf einem Prisma festgespannt, das Prisma wird entsprechend in die Vorrichtung gestellt. **Bild 7.7** zeigt die Anordnung innerhalb der Messeinrichtung.

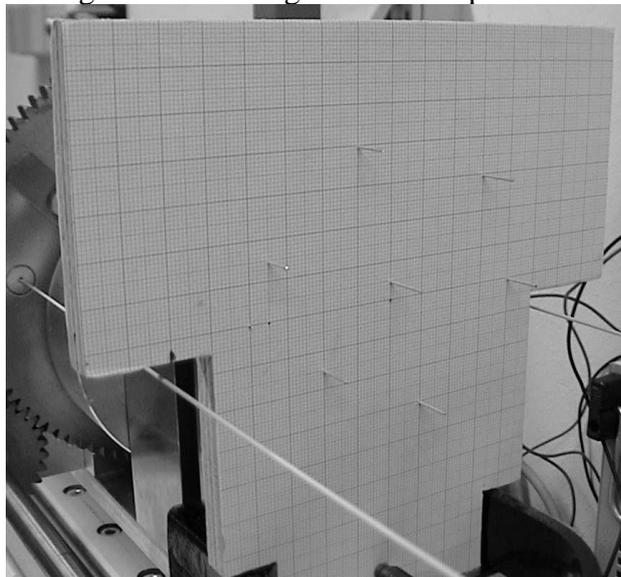


Bild 7.6 Kalibrierkörper

Zunächst wird der Laser senkrecht zu den Referenzdrähten bzw. -punkten ausgerichtet. Als nächstes wird die Kamera horizontal ausgerichtet, bis die beiden Referenzdrähte in einer Ebene abgebildet werden. Dies kann durch entsprechende Messungen und Überprüfung der Lage der Pixel ermittelt werden. Danach wird der mittlere Referenzpunkt in die Bildmitte der Kamera gelegt, und zwar sowohl in der Höhe als auch in der Breite. Dies wird ebenfalls durch mehrmaliges Messen und Ausrichtung des Kalibrierkörpers innerhalb der Messanordnung erreicht.

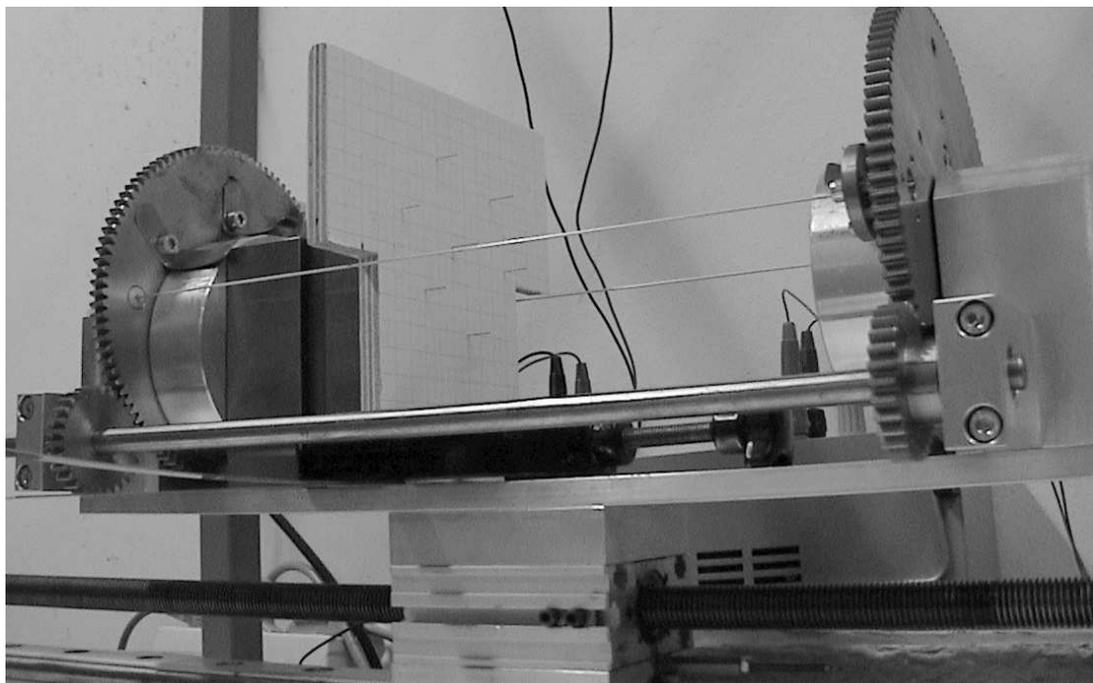


Bild 7.7 Kalibrieranordnung in der Messeinrichtung

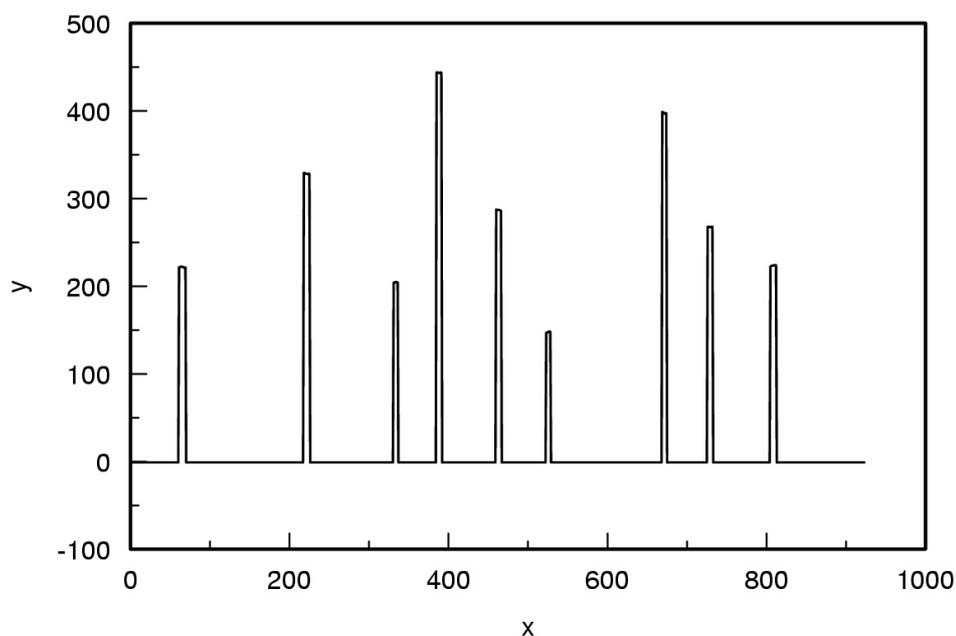


Bild 7.8 Abbildung der Kalibriermessung

Nachdem die Anordnung im Rahmen der Toleranzen ausgerichtet ist, wird die Kalibriermessung durchgeführt, die zur Ermittlung der Bildkoordinaten dienen soll. Hierzu wird das Fremdlicht soweit wie möglich minimiert und die Einstellung der Kamera ent-

sprechend verändert, um eine scharfe Abbildung des Lichtstrahls zu bekommen. **Bild 7.8** zeigt die Abbildung der Kalibriermessung, dabei sind rechts und links die Referenzdrähte mit den gleichen Höhenkoordinaten abgebildet. Die anderen Referenzpunkte werden in unterschiedlichen Höhen abgebildet. Der fünfte Referenzpunkt wird in der Mitte des Messbereiches abgebildet, weiterhin zeigt das Bild eine gute Abbildung des Kalibrierkörpers ohne weitere Störeffekte, Abschattungen o. ä.

Zur möglichst exakten Bestimmung der Objektkoordinaten, d. h. zur Festlegung der Referenzpunkte auf dem Kalibrierkörper, werden diese auf einer Koordinatenmessmaschine vermessen. Hierdurch wird ein Fehler, der bei der Umrechnung der Bildkoordinaten in die realen Objektkoordinaten auftreten kann, so weit wie möglich minimiert. Die Koordinaten der Referenzpunkte werden dabei auf den in Bildmitte befindlichen Referenzpunkt (Nullpunkt) bezogen. **Bild 7.9** (links) zeigt den Kalibrierkörper aus der Sicht der Kamera, darüber hinaus sind die gemessenen Koordinaten bezogen auf den Nullpunkt angegeben. **Bild 7.9** (rechts) zeigt den Kalibrierkörper bei der Vermessung mit der Koordinatenmessmaschine.

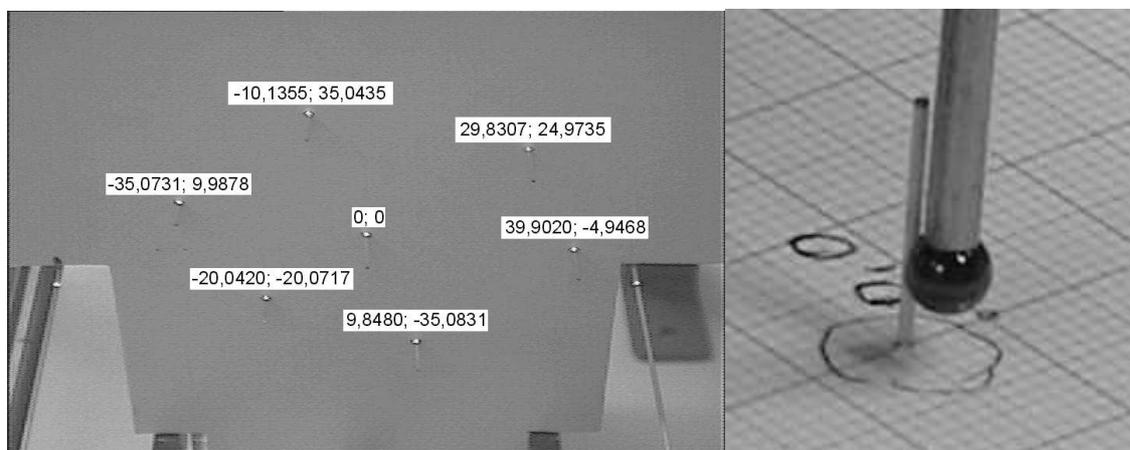


Bild 7.9 Kalibrierkörper mit Objektkoordinaten aus Sicht der Kamera (links); Vermessung (rechts)

Bisher liegen die Bild- und realen Objektkoordinaten vor. Im nächsten Schritt muss ein mathematisches Modell geschaffen werden, das die Umrechnung der Bild- in reale Objektkoordinaten ermöglicht. Als mathematischer Ansatz wird dabei zunächst das Kameramodell der Lochkamera betrachtet.

Kameramodell

Zur Umwandlung der Bildkoordinaten in Objektkoordinaten wird das mathematische Modell einer Lochkamera genutzt. Dies soll allerdings nicht zur Bestimmung der tatsächlichen Kameraparameter genutzt werden, sondern dient lediglich zur Ermittlung theoretischer Parameter eines idealen Kameramodells. Dieses Modell berücksichtigt allerdings keine Abbildungsfehler der Linsen sowie weitere Fehlerquellen. Ansonsten sind mit vertretbarem Aufwand die Zusammenhänge nicht zu erfassen, daher werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen: Die Kamera wird als sogenannte Lochkamera angenommen; d. h. alle Strahlen werden vom Objekt durch den Mittelpunkt der Linse („Loch“) geradlinig auf die Bildebene geleitet. Darüber hinaus wird angenommen, dass der CCD-Sensor senkrecht auf dem Mittelstrahl steht, d. h. dass eventuelle Schiefstellungen im ersten Schritt noch nicht berücksichtigt werden. Als zunächst unbekannte Parameter verbleiben die nachfolgenden drei Größen:

- a = Abstand vom CCD-Sensor bis zur Linse
- b = Abstand von der Linse bis zum Schnittpunkt des Mittelstrahls mit der Objektebene
- α = Triangulationswinkel (Winkel zwischen der Lichtquelle und einer Abbildungsoptik, z. B. Kamera), gemessen zwischen Mittelstrahl und Objektebene

Bild 7.10 zeigt die geometrischen Beziehungen zwischen dem Objekt und der Abbildung auf dem CCD-Bildsensor. Darüber hinaus sind alle verwendeten Parameter bzw. Größen, die in den folgenden geometrischen Beziehungen bzw. in den Formeln Verwendung finden, dargestellt. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf den Mittelstrahl.

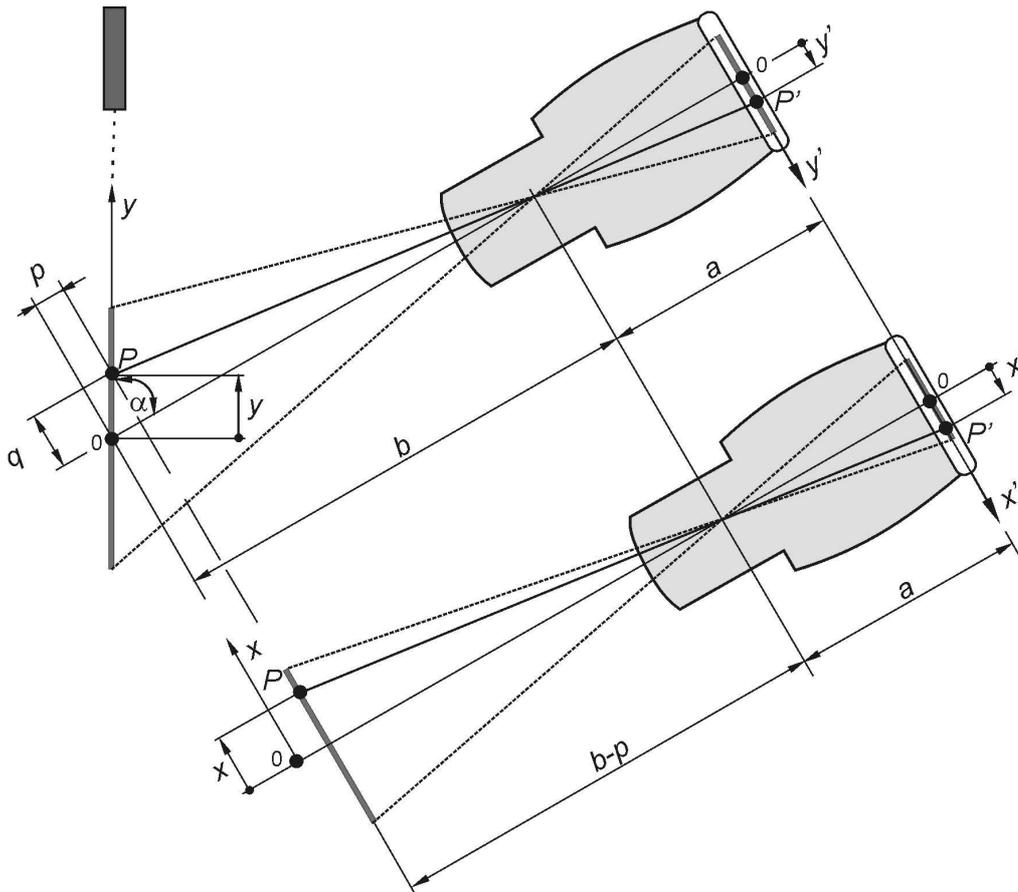


Bild 7.10 Geometrische Beziehungen zwischen dem Objekt und dem CCD-Bildsensor

Zunächst wird mittels des theoretischen Modells untersucht, mit welchen geometrischen Beziehungen von der Abbildung des Objekts auf dem CCD-Sensor bzw. von den daraus ermittelten Messwerten auf das reale Objekt selbst zurückgeschlossen werden kann. Im Folgenden werden die geometrischen Beziehungen bezüglich der dargestellten y -Achse betrachtet („Vorderansicht“). Die entsprechende Koordinate y' wird gemäß **Bild 7.10** angenommen. Nach dem Strahlensatz gilt für den beliebigen Punkt P :

$$\frac{q}{y'} = \frac{b-p}{a} \quad \Rightarrow \quad y' = \frac{a \cdot q}{b-p}$$

Mit Einführung des Triangulationswinkels α , der zwischen dem Mittelstrahl und der Objektebene gemessen wird, gilt:

$$p = y \cdot \cos \alpha \quad \text{und} \quad q = y \cdot \sin \alpha$$

$$y' = \frac{a \cdot y \cdot \sin \alpha}{b - y \cdot \cos \alpha} \quad \Rightarrow \quad \boxed{y = \frac{b \cdot y'}{a \cdot \sin \alpha + y' \cdot \cos \alpha}}$$

Im nächsten Schritt wird die x -Achse untersucht („Draufsicht“). Es gilt:

$$\frac{x'}{x} = \frac{a}{b - p} \quad \text{mit } p = y \cdot \cos \alpha$$

$$x' = x \cdot \frac{a}{b - y \cdot \cos \alpha} \quad x = x' \cdot \frac{(b - y \cdot \cos \alpha)}{a}$$

Einsetzen von y in die Gleichung ergibt:

$$x = x' \cdot \frac{b - \left(\frac{b \cdot y'}{a \cdot \sin \alpha + y' \cdot \cos \alpha} \right) \cdot \cos \alpha}{a} \quad \Rightarrow \quad \boxed{x = x' \cdot \frac{b}{a} \cdot \left(1 - \frac{y'}{a \cdot \tan \alpha + y'} \right)}$$

Damit sind die Abbildungsgleichungen für die x -Achse und die y -Achse gefunden. Durch die Kalibriermessung sind sowohl die Bildkoordinaten „ (y', x') “ als auch die dazugehörigen realen Objektkoordinaten „ (y, x) “ bekannt. Mit Hilfe dieser Koordinaten können die freien Parameter (a, b, α) der Abbildungsgleichung numerisch optimiert werden, bis die Summe der Fehlerquadrate in den Abweichungen von den realen Objektkoordinaten minimal wird. Die gefundene Lösung zeigt an einigen der Punkte Abweichungen in einer Größenordnung von ca. 0,3 mm, die nicht akzeptiert werden können. Aus diesem Grunde wird nach der numerischen Optimierung der drei Parameter eine rotatorische Koordinatentransformation durchgeführt, wobei auch der Rotationswinkel numerisch so bestimmt wird, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal ist. Hierdurch werden Fehler kompensiert, die dadurch entstehen, dass der Sensor der Kamera um die Mittelachse verdreht ist. Dieser Drehwinkel wird als vierter Parameter in der Umrechnung der Bildkoordinaten auf die Objektkoordinaten berücksichtigt.

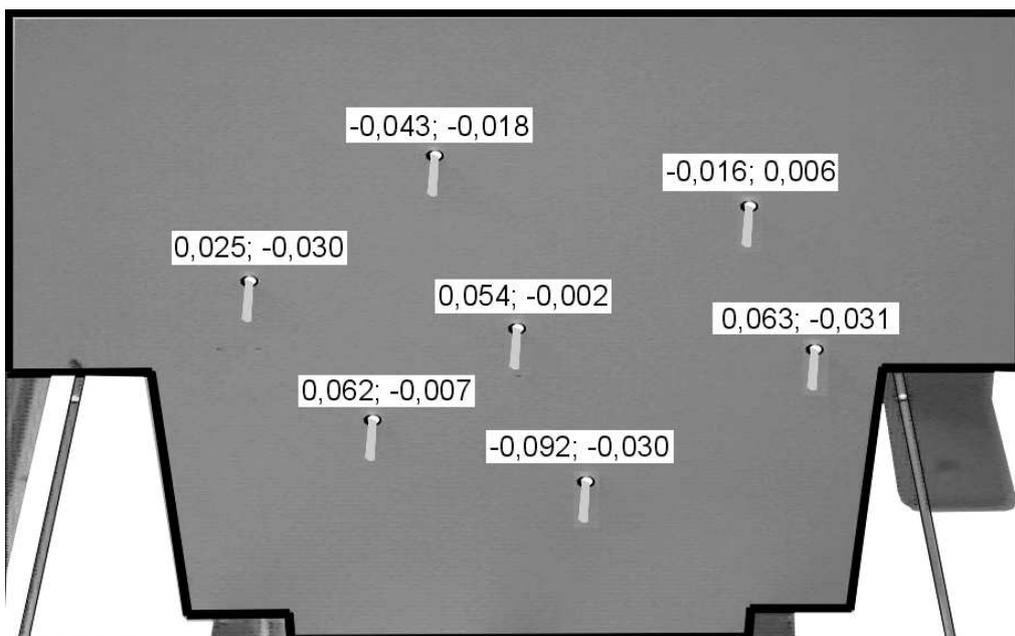


Bild 7.11 Messwertabweichungen der Referenzpunkte von den berechneten Objektkoordinaten

Mit den entsprechenden Abbildungsgleichungen und der Transformation können die ermittelten („gescannten“) Bildkoordinaten nun in reale Objektkoordinaten umgerechnet werden. Die noch bestehenden Abweichungen sind durch geometrische Fehler der Linse o. ä. bedingt und können mit vertretbarem Aufwand nicht mehr kompensiert werden. In **Bild 7.11** sind die Abweichungen der am realen Kalibrierkörper mittels Koordinatenmessmaschine gemessenen Referenzpunkte von den mittels des Scanners ermittelten und berechneten Objektkoordinaten dargestellt. Die Zahlenwerte geben an, um welchen Betrag in Millimetern jeweils die x - und y -Koordinaten abweichen.

Überprüfung der Genauigkeit

Zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit von Messergebnissen wird der bereits beschriebene Kalibrierkörper, **Bild 7.6**, dreimal nacheinander auf die Messeinrichtung aufgesetzt und gescannt. Durch die manuelle und nicht zentrierte Montage des Kalibrierkörpers wird gewährleistet, dass eine Position der Kalibrierpunkte vorliegt, die von der Kalibrierung selbst abweicht (translatorische und rotatorische Abweichungen). Auf diese Weise werden also drei beliebige Messungen simuliert.

Zur Auswertung der Werte wird für jede Messreihe der Abstand der einzelnen Kalibrierpunkte vom mittleren Punkt berechnet, indem die Differenz der jeweiligen X - und Y -Koordinaten gebildet und deren Diagonale berechnet wird. Von diesem Punktabstand wird der Abstand subtrahiert, der aus den mittels Koordinatenmessmaschine gemessenen Werten berechnet wird. Das Ergebnis ist der Fehler, um den die Messwerte streuen. Die drei Messungen haben die in **Bild 7.12** dargestellten Werte ergeben:

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4 (Mittelpunkt)	Punkt 5	Punkt 6	Punkt 7
Messung 1	0,121	0,043	0,333	0	-0,006	-0,005	0,162
Messung 2	-0,206	-0,019	0,055	0	0,009	-0,127	0,018
Messung 3	-0,065	-0,115	0,055	0	0,053	0,009	0,018

Bild 7.12 Messwertabweichungen der drei Kontrollmessungen

Es ist erkennbar, dass die Fehler in der Regel im Bereich von 0,1 mm liegen und teilweise deutlich darunter; nur bei zwei Messwerten liegen höhere Abweichungen vor.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit Hilfe des idealisierten Kameramodells und dessen mathematischer Betrachtung wird eine maximale Abweichung in der Diagonalen von 0,333 mm erreicht, bei den meisten Messwerten liegt der Fehler noch deutlich darunter. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Fehler aus den Abweichungen in der x - und in der y -Koordinate ergeben, so dass das Versuchsergebnis erstaunliche hohe Genauigkeiten liefert.

Somit ist die Funktionsfähigkeit nachgewiesen und die Genauigkeit dieser Messeinrichtung ermittelt. Für die Bestimmung der Geometrie der Faserformschiene ist die Genauigkeit hinreichend. Allerdings wird die Abweichung bei der Bestimmung der Flachproben einen größeren Einfluss nehmen, da bei der Bestimmung des Widerstandsmoments und des Flächenmoments 2. Grades die Materialstärke bzw. Höhe des Probenkörpers in der zweiten bzw. dritten Potenz in die Berechnung einfließt. Die Lage des Schwerpunktes befindet sich bei den Flachproben in Höhe der halben Materialstärke; somit ist der

Steineranteil gleich Null. **Bild 7.13** zeigt die Beeinflussung des Flächenmoments 2. Grades und des Widerstandsmoments durch Messfehler in der Größe von $\pm 0,1$ mm. Wird ein Fehler von etwa 15% bei der Ermittlung des Flächenträgheitsmoments und damit des Elastizitätsmoduls sowie von etwa 10% beim Widerstandsmoment, d. h. bei der Bestimmung der Festigkeit, akzeptiert, so kann das Messverfahren für Proben oberhalb von 2 mm Wandstärke sinnvoll eingesetzt werden, während es unterhalb dieser Materialstärke nur wenig brauchbar erscheint.

Probendicke Istmaß	Abweichung +0,1 mm		Abweichung -0,1 mm	
	Flächenmoment 2. Grades I	Widerstandsmoment W_b	Flächenmoment 2. Grades I	Widerstandsmoment W_b
1 mm	+33,1%	+21,0%	-27,1%	-19,0%
2 mm	+15,8%	+10,3%	-14,3%	-9,7%
3 mm	+10,3%	+6,8%	-9,7%	-6,6%
4 mm	+7,7%	+5,1%	-7,3%	-4,9%
5 mm	+6,1%	+4,0%	-5,9%	-4,0%

Bild 7.13 Prozentuale Abweichung des Flächenmoments 2. Grades und des Widerstandsmoments

Folglich kann die Faserformschiene mit Hilfe dieser Messeinrichtung vermessen werden. Allerdings ist dieses nur sinnvoll, wenn die Materialstärke größer als 2 mm ist. Bei allen anderen Flachproben ist es aufgrund der erreichten Genauigkeit erforderlich, die Prüfkörper mit einer Bügelmessschraube zu vermessen, z. B. an drei um 120° versetzten Punkten.

Kritische Beurteilung der Funktionalität (Probleme und Störfaktoren)

Die erreichte Genauigkeit gilt lediglich für die Bedingungen und Einstellungen, die bei der Kalibriermessung vorgelegen haben. Falls wesentliche Änderungen an der Messeinrichtung vorgenommen werden, muss die Kalibrierung erneut durchgeführt werden.

Kamera

Die eingesetzte Kamera besitzt einen CCD-Bildsensor, der in horizontaler Richtung 512 Pixel (Spalten) und in vertikaler Richtung 582 Pixel (Zeilen) aufweist. In vertikaler Richtung wird mit Hilfe des Auswertprogramms und der Schwellwertbildung die Lage der Pixel exakter bestimmt; in horizontaler Richtung wird dagegen kein Auswertalgorithmus verwendet. Folglich wird die von der Kamera aufgenommene Bildbreite von ca. 150 mm auf den Bildsensor auf 512 Pixel verteilt; dies entspricht einer Auflösung von einem Pixel bei 0,29 mm am Objekt. Durch Interpolation werden jedoch Zwischenwerte gebildet, so dass die Auflösung entsprechend erhöht werden kann.

Weitere Fehler und somit Einbußen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit können durch mögliche Einbaufehler des Bildsensors hervorgerufen werden. Durch den winkligen Versatz oder nicht mittige Anordnung des Sensors kann es zu Abbildungsfehlern kommen. Darüber hinaus kann der Sensor Herstellungsfehler aufweisen, so dass die Bildzellen unterschiedlich lichtempfindlich sind.

Abbildungsfehler können weiterhin durch die eingesetzte Linse entstehen. Ursachen hierfür sind z. B. Fertigungs- und Montagetoleranzen. Das abgebildete Bild kann abhängig von den Linsen und eingesetzten Blenden Verzerrungen im Randbereich aufweisen. Die Verzerrungen werden als kissenförmig bezeichnet, wenn sie im Randbereich

auseinandergezogen sind, und als tonnenförmig, wenn die Randbereiche zusammengezogene Verzerrungen aufweisen. Eine Abbildung ohne Verzerrungen ist nur durch die Verwendung von orthoskopischen Objektiven möglich; hierbei handelt es sich um Linsensysteme, die aus mindestens zwei Linsen bestehen /MAT72/.

Beleuchtung

Die jeweilige Beleuchtung des Objektes durch den Laser spielt eine weitere Rolle bei der erzielten Genauigkeit. Dabei haben sowohl die eigentliche Reflexion des Lichtstrahls als auch die Ausleuchtung (Helligkeit) des Raumes eine entscheidende Bedeutung. Abhängig von der Reflexion des Lichtstrahls auf dem zu vermessenden Objekt und vom vorhandenen Fremdlicht beeinflussen die gewählten Kameraeinstellungen (Helligkeit, Kontrast usw.) das erreichte Resultat.

Unter Berücksichtigung der beschriebenen Störfaktoren stellt die erreichte Messgenauigkeit in jeder Hinsicht ein sehr gutes Ergebnis dar.

7.2 Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung für Flachproben

Die Ermittlung der zulässigen Belastungen soll mittels geeigneter Prüfeinrichtung erfolgen. Aus den experimentell ermittelten Belastungen und den Geometriedaten der jeweiligen Prüfkörper wird die Grenzspannung des eingesetzten Werkstoffes berechnet. Der Elastizitätsmodul kann aus den gemessenen Verformungen unter Berücksichtigung der Biegelinie und der jeweiligen Geometriedaten des Prüfkörpers berechnet werden.

Mit Hilfe der im folgenden beschriebenen Biegeprüfvorrichtung sollen zunächst Flachproben mit rechteckigem Querschnitt geprüft werden. Dabei werden einerseits Prüfkörper untersucht, die aus bestehenden Faserformprodukten entnommen sind, und andererseits werden die Prüfkörper mit der vorhandenen Überdruckversuchsanlage selbst hergestellt. In einem Prüfbericht werden die Ergebnisse der Untersuchung sowie Angaben über den jeweiligen untersuchten Prüfkörper festgehalten. Zu den prüfkörper-spezifischen Angaben sollen nach Möglichkeit auch Angaben über die Herstellung und die Materialzusammensetzung der Proben gemacht werden. Dies ist bei den herkömmlichen Faserformprodukten nur beschränkt möglich.

Bei der Biegeprüfung der Faserformprodukte wird das Vierpunkt-Verfahren eingesetzt. Bei dem Vierpunkt-Verfahren wird die Probe an zwei Kraftangriffspunkten belastet. Folglich ist die Probe im Prüfquerschnitt querkraftfrei, aber mit einem konstanten Biegemoment über einen längeren Querschnitt belastet, siehe **Bild 6.3**. Allerdings ist die Versuchsanordnung so konzipiert, dass ohne Weiteres eine Umrüstung auf das einfachere Dreipunkt-Verfahren möglich ist. Dem Vorteil der weniger aufwändigen Versuchsanordnung stehen die Nachteile gegenüber, dass das maximale Biegemoment nur an der Lasteinleitungsstelle herrscht und dass der Prüfquerschnitt einer zusätzlichen Flächenpressung durch den Belastungsstempel ausgesetzt ist. Darüber hinaus wird das Prüfobjekt durch eine Querkraft belastet, die an der Kraftangriffsstelle undefiniert ist. Aus diesen genannten Gründen wird das Vierpunkt-Verfahren bevorzugt eingesetzt.

Versuchsaufbau

Die Biege-Versuchsanordnung besteht aus einer Linearführung mit Führungswagen, einer Antriebseinheit, einer Präzisionswaage mit RS232-Schnittstelle, einem induktiven Wegmesser und einem Computer (PC). **Bild 7.14** zeigt die Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung für rechteckige Faserformprodukte.

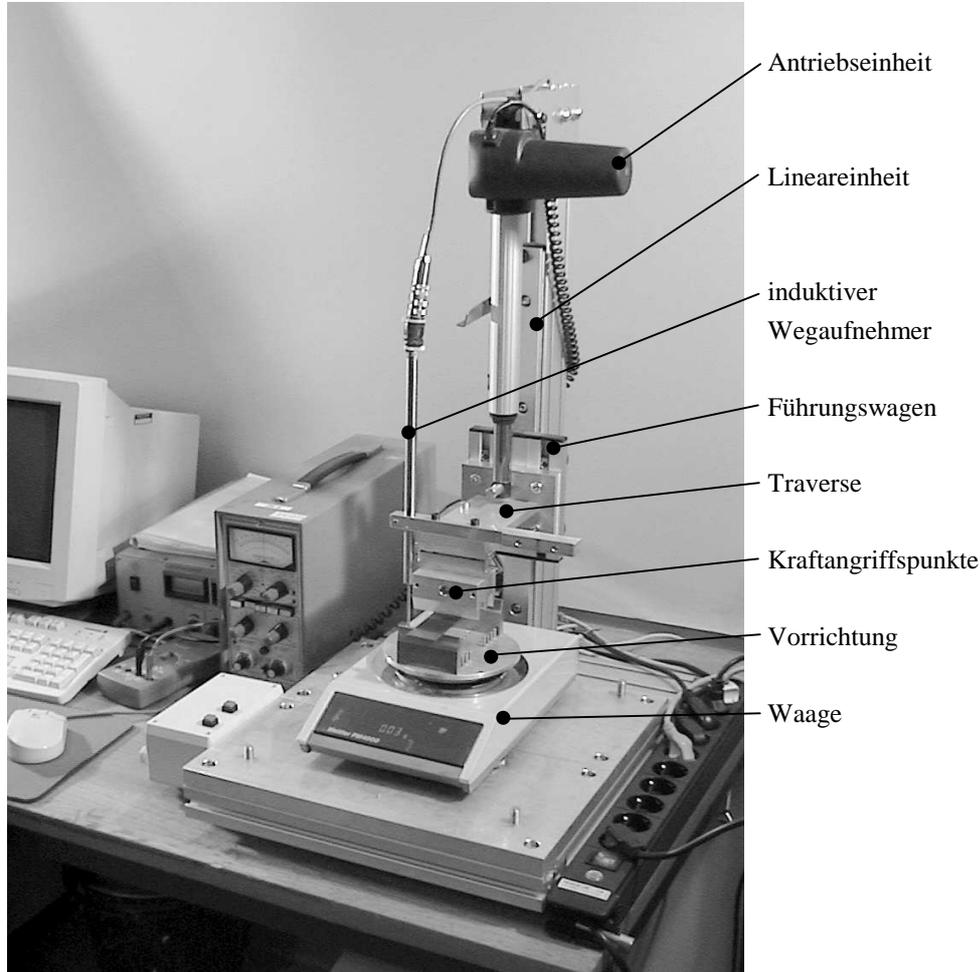


Bild 7.14: Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung

Die Antriebseinheit ist mit dem Führungswagen der Lineareinheit verbunden, auf dem eine Traverse mit drehbar gelagerten Kraftangriffspunkten befestigt ist. Beim Verfahren der Antriebseinheit wird somit die Belastung über die Kraftangriffspunkte auf den zu untersuchenden Prüfkörper aufgebracht. Mit Hilfe der Präzisionswaage werden die wirkenden Belastungen gemessen und über die RS232-Schnittstelle an den Computer (PC) übergeben. Auf der Präzisionswaage wird eine Vorrichtung zur Aufnahme der Prüfkörper aufgesetzt. Auf dieser Vorrichtung sind zwei Auflager montiert, deren maximaler Abstand $l = 120$ mm beträgt. Die Abstände der Auflager sind von $l = 120$ mm bis $l = 40$ mm in 10 mm-Schritten zu variieren, wobei $l = 40$ mm ggf. nur bei dem Dreipunkt-Verfahren verwendet werden kann, da der Abstand der Kraftangriffspunkte für das Vierpunktverfahren ebenfalls 40 mm beträgt.

Auf der Vorrichtung der Waage wird unten der bewegliche Teil des induktiven Wegaufnehmers befestigt. Das Gehäuse des Wegaufnehmers wird an der Traverse unmittelbar über den Kraftangriffsstellen befestigt. Somit kann der Verfahrensweg der Kraftangriffspunkte relativ zur Vorrichtung gemessen werden. Zur Ermittlung der Durchbiegung der Prüfkörper muss die Wegmessung von der Probenoberfläche an gemessen

werden. Hierbei handelt es sich allerdings nicht um die maximale Verformung des Prüfkörpers, denn diese tritt in der Probenmitte auf. Während des Prüfvorgangs wird die Gewichtskraft von der Präzisionswaage erfasst und der Verfahrweg bzw. damit die Durchbiegung des Prüfkörpers von einem Prüfprogramm aufgezeichnet.

Zur Steuerung der Biegeprüfeinrichtung wird auf dem Computer (PC) ein in Visual Basic erstelltes Prüfprogramm installiert. Mit Hilfe dieses Prüfprogramms kann der Prüfvorgang gestartet und beendet werden. Nach dem Start des Programms werden durch den Antrieb der Führungswagen und damit die Kraftangriffspunkte verfahren. Nachdem die Kräfteinleitungspunkte den Prüfkörper berühren, werden die Messwerte der Präzisionswaage mittels der RS232-Schnittstelle von dem Steuerungsprogramm aufgezeichnet. Die entsprechenden Weginformationen gelangen über eine Messkarte in den Computer (PC) und werden ebenfalls von dem Steuerungsprogramm verarbeitet.

Nach dem Bruch des Prüfkörpers oder nach hinreichender Verformung wird das Prüfprogramm beendet, und die Messwerte des Biegeversuchs können in einer Datei gespeichert werden. Durch diesen Biegeversuch sind somit das Biegemoment M_b und die jeweils dadurch hervorgerufene Durchbiegung f erfassbar.

Inbetriebnahme der Biegeprüfvorrichtung

Bei der Inbetriebnahme der Versuchsanordnung wird zunächst ein bekannter Werkstoff untersucht, um die Funktionsfähigkeit und Richtigkeit der Prüfeinrichtung zu überprüfen. Als Prüfkörper wird zunächst ein ebenes dünnes Blech aus Federstahl verwendet. **Bild 7.15** zeigt die Prüfeinrichtung und den für die Inbetriebnahme verwendeten Prüfkörper. Das eingesetzte Blech besitzt eine Breite von 33,3 mm und eine Höhe bzw. Materialstärke von 0,47 mm. Der Abstand der Auflager beträgt $l = 120$ mm, und der Abstand der Auflager zur jeweiligen Kraftangriffsstelle beträgt $a = 40$ mm.

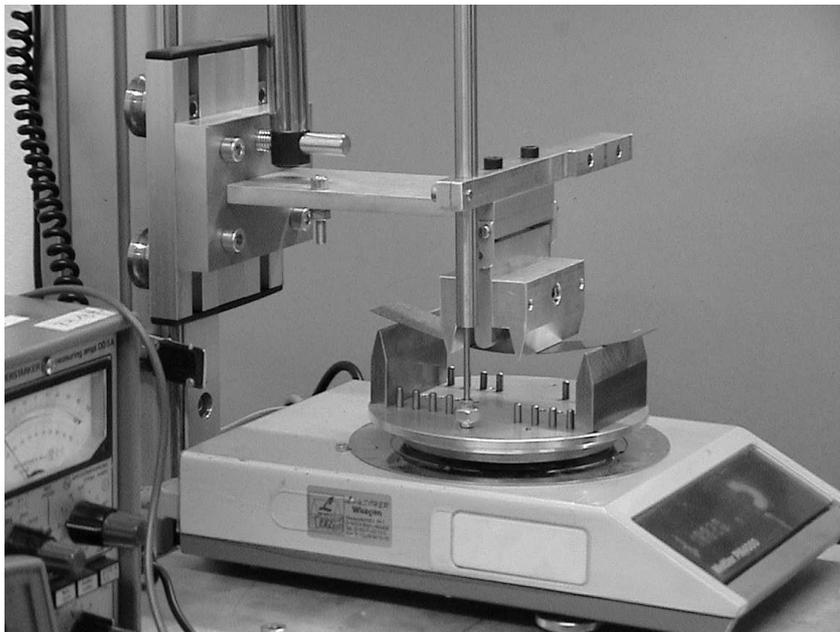


Bild 7.15: Inbetriebnahme der Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung

Das folgende Diagramm, **Bild 7.16**, zeigt, dass mit zunehmender Verformung der E-Modul sich immer weiter an den idealen Wert annähert.

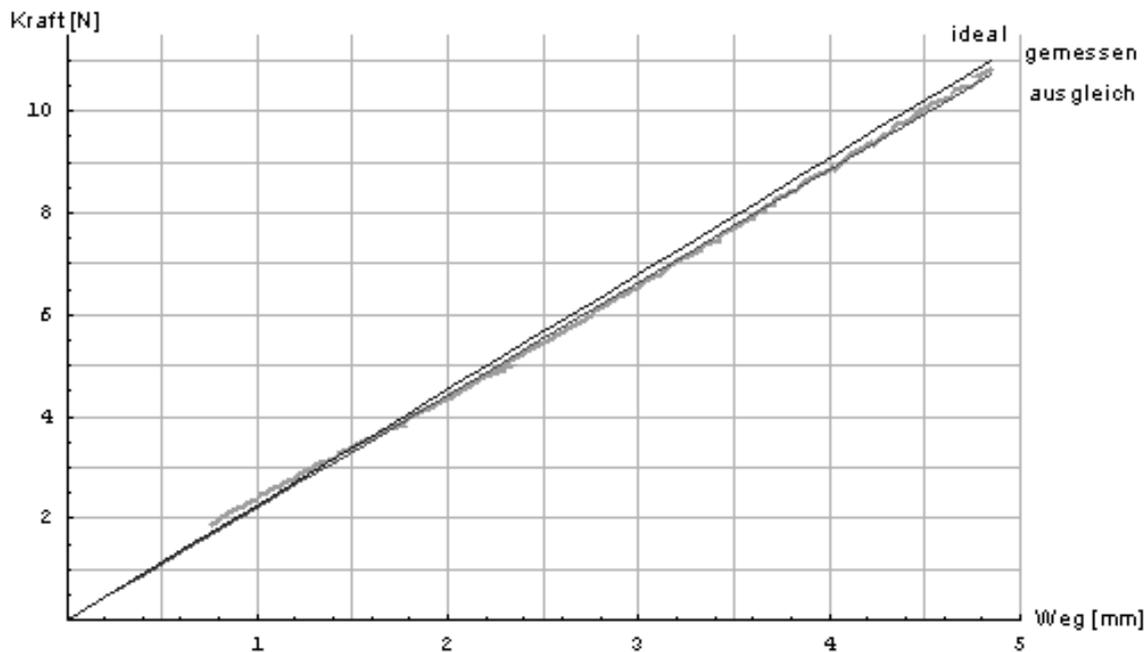


Bild 7.16: Darstellung des E-Moduls von Federstahl; ideale, gemessene sowie Ausgleichskurve

7.3 Vorrichtung zur Ermittlung des Pressverhaltens

Durch das Pressen der Faserformprodukte wird die Oberflächenbeschaffenheit verbessert. Dies ermöglicht das Bedrucken und Bekleben der Produkte. Darüber hinaus wird durch das Pressen das Fasermaterial stärker verdichtet. Die Verdichtung beeinflusst einerseits die Materialeigenschaften (engerer Faserverbund, geringere Lufteinschlüsse, höhere Festigkeit) und andererseits die Geometrie (kleinere Querschnittsform) der Faserformprodukte. Bei identischen Anformbedingungen verringert sich die Querschnittsfläche der gepressten Produkte gegenüber den ungepressten in Abhängigkeit von der Verdichtung (Pressdruck). Besitzt ein höher verdichtetes Produkt die gleiche Materialstärke wie ein unverdichtetes, so müssen andere Anformbedingungen vorgelegen haben. Zur Realisierung der gleichen Materialstärke muss beim gepressten Teil mehr Fasermaterial bei der Herstellung eingesetzt werden im Vergleich zum ungepressten. Dies könnte einerseits durch einen längeren Ansaugvorgang realisiert oder durch das ineinander Gautschen mehrerer Lagen erreicht werden. Beim Überdruckverfahren können größere Materialstärken durch mehrfache Anformvorgänge erzielt werden. Das Ergebnis wäre in jedem Fall ein Faserformteil mit besseren Werkstoffeigenschaften; dies hat allerdings eine Vergrößerung der Taktzeiten und eine Erhöhung des Rohstoffeinsatzes sowie eine Verteuerung der Teile zur Folge. Dabei werden die größten Kosten durch den zusätzlichen Bearbeitungsschritt und die hierfür benötigten Presswerkzeuge verursacht.

Bei der Ermittlung der Werkstoffeigenschaften muss dieser Einfluss des Pressens daher mit berücksichtigt werden, um zu gewährleisten, dass die ermittelten Werkstoffkennwerte vergleichbar sind. Da die Herkunft der untersuchten Faserformprodukte bzw. Prüfkörper nicht immer bekannt ist, sind somit auch keine Herstellungsparameter bekannt. Aus diesen Gründen soll durch den im Folgenden beschriebenen Versuchsaufbau das Verhalten der jeweiligen Prüfkörper beim Pressen ermittelt werden. Das Pressverhalten wird durch den jeweiligen Verdichtungsgrad und Rückverformungsgrad gekennzeichnet.

Mit Hilfe des Verdichtungsgrades ist es eventuell möglich, die Werkstoffe in unterschiedliche Werkstoffklassen einzuteilen, denn bei der Ermittlung des Verdichtungsgrades ist der Prüfkörper bei den vorliegenden Prüfverhältnissen maximal verdichtet. Somit sind alle Lufteinschlüsse o. ä. aus der Probe herausgepresst, und die ermittelte Probenhöhe $t_{p,p}$ spiegelt die Menge des eingesetzten Fasermaterials wider. Folglich ist der Verdichtungsgrad eine Kenngröße für die während des Herstellprozesses verwendete Fasermenge (Stoffdichte). Darüber hinaus gibt die Masse der Probe Aufschluss über die im Prüfkörper vorhandene Materialmenge und wird daher ebenfalls festgehalten.

Der Rückverformungsgrad ist eine Kenngröße für das elastische Verhalten des Werkstoffes; er gibt an, inwieweit sich der Prüfkörper nach dem Pressen bzw. Entlasten elastisch verformt. Zur Ermittlung des Rückverformungsgrades ist die Probenhöhe vor und nach dem Pressvorgang relevant.

Damit die Untersuchungen untereinander vergleichbar sind, ist es erforderlich, Prüfkörper mit definierten Abmessungen zu pressen. Damit darüber hinaus Rückschlüsse auf die im Biegeversuch ermittelten Ergebnisse möglich sind, muss aus den im Biegeversuch untersuchten Prüfkörpern eine Pressprobe entnommen werden. Vor dem Pressen wird die Probenhöhe t_0 an drei definierten Stellen gemessen. Hieraus wird jeweils der arithmetische Mittelwert $t_{0,arith}$ berechnet. Die Prüfkörper werden mit der im **Bild 7.17** abgebildeten hydraulischen Presse gepresst. Der Weg des Pressenstempels wird mit einem induktiven Wegmesser, und die jeweils aufgebrachte Presskraft wird über einen Druckaufnehmer gemessen. Kraft und Weg werden dabei über einen X-Y-Schreiber aufgezeichnet. Der Pressvorgang ist beendet, wenn die Kraft überproportional ansteigt, während der Verformungsweg sich praktisch nicht mehr verändert. Nach dem Pressen wird die Probenhöhe t_p wiederum an drei definierten Stellen gemessen, hieraus wird der arithmetische Mittelwert $t_{p,arith}$ berechnet. Darüber hinaus wird aus der Presskurve, siehe **Bild 7.18**, der Wert $t_{p,p}$ ermittelt.

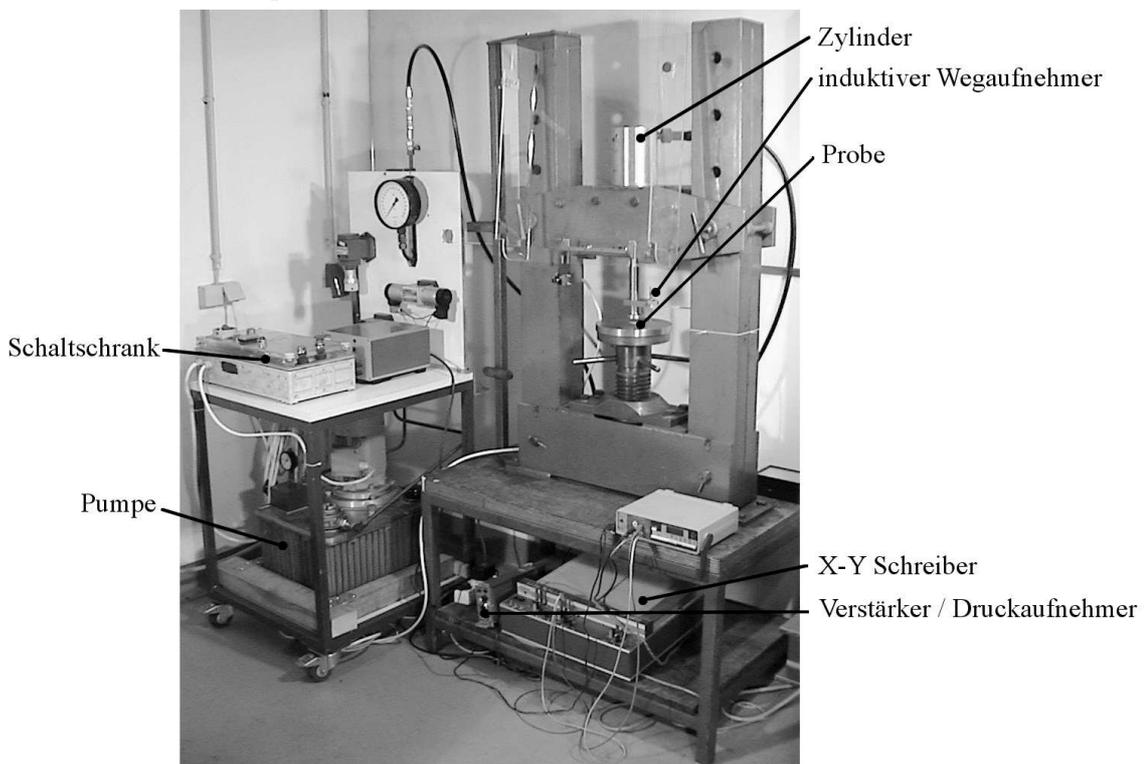


Bild 7.17: Hydraulische Presse

Prüfkörper, bei denen die Probenhöhe vor und nach der Pressprüfung unverändert ist, sind bereits im Herstellungsprozess zu 100 % bzw. maximal verdichtet worden. Folglich ist $t_{0\text{ arth}} = t_{pP} = t_{p\text{ arth}}$; die hieraus resultierende Presskurve ergibt eine senkrechte Linie. Der Verdichtungsgrad und der Rückverformungsgrad sind somit gleich eins ($\lambda_V = \lambda_R = 1$). Derartige Materialverhalten könnte z. B. mit der Güteklasse I definiert werden. Für alle Prüfkörper werden der Verdichtungsgrad λ_V und der Rückverformungsgrad λ_R wie folgt definiert:

$$\lambda_V = \frac{t_{pP}}{t_{0\text{ arth}}} \leq 1 \quad \lambda_R = \frac{t_{p\text{ arth}}}{t_{0\text{ arth}}} \leq 1$$

Inbetriebnahme der Presse

Für die Inbetriebnahme der Presse werden zunächst sechs Prüfkörper aus einem beliebigen Faserformprodukt herausgeschnitten. Die Prüfkörper weisen jeweils einen Durchmesser von 30 mm auf. Zur Simulation der unterschiedlichen Materialstärken werden zwei bzw. drei Prüfkörper übereinander zu einer Prüfprobe angeordnet. Zur Messung der Probenhöhe t_0 wird eine Bügelmessschraube verwendet. Aufgrund der unebenen Struktur der Proben werden diese an drei verschiedenen Punkten gemessen und hieraus der arithmetische Mittelwert $t_{0\text{ arth}}$ gebildet. Bei den Proben, die aus doppelt bzw. dreifach übereinander angeordneten Prüfkörpern bestehen, ist die Messung der Probenhöhe problematisch; es können sich hierbei Ungenauigkeiten ergeben. Im nächsten Schritt werden die drei Proben mit Hilfe der Presse gepresst. Das Ergebnis wird entsprechend auf dem X-Y-Schreiber dokumentiert.

Hierfür wird das Messsignal des induktiven Wegaufnehmers über einen Trägerfrequenzverstärker auf den x-Kanal des X-Y-Schreibers geleitet. Somit wird der Verfahrensweg der Presse auf der x-Achse gemessen. Auf den y-Kanal wird das Messsignal des Druckaufnehmers geleitet. Über die Kolbenfläche und den aufgetragenen Druck kann die Presskraft berechnet werden. Die Achsen des X-Y-Schreibers sind wie folgt kalibriert:

x-Achse: 30 mm Weg auf der x-Achse entspricht 0,5 mm Weg des Pressenstempels

y-Achse: 10 mm Weg auf der y-Achse entspricht einen Druck von 4,286 bar

	Probe 1	Probe 2	Probe 3
t_0	1,70 1,73 1,90	2,90 2,84 2,90	3,85 4,10 3,96
$t_{0\text{ arth}}$	1,78	2,88	3,97
t_p	0,54 0,58 0,53	0,97 1,00 0,97	1,42 1,46 1,47
$t_{p\text{ arth}}$	0,55	0,98	1,45
t_{pP}	0,14	0,33	0,54
λ_V	0,08	0,11	0,14
λ_R	0,31	0,34	0,37

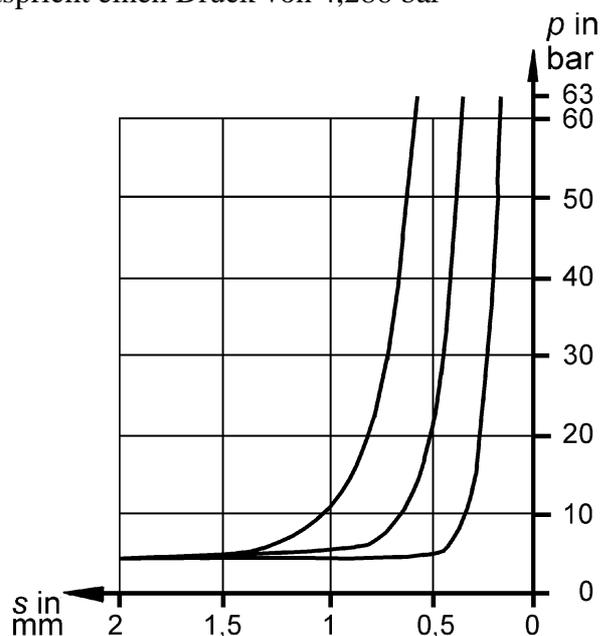


Bild 7.18: Presskurven

Bild 7.18 zeigt den Verlauf der drei ermittelten Presskurven. In der danebenstehenden Tabelle sind die gemessenen und ermittelten Werte aufgeführt.

λ_V	= Verdichtungsgrad $\lambda_V = t_{pP}/t_{0\text{ arth}}$
λ_R	= Rückverformungsgrad $\lambda_V = t_{p\text{ arth}}/t_{0\text{ arth}}$
p	= Pressdruck
s	= Verfahrweg des Pressenstempels
t_0	= gemessene Probenhöhe des Prüfkörpers vor dem Pressen
$t_{0\text{ arth}}$	= arithmetischer Mittelwert aus t_0
t_p	= gemessene Probenhöhe des Prüfkörpers nach dem Pressen
$t_{p\text{ arth}}$	= arithmetischer Mittelwert aus t_p
t_{pP}	= ermittelte Probenhöhe beim Pressen unter Last

Der ermittelte Verdichtungsgrad zeigt, dass die eingesetzten Proben beim Herstellungsprozess in etwa gleich verdichtet worden sind. Bei den Proben 2 und 3 ist der Verdichtungsgrad etwas größer, da aufgrund der aufeinanderliegenden 2 bzw. 3 Proben vermutlich Ungenauigkeiten in Form von Zwischenräumen zwischen den Proben bestehen. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da alle Proben aus demselben Faserformprodukt stammen. Der Rückverformungsgrad zeigt ebenfalls annähernd den gleichen Wert; somit ist das elastische Verhalten des Werkstoffs ebenfalls durchaus vergleichbar. Die Funktionsfähigkeit der Presse zur Ermittlung des Verdichtungsgrades ist damit eindeutig nachgewiesen.

7.4 Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung für Funktionsteile

Oftmals ist es problematisch, die in experimentellen Untersuchungen gewonnenen Werkstoffkennwerte auf die realen Verhältnisse zu übertragen. Gerade bei Faserformprodukten ist dies besonders schwierig, da hier der Einfluss von Kerben bzw. Querschnittsveränderungen o. ä. nicht bekannt ist. Aus diesen Gründen kann zur Zeit die Übertragung der an den rechteckigen Proben ermittelten Werkstoffkennwerte auf reale Funktionsteile, die beliebig geformt sind und andere Größenordnungen haben, nicht ohne weiteres erfolgen. Daher werden mit der im Folgenden beschriebenen Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung für Funktionsteile (Faserformschienen) weitere Untersuchungen durchgeführt. Hieraus lassen sich gegebenenfalls Zusammenhänge zwischen den an Flachproben und realen Funktionsteilen ermittelten Kennwerten erfassen.

Die Prüfeinrichtung arbeitet ebenfalls nach dem Vierpunkt-Verfahren. Sie ist durch Ergänzung bzw. Umbau der Versuchseinrichtung zur Messung der Handgelenkmomente entstanden (siehe Kapitel 4). Sie ist so konzipiert, dass sie einerseits zur Prüfung von Funktionsteilen (Faserformschienen) geeignet ist, andererseits aber auch noch für den ursprünglichen Zweck eingesetzt werden kann. Die Vorrichtung ist in **Bild 7.19** mit abgenommener Haube dargestellt.

An die vorhandene Versuchseinrichtung wird ein induktiver Tauchankergeber angebaut, dessen Anker über ein Stahlseil und eine Riemenscheibe mit der Welle verbunden ist, an der die Handgelenkauflage befestigt ist. Das Messsignal, das auf diese Weise gewonnen wird, entspricht dem Verdrehwinkel der Welle.

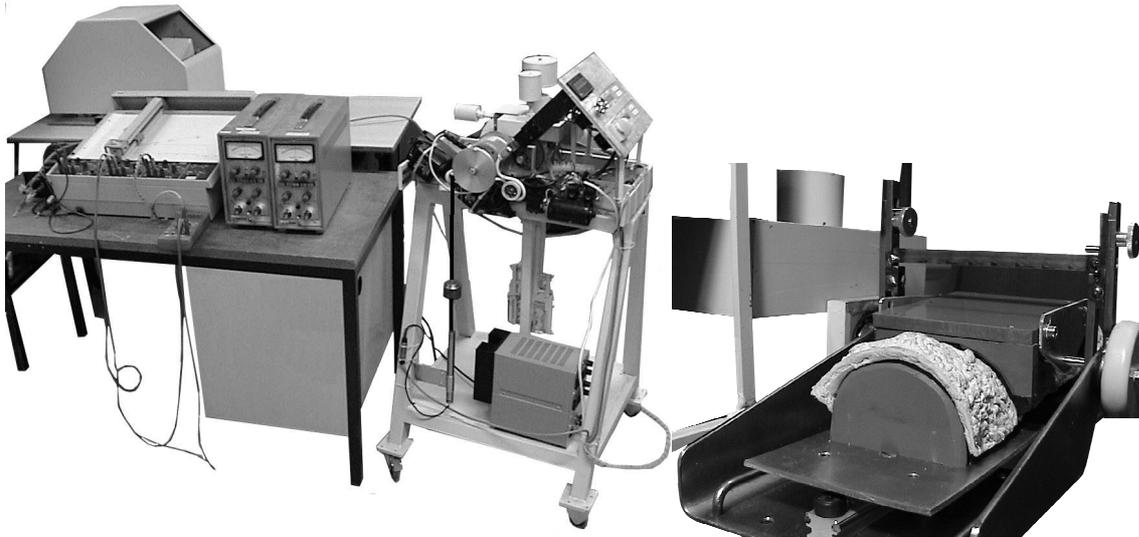


Bild 7.19: Vierpunkt-Verfahren zur Prüfung von Faserformschienen

Die Kabel, die ursprünglich von den Kraftaufnehmern zu der jeweiligen Auswertelektronik der Digitalwaagen führten, werden abgeklemmt und mit jeweils einem Trägerfrequenzverstärker verbunden, so dass das Messsignal der in Vollbrücke geschalteten, DMS-bestückten Kraftaufnehmer direkt erfasst werden kann. Wahlweise kann jeweils der Ausgang eines der beiden Verstärker auf einen Kanal eines X-Y-Schreibers geleitet werden, um das Messsignal beim Beuge- oder beim Streckvorgang auswerten zu können. Der andere Kanal registriert den Verdrehwinkel.

Die Kalibrierung sowohl der Messkette zur Winkelerfassung als auch der beiden Messketten zur Momentenmessung zeigt ein lineares Verhalten, so dass die ermittelten Werte direkt ausgewertet werden können.

An den Auflageelementen für die Hand und für den Unterarm kann ein Modell eines Unterarms mit Handgelenk und Hand mittels der Luftdruckmanschetten befestigt werden, vgl. Kapitel 6.4. An das Modell kann eine Unterarmorthese mit Hilfe von Binden so appliziert werden, wie es auch im realen Anwendungsfall durchgeführt würde. Für die durchgeführten Versuche wurden jedoch vier definierte Krafteinleitungsstellen geschaffen, so dass eine eindeutige Vierpunktbiegung vorliegt. Diese Maßnahme war erforderlich, um zuverlässig reproduzierbare Messwerte zu erhalten, die mit den Messungen an den Flachproben verglichen werden können. Die Maße sind $l = 200 \text{ mm}$ und $a = 50 \text{ mm}$, vergleiche Kapitel 6.4.

Wird der Antriebsmotor der Versuchseinrichtung eingeschaltet, verdreht sich die Welle. Dabei werden das Drehmoment und der Verdrehwinkel aufgezeichnet. Auf diese Weise können Vierpunkt-Biegeuntersuchungen entsprechend den mit der Vierpunkt-Biegeprüfvorrichtung an den Flachproben durchgeführten vorgenommen werden, hier jedoch mit räumlich gestalteten Elementen.

8 Versuchsdurchführung

8.1 Voraussetzungen

Für die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der relevanten Kenngrößen wird wie nachfolgend beschrieben vorgegangen. Die Versuche werden zunächst an Flachproben mittels der Vierpunkt-Biegemaschine durchgeführt, wobei sowohl eigengefertigte Proben als auch solche untersucht werden sollen, die aus handelsüblichen Faserformverpackungen entnommen wurden. Die eigengefertigten Flachproben werden mit der vorhandenen Überdruckanlage hergestellt und bei Bedarf auf einer hydraulischen Universalpresse gepresst. In einem zweiten Schritt werden Funktionsteile, im vorliegenden Fall also Unterarmorthesen, mittels der Faserformversuchsanlage hergestellt und ebenfalls untersucht. Hierbei wird geprüft, inwieweit sich die bei Flachproben gefundenen Kennwerte auf räumlich gestaltete Bauteile übertragen lassen.

Problematisch sind die Verfahrensparameter, die bei der Herstellung der Werkstücke vorgelegen haben. Bei den eigengefertigten Flachproben sind die entsprechenden Randbedingungen bekannt. Für die Prüfkörper, die aus vorhandenen Faserformverpackungen stammen, sollen die Parameter so weit wie möglich mit erfasst werden.

Mit Hilfe der bereits beschriebenen Versuchseinrichtungen werden die Eigenschaften der Faserformprodukte näher untersucht. Im Folgenden werden das entsprechende Prüfprogramm und die durchzuführenden Untersuchungen beschrieben.

Ziel ist es dabei, die Werkstoffkennwerte für Faserformprodukte zu ermitteln. Zur Beurteilung der Ergebnisse müssen die Prüfbedingungen erfasst werden. Dies betrifft einerseits das eingesetzte Prüfverfahren, die hierbei wirkenden Belastungen und gemessenen Verformungen und andererseits den Prüfkörper mit seinen charakteristischen Kenngrößen; die vorliegenden Klimabedingungen müssen ebenfalls aufgenommen werden, da die Kennwerte der Faserformteile insbesondere auch stark vom Feuchtigkeitsgehalt abhängen.

Im Folgenden werden das Prüfprogramm und die charakteristischen Kenngrößen, die bei den zu untersuchenden Faserformprodukten erfasst werden, beschrieben.

8.2 Untersuchungen an Flachproben

8.2.1 Versuchsprogramm

Bei der Untersuchung der Flachproben wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- Erfassung der Klima- und Randbedingungen
- Erfassen und Vermessen der Probe
- Durchführung des Vierpunkt-Biegeversuchs
- Entnahme einer Rundprobe und Durchführung des Verdichtungsversuchs

Vor bzw. während der Versuchsdurchführung werden die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit erfasst. Da sich der Laborraum im Keller des Gebäudes befindet, sind keine größeren klimatischen Veränderungen zu erwarten. Im ersten Versuchsschritt werden

die Proben erfasst und vermessen. Die einzelnen Parameter werden weiter unten detailliert beschrieben. Als nächstes wird der Vierpunkt-Biegeversuch durchgeführt. Dabei werden die wirkende Kraft und der Verformungsweg rechnergestützt erfasst. Nach Abschluss dieses Versuchs wird mittels eines Locheisens eine Rundprobe mit einem Durchmesser von 30 mm aus dem unbeschädigten Teil der Probe herausgestanzt und mittels der Pressvorrichtung dem Verdichtungsversuch unterzogen; auf diese Weise kann der Verdichtungsgrad bestimmt werden. Außerdem wird der Probe ein weiterer Teilbereich entnommen, der mittels eines Feuchtigkeitsmessgeräts untersucht wird. Hierdurch wird die Probenfeuchtigkeit bestimmt. Abschließend erfolgt die Versuchsauswertung zunächst für die Einzelergebnisse; darauf aufbauend werden vergleichende Auswertungen durchgeführt.

8.2.2 Probenparameter

Die einzelnen Parameter der Probe werden erfasst und in ein Formular, **Bild 8.1**, eingetragen. Im einzelnen sind dies folgende Kenngrößen:

Hersteller bzw. Herkunft:

Stammt der Prüfkörper aus einem bestehenden (fremdgefertigten) Faserformprodukt, soll nach Möglichkeit der entsprechende Hersteller dieses Produktes angegeben werden. Oftmals ist der Hersteller durch einen Schriftzug oder Logo auf dem Produkt erkennbar. Somit wird der Hersteller hier namentlich oder als unbekannt angegeben. Bei eigengefertigten Prüfkörpern bzw. Faserformschienen wird hier entsprechend die Eigenfertigung vermerkt.

Produktart:

Der ursprünglich vorgesehene Verwendungszweck des Produkts, z. B. Obstverpackung, Tonerverpackung, Faserformhülse, eigengefertigte Prüfkörper o. ä., wird hier soweit möglich angegeben.

Herstellverfahren:

Fremdgefertigte Produkte werden mittels des Saugverfahrens hergestellt. Das Überdruckverfahren wird lediglich bei den eigengefertigten Produkten eingesetzt. Das Verfahren wird mit Überdruck bzw. Saugen entsprechend vermerkt.

Anformdruck p_a [Pa]:

Der vorhandene Anformdruck p_a , der während des Herstellungsprozesses vorgelegen hat, kann nur bei den eigengefertigten Produkten beziffert werden.

Stoffdichte [%]:

Die Stoffdichte ist das Verhältnis der Trockenmasse zur Masse der Fasersuspension und wird als Massenanteil in Prozent [% (m/m)] angegeben, siehe DIN EN ISO 4119 /DEI96a/. Die Angabe der Stoffdichte, die beim Anformprozess vorgelegen hat, ist ebenfalls nur bei den eigengefertigten Produkten möglich.

Trockengehalt [%]:

Der Trockengehalt ist das Verhältnis der getrockneten Masse zur Masse der nassen Probe und wird in Prozent angegeben. Der Trockengehalt wird mit einer Infrarottrocknungswaage ermittelt.

Vordruck zur Auswertung von Faserbiegeversuchen			
Allgemeine Beschreibung des Versuches:		Dateiname :	1,5HS00-05-P2
Datum:	2002	Versuchs-Nr.:	VE5
Probenparameter:			
Hersteller:	Eigenfertigung-	Probenhöhe t_0 [mm]:	4,36 5,39 5,6
Produktart:	Testwerkstück	Probenhöhe $t_{0\text{arth}}$ [mm]:	5,12
Herstellverfahren:	Überdruck	Probenbreite b [mm]:	30
Anformdruck p_a [bar]:	4	Probenlänge l [mm]:	135
Stoffkonzentration κ [%]:	1,5	Probenvolumen V [mm ³]:	20723
Werkstoff:	Holzstoff	Gewicht G [g]:	4,63
Relative Feuchte r_F [% otro]:	9,83	Probindichte ρ [g/mm ³]:	$2,23 \times 10^{-4}$
Beurteilung der Verdichtung:		hoch <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> gering <input checked="" type="checkbox"/>	
Versuchsparameter:			
Stützweite l_{St} [mm]:	120	Gewähltes Biegeverfahren:	Vier-Punkt-Biegung
Abstand a [mm]:	40	Stempelschrittweite x [mm]:	0,05
Raumtemperatur T [°C]:	22,2	maximale Durchbiegung s [mm]:	16
Luftfeuchtigkeit R [%]:	34	Knickung:	keine
Faserrichtung zur Probenlänge θ [°]:	normal		
Pressen:			
Probenhöhe t_0 [mm]:	6,60 6,46 6,14		
Arith. Mittel $t_{0\text{arth}}$ [mm]:	6,40		
Probenhöhe unter Last t_{pP} :	0,50		
Probenhöhe t_p [mm]:	1,10 1,49 1,44		
Arith. Mittel $t_{p\text{arth}}$ [mm]:	1,34		
Flächenpressung p_F :	37,6		
Verdichtungsgrad λ_V [%]:	7,8		
Rückfederungsgrad λ_R [%]:	21,0		
Probengewicht G_P [g]:	0,91		
Biegesteifigkeit $E \cdot I$ [Nmm ²]:		max. Biegemoment M_b [Nmm]:	
Elastizitätsmodul E [N/mm ²]:		Widerstandsmoment W [mm ³]:	
Flächenmoment 2. Grades I [mm ⁴]:	9,31	Biegefestigkeit σ_b [N/mm ²]:	
Anmerkungen:			

Bild 8.1: Versuchsprotokoll

Werkstoff:

Das bei der Herstellung der Faserformprodukte eingesetzte Fasermaterial ist hier nach Möglichkeit anzugeben. Die eigengefertigten Produkte bestehen dabei entweder aus Holz- oder Zellstoff. Dagegen bestehen die fremdgefertigten Produkte meist aus 100 % Altpapier.

Beurteilung der Verdichtung:

Bei den fremdgefertigten Produkten kann hier nur qualitativ bzw. augenscheinlich beurteilt werden, ob die Produkte nach dem Herstellungsprozess hoch, mittel, gering bzw. gar nicht verdichtet wurden. Die eigengefertigten Produkte sind entweder gar nicht verdichtet, bzw. der entsprechende Pressendruck p_p wird angegeben.

Probenhöhe t_0 [mm] bzw. $t_{0\text{ arth}}$ [mm]:

Die Probenhöhe t_0 des Prüfkörpers wird jeweils an (mindestens) drei Stellen mit der Bügelmessschraube gemessen, da die Faserformprodukte aufgrund des Herstellungsprozesses leichten Schwankungen unterliegen. Aus diesen gemessenen Werten wird das arithmetische Mittel $t_{0\text{ arth}}$ rechnerisch bestimmt. Bei Proben mit sehr starken Höhenschwankungen, d. h. mit sehr unregelmäßiger Oberfläche, wird die Höhe an möglichst vielen Stellen gemessen und anschließend für den Bereich, in dem der Bruch erwartet wird, durch Mittelwertbildung bestimmt. Dieses relativ ungenaue Verfahren wird ergänzt durch eine Bestimmung der Probenhöhe mittels der Scanneinrichtung.

Probenbreite b [mm] und Probenlänge l [mm]:

Die Probe wird auf die gewünschte Länge und Breite zugeschnitten bzw. aus dem bestehenden Produkt herausgeschnitten. Die Probenbreite b wird mit einem Messschieber gemessen, die Probenlänge l wird mit einem Stahlmaß gemessen.

Probenvolumen V [mm³]:

Das Probenvolumen ist die rechnerische Größe aus der Probenbreite b , der Probenlänge l und der Probenhöhe $t_{0\text{ arth}}$.

Gewicht G [g]:

Das Gewicht der Probe wird mit Hilfe einer Präzisionswaage ermittelt.

Probendichte ρ [g/mm³]:

Die Probendichte ρ ist der Quotient aus der ermittelten Gewichtskraft G und dem Probenvolumen V .

Die im Folgenden beschriebenen Angaben beziehen sich im Wesentlichen auf die Randbedingungen bei der Biegeprüfung sowie die herrschenden Klimabedingungen:

Stützweite l_{St} [mm]:

Die Stützweite gibt den Abstand der Auflager an, der während des Biegeversuchs vorgelegen hat.

Abstand a [mm]:

Der Abstand a ist der Abstand vom Auflager bis zur Krafteinleitungsstelle.

Gewähltes Biegeverfahren:

Hier wird angegeben, ob die Biegeprüfung nach dem Vierpunkt-Verfahren oder Dreipunkt-Verfahren erfolgte.

Raumtemperatur T [°C]:

Dies ist die vor Beginn des Biegeversuchs gemessene Raumtemperatur.

Luftfeuchtigkeit R [%]:

Die gemessene Luftfeuchtigkeit R vor Beginn des Biegeversuchs wird erfasst.

Stempelschrittweite x [mm]:

Die Stempelschrittweite x gibt den Vorschub an, mit dem die Krafteinleitungsstellen bei jedem weiteren Belastungsschritt bewegt werden.

Maximale Durchbiegung s [mm]:

Die maximale Durchbiegung s ist das Maximum des während des Biegeversuchs an den Krafteinleitungsstellen zurückgelegten Weges $s_{\text{prüf}}$. Der Wert wird vom Prüfprogramm aufgezeichnet und nur falls erforderlich nachträglich in das Prüfprotokoll eingetragen.

Faserrichtung zur Probenlängsrichtung θ [Grad]:

Die Faserrichtung gibt die Richtung des Faserverlaufs relativ zur Längsrichtung der Probe an. Sie wird augenscheinlich erfasst. Unter „normal“ ist zu verstehen, dass die Fasern senkrecht zur Probenlängsrichtung bzw. in Querrichtung der Probe verlaufen.

Die Ergebnisse der Biegeprüfung sind der Biege-Elastizitätsmodul E_b sowie die Biegefestigkeit σ_b der jeweiligen Proben bzw. Prüfkörper. Die Werte werden durch Auswertung der vom Rechner erfassten Daten ermittelt.

Als weiteres werden die Kenngrößen beschrieben, die beim Pressen der Proben bzw. Prüfkörper ermittelt werden. Hierzu gehört zunächst wiederum die Ermittlung der Abmessung vor und nach der Versuchsdurchführung.

Probenhöhe t_0 [mm] bzw. $t_{0 \text{ arth}}$ [mm]:

Die Probenhöhe t_0 wird vor dem Pressen mit einer Bügelmessschraube an drei um 120° versetzten Stellen der ausgestanzten Rundprobe gemessen. Aus den in t_0 ermittelten Probenhöhen wird der arithmetische Mittelwert $t_{0 \text{ arth}}$ berechnet.

Probenhöhe $t_{p \text{ p}}$ [mm]

Die Probenhöhe $t_{p \text{ p}}$ ist die Höhe des Prüfkörper während des Pressens. Der Wert wird aus den während des Pressens gemessenen Daten ermittelt.

Probenhöhe t_p [mm] bzw. $t_{p \text{ arth}}$ [mm]:

Die Probenhöhe t_p ist die gemessene Materialstärke bzw. Probenhöhe des Prüfkörpers nach dem Pressen. Die Probe wird wiederum an drei um 120° versetzten Stellen vermessen; aus den drei Werten für t_p wird der arithmetische Mittelwert $t_{p \text{ arth}}$ berechnet.

Gewicht G [g]:

Das Gewicht der Rundprobe bzw. des Prüfkörpers wird mit Hilfe einer Präzisionswaage ermittelt.

Zwei wesentliche Ergebnisse sind der Verdichtungsgrad λ_V und der Rückfederungsgrad λ_R . Die während des Pressversuchs registrierte Presskurve wird festgehalten.

Verdichtungsgrad λ_V [%]:

Der Verdichtungsgrad $\lambda_V = t_{p\ p}/t_{0\ arth}$ ist der Quotient aus der Probenhöhe $t_{p\ p}$ während des Pressens (bei maximaler Verdichtung) und dem arithmetischen Mittelwert $t_{0\ arth}$ aus der Probenhöhe vor dem Pressen. Er gibt an, wie stark sich die Probe verdichten lässt, und ist damit ein Maß für die in der Probe vorhandene Menge an Fasern bzw. an Hohlräumen. Dieser Wert ist im Wesentlichen unter Lasteinwirkung relevant.

Rückverformungsgrad λ_R [%]:

Der Rückverformungsgrad $\lambda_R = t_{p\ arth}/t_{0\ arth}$ ist das Verhältnis aus den arithmetischen Mittelwerten der Probenhöhe nach dem Pressen und Entlasten $t_{p\ arth}$ zu der Probenhöhe vor dem Pressen $t_{0\ arth}$. Zur Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wird die Probe jeweils an drei um 120° versetzten Messstellen gemessen. Der Rückverformungsgrad gibt an, inwieweit der Werkstoff nach einer starken Belastung in der Lage ist, sich in seine Ausgangsform zurückzuverformen.

Versuchsbezeichnung:

Jede Probe wird mittels einer Buchstaben-Zahlen-Kombination gekennzeichnet, die eine eindeutige Zuordnung gestattet. Diese Bezeichnung wird auch für die Dateien übernommen, in denen die Versuchsergebnisse abgespeichert werden. Sie ist folgendermaßen aufgebaut:

Eigengefertigte Produkte:

VE05_1,5HS00_05P2

Rohteil-Nr.	05P2 = 5. Probe aus 2. Rohteil entnommen
Probe aus Rohteil	
Druck beim Verdichten nach dem Anformen	00 \Rightarrow ungespresst; übrige Angaben: 05 $\Rightarrow F = 50.000\text{ N}$ $p = 2,86\text{ N/mm}^2$ 10 $\Rightarrow F = 100.000\text{ N}$ $p = 5,72\text{ N/mm}^2$ 15 $\Rightarrow F = 150.000\text{ N}$ $p = 8,58\text{ N/mm}^2$ 20 $\Rightarrow F = 200.000\text{ N}$ $p = 11,44\text{ N/mm}^2$
Werkstoff	HS = Holzstoff; ZS = Zellstoff
Stoffkonzentration in %	(1,0% – 1,3% – 1,5% – 1,7% – 2,0%)
Lfd. Nr.	
V = Versuch	E = Eigengefertigtes Produkt, P = Fremdprodukt

Fremdprodukte:

VP01-FV1

Nr. des Rohteils	HS = Holzstoff; ZS = Zellstoff
Farbe	FV = Violett FB = Braun FG = Grün
Lfd. Nr.	
V = Versuch	E = Eigengefertigtes Produkt, P = Fremdprodukt

Die Farbe ist ein zusätzliches Zuordnungsmerkmal zu den Fremdprodukten, aus denen die Proben entnommen wurden.

Die eigengefertigten Proben, die nach dem Anformvorgang gepresst werden, weisen eine Größe von 141 mm x 124 mm und damit eine Fläche von $A = 17.484\text{ mm}^2$ auf. Damit lässt sich die Flächenpressung p beim Pressen berechnen: $p = F/A$. Die Werte sind obiger Tabelle zu entnehmen.

8.2.3 Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung

Bei der Untersuchung der Flachproben werden Werte für die Kraft in Abhängigkeit von dem Verfahrweg der Krafteinleitungsstellen mittels des Rechners aufgezeichnet. Ein Beispiel für die grafische Darstellung der Versuchsergebnisse ist in **Bild 8.2** gezeigt.

Die dargestellte Kennlinie entspricht prinzipiell einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Da die Umrechnung in die Biegespannung und die zugehörige Dehnung jeweils mittels entsprechender Faktoren erfolgen kann, ergibt sich hierfür lediglich eine andere Achsenteilung, die am rechten Diagrammrand gezeigt ist. Im Einzelnen sind folgende Ergebnisse erkennbar:

Der Kurvenverlauf ist im Bereich kleiner Kräfte (Bereich I) konkav gekrümmt. Hier hat die Probe noch nicht vollständig an den vier Krafteinleitungsstellen angelegen. Ist dies der Fall, steigt bei einer Steigerung des Verfahrweges die Kraft zunächst nur geringfügig an, bis eine vollständige Anlage gewährleistet ist. Dies ist etwa im Übergang von Bereich I in Bereich II der Fall. Im Bereich II steigt der Kraftverlauf nahezu geradlinig an, entsprechend einer *Hookeschen* Gerade, die im Bild auch eingezeichnet ist. Die Bereiche II und III sind durch die Proportionalitätsgrenze voneinander abgegrenzt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Kurvenverlauf unter der *Hookeschen* Gerade liegt; es ist also relativ betrachtet eine kleinere Kraft zur weiteren Verformung erforderlich, die Probe wird „weicher“.

Im oberen Bereich der Messkurve ist ein waagerechter Verlauf erkennbar, an den ein Bereich anschließt, in dem die Kraft abfällt. Hier ist offensichtlich das Versagen der Probe eingetreten. Der maximale Wert der Kraft kann daher direkt in die maximal vom Werkstoff ertragbare Biegespannung umgerechnet werden. Jenseits der Proportionalitätsgrenze ist die Verformung der Probe bereits so stark, dass sie beginnt, über die Auflager hinweg zu rutschen. Dabei tritt auf Grund des relativ hohen Reibbeiwertes und der unregelmäßig geformten Oberfläche ein Stick-Slip-Effekt auf, der deutlich anhand der Schwankungen der Kraft zu erkennen ist.

Im dargestellten Beispiel beträgt die maximale Kraft 10,0 N. Die Probenbreite beträgt $b = 30$ mm und die gemittelte Probenhöhe $t_{0 \text{ arth}} = 5,12$ mm. Damit lassen sich folgende Werte bestimmen:

$$\begin{aligned} \text{Biegemoment:} & \quad M_{b \text{ max}} = F_{\text{max}}/2 \cdot a = 10,0 \text{ N}/2 \cdot 40 \text{ mm} = 200 \text{ Nmm} \\ \text{Widerstandsmoment:} & \quad W_b = b \cdot t_{0 \text{ arth}}^2/6 = 30 \text{ mm} \cdot 5,12^2 \text{ mm}^2/6 = 130,9 \text{ mm}^3 \\ \text{Biegefestigkeit } \sigma_b: & \quad \sigma_b = M_{b \text{ max}}/W_b = 200 \text{ Nmm}/130,9 \text{ mm}^3 = 1,53 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Flächenmoment 2. Grades } I: & \quad I = b \cdot t_{0 \text{ arth}}^3/6 \end{aligned}$$

$$\text{Elastizitätsmodul } E: \quad E = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot s_{\text{prüf}} \cdot I} \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{a}{l}\right) \quad (\text{vgl. Kap. 6.4})$$

mit $a = 40$ mm und $l = l_{\text{St}} = 120$ mm gilt

$a/l = 40 \text{ mm}/120 \text{ mm} = 1/3$ und damit:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot s_{\text{prüf}} \cdot I} \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{3}\right) = \frac{5 \cdot F \cdot l^3}{324 \cdot s_{\text{prüf}} \cdot I}$$

Bzw. gilt zur Bestimmung des Sekantenmoduls mit der Betrachtung von Differenzkräften und Differenzwegen:

$$E = \frac{5 \cdot \Delta F \cdot l^3}{324 \cdot \Delta s_{\text{prüf}} \cdot I}$$

Bild 8.3 zeigt den Verlauf des nach der Formel auf der vorigen Seite ermittelten Elastizitätsmoduls, bezogen auf den Nullpunkt, in Abhängigkeit vom Verformungsweg. Deutlich erkennbar ist, dass die Werte starke Fehler aufweisen: Neben den starken Schwankungen, die im unteren Bereich bestehen, verläuft die Kurve im Bereich III waagrecht. Dies entspricht jedoch nicht der Lage der *Hookeschen* Gerade im Kraft-Weg-Diagramm. Damit ist diese Ermittlung des Elastizitätsmoduls offensichtlich unbrauchbar. Der obere Kurvenverlauf ist entstanden, indem die Werte für kleine Kräfte und Wege nicht berücksichtigt wurden. Es wurde die obige Formel für den Elastizitätsmodul angewendet, wobei die Kraft bei einem Verformungsweg von 1 mm und dieser Weg selbst als Bezugsgrößen verwendet wurden. Damit ergibt sich der obere Kurvenverlauf, der eine relativ gute Übereinstimmung mit dem Kraft-Weg-Diagramm aufweist. Der über den waagerechten Bereich des Elastizitätsmoduls gemittelte Wert beträgt 100 N/mm².

Zu beachten ist, dass die Werte mit Unsicherheiten behaftet sind. Für die Ermittlung der ertragbaren Spannung wird das Widerstandsmoment der Probe benötigt, für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls das Flächenmoment 2. Grades. Beide Werte werden aus mit einer Bügelmessschraube gemessenen Probenhöhen, von denen der arithmetische Mittelwert gebildet wird, berechnet. Diese Vorgehensweise ist sicherlich bei sehr stark schwankenden Probenhöhen fehlerbehaftet. Bei diesen Proben wird daher der Querschnitt mittels des 3-D-Scanners vermessen; aus den gewonnenen Daten wird das Widerstandsmoment und das Flächenmoment zweiten Grades bestimmt wie bereits beschrieben. Das jeweilige Berechnungsverfahren ist in der Tabelle angegeben.

Im Einzelnen wird bei der Versuchsdurchführung folgendermaßen vorgegangen:

- Probenerstellung: Die Proben werden aus Fremdprodukten in einer Größe von 130 mm x 30 mm herausgeschnitten. Eigengefertigte Proben werden angeformt, ggf. im noch feuchten Zustand verdichtet (gepresst) und getrocknet. Anschließend werden sie in der gleichen Größe zugeschnitten.
- Probengeometrie: Die Breite wird mittels Messschieber nachgemessen; die Probenhöhe wird an mehreren Stellen gemessen und anschließend arithmetisch gemittelt. Bei Proben aus Fremdprodukten werden hieraus das Flächenmoment 2. Grades I und das Widerstandsmoment W_b berechnet. Eigengefertigte Proben werden gescannt, und aus den dabei gemessenen Größen werden die Werte I und W_b berechnet.
- Die Proben werden auf der Biegemaschine untersucht wie beschrieben. Die Siebseite befindet sich unten. Aus den gemessenen Werten werden der Elastizitätsmodul E und die Biegefestigkeit E_b wie bereits beschrieben bestimmt.
- Aus einem unbeschädigten Bereich der Probe wird eine Rundprobe $\varnothing 30$ mm herausgestanzt; diese wird an drei um 120° versetzten Stellen erneut vermessen, so dass ein aktualisierter Wert $t_{0 \text{ arth}}$ erhalten wird.
- Die Rundprobe wird dem Pressversuch unterzogen. Es werden die Höhe während des Pressens (mittels des Wegaufnehmers der Presse) und die Höhe nach dem Pressen und Entlasten an drei um 120° versetzten Stellen gemessen. Der Verdichtungsgrad λ_V und der Rückverformungsgrad λ_R werden berechnet.

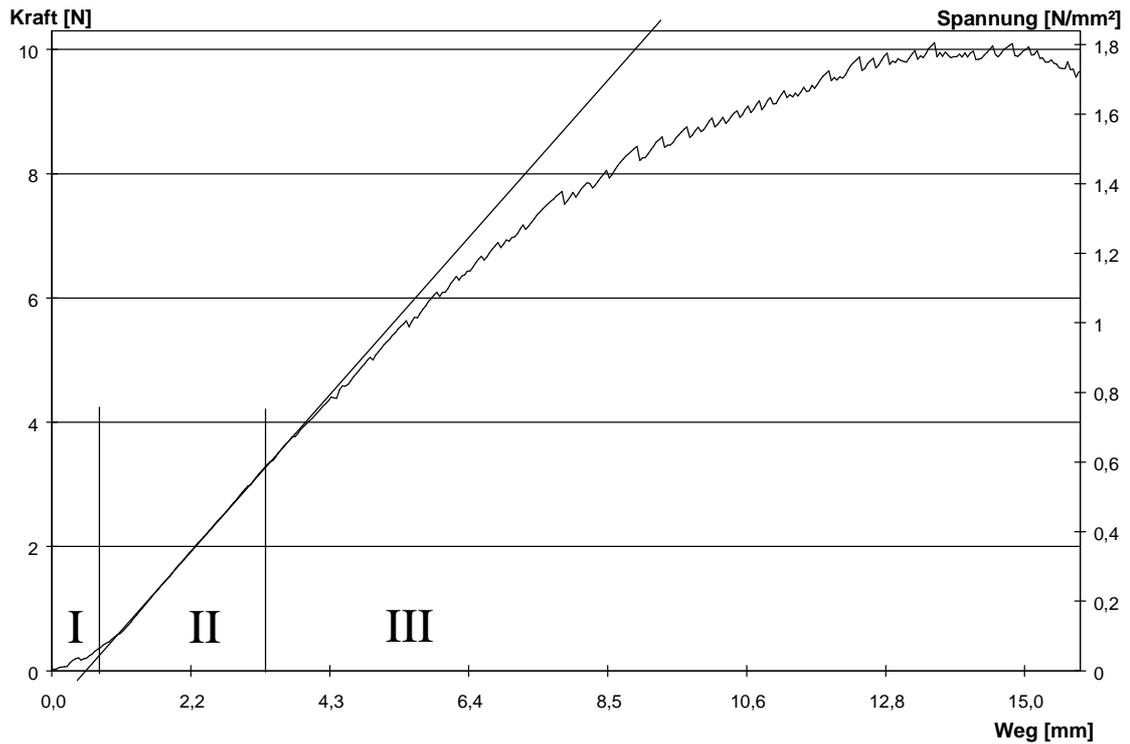


Bild 8.2: Kraft-Weg-Diagramm für eine Flachprobe

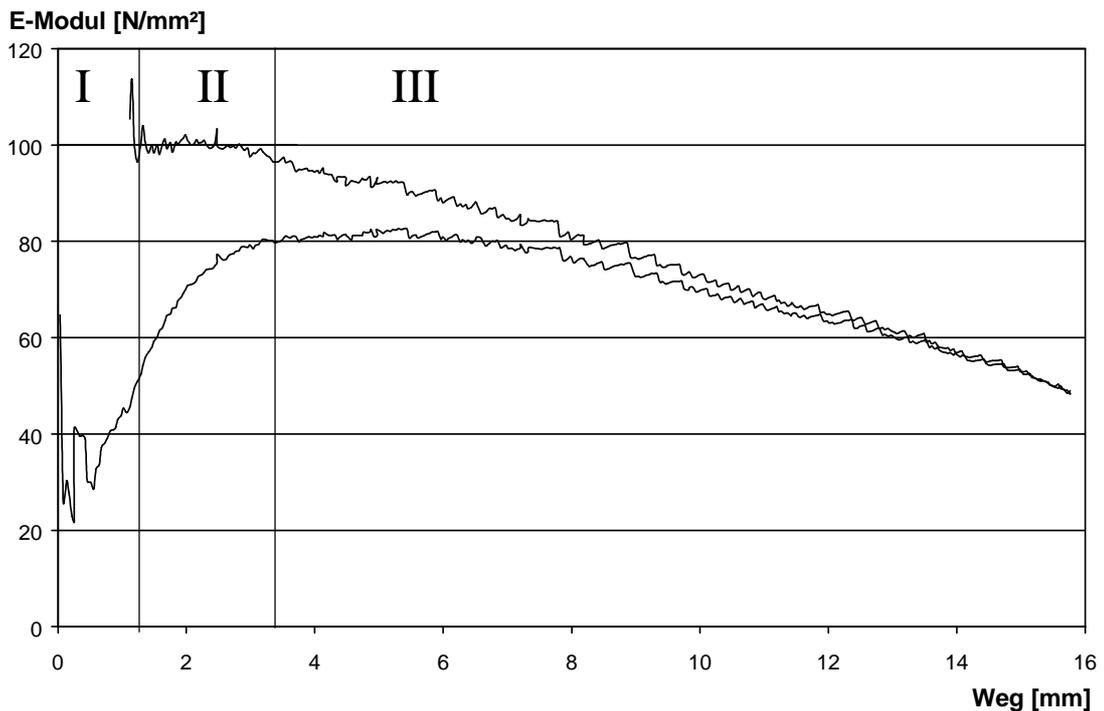


Bild 8.3: Elastizitätsmodul; aus Kraft-Weg-Diagramm ermittelt; unterer Kurvenverlauf bezogen auf Nullpunkt, bei oberer Kurve Bereich unterhalb von Verformungsweg 1 mm nicht berücksichtigt

8.2.4 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse, die durch die Versuchsauswertung gewonnen werden konnten, sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. **Bild 8.4** zeigt die Biegefestigkeit und Biegesteifigkeit, in **Bild 8.5** ist das Verhalten der Proben beim nachträglichen Pressen dargestellt.

Nr	Bezeichnung	Herstellkennwerte		GeometrieKennwerte				max. ertragb. Kraft F_{\max} N	Biegefestigkeit σ_b N/mm ²	E-Modul E N/mm ²
		Stoffkonzentration κ %	Pressdruck p N/mm ²	Breite b mm	Höhe $t_{0 \text{ arth}}$ mm	Flächenmoment 2. Grades $I^{6)}$ mm ⁴	Widerstandsmoment $W_b^{5)}$ mm ³			
1	VE01-1,5HS15-02P1	1,5	8,58	30	1,50	3,27 ¹⁾	3,39 ¹⁾	6,00	35,40	4.556
2	VE02-1,5HS15-01P1	1,5	8,58	29,5	1,56	10,57 ¹⁾	9,28 ¹⁾	3,37	7,26	707
3	VE03-1,5HS00-01P1	1,5	0	30	3,73	181,68 ¹⁾	98,97 ¹⁾	8,10	1,64	106
4	VE04-1,5HS00-02P1	1,5	0	29	3,73	146,11 ¹⁾	63,95 ¹⁾	7,53	2,35	174
5	VE05-1,5HS00-05P2	1,5	0	30	5,12	297,07 ¹⁾	85,99 ¹⁾	10,00	2,33	110
6	VE06-1,5HS10-04P2	1,5	5,72	29	3,00	54,59 ¹⁾	39,66 ¹⁾	12,72	6,41	795
7	VE07-1,5HS10-05P2	1,5	5,72	29,5	2,80	39,64 ¹⁾	26,10 ¹⁾	11,77	9,02	844
8	VE08-1,5HS20-03P2	1,5	11,44	29,5	3,07	91,60 ¹⁾	57,72 ¹⁾	13,40	4,64	447
9	VE09-1,5HS20-04P2	1,5	11,44	30	2,78	66,06 ¹⁾	45,54 ¹⁾	10,00	4,39	493
10	VE10-1,5HS05-03P1	1,5	2,86	29	2,32	16,01 ¹⁾	12,44 ¹⁾	7,44	11,96	1.519
11	VE11-1,5HS05-02P1	1,5	2,86	29,5	2,35	20,07 ¹⁾	17,48 ¹⁾	8,65	9,90	1.141
12	VE12-2,0HS10-02P2	2,0	5,72	29	2,16	34,04 ¹⁾	39,63 ¹⁾	6,61	3,35	485
13	VE13-2,0HS10-03P2	2,0	5,72	29	2,41	25,19 ¹⁾	22,05 ¹⁾	8,59	7,79	1.033
14	VE14-2,0HS00-01P1	2,0	0	29,5	6,46	847,69 ¹⁾	217,41 ¹⁾	9,33	0,85	43
15	VE15-2,0HS15-01P1	2,0	8,58	29	2,28	21,46 ¹⁾	19,99 ¹⁾	8,55	8,55	1.198
16	VE16-1,0HS00-02P1	1,0	0	30	2,70	34,80 ¹⁾	32,75 ¹⁾	2,93	1,79	186
17	VE17-1,0HS10-08P3	1,0	5,72	30	1,56	4,56 ¹⁾	4,59 ¹⁾	2,62	11,41	1.147
18	VE18-1,0HS20-02P1	1,0	11,44	29	1,26	3,30 ¹⁾	4,99 ¹⁾	2,82	11,30	1.561
19	VE19-1,7HS00-01P1	1,7	0	29	5,46	394,63 ¹⁾	117,23 ¹⁾	21,36	3,64	226
20	VE20-1,7HS10-03P2	1,7	5,72	29,5	3,63	90,33 ¹⁾	46,38 ¹⁾	21,31	9,19	751
21	VE21-1,7HS20-01P1	1,7	11,44	29,5	2,74	82,19 ¹⁾	59,43 ¹⁾	13,61	4,58	492
22	VE22-1,3HS00-01P1	1,3	0	29	3,71	80,70 ¹⁾	35,79 ¹⁾	7,00	3,91	248
23	VE23-1,3HS10-04P2	1,3	5,72	30	2,51	63,19 ¹⁾	48,99 ¹⁾	8,73	3,56	395
24	VE24-1,3HS20-02P1	1,3	11,44	29	1,87	10,55 ¹⁾	9,48 ¹⁾	8,24	17,38	2.108
25	VE25-1,3HS20-01P1	1,3	11,44	29	2,02	27,45 ¹⁾	31,1 ¹⁾	5,61	3,61	481
26	VE26-1,5HS20-01P1	1,5	11,44	29	1,91	9,40 ¹⁾	10,42 ¹⁾	6,16	11,82	1.737
27	VE27-1,5HS15-03P2	1,5	8,58	29	3,29	83,87 ¹⁾	43,11 ¹⁾	13,70	6,36	554
28	VE28-1,7HS20-02P1	1,7	11,44	30	2,60	43,77 ²⁾	33,71 ²⁾	15,18	9,01	893
29	VP01-FV1	unbek.	unbek.	30	1,55	9,31 ²⁾	12,01 ²⁾	2,68	4,46	1.197
30	VP02-FV2	unbek.	unbek.	30	1,29	5,33 ²⁾	8,28 ²⁾	1,96	4,73	990
31	VP03-FV3	unbek.	unbek.	30	1,24	4,81 ²⁾	7,73 ²⁾	1,85	4,78	1.044
32	VP04-FB1	unbek.	unbek.	30	1,85	15,74 ²⁾	17,05 ²⁾	1,40	1,64	211
33	VP05-FB2	unbek.	unbek.	30	2,35	32,58 ²⁾	27,69 ²⁾	4,11	2,97	367
34	VP06-FB3	unbek.	unbek.	30	1,41	7,01 ²⁾	9,94 ²⁾	0,53	1,07	273
35	VP07-FG1	unbek.	unbek.	50	1,42	11,80 ²⁾	16,68 ²⁾	2,41	2,89	787
36	VP08-FG2	unbek.	unbek.	50	1,84	25,82 ²⁾	28,11 ²⁾	3,80	2,70	537
37	VP09-FB4	unbek.	unbek.	50	2,25	47,46 ²⁾	42,19 ²⁾	5,39	2,56	301
38	VP10-FB5	unbek.	unbek.	50	0,99	4,04 ²⁾	8,17 ²⁾	1,40	3,43	676
39	VP11-FS1	unbek.	unbek.	100	1,13	11,92 ²⁾	21,16 ²⁾	3,34	3,16	870
40	VP12-FG3-1							7,00	3,07	470
41	VP12-FG3-2 ³⁾							7,74	3,40	461
42	VP12-FG3-3 ³⁾	unbek.	unbek.	100	1,65	37,66	45,56 ²⁾	7,87	3,45	451
43	VP12-FG3-4A ³⁾⁴⁾							7,20	3,16	473
44	VP12-FG3-4 ³⁾							7,20	3,16	473

1) aus gescannten Werten

3) von Hand gerichtet, erneut untersucht

5) Kleinstwert

2) aus $t_{0 \text{ arth}}$ berechnet

4) siebabgewandte Seite unten

6) gemittelter Wert

Bild 8.4: Werkstoffkennwerte

Nr.	Bezeichnung	Herstellkennwerte		Geometrie-kennwerte			Pressverhaltenskennwerte	
		Stoffkonzentration	Pressdruck	Höhe	Höhe beim Pressen	Höhe nach dem Pressen	Verdichtungsgrad	Rückverformungsgrad
		κ %	p N/mm ²	$t_{0\text{ arth}}$ mm	$t_{p\text{ P}}$ mm	$t_{p\text{ arth}}$ mm	λ_V %	λ_R %
1	VE01-1,5HS15-02P1	1,5	8,58	1,47	0,52	1,12	35,1	76,2
2	VE02-1,5HS15-01P1	1,5	8,58	1,55	0,33	0,94	21,5	60,7
3	VE03-1,5HS00-01P1	1,5	0	4,10	0,45	1,30	11,0	31,7
4	VE04-1,5HS00-02P1	1,5	0	4,21	0,53	1,33	12,7	31,5
5	VE05-1,5HS00-05P2	1,5	0	4,90	0,50	1,34	10,2	27,3
6	VE06-1,5HS10-04P2	1,5	5,72	3,45	0,57	1,10	16,4	31,8
7	VE07-1,5HS10-05P2	1,5	5,72	2,33	0,35	1,64	15,0	70,1
8	VE08-1,5HS20-03P2	1,5	11,44	3,01	0,42	1,15	14,0	38,2
9	VE09-1,5HS20-04P2	1,5	11,44	3,02	0,72	1,65	23,7	54,5
10	VE10-1,5HS05-03P1	1,5	2,86	2,34	0,57	1,39	24,2	59,5
11	VE11-1,5HS05-02P1	1,5	2,86	2,41	0,62	1,54	25,6	64,1
12	VE12-2,0HS10-02P2	2,0	5,72	2,29	0,57	1,32	24,7	57,6
13	VE13-2,0HS10-03P2	2,0	5,72	2,50	0,57	1,39	22,7	55,6
14	VE14-2,0HS00-01P1	2,0	0	7,97	0,80	2,07	10,0	25,9
15	VE15-2,0HS15-01P1	2,0	8,58	2,43	0,35	1,35	14,4	55,6
16	VE16-1,0HS00-02P1	1,0	0	2,86	0,28	0,78	9,9	27,1
17	VE17-1,0HS10-08P3	1,0	5,72	1,52	0,27	0,83	17,6	54,7
18	VE18-1,0HS20-02P1	1,0	11,44	1,25	0,35	0,86	28,0	69,1
19	VE19-1,7HS00-01P1	1,7	0	5,74	0,75	2,05	13,1	35,7
20	VE20-1,7HS10-03P2	1,7	5,72	3,63	0,82	2,12	22,5	58,4
21	VE21-1,7HS20-01P1	1,7	11,44	2,87	0,65	1,65	22,6	57,6
22	VE22-1,3HS00-01P1	1,3	0	3,67	0,45	1,30	12,3	35,4
23	VE23-1,3HS10-04P2	1,3	5,72	2,67	0,67	1,44	25,0	54,1
24	VE24-1,3HS20-02P1	1,3	11,44	1,94	0,58	1,30	30,1	67,3
25	VE25-1,3HS20-01P1	1,3	11,44	2,03	0,47	1,17	31,9	58,8
26	VE26-1,5HS20-01P1	1,5	11,44	1,88	0,55	1,32	29,3	70,4
27	VE27-1,5HS15-03P2	1,5	8,58	3,59	0,67	1,89	18,6	52,7
28	VE28-1,7HS20-02P1	1,7	11,44	2,71	0,75	1,80	27,7	66,4
29	VP01-FV1	unbek.	unbek.	1,55	0,25	0,64	16,1	41,0
30	VP02-FV2	unbek.	unbek.	1,27	0,25	0,52	19,7	41,1
31	VP03-FV3	unbek.	unbek.	1,25	0,25	0,57	19,9	45,5
32	VP04-FB1	unbek.	unbek.	2,17	0,27	0,63	12,4	28,8
33	VP05-FB2	unbek.	unbek.	2,23	0,33	0,81	14,8	36,2
34	VP06-FB3	unbek.	unbek.	0,87	0,10	0,39	11,5	44,3
35	VP07-FG1	unbek.	unbek.	1,46	0,23	0,70	15,8	48,3
36	VP08-FG2	unbek.	unbek.	1,82	0,25	0,69	13,7	37,8
37	VP09-FB4	unbek.	unbek.	2,26	0,35	0,80	15,5	35,4
38	VP10-FB5	unbek.	unbek.	1,24	0,13	0,42	10,5	33,7
39	VP11-FS1	unbek.	unbek.	1,10	0,15	0,45	13,7	41,3
40	VP12-FG3-1	unbek.	unbek.	1,81	0,27	0,73	14,9	40,3
41	VP12-FG3-2							
42	VP12-FG3-3							
43	VP12-FG3-4A							
44	VP12-FG3-4							

Bild 8.5: Kennwerte für das Pressverhalten

Betrachtung des Verdichtungsgrades λ_V und des Rückverformungsgrades λ_R

Zur Auswertung der Kennwerte werden zunächst nur selbstgefertigte Proben betrachtet. Für diese werden der Verdichtungsgrad λ_V und der Rückverformungsgrad λ_R über dem Pressdruck (Flächenpressung) p , der beim Pressen der noch nassen Proben geherrscht hat, aufgetragen. Dabei sind keine signifikanten Abhängigkeiten von den jeweiligen Stoffkonzentrationen κ erkennbar, daher wird hierüber der arithmetische Mittelwert ge-

bildet. Deutliche Abhängigkeiten vom Pressdruck p sind dagegen feststellbar. Die Zusammenhänge sind in **Bild 8.6** dargestellt.

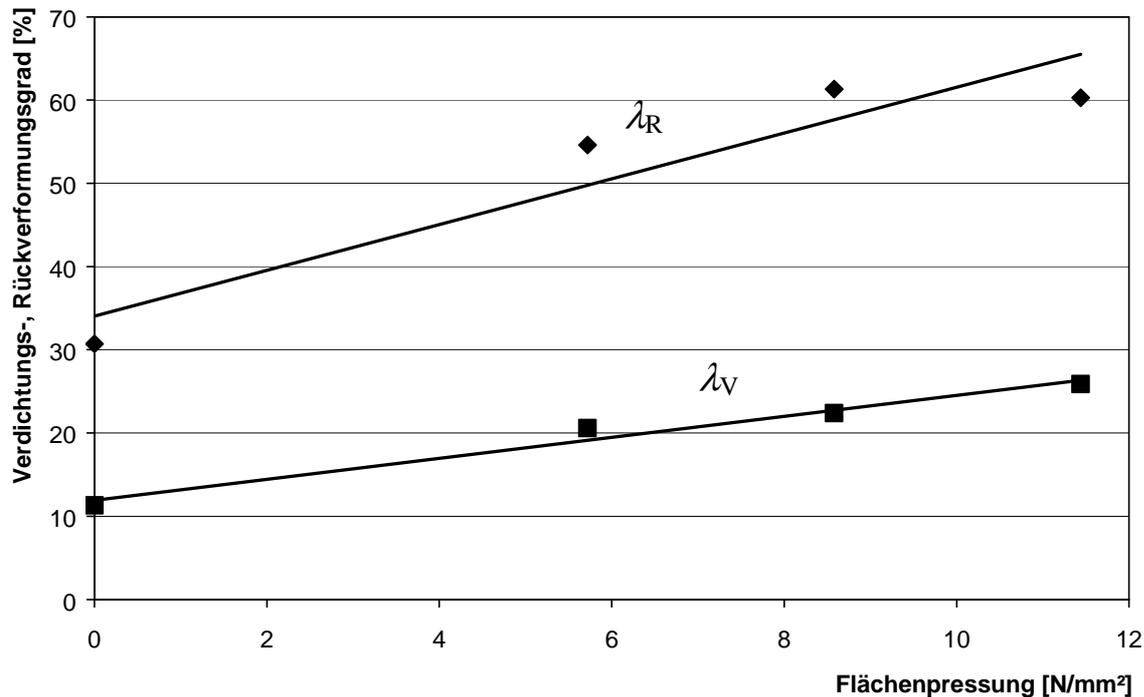


Bild 8.6: Verdichtungsgrad λ_V und Rückverformungsgrad λ_R ; Stoffkonzentrationen κ gemittelt

Unmittelbar erkennbar ist, dass sowohl der Verdichtungsgrad als auch der Rückverformungsgrad mit steigendem Pressdruck ebenfalls ansteigen. Stark vereinfachend kann der Zusammenhang als linear angenommen werden. Auf Grund der geringen Anzahl der verwendbaren Messwerte kann nur eine überschlägige Aussage über die Zusammenhänge getroffen werden. Dennoch wird versucht, die Werte einander zuzuordnen, indem aus den erkennbaren Zusammenhängen Geradengleichungen abgeleitet werden. Diese lauten wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Verdichtungsgrad} \quad \lambda_V &= 0,013 \cdot p/[\text{N/mm}^2] + 0,11 \quad \cdot 100\% \\ \text{Rückverformungsgrad} \quad \lambda_R &= 0,028 \cdot p/[\text{N/mm}^2] + 0,33 \quad \cdot 100\% \end{aligned}$$

Es handelt sich um zugeschnittene Größengleichungen, in die der Pressdruck p in der Einheit $[\text{N/mm}^2]$ einzusetzen ist. Damit lassen sich Rückschlüsse auf den Pressdruck bei der Produktherstellung und auf das Verhältnis von Verdichtungsgrad λ_V und Rückverformungsgrad λ_R ziehen:

$$p/[\text{N/mm}^2] = 76,9 \cdot \lambda_V - 9 \quad \text{bzw.} \quad p/[\text{N/mm}^2] = 35,7 \cdot \lambda_R - 12$$

$$\lambda_R = 2,15 \cdot \lambda_V + 0,08$$

Die Beziehungen wurden rein empirisch gewonnen und sind vermutlich sehr stark fehlerbehaftet, da nur wenige Messwerte vorliegen. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass die Proben auf derselben Anlage, aus dem gleichen Werkstoff und mit ansonsten auch weitgehend vergleichbaren Parametern hergestellt wurden. In **Bild 8.7** ist der ermittelte Zusammenhang zwischen den Werten λ_R und λ_V als Linienzug dargestellt. Die einzelnen Punkte sind die entsprechenden Werte der Fremdprodukte. Berücksichtigt man die stark unterschiedlichen Randbedingungen, wie Rohstoff, Anformdruck, Stoffkonzentration usw., ist die Übereinstimmung als sehr gut anzusehen. Demnach ist bei

allen betrachteten Produkten der Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad und Rückverformungsgrad weitgehend gleich.

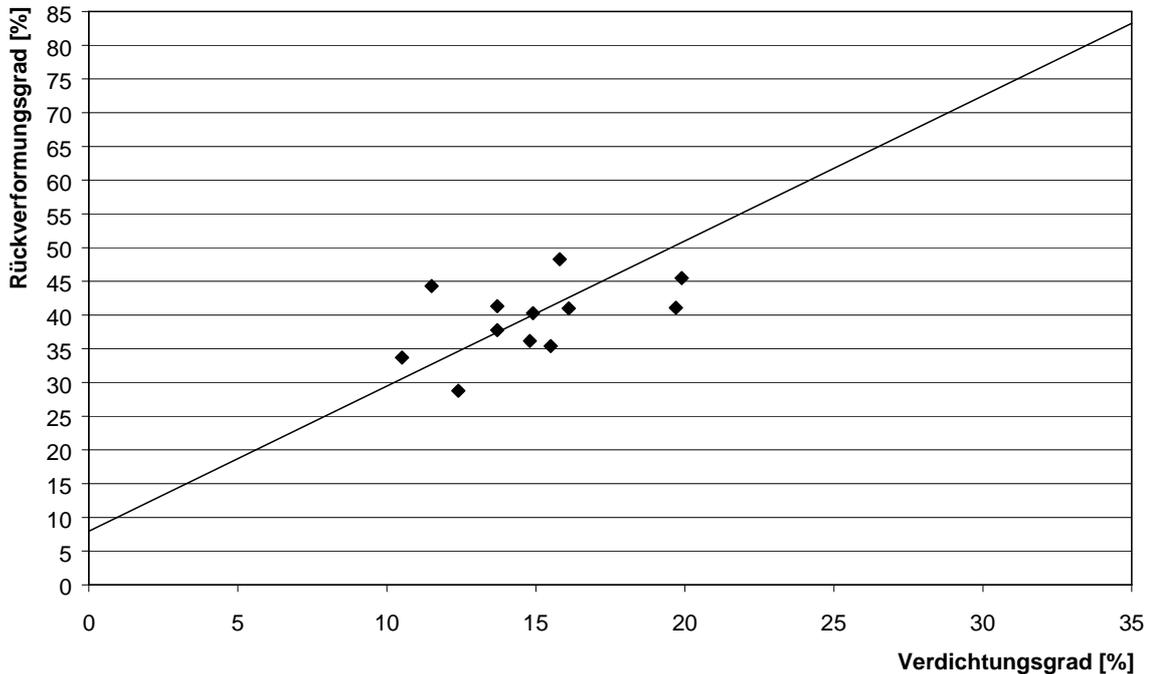


Bild 8.7: Rückverformungsgrad λ_R in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad λ_V ; Linienzug für eigengefertigte Produkte, Punkte für Fremdprodukte

Der prinzipielle Zusammenhang ist folgendermaßen erklärbar: Durch einen Pressvorgang nach dem Anformen wird das Produkt so verdichtet, dass zwischen den Fasern weniger große Freiräume vorhanden sind. Daher ist es naheliegend, dass das stärker gepresste Produkt (höherer Pressdruck p) sich später nur geringfügiger verdichten lässt, also einen größeren Verdichtungsgrad aufweist. Charakteristisch ist jedoch, dass sich der Rückverformungsgrad prinzipiell gleich verhält, dass also das stärker gepresste Produkt sich trotz der Verdichtung auch besser zurückverformen kann. Darüber hinaus ist es unter Umständen möglich, aus dem Verdichtungsgrad und damit auch aus dem Rückverformungsgrad auf die Herstellung des Produktes, insbesondere auch auf Pressvorgänge nach dem Anformen, zurückzuschließen. Dieser Zusammenhang soll als nächstes untersucht werden.

Zur Kontrolle dieser Übertragbarkeit wird basierend auf den obigen Formeln, die für selbstgefertigte Proben ermittelt wurden, der Pressdruck p für Fremdproben bestimmt. Wenn die Zuordnung möglich ist, müsste sich sowohl ausgehend vom Verdichtungsgrad λ_V als auch vom Rückverformungsgrad λ_R der gleiche Wert p ergeben. **Bild 8.8** zeigt die entsprechende tabellarische Zusammenstellung. Die Abweichung wird als Differenz der beiden Pressungen, bezogen auf den betragsmäßig größeren der beiden Werte, berechnet. Sie wird wie folgt gewertet:

+ Abweichung < 10% o Abweichung < 50% - Abweichung > 50%

Bei zwei Proben liegt eine sehr gute Übereinstimmung vor. Hier ist es anscheinend tatsächlich möglich, aus dem Verdichtungsgrad auf den Pressdruck zu schließen. Beide Proben stammen aus vergleichbaren Fremdprodukten. Der berechnete Pressdruck entspricht einer leichten Verdichtung des Produktes bei der Herstellung; dieses kann bei Betrachtung des Produktes augenscheinlich bestätigt werden. Auf Grund der zahlreichen

Herstellparameter und des geringen Umfangs der bisher durchgeführten Untersuchungen kann auch eine Abweichung bis 50% noch als brauchbar angesehen werden. Bei den übrigen Proben sind die Abweichungen so stark, dass das betrachtete Verfahren nicht angewendet werden kann.

Nr.	Bezeichnung	Pressverhaltenskennwerte		Pressdruck p			Wertung
		Verdichtungsgrad λ_V %	Rückverformungsgrad λ_R %	ermittelt aus λ_V p_{λ_V} N/mm ²	ermittelt aus λ_R p_{λ_R} N/mm ²	Abweichung $\frac{ p_{\lambda_V} - p_{\lambda_R} }{\max(p_{\lambda_V}, p_{\lambda_R})} \cdot 100\%$ %	
29	VP01-FV1	16,1	41,0	3,38	2,64	21,9	o
30	VP02-FV2	19,7	41,1	6,15	2,67	56,7	-
31	VP03-FV3	19,9	45,5	6,30	4,24	32,7	o
32	VP04-FB1	12,4	28,8	0,53	-1,70	131,2	-
33	VP05-FB2	14,8	36,2	2,38	0,92	61,3	-
34	VP06-FB3	11,5	44,3	-0,16	2,80	105,7	-
35	VP07-FG1	15,8	48,3	3,15	5,24	39,9	o
36	VP08-FG2	13,7	37,8	1,53	1,49	2,6	+
37	VP09-FB4	15,5	35,4	2,92	0,64	78,1	-
38	VP10-FB5	10,5	33,7	-0,92	0,03	103,3	-
39	VP11-FS1	13,7	41,3	1,54	2,74	43,8	o
40	VP12-FG3	14,9	40,3	2,46	2,38	3,3	+

Bild 8.8: Pressdruck p , ermittelt aus Verdichtungsgrad λ_V und Rückverformungsgrad λ_R

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass unter bestimmten Voraussetzungen tatsächlich aus dem Verdichtungsgrad auf Pressvorgänge bei der Herstellung zurückgeschlossen werden kann. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn vergleichbare Herstellparameter vorgelegen haben. Durch Modifikation des entwickelten Modells könnten die Genauigkeit und die Übertragbarkeit noch deutlich verbessert werden. Hier liegt ein Ansatzpunkt für weiterführende Betrachtungen.

Betrachtung des Elastizitätsmoduls E und der ertragbaren Spannung σ

Die für die Biegebelastung relevanten Werkstoffkenngrößen sind der Elastizitätsmodul E sowie die ertragbare Biegespannung σ . Da gezeigt werden konnte, dass zwischen dem Verdichtungsgrad λ_V und dem Rückverformungsgrad λ_R ein linearer Zusammenhang besteht, wird im Folgenden nur noch die Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad λ_V betrachtet. In den folgenden Diagrammen sind der Elastizitätsmodul E und die ertragbare Spannung σ in Abhängigkeit von der Pressung p und von der Stoffkonzentration κ dargestellt. Auffällig ist, dass die Probe 1 äußerst hohe Werte für beide Größen aufweist, die bei einem Mehrfachen der Werte der übrigen Proben liegt, siehe **Bild 8.4**. Vermutlich basiert dies auf einem Messfehler; aus diesem Grund wird Probe 1 im Folgenden nicht mehr berücksichtigt. Die Proben 10 und 11 liegen bei beiden Kennwerten deutlich über dem Bereich, der zu erwarten war. Wie sich nachträglich herausstellte, sind die Proben bei der Herstellung durch einen Bedienfehler erheblich höher gepresst worden, als erwünscht war. Der Pressdruck ist nicht mehr nachvollziehbar, so dass auch diese Proben aus der weiteren Betrachtung herausgenommen werden. Die dann verbleibenden Versuchsergebnisse zeigen **Bild 8.9** und **Bild 8.10**.

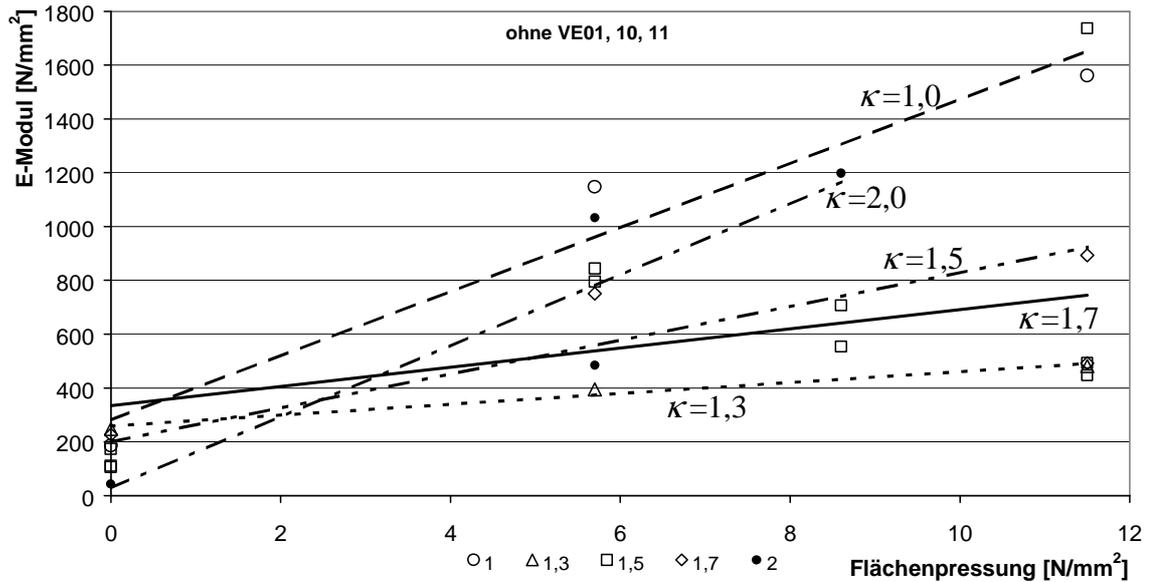


Bild 8.9: Elastizitätsmodul E in Abhängigkeit vom Pressdruck p und der Stoffkonzentration κ

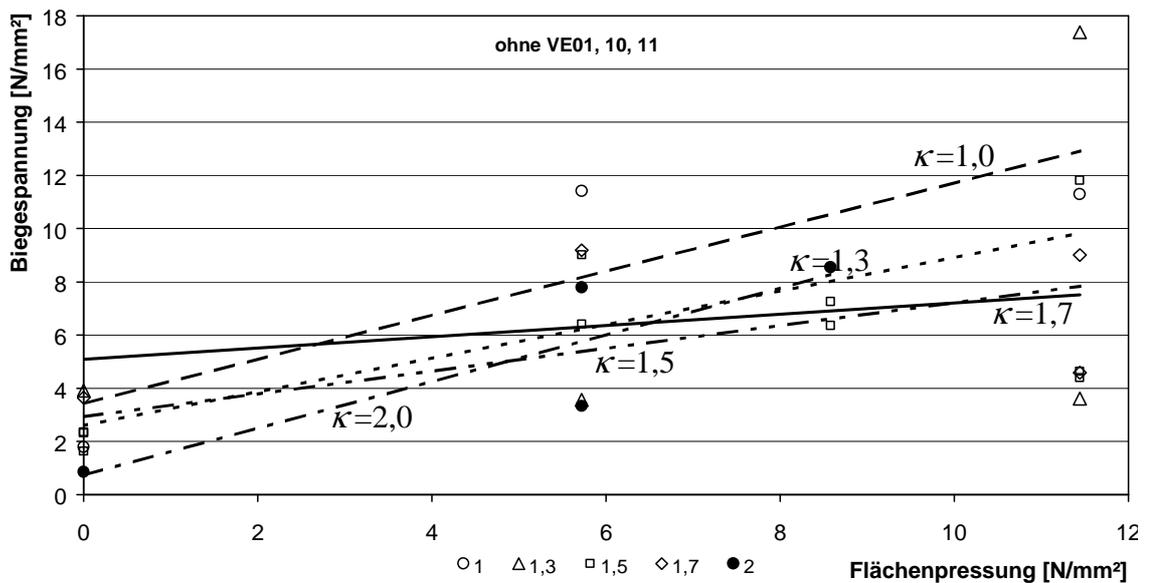


Bild 8.10: Ertragbare Spannung σ in Abhängigkeit vom Pressdruck p und der Stoffkonzentration κ

Es ist erkennbar, dass mit steigender Flächenpressung p sowohl der Elastizitätsmodul E als auch die ertragbare Spannung σ ansteigen. Dieser Effekt war zu erwarten, da mit steigendem Pressdruck die Verdichtung des Bauteils zunimmt. Jedoch ist dies nur als tendenzielle Aussage möglich, da die Streuung der Werte sehr groß ist. Eindeutige quantifizierbare Aussagen können daher nicht getroffen werden. In Kapitel 6.6 wurde gezeigt, dass die ertragbare Spannung linear mit dem Geometriefaktor λ_G zunimmt, der das Dickenverhältnis vom ungepressten zum gepressten Werkstück angibt, s. S. 96. Dieser Faktor kann bei den bestehenden Proben nicht ohne Weiteres ermittelt werden; ohnehin ist eine reproduzierbare Ermittelbarkeit dieses Faktors fraglich. Dennoch konnte der prinzipielle Effekt gezeigt werden.

$$\sigma_{z \text{ zul } p} = \lambda_G \cdot \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_B} \cdot \sigma_{z \text{ zul } u}$$

Auch der E-Modul steigt mit zunehmender Verdichtung des Werkstoffs, tendenziell sogar in stärkerem Maße. Auch dieser Effekt wurde vorausgesehen; in Kapitel 6.6 wurde eine theoretische Zunahme mit der dritten Potenz des Geometriefaktors λ_G berechnet. Da der Geometriefaktor selbst nicht bekannt ist, kann auch hier nur eine qualitative Aussage dahingehend gemacht werden, dass der Anstieg stärker ausfällt.

Insgesamt konnten die in Kapitel 6.6 theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge experimentell verifiziert werden, wenn auch nur qualitativ. Hier ist eine wertvolle Grundlage für weitere Untersuchungen vorhanden. Qualitativ kann ausgesagt werden, dass die ertragbare Spannung für ungespresste Proben im Bereich von ca. 1,6 bis 4 N/mm² liegt; sie kann durch Pressvorgänge nach dem Anformen bis zu einem Werte von etwa 12 N/mm² gesteigert werden, eventuell auch noch darüber hinaus. Der Elastizitätsmodul bewegt sich bei ungespressten Proben in der Größenordnung von ca. 40 bis 250 N/mm², bei gepressten Proben bei bis zu 2000 N/mm². Im Vergleich dazu weisen die Fremdproben Festigkeiten von 2,5 bis 4,8 N/mm² auf bei E-Modulen von 200 bis 1200 N/mm². Da die Fremdproben augenscheinlich nicht oder nur geringfügiger als die eigengefertigten Proben verdichtet sind, kann auch hiermit gezeigt werden, dass Pressvorgänge die Festigkeit und die Steifigkeit der Proben erheblich steigern.

Die Versuche 40 bis 44 wurden mit derselben Probe ausgeführt. Diese wurde nach dem Versuch von Hand wieder soweit gerichtet, dass sie augenscheinlich gerade war, und erneut belastet (Versuch 41). Danach wurde der Vorgang wiederholt (Versuch 42). Nach erneutem Richten wurde die Probe für Versuch 43 mit der siebabweandten Seite nach unten aufgelegt und erneut belastet. Versuch 44 wurde mit der erneut gerichteten Probe durchgeführt, wobei jedoch die Siebseite wieder nach unten angeordnet wurde.

Die auf diese Weise ermittelten Werte zeigen keine signifikanten Abweichungen. Der Mittelwert der maximal ertragbaren Spannung beträgt 3,28 N/mm²; die größte Abweichung hiervon beträgt 7%; im arithmetischen Mittel beträgt der E-Modul 622,6 N/mm² mit einer maximalen Abweichung von 2,6%. Die Werte sind also sehr gut reproduzierbar. Außerdem ist – zumindest bei dieser Probe – kein Unterschied zu erkennen, wenn eine der Randfasern auf Zug oder auf Druck belastet wird, d. h. die Biegefestigkeit und die Biegesteifigkeit ist in beiden Richtungen gleich groß.

Die Versuche 29 bis 44 wurden mit Proben aus handelsüblichen Produkten durchgeführt. Das Spektrum der Biegefestigkeit σ_b reicht von 1,1 N/mm² bis 4,8 N/mm², das Spektrum der E-Moduln von 285 N/mm² bis 1.616 N/mm². Es lassen sich keine Zusammenhänge mit dem Verdichtungsgrad λ_V herstellen oder mit anderen Größen herleiten. Vermutlich liegt eine Kombination zahlreicher Einflussfaktoren vor, die sich unterschiedlich auswirken. Während bei den selbstgefertigten Produkten ein einheitlicher Werkstoff vorgelegen hat, sind die Fremdprodukte aus stark unterschiedlichen Materialien hergestellt, was insbesondere die Faserlänge, das verwendete Material und auch die Verfahrensparameter betrifft. Hier müssten weiterführende Untersuchungen stattfinden, die jedoch den Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung weit überschreiten würden.

Betrachtung des ertragbaren Biegemoments M_b und der Biegesteifigkeit $E \cdot I$

Im nächsten Schritt sollen die anwendungsbezogenen Größen betrachtet werden. Dies sind das von der Probe aufnehmbare Biegemoment M_b und die Steifigkeit des Trägers

E-I. In Kapitel 6.6 wurde nachgewiesen, dass bei den betrachteten Flachproben das ertragbare Biegemoment mit steigendem Geometriefaktor λ_G , also mit zunehmender Verdichtung, fallen müsste, s. S. 97:

$$M_{b,p} = \frac{\lambda_{H2}}{\lambda_G \cdot \lambda_B} \cdot M_{b,u}$$

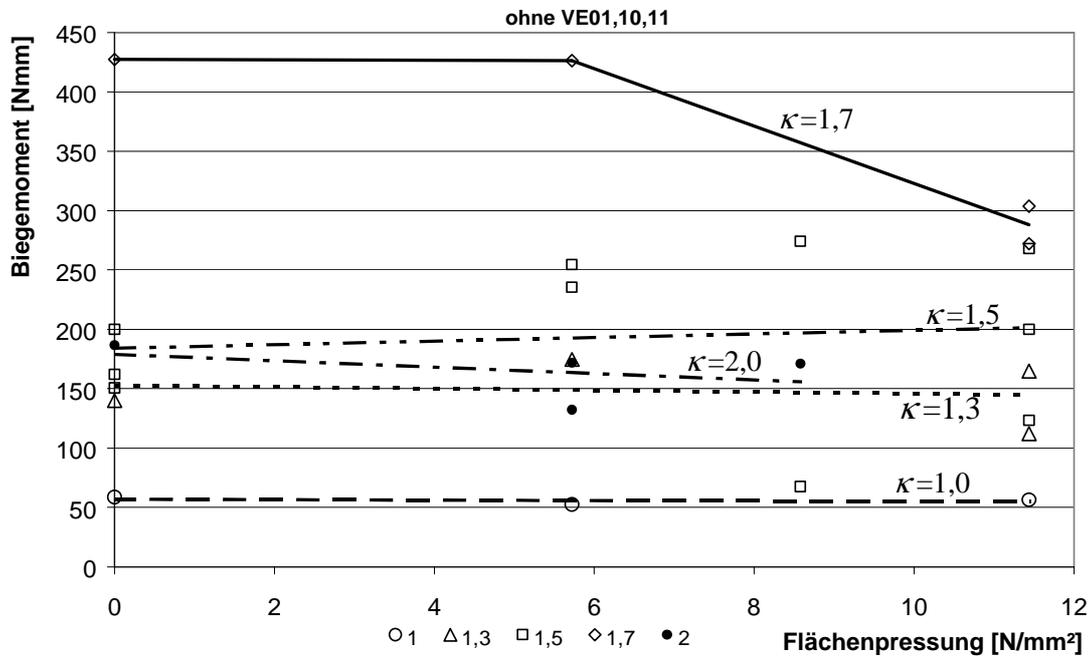


Bild 8.11: Ertragbares Biegemoment M_b in Abhängigkeit vom Pressdruck p und der Stoffkonzentration κ

Zur Untersuchung dieser Theorie werden nur selbstgefertigte Produkte betrachtet. **Bild 8.11** zeigt das von der Probe ertragbare Biegemoment über der Pressung p und der Stoffkonzentration κ aufgetragen. Trotz der geringen Anzahl der Messwerte kann eindeutig ausgesagt werden, dass die Theorie nicht bestätigt werden kann. Statt dessen ist ein nahezu waagerechter Verlauf der Trendlinien zu erkennen (die Stoffkonzentration $\kappa = 2,0$ wird zunächst nicht berücksichtigt). Demnach muss also ein Effekt bestehen, der sich gegenläufig zum Geometriefaktor verhält.

Bisher wurde nur der Geometriefaktor λ_G betrachtet; die beiden übrigen Größen wurden zunächst vernachlässigt. Der Wasserstoffbrückenfaktor λ_{H2} betrachtet die Vergrößerung der Festigkeit und Steifigkeit aufgrund einer innigeren Ausbildung der Wasserstoffbrücken, der Faserbruchfaktor λ_B berücksichtigt die Verringerung der Festigkeit und Steifigkeit in Folge von Faserbruch. Im Rahmen der Betrachtungen zur ertragbaren Spannung und zum E-Modul konnte zwar die Zunahme der Kennwerte mit zunehmendem Geometriefaktor gezeigt werden; sie konnte jedoch nicht quantifiziert werden, da der Geometriefaktor nicht zahlenmäßig ermittelt werden konnte. Deshalb konnten auch weitere Einflüsse wie der Wasserstoffbrückenfaktor λ_{H2} und der Geometriefaktor λ_G noch nicht berücksichtigt werden.

Unter der Annahme, dass das ertragbare Biegemoment mit zunehmender Verdichtung konstant bleibt, muss ein Faktor gegenläufig wirken. Der Faserbruchfaktor λ_B kann das ertragbare Biegemoment definitionsgemäß allenfalls verkleinern, nicht vergrößern. Also muss der Wasserstoffbrückenfaktor λ_{H2} die entscheidende Größe sein. Er muss sich et-

wa in umgekehrten Maße auswirken wie der Geometriefaktor. Dies würde jedoch bedeuten, dass sich ertragbare Spannung und E-Modul hierdurch zusätzlich vergrößern würden. Da deren Zunahme in Abhängigkeit vom Pressdruck nicht zahlenmäßig erfasst werden konnte, ist diese zusätzliche Vergrößerung durch die Verbesserung der Wasserstoffbrückenbildung durchaus möglich.

Auffällig ist in **Bild 8.11**, dass bei einer Konzentration von $\kappa = 1,7$ ein zunächst waagerechter und dann fallender Verlauf erkennbar ist. Hier spielt offensichtlich ein weiterer Effekt eine Rolle: Eine hohe Stoffdichte bedeutet einen relativ zum Wassergehalt hohen Faseranteil. Daher werden die Fasern beim Anformvorgang von anderen Fasern daran gehindert, eine möglichst günstige Ausrichtung zu erlangen. Aus diesen Gründen liegen bei einer hohen Stoffdichte mehr Fasern über Kreuz, und der Abstand der Fasern untereinander ist geringer. Beim Pressvorgang werden die horizontal ausgerichteten Fasern zusammengepresst; die vertikal ausgerichteten Fasern werden auf Knickung beansprucht und zusätzlich in den Verbund der übrigen Fasern gedrängt, so dass sie diesen zerstören. Bei geringerer Stoffdichte ist der Anteil querliegender Fasern geringer, da die Fasern hinreichenden Platz haben, um sich in Längsrichtung auszurichten, ohne den Verbund zu schädigen, siehe **Bild 8.12**. Ein idealer Pressvorgang erfordert in Längsrichtung ausgerichtete Fasern, die sich gegeneinander abstützen können.

Bei zu hoher Stoffkonzentration verlieren die Proben daher ihre Belastbarkeit. Dies wird auch dadurch bestätigt, dass bei den Proben mit $\kappa = 2,0$ die volle Flächenpressung $p = 11,44 \text{ N/mm}^2$ nicht aufgebracht werden konnte, ohne die Probe zu zerstören. Bei mehreren Verdichtungsversuchen platzten die Proben regelrecht auf und zeigten eine sehr starke Riss- und Lochbildung, **Bild 8.13**. Demnach besteht eine kritische Stoffkonzentration, die abhängig von der vorgesehenen Verdichtung und dem dabei wirkenden Pressdruck ist.

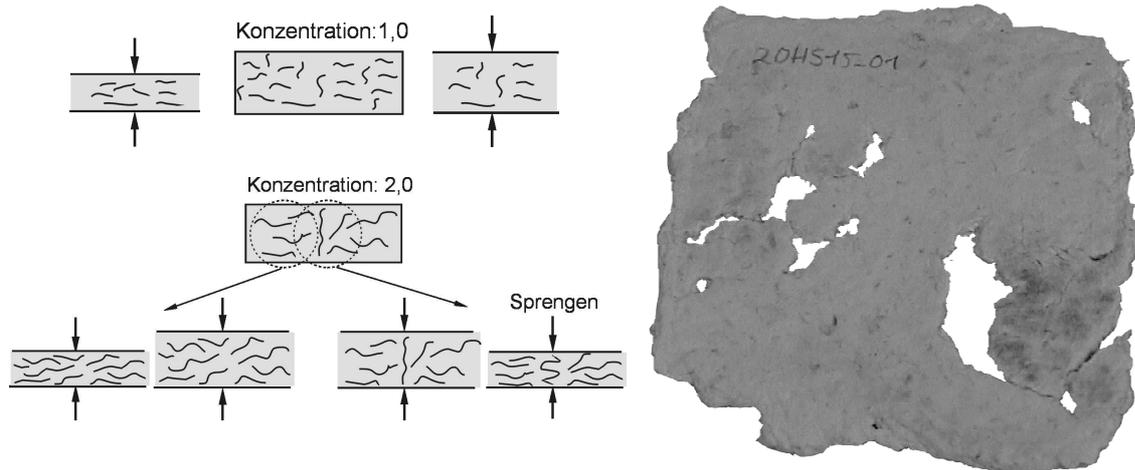


Bild 8.12: Sprengeneffekt bei hoher Stoffkonzentration κ und hohem Pressdruck p ; Vergleich unterschiedlicher Stoffkonzentrationen

Bild 8.13: Lochbildung bei hoher Stoffkonzentration κ und hohem Pressdruck p

Das entsprechende Diagramm für die Biegesteifigkeit, **Bild 8.14**, zeigt tendenziell den gleichen Verlauf und bestätigt damit die Theorie.

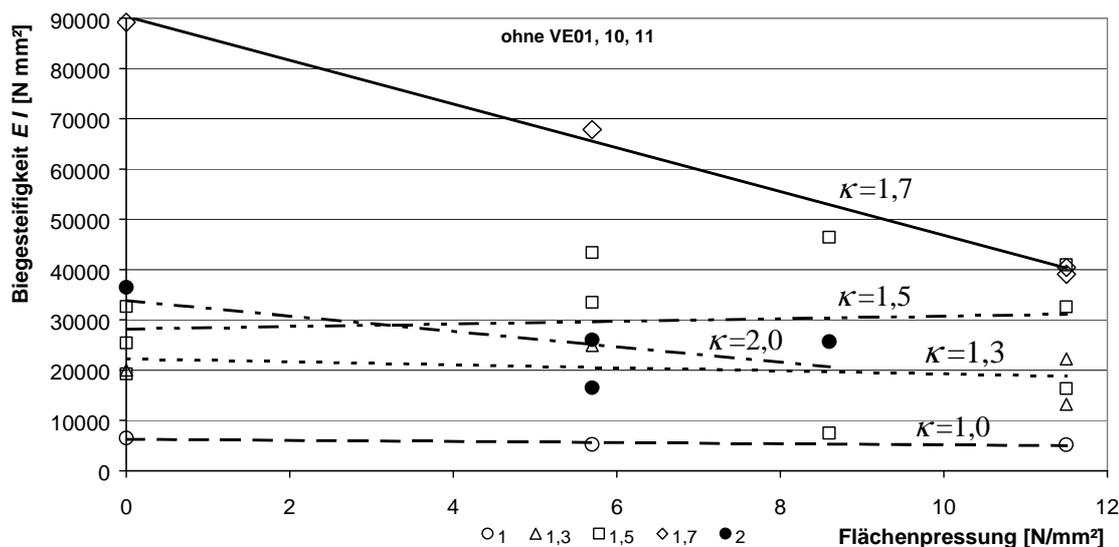


Bild 8.14: Biegesteifigkeit $E-I$ in Abhängigkeit vom Pressdruck p und der Stoffkonzentration κ

8.3 Untersuchungen an Funktionsteilen

8.3.1 Versuchsprogramm

Die Untersuchungen an Funktionsteilen werden am Beispiel der Unterarmorthese durchgeführt. Hierzu wird die Geometrie genutzt, für die bereits Anform- und Presswerkzeuge vorliegen, siehe Kapitel 5. Gegenüber den dort dargestellten Teilen sollen jedoch die Presswerkzeuge so angepasst werden, dass ein Abreißen des Werkstoffes nicht mehr auftritt. Um die Geometrie der Proben erfassen zu können, werden sie zunächst mittels des 3-D-Scanners, Kapitel 7.1, vermessen. Hieraus werden das Widerstandsmoment und das Flächenträgheitsmoment numerisch berechnet. Die Belastungsuntersuchungen sollen dann mittels der Vierpunkt-Prüfeinrichtung für Funktionsteile, Kapitel 7.4, an verschiedenen Varianten durchgeführt werden. Hierbei wird der Maximalwert des Biegemoments gemessen, so dass damit die Werkstofffestigkeit berechnet werden kann. Dieser Wert wird mit dem verglichen, der an Flachproben ermittelt wurde. Im nächsten Schritt wird die Geometrie der Orthese so verbessert, dass das Widerstandsmoment für den gefährdeten Bereich entsprechend erhöht wird.

Die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung ist identisch mit der vorherigen bei der Untersuchung der Flachproben:

- Erfassung der Klima- und Randbedingungen
- Durchführung des Vierpunkt-Biegeversuchs
- Entnahme einer Rundprobe und Durchführung des Verdichtungsversuchs

Im Einzelnen sind dann folgende Orthesen zu untersuchen:

- Ausgangsgeometrie – ungespresst
- Ausgangsgeometrie – gepresst
- Verbesserte Geometrie – gepresst

Die Versuchsparameter sind mit denen bei den Flachproben weitgehend identisch. Nach der Erfassung der Geometrie und der klimatischen Randbedingungen wird der Vierpunkt-Biegeversuch mit der Prüfeinrichtung gemäß Kapitel 7.4 durchgeführt.

8.3.2 Funktions- bzw. belastungsgerechte Gestaltung der Faserformorthese

Zur Verbesserung der Faserformorthese wird der Querschnitt unter verschiedenen Gesichtspunkten variiert. Die Eignung der jeweiligen Lösung wird durch die Bestimmung des Flächenmomentes zweiten Grades verglichen, wobei diejenige Lösung als besser bewertet wird, deren Flächenmoment zweiten Grades höher ist. Die innere Kontur des Werkstücks soll erhalten bleiben, so dass Variationen nur durch eine Anpassung der Außenkontur erfolgen können. Zur Berechnung wird das Programm Mathematica eingesetzt.

Zunächst wird von der vorhandenen Orthesengeometrie ausgegangen, die mittels des 3-D-Scanners an einer vorhandenen Faserformorthese erfasst wird. Betrachtet wird der Querschnitt mit dem geringsten Flächenmoment zweiten Grades, von dem die Innenkontur übernommen wird.

Ausgehend von dieser Innenkontur werden nun im ersten Schritt Querschnitte mit einer konstanten Wandstärke t_0 von 2,0 mm, 4,0 mm, 6,0 mm und 8,0 mm betrachtet. Hierfür wird jeweils das Flächenmoment zweiten Grades I_{zs} bezogen auf die waagrecht durch den Schwerpunkt verlaufende Achse berechnet. Hiermit und mit dem zugehörigen Randfaserabstand wird die Spannung σ_b berechnet, die am unteren Rand der Querschnittsfläche wirkt, wenn die Orthese mit einem Biegemoment von $M_b = 1.000 \text{ Nmm}$ belastet wird. Die Ergebnisse sind in **Bild 8.15**, Variante 1, dargestellt.

Problematisch ist der Widerspruch zwischen der Forderung nach einer möglichst großen Wandstärke, die ein hohes Flächenmoment zweiten Grades bewirkt, und der Forderung nach einer Wandstärke, die so klein ist, dass eine wirtschaftliche Produzierbarkeit gewährleistet ist. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt der Querschnitt belastungsgerecht angepasst.

Bei der Variante 2 wird mit Hilfe einer trigonometrischen Funktion die Materialstärke über den Querschnitt von 2 mm bis 8 mm variiert. Dabei wird so vorgegangen, dass an den unteren Randbereichen, d. h. für $y = 0$, und im oberen Bereich, genauer für $z = 0$, die maximale Wandstärke 8 mm ist. An der dünnsten Stelle des Querschnitts soll eine Wandstärke von 2 mm vorliegen. Die Laufvariable φ wird gemäß **Bild 8.16** oben angenommen. Es wird folgende Funktion verwendet:

$$t(\varphi) = 2 \text{ mm} + (8 \text{ mm} - 2 \text{ mm}) \cdot \cos^2(2\varphi)$$

Da einerseits die hierfür auftretende Biegespannung im Bereich zwischen der Spannung der Querschnitte mit einer konstanten Wandstärke von 6 mm und 8 mm liegt und andererseits die Wandstärke in weiten Bereichen so reduziert werden konnte, dass eine sinnvolle Fertigung noch möglich ist, wird im Folgenden von dieser Geometrie ausgegangen. Um den Aufwand für die Herstellung der erforderlichen Presswerkzeuge in Grenzen zu halten, werden die bestehenden Werkzeuge so überarbeitet, dass die berechnete Kontur näherungsweise erreicht wird. Hierzu werden im oberen Bereich und in den Randbereichen des Querschnitts Nuten eingefräst, die sich als Rippen am Werkstück abformen. Der mit diesen Werkzeugen herstellbare Querschnitt ist in **Bild 8.16** unten gezeigt.

Variante 1)	Kennwerte		
	Wand- stärke t_0 mm	Flächen- moment 2. Grades I_{zs} mm ⁴	Biege- spannung σ_b N/mm ²
1	2,0	34.631	0,71
	4,0	74.943	0,34
	6,0	121.710	0,21
	8,0	175.751	0,15
2		133.253	0,19

- 1) 1 = Wandstärke konstant
2 = Wandstärke angepasst mittels der beschriebenen Funktion

Bild 8.15: Kennwerte der verbesserten Querschnitte

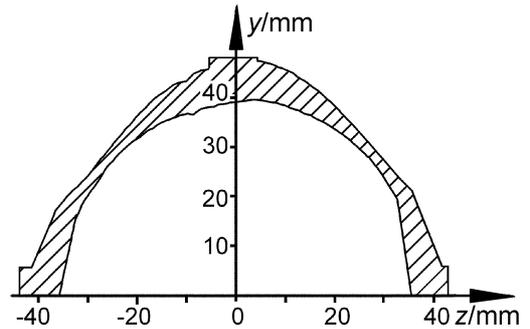
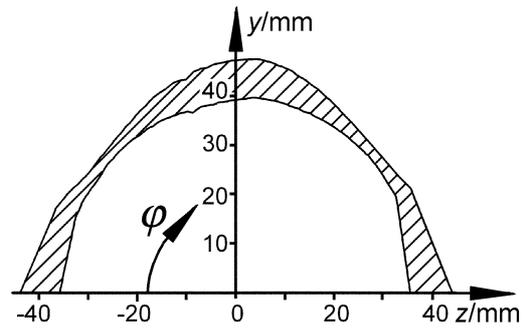


Bild 8.16: Querschnitte; oben: Variante 2, unten: entsprechend der Werkzeugänderung

Mit den entsprechend angepassten Werkzeugen werden weitere Versuchsmuster hergestellt. **Bild 8.17** zeigt oben eine ungepresste Orthese mit der ursprünglichen Geometrie; darunter ist eine gepresste Ausführung dieses Versuchssubjektes abgebildet. Ganz unten ist eine Orthese dargestellt, die in die in **Bild 8.16** unten gezeigte Geometrie gepresst wurde.

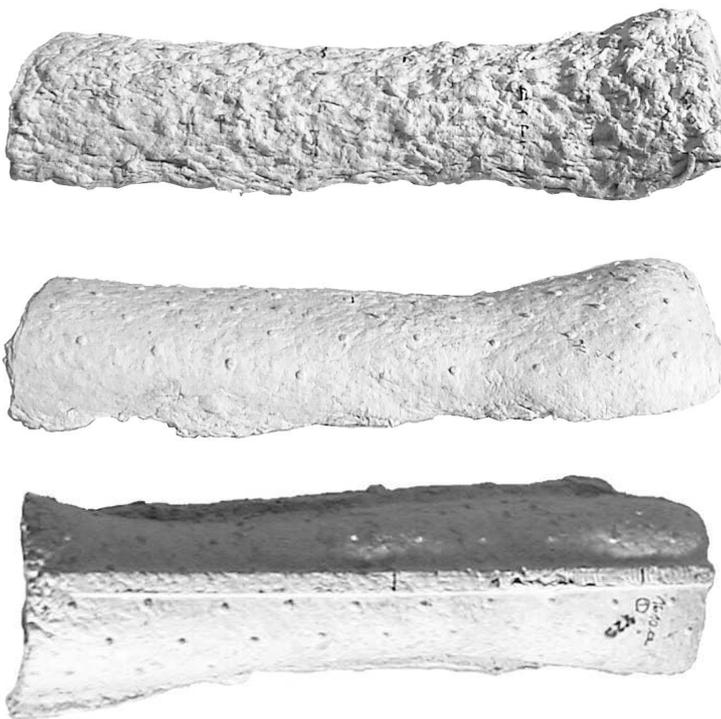


Bild 8.17: Orthesen; oben ungepresst; Mitte gepresst; unten verbesserte Geometrie

8.3.3 Versuchsergebnisse der Faserformorthesen

Nr	Bezeichnung	Herstell-kennwerte		Verdichtungs-kennwerte		Geometrie-kennwerte		max. ertragb. Moment $M_{b \max}$ Nmm	Werkstoff-kennwert Biege-festigkeit σ_b N/mm ²
		Stoff-konzentration κ %	Press-kraft F_p N	Verd.-grad λ_v %	Rück-verform.-grad λ_R %	Flächen-moment 2. Grades $I^1)$ mm ⁴	Wider-stands-moment $W_b^2)$ mm ³		
1	S01 1,2HS	1,2	0	22,5	27,7	89.660	11.165	9.200	0,82
2	S03 1,2HS	1,2	0	20,7	25,1	27.866	5.393	6.850	1,27
3	S04 1,2HS	1,2	0	23,2	27,2	78.807	14.697	9.750	0,66
4	S05 1,2HS	1,2	0	4,4	5,6	62.094	6.804	9.700	1,42
5	S06 1,2HS05	1,2	5.000	4,7	89,1	49.071	7.967	11.100	1,39
6	S08 1,2HS05	1,2	5.000	22,9	31,5	37.360	5.866	9.150	1,56
7	S09 1,2HS05	1,2	5.000	24,1	31,9	37.541	5.407	8.650	1,60
8	S27 1,2HS05 v ³⁾	1,2	5.000	30,1	40,1	146.444	25.348	3.600	0,14
9	S28 1,2HS05 v ³⁾	1,2	5.000	28,3	38,6	124.901	15.854	14.700	0,93
10	S29 1,2HS05 v ³⁾ 4)	1,2	5.000	34,8	45,0	155.620	28.644	11.950	0,42
11	S31 1,2HS05 v ³⁾ 4)	1,2	5.000	38,0	45,2	97.810	11.038	17.800	1,61

¹⁾ gemittelter Wert ²⁾ Kleinstwert ³⁾ verbesserte Geometrie ⁴⁾ Im Werkzeug getrocknet

Bild 8.18: Werte für Orthesen, $W_b \min$ und I_{mittel} aus gescannten Werten

Das Flächenmoment zweiten Grades und das Widerstandsmoment differieren relativ stark. Es ist also mit den vorhandenen Werkzeugen nicht gelungen, reproduzierbare Geometrien herzustellen. Die Werte für die gepressten Proben, lfd. Nr. 5 bis 7, liegen unterhalb von denen, die für die ungepressten Proben ermittelt werden können, lfd. Nr. 1 bis 4. Dies ist dadurch begründet, dass durch die Verdichtung die Wandstärke der Proben verringert wird. Die Prüfkörper mit verbesserter Geometrie weisen erheblich höhere Flächenmomente zweiten Grades und entsprechend größere Widerstandsmomente auf. Es wurde also trotz der erheblichen Schwankungen bei der Fertigung erreicht, die Geometrie des Querschnittes so zu verbessern, dass sich die beiden charakteristischen Geometriewerte verbessern. Das Ziel dieser Verbesserungsmaßnahme konnte also auch fertigungstechnisch umgesetzt werden.

Die Biegefestigkeit des Werkstoffes liegt in einem Bereich von 0,66 bis 1,61 N/mm² und damit am unteren Rand von den Werten, die an ungepressten Flachproben gemessen wurden. Es ist also offensichtlich schwieriger, bei größeren und räumlich gestalteten Objekten eine gleichmäßige Produktqualität zu erlangen. Der Pressvorgang hat an den Orthesen keine wesentliche Verbesserung der Festigkeit bewirkt. Dies war in dieser Form auch zu erwarten, da zum einen eine relativ kleine Verdichtungskraft genutzt wurde, die auf eine erheblich größere Fläche als bei den Flachproben einwirkte, und zum anderen aufgrund der räumlichen Gestaltung der Versuchskörper in bestimmten Bereichen nur relativ gering verdichtet wurde, beispielsweise in den Seitenbereichen. Dennoch waren die Versuche mit gepressten Proben erforderlich, um Vergleichswerte zu erhalten, denn Versuchskörper mit der verbesserten Geometrie waren nur mittels Pressvorgängen herstellbar. Zwar konnte das Anformwerkzeug so modifiziert werden, dass sich ein verstärkter Randbereich ausbilden konnte; dennoch wurde die endgültige Geometrie erst im Presswerkzeug erzeugt.

Die maximal ertragbaren Biegemomente weisen bei ungepressten und gepressten Werkstücken keine signifikanten Unterschiede auf; sie liegen in einem Bereich von etwa 7.000 bis 11.000 Nmm. Auch dieses Ergebnis war zu erwarten; in Kapitel 6.6 wurde

nachgewiesen, dass bei stark räumlich ausgeprägten Bauteilen der Verdichtungsvorgang kaum einen Einfluss auf die Bauteilbelastbarkeit hat.

Bei den verbesserten Orthesen konnte durch die belastungsgerechte räumliche Gestaltung das maximal ertragbare Biegemoment erheblich erhöht werden. Hierbei wurde ein höheres Flächenmoment zweiten Grades und somit auch ein größeres Widerstandsmoment erzielt. Der Prüfkörper S27, lfd. Nr. 8, fällt durch ein erheblich geringeres ertragbares Biegemoment und eine geringe Werkstofffestigkeit auf. Er wurde deshalb nach Versuchsdurchführung nochmals eingehender betrachtet. Dabei zeigte sich, dass insbesondere im Übergang zu den verstärkten Randbereichen Risse vorhanden sind, die vermutlich beim Pressen entstanden sind. Diese Schwächungen des Bauteils konnten in der Berechnung nicht mit erfasst werden.

Die Proben S29 und S31, lfd. Nr. 10 und 11, wurden im Presswerkzeug getrocknet. Hierdurch konnte zwar ein erheblich geringerer Verzug erreicht werden, doch wies die Probe S29 ebenfalls Risse auf, die auch die geringe Festigkeit begründen. Auch bei der Probe S31 konnte keine deutliche Festigkeitssteigerung beobachtet werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass auch unter den relativ eingeschränkten Fertigungsmöglichkeiten Versuchskörper hergestellt werden können, die den im Gebrauch der Unterarmorthese auftretenden Belastungen standhalten. Die Proben mit verbesserter Geometrie sind auf ein hohes ertragbares Biegemoment zu bringen, wenn die Fertigungsbedingungen vollständig beherrscht werden. Im Vergleich zu den im Kapitel 4.2 ermittelten im realen Betrieb auftretenden Belastungen können damit Werte erreicht werden, die die von Frauen aufbringbaren Momente übertreffen und auch noch 50% der von Männern aufbringbaren Momente abdecken. Dies dürfte im realen Anwendungsfall auch noch ausreichend sein, so dass es gelungen ist, die Orthese hinreichend zu dimensionieren.

9 Gestaltungsregeln

Im Gegensatz zu Bauteilen aus metallischen Werkstoffen und aus Kunststoffen bestehen für Faserformbauteile zur Zeit noch keine Gestaltungsregeln. Vielfach liegen Erfahrungswerte einzelner Hersteller vor, die jedoch als firmeninternes Wissen nicht ohne Weiteres allgemein verfügbar sind. Im Folgenden sollen einige Leitregeln, die auf durchgeführten Untersuchungen und auch dabei gewonnenen Erfahrungen basieren, zusammengestellt werden. Zu beachten ist dabei, dass Regeln, die für die Gestaltung von Bauteilen angewendet werden, stets auf den jeweiligen Herstellungsprozess und dessen Besonderheiten, auf die Anwendung der Bauteile, auf eventuelle Wieder- oder Weiterverwendung und weitere Aspekte zugeschnitten sein müssen. Im Zusammenhang mit der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Problematik ist insbesondere von Bedeutung, welcher Belastung die Bauteile ausgesetzt werden.

Die im Folgenden aufgelisteten Gestaltungsregeln sollen einen ersten Ansatz darstellen und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Grob lassen sich die Regeln in folgende Bereiche gliedern:

- Herstellgerechte Gestaltung
- Beanspruchungsgerechte Gestaltung
- Logistikkerechte Gestaltung
- Recyclinggerechte Gestaltung.

Die Regeln der beanspruchungsgerechten Gestaltung basieren auf den gewonnenen Forschungsergebnissen und werden daher am Ende dieses Kapitels behandelt, während die übrigen Regeln Erfahrungswerte darstellen.

Herstellgerechte Gestaltung

- Geringe Wandstärken bevorzugen; Wandstärken konstant halten; Formsteifigkeit durch räumliche Gestaltung bewirken
- Hinterschneidungen und Hohlkörper vermeiden
- Große waagerechte Flächen vermeiden, durch räumlich gestaltete Flächen mit definierten Auflageflächen ersetzen
- Zwischen weitgehend senkrechten Flächen Mindestabstand vorsehen von $2 \times \text{Wandstärke} + \text{Sicherheitsabstand}$
- Entformungsschrägen vorsehen
- Verzug beachten; gleichmäßige Wandstärken vorsehen; nachträgliches Pressen in beheizten Werkzeugen verringert die Verzugsgefahr (jedoch höhere Werkzeugkosten)
- Durchbrüche möglichst auf ebenen Flächen anordnen, in Wänden vermeiden, Erzeugung beim Anformvorgang kostengünstiger, aber Gefahr von „Schwimmhäuten“ und Erschwerung des Entformvorgangs, bei hohen Anforderungen nachträglich stanzen (Werkzeug teurer, aber sauberer)

Geringe und konstante Wandstärken bedeuten kurze Trocknungszeiten und damit kurze Taktzeiten und einen wirtschaftlichen Herstellprozess. Die in Folge verminderter Wandstärken geringere Bauteilfestigkeit muss dann durch entsprechende räumliche Gestaltung ausgeglichen werden, beispielsweise durch Rippen und Sicken. Derzeitige Faserformteile haben Wandstärken von ca. 1 ... 5 mm, seltener bis 10 mm und darüber.

Hinterschneidungen und Hohlkörper sollten auf jeden Fall vermieden werden. Zwar sind Herstellverfahren für derartige Bauteile schon seit langer Zeit bekannt, jedoch erfordern sie mehrteilige und damit kompliziert handhabbare Werkzeuge. Die derzeitige Anwendung der entsprechenden Verfahren für Hohlteile oder Teile mit Hinterschneidungen beschränkt sich auf die Flasche der Firma Kao, Japan, die sich jedoch auch nur in einem Prototypenstadium befindet. **Bild 9.1** zeigt Herstellmöglichkeiten für Hohlteile. Das links im Bild dargestellte Teil wird von außen an einen Siebkörper angeformt; hier muss der Siebkörper nachträglich aus dem Werkstück entfernt werden, was sehr aufwändig ist. Rechts ist ein Teil dargestellt, das von innen an die Form angeformt wird; hier muss die Form senkrecht oder waagrecht geteilt sein, siehe Pfeile. Diese Bauweise wird bei Hohlkörpern allgemein angewendet.

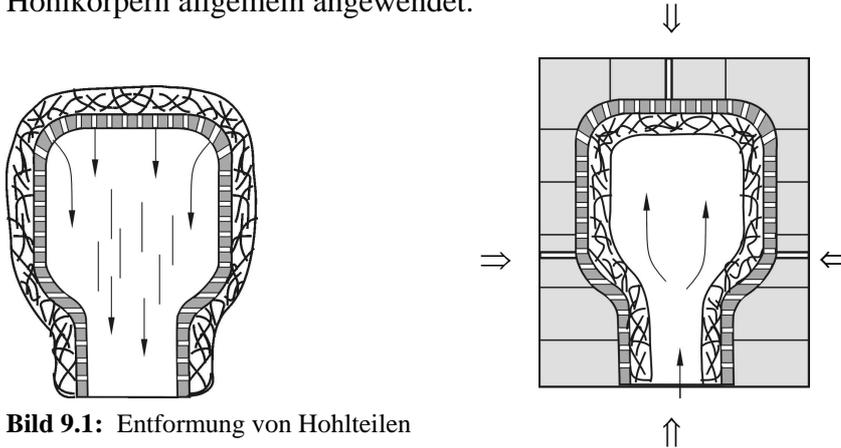


Bild 9.1: Entformung von Hohlteilen

Große waagerechte Flächen sind nur sehr aufwändig zu entwässern. Bei dem entsprechenden Vorgang besteht die Gefahr, dass Material weggeschlämmt wird und die gewünschte Werkstückdicke nicht erreicht wird. Außerdem neigen sie zum Einfallen und Beulen, **Bild 9.2**. Günstiger sind räumlich gestaltete Flächen mit definierten Auflageflächen, **Bild 9.3**.

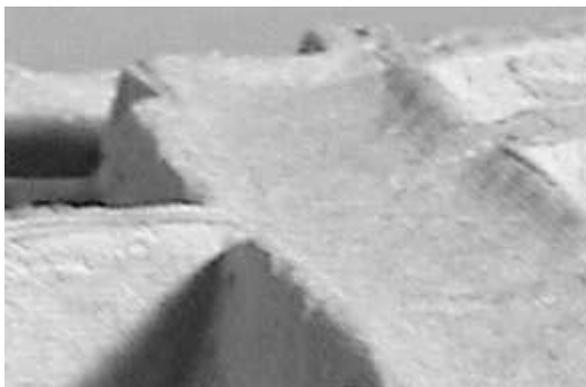


Bild 9.2: Einfallstellen bei ebenen Flächen

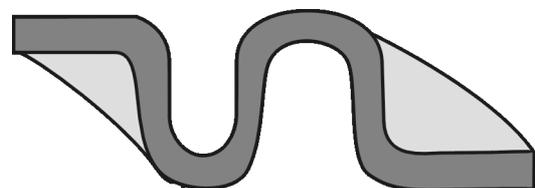


Bild 9.3: Räumliche Gestaltung an Stelle von ebenen Auflageflächen

Weitgehend senkrechte Flächen müssen einen Mindestabstand von dem Doppelten der Wandstärke zuzüglich eines Sicherheitsabstandes haben, um ein Ineinanderfließen auf der siebabgewandten Seite oder im anderen Fall Platzprobleme im Werkzeug auf der Siebseite zu verhindern, siehe **Bild 9.4**. Ist die Spaltbreite b_{sp} zu klein, entsteht eine Materialanhäufung, die zu einem ungleichmäßigen Trockenvorgang führt. Hierdurch werden die Taktzeiten erhöht und die Verzugsgefahr vergrößert, siehe **Bild 9.5**.

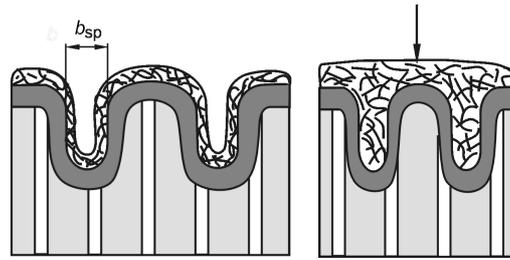
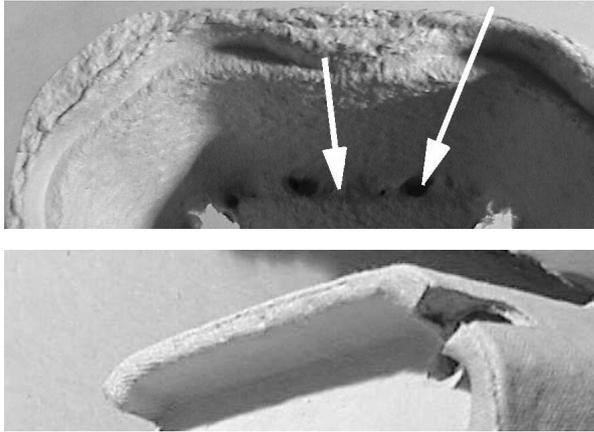


Bild 9.4: Mindestabstände

Bild 9.5: Materialanhäufung (oben) bei zu schmalem Steg (unten)

Als Mindestschräge für die Entformung des Werkstückes sind etwa 5° (Erfahrungswert) vorzusehen; bei kleineren Winkeln kann der Entformungsvorgang nur mit erhöhtem Aufwand durchgeführt werden.

Ein geringer Verzug wird erreicht, wenn die Bauteile nach dem Anformvorgang in beheizten Werkzeugen gepresst werden. Hierfür ist jedoch ein erhöhter Werkzeugaufwand erforderlich. Gleichmäßige Wandstärken führen zu einem gleichmäßigen Entwässerungsvorgang und verringern ebenfalls die Verzuggefahr.

Werden in den Bauteilen Durchbrüche benötigt, beispielsweise für Verschlusselemente, bestehen zwei Möglichkeiten, diese herzustellen. Werden im Anformwerkzeug entsprechende Elemente vorgesehen, wird der Entformungsvorgang erschwert. Dies ist um so problematischer, je größer die Höhe h ist, **Bild 9.6**. Liegen die Durchbrüche zusätzlich im Wandbereich, bilden sich Grate und sog. „Schwimmhäute“ aus, siehe auch **Bild 9.7**. Ein nachträgliches Ausstanzen der Durchbrüche führt zu erheblich besseren Ergebnissen, ist jedoch wesentlich teurer. Diese Herstellmöglichkeit sollte bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit gewählt werden; **Bild 9.8** zeigt einen derartigen Durchbruch.

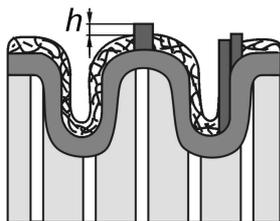


Bild 9.6: Elemente für Durchbrüche

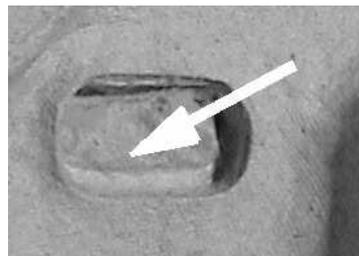


Bild 9.7: Durchbruch, Element im Siebkörper

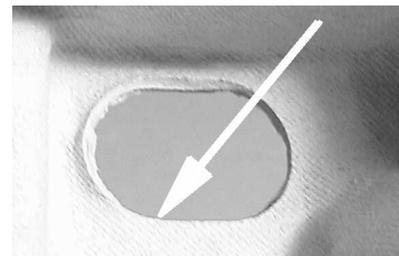


Bild 9.8: Durchbruch, nachträglich gestanzt

Logistikgerechte Gestaltung

- Mindestabstand gestapelter Teile einhalten, Neigungswinkel auf Konizität und Wandstärke abstimmen.
- Waagerechte Flächen hinreichender Größe vorsehen (Greifer, Niederhalter)
- Kontakt konischer Bereiche vermeiden; ggf. Distanzelemente verwenden
- Hohe Formsteifigkeit anstreben
- Einführschrägen erleichtern die automatische Verpackung
- Grenzbelastungsfälle beachten, einseitige Lasten können zum Umkippen führen
- Beschriftungen (Logos, Artikel-Nrn. usw.) beachten; nachträgliches Prägen ermöglicht sauberere Beschriftungen; Markierungen im Siebkörper sind kostengünstiger, aber ungenauer

Faserformprodukte werden häufig in logistischen Bereichen, insbesondere als Verpackungsteile, eingesetzt. Die Regeln der logistikgerechten Gestaltung betreffen die Nestfähigkeit der Produkte und deren Handhabbarkeit. Um die Teile zuverlässig vereinzeln zu können ist es erforderlich, einen Mindestabstand a zwischen den Teilen einzuhalten, um das Einführen von Greifelementen zum Entnehmen des obersten Teils einerseits und von Niederhaltern zum Fixieren der unteren Teile andererseits zu ermöglichen, siehe **Bild 9.9**. Vorteilhaft sind hierfür auch hinreichend große, möglichst waagrecht liegende Flächen zum Kraftangriff durch den Greifer. Konische Bauteilbereiche sollten nicht unmittelbar aneinander anliegen, da sonst durch das Eigengewicht die Teile so ineinander gedrückt werden, dass Selbsthemmung entsteht; in diesem Fall können die Teile nicht mehr zuverlässig entnommen werden. Abhilfe kann durch Distanzelemente geschaffen werden, die den direkten Kontakt konischer Bereiche verhindern, sowie durch hinreichend große Neigungswinkel α . Eine hohe Formsteifigkeit der Bauteile vermeidet unerwünschte Verformungen und verbessert die Handhabbarkeit.

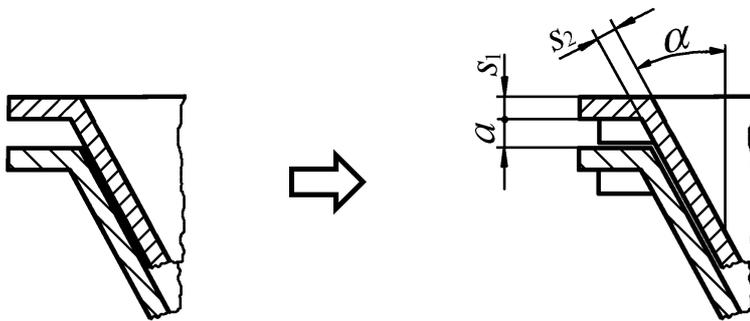


Bild 9.9: Logistikgerechte Gestaltung

Für das automatisierte Einlegen von Produkten in Verpackungsteile sind hinreichende Einführschrägen vorzusehen. Außerdem müssen Grenzbelastungsfälle beachtet werden, siehe **Bild 9.10**. In dem dargestellten Beispiel könnte eine einseitige Last, die bei Belastung mit nur einem Produkt entsteht, leicht zum Umkippen der gesamten Verpackung führen. Abhilfe kann durch eine Rippe, im Bild unten links, geschaffen werden. Wird diese Maßnahme nicht rechtzeitig berücksichtigt, ergeben sich aufwändige und teure nachträgliche Werkzeugänderungen.

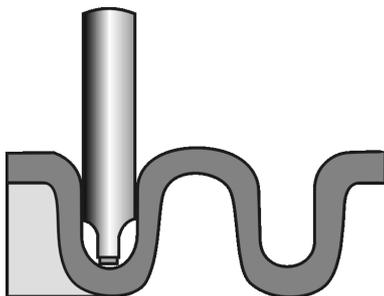


Bild 9.10: Einseitige Belastung durch nur ein Produkt

Bild 9.11: Schriftzug; nachträglich geprägt (oben) und in Siebstruktur eingearbeitet (unten)



Häufig werden Beschriftungen, Logos, Artikel-Nummern oder ähnliche Symbole in das Produkt eingearbeitet. Dies kann durch entsprechende Änderung des Siebkörpers, z. B. Aufsetzen von Drahtelementen, erreicht werden, **Bild 9.11** unten. Die Symbole sind dann nur schwer erkennbar, insbesondere bei kleinen Symbolelementen. Wird das Symbol beim nachträglichen Pressen eingebracht, ist es erheblich besser ausgeprägt. Ein nachträgliches Einprägen des Symbols liefert zwar saubere Ergebnisse, ist jedoch erheblich teurer, **Bild 9.11** oben.

Recyclinggerechte Gestaltung

- Bereits bei der Produktentwicklung Entsorgungsmöglichkeiten beachten
- Produktlebensdauer auf erforderliche Nutzungsdauer abstimmen
- Imprägnierungen vermeiden; zumindest Umweltverträglichkeit beachten

Ein wesentlicher Vorteil der Faserformprodukte liegt in den umweltverträglichen Entsorgungsmöglichkeiten durch Verbrennen oder Kompostieren. Dieser Vorteil sollte möglichst nicht durch andere Maßnahmen beeinträchtigt werden. Eine Imprägnierung des Bauteils kann dessen Lebensdauer erheblich erhöhen, behindert u. U. aber eine problemlose Entsorgung. Gegebenenfalls kann ein Pressen des Bauteils, das zu einer glatteren und damit mikroskopisch kleineren Oberfläche führt, die Aufnahmefähigkeit gegenüber Wasser verringern und damit die Lebensdauer erhöhen. Das so entstehende Einstoffprodukt ist einem imprägnierten Mehrstoffprodukt vorzuziehen.

Beanspruchungsgerechte Gestaltung

- Auf Zug oder Druck beanspruchte Bauteile möglichst nach dem Anformen pressen, da die Festigkeit hierdurch erhöht wird
- Auf Biegung beanspruchten flachen Platten und Trägern nicht pressen, da die Belastbarkeit verkleinert wird.
- Auf Biegung belastete räumliche Teile haben gepresst und ungepresst die gleiche Belastbarkeit.
- Kritische Stoffkonzentration bzw. kritische Flächenpressung bei gepressten Teilen beachten.

Wie in Kapitel 6 gezeigt werden konnte wird durch das Pressen der Bauteile nach dem Anformvorgang eine höhere Zug- bzw. Druckfestigkeit erreicht, die proportional zum Grad der Verdichtung steigt. Dies hat allerdings entweder einen höheren Materialeinsatz zur Folge, wenn die gleiche Wandstärke wie beim ungepressten Bauteil erreicht werden soll, oder die Wandstärke wird gegenüber dem ungepressten Teil verringert. Ein erhöhter Materialeinsatz würde aber eine Änderung des Anformprozesses bewirken. Entsprechende Bauteile könnten durch einen längeren Ansaugvorgang realisiert werden oder durch das Ineinandergautschen von entsprechenden Vorprodukten erreicht werden. Beim Überdruckverfahren könnten die größere Wandstärken durch mehrere Anformvorgänge erzielt werden. Allerdings werden hierdurch die Taktzeiten erheblich steigen.

Werden ebene Bauteile mit einem um ihre Mittelachse wirkenden Biegemoment belastet, vermindert ein Pressvorgang das übertragbare Biegemoment proportional zum Grad der Verdichtung. Zwar wird die Zug- bzw. Druckfestigkeit erhöht, gleichzeitig verringert sich jedoch die Wandstärke (linear, proportional) und damit das Widerstandsmoment (quadratisch). Abhilfe könnte auch hier durch erhöhten Materialeinsatz geschaffen werden.

Stark räumliche Teile weisen bei Biegung die gleiche Belastbarkeit auf, unabhängig davon, ob sie gepresst wurden oder nicht. Die Erhöhung der Zug- bzw. Druckfestigkeit geht einher mit einer Verkleinerung der Wandstärke. Da diese im *Steinerschen* Anteil linear eingeht, wirken sich beide Effekte gegenläufig, jedoch im gleichen Maße aus.

Weitere Vorteile gepresster Teile, wie bessere Möglichkeiten zum Bedrucken und Bekleben sowie eine optisch wertvoller erscheinende Oberfläche, sind hier nicht berücksichtigt worden.

Die genannten Gestaltungsregeln stellen eine Auswahl aus einer Vielzahl von Regeln dar, die zur Zeit noch nicht erarbeitet worden sind. Eine wissenschaftliche Untersuchung von definierten Themenbereichen ist ein interessantes Betätigungsfeld für weiterführende Forschungsarbeiten. Ein Problem aus diesem Gebiet ist beispielsweise die Untersuchung des Grenzwinkels zur Entformung und zur Ermöglichung eines Pressvorgangs, der ohne ein Abscheren des Werkstückes noch realisiert werden kann. Hierdurch könnte der genannte Erfahrungswert korrigiert und zuverlässig abgesichert werden.

Insgesamt konnte ein erster Schritt zur Erstellung von Gestaltungsregeln für Faserformprodukte getan werden.

10 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Beitrag zur beanspruchungsgerechten Gestaltung von Faserformprodukten geleistet. Charakteristisch ist, dass Faserformprodukte nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht ausgelegt und nachgerechnet werden können, da die Werkstoffkennwerte nicht bekannt sind. Aus diesem Grunde erfolgt entweder eine überschlägige Dimensionierung ohne Berechnung und Festigkeitsnachweis, oder die fertigen Produkte werden nachträglichen Untersuchungen, wie Fallversuchen o. ä., unterzogen. Sollen Funktionsteile außerhalb des Verpackungsbereichs hergestellt werden, ist diese Vorgehensweise nicht akzeptabel; es müssen also die entsprechenden Werkstoffkennwerte bestimmt werden.

An dieser Stelle setzen die durchgeführten Untersuchungen an. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen wurde die in der Praxis am häufigsten auftretende Beanspruchung, die Biegebeanspruchung, untersucht. Da grundsätzlich die Belastbarkeit von Bauteilen nicht nur von der Werkstofffestigkeit, sondern auch von der Kerbwirkung und anderen konstruktiven Größen abhängt, können in einem ersten Schritt auch nur diese Größen gemeinsam erfasst werden. Es ist beispielsweise mit vertretbarem Aufwand nicht einwandfrei möglich, den Einfluss der Bauteilgröße, die Kerbwirkung und die Werkstofffestigkeit getrennt zu bestimmen.

Um trotz der beschriebenen Probleme eine Aussage über die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse treffen zu können, wurden nicht nur definierte Versuchsmuster untersucht, sondern es wurden auch Versuche an realen Bauteilen durchgeführt. Als Beispiel hierfür wurde eine Unterarmorthese gewählt. Grundgedanke war hierbei, dass ein zur Zeit aus duroplastischem Kunststoff hergestelltes Produkt, das nur bedingt umweltverträglich ist, durch ein umweltfreundlicheres Produkt ersetzt werden soll. Hier sollten insbesondere die entsorgungstechnischen Vorteile der Faserformprodukte genutzt werden.

Bei der Bearbeitung der Themenstellung wurde zunächst ein Überblick über das Faserformverfahren, über die wesentlichen Einflussgrößen, wie Faserstoffe und die Bindungsmechanismen im Papier, sowie über die herstellbaren Produkte gegeben. Im nächsten Schritt wurde der Stand der Technik analysiert. Als problematisch erwies sich hierbei, dass kaum verwertbare aktuelle Fachliteratur besteht, die sich mit der Faserformtechnologie beschäftigt. Umfangreiches Fachwissen ist bei den Herstellern von Faserformprodukten vorhanden, wird jedoch aus Angst, Wettbewerbsvorteile einzubüßen, kaum preisgegeben. Interessanter Weise handelt es sich dabei jedoch um teilweise über hundert Jahre alte Informationen, die lediglich mangels Informationsfluss verloren gegangen sind und nun als vermeintliche Neuentdeckung wieder auftauchen. Auch die in mehreren Veröffentlichungen auftauchende Papierflasche der Firma Kao, Japan, verwendet Technologien, die bereits seit Jahrzehnten bekannt und durch zahlreiche Patente bereits dokumentiert sind.

Hier liegt eine wesentliche Informationsquelle. Bei der Bearbeitung wurden weit über hundert Patente ausgewertet und deren wesentliche Aussagen im Stand der Technik dokumentiert. Weitere Untersuchungen zum Stand der Technik betreffen Auslegungskriterien für Faserformprodukte und Orthesen, die als Anwendungsbeispiel dienen sollen.

Um ein Produkt beanspruchungsgerecht gestalten zu können müssen die im Betrieb auftretenden Belastungen bekannt sein. Daher wurde eine Versuchseinrichtung erstellt, mit deren Hilfe die von gesunden Probanden aufbringbaren Momente im Handgelenk ermittelt werden können. Reihenuntersuchungen, die statistisch ausgewertet wurden, haben diese Ergebnisse geliefert. Darüber hinaus wurden handelsübliche Orthesen untersucht, um Vergleichswerte zu erhalten.

Für die Erstellung von Versuchsmustern wurde eine Faserform-Versuchsanlage erstellt. Diese arbeitet nach dem Überdruckverfahren, so dass ein breiteres Spektrum an Anformdrücken abgedeckt werden kann. Pressvorgänge können mit einem Presswerkzeugsatz durchgeführt werden. Die entwickelte Anlage weist abgesehen von den über einen PC steuerbaren Anformparametern keinerlei Automatisierung auf und ist somit nicht auf eine Produktion im industriellen Maßstab ausgelegt. Dennoch ist sie in der Lage, die bei industriellen Anwendungen auftretenden Bedingungen zuverlässig nachzubilden.

Im nächsten Schritt wurden theoretische Betrachtungen durchgeführt, die zur Vorbereitung des nachfolgenden Versuchsprogramms unerlässlich sind. Neben der Analyse entsprechender DIN-Normen zur Ermittlung der Biegefestigkeit und des E-Moduls und der Klärung der entsprechenden Grundlagen der Mechanik wurden die Gleichungen für die Bestimmung dieser Kenngrößen abgeleitet. Abschließend wurde der Einfluss von Pressvorgängen untersucht.

Für die Durchführung des Versuchsprogramms waren mehrere Versuchseinrichtungen erforderlich. Im Einzelnen wurde eine 3D-Messeinrichtung erstellt, die insbesondere zur Erfassung der Geometrie der Orthesen eingesetzt wurde. Eine für die an Proben durchzuführenden Versuche entwickelte Biegemaschine bietet die Möglichkeit der Vierpunktbiegeprüfung, kann aber auch auf eine Dreipunktbiegeprüfung umgerüstet werden. Mittels einer Presse, die mit entsprechender Messtechnik ausgerüstet ist, kann ermittelt werden, inwieweit Proben weiter verdichtet werden können. Hierdurch kann auf deren Verdichtungsgrad zurückgeschlossen werden. Eine Umrüstung der Einrichtung zur Messung der Handgelenkmomente diente dazu, mit dieser Einrichtung auch Versuchsmuster der Orthesen zu untersuchen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden sowohl an rechteckigen Proben als auch an Faserformorthesen durchgeführt. Dabei konnten sowohl die Biegefestigkeit als auch der Biege-Elastizitätsmodul für Versuchsobjekte ermittelt werden, die unter unterschiedlichen Randbedingungen hergestellt wurden. Die Abhängigkeiten der Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte von den entsprechenden Verfahrensparametern konnten aufgezeigt werden.

Aus den gefundenen Ergebnissen und aus den sonstigen Erfahrungen, die während der Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Faserformtechnologie gewonnen werden konnten, wurden Leitregeln für die Gestaltung von Faserformprodukten abgeleitet. Hiermit wurde ein weiterer Ansatz für die beanspruchungsgerechte Gestaltung von Faserformprodukten gefunden.

Insgesamt ist es erstmalig gelungen, Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte für Faserformprodukte zu gewinnen und hiermit einen wesentlichen Beitrag zu deren beanspruchungsgerechter Gestaltung zu leisten.

11 Literaturverzeichnis

- /ABW02/ ABW GmbH (Hrsg.): Lichtschnittverfahren. Frickenhausen: August 2002. WWW-Adresse: http://www.abw-3d.de/verfahr/licht_r.html
- /ADP96/ Arbeitgeberverband Schweizerischer Papier-Industrieller (Hrsg.); Österreichischer Fachverband der Papierindustrie (Hrsg.); Vereinigung der Arbeitgeberverbände der Deutschen Papierindustrie e.V. (Hrsg.): Papiermacher Taschenbuch. 6. Aufl. Heidelberg: Dr. Curt Haefner Verlag, 1996
- /AND00/ Andrés, Louis E.: Die Fabrikation der Papiermaché und Papierstoff-Waaren. 1. Aufl., Wien, Pest, Leipzig: U. Hartleben's Verlag, 1900
- /APK00/ N. N.: Faserform : Konzept für Umwelt- und Lebensmittelverpackungen. In: Austropack (2000), Nr. 9, S. 9
- /APK92/ N. N.: Eierverpackungen – damit's kein Rührei gibt. In: Austropack (1992), Nr. 3, S. 70-71
- /ASS99/ Assmann, Bruno: Technische Mechanik: Lehr- und Übungsbuch, Bd. 2 Festigkeitslehre. 14. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 1999. – ISBN 3-486-25286-0
- /BAR01/ Barck, I.; Rimmel, U.; Reinhardt, J.: Medizinisch-therapeutische Wirksamkeit moderner Gestricke in der Anwendung bei Orthesen und Bandagen. In: Orthopädie-Technik 52 (2001) Nr. 10, S. 751-757
- /BAR88/ Bargel, Hans-Jürgen; Cardinal, Peter; Hilbrans, Hermann: Werkstoffkunde. 5. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988
- /BAU01/ Bauerfeind Orthopädie GmbH & Co. KG (Hrsg.): Medical Line – Das Therapie-Programm. Kempfen: 2001. – Firmenprospekt
- /BKM02/ Bergmann, Stefan; Karbassian, Hossein; Marschalkowski, Kay: Entwicklung einer Biegeprüfvorrichtung und Ermittlung von Werkstoffkennwerten für Faserform-Flachproben. Dortmund: Universität, Fachgebiet Maschinenelemente, Gruppenstudienarbeit, 2002
- /BÖN00/ Böni, T.: Orthesen: gestern, heute, morgen. In: Schweizerische Medizinische Wochenschrift 120 (2000), S. 44-45
- /BOR01/ Bort GmbH (Hrsg.): 2001 Programm. Weinstadt: 2001. – Firmenprospekt
- /BRD81/ Schutzrecht DE 24 28 632 B2 (1981), Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister für Verteidigung
- /BRE93/ Breukmann, Bernd: Bildverarbeitung und optische Messtechnik. München: Franzis-Verlag GmbH, 1993. – ISBN 3-7723-4861-0
- /BUC94/ Buchner, Norbert: Verpackungsrecycling, oder das kleine Kind und das Meer. In: Neue Verpackung (1994), Nr. 2, S. 56-59
- /CAM02/ Cam – Control GmbH (Hrsg.): Cam-Control. Nürnberg: August 2002. WWW-Adresse: <http://www.cam-control.de/>
- /CAR/ Cartofont AG Aarau (Hrsg.): Aus unserem Fabrikationsprogramm. Aarau: Graphische Werkstätten A. Trüb & Cie, – Firmenprospekt, Produktionsprogramm

- /CAR75/ Cartofont AG Aarau (Hrsg.): 50 Jahre Cartofont : Vom Pappenguss zum Kunststoff. Separatdruck aus Tara 309, Mai 1975. – Firmenprospekt Produktionsprogramm
- /CMC94/ Schutzrecht US 5 356 518 (1994), The Cin-Made Corporation, USA
- /CRA46/ Schutzrecht US 2409195 (1946). Crawford, Walter J.
- /CZI00/ Czichios, Horst (Hrsg.): Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. 31. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2000. – ISBN 3-540-66882-9
- /DAN95/ Dankert, Helga; Dankert, Jürgen: Technische Mechanik. 2. Aufl. Stuttgart: B. G. Teubner GmbH, 1995
- /DEI00b/ Norm DIN EN ISO 7438 Juli 2000. Metallische Werkstoffe – Biegeversuch
- /DEI02/ Norm DIN EN ISO 1043 Teil 1 Juni 2002. Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften
- /DEI95/ Norm DIN EN ISO 1924 Teil 2 April 1995. Papier und Pappe: Bestimmung von Eigenschaften bei zugförmiger Belastung
- /DEI96a/ Norm DIN EN ISO 4119 Mai 1996. Halbstoffe: Bestimmung der Stoffdichte
- /DEI96b/ Norm DIN EN ISO 801 Teil 1 November 1996. Bestimmung des Handelsgewichtes von Lieferposten: Zellstoffbogen in Ballen
- /DEI96c/ Norm DIN EN ISO 801 Teil 3 November 1996. Bestimmung des Handelsgewichtes von Lieferposten: Großballen
- /DEI97/ Norm DIN EN ISO 178 Februar 1997. Kunststoffe: Bestimmung der Biegeeigenschaften
- /DEI98/ Norm DIN EN ISO 14125 Juni 1998. Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften.
- /DEN01/ Norm DIN EN 10002 Dezember 2001. Metallische Werkstoffe – Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur
- /DEN93a/ Norm DIN EN 20638 November 1993. Zellstoff: Bestimmung des Trocken-
gehaltes
- /DEN93b/ Norm DIN EN 25651 November 1993. Papier, Pappe und Zellstoff: Maßeinheiten zum Bezeichnen von Eigenschaften
- /DEN93c/ Norm DIN EN 310 August 1993. Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit
- /DEN96a/ Norm DIN EN 1058 April 1996. Holzwerkstoffe - Bestimmung der charakteristischen Werte der mechanischen Eigenschaften und der Rohdichte
- /DEN96b/ Norm DIN EN 789 Juli 1996. Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen
- /DEN99/ Norm DIN EN 12523 Mai 1999. Externe Gliedmaßenprothesen und externe Orthesen: Anforderungen und Prüfverfahren
- /DIM02/ Dimensional (Hrsg.): Dimensional; Messtechnik für geometrische Größen. Weingarten: Mai 2002. WWW-Adresse: <http://www.3dimensional.de/>
- /DIN00a/ Norm DIN 6730 Juni 2000. Papier und Pappe: Begriffe
- /DIN00b/ Norm DIN 6735 Juni 2000. Papier, Pappe und Halbstoffe: Übersicht von Begriffen

- /DIN00c/ Norm DIN 1052 (Entwurf) Mai 2000. Berechnung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- /DIN72/ Norm DIN 58320 Blatt 1 Juli 1972. Orthopädietechnik: Orthopädisch-technische Heil- und Hilfsmittel, Übersicht, Einteilung
- /DIN78a/ Norm DIN 53123 Januar 1978. Prüfung von Papier und Pappe: Bestimmung der Biegesteifigkeit – Resonanzlängen-Verfahren
- /DIN78b/ Norm DIN 50100 Februar 1978. Werkstoffprüfung; Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung
- /DIN78c/ Norm DIN 52186 Juni 1978. Prüfung von Holz; Biegeversuch
- /DIN78d/ Norm DIN 33402 Teil 1 Januar 1978. Körpermaße des Menschen - Begriffe, Messverfahren
- /DIN80/ Norm DIN 13316 September 1980. Mechanik ideal elastischer Körper; Begriffe, Größen, Formelzeichen
- /DIN82a/ Norm DIN 33411 Teil 1 September 1982. Körperkräfte des Menschen - Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen
- /DIN82b/ Norm DIN 50142 März 1982. Prüfung metallischer Werkstoffe; Flachbiegeschwingversuch
- /DIN83a/ Norm DIN 55471 Teil 1 Oktober 1983. Polystyrol-Schaumstoff für Verpackungszwecke: Anforderungen, Prüfungen
- /DIN83b/ Norm DIN 58320 (Entwurf) Teil 1 Dezember 1983. Orthopädie-Technik; Orthopädie-technische Heil- und Hilfsmittel; Übersicht, Einteilung
- /DIN83c/ Norm DIN 13317 Januar 1983. Mechanik starrer Körper; Begriffe, Größen, Formelzeichen
- /DIN86/ Norm DIN 33402 Teil 2 Oktober 1986. Körperkräfte des Menschen - Werte
- /DIN87/ Norm DIN 55471 Teil 2 Februar 1987. Polystyrol-Schaumstoff für Verpackungszwecke: Berechnung und Gestaltung von Verpackungsformteilen
- /DIN88a/ Norm DIN 55405 Teil 1 Februar 1988. Begriffe für das Verpackungswesen: Systematische Übersichten, alphabetisches Gesamtverzeichnis und Begriffsbereich Verpackungswesen
- /DIN88b/ Norm DIN 55405 Teil 2 Februar 1988. Begriffe für das Verpackungswesen: Packstoff
- /DIN88c/ Norm DIN 55405 Teil 3 Februar 1988. Begriffe für das Verpackungswesen: Packmittel
- /DIN88d/ Norm DIN 55405 Teil 5 Februar 1988. Begriffe für das Verpackungswesen: Verpackung, Packgut, Packung, Packstück
- /DIN93a/ Norm DIN 55405 Teil 7 Dezember 1993. Begriffe für das Verpackungswesen: Verpackungsprüfung, Merkmale und deren Prüfung
- /DIN93b/ Norm DIN 7724 April 1993. Polymere Werkstoffe: Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund ihres mechanischen Verhaltens
- /DIN94a/ Norm DIN 1304 März 1994. Formelzeichen; Allgemeine Formelzeichen
- /DIN94b/ Norm DIN 13343 April 1994. Linear-viskoelastische Stoffe; Begriffe, Stoffgesetze, Grundfunktionen

- /DIN96a/ Norm DIN 53121 Dezember 1996. Prüfung von Papier, Karton und Pappe: Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode
- /DIN96b/ Norm DIN 6120 Teil 2 Dezember 1996. Kennzeichnung von Packstoffen und Packmitteln zu deren Verwertung. – Packstoffe und Packmittel aus Kunststoff: Zusatzberechnung
- /DIN96c/ Norm DIN 1338 August 1996. Formelschreibweise und Formelsatz
- /DIO02a/ Norm DIN ISO 2758 (Entwurf) März 2002. Papier: Bestimmung der Berstfestigkeit
- /DIO02b/ Norm DIN ISO 2759 (Entwurf) März 2002. Pappe: Bestimmung der Berstfestigkeit
- /DIO86/ Norm DIN ISO 2758 Dezember 1986. Papier: Bestimmung der Berstfestigkeit
- /DIO94a/ Norm DIN ISO 3781 Oktober 1994. Papier und Pappe: Zugversuch – Bestimmung der breitenbezogenen Bruchkraft nach dem Eintauchen in Wasser
- /DIO94b/ Norm DIN ISO 3689 Juli 1994. Papier und Pappe: Bestimmung der Berstfestigkeit nach dem Eintauchen in Wasser
- /DIS01/ Distrac Ortho – Medical Supplies (Hrsg.): Zipy cast – Quality Care through Product Management. Hoegaarden: 2001. – Firmenprospekt
- /DOM86/ Domke, Wilhelm: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 10. Aufl. Düsseldorf: Cornelsen Verlag Schwann-Giradet, 1986. – ISBN 3-590-81220-6
- /DON01/ Donga, Markus; Jansen, Rolf (Hrsg.): Entwicklung eines Berechnungsmodells zur belastungsgerechten Dimensionierung von Faltschachteln. Frankfurt: Deutscher Fachverlag, 2001 (Forschungsbericht Nr. 53 aus der Schriftenreihe: Transport und Verpackungslogistik). – Forschungsbericht
- /DUM02/ Dumke, Dominik: Teilautomatisierung eines Fertigungsprozesses zur Qualitätssicherung. Dortmund: Universität, Fachgebiet Maschinenelemente, Studienarbeit, 2002
- /EBE52/ Ebers, Heinz: Der Werkstoff FIBRIT und seine Anwendung in der Verpackung. In: Die Neue Verpackung (1952), S. 60-62
- /EBM92/ Ebmeyer, Waltram E.: Styropor oder Faserguß. In: Verpackungs-Rundschau (1992), Nr. 12, S. 44-45
- /EBM94a/ Ebmeyer, Waltram E.: Härtetest bestanden – Umweltfreundliche Verpackungstechnik mit Faserguß. In: Pack-Report (1994), Nr. 4, S. 13-18
- /EBM94b/ Ebmeyer, Waltram, E.: Einstoffverpackungen: Faserguß bringt Altpapier in Form. In: Neue Verpackungen (1994), Nr. 6, S. 40-45
- /EBM94c/ Ebmeyer, Waltram E.: Faserguß – Formvollendet und umweltfreundlich. In: Verpackungs-Rundschau, PaPro (1994), S. 22-24
- /EBM99/ Ebmeyer, Waltram E.: Leserbrief: Tabakfolie. In Verpackungs-Rundschau (1999), Nr. 8, S. 37
- /EHR95/ Ehrenstein Gottfried W.: Mit Kunststoffen konstruieren – Eine Einführung. München: Carl Hanser Verlag, 1995. – ISBN 3-446-18347-7
- /ERH93/ Erhard, Gunter: Konstruieren mit Kunststoffen. München: Carl Hanser Verlag, 1993. – ISBN 3-446-17397-8

- /EUC95/ European Commission: Implementation of best available techniques (BAT) in the pulp industry. 1995. – Final Report
- /FER97/ Ferner, Lars: Ein lernendes System zur Klassifikation kleiner Objekte auf Basis adaptiv gewählter Laser Scans. Kaiserslautern: Universität, Fachbereich Informatik, Diplomarbeit, 1997
- /FPZ61/ Feldmühle Papier- und Zellstoffwerke Aktiengesellschaft (Hrsg.): Vom Papier – Kultur, Technik, Statistik. 2. Aufl. Düsseldorf: 1961
- /GAL02/ Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie (Hrsg.): Laser-Tomographie. Karlsruhe: August 2002. WWW-Adresse: <http://www.gala-ev.de/laser-to.htm>
- /GOR96/ N. N.: Verpackungen aus Papier und Karton. In: Gordian (Hamburg) 96 (1996), Nr. 5, S. 75
- /GÖT90/ Götsching, Lothar (Hrsg.): Papier in unserer Welt. Düsseldorf: ECON Verlag, 1990
- /GRO99/ Grote, Andreas: Alles Öko oder was? Natürliche Rohstoffe am Computer. In: Ct (1999), Nr. 3, S. 82-84
- /GÜN50/ Günther, Gustav B.: Das Handgelenk in mechanischer, anatomischer und chirurgischer Beziehung. 1. Aufl. Hamburg: Druck von Johann August Meissner, 1850
- /GUT01/ Gutenbrunner, C.; Hildebrandt, H. D.: Untersuchungen zur Wirksamkeit funktioneller Orthesen auf lumbale Schmerzen. In: Orthopädie-Technik 52 (2001), Nr. 10, S. 727-735
- /HAN74/ Schutzrecht DE 2447703 (1974). Harrison, Howard D.
- /HAN96/ Hansen, Guido: Konzeption und Realisierung eines Sensorsystems zur dreidimensionalen Erfassung anthropometrischer Daten. Kaiserslautern: Universität, Fachbereich Informatik, Diplomarbeit, 1996
- /HAR/ Brødrene Hartmann A/S (Hrsg.): Umweltgerechte Verpackungen. – Firmenprospekt
- /HAR01/ Schutzrecht WO 0174564 A1 (2001). Brødrene Hartmann A/S
- /HAR95/ Brodrene Hartmann A/S (Hrsg.): Sculptured Packaging – Moulded pulp isn't what it used to be. Lyngby, Dänemark: ca. 1995. – Firmenprospekt
- /HÄR98/ Härter, R.; Jagdfeld, G.; Kern, G.: Checklisten der aktuellen Medizin – Ceckliste Gipstechnik, Fixationsverbände. 3. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1998
- /HEE92/ Heene, Werner: Altpapier-Faserguß ersetzt Kunststoffschaum. In: VDI-Nachrichten (1992), Nr. 44, S. 37
- /HOC91/ Hocking, M.B.: Paper versus polystyrene: A complex choice. In: Science (1991), Nr. 251, S. 504-505
- /HOO02/ Hoog, Thorsten: Optimierung einer Versuchsanlage und Durchführung von Momentenmessungen am menschlichen Handgelenk. Dortmund, Universität, Fachgebiet Maschinenelemente, Diplomarbeit, 2002
- /HOR02/ Hortig, Christian: Untersuchungen zur Geometrieerfassung und -optimierung sowie zur Berechnung von Werkstoffkennwerten für Faserformprodukte. Dortmund: Universität, Fachgebiet Maschinenelemente, Studienarbeit, 2002

- /HTS95/ Schutzrecht DE 4417329 (1995). HTS Industrie GmbH, Freiburg
- /IKK99/ IKK-Bundesverband (Hrsg.): Blick durch die Versorgung mit Hilfsmitteln und Pflegehilfsmitteln. Bergisch Gladbach: 1999
- /INF92/ Interdisziplinäre Forschungsgemeinschaft InFo – Kunststoff e. V. Berlin: Vergleichende Lebenswegbilanz von EPS- (Styropor®) und Wellpappe-Verpackungen – ein erweitertes Berechnungsmodell. 1992
- /INF95/ Interdisziplinäre Forschungsgemeinschaft InFo – Kunststoff e.V. Berlin: Lebenswegbilanz von Papier-Fasergußverpackungen und Vergleich mit EPS-Verpackungen. 1995
- /ISS95/ Issler, Lothar; Ruoff, Hans; Häfele, Peter: Festigkeitslehre Grundlagen. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- /IZK94/ Informationszentrum Kunststoffverpackungen GmbH (Hrsg.): Zum Thema Styropor - 24 Fragen 24 Antworten. Bad Homburg: 1994 (Eine Fachinformation über Verpackungen und Formteile aus Styropor) – Fachinformation
- /KAI00/ Kaiser, Ansgar: Systematische Untersuchungen zum Faserformverfahren und Erarbeitung von Ansätzen zur konstruktiven Optimierung. Dortmund, Universität, Fachgebiet Maschinenelemente der Transporttechnik, Diplomarbeit, 2000
- /KAP84/ Kapandji, I. A.: Funktionelle Anatomie der Gelenke, Band 1, Obere Extremität. Stuttgart: 1984
- /KAß95a/ Kaßmann, Monika; Gottfried, H.-P.: Transportbelastungen: Polstern mit Maß und Ziel. In: Neue Verpackung (1995), Nr. 1, S. 39-43
- /KAß95b/ Kaßmann, Monika; Gottfried, H.-P.: Abbaubare Verpackungspolster: Fehlende Testnormen prägen die Situation. In: Neue Verpackung (1995), Nr. 3, S. 82-87
- /KEL93/ Kelsch, Ursula: Kreativität ist gefragt: Fachtagung zu Verpackungen aus Papier. In: Verpackungsberater (1993), Nr. 10, S. 35-36
- /KLE00/ Klein, Markus (Hrsg.): Sportwissenschaftliche Skripte – Bewegungswissenschaft. Saarbrücken: 2000 – Onlinepublikation: <http://www.sport-training.de/>
- /KOC02/ Schutzrecht DE 145816 (1902). Koch, P.
- /KOH95/ Kohl, Anton; Bastian, Kurt; Neizel, Ernst: Baufachkunde – Grundlagen. Stuttgart: B. G. Teubner Verlag, 1995. – ISBN 3-519-45601-X
- /KOS93/ Kossatz, Gerd; Kossatz, Christa: Fortteile aus organischen Fasermaterial – moderne Produkte mit Tradition. In: Holz-Zentralblatt 119 (1993), Nr. 55, S. 858-860
- /KRI82/ Kriehoff, R.: Spezielle Pathologie und orthopädietechnische Versorgung. 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Volk und Gesundheit, 1982
- /KÜC93/ Kücherer, Helmut: Geblasene Behälter aus Papier. In Neue Verpackung 46 (1993), Nr. 4, S. 269-271
- /KÜC95/ Kücherer, Helmut: Geblasene Behältnisse aus Papier. In: Der Papiermacher 45 (1995), Nr. 7, S. 106-107
- /KÜN01/ Künne, Bernd: Einführung in die Maschinenelemente – Gestaltung – Berechnung – Konstruktion. 2. Aufl. Stuttgart: B. G. Teubner GmbH, 2001. – ISBN 3-519-16335-7

- /KÜN02a/ Schutzrecht DE 100 45 993 (2002). Künne, Bernd; Stephan, Frank; Willms, Ulrike
- /KÜN02b/ Künne, Bernd: Faserform-Hohlteile – gestern und heute. In: Verpackungs-Rundschau (voraussichtlich 2002)
- /LIN98/ Linß, G. (Hrsg.): Neuartige Methoden der automatischen Sichtprüfung räumlicher Objekte unter Berücksichtigung von Tiefeninformationen. Ilmenau: Institut für Präzisionstechnik und Automation, 1998 (DFG Abschlussbericht Li 555/4). – Forschungsbericht
- /LÜC97/ Lücke, Brigitte: Schienenversorgung im Rahmen der Ergotherapie – Vorstellung eines vielseitigen und preisgünstigen Schienenmaterials. In: Ergotherapie & Rehabilitation (1997), Nr. 6, S. 524-527
- /LUX96/ Luxenhofer, Klaus: Vergleichende Ökobilanz für Polsterformteile aus EPS und Altpapier: Ist EPS weniger umweltbelastend? In: Neue Verpackung (1996), Nr. 6, S. 58-61
- /MAR98/ Schutzrecht NL 1004773-C (1998). Markhorst Holland
- /MAT72/ Matossi, Frank (Hrsg.): Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. 3: Optik. 5.Aufl. Berlin: W. de Gruyter, 1972 – ISBN 3-1100-3937-0
- /MAR02/ Entwicklung einer optischen Koordinatenmessmaschine nach dem Lichtschnittverfahren. Persönliche Kommunikation Martens, Uhle, Holtwick (2002)
- /MIN99/ Minne, H. W.: Beurteilung von Orthesen am Beispiel der „Spinomed“. In: Orthopädie-Technik 50 (1999), Nr. 4, S. 324-327
- /NIC00/ Nicol, A. C.; Chadwick, E. K. J.: Elbow and wrist forces during occupational pick and place activities. In: Journal of Biomechanics (2000), Nr. 33, S. 591-600
- /NOK02/ NoKra Optische Prüftechnik und Automation GmbH (Hrsg.): Lasermesstechnik. Baesweiler: August 2002. WWW-Adresse: <http://www.nokra.de/index.html>
- /NPI95/ Schutzrecht DE 44 34 936 A1 (1995), Nippon Paper Industries, Japan
- /NVP94/ N. N.: Neue Faserformverpackungen für Industrie- und Konsumgüter. In: Neue Verpackung (1994), Nr. 2, S. 42
- /NVP96/ N. N.: Natürlicher Packstoff für Formteile. In: Neue Verpackung (1996), Nr. 11, S. 106
- /OZO90/ Schutzrecht DE 61832 (1890). Ozouf & Leprince, Paris
- /PAI67/ Paine, F. A.; Council of the Institute of Packaging (Hrsg.): Packaging Materials and Containers. London: Blackie & Son Limited, 1967
- /PAÖ01/ N. N.: Verpackungen aus Papier und Pappe im Produktionszyklus. In: Papier aus Österreich (2001), Nr. 1, S. 29-30
- /PRP89/ N. N.: Marken-Konzepte für das Premium-Ei – Umweltschutzaspekte spielen auch bei Eiverpackungen eine große Rolle. In: Pack Report (1989), Nr. 12, S. 18
- /PRP97/ N. N.: Aus dem Ei geschlüpft – Faserformteile erfüllen jetzt höhere Anforderungen als der herkömmliche Eierkarton. In: Pack Report (1997), Nr. 5, S. 70-71

- /REK93/ Rekitte, Hans J.: Styropor-Verpackungen komplett ersetzt – Ein neues Recycling für Papier und Pappeabfälle. In: Der Papiermacher (1993), Nr. 6, S. 84-86
- /ROH94/ Rohmert, Walter; Berg, Knut; Bruder, Ralph: Kräfteatlas, Teil 1 Datenauswertung statischer Aktionskräfte. Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1994. – ISBN 3-89429-524-4
- /ROS01/ Rost, Katrin: Anatomie – Hand. Mai 2002. WWW-Adresse: <http://stud-www.uni-marburg.de/~Rostk/hand.html>
- /SAM96/ Sauermann, Norbert: Dänemark-Report. In: Verpackungs-Rundschau Interpack 96 Spezial (1996), Sonderausgabe S. 14-16
- /SAM99/ Sauermann, Norbert: Aus einer Hand – Neu organisierte TPE präsentiert sich. In: Verpackungs-Rundschau Interpack 99 Spezial (1999), Sonderausgabe S. 6
- /SCH47/ Schmidt, Ch., H.: Die Benutzung des Papiermaché zur Fertigung. 1. Aufl. Weimar: Verlag, Druck und Lithographie von B. F. Voigt, 1847
- /SER93/ Schutzrecht DE 68919961-T2 (1993). Société d'Etudes et de Recherches Creativity Société Civile
- /SFR62/ Schutzrecht US 3040740 (1962). San Francisco Res. Corp. Pr.: US 19570698024
- /SHI87/ Schiebler, T. H.; Schmidt, W.: Lehrbuch der gesamten Anatomie des Menschen. 4. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1987
- /SMT83/ Schutzrecht DE 24946 (1883). Carl Otto Schmidt, Dresden
- /SNL89/ Schnell, Walter; Gross, Dietmar; Hauger, Werner: Technische Mechanik Band 2, Elastostatik. 3. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 1989. – ISBN 3-540-530-18-5
- /STE02/ Steinbeis Temming Papier GmbH & Co (Hrsg.): Steinbeis Temming – grafische Recyclingpapiere. Glückstadt: Juli 2002. WWW-Adresse: http://www.steinbeis-temming.de/site/mrecycling_bd.xml
- /TAC99/ Tacker, M.: Gütesicherung von Molkereiprodukteverpackungen. In: Verpackungs-Rundschau (1999), Nr. 3, S. 56-58
- /THÄ01/ Thämert Orthopädische Hilfsmittel GmbH & Co. KG (Hrsg.): Medizinisches Hilfsmittel-Verzeichnis – Arzt-Information. (Ausg. 09.2001) Burgwedel: 2001.
- /TRI02a/ Triamed GmbH & Co. KG (Hrsg.): Preisliste X-Lite Produktserie. Lüdinghausen: 2002. – Preisliste
- /TRI02b/ Triamed GmbH & Co. KG (Hrsg.): X-Lite – Das führende thermoplastische Material für synthetischen Gips und Schienen. Lüdinghausen: 2002. – Firmenprospekt
- /TRI02c/ Triamed GmbH & Co. KG: Triamed Orthopädie – kompetent und konsequent preiswert. April 2002. WWW-Adresse: <http://www.triamed-orthopaedie.de>.
- /VBE93a/ N. N.: Junge Franzosen bevorzugen Faserform-Eierverpackungen. In: Verpackungs-Berater (1993), Nr. 2, S. 28

- /VBE93b/ N. N.: 2. Fachtagung: Verpackungen aus Karton und Papier – Ökologische Bilanzierung. In: Verpackungs-Berater (1993), Nr. 9, S. 34
- /VBE93c/ N. N.: Faserform-Verpackungen: Spitzenquote im Recycling. In: Verpackungs-Berater (1993), Nr. 9, S. 34-35
- /VBE94a/ N. N.: Neue Faserformverpackungen für Industrie und Konsumgüter. In: Verpackungs-Berater (1994), Nr. 2, S. 35
- /VBE94b/ N. N.: Tendenzen bei der Herstellung und Verarbeitung von Papier, Karton und Pappe in der Packmittelproduktion. In: Verpackungs-Berater (1994) Nr. 3, S. 40
- /VBE97/ N. N.: Prüfen von Papier- und Pappequalitäten. In: Verpackungs-Berater (1997) Nr. 9, S. 18
- /VOS83/ Voss, Hermann; Herrlinger, Robert: Taschenbuch der Anatomie - Band 1 Einführung in die Anatomie, Bewegungsapparat. 17. Aufl., Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1983
- /VRU00a/ N. N.: Neues Verpackungskonzept – Umweltfreundliche Lebensmittelverpackungen aus Faserform. In: Verpackungs-Rundschau 51 (2000), Nr. 10, S. 81
- /VRU00b/ N. N.: Paper-bottle mit Konturen – Kao Corporation zeigt eine sensationelle Papierflasche. In: Verpackungs-Rundschau (2000), Nr. 12 S. 18
- /VRU01a/ N. N.: Innovative paper bottle molding process. In: Verpackungs-Rundschau Pharma and Cosmetic Packaging (2001), Nr. 1, S. 16-20
- /VRU01b/ N. N.: Bekommt der Kunststoffbehälter Konkurrenz? In: Verpackungs-Rundschau (2001), Nr. 4, S. 68
- /VRU94/ N. N.: Neue Faserformverpackungen. In: Verpackungs-Rundschau (1994), Nr. 2, S. 12-14
- /VRU96/ N. N.: Faserformteile. In: Verpackungs-Rundschau Interpack 96 Spezial (1996), Sonderausgabe S. 44-45
- /VRU98/ N. N.: Basel und zurück. In: Verpackungs-Rundschau (1998), Nr. 4, S. 27
- /VRU99a/ N. N.: Zellstoff fordert Kunststoff heraus. In: Verpackungs-Rundschau (1999), Nr. 4, S. 99
- /VRU99b/ N. N.: Blisterkarte und Faserformteile. In: Verpackungs-Rundschau (1999), Nr. 4, S. 100
- /WED02/ Wedekind, Jan: Fokuserien-basierte Rekonstruktion von Mikroobjekten. Karlsruhe: Universität, Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Diplomarbeit, 2002
- /WIL99a/ Wilken, R.: Direkt vor Indirekt, Teil 1. In: Verpackungs-Rundschau (1999) Nr. 5, S. 36
- /WIL99b/ Wilken, R.: Direkt vor Indirekt, Teil 2. In: Verpackungs-Rundschau (1999) Nr. 8, S. 36
- /WIN07/ Winzer, Anton (Hrsg.): Papiermaché und Zelluloid. 4. Aufl. Leipzig: Verlag von B. F. Voigt, 1907
- /WOR95/ Wortmann, Martin: Biologisch abbaubare Verpackungen: Todgesagte leben länger. In: Neue Verpackung (1995), Nr. 4, S. 94-96
- /WÜR01/ Würsching, A.: Orthesen in Prepreg-Technik. In: Orthopädie-Technik 52 (2001), Nr. 11, S. 814-823

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit	Bemerkung
a	Abstand Auflager – Kräfteeinleitungsstelle	mm	
a	Abstand vom CCD-Sensor bis zur Linse	mm	
A	Querschnittsfläche, Fläche	mm ²	
A_i	Flächenelement	mm ²	
A_{ges}	Gesamtfläche	mm ²	
A_p	Fläche, gepresstes Teil	mm ²	
A_u	Fläche, ungepressten Teil	mm ²	
b	Bauteilbreite	mm	
b	Abstand von der Linse bis zum Schnittpunkt des Mittelstrahls mit der Objektebene	mm	
b_i	Breite des Flächenelements	mm	
c	Konstante	1	
c_1, c_2, c_3, c_4	Integrationskonstanten	1	
E	Elastizitätsmodul (kurz E-Modul)	N/mm ²	$E = \sigma / \varepsilon$
E_B	Biege-Elastizitätsmodul	MPa (N/m ²)	DIN 52186 /DIN78c/
E_f	Biegemodul	MPa	DIN EN ISO 178 /DEI97/ DIN EN ISO 14125 /DEI98/
E_0	Elastizitätsmodul oder Nullpunktsmodul	N/mm ²	/ERH93/ /EHR95/
E_m	Biegemodul	N/mm ²	DIN EN 310 /DEN93b/
E_p	E-Modul, gepresstes Teil	N/mm ²	
E_s	Sekantenmodul	N/mm ²	/ERH93/ /EHR95/
E_t	Tangentenmodul	N/mm ²	/EHR95/
E_u	E-Modul, ungepresstes Teil	N/mm ²	
$E \cdot I$	Biegesteifigkeit	N·mm ²	
f	Durchbiegungen, Durchhang	mm	DIN 1304
f_v	Verhältnissfaktor	1	$f = s_{max}/s_{prüf}$
Δf	Differenz der Durchbiegungen	mm	DIN 52186 /DIN78c/
f_m	Biegefestigkeit	N/mm ²	DIN EN 310 /DEN96b/
F	Kraft	N	
ΔF	Kraftdifferenz	N	DIN 52186 /DIN78c/
F_d	Druckkraft	N	
F_N	Normalkraft	N	
F_p	Kraft, vom gepressten Bauteil übertragbar	N	
F_u	Kraft, vom ungepressten Bauteil übertragbar	N	
F_z	Zugkraft	N	
h_i	Höhe des Flächenelements	mm	
h_p	Höhe, gepresstes Teil	mm	
h_u	Höhe, ungepresstes Teil	mm	
H	Flächenmoment 1. Grades	mm ³	DIN 1304
I	Flächenmoment 2. Grades	mm ⁴	DIN 1304
I_{ges}	gesamtes Flächenmoment 2. Grades	mm ⁴	
I_p	Flächenmoment 2. Grades, gepresstes Teil	mm ⁴	
I_u	Flächenmoment 2. Grades, ungepresstes Teil	mm ⁴	
I_x, I_y	Axiale Flächenmoment 2. Grades	mm ⁴	
I_{xy}	Deviationsmoment bzw. Zentrifugalmoment	mm ⁴	

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit	Bemerkung
l	Ausgangslänge, Balkenlänge, Probenlänge	mm	
Δl	Längenänderung	mm	
M_b	Biegemoment	Nm	DIN 1304
$M_b(x)$	Biegemoment, Funktion	Nm	
M_{b_p}	Biegemoment, vom gepressten Teil übertragbar	Nm	
M_{b_u}	Biegemoment, vom ungespressten Teil übertragbar	Nm	
p	Hilfsgröße für Objektkoordinaten	mm	
p_a	Anfordrdruck	Pa	$Pa = N/m^2 = 10^5 \text{ bar}$
q	Hilfsgröße für Objektkoordinaten	mm	
R	Luftfeuchtigkeit	%	
R_e	Streckgrenze	N/mm ²	
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²	
$s_i; s_1; s_2$	Durchbiegung	mm	DIN EN ISO 178 /DEI97/
s', s''	Durchbiegung	mm	DIN EN ISO 14125 /DEI98/
$s_{\text{prüf}}$	Gemessener Verformungsweg	mm	$s_{\text{prüf}} = w(a)$
s_{max}	Maximale Verformung in Balkenmitte	mm	$s_{\text{max}} = w(l/2)$
S	breitenbezogene Biegesteifigkeit	N·mm ² /mm	DIN 53121 /DIN96a/
S	Sicherheit	1	
T	Raumtemperatur	°C	
t_0	gemessene Probenhöhe vor dem Pressen	mm	
t_p	gemessene Probenhöhe nach dem Pressen	mm	
$t_{p \text{ arth}}$	arithmetischer Mittelwert aus t_p	mm	
$t_{0 \text{ arth}}$	arithmetischer Mittelwert aus t_0	mm	
$t_{p P}$	ermittelte Probenhöhe unter Last (Pressdruck)	mm	
V	Probenvolumen	mm ³	
$t(\varphi)$	Probenhöhe in Abhängigkeit von Laufvariable	mm	
w	Verschiebung	mm	
w'	Neigung	1	
w''	Krümmung näherungsweise	1/mm	
w_p	Verschiebung, gepresstes Teil	mm	
w_u	Verschiebung, ungespresstes Teil	mm	
$w(a)$	Verschiebung an Kräfteinleitungsstelle	mm	
$w(l/2)$	Maximale Verschiebung in Trägermitte	mm	
$w(x)$	Verschiebung, Funktion	mm	
W	Widerstandsmoment	mm ³	DIN 1304
W_b	Biege-widerstandsmoment	mm ³	
W_{b1}	Widerstandsmoment, obere Randfaser	mm ³	
W_{b2}	Widerstandsmoment, untere Randfaser	mm ³	
$W_{b \text{ min}}$	Minimales Widerstandsmoment	mm ³	
W_{b_p}	Biege-widerstandsmoment, gepresstes Teil	mm ³	
W_{b_u}	Biege-widerstandsmoment, ungespresstes Teil	mm ³	
x	Laufkoordinate	mm	
y', x'	Bildkoordinaten	mm	
x_s, x_{si}	Schwerpunktsabstand in x-Richtung	mm	
y, x	Objektkoordinaten		
x/l	Auf die Trägerlänge l normierte Koordinate	1	
y_s, y_{si}	Schwerpunktsabstand in y-Richtung	mm	

Formelzeichen	Bedeutung	SI-Einheit	Bemerkung
z	Schwerpunktsabstand	mm	
z_0	Abstand Momentenbezugspunkt - Schwerachse	mm	
z_1, z_2	Randfaserabstände	mm	
z_i	Schwerpunktsabstand zu beliebiger Achse	mm	
z_{i0}	Schwerpunktsabstand zur Schwerachse	mm	
α	Triangulationswinkel	1	
β_B	Biegefestigkeit	N/mm ²	DIN 52186 / DIN78c/
ε	Dehnung, relative Längenänderung	1	$\varepsilon = \Delta l / l$
ε_p	Dehnung, gepresstes Teil	1	
ε_u	Dehnung, ungespresstes Teil	1	
$\varepsilon_{f1}; \varepsilon_{f1}; \varepsilon_{f2}$	Randfaserdehnungen	1	DIN EN ISO 178 /DEI97/
θ	Faserrichtung zur Probenlängsrichtung	Grad	
λ_G	Geometriefaktor	1	$\lambda_G = h_v/h_p \geq 1$
λ_{H2}	Wasserstoffbrückenfaktor	1	$\lambda_{H2} \geq 1$
λ_B	Faserbruchfaktor	1	$\lambda_B \geq 1$
λ_v	Verdichtungsgrad	1	$\lambda_v = t_{p,arth}/t_{0,arth} \leq 1$
λ_R	Rückverformungsgrad	1	$\lambda_R = t_{p,arth}/t_{0,arth} \leq 1$
ν	Sicherheit	1	
ρ	Probendichte	g/mm ³	
σ_b	Biegespannung	N/mm ²	
σ_B	Bruchspannung	N/mm ²	
σ_{b1}, σ_{b2}	Randfaserspannungen	N/mm ²	
$\sigma_{bd1}, \sigma_{bd2}$	Obere Druck- und untere Zugspannung, aus Biegung resultierend	N/mm ²	
$\sigma_{bd \max}$	Maximale Druckspannung	N/mm ²	
$\sigma_{b,p}$	Biegespannung, gepresstes Teil	N/mm ²	
$\sigma_{b,u}$	Biegespannung, ungespresstes Teil	N/mm ²	
σ_{bF}	Biegefließgrenze	N/mm ²	
σ_F	Fließgrenze	N/mm ²	
$\sigma_{bz1}, \sigma_{bz2}$	Obere Zug- und untere Druckspannung, aus Biegung resultierend	N/mm ²	
$\sigma_{bz \max}$	Maximale Zugspannung	N/mm ²	
$\sigma_{b \text{ zul } p}$	zulässige Biegespannung, gepresstes Teil	N/mm ²	
$\sigma_{b \text{ zul } u}$	zulässige Biegespannung, ungespresstes Teil	N/mm ²	
σ_d	Druckspannung	N/mm ²	
$\sigma_{d \text{ zul}}$	zulässige Druckspannung	N/mm ²	
σ_{bF}	Biege-Quetschgrenze	N/mm ²	
σ_f	Biegefestigkeit bzw. Biegespannung	MPa	DIN EN ISO 178 /DEI97/ DIN EN ISO 14125 /DEI98/
σ_N	Normalspannung	N/mm ²	siehe DIN 13316
σ_z	Zugspannung	N/mm ²	
$\sigma_{z \text{ zul}}$	zulässige Zugspannung	N/mm ²	
$\sigma_{z \text{ zul } p}$	zulässige Zugspannung, gepresstes Teil	N/mm ²	
$\sigma_{z \text{ zul } u}$	zulässige Zugspannung, ungespresstes Teil	N/mm ²	
τ	Schubspannung	N/mm ²	siehe DIN 13316
φ	Laufvariable	Grad	