

# **Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Flugzeughölzern**

Bakkalaureats Arbeit

Erstellt von  
Michael Kreßl

Betreuer: Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.Christoph Buksnowitz  
Institut für Holzforschung  
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik  
Universität für Bodenkultur  
BOKU – Wien

Juli 2009

## **Abstract**

In this work the mechanical properties of typical aircraft woods for example Sitka Spruce (*Picea sitchensis* Bong.) have been determined. Therefore 120 samples for tensile tests and 50 samples for compression tests of five different woods species with different sortations have been made. The tests have been arranged on the basis of the "manufacturing specification for gliders 1950". Furthermore the strength of a special stem which will be used for the construction of an airplane has been inspected. For this reason the certification of the strength is necessary. Also a comparison with the most important up to date materials for aircraft construction which are compounds, titan-, ferrous- and aluminium alloys has been made.

All the wood species and sortations met the tensile- and compression strength requirements for the aircraft industry. A maximum value of 180 N/mm<sup>2</sup> tensile strength could be reached with an ash (*Fraxinus Excelsior* L..) sample.

The gained results confirm the use of wood as a material for aircraft constructions. The comparison with the modern materials for aircraft construction shows that wood would be competitive only of the mechanical properties exclusive of any economic aspects.

## **Keywords**

Aircraft material, Compression strength, Historical use of wood, Mechanical wood properties, Tensile strength, Wooden aircraft

## **Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurden die mechanischen Eigenschaften von typischen Flugzeughölzern wie zum Beispiel Sitka Spruce (*Picea sitchensis* Bong.) ermittelt. Hierfür wurden 120 Zugproben und 50 Druckproben aus fünf verschiedenen Holzarten und verschiedenen Sortierungen erstellt. Anhand der „Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950“ wurden die Prüfungen durchgeführt. Weiters wurde noch die Festigkeit eines ganz speziellen Stammes, welcher zur Konstruktion eines Flugzeuges verwendet werden wird, überprüft. Weshalb ein Nachweis der Festigkeit für die Zulassung nötig ist.

Weiters wurde ein Vergleich mit Faserverbundwerkstoffen, Titan-, Stahl- und Aluminiumlegierungen erstellt, welche die wichtigsten aktuellen Werkstoffe für die Konstruktion von Flugzeugen darstellen.

Alle Holzarten haben die Festigkeitsanforderungen für die Flugzeugindustrie erreicht. Ein Maximalwert von 180 N/mm<sup>2</sup> Zugfestigkeit konnte mit einer Eschenprobe erreicht werden.

Die gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Verwendung von Holz als Material für Flugzeugkonstruktionen. Der Vergleich mit den modernen Flugzeugwerkstoffen zeigt, dass Holz aufgrund der spezifischen Zugfestigkeit auf jeden Fall konkurrenzfähig wäre, ohne jede Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten.

## **Schlagwörter**

Flugzeugmaterialien, Druckfestigkeit, historische Verwendung von Holz, Mechanische Eigenschaften von Holz, Zugfestigkeit, Flugzeuge aus Holz,

# INHALT

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Materialien .....</b>	<b>5</b>
2.1 Holzarten .....	5
2.1.1 Anforderungen der Norm .....	5
2.1.2 Auswahl der Holzarten .....	6
2.2 Prüfmaschine.....	8
2.3 Messinstrumente .....	8
<b>3. Methodik .....</b>	<b>9</b>
3.1 Zugprüfung nach den Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950 .....	9
3.1.1 Versuchsaufbau .....	9
3.1.2 Probendimension .....	11
3.1.3 Belastungsgeschwindigkeit.....	12
3.2 Druckprüfung nach den Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950.....	12
3.2.1 Versuchsaufbau .....	12
3.2.2 Wegmessung .....	12
3.2.3 Probendimension .....	13
3.2.4 Belastungsgeschwindigkeit.....	13
3.3 Bestimmung der Rohdichte nach DIN 52 182 und Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes nach DIN 52 183.....	13
<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>14</b>
4.1 Literaturrecherche .....	14
4.1.1 Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten der Holzarten .....	14
4.1.2 durchschnittliche Eigenschaften.....	15
4.1.3 Anforderungen der Norm .....	15
4.1.4 moderne Flugzeugwerkstoffe.....	15
4.2 praktische Arbeit.....	17
4.2.1 Zugprüfung.....	17
4.2.2 Druckprüfung .....	21
<b>5. Diskussion.....</b>	<b>23</b>
5.1 Zugprüfung .....	23
5.2 Druckprüfung .....	24
<b>6. Schlussfolgerung.....</b>	<b>25</b>

## 1. Einleitung

Durch die Verwendung von Holz als Werkstoff für die Konstruktion von Flugzeugen, wurde die Grundlagenforschung stark vorangetrieben. Bei vielen Themen wie zum Beispiel Quellen und Schwinden, Dichte, Holzanatomie,... bilden diese Ergebnisse noch heute die Grundlage der Entwicklung. Gerade die mechanischen Eigenschaften wie Zug-, Druck-, Biege-, Scherfestigkeit usw. waren enorm wichtig um leistungsfähige Flugzeuge bauen zu können (Hill 1934). Erste Richtlinien zur genormten Festigkeitsprüfung von Holz entstanden. Weiters wurden natürlich auch die Einflüsse auf die Festigkeit erforscht und Sortierkriterien zur Auswahl der Hölzer wurden entwickelt (Information of inspectors of airplane wood 1919). Ein weiterer großer und wichtiger Forschungsbereich war die Holz Trocknung, da die Komplexität und die weitreichenden Auswirkungen der Holz Trocknung bereits bekannt waren (Willson 1920). Trotz dieser enormen Entwicklung konnte die Verwendung von Metallen für den Flugzeugbau nicht verhindert werden. Somit wurde Holz nach und nach substituiert. Die Einführung von Faserverbundwerkstoffen führte schlussendlich, bis auf einige Nischenprodukte, zur vollständigen Verdrängung aus der Flugzeugindustrie.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die mechanischen Eigenschaften von den verschiedenen Holzarten und speziellen Sortierungen, welche im Flugzeugbau zum Einsatz kommen, durch Zug- und Druckprüfungen aufzuzeigen und mit modernen Werkstoffen aus der Flugzeugindustrie in Relation zu stellen. Weiters sollte auch für ein aktuelles Projekt, der Festigkeitsnachweis für einen Stamm erbracht werden, der in Zukunft für den Bau eines Flugzeuges verwendet werden wird.

## 2. Material

### 2.1 Holzarten

#### 2.1.1 Anforderungen der Norm

Für Vollholz wie zum Beispiel Kiefer (*Pinus silvestris L.*), Tanne (*Abies Alba L.*), Fichte (*Picea abies Karst.*) und Esche (*Fraxinus excelsior L.*) zur direkten Verarbeitung zu Bauteilen wird folgendes gefordert: gerader Wuchs, lufttrockener Zustand, möglichst wenig Äste, keine Gallen und Risse, nicht zu hoher Harzgehalt mit Rücksicht auf Festigkeit und Leimung, keine Rotfäule und bei lebenswichtigen Teilen: kein Verblauen (Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950).

### 2.1.2 Auswahl der Holzarten

Für die Zug- und Druckproben wurden spezielle Holzarten und Sortierungen unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Norm (siehe 2.1.1) ausgewählt, welche im Flugzeugbau verwendet wurden bzw. immer noch verwendet werden.

Die Proben für die Zug- und Druckprüfung wurden direkt angrenzend aus den selben Stücken gefertigt um eine Vergleich zu ermöglichen.

#### 2.1.2.1 Sitka Spruce (*Picea sitchensis* Bong.)

Die Probensätze 1-3 wurden aus einem Pfosten entnommen, welcher für den Nachbau eines Flugzeuges des Typs Klemm 25 D verwendet wird.



**Abb. 1:** Konstruktionsholz für Klemm 25D



**Abb. 2:** Klemm 25D

Durch diese Proben soll der nötige Festigkeitsnachweis (Tabelle 2) des Holzes erbracht werden. Der erste Probensatz wurde aus dem stocknäheren Ende des Stammes, der zweite aus der Mitte und der dritte aus dem zopfnäheren Ende entnommen, um Information über die Variation der Eigenschaften in longitudinaler Richtung zu erhalten. Um einen möglichst geradlinigen Jahrringverlauf in den Proben zu erhalten wurde der zweite Probensatz aus dem Pfosten gespalten. Dies war bei den anderen beiden aufgrund der sonstigen Ausbeuteverluste nicht möglich.

Der 4. Probensatz wurde aus einem Stamm entnommen, welcher der Sortierung A und der 5. Probensatz aus einem Stamm, welcher der Sortierung B entsprechen würde (Mayrhofer 2009). Der Unterschied besteht hauptsächlich in der Jahrringbreite der Hölzer. Es sollte somit ein möglicher Festigkeitsunterschied der beiden Sortierungen nachgewiesen werden.

Mit dem 6. Probensatzes sollten die Auswirkungen von Reaktionsholz, bei sonst keinen weiteren ersichtlichen Holzanomalien überprüft werden.

Der 7. Probensatz wurde aus einem Pfosten mit extrem spröden Verhalten in der Verarbeitung entnommen. Optisch waren jedoch keine Anomalien erkennbar.

#### 2.1.2.2 Fichte (*Picea abies* Karst.)

Für den 8. Probensatz wurde slowenisches Fichtenholz aus Zagorje verwendet, welches aufgrund der allgemeinen Wuchsbedingungen (Klima, Boden,...), als ausgezeichnetes Holz für den Flugzeugbau dienen sollte (Mayrhofer 2009).

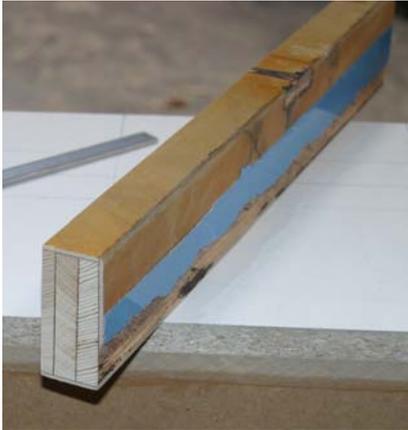
#### 2.1.2.3 Kiefer (*Pinus silvestris* L.)

Die Proben des 9. Probensatzes stammen aus einem Kiefernholm welcher mit Aerodux verleimt wurde. Der Holm stammt aus einem Obergurt eines Flugzeuges des Typs Schleicher Ka 8. Dieses Flugzeug wurde für Schulungszwecke verwendet und hatte daher sehr viele Starts (ca. 22900) und viele Flugstunden (6355) absolviert bevor es aufgrund eines Flugfehlers abstürzte (Knapp 2009). Der Obergurt ist eines der Bauteile welches gerade bei Start und Landung extrem beansprucht wird. (Sun 1998).

Aus diesem Grund sollte mit diesen Proben die Materialermüdung von Holz im Flugzeugbau überprüft werden.



**Abb. 3:** Obergurt Schleicher Ka 8



**Abb. 4:** Flugzeugholm

Der 10. Probensatz bestand aus reinem Kiefernholz (*Pinus silvestris L.*) und sollte Aufschluss über dessen Festigkeit bringen.

#### 2.1.2.4 Esche (*Fraxinus excelsior L.*)

Bei den Probensätzen 11 – 13 wurde Eschenholz (*Fraxinus excelsior L.*) mit den Sortierungen: leichte Esche, mittlere Esche und schwere Esche, was hauptsächlich auf die Jahrringbreite zurückzuführen ist, verwendet. Der Festigkeitsunterschied dieser Sortierungen sollte überprüft werden.

Der 14. Probensatz wurde aus verkernter Esche produziert, um diesen Einfluss, auf einen etwaigen Einsatz im Flugzeugbau zu überprüfen.

#### 2.1.2.5 Mahagoni (*Swietenia macrophylla King*)

Für den 15. Probensatz wurde Mahagoni (*Swietenia macrophylla King*) verwendet, um auch eine Holzart welche hauptsächlich für Propeller verwendet wurde, charakterisieren zu können.

## 2.2 Prüfmaschine

Für die Durchführung der Zug- und Druckfestigkeitsprüfung wurde eine Prüfmaschine der Marke Zwick/Roell des Typ 100kN verwendet. Es wurde ein 100kN Karftmessdose mit einer Genauigkeitsklasse 1 nach DIN EN ISO 7500-1 ausgewählt. Als Wegmesssystem wurde ein Makrodehnungsmessfühler und zum Einspannen der Proben hydraulische Probenhalter verwendet.

## 2.3 Messinstrumente

Die Dimension der Zug- und Druckproben, sowie der Proben für die Dichtebestimmung wurde mit einer digitalen Schiebelehre (Genauigkeit 0,01mm) und das Gewicht der Proben für die Dichte- und Feuchtigkeitsbestimmung wurde mit einer digitalen Waage (Genauigkeit 0,001g) bestimmt.

### 3. Methodik

Die Zug- und Druckprüfungen wurden nach den Bauvorschriften für Segelflugzeuge von 1950 durchgeführt, da diese das aktuelle Regelwerk für Holz im Flugzeugbau bilden.

Die Proben wurden vor den Prüfungen im Normklima gelagert und die Prüfungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

#### 3.1 Zugprüfung nach den Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950

##### 3.1.1 Versuchsaufbau



**Abb. 5:** Zugprüfmaschine

##### 3.1.1.1 Einspannung

Zur Einspannung der Proben wurden die hydraulischen Spannbacken verwendet, da mit diesen ein, für alle Proben, gleichmäßiger Spanndruck, im Gegensatz zur händischen Spannung, erreicht werden konnte. Weiters mit Keilspannfaktor gearbeitet, was bedeutet, dass sich der Spanndruck mit ansteigender Zugkraft erhöht und somit das Rutschen der Probe in den Spannbacken verhindert wird. Zur genauen Positionierung der Proben wurde ein Anschlag verwendet, wodurch die Proben vertikal exakt ausgerichtet waren und somit Torsionskräfte in den Proben vermieden werden konnten.

Ermittlung des Spanndrucks:

In der Norm gibt es keine Angaben zum Spanndruck deshalb musste dieser erst mittels Versuchsproben eruiert werden. Aufgrund der geringen Einspannfläche der Proben, im Verhältnis zum Prüfquerschnitt, war es nicht möglich die Proben, ohne erhebliche Deformationen an den Einspannstellen ausreichend zu spannen. (siehe Abbildung 6) Die Deformation würde wiederum Spannungsspitzen hervorrufen und der Bruch würde in diesen Bereichen, außerhalb der parallelen Probenlänge auftreten. Somit könnten die Proben nicht zur Auswertung herangezogen werden. Durch das Anbringen von Anleimklötzen konnte die Einspannfläche erhöht und der nötige Spanndruck ohne beeinträchtigende Deformation aufgebracht werden.



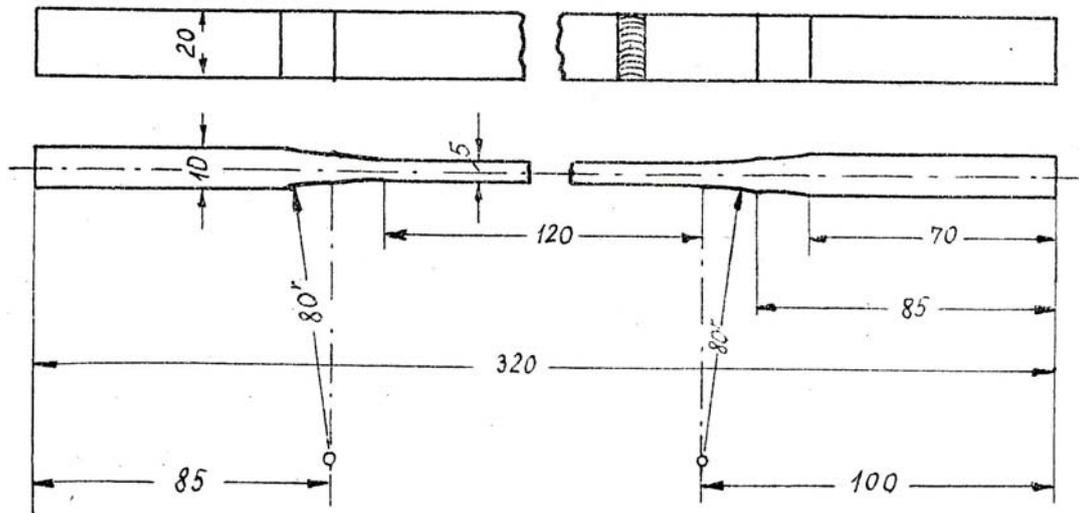
**Abb. 6:** Auswirkungen Spanndruck

### 3.1.1.2 Wegmessung

Zur genauen Bestimmung der Dehnung wurde ein Makrowegaufnehmer verwendet. Die Fühler wurden in einem Abstand von 80mm in der Mitte der Proben angesetzt und bei einer Zugspannung von 80 N/mm<sup>2</sup> abgenommen um das feinfühlige Messgerät durch die Erschütterungen beim Bruch nicht zu beschädigen. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Dehnung über den Weg der Traverse bestimmt.

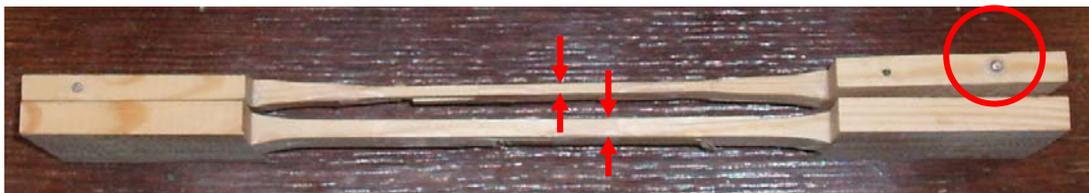
### 3.1.2 Probendimension

Die Proben wurden laut Norm dimensioniert. (siehe Abbildung 7)



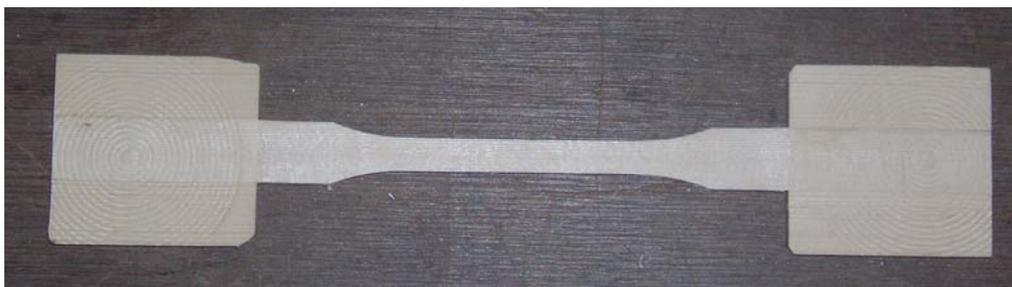
**Abb. 7:** Probendimension Zugprüfung

Bei einigen Proben musste die Leimfuge der Anleimklötze mittels kleinen Nägeln verstärkt werden, um die auftretenden Scherkräfte zu übertragen. (Abbildung 8) Da dies bei einigen Proben immer noch nicht zum Bruch sondern wiederum zum Versagen der Anleimklötze kam, wurde bei diesen Proben die Dicke von 5 mm auf 3 mm reduziert.



**Abb. 8:** Änderungen an den Zugproben

Bei vier Proben musste dann noch zusätzlich die Breite von 20mm auf 10mm reduziert werden um den Bruch innerhalb der parallelen Probenlänge zu erreichen. (Abbildung 9)



## **Abb. 9:** Dimensionsänderung Zugproben

### *3.1.3 Belastungsgeschwindigkeit*

Die maximale Belastungsgeschwindigkeit, laut Norm, für Nadelhölzer 120 N/s und für Esche 170 N/s wurde nicht überschritten. Zur maximale Zeit bis zum Bruch gibt es in der Norm keine Angaben.

## **3.2 Druckprüfung nach den Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950**

### *3.2.1 Versuchsaufbau*



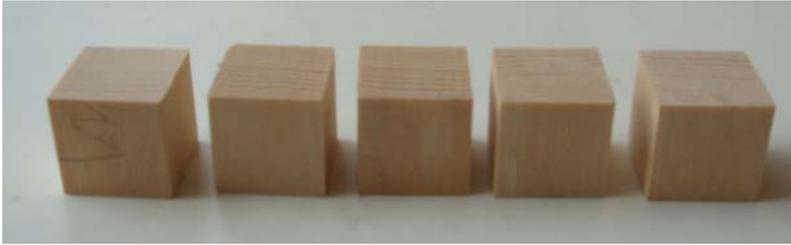
**Abb. 10:** Druckprüfung

Die Druckproben wurden genau im Mittelpunkt der Prüfplatten eingerichtet, um ein gleichmäßiges Belasten der Probe zu gewährleisten. (siehe Abbildung 10)  
Als Ende der Prüfung wurde ein Kraftabfall von 20% vom Maximalwert angenommen.

### *3.2.2 Wegmessung*

Die Dimensionsänderung der Probe wurde über den Traversenweg ermittelt, da für den Einsatz des Makros die Probenhöhe zu gering war.

### 3.2.3 Probendimension



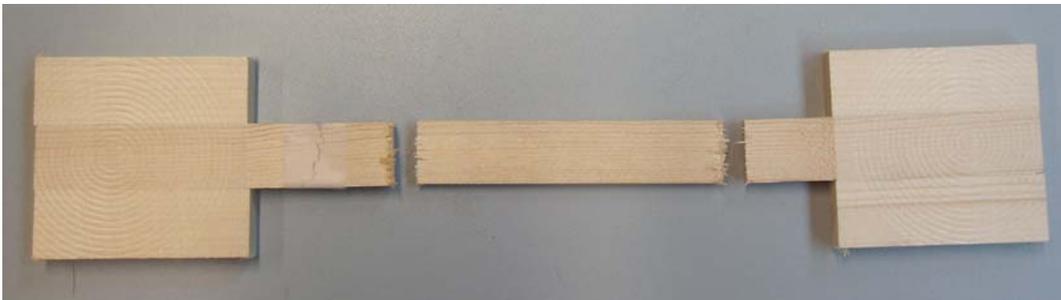
**Abb. 11:** Druckproben

Für die Druckproben wurden Würfel mit einer Seitenlänge von 20mm verwendet. (siehe Abbildung 11) Diese sind im Vergleich zu anderen Druckprüfungsproben eher klein, es wurde jedoch bewusst diese Probendimension gewählt um genau nach Norm vorzugehen.

### 3.2.4 Belastungsgeschwindigkeit

Die maximale Belastungsgeschwindigkeit, laut Norm, für Kiefer (*Pinus silvestris* L.) und Esche (*Fraxinus excelsior* L.) 70 N/s und für die restlichen Nadelhölzer 60 N/s wurde nicht überschritten. Maximale Zeit bis zum Bruch musste, laut Norm; nicht berücksichtigt werden.

## 3.3 Bestimmung der Rohdichte nach DIN 52 182 und Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes nach DIN 52 183



**Abb. 12:** Probenentnahme für die Dichte und Feuchtigkeitsbestimmung

Die Dichte und die Feuchtigkeit wurden anhand derselben Proben bestimmt. Diese wurden aus den Zugproben herausgeschnitten. Es wurde versucht, die Proben so groß wie möglich zu gestalten, es konnte jedoch nur der unbeschädigte Bereich der parallelen Probenlänge zur Dichte- und Feuchtigkeitsbestimmung verwendet werden.

Zur Bestimmung des Darrgewichtes wurden die Proben in einem Darrofen bei 103 C° gedarrt. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz, wurden Sie vor dem Wägen im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt.

Zur Bestimmung der Dichte und des Feuchtigkeitsgehaltes wurde laut Norm vorgegangen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Literaturrecherche

#### 4.1.1 Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten der Holzarten

##### 4.1.1.1 Sitka Spruce (*Picea sitchensis* Bong.)

Sitka Spruce ist in Nordamerika entlang der Pazifikküste von Alaska bis Nord Kalifornien beheimatet. Aufgrund von hoher Festigkeit und Steifigkeit im Verhältnis zur Masse war Sitka Spruce die am meisten verwendete Holzart im Flugzeugbau. Weiters weist Sitka Spruce einen sehr regelmäßigen Wuchs auf. Es ist leicht zu trocknen, gut zu bearbeiten und zu verkleben weshalb es im Flugzeug für fast alle Bauteile verwendet werden kann (Trayer 1930).

##### 4.1.1.2 Kiefer (*Pinus silvestris* L.)

Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften wie Sika Spruce und wegen der Verfügbarkeit der benötigten Mengen war Kiefer in Europa die am meisten verwendete Holzart für Flugzeugkonstruktionen. Ebenso wie Sika Spruce konnte es für beinahe alle Bauteile im Flugzeug verwendet werden konnte (Küch 1939).

##### 4.1.1.3 Fichte (*Picea abies* Karst.)

Fichte ist leichter als Kiefer, hat jedoch auch etwas geringere Festigkeit weshalb es auch eher als Kiefernersatz verwendet wurde (Küch 1939).

##### 4.1.1.4 Esche (*Fraxinus excelsior* L.)

Esche wurde aufgrund seiner hohen Festigkeit und Steifigkeit für in erster Linie für Holme, Längsträger und Propeller verwendet. Gebogene Bauteile welche trotzdem hohe Festigkeit aufweisen mussten, wurden auch häufig aus Esche gefertigt (Jenkin 1930).

##### 4.1.1.5 Mahagoni (*Swietenia macrophylla* King)

Mahagoni ist schwerer als Sitka Spruce und hat eher sprödes Werkstoffverhalten weshalb es auch hauptsächlich nur für Propeller eingesetzt wurde (Trayer 1930).

#### 4.1.2 durchschnittliche Eigenschaften

Holzart	Darrdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
Sitka Spruce ( <i>Picea sitchensis</i> Bong.)	0,36	35	70	52	9.100
Fichte ( <i>Picea abies</i> L.)	0,43	50	90	78	11.000
Kiefer ( <i>Pinus silvestris</i> L.)	0,37	34	76	61	10.000
Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	0,65	52	120	100	12.400
Mahagoni ( <i>Swietenia macrophylla</i> King)	0,50	50	100	85	8.000

**Tab. 1:** durchschnittliche Eigenschaften der Holzarten

#### 4.1.3 Anforderungen der Norm

Holzart	Darrdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
Kiefer Klasse I ( <i>Pinus silvestris</i> L.)	< 0,62	48	80	75	10.000
Kiefer Klasse II ( <i>Pinus silvestris</i> L.)	< 0,57	40	70	65	10.000
sonstige Nadelhölzer		35	70	60	10.000
Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	0,70	45	100	100	11.000
Mahagoni ( <i>Swietenia macrophylla</i> King)	0,50	60	100	100	12.000

**Tab. 2:** Anforderungen der Norm

#### 4.1.4 Moderne Flugzeugwerkstoffe

Werkstoffe für den Flugzeugbau müssen bei einer möglichst hohen Zugfestigkeit gleichzeitig leicht sein. Zur Beurteilung solcher Werkstoffe ist deshalb eine Wertung der mechanischen Eigenschaften in Bezug auf die Dichte unerlässlich. Teilt man die Zugfestigkeit ( $R_M$ ) durch die Dichte ( $\rho$ ) und die Fallbeschleunigung ( $g$ ), so ergibt sich die spezifische Zugfestigkeit, die auch als Reißlänge ( $L_R$ ) bezeichnet wird (Engmann 2008). S. 114

$$L_R = R_M / g * \rho$$

### Aluminiumlegierungen

Aluminiumlegierungen bilden den überwiegenden Anteil der Struktur eines Flugzeuges. Sie haben durch eine Reihe vorteilhafter Eigenschaften eine besondere Bedeutung für den Flugzeugbau. Zu diesen Eigenschaften zählen: günstige mechanische Eigenschaften, chemische Beständigkeit, Witterungs- und Seewasserbeständigkeit, gute Bearbeitbarkeit, gute Wärme- und elektrische Leitfähigkeit (Engmann 2008).

### Stahllegierungen

Für besonders hoch beanspruchte Bauteile im Flugzeug, die gleichzeitig relativ klein sein müssen, werden Stahllegierungen verwendet. Diese weisen, je nach Legierung, bis zu 2000 N/mm<sup>2</sup> Zugfestigkeit auf. Das Fahrwerk besteht zum Beispiel in seinen tragenden Teilen aus einer hochfesten Stahllegierung. Außerdem werden hochfeste Verbindungselemente und spezielle Triebwerksteile aus Stahllegierungen gefertigt (Engmann 2008).

### Titan und Titanlegierungen

Titanwerkstoffe zeichnen sich durch die hohe spezifische Zugfestigkeit, auch bei erhöhten Temperaturen und die sehr gute Korrosionsbeständigkeit aus (Engmann 2008).

### Faserverbundwerkstoffe

Die Möglichkeit, bei Verwendung herkömmlicher Aluminiumlegierungen größere Massenreduzierungen zu erreichen, sind heute praktisch erschöpft. Aus diesem Grund werden in zunehmendem Maße Faserverbundwerkstoffe eingesetzt. Das Verhalten der Faserverbundwerkstoffe weicht stark von dem der Legierungen ab. Die Eigenschaften sind von Matrix- und Faserwerkstoff, vom Anteil und von der Richtung der Fasern sowie deren Qualität und Herstellungsart abhängig. Insbesondere bei der Kohlenstofffaser kann aufgrund der Vielzahl der angebotenen Faserarten, die durch unterschiedliche Herstellungsarten und spezielle Wärmebehandlungsverfahren erzeugt werden, für jeden Anspruch die geeignete Faser gewählt werden (Engmann 2008).

Werkstoff	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Reißlänge [km]
<b>Aluminiumlegierungen</b>				
Al 99,5	2,7	110	70.000	4
AlZnMgCu1,5	2,8	515	71000	19
<b>Stahlwerkstoffe</b>				
X10CrNiTi18 9	7,9	735	200000	9
18%Ni; 9%Co; 5%Mo; 0,7%Ti	7,9	1960	197000	25
<b>Titanlegierungen</b>				
Ti 99,5	4,5	410	108000	9
TiAl6V6Sn2	4,54	1070	118000	24
<b>Faserverbundwerkstoffe</b>				
GFK	2,4	1000	45000	42
AFK	1,4	2200	80000	160
Karbonfaser	1,8	4600	230000	260

**Abkürzungen:** GFK... glasefaserverstärkter Kunststoff  
AFK... aramidfaserverstärkter Kunststoff

**Tab. 3:** Werkstoffwerte Flugzeugmaterialien

## 4.2 praktische Arbeit

### 4.2.1 Zugprüfung

Es wurden insgesamt 110 Zugprüfungen durchgeführt. Dabei wurden Proben aus fünf verschiedenen Holzarten und 15 verschiedenen Sortierungen getestet. Abbildung 13 gibt einen Überblick über alle Zugproben.



**Abb. 13:** Übersicht Zugproben

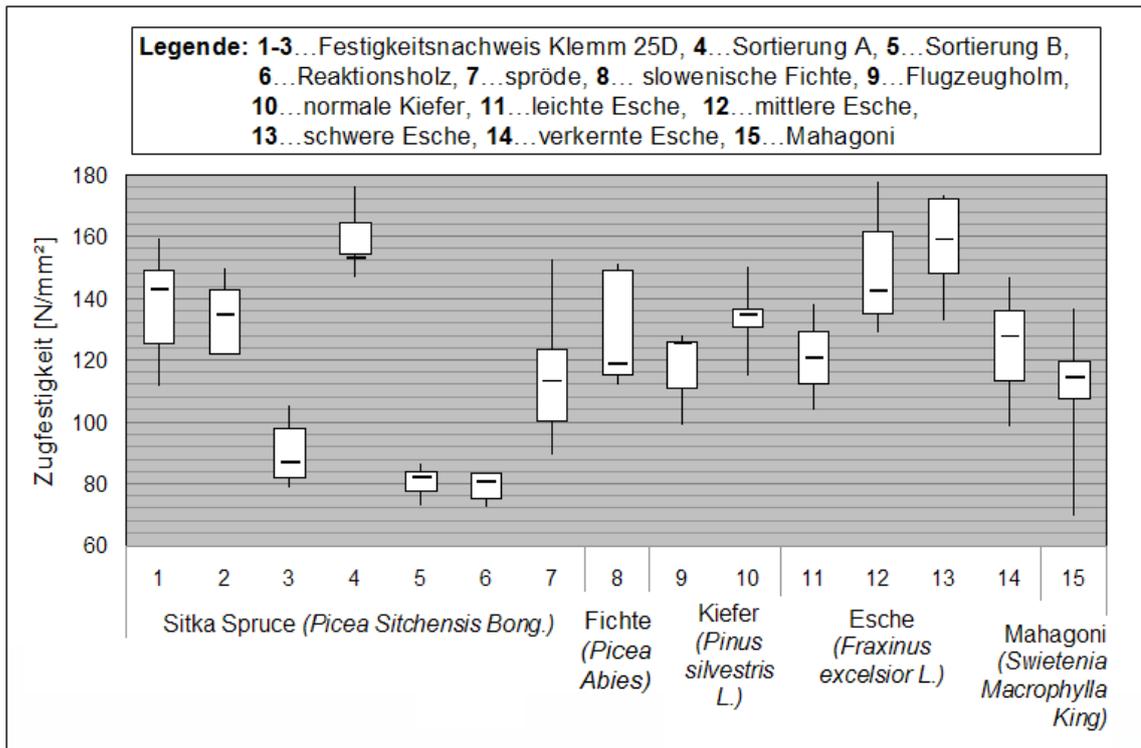
In Tabelle 4 sind alle Ergebnisse der Zugprüfung und der Dichte- und Feuchtigkeitsbestimmung zusammengefasst. Es sind jeweils die Mittelwerte der Probensätze angeführt.

Holzart		n	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s_{\sigma}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_o$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$L_R$ [km]	b [mm]	u [%]
Sitka Spruce ( <i>Picea sitchensis</i> Bong.)	1	6	12693	137,79	18,47	0,49	29	0,88	11,8
	2	8	11363	130,66	16,97	0,47	28	1,43	11,6
	3	6	11120	90,1	11,01	0,45	20	1,2	11,7
	4	3	14456	158,62	15,45	0,55	29	0,56	11,4
	5	3	9249	80,59	7,08	0,38	22	2,34	11,2
	6	7	12243	79,48	8,12	0,46	18	1,12	11,6
	7	7	10317	114,65	21,71	0,55	21	0,59	11,5
Fichte ( <i>Picea Abies</i> )	8	7	17116	130,13	18,61	0,49	27	0,39	12,2
Kiefer ( <i>Pinus silvestris</i> L.)	9	5	13362	117,88	12,65	0,48	25	\	10,0
	10	4	15942	133,51	11,34	0,59	23	1,01	11,5
Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	11	2	10417	120,82	24,3	0,5	25	1,06	10,1
	12	12	13623	145,96	19,4	0,63	24	1,01	10,1
	13	10	13228	159,63	15,54	0,67	24	3,78	11,2
	14	6	9119	124,63	18,01	0,75	17	5,96	10,5
Mahagoni ( <i>Swietenia macrophylla</i> King)	15	10	11862	111,05	17,78	0,61	19	0,58	12,6

**Abkürzungen:** n...Stichprobenumfang,  $\sigma$ ...mittlere Zugfestigkeit,  $s_{\sigma}$ ...Standardabweichung,  
 $\rho_o$ ...mittlere Darrdichte, b...mittlere Jahrringbreite,  $L_R$ ...Reißlänge,  
u...Holzfeuchte

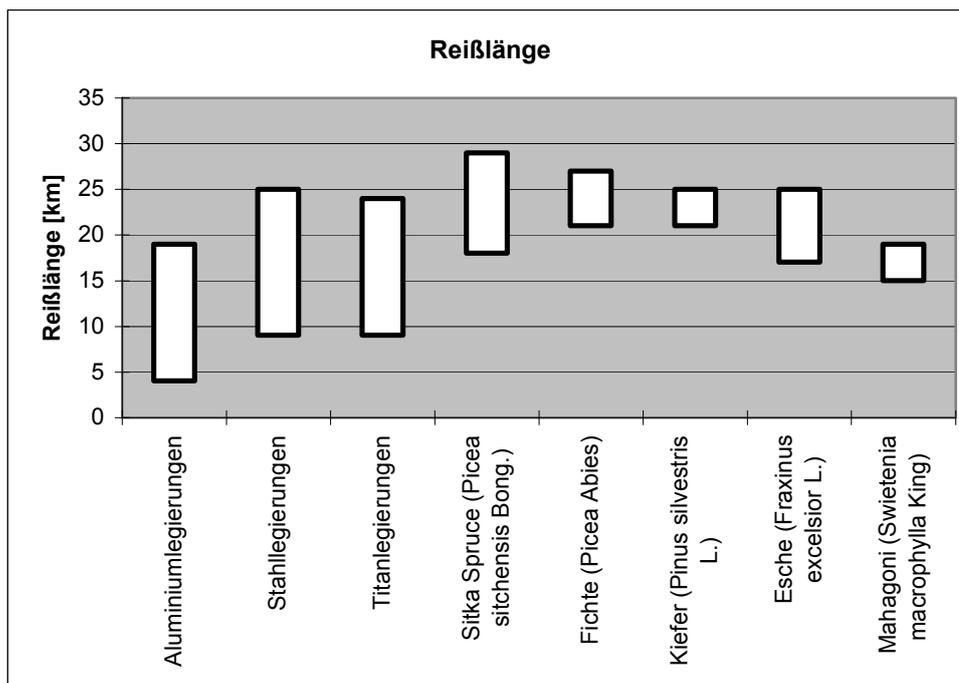
**Tab. 4:** Ergebnisse Zugprüfung

Abbildung 14 zeigt die Zugfestigkeiten der verschiedenen Holzarten.



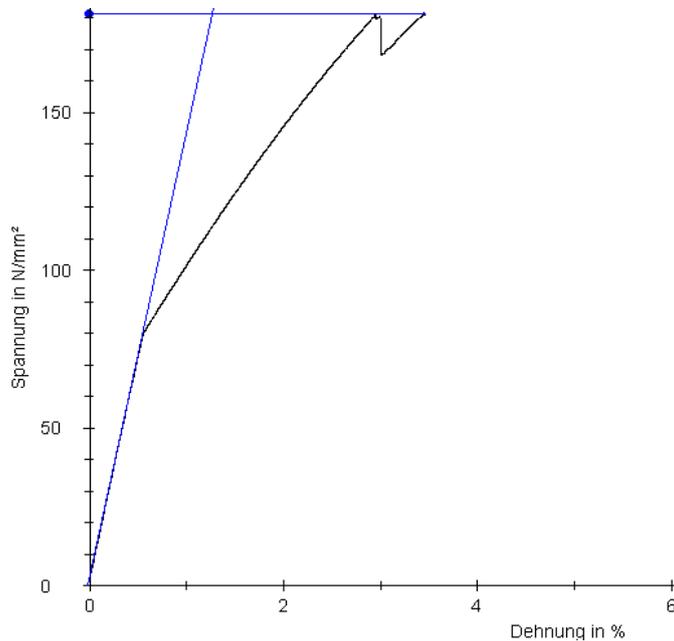
**Abb. 14:** Zugfestigkeit der Holzarten

In Abbildung 15 sind die Reißlängen der wichtigsten Flugzeugwerkstoffe und der verschiedenen Holzarten dargestellt. Faserverbundwerkstoffe mit einer Reißlänge von 42 – 160 km werden aus Gründen der Darstellung in der Abbildung nicht berücksichtigt (Engmann 2008).



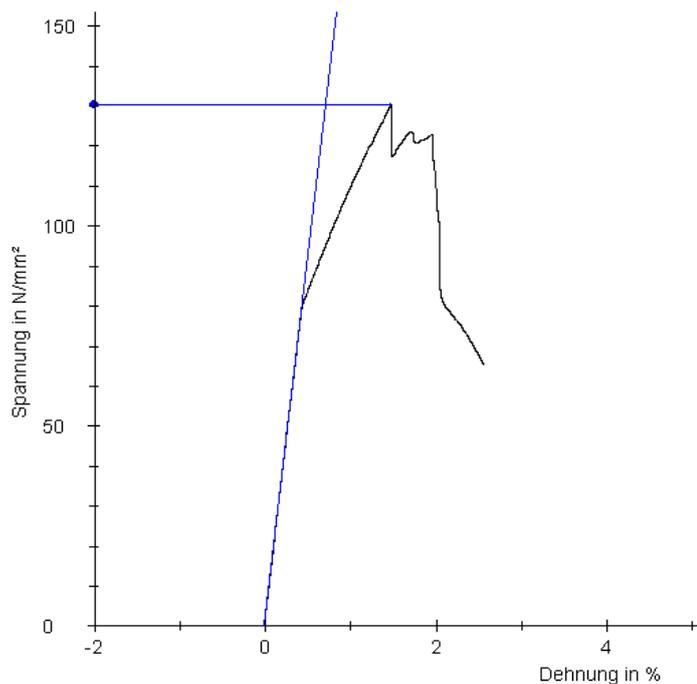
**Abb. 15:** Reißlänge verschiedener Werkstoffe

Abbildung 16 zeigt das Spannungs- Dehnungsdiagramm der Zugprobe mit der, der maximale Festigkeitswert von 181 N/mm<sup>2</sup> erreicht wurde. Es handelt sich um eine Probe der Sortierung schwere Esche.



**Abb. 16:** Maximale Festigkeit Zugprüfung

In Abbildung 17 ist das Spannungs- Dehnungsdiagramm der Zugprobe, mit der, der maximale E-Modul von 18230 N/mm<sup>2</sup> erreicht wurde, dargestellt. Die Holzart war Fichte.



**Abb. 17:** Maximaler E-Modul Zugprüfung

#### 4.2.2 Druckprüfung

Es wurden 50 Druckprüfungen aus drei verschiedenen Holzarten und fünf Sortierungen durchgeführt.

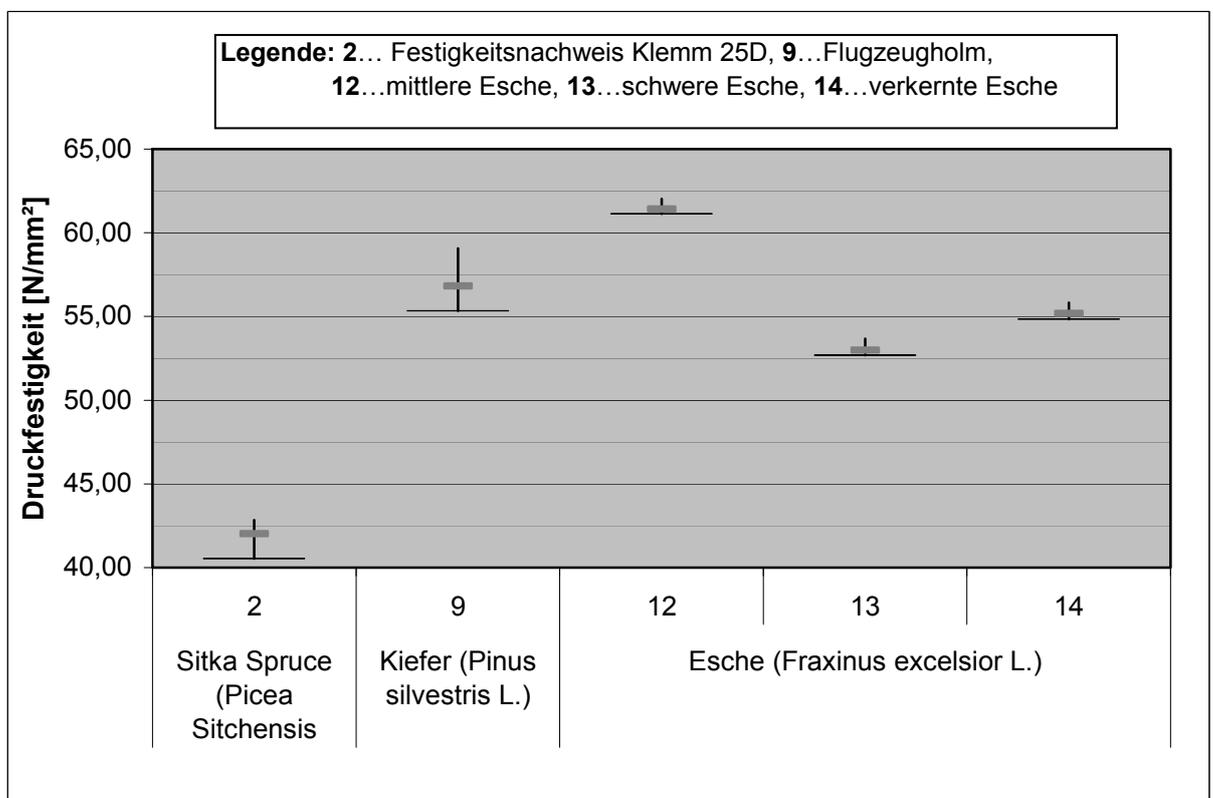
Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Druckprüfung, sowie der Dichte- und Feuchtigkeitsbestimmung.

Holzart	n	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s_\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_o$ [g/cm <sup>3</sup> ]	u [%]	
Sitka Spruce ( <i>Picea sitchensis</i> Bong.)	2	5	5076	41,86	0,95	0,47	11,6
Kiefer ( <i>Pinus silvestris</i> L.)	9	10	6000	56,84	1,11	0,48	10
Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> L.)	12	7	6478	61,55	0,33	0,63	10,1
	13	7	6016	53,15	0,34	0,67	11,2
	14	8	5992	55,24	0,33	0,75	10,5

**Abkürzungen:** n...Stichprobenumfang,  $\sigma$ ...mittlere Zugfestigkeit,  $s_\sigma$ ...Standardabweichung,  $\rho_o$ ...mittlere Darrdichte, u...Holzfeuchte

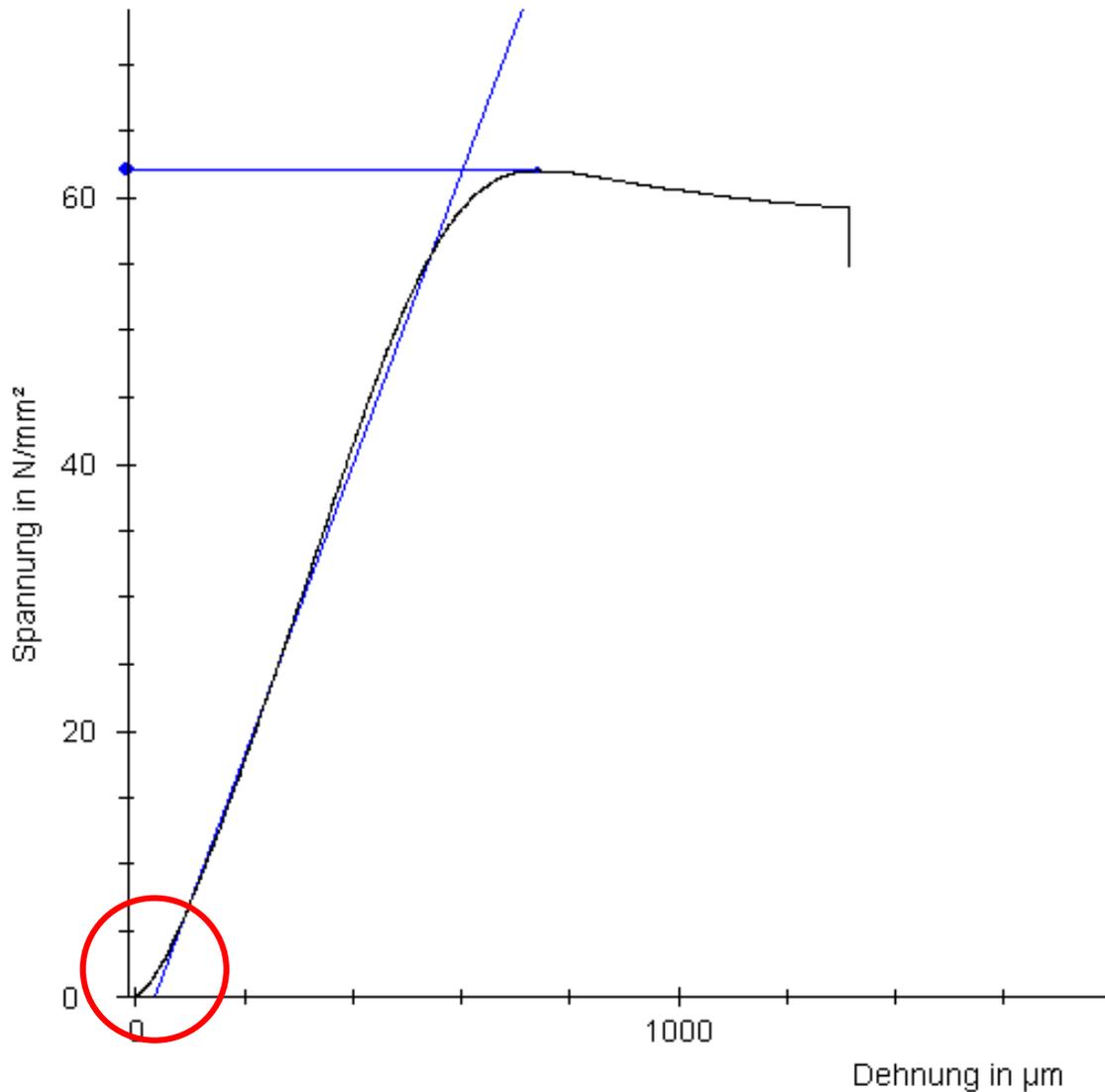
**Tab. 5:** Ergebnisse Druckprüfung

In Abbildung 18 ist die Druckfestigkeit der verschiedenen Holzarten dargestellt.



**Abb. 18:** Druckfestigkeit der Holzarten

Abbildung 19 zeigt das Spannungs- Dehnungsdiagramm der Druckprobe mit der, der maximale Festigkeitswert von  $62 \text{ N/mm}^2$  und auch gleichzeitig der maximale E-Modul von  $6545 \text{ N/mm}^2$  erreicht wurde. Es handelt sich um eine Probe der Sortierung mittlere Esche.



**Abb. 19:** Maximale Druckfestigkeit und E-Modul

## 5. Diskussion

### 5.1 Zugprüfung

Wie in Tabelle 4 und Abbildung 14 ersichtlich, konnten bei der Zugprüfung sehr aussagekräftige Werte erzielt werden. Alle Holzarten und Sortierungen haben die Anforderungen aus der Norm (siehe Tabelle 2) erreicht und könnten daher für den Einsatz im Flugzeugbau verwendet werden. Im Vergleich zu den durchschnittlichen Werten aus der Literatur (siehe Tabelle 1) konnte mit den Probensätzen eins und vier, bei mehr als der Hälfte der Proben eine um mehr als 100% höhere Festigkeit erreicht werden. Der Maximalwert von 180 N/mm<sup>2</sup> konnte ebenfalls bei der gleichen Sortierung gemessen werden.

Der Unterschied der Probensätze vier und fünf, spiegelt den Festigkeitsunterschied der beiden Qualitätssortierungen A und B wider. Trotz des eindeutig sichtbaren Anteils an Reaktionsholz konnten auch diese Proben die Anforderungen erreichen. Das Ergebnis des 7. Probensätzen entspricht den Werten der optisch fehlerlosen Proben. Die Sprödigkeit in der Verarbeitung und die große Streuung lassen jedoch auf einen nicht ersichtlichen Fehler, eventuell anatomischer Art, schließen.

Die Ergebnisse der slowenische Fichte (*Picea Abies*) liegen im Bereich derer, von Sitka Spruce (*Picea sitchensis* Bong.) und rechtfertigen somit die frühere Verwendung der Fichte (*Picea Abies*) im europäischen Flugzeugbau. Eine genauere Aussage über die statistische Sicherheit der Festigkeitswerte der Fichte speziell aus diesem Standort in Slowenien lässt sich aufgrund des zu geringen Stichprobenumfangs nicht machen.

Das Ergebnis des 9. Probensatzes (Flugzeug Holm) lässt darauf schließen, dass die Materialermüdung bei Holz im Flugzeugbau keine Probleme bereitet, selbst bei überdurchschnittlicher Belastung. Die Festigkeiten entsprechen den Anforderungen aus der Norm, obwohl man noch berücksichtigen muss, dass beim Absturz bereits Haarrisse oder andere nicht sichtbare Beschädigungen entstanden sein könnten, welche natürlich negative Auswirkung auf die Festigkeit haben. Dies könnte auch, neben Unterschieden in der Anatomie, ein Grund für die höheren Festigkeitswerte der „normalen“ Kiefernproben (*Pinus silvestris* L.) sein.

Bei den Ergebnissen der Eschenproben (*Fraxinus excelsior* L.) spiegelt sich der Zusammenhang der Jahrringbreite mit der Festigkeit, resultierend aus dem Dichteunterschied, wider. Weiters wird auch der Einsatz von Esche (*Fraxinus excelsior* L.) für hoch beanspruchte Teile bestätigt.

Mahagoni (*Swietenia Macrophylla* King.) erzielte auch verwendbare Festigkeiten. Aufgrund der Sprödigkeit und der hohen Streuung wird der überwiegende Einsatz für Propeller bestätigt.

Trotz fehlerfreier Probenkörpern ergab sich doch eine hohe Standardabweichung bei manchen, die bei Holz als Naturwerkstoff auf viele Faktoren zurückzuführen ist. (Tabelle 4)

Der eruierte E-Modul (Tabelle 4) lässt ebenfalls auf hohe Qualität der Sortierungen schließen. Die Anforderungen der Norm werden erfüllt und im Vergleich mit den durchschnittlichen Literaturwerten (Tabelle 1) konnten höhere Ergebnisse erzielt werden.

Die spezifische Zugfestigkeit oder auch Reißlänge genannt, gibt die Festigkeit im Verhältnis zur Dichte wieder. Dies ist einer der wichtigsten Kriterien bei der Entscheidung, welcher Werkstoff im Flugzeugbau eingesetzt wird. Wie in Abbildung 15 ersichtlich, erreichen die Holzarten Sitka Spruce (*Picea sitchensis* Bong.) und Fichte (*Picea Abies*) sogar höhere Maximalwerte als die verschiedenen Legierungen, aber auch die anderen Holzarten sind im Bereich der Legierungen angesiedelt. Der große Vorteil der Legierungen ist jedoch jener, dass die Eigenschaften für jeden Verwendungszweck abgestimmt werden können.

## **5.2 Druckprüfung**

Wie in Tabelle 5 und Diagramm 5 dargestellt, konnten auch die drei Holzarten und fünf Sortierungen bei der Druckprüfung die geforderten Werte aus der Norm (siehe Tabelle 2) erfüllen und somit die Verwendung der Holzarten als Werkstoff für Flugzeugkonstruktionen bestätigen. Auffallend dabei ist die, im Gegensatz zur Zugprüfung, sehr geringe Streuung.

Wie in Diagramm 6 ersichtlich ergab sich am Beginn der Prüfung ein Bereich mit starker Dehnung im Vergleich zum Kraftanstieg. Dies ist auf die Messung der Dimensionsänderung über den Traversenweg (siehe 3.2.2) und auf die nicht einhundertprozentig parallelen Proben zurückzuführen. Da die Prüfkraft am Beginn nur auf einen kleinen Teil der Fläche einwirkt.

## **6. Schlussfolgerung**

Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse kann die frühere Bedeutung von Holz als Werkstoff für Flugzeugkonstruktionen auf jeden Fall bestätigt werden. Der Vergleich mit den modernen Flugzeugwerkstoffen zeigt, dass Holz aufgrund der spezifischen Zugfestigkeit auf jeden Fall konkurrenzfähig ist. Auch der Festigkeitsnachweis zum Bau der Klemm 25D bestätigt die Verwendbarkeit von Holz im Flugzeugbau.

Die Streuung von Holz als inhomogener Werkstoff ist jedoch auch in der Verwendung im Flugzeugbau sehr problematisch. Weiters muss der extrem hohe Sortieraufwand und die geringe Ausbeute an Flugzeughölzern bedacht werden, was einen wirtschaftlichen Einsatz von Holz für die Massenproduktionen von Flugzeugen aus Kostengründen und wegen der Verfügbarkeit des Rohstoffs schwierig gestalten würde. Weshalb auch in Zukunft, Holz als Werkstoff für Flugzeugkonstruktionen ein Nischenprodukt bleiben wird.

## **Danksagung**

Ich möchte Herrn Koloman Mayrhofer und Herrn Sebastian Knapp von Craft Lab GmbH Restaurations-, Modell- und Ausstellungsbau recht herzlich danken. Sie übernahmen einen Großteil der Probenzubereitung, unterstützten mich mit ihrem enormen Fachwissen und gewährten mir Zugang zu ihrer umfangreichen privaten Bibliothek.

Weiters möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.Christoph Buksnowitz sehr herzlich für die Betreuung des Projektes bedanken.

## Referenzen

### Bücher

- Bauvorschrift für Segelflugzeuge (1950) Heft II, Bundesministerium für Verkehr und verstaatlichte Betriebe – Amt für Zivile Luftfahrt, Deutschland, p.7-15
- Engmann K (2008) Technologie des Flugzeuges. Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg, S.
- Hill FT (1934) The materials of aircraft construction. Sir Isaac Pitman & Sons, Bath, Melbourne, Toronto, and New York.
- Information of inspectors of airplane wood (1919) Bureau of aircraft production The forests products laboratory, forest service, U.S. department of agriculture, Washington
- Jenkin CF (1920) Report on materials of construction used in aircraft and aircraft engines. His Majesty's Stationary office, London p. 95-140
- Küch W (1939) Untersuchungen an Holz, Sperrholz und Schichthölzern im Hinblick auf ihre Verwendung im Flugzeugbau. Holz als Roh- und Werkstoff. 2(7/8): 257-320
- Sun CT (1998) Mechanics of aircraft structures. John Wiley & Sons, Inc. NewYork / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto, ISBN 0-471-17877-2, p. 11-17
- Trayer GW (1930) Wood in aircraft construction. The national lumber manufacturers association, Washington, D.C. p. 13, 61-81, 105, 129
- Wagenführ R, Scheiber C (1985) Holzatlas. VEB Fachbuchverlag Leipzig

### Papers

- Markwardt L (1931) Aircraft woods: their properties, selection, and characteristics. N.A.C.A (National advisory committee for aeronautics) Report No. 354
- Willson T.R.C (1920) Effect of kiln drying on the strength of airplane woods N.A.C.A (National advisory committee for aeronautics) Report No. 68

### Internet

- Cytec industries (2009) Technology ahead of its time  
<http://www.cytec.com/index.htm>, letzter Aufruf am 25.juli 2009

### Interviews

- Knapp S (2009) Craft Lab GmbH Restorations, Modell- und Ausstellungsbau Arbeiter, Interview am 25.März 2009, Wien
- Mayrhofer K (2009) Craft Lab GmbH Restorations, Modell- und Ausstellungsbau, Geschäftsführer, Interview am 25.März 2009, Wien

## Anhang

Anhang A: Bauvorschriften für Segelflugzeuge 1950, Heft 2

BAUVORSCHRIFTEN FÜR SEGELFLUGZEUGE

(BVS)

Heft 2

B a u s t o f f e

Ausgabe April 1950

Bundesministerium für Verkehr und  
verstaatlichte Betriebe - Amt für  
Zivilluftfahrt

Nur für den Lehrgebrauch

Teil I

Allgemeines

A. Allgemeines über die Vorschriften

2001 Lebenswichtige Teile von Segelflugzeugen haben den nachstehend aufgeführten Vorschriften für Baustoffe, d.h. Werkstoffe, Halbzeuge und Normteile, zu genügen.

2002 "Lebenswichtige" Teile sind solche, deren Ausfall zu Start-, Flug- und Landeunfähigkeit oder in irgend einem Betriebszustand oder Belastungsfall zu einer Minderung der Festigkeit (s. BVS, Heft 1 "Vorschriften für die Festigkeit von Segelflugzeugen") um mehr als 50 vH führen würde.

B. Allgemeines über Baustoffe

I. Nachweis der Werkstoffeigenschaften

2010 Der Nachweis der geforderten Eigenschaften für Werkstoffe ist durch Prüfungen zu erbringen, die dem Verwendungszweck und den im Betrieb auftretenden Beanspruchungen möglichst entsprechen.

2011 Ob eine Gewährleistung der nach den BVS geforderten Eigenschaften für Werkstoffe seitens deren Hersteller als Nachweis nach 2010 für die Erfüllung der an den Werkstoff zu stellenden Forderungen angesehen werden kann, entscheidet das Amt f. Zivilluftfahrt

2012 Bei Verwendung anderer als der nachstehend angegebenen Werkstoffe können gegebenenfalls zwecks Feststellung ihrer Eigenschaften (Festigkeit, Verarbeitungsfähigkeit usw.) über die geforderten Prüfungen hinaus zusätzliche Prüfungen gefordert werden.

2013 Die Angaben über die Anzahl der für die Prüfungen zu entnehmenden Proben sind Richtwerte.

II. Kennzeichnung

2020 Die Baustoffe bzw. Werkstoffe sind eindeutig zu kennzeichnen (z.B. durch Farbe).

2022, 2023, 2030

2031, 2033, 2035

- 2022 Auf Erhaltung der Kennzeichen bei Probeentnahmen ist zu achten.
- 2023 Baustoffe, welche bei der Prüfung den Anforderungen genügt haben, und solche, welche den Anforderungen nicht genügt haben, sind verschieden zu kennzeichnen; die Kennzeichnung hat so zu erfolgen, dass eine Verwechslung ausgeschlossen ist (s. a. 2035).

### III. Lagerung

- 2030 Die nachstehenden Forderungen gelten für die Lagerung aller Baustoffe bzw. Werkstoffe. Besondere Forderungen für die Lagerung einzelner Werkstoffe sind nachstehend bei den Angaben für die betreffenden Werkstoffe gestellt.
- 2031 Lagerräume müssen trocken und frei von schädlichen Gasen und Dämpfen sein.
- 2033 Bei Metallen sind Oberflächenverletzungen durch Scheuern einzelner Teile gegeneinander oder gegen Trennwände und Unterlagen sorgfältig zu vermeiden. Der vom Hersteller für Lagerung und Versand aufgebraachte Oberflächenschutz ist nicht zu entfernen (Schutz von Stahl für Lagerung und Versand s.2241/1).
- 2035 Werkstoffe, die bei den Prüfungen den Anforderungen genügt haben, sind von denjenigen Werkstoffen, die den Anforderungen nicht genügt haben, getrennt zu lagern (s. a.2023).

## Teil II

## Holz und Leim

## A. Vollholz und Schichtholz

## I. Anforderungen

2101

## a) Allgemeine Forderungen für Vollholz

Für Vollholz, wie z.B. Kiefer, Tanne, Linde, Douglasie (Oregon-Pine), Fichte (Spruce), Esche und Nussbaum, zur direkten Verarbeitung zu Bauteilen wird folgendes gefordert:

1. Gerader Wuchs.
2. Lufttrockener Zustand.
3. Möglichst wenig Äste, Gallen und Risse.
4. Nicht zu hoher Harzgehalt mit Rücksicht auf Festigkeit der Leimung.
5. Keine Rotfäule.
6. Bei lebenswichtigen Teilen (s. 2002): kein Verblauen.

2103

## b) Allgemeine Forderungen für Schichtholz

Für Schichtholz (Buche) gelten die Forderungen wie für Vollholz nach 2101. Bei den einzelnen Lagen von Schichtholz sind ferner unzulässig:

1. Lose und tote Äste.
2. Mehr als 5 feste Äste bis zu je einem mittleren Durchmesser von 6,0 mm, und zwar auf 0,5 m<sup>2</sup> in jeder Lage.
3. Grössere Anhäufung von Ästen in irgend einem Schichtholzquerschnitt.
4. Schäftungsverhältnis bei Fugen kleiner als 1:6.
5. Übereinander liegende Fugen in benachbarten Lagen.

Abmessungen und Aufbau s. Blatt L 12421 (Heft 5)

2105

## c) Festigkeit

Mindestwerte, entsprechend den nachstehend unter 2110 bis 2117 angegebenen Prüfungen, bezogen auf einen Feuchtigkeitsgehalt von 12 vH für Vollholz und 7 vH für Schichtholz.

Holzart	Rohwichte (Raumgewicht) g/cm <sup>3</sup>	Druck kg/cm <sup>2</sup>	Zug kg/cm <sup>2</sup>	Biegung kg/cm <sup>2</sup>	E-Modul kg/cm <sup>2</sup>
<b>Vollholz:</b>					
Kiefer Klasse II (Fl.-Werkstoff 4001)	≤ 0,57	400	700	650	100 000
Klasse I (Fl.-Werkstoff 4002)	≤ 0,62	480	800	750	100 000
Sonst.Nadelhölzer.....		350	700	600	100 000
Esche.....	≈ 0,7	450	1000	1000	110 000
Nußbaum....	≈ 0,66	600	1100	1100	110 000
<b>Schichtholz:</b>					
nach					
Blatt L12421 (Heft 5)	≤ 0,85	800	1200	1400	≈ 160 000

2106

Höhere Werte der Holzfestigkeit können der Berechnung von Segelflugzeugen der Bgr.4 (s.1003 der BVS, Heft 1 "Vorschriften für die Festigkeit von Segelflugzeugen") zugrunde gelegt werden, wenn sie durch entsprechende Werkstoffprüfungen nachgewiesen sind.

## II. Prüfung

10

- a) Probenahme. Bei Vollholz sind für die nachfolgend angegebenen Prüfungen die Druck-, Zug- und Biegeproben von jeder Bohle bzw. jedem Teil einer geteilten Bohle aus den äusseren Jahresringen jeweils am Zopfende sowie am Stammende durch Abspalten zu entnehmen

Bei den Zug- und Biegeproben kann im Einvernehmen mit dem Amt für Zivilluftfahrt auf die Prüfung jeder einzelnen Bohle verzichtet werden. In diesem Fall sind jedoch Zug- und Biegeproben mindestens von je  $8 \text{ m}^3$  Holz zu entnehmen.

Bei Schichtholz sind die Proben an einem Ende der Platte aus einem Abschnitt zu entnehmen, der über die ganze Breite der Platte abzutrennen ist. Bei Einzellieferung von Schichtholzplatten ist jede einzelne Platte zu prüfen. Bei grösseren Lieferungen bis zu 100 Platten genügt die Prüfung und damit Probenahme aus mindestens 10 vH, über 100 Platten aus mindestens 5 vH der Lieferung.

2111

- b) **Z u s a m m e n f a s s u n g d e r P r o b e n.** Die Proben dürfen bei den Prüfungen keinen anderen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen als  
9 bis 15 vH bei Vollholz und  
5 bis 10 vH bei Schichtholz.

2112

- c) **P r ü f e r g e b n i s s e**

1. Die bei den Prüfungen ermittelten Festigkeitswerte sind auf einen Feuchtigkeitsgehalt von 12 vH bei Vollholz und 7 vH bei Schichtholz umzurechnen. Für die Umrechnung der Festigkeitswerte auf den normalen Feuchtigkeitsgehalt gilt folgendes:

Bei Vollholz sind der Umrechnung auf 12 vH Feuchtigkeitsgehalt in den Grenzen von 9 bis 15 vH für je 1 vH Feuchtigkeitsabnahme bzw. -zunahme  $30 \text{ kg/cm}^2$  Zunahme bzw. Abnahme der Druck- und Biegefestigkeit zugrunde zu legen.

Bei Schichtholz sind der Umrechnung auf 7 vH Feuchtigkeitsgehalt in den Grenzen von 5 bis 10 vH für je 1 vH Feuchtigkeitsabnahme bzw. -zunahme  $50 \text{ kg/cm}^2$  Zunahme bzw. Abnahme der Druckfestigkeit zugrunde zu legen.

2. Einzelwerte der Festigkeitsprüfungen dürfen den aus den untersuchten Proben zu bestimmenden Mittelwert um höchstens 10 vH unterschreiten.

2113

d) **D r u c k p r ü f u n g** (Belastung parallel zur Faser)

1. Anzahl der Proben: mindestens 3 je Probenentnahmestelle.
2. Probenahme und Zustand der Proben: s. 2110 und 2111.
3. Abmessungen der Probe. Druckwürfel entsprechend Abb. 5.

**Kantenlänge**

bei Vollholz mindestens 20 mm, jedoch höchstens 50 mm,

bei Schichtholz 10 bis 20 mm. Bei Platten unter 10 mm Dicke sind die Probekörper durch Zusammenleimen mehrerer Platten herzustellen.

(Bei einer Kantenlänge von 31,6 mm beträgt die Druckfläche des Prüfkörpers  $10 \text{ cm}^2$ . Die Druckfestigkeit in  $\text{kg/cm}^2$  kann also in diesem Fall direkt am Kraftanzeiger der Prüfmaschine abgelesen werden; sie beträgt  $\frac{1}{10}$  der beim Druckversuch erreichten kg-Zahl.)

4. Belastungsgeschwindigkeit, gleichmässig, nicht mehr als  $400 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  bei Kiefer und Esche,  $350 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  bei Nadelhölzern mit Ausnahme von Kiefer, ferner bei Linde,  $800 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  bei Schichtholz.

Bei anderen Holzarten darf der Belastungsgeschwindigkeit ( $\text{kg/cm}^2$  je Minute) höchstens eine Belastung  $\text{kg/cm}^2$  zugrunde gelegt werden, die nicht mehr als die Druckfestigkeit in  $\text{kg/cm}^2$  des betreffenden Holzes beträgt.

2114

## e) Zugprüfung

1. Anzahl der Proben: mindestens 3 je Probenentnahmestelle.
2. Probenahme und Zustand der Proben s. 2110 und 2111.
3. Abmessungen der Probe. Zugstab entsprechend Abb. 4.  
Länge der Probe 320 mm,  
bei Vollholz und Schichtholz parallel zur Faser.  
Einspannquerschnitt  
bei Vollholz 10 x 20 mm. Die Abmessung 10 mm parallel zu den Jahresringen,  
bei Schichtholz 10 x Plattendicke, jedoch höchstens 10 x 20 mm.  
Die Abmessung 10 mm parallel zu den einzelnen Lagen.  
Prüfquerschnitt  
bei Vollholz 5 x 20 mm,  
bei Schichtholz 5 x Plattendicke, jedoch höchstens 5 x 20 mm.  
(Um zu gewährleisten, dass der Bruch der Probe einwandfrei im Prüfquerschnitt erfolgt, ist bei ausnahmsweise weichen Holz entweder der Einspannquerschnitt durch Aufleimen von Sperrholzbeilagen beiderseits an den Einspannenden zu verstärken oder es ist der Prüfquerschnitt auf die Abmessung 4 x 20 mm zu verringern.)
4. Belastungsgeschwindigkeit, gleichmässig, nicht mehr als  $700 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  bei Kiefer und sonstigen Nadelhölzern,  
 $1000 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  bei Esche,  
 $1200 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  bei Schichtholz.  
Bei anderen Holzarten darf der Belastungsgeschwindigkeit ( $\text{kg/cm}^2$  je Minute) höchstens eine Belastung  $\text{kg/cm}^2$  zugrunde gelegt werden, die nicht mehr als die Zugfestigkeit in  $\text{kg/cm}^2$  des betreffenden Holzes beträgt.

## 2115 f) B i e g e p r ü f u n g

1. Anzahl der Proben: mindestens 3 je Probenentnahmestelle.
2. Probenahme und Zustand der Proben: s.2110 und 2111.
3. Abmessungen der Probe. Biegestab entsprechend Abb.6  
Länge der Probe  
bei Vollholz 320 mm parallel zur Faser,  
bei Schichtholz 140 mm parallel zur Faser.  
Querschnitt  
bei Vollholz 20 x 20 mm,  
bei Schichtholz 8 x 8 mm für Plattendicke von 10 mm  
und darüber. Für Plattendicke unter 10 mm kann auf  
die Biegeprüfung verzichtet werden.
4. Auflage. Zwei Rollen von je 25 mm, höchstens 30 mm  
Durchmesser, Entfernung von Mitte zu Mitte Rolle  
280 mm bei Vollholzprüfung,  
120 mm bei Schichtholzprüfung.
5. Belastungsstempel. Abgerundete Schneide mit min-  
destens 10 mm, höchstens 15 mm Radius.
6. Belastungsgeschwindigkeit. Die Belastung kann  
gleichmässig- oder stufenweise erfolgen. Der Vor-  
schub der Belastungseinrichtung der Prüfmaschine  
muss jedoch in jedem Falle so geregelt werden, dass  
sich eine Belastungsgeschwindigkeit von nicht mehr  
als 700 kg/cm<sup>2</sup>/min bei Kiefer und sonstigen Nadel-  
hölzern,  
1000 kg/cm<sup>2</sup>/min bei Esche,  
1400 kg/cm<sup>2</sup>/min bei Schichtholz ergibt.

Bei anderen Holzarten darf der Belastungsgeschwin-  
digkeit (kg/cm<sup>2</sup> je Minute) höchstens eine Bela-  
stung kg/cm<sup>2</sup> zugrunde gelegt werden, die nicht mehr  
als die Biegefestigkeit in kg/cm<sup>2</sup> des betreffenden  
Holzes beträgt.

2116

g) Die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes hat gleichzeitig mit der Festigkeitsprüfung zu erfolgen.

Bei grösseren Reihenprüfungen genügt es, die Feuchtigkeit von 10 vH der Anzahl der Proben zu bestimmen, wenn die zu prüfenden Bohlen bzw. Platten oder die aus ihnen entnommenen Proben mehrere Wochen unter gleichen Bedingungen gelagert haben.

1. Abmessungen der Proben. Als Probekörper können die Proben für die Festigkeitsprüfungen, d.h. die Druck-, Zug- und Biegeproben bzw. Abschnitte von denselben verwendet werden. Bei Vollholz kann der Feuchtigkeitsgehalt bei den Druckproben an der ganzen Probe ermittelt werden. Bei den Zug- und Biegeproben ist den Proben eine etwa 2 cm dicke Scheibe zu entnehmen, jedoch nicht von Stirnende. Die Scheiben sind in der Nähe der Bruchstelle sofort nach der Festigkeitsprüfung mit einer scharfen, gut geschränkten Säge herauszuschneiden.

Bei Schichtholz kann der Feuchtigkeitsgehalt jeweils bei Druck-, Zug- oder Biegeproben an der ganzen Probe oder aber an deren Abschnitten ermittelt werden.

2. Prüfverfahren. Zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes ist das Gewicht  $G_u$  der Feuchtigkeitsproben unmittelbar nach der Entnahme und das Gewicht  $G_d$  sofort nach dem bei 100 bis 103° C bis zum Aufhören der Gewichtsabnahme erfolgten Trocknen festzustellen. Der Feuchtigkeitsgehalt ist dann

$$\frac{(G_u - G_d) \cdot 100}{G_d} \text{ in vH}$$

Es gilt der Mittelwert von drei Messungen.

2117

h) Die Bestimmung der Rohwichte (Raumgewicht) hat gleichzeitig mit der Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes zu erfolgen. Für die Abmessungen der Proben gelten die gleichen Bestimmungen wie unter g) 1.

2120, 2121, 2123

2125, 2126

Die Rohwichte ist durch Volumenmessung und Wägung bei der Werkstoffprüfung möglichst bei normalem Feuchtigkeitsgehalt zu bestimmen, d.h. Feuchtigkeitsgehalt: 12 vH bei Vollholz, 7 vH bei Schichtholz.

### III. Verarbeitung

- 2120 Fertig zugeschnittene Flugzeugbauteile müssen den Anforderungen nach 2101 entsprechen. Die Fasern sollen mit möglichst kleinen Winkel, höchstens in Verhältnis 1:20 aus der zugeschnittenen Fläche herauslaufen. Im ausgesuchten Holz etwa noch vorhandene Fehler, wie Äste, Harzgallen, schiefer Faserverlauf, müssen herausgeschnitten werden, die guten Teile können durch Schäftung wieder verbunden werden.
- 2121 Bei wichtigen Bauteilen, deren Abmessungen unter 10 mm in radialer Richtung zu den Jahresringen gemessen betragen, sollen mindestens 6 Jahresringe je cm vorhanden sein.
- 2123 Vornehmlich auf Druck beanspruchte Teile sind aus Kernholz anzufertigen.
- 2125 Zur Verbindung (Schäftung) von Leisten und Brettern sind die Enden keilförmig abzuschrägen. Abschrägung mindestens 15:1. Keilflächen für die Verleimung sind gut eben zu arbeiten.
- 2126 Bei auf Biegung beanspruchten Stäben ist die Schäftung so zu legen, dass die Richtung der Ausbiegung des Sta- bes in der Schäftungsebene liegt, also entsprechend der in Abb.13 dargestellten Krafrichtung. Bei Knick- streben (Spannturm-, Flügelstreben) ist die Schäftungs- ebene nach dem gleichen Gesichtspunkt (Ausknickrichtung) anzuordnen, doch kann hiervon abgewichen werden, wenn allzu grosse Schäftungslängen entstehen.