



Materials Science & Technology

SCHLAGBIEGEBEANSPRUCHUNG VON BAUTEILEN AUS SCHWEIZER FICHTENHOLZ

**Impact load on timber structural elements made of Swiss
Norway Spruce**

**Abschlussbericht zum WHFF Projekt Nr. 2003.17
November 2009**

Berichtverfasser:

Robert Widmann, Empa Abteilung Holz, Dübendorf

Projektmitwirkende

Rolf Brönnimann, Dr., Empa Abteilung Elektronik, Messtechnik und Zuverlässigkeit

Enzo Cattarin, Empa Abteilung Elektronik, Messtechnik und Zuverlässigkeit

Daniel Heer, Empa Abteilung Holz

Florian Schlegel, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs Universität Freiburg (D)

Michael Strässle, Empa Abteilung Holz

Kurt Weiss, Empa Abteilung Holz

Lu Ye, Departement Materialwissenschaften MATL, ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung	5
2.1 Motivation und Projektziele	5
2.2 Schlagbiegung	5
2.2.1 Problem	5
2.2.2 Bemessung nach Norm	6
2.3 Vorhandenes Wissen	8
2.3.1 Versuche an fehlerfreien Kleinproben	8
2.3.2 Versuche mit Proben in Bauteilgrösse	9
3. Material und Methode	10
3.1 Fehlerfreie Kleinproben	10
3.2 Kanthölzer und Bretter	11
3.2.1 Aufteilung der Kanthölzer und Bretter	11
3.2.2 Probekörperserien	13
3.3 Grundlagen zum Schlagbiegeversuch	15
3.4 Grundlagen zu den Messmethoden	16
3.5 Versuche mit fehlerfreien Kleinproben in einem Pendelschlagwerk	16
3.6 Versuche mit Kanthölzern und Gerüstbrettern in einer Fallgewichtanlage	19
3.7 Elektronische Messung und Bestimmung der Bruchschlagarbeit	21
3.7.1 Messeinrichtung	21
3.7.2 Ermittlung der Bruchschlagarbeit über kinetische Energie	22
3.7.3 Ermittlung der Bruchschlagarbeit über das Arbeitsintegral	23
3.8 Auswertung der Arbeitsintegrale	25
3.9 Statische 3-Punkt Biegeversuche	27
3.10 Ermittlung der Ergebniswerte	27
3.11 Versuchsreihenfolge und verfügbare Schlagenergie	29
4. Ergebnisse und Diskussion	30
4.1 Allgemeine Angaben zur Ergebnisdarstellung	30
4.2 Ergebnisse der Versuche mit fehlerfreien Kleinproben	31
4.3 Ergebnisse der Versuche mit Kanthölzern und Brettern	32
4.3.1 Brucharten und Bruchbilder	32
4.3.2 Bruchschlagarbeit	37
4.3.3 Maximalkraft	38
4.3.4 Schlagbiegefestigkeit	39
4.3.5 Schlagbiegefestigkeit und Bruchschlagarbeit der Vorversuchsserien	41
4.3.6 Einfluss von Ästen	43
4.3.7 Statischer Biege widerstand und Schlagbiege widerstand	45
4.3.8 Einfluss der Dichte	46
4.3.9 Einfluss des dynamischen E-Moduls	47
4.3.10 Einfluss des Schlankheitsgrads	47
4.3.11 Einfluss der Biegesteifigkeit	48
4.3.12 Einfluss der Holzfeuchte	49
5. Hinweise für eine Bemessung	50
6. Schlussfolgerungen und Fazit	54
7. Danksagung	55
8. Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	56
9. Literatur und Normen	59
9.1 Literatur	59
9.2 Normen	60

1. Zusammenfassung

Stossartige Belastungen von Bauteilen im Ingenieurholzbau sind planmässig eher selten und kommen z.B. bei Fahrzeuganprall an Brückenpfeilern oder Leitplanken zum Tragen. Im Kulturbau werden Steinschlag- und Lawinenschutzeinrichtungen ebenfalls stossartig belastet. Tragende Fussböden, Gerüstbretter und –balken sowie Fangwände stellen Bauteile dar, welche häufig durch herunterfallende Gegenstände oder durch Personen, welche auf diese springen bzw. abstürzen, auf Schlagbiegung beansprucht werden.

Bei einer Bemessung von Bauteilen gegen stossartige Belastungen gibt es zwei verschiedene Wege. Für gewisse Lasten, beispielsweise Fahrzeuganprall, sind statische Ersatzlasten in den relevanten Normen angegeben. Die Bemessung erfolgt analog einer statischen Bemessung, wobei auf der Widerstandsseite wegen der geringen Einwirkungsdauer erhöhte Bemessungswerten angesetzt werden können. Bei speziellen Bauteilen, (z.B. Spenglergänge von Gerüsten) muss der Tragwiderstand gegen eine solche Belastung durch Versuche nachgewiesen werden. Konkrete Daten über den Schlagbiegewiderstand von Bauteilen aus Nadelholz stehen jedoch weder in Normen - noch in der Literatur zur Verfügung.

Vor diesem Hintergrund wurde das Projekt "Schlagbiegebeanspruchung von Bauteilen aus Schweizer Fichtenholz" lanciert. Mit dem Fokus auf den Bauteilen Kanthölzer und (Gerüst-) Bretter wurde ein entsprechendes Versuchsprogramm erstellt. Ziel war es dabei, auf der Basis einer grösseren Anzahl von Versuchen Daten über den Schlagbiegewiderstand der Bauteile zu ermitteln und somit Hinweise für eine entsprechende Bemessung geben zu können.

Der Schlagbiegewiderstand wurde grundsätzlich in Form der Schlagbiegefestigkeit und in Form der Bruchschlagarbeit ermittelt. Im Gegensatz zu Versuchen mit fehlerfreien Kleinproben welche zumeist mit Pendelschlagwerken ausgeführt werden, können grössere Proben praktisch nur in Fallgewichtanlagen getestet werden. Schlagbiegeversuche in instrumentierten Fallgewichtanlagen sind verglichen mit statischen Versuchen zwar relativ einfach auszuführen, allerdings ist die Versuchsauswertung schwierig. Daher war ein wichtiger Faktor die Versuchs- und Messtechnik. Basierend auf Versuchen mit Kleinproben in einem instrumentierten Pendelschlagwerk wurde eine bestehende Fallgewichtanlage so modifiziert, dass auf Basis der Messung der Kraft bzw. der Beschleunigung sowie der Messung des Wegs des Pendelhammers/Fallgewichts zwei unabhängige Messverfahren zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit verfügbar waren.

Es wurden insgesamt ca. 750 Versuche durchgeführt, wovon für 168 Kleinproben, 373 Kantholzabschnitte und 180 Brettabschnitte auswertbare Daten ermittelt werden konnten. Die Kleinproben dienten praktisch ausschliesslich der Ermittlung der idealen Messkonfiguration. Für die mit Brettern und Kanthölzern gemachten Versuche lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Die Daten der angewandten Messmethoden korrelierten gut.
- Die Schlagbiegefestigkeiten lagen im Mittel um etwa 27% über der statischen 3-Punkt Biegefestigkeit. Die Schlagbiegefestigkeit ist abhängig von der Rohdichte, dem (dynamischen) E-Modul, der Holzfeuchte, dem Schlankheitsgrad, der Federsteifigkeit, der statischen Biegefestigkeit und dem Vorhandensein von Ästen im Bruchquerschnitt.
- Die Bruchschlagenergien der Kanthölzer und Bretter lagen höher als die publizierten und in den Versuchen erzielten Werte für fehlerfreie Kleinproben.
- Die Bruchschlagenergie ist abhängig von der Rohdichte, dem (dynamischen) E-Modul, der Holzfeuchte, der statischen Brucharbeit und dem Vorhandensein von Ästen im Bruchquerschnitt.
- Es wurden Hinweise zu Bemessungsmöglichkeiten gegeben. Für Bauteile, welche ähnliche Eigenschaften und Abmessungen aufweisen, wie die in den Versuchen verwendeten Probekörper, lässt sich deren möglicher Schlagbiegewiderstand auf dem Mittelwert-, Minimum- oder 5%-Quantilniveau gut abschätzen. Eine allgemein gültige Bemessungsregel kann jedoch nicht angegeben werden.
- Mit Hilfe von Berechnungen auf Basis der Versuchsergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Ausführung eines Spenglergangs bestehend aus einer Lage herkömmlicher Gerüstbretter nicht den geltenden Anforderungen entspricht.

2. Einleitung

2.1 Motivation und Projektziele

Stossartige Belastungen von Bauteilen im Ingenieurholzbau sind planmässig eher selten und kommen z.B. bei Fahrzeuganprall an Brückenpfeilern oder Leitplanken, sowie bei Erdbeben und Explosionen zum Tragen. Im Kulturbau werden Steinschlag- und Lawinenschutzeinrichtungen ebenfalls stossartig belastet. Tragende Fussböden, Gerüstbretter und –balken sowie Fangwände stellen Bauteile dar, welche häufig durch herunterfallende Gegenstände oder durch Personen, welche auf diese springen bzw. abstürzen, sowohl planmässig als auch in der Praxis auf Schlagbiegung beansprucht werden.

Mehrere an der Abteilung Holz der EMPA erstellte Expertisen über Absturzunfälle im Zusammenhang mit Gerüsten gaben den Anstoss für die Lancierung dieses Projekts. In einigen Fällen zeigte sich im Rahmen der Untersuchungen, dass unter stossartigen Lasten versagende Gerüstbauteile aus Holz für die Unfälle verantwortlich waren. In diesem Zusammenhang wurde schnell erkannt, dass weder in Normen noch in der Literatur ausreichende Angaben zu einer Berechnung bzw. Bemessung von Hölzern in Bauteilgrösse, wie z.B. Bretter und Kanthölzer, auf Schlagbiegung vorhanden sind. Dieses wird weiter unten näher erläutert.

Schwere Arbeitsunfälle sind nicht nur mit persönlichen Schicksalen verknüpft, sondern belasten im Normalfall auch direkt die zuständigen Versicherungen und indirekt die Volkswirtschaft mit erheblichen Kosten. Eine in Deutschland durchgeführte statistische Untersuchung [1] von Absturzunfällen im Hochbau zeigt, dass 44% aller Vorkommnisse im Zusammenhang mit der Benutzung von Gerüsten aller Bauarten in Zusammenhang stehen. Ein weiterer grosser Unfallschwerpunkt stellt die Benutzung von Leitern mit 33% aller Ursachen dar. In wie weit hierbei dynamische Belastungen als Unfallursachen ermittelt wurden, lässt sich anhand dieser Untersuchungen nicht direkt beantworten. Werden jedoch alle aufgeführten Unfallursachen nach potentiellen stossartigen Belastungen (Springen von..., Springen/Fallen auf..., Bruch von...) überprüft, so ergibt sich, dass mindestens 15% aller Unfallursachen potentiell direkt mit stossartigen Lasten in Zusammenhang gebracht werden können. Darüber hinaus ist ebenfalls klar, dass jeder Absturz, unabhängig von seiner eigentlichen Ursache (z.B. Abrutschen von einer Leiter), eine dynamische Beanspruchung derjenigen Bauteile hervorruft, auf welche der Sturz erfolgt (z.B. Arbeitsplattform aus Holz, auf welcher die Leiter steht).

Die genannten Zusammenhänge bedingen nachdrücklich, dass für stossartige Belastungen von Bauteilen aus Holz eine Sicherheitsstrategie vorhanden sein muss, sowie eine entsprechende Bemessung der Bauteile ermöglicht werden muss. Weiter oben wurde aufgezeigt, dass Angaben hierüber heute, wenn überhaupt, nur eingeschränkt existent sind und somit eine systematisch angelegte Untersuchung angebracht erscheint. Dies sollte mit der Umsetzung des hier beschriebenen Projekts <<Schlagbiegebeanspruchung von Bauteilen aus Schweizer Fichtenholz>> realisiert werden.

2.2 Schlagbiegung

2.2.1 Problem

Wird auf ein biegebeanspruchtes Bauteil - z.B. auf einen einfach gelagerten Balken - eine Belastung schlagartig aufgebracht, so wird dies allgemein als Schlagbiegung ("impact bending") bezeichnet. Kennzeichnend für diese Art der Belastung ist also in erster Linie eine sehr kurze Zeitspanne zwischen Last = 0 und Last = Maximum, welche nur den Bruchteil einer Sekunde beträgt.

Der Bauteilwiderstand gegen eine solche Belastung ist durch die aufnehmbare Bruchschlagarbeit und/oder die Schlagbiegefestigkeit gekennzeichnet und das Last – Verformungsverhalten ergibt sich im Wesentlichen aus der dynamischen Biegesteifigkeit des Bauteils. Dies steht im Gegensatz zu einer statischen Beanspruchung, bei welcher der Bauteilwiderstand auf einer statischen Biegefestigkeit und einer statischen Biegesteifigkeit beruht.

Von Bedeutung ist diese Art der Belastung beispielsweise bei der Auswahl von Hölzern für Stiele von Werkzeugen und Sportgeräten, Schwingböden in Turnhallen, Sprungbretter in Schwimmbädern, Treppentritten oder auch Holzkernen von Skiern. Bei der Dimensionierung für solche Anwendungen kann auf eine grosse Anzahl an tabellierten Werten der Schlagbiegearbeit in der Literatur [2, 3]

zurückgegriffen werden. Diese Werte wurden praktisch ausnahmslos mittels Versuchen an kleinen störungsfreien Proben ermittelt. Bei den Versuchen kommen vorwiegend Pendelschlagwerke oder Fallgewichtsanlagen zum Einsatz. Insbesondere ein Vergleich unterschiedlicher Holzarten auf ihr Schlagbiegeverhalten ist auf dieser Grundlage möglich und gestattet somit eine der Beanspruchung angemessene Auswahl einer geeigneten Holzart für die oben genannten Anwendungen.

2.2.2 Bemessung nach Norm

Biegebeanspruchte Bauteile finden sich praktisch in jedem Bauwerk. Deren Bemessung ist ein Standardfall in der Statik. Einer Einwirkung, z.B. Schneelast auf einem Dachbinder, steht ein Widerstand gegenüber, hier beispielsweise in Form des Binders selbst. Die Einwirkung "Last auf dem Dachbinder" verursacht entsprechende Auswirkungen E einerseits vor allem ein Biegemoment und demzufolge Biegespannungen im Träger als auch eine Verformung – Durchbiegung – desselben. Den genannten Auswirkungen werden Widerstände R und Gebrauchsgrenzen C entgegengesetzt, im Beispiel namentlich die Biegefestigkeit und die maximal akzeptable oder vereinbarte Durchbiegung des Dachbinders. In den meisten Fällen basiert eine entsprechende Bemessung für ein Holztragwerk vorwiegend auf Schweizer Normen wie SIA 260, SIA 261, SIA 265 und SIA 265/1 oder den Europäischen Normen Eurocode 0, Eurocode 1 und Eurocode 5.

Ein wichtiger Faktor bei der Betrachtung von mechanischen Eigenschaften eines Baustoffs ist unter anderem die Dauer von Einwirkungen. Die Bestimmung von Festigkeitseigenschaften, beispielsweise einer charakteristischen Biegefestigkeit $f_{m,k}$ erfolgt an Hand von Kurzzeit-Normversuchen. Bei derartigen Versuchen ist die Einwirkungsdauer, in diesem Fall vom Beginn der Belastung bis zum Bruch mit (300 ± 120) s festgelegt (SN EN 408). Dabei wird die Last kontinuierlich gesteigert bis der Bruch z.B. eines Biegeversuchskörpers erfolgt. Die Art der Belastung hat zur Folge, dass die Höchstlast eigentlich nur unmittelbar vor dem Bruch des Probekörpers, also gerade einmal für ein paar wenige Sekunden, anliegt. Tatsächlich variiert die Lastdauer auf ein konkretes Bauteil aber stark: von sehr kurz, beispielsweise bei Fahrzeuganprall, bis ständig (Eigenlast und Auflasten). Im Rahmen der Bemessung von Holzkonstruktionen wird der realen Belastungsdauer auf ein Bauteil dadurch Rechnung getragen, dass auf der Widerstandsseite die charakteristische Festigkeit durch Multiplikation mit einem Faktor η_t nach SIA 265, η_{mod} nach SIA 265/1 (für Holzwerkstoffe) oder k_{mod} nach Eurocode 5 entsprechend angepasst wird. Aus der Tabelle 1 und der Abbildung 1 geht hervor, dass die Festigkeit mit zunehmender Lastdauer abnimmt. Im Gegenzug kann sie aber bei sehr kurzen Einwirkungen auch den Wert des im Kurzzeitversuch ermittelten Werts übersteigen. Schwierig ist hier allerdings die genaue Zuordnung der Lastdauer "sehr kurz" zu einem konkreten Zeitwert. Von den drei genannten Normen gibt einzig die SIA 265/1 für eine "sehr kurze" Einwirkungsdauer eine Zeitspanne von "weniger als einer Minute" an. In der SIA 265 und im Eurocode 5 (EC5) fehlt eine entsprechende Zeitangabe ganz.

Tabelle 1: Klassen der Lasteinwirkungsdauer KLED gemäss Norm SIA 265/1 und Eurocode 5 sowie Belastungsversuch als Referenzwert.

Klasse der Lasteinwirkungsdauer KLED (SIA 265/1 bzw. EC5)	Größenordnung der Lasteinwirkungsdauer (SIA 265/1 bzw. EC5)	Beispiele für die Einwirkung	k_{mod} für Voll- und Brettschichtholz (EC5) bzw. η_{mod} für mehrlagige Massivholzplatten (SIA 265/1) in Nutzungsklasse 1 und 2
ständig	länger als 10 Jahre	Eigen- und Auflasten	0.6
lang	6 Monate bis 10 Jahre	Lagerstoffe	0.7
mittel	1 Woche bis 6 Monate	Verkehrslasten Schnee	0.8
kurz	kürzer als eine Woche	Schnee, Wind	0.9
----	mehrere Minuten (Höchstlast einige Sekunden)	Belastungsversuch	(1.0)
sehr kurz	kürzer als eine Minute (nur nach SIA 265/1)	Wind, aussergewöhnliche Einwirkungen	1.1

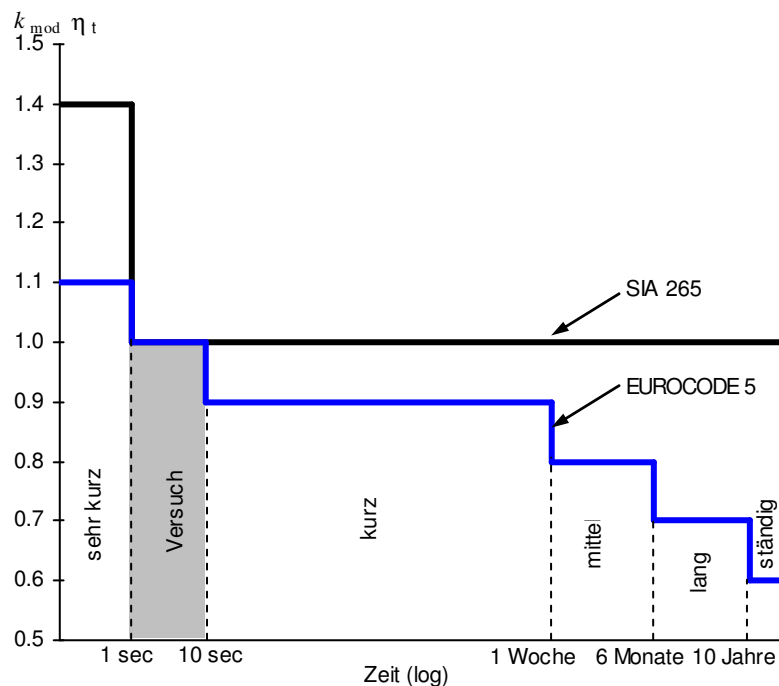


Abbildung 1: Zeiteinfluss auf Festigkeitseigenschaften von Bauhölzern ausgedrückt als Beiwerte η_t nach Norm SIA 265 und k_{mod} nach Eurocode 5 gemäss [4]. In beiden Normen ist die in der Grafik angegebene Lastdauer "sehr kurz" nicht als konkreter Zeitwert definiert.

Es existiert keine allgemein gültige, definierte Trennung zwischen statischer, sehr kurzfristiger und schlagartiger Belastung. In Normen, welche Einwirkungen auf Tragwerke beinhalten (z.B. Norm SIA 261), werden oft Ersatzlasten bzw. so genannte dynamische Beiwerte oder Stossfaktoren (z.B. für Fahrbahnübergänge von Strassenbrücken) angegeben.

Eine schlagartige Belastung auf Bauteile entsteht gemäss Norm SIA 261 durch den möglichen Anprall von:

- Strassen- und Schienenfahrzeugen
- Schiffen
- Helikoptern und Flugzeugen
- abstürzenden Teilen von Maschinen, Geräten und Kranen
- abstürzenden Bauteilen
- Steinen-, Blöcken und Eis

Die Norm gibt für einige dieser Belastungen statische Ersatzlasten als Bemessungswerte an. Für einen frontalen Anprall beim Bauwerkstyp Strasse ausserorts ist beispielsweise eine horizontale Bemessungslast Q_{dx} von 1500 kN anzusetzen.

Es folgt eine kurze Betrachtung hinsichtlich der Belastungsgeschwindigkeit anhand von Beispielen. Wird eine 20 m lange Holzbrücke von einem Lastwagen mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s \approx 72 km/h befahren so wirkt die Last einer Achse dieses Fahrzeugs für ca. eine Sekunde auf die Konstruktion ein und die Auswirkung Biegespannung in Feldmitte wächst in dieser Zeit von Null auf den Maximalwert und geht wieder auf Null zurück. Nachschwingungen der Brückenplatte bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt. Angenommen, die Brücke biegt sich dabei in Feldmitte bis zum zulässigen Wert durch ($w = \ell/500$), dann beträgt die Verformungsgeschwindigkeit: $20/500/0.5 = 0.08$ m/s. Wird weiter angenommen, dass hierbei eine maximale Biegespannung von

10 MPa erreicht wird/wurde, ergibt sich eine Stress – Rate von 10/0.5 20 MPa/s. Ausgehend von Bauholz der Festigkeitsklasse C24 wird dessen charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,k} = 24$ MPa im 4-Punkt Biegeversuch idealerweise nach 300 s (SN EN 408) erreicht. Dementsprechend resultiert eine Belastungsgeschwindigkeit von 0.08 MPa/s. Bei den später hier gezeigten Schlagbiegeversuchen wurde der Bruch nach einer Zeit in der Grössenordnung von einer hundertstel Sekunde erreicht. Es ergeben sich somit eine Stress Rate von im Mittel ca. 70MPa/0.01s = 7000MPa/s und Verformungsgeschwindigkeiten von 40mm/0.01s = 4 m/s und somit um ein Vielfaches höhere Werte als bei den oben genannten statischen bzw. dynamischen Lasten. Die oben gezeigte Lasteinwirkungsklasse "sehr kurz" deckt jedoch die gesamte Spannweite von sehr kurzen Lasteinwirkungsauern (weniger als eine Minute - wenige Sekunden - Bruchteile einer Sekunde) nicht vollständig ab.

2.3 Vorhandenes Wissen

2.3.1 Versuche an fehlerfreien Kleinproben

Es existieren zahlreiche Untersuchungen und entsprechende Veröffentlichungen über das Schlagbiegeverhalten von Hölzern im Allgemeinen. Dies liegt mit Sicherheit auch daran, dass das weltweit am meisten verbreitete Verfahren zur Bestimmung der zugehörigen Festigkeit eines einfeldrigen Probestabs mittels eines Pendelschlagwerks, auch als Charpy-Test bezeichnet, relativ einfach ist und es gestattet, innerhalb kurzer Zeit eine grosse Anzahl von Probekörpern zu testen. Die Differenz zwischen der Lageenergie des Pendelhammers vor und nach dem Schlag ergibt die verbrauchte Bruchschlagarbeit, welche oft als ein Mass für die Schlagbiegefestigkeit und auch für die Zähigkeit bzw. Sprödigkeit (engl.: toughness) eines Holzes dargestellt wird. Typische Probekörperabmessungen bei solchen Versuchen, z.B. nach DIN 52 189, sind $b \times h \times \ell = 20 \times 20 \times 300\text{mm}^3$ bei einer effektiven Spannweite ℓ_{eff} von 240 mm.

Eine zweite Versuchsmethode zur Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit mittels des Hatt-Turner Tests (siehe z.B. [5]) wurde vor allem in den USA angewendet. Dabei wird das Gewicht und/oder die Fallhöhe eines Fallhammers so lang sukzessive erhöht, bis die Probe bricht. Die vor dem Bruch vorhandene Lageenergie des Fallgewichts wird dann als verbrauchte Bruchschlagarbeit angegeben. In der Literatur finden sich hierzu Probekörperabmessungen von z.B. $b \times h \times \ell = 50 \times 50 \times 760\text{mm}^3$ bei einer effektiven Spannweite von 720 mm.

Mittels beider Methoden und deren Abwandlungen wurde in erster Linie die Schlagbiegearbeit von kleinen fehlerfreien Holzproben ermittelt. Die veröffentlichten Ergebnisse differieren jedoch auf Grund der unterschiedlichen Methoden und Bezugsgrössen zum Teil erheblich. Unter Beibehaltung von gewissen Versuchsparametern liessen sich allerdings zahlreiche Einflüsse auf die Schlagbiegearbeit untersuchen. Ghelmeziu [6], Kollmann [5] und Monnin [7] betrachteten u.a. den Einfluss von Parametern wie Holzart, Holzdichte, Holzfeuchtigkeit, Temperatur, Jahrringstellung, Faserverlauf, Probenform und Schlankheitsgrad auf die Bruchschlagarbeit.

Wurde in diesen älteren Arbeiten vor allem die Bruchschlagarbeit ermittelt, so bezogen sich spätere Untersuchungen auch vermehrt auf die Schlagbiegefestigkeit unter Angabe von entsprechenden Spannungsverläufen und Bruchspannungen. Krech [8] untersuchte zum Beispiel Zusammenhänge zwischen Kraft, Durchbiegung und Bruchschlagarbeit. Auch Partl [9] ging in seinen Versuchen zum Temperatureinfluss auf das Schlagbiegeverhalten neben der Bruchschlagarbeit auf die Schlagbiegefestigkeit ein.

Zahlreiche grundlegende Daten über den Einfluss der Belastungsdauer auf die (Biege-) Festigkeit von Hölzern wurden in der Zeit des zweiten Weltkriegs im Zusammenhang mit dem Einsatz von Hölzern im Flugzeugbau ermittelt. Beispielsweise sind in einem vom Forest Products Laboratory herausgegebenen Bericht [10] wichtige Ergebnisse zusammengefasst. Geprüft wurde die Biegefestigkeit von verschiedenen Holzarten bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten. Die fehlerfreien und geradfaserigen Probekörper wiesen Abmessungen von ca. $b \times h \times \ell = 25 \times 51 \times 406\text{mm}^3$ für Nadelhölzer und $b \times h \times \ell = 25 \times 25 \times 406\text{mm}^3$ für Laubhölzer bei einer effektiven Spannweite von $\ell_{\text{eff}} = 356$ mm auf. Die Kurzzeitversuche wurden dabei mit hydraulischen Prüfmaschinen durchgeführt. Hierbei zeigte sich deutlich, dass für die kürzesten Zeiten bis zum Bruch von ca. 0.3 s bei Laubhölzern und ca. 1.5 s bei Nadelhölzern und die Festigkeit bei

kurzen Belastungszeiten um 20% bis 30% höher war als bei den Kontrollversuchen mit einer mittleren Belastungszeit von ca. 720 s.

Allen diesen Untersuchungen ist gemein, dass sie praktisch ausschliesslich mit kleinen fehlerfreien Proben durchgeführt wurden und sie keine Grundlage für eine effektive Bemessung von Bauteilen aus Holz auf stossartige Belastungen liefern, wie auch schon Partl [9] erkannt hatte.

2.3.2 Versuche mit Proben in Bauteilgrösse

Hölzer in Bauteilgrösse, also z.B. Balken und Bretter, und deren Verhalten bei Schlagbiegung wurden in der Vergangenheit selten geprüft. Dies dürfte unter anderem daran liegen, dass der Aufwand für entsprechende Versuche erheblich ist und Einrichtungen (Fallgewichtanlagen inklusive entsprechend ausgerichteter Messtechnik) in beträchtlicher Grösse vorhanden sein müssen.

Arbeiten hierzu liegen beispielsweise von Madsen [11] und Jansson [12] an der University of British Columbia UBC vor. Die verwendeten Nadelhölzer mit einem Querschnitt von $38 \times 89 \text{ mm}^2$ und einer Spannweite von ca. 1095 mm waren gemäss der Grösse von vorhandenen Ästen rudimentär in zwei "Güteklassen" eingeteilt. Bei diesen Versuchen traten weitere wichtige Parameter, nämlich die Geometrie der Lasteinleitung, die Eigenfrequenz sowie das Beharrungsvermögen der Probekörper, als wichtige, früher weniger beachtete Einflussgrössen auf das Schlagbiegeverhalten von Holz hervor. Weiterhin zeigten die Autoren sowie auch Leijten [13] auf, dass eine nach verschiedenen Holzbaunormen häufig angewendete Erhöhung von zulässigen- bzw. Bemessungs- Spannungen bei Kurzzeitbeanspruchungen (z.B. k_{mod} nach EC5 bzw. η_t nach SIA 265) auf Grund ihrer Ergebnisse mit stossartigen Belastungen nicht bestätigt werden kann. Vielmehr lagen die beobachteten Bruchspannungen um bis zu 15% unter denjenigen aus statischen Biegeversuchen. Jansson [12] und Leijten [13] berücksichtigten bei ihren Untersuchungen die Auswirkung von "inertia effects" auf den Schlagbiegewiderstand. Dies bezeichnet im Wesentlichen den Einfluss des Beharrungsvermögens des Probekörpers bei einer schlagartigen Belastung. Hierbei wird die Energie (bzw. Kraft), welche zum Beschleunigen des Probekörpers auf die Geschwindigkeit der Last notwendig ist, von der registrierten Gesamtkraft bzw. Energie abgezogen. Der entsprechend reduzierte Wert der Kraft wird anschliessend für die Bestimmung der Festigkeit zu Grunde gelegt.

Gemäss diesen Untersuchungen hat die Zeit bis zum Bruch (time of failure) im Millisekundenbereich einen massgeblichen Einfluss auf die im Vergleich geringere Bruchspannung.

Im Hinblick auf einen möglichen Einsatz von Holz beim Bau von Leitplanken an Strassen in den Niederlanden wurden an der Universität Delft von Bocchio et al. [14] sowie Leijten [15] ebenfalls Schlagbiegeversuche mit mehreren Holzarten (z.T. auch wärmebehandelt) mit Querschnitten von $130 \times 40 \text{ mm}^2$ und einer Spannweite von 1400 mm durchgeführt. Die Sortierung der Hölzer in zwei Gruppen erfolgte ausschliesslich auf der Basis des zuvor bestimmten statischen E-Moduls. Wie bereits bei Madsen [11] und Jansson [12] wurden die Bruchspannungen unter statischen und stossartigen Lasten miteinander verglichen und ein Einfluss der beschriebenen Sortierung auf die Schlagbiegefestigkeit konnte bestätigt werden.

Sukontasukkul und Lam [16] untersuchten das Schlagbiegeverhalten von Parallam (PSL) ebenfalls unter Berücksichtigung der Trägheitseffekten und fanden, dass die Schlagbiegefestigkeit von PSL um ca. 30% über der statischen Biegefestigkeit lag.

3. Material und Methode

3.1 Fehlerfreie Kleinproben

Die Versuche mit den fehlerfreien Kleinproben zur Justierung des Mess- und Auswertverfahrens wurden an Kleinproben aus Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) und thermisch modifizierter Buche durchgeführt. Die Abmessungen der Probekörper betrugen $b \times h \times \ell = 20 \times 20 \times 300 \text{ mm}^3$ und entsprachen somit den Angaben in DIN 52189. Die Rohdichte wurde durch Wägung und den Abmessungen des gesamten Probekörpers bestimmt. Weiterhin wurde der dynamische E-Modul aus der Dichte und der Eigenfrequenz gemäss dem von Görlacher beschriebenen Verfahren [17] sowie der statische E-Modul mittels 3-Punkt Biegung ermittelt. Die Proben wurden vor der Versuchsdurchführung im Normklima $20^\circ\text{C} / 65\% \text{ r.h.}$ bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Die effektiv beim Versuch vorhandene Holzfeuchte wurde nicht bestimmt.

Es wurden $n = 124$ Buchen- und $n = 44$ Fichtenproben gemäss Tabelle 2 getestet. Bedingt durch Fehlmessungen im Rahmen der Justierung des Pendelschlagwerks und der Messeinrichtung waren jedoch nicht für alle Probekörper auswertbare Messdaten vorhanden. Um unterschiedliches Bruchschlagverhalten (spröde - zäh) zu erzeugen wurden die Spannweite ℓ_{eff} und die verfügbare Schlagenergie W_{pot} (durch den Einsatz von zwei verschiedenen Schlaghämmern) variiert. Aus demselben Grund bestand ein Teil der Buchenproben aus thermisch modifiziertem Holz (TM).

Tabelle 2: Übersicht der fehlerfreien Kleinproben

Probenbezeichnung	Serie	Holzart	n	ℓ_{eff}	$\lambda = \ell_{\text{eff}} / h$	W_{pot}
			[]	[mm]	[]	[J]
S-01 - S-07	SP-24	Fichte	7	240	12	150
S-08 - S-14	-	Fichte	7	240	12	50
S-15 - S-37	SP-24	Fichte	23	240	12	150
S-38 - S-44	SP-12	Fichte	7	120	6	150
B-02 - B-07 und B-11 - B-25	BE-24	Buche	21	240	12	150
B-08 - B-10	-	Buche	3	240	12	50
B-012_01 - B-062_20	BE-24	Buche	20	240	12	150
B-312_01 - B-661_20	BE,TM-24	Buche TM	80	240	12	150
$n_{\text{tot}} =$			168			

3.2 Kanthölzer und Bretter

Für die Untersuchungen standen 130 Kanthölzer aus zwei verschiedenen Losen (Vorversuche mit $n = 30$, und Hauptversuche mit $n = 102$, mit den Nennabmessungen $b \times h \times \ell = 80 \times 5000 \times 120 \text{ mm}^3$ sowie 45 Bretter mit den Nennabmessungen $b \times h \times \ell = 330 \times 45 \times 4000 \text{ mm}^3$ zur Verfügung. Die Kanthölzer wurden als "C24" bzw. "FK2" bestellt und geliefert, die Bretter waren als "Gerüstbretter" sortiert und geliefert. Alle Bauteile bestanden aus Fichtenholz (*Picea abies*). Sowohl die Kanthölzer als auch die Bretter wurden in Abschnitte aufgeteilt. Dies ergab sich aus der Abmessung der Fallgewichtanlage, welche eine maximale Spannweite ℓ_{eff} von 2.08 m und eine maximale Breite der Probekörper von 0.13 m zuließ. Die Auflagerseiten der Kanthölzer wurden planparallel abgerichtet und gehobelt während die Bretter grundsätzlich sägerau belassen wurden. Bei allen Probekörpern wurden die Holzfeuchte u , die Dichte bei der vorhandenen Holzfeuchte ρ_u und der dynamische E-Modul E_{dyn} bestimmt, bei einem Teil der Probekörper zusätzlich der statische E-Modul $E_{\text{stat,3P}}$ mittels 3-Punkt Biegeversuchen. Die Holzfeuchte entspricht dem Mittelwert von drei Messungen mit einem elektrischen Holzfeuchtemessgerät Bollmann H-DI 3.1 in jeweils etwa 2 cm Tiefe des Holzes. Die zugehörige Dichte wurde aus der durch Wägen des gesamten Probekörpers ermittelten Masse und den aktuell vorhandenen Abmessungen der Probekörper bestimmt. Der dynamische E-Modul wurde aus der mit einem "Sylvatest" gemessenen Schallgeschwindigkeit im Holz v sowie der Dichte ρ_u mit folgendem Zusammenhang berechnet:

$$E_{\text{dyn}} = \rho_u \cdot v^2 \quad \text{Gl. 1}$$

Die Mittelwerte sowie die 5% Fraktilwerte der Rohdichten aller Serien entsprachen den Anforderungen an die Festigkeitsklasse C24. Eine Verifizierung der Festigkeitsklasse über den Biege-E-Modul war nicht möglich, da dieser statisch nur mittels 3-Punkt Biegeversuche ermittelt wurde und daher Anteile aus Schubverformung und Eindrückungen an der Lasteinleitung und an den Auflagern enthält.

Diese Belastungssituation wurde mit Absicht so gewählt, um einen direkten Vergleich mit den ebenfalls als 3-Punkt-Versuchen durchgeführten Schlagbiegetests zu ermöglichen.

3.2.1 Aufteilung der Kanthölzer und Bretter

Die Kanthölzer wurden, wie Abbildung 2 und Abbildung 3 gezeigt, aufgeteilt und den angegebenen Serien zugeordnet:

27 Kanthölzer:

s-208-e	s-136-e,i oder s-136-f,i	s-136-e,s oder s-136-f,s
$\ell = 2200 \text{ mm}$ impact	$\ell = 1400 \text{ mm}$ impact	$\ell = 1400 \text{ mm}$ statisch

21 Kanthölzer:

s-172-e	s-136-e,i oder s-136-f,i	s-136-e,s oder s-136-f,s	Rest
$\ell = 1800 \text{ mm}$ impact	$\ell = 1400 \text{ mm}$ impact	$\ell = 1400 \text{ mm}$ statisch	

54 Kanthölzer:

s-148-e oder s-148-f	s-136-e,i oder s-136-f,i	s-136-e,s oder s-136-f,s	Rest
$\ell = 1650 \text{ mm}$ impact	$\ell = 1400 \text{ mm}$ impact	$\ell = 1400 \text{ mm}$ statisch	

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Aufteilung der Kanthölzer


30 Kanthölzer (Vorversuche)

P-148-e,A	P-148-e,B	P-148-e,C
-----------	-----------	-----------

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Aufteilung der Kanthölzer für die Vorversuche

Die Bretter wurden wie folgt aufgeteilt:

30 Bretter:

b-208	b-136	
b-208	b-136	
		◀ Rest
$\ell = 2200 \text{ mm}$	$\ell = 1800 \text{ mm}$	

15 Bretter:


b-172-mc	b-136-mc	
b-172-mc	b-136-mc	
		◀ Rest
$\ell = 2200 \text{ mm}$	$\ell = 1800 \text{ mm}$	

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Aufteilung der Bretter

Die in den Abbildungen aufgeführten Bezeichnungen der Probekörperserien werden im folgenden Abschnitt 3.2.2 erläutert. Die mit "Rest" bezeichneten Abschnitte wurden nicht für Versuchszwecke verwendet.

3.2.2 Probekörperserien

Für die Bezeichnungen der einzelnen Serien werden folgende Indizes und Bezeichnungen verwendet, welche auch einen Aufschluss über die beabsichtigten Prüfschwerpunkte der einzelnen Serien ergeben:

s-	Kantholz (square-cut timber)
b-	Brett (board)
P-	Vorversuch (preliminary)
-e	hochkant (edgewise)
-f	flachkant (flatwise)
-mc	hohe Holzfeuchte
,i	stossartige Belastung (impact loading)
,s	statische Belastung (static loading)

Eine Übersicht über die Prüfkörperanzahl und deren Eigenschaften ergibt sich aus der Tabelle 3 und der Tabelle 4 sowie aus Abbildung 5.

Tabelle 3: Übersicht der Kanthölzer

Serie	n	l_{eff}	b	h	$\lambda = l_{\text{eff}} / h$	ρ_u	u	E_{dyn}
		[mm]	[mm]	[mm]	[]	[kg/m ³]	[%]	[GPa]
P-148-e	79	1480	69	106	14.0	465 ± 36	12.9 ± 1.4	16.5 ± 1.9
s-208-e	27	2080	80	110	18.9	470 ± 42	14.5 ± 1.1	16.0 ± 2.6
s-172-e	21	1720	80	110	15.6	453 ± 34	14.1 ± 1.6	15.0 ± 2.2
s-148-e	27	1480	80	110	13.5	440 ± 55	11.7 ± 1.3	13.4 ± 2.2
s-148-f	27	1480	110	80	18.5	439 ± 58	12.4 ± 1.4	13.4 ± 2.6
s-136-e,i	48	1360	71	110	12.4	451 ± 52	13.7 ± 2	15.8 ± 3.0
s-136-f,i	48	1360	110	71	19.2	456 ± 55	13.2 ± 1.5	15.8 ± 3.0
s-136-e,s	48	1360	71	110	12.4	448 ± 50	13.4 ± 1.6	15.2 ± 3.2
s-136-f,s	48	1360	110	71	19.2	450 ± 54	13.4 ± 1.5	15.3 ± 3.0
$n_{\text{tot}} =$	373							

Tabelle 4: Übersicht der Bretter

Serie	n	l_{eff}	b	h_{nom}	$\lambda = l_{\text{eff}} / h$	ρ_u	u	E_{dyn}
		[mm]	[mm]	[mm]	[]	[kg/m ³]	[%]	[GPa]
b-208	60	2080	130	45	41.6	459 ± 44	10.5 ± 1.1	16.0 ± 2.4
b-136	60	1360	130	45	27.2	453 ± 41	10.6 ± 1.2	16.0 ± 2.3
b-172-mc	30	1720	130	45	34.4	464 ± 28	20.5 ± 2.3	14.1 ± 1.2
b-136-mc	30	1360	130	45	27.2	465 ± 33	20.7 ± 1.9	14.5 ± 1.3
$n_{\text{tot}} =$	180							

Die Kantholzserien mit 136 cm und 148 cm Spannweite waren im Gegensatz zu den Serien mit den grösseren Spannweiten sowie den Vorserien nach der Dichte- und/oder nach dem dynamischen E-Modul sortiert.

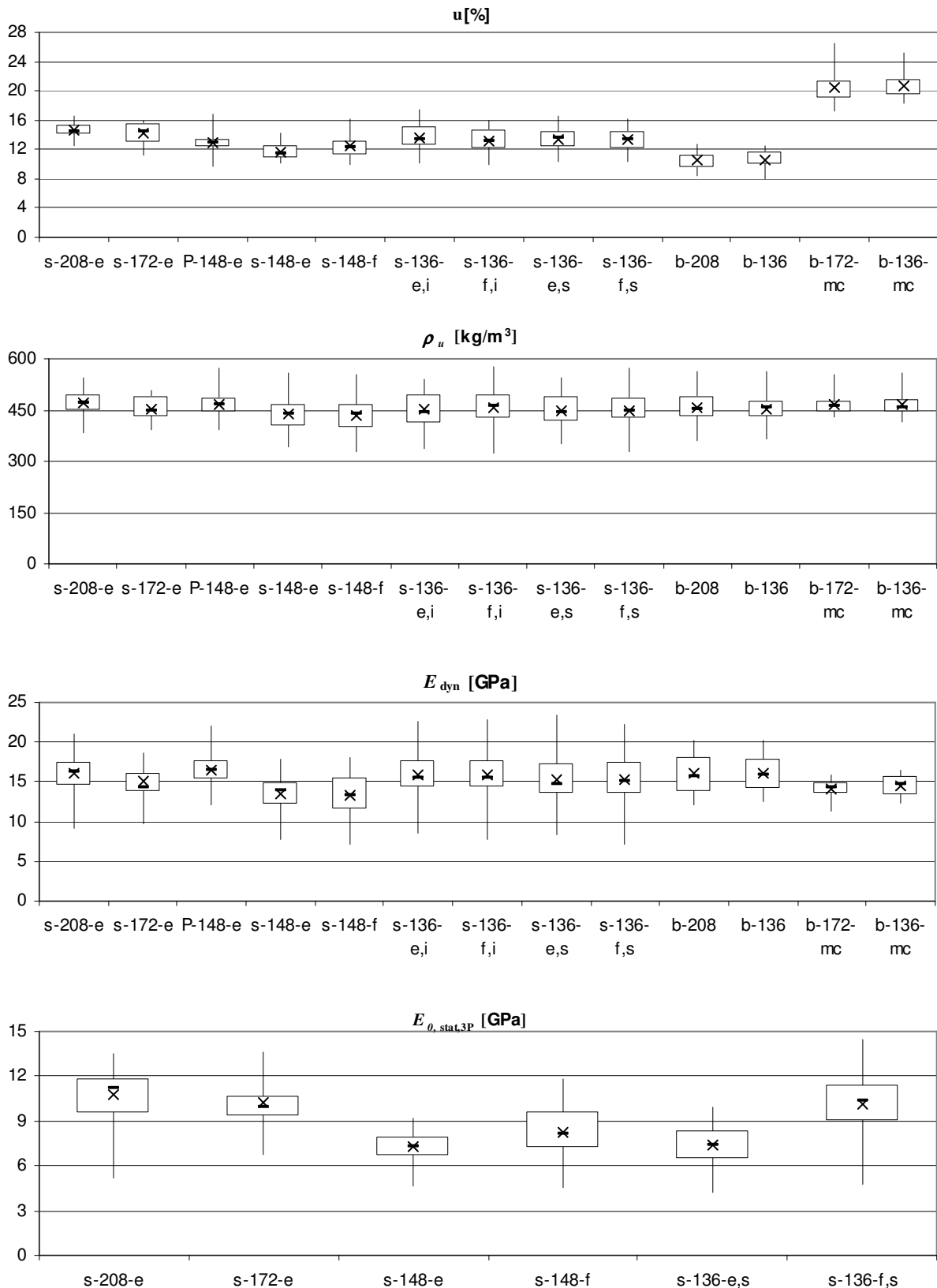


Abbildung 5: Übersicht über die wichtigsten Materialparameter der bei den Hauptversuchen geprüften Kanthölzer und Bretter. Es sind aufgeführt: Holzfeuchte u , Dichte bei angegebener Holzfeuchte ρ_u , dynamischer E-Modul E_{dyn} und im 3-Punkt Biegeversuch ermittelter statischer E-Modul $E_{0,stat,3P}$.

Bei der Holzfeuchte fällt auf, dass deren Streuungen relativ hoch sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese nicht bis zum Erreichen Gewichtskonstanz im Normklima gelagert wurden. Die Möglichkeit eines signifikanten Einflusses dieser Streuung der Holzfeuchtwerte auf die Ergebnisse der Schlagbiegeversuche wird allerdings als relativ gering eingeschätzt, da diese Streuungen für die Serien in ähnlichen Grössenordnungen sind. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten CoV schwanken zwischen 7% und 14%. Der generelle Einfluss der Holzfeuchte auf den Schlagbiegewiderstand wird bei den Ergebnissen der Versuche mit Brettern im Abschnitt 4.3.12 näher diskutiert.

3.3 Grundlagen zum Schlagbiegeversuch

Schlagbiegeversuche sind Standardversuche und werden in der Materialentwicklung und Materialprüfung insbesondere von Metallen und Kunststoffen häufig angewendet. Die Belastung bei einem Schlagbiegeversuch erfolgt grundsätzlich derart, dass eine bestimmte Masse schlagartig mit einer definierten Geschwindigkeit auf das zu untersuchende Bauteil einwirkt. Im Normalfall gleicht der Versuch vom Aufbau her einem Standard 3-Punkt Biegeversuch. Während beim statischen Biegeversuch die Zeit bis zum Bruch des Probekörpers mehrere Minuten (z.B. nach EN 408: 300 s \pm 120 s) beträgt, erfolgen Belastung und Bruch der Probe beim Schlagbiegeversuch innerhalb von Sekundenbruchteilen. Dieser Unterschied in der Belastungsgeschwindigkeit spiegelt sich auch in der Art der Versuchsergebnisse wider. Beim statischen Biegeversuch sind im Normalfall die maximale Bruchlast sowie der Biege E-Modul von grösstem Interesse, während beim Schlagbiegeversuch die Bruchenergie und die Zähigkeit (engl.: toughness) im Vordergrund stehen. Diese Art des Schlagbiegeversuchs geht auf eine Entwicklung am Anfang des 20. Jahrhunderts durch den Franzosen Georges Charpy zurück. Dementsprechend ist der Versuch auch als Charpy-Test bekannt. Standardmässig wird der Versuch bei Metallen und Kunststoffen mit auf der Biegezugseite gekerbten Probekörpern durchgeführt. Auf die Anbringung einer Kerbe wird beim Schlagbiegeversuch an Holz jedoch im Normalfall verzichtet.

Alternativ zum Charpy-Test wird auch der Izod-Test verwendet, um eine Bruchschlagenergie zu bestimmen. Der grösster Unterschied zwischen den beiden Verfahren ist die Versuchsanordnung. Beim Charpy-Test handelt es sich um eine 3-Punkt Biegung, beim Izod-Test wird am Kragarm geprüft.

In der Literatur wird begrifflich nicht immer sauber zwischen Bruchenergie und Zähigkeit unterschieden. Insbesondere in englischsprachigen Quellen wird häufig der Begriff "toughness" verwendet, da dies sowohl für "Schlagfestigkeit" als auch für "Zähigkeit" steht. Abbildung 6 zeigt den prinzipiellen Kraft – Verformungsverlauf für drei verschiedene Schlagbiegeversuche. Unter der Voraussetzung dass die Versuchs- und Probegeometrien identisch sind, zeigen die Proben ein unterschiedliches Schlagbievehalten. Obwohl die verbrauchte Bruchschlagenergie für alle drei Proben gleich gross ist (die Flächeninhalte unter den Kurven sind identisch) zeigt sich ein signifikanter Unterschied im Verformungsverhalten. Die Probe 1 zeigt ein Kraft-Verformungsverhalten, wie es typisch ist bei der Schlagbiegebeanspruchung von Holz. Die Probe 2 ist deutlich zäher als die Probe 1, während die Probe 3 ein vergleichsweise sprödes Verhalten zeigt.

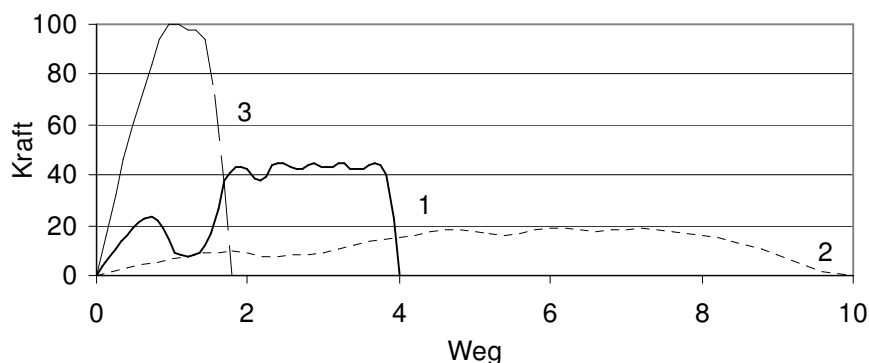


Abbildung 6: Prinzipieller Kraft – Verformungsverlauf für drei verschiedene Schlagbiegeversuche. Die Flächeninhalte unter den drei Kurven und die entsprechend jeweils verbrauchten Bruchschlagarbeiten sind identisch.

Häufig treten jedoch sprödes Bruchverhalten und niedrige Bruchschlagarbeit zusammen auf, so dass die in Abbildung 6 aufgezeigten Verhältnisse als eher allgemeine theoretische Ausführung betrachtet werden sollten und in der Praxis nicht unbedingt angetroffen werden. In diesem Bericht wird jedoch durchgehend konsequent zwischen Zähigkeit (also einem mehr oder weniger spröden Bruchverhalten) und Bruchschlagarbeit/-energie unterschieden.

3.4 Grundlagen zu den Messmethoden

Normalerweise werden Schlagbiegeversuche mit Pendelschlagwerken durchgeführt. Diese ermöglichen eine rasche Ermittlung der Schlagbiegegefestigkeit in Form der abgelesenen verbrauchten Bruchschlagarbeit. Pendelschlagwerke stehen allerdings nur für Versuche mit Kleinproben zur Verfügung. Die Untersuchung des Schlagbiegeverhaltens von Proben in Bauteilgrösse würde Pendelschlagwerke einer Grösse erfordern, welche unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht herstellbar bzw. vertreibbar wären. Daher muss für Versuche mit grösseren Probeabmessungen auf Fallgewichtsanlagen ausgewichen werden. Diese haben gegenüber Pendelschlagwerken den grossen Nachteil, dass die verbrauchte Schlagenergie nicht so einfach abgelesen werden kann, sondern auf andere Art und Weise bestimmt werden muss. Dies gilt auch für alle Schlagbiegeversuche, bei welchen Aussagen über die Zähigkeit gemacht werden sollen. Hierfür ist es unerlässlich, instrumentierte Anlagen zu nutzen, welche es beispielsweise erlauben, den Kraft – Weg Verlauf beim Durchschlagen eines Probekörpers, wie in Abbildung 6 gezeigt, aufzuzeichnen.

3.5 Versuche mit fehlerfreien Kleinproben in einem Pendelschlagwerk

Die Versuche mit Kleinproben dienen der Überprüfung und Justierung der geplanten elektronischen Messeinrichtung. Es kam ein Standard Pendelschlagwerk "Wolpert PW 15 Holz" nach DIN 51222 zum Einsatz. Dieses Pendelschlagwerk verfügt über auswechselbare Schlaghämmer. Die zwei an der Empa Abteilung Holz verfügbaren Hämmer leisten Schlagarbeiten von 50 J und 150 J. Die Probekörper haben standardmässig einen Querschnitt von $20 \times 20 \text{ mm}^2$ und eine Länge von 300 mm bei einer effektiven Spannweite von 240 mm. Dieser Versuch ist in DIN 52189 geregelt.

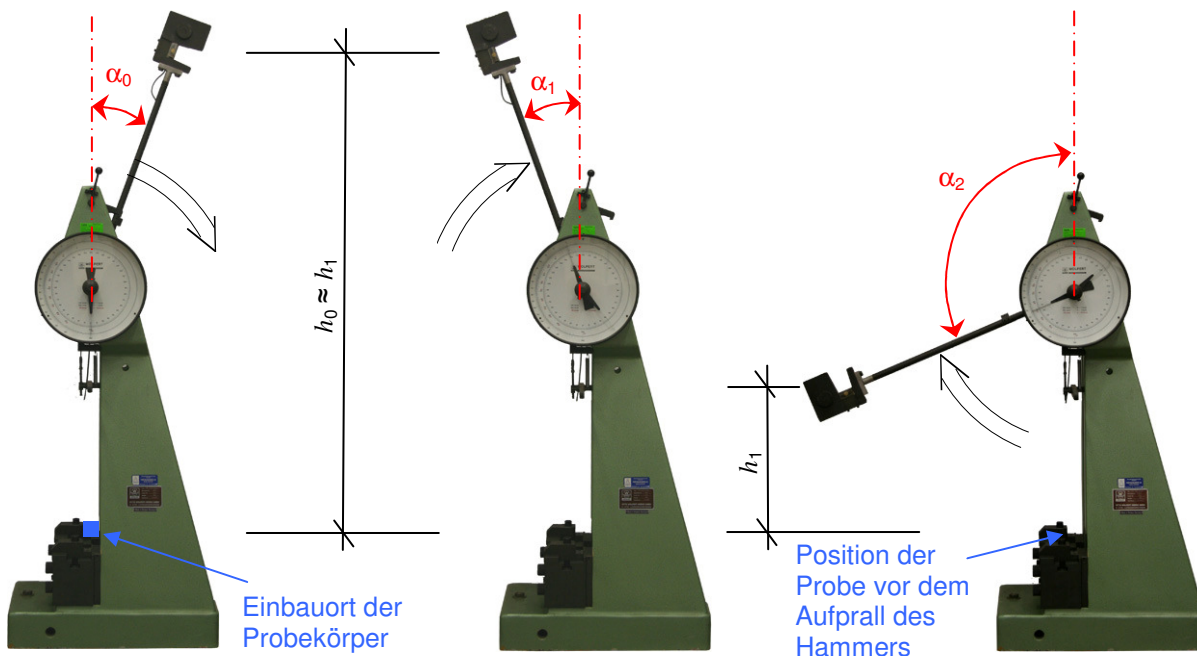


Abbildung 7: Drei typische Positionen des Schlaghammers (hier: 50 J) eines Pendelschlagwerks: Links die Ausgangssituation vor der Auslösung. In der Mitte die maximale Auslenkung nach dem freien Durchschwingen des Pendels ohne Probekörper und rechts die maximale Auslenkung nach dem Durchschlagen eines Probekörpers. Die gezeigte Auslenkung im rechten Bild entspricht einer verbrauchten Schlagarbeit von ca. 35 J.

Aus Abbildung 7 geht die Funktionsweise des Pendelschlagwerks hervor. Links ist der eingebaute 50 J Pendelhammer in seiner Ausgangsposition (α_0 , h_0) gehalten. Wird das Pendel ausgelöst, so fällt dieses im Uhrzeigersinn um seine Drehachse. Die im Pendelhammer enthaltene potentielle Energie teilt sich auf in verbleibende potentielle Energie plus kinetische Energie. Am Fusspunkt des Drehkreises beträgt die potentielle Energie des Hammers null und die kinetische Energie im Hammer erreicht ihr Maximum und entspricht der ursprünglich vorhandenen potentiellen Energie. Genau an dieser Stelle ist normalerweise der Probekörper eingebaut. Wird keine Probe in die entsprechende Vorrichtung eingebaut, so schwingt der Pendelhammer nach der Auslösung frei durch und erreicht eine maximale Auslenkung α_1 , die praktisch der gespiegelten Ausgangsposition α_0 entspricht. Lagerreibung und Luftwiderstand bewirken, dass der Winkel α_1 minimal grösser ist als der Ausgangswinkel α_0 . Dementsprechend verliert das Pendel beim Schwingen etwas von seiner gespeicherten Energie. Solange der Energieverlust allerdings im normierten Rahmen bleibt (EN ISO 148-2), kann dieser in der Praxis, also für die Messung, vernachlässigt werden ($\alpha_0 \approx \alpha_1$ und $h_0 \approx h_1$).

Beim Auftreffen und Durchschlagen eines Probekörpers verrichtet ein Teil der im Pendelhammer vorhandenen kinetischen Energie Verformungsarbeit. Dementsprechend reicht die im Pendel verbleibende Energie nicht mehr aus, dieses bis zur Position α_1 auszu lenken. Die maximale, durch einen Schleppzeiger angezeigte Auslenkung α_2 wird also früher erreicht. Da die reduzierte Auslenkung proportional zur verrichteten Bruchschlagarbeit ist, kann diese einfach auf einer Skala abgelesen werden.

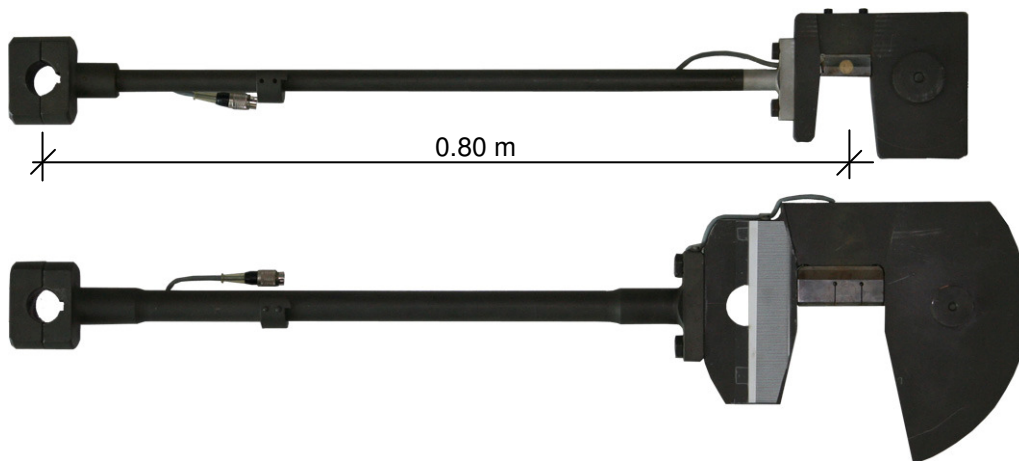


Abbildung 8: Pendelschlaghammer 50 J (oben) und 150 J (unten) für das Pendelschlagwerk PW 15 Holz der Empa Abteilung Holz. Die Finnen der Schlaghämmer sind mit elektronischen Kraftmesseinrichtungen versehen. Beim 150 J Hammer ist links neben der Finne auch die Zielmarke für die optische Wegmessung erkennbar.

Die beiden verfügbaren Schlaghämmer (Abbildung 8) sind mit einer elektronischen Kraftmessung ausgerüstet. Diese befindet sich jeweils in der Finne der Schlaghämmer. Da die elektronische Kraftmessung des 50 J Hammers jedoch keine stabilen Messsignale erzeugte, wurden letztlich alle Versuche mit dem 150 J Hammer durchgeführt und die mit dem 50J Hammer erzielten Ergebnisse wurden verworfen.

Der Einbau der Proben in das Pendelschlagwerk erfolgt in der dafür vorgesehenen Vorrichtung, so wie in Abbildung 9 gezeigt. Die Position des Schlaghammers entspricht genau jener beim Aufprall auf die Probe.

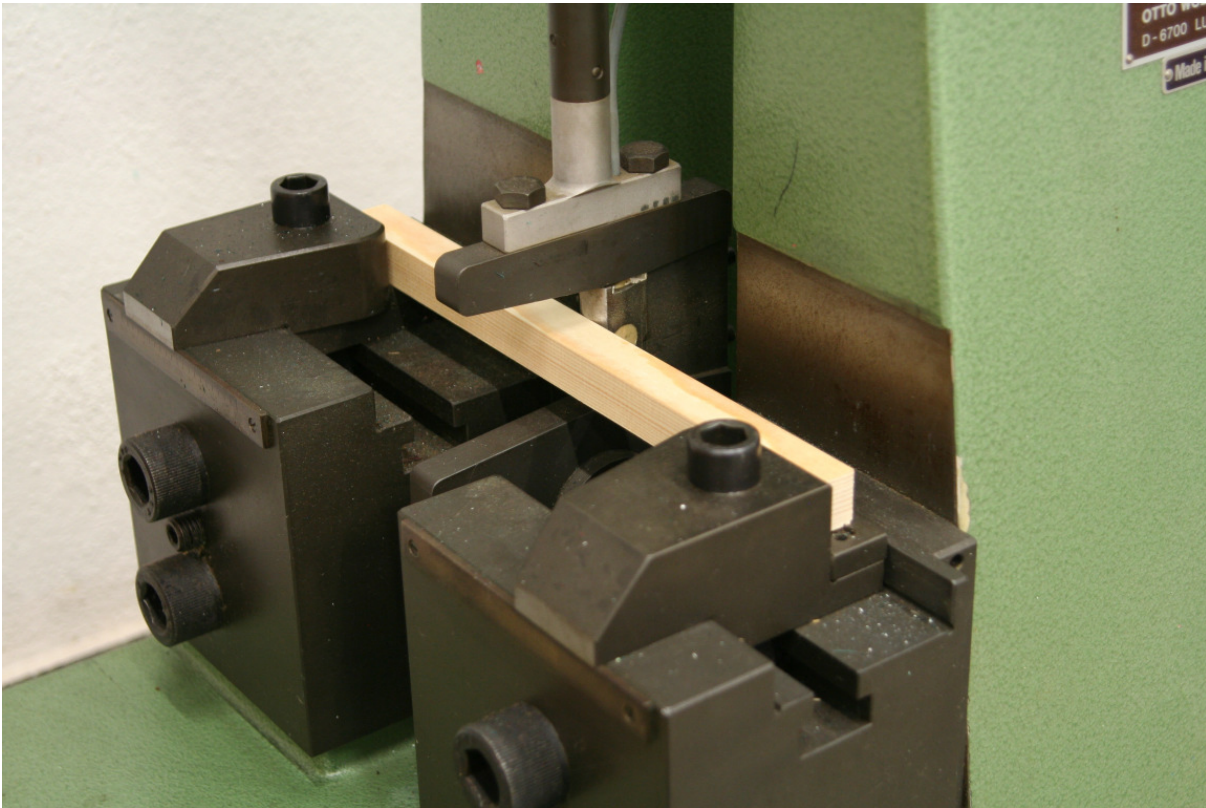


Abbildung 9: Probekörper mit $b \times h \times \ell = 20 \times 20 \times 300 \text{ mm}^3$ in der Vorrichtung des Pendelschlagwerks eingebaut. Die effektive Spannweite beträgt 240 mm. Der Schlaghammer (50 J) ist, wie hier gezeigt, in seiner tiefsten Position wenn er auf die Probe trifft.

Gemäss Norm werden die Probekörper grundsätzlich so eingebaut, dass der Schlag in tangentialer Richtung erfolgt. Hierdurch wird gewährleistet, dass alle Jahrringe innerhalb der Probe gleich belastet werden. Bei einem radialen Schlag wäre, ähnlich wie bei statischen Biegeversuchen, der Einfluss der auf der Biegezug- oder Biegedruckseite aussen liegenden Jahrringe auf die Festigkeit und Steifigkeit überproportional.

3.6 Versuche mit Kanthölzern und Gerüstbrettern in einer Fallgewichtanlage

Weiter oben wurde bereits ausgeführt, dass für Versuche mit Probekörpern in Bauteilgrösse sehr grosse Pendelschlagwerke nötig wären. Solche sind auf dem Markt allerdings nicht erhältlich und eine Eigenkonstruktion wurde aus ökonomischen sowie aus operativen Gründen als nicht sinnvoll erachtet. Daher fiel die Entscheidung schon vor Projektbeginn, die Versuche in einer Fallgewichtanlage durchzuführen. An der Empa ist eine solche Anlage mit dem Baujahr 1983 vorhanden, allerdings waren hier geometrische Einschränkungen vorhanden. Der Aufbau der Anlage ermöglichte es lediglich, Bauteile bis zu einer Breite von ca. 15 cm und einer Länge von ca. 200 cm zu testen. Zudem wurde die Instrumentierung als veraltet und vor allem für den vorgesehenen Zweck als nicht ausreichend angesehen. Aus diesem Grund war ursprünglich geplant, diese Anlage durch eine Neuanschaffung zu ersetzen. Die im Gegensatz zur ursprünglichen Planung letztlich vorhandenen finanziellen Mittel gestatteten es jedoch nicht, diese Anschaffung zu tätigen. Daher wurde die vorhandene Anlage mit elektronischen Sensoren zur Kraft- und Wegmessung aufgerüstet und alle Versuche mit Brettern und Kanthölzern fanden auf dieser Anlage statt.

In der Abbildung 10 ist der Versuchsaufbau zu erkennen. Das gelbe Fallgewicht wird mittels einer elektrischen Winde in die gewünschte Position nach oben gezogen. Dabei wird das Gewicht über eine Haken - Ösenverbindung mit der Auslösevorrichtung verbunden. Die Auslösung erfolgt pneumatisch. Das Gewicht fällt in der Folge von zwei Rundstahlprofilen geführt nach unten auf die Probe.

Wichtig sind die Details "Auflager" und Lasteinleitung oder "Schlagstück". Die beim Biegeschlag auftretenden Eindrücken nehmen einen Teil der Energie auf, welche dann dem eigentlichen Biegeschlag nicht mehr zur Verfügung stehen. Die als Auflager verwendeten Schienenprofile hinterliessen praktisch keine bleibenden Verformungen im Probekörper. Anders der als Schlagstück verwendete Rundstahl mit einem Durchmesser von 50 mm, welcher in den Probekörpern bleibende Eindrücken von bis zu 5 mm hervorrief.

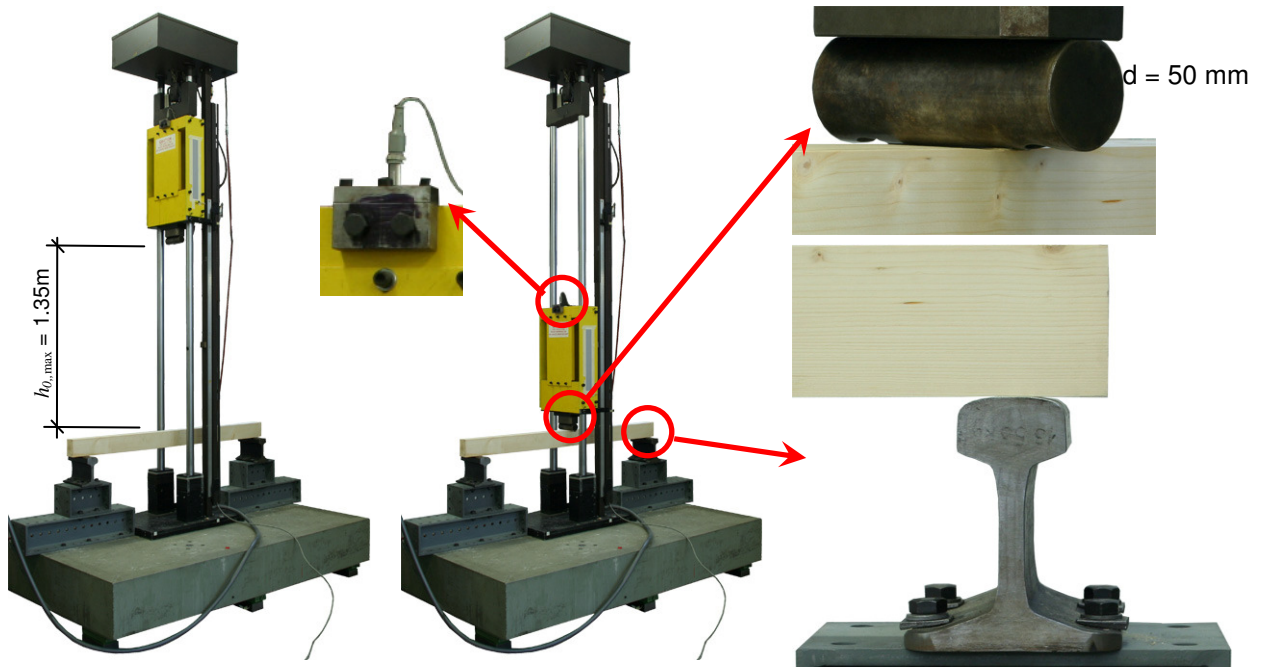


Abbildung 10: Fallgewichtanlage mit Bescheinigungssensor auf der Fallgewichtoberseite, Auflager und Lasteinleitungspunkt im Detail.

Generell ist bei dieser Anlage eine theoretische Fallhöhe von etwa 2.00 m möglich (Unterkante Fallgewicht bis Betonfundament). Der Einbau der Auflager sowie des Schlagstücks in Verbindung mit der Höhe der Proben verringerte die nutzbare Fallhöhe für die Schlagbiegeversuche auf ca. 1.30 m, so wie dies in Abbildung 10 gezeigt ist. Die Fallhöhe h_0 wurde als lichter Abstand zwischen dem Schlagstück und der Oberseite des Probekörpers definiert und kann zwischen null und maximaler

Höhe praktisch stufenlos eingestellt werden. Die Masse des Fallgewichts inklusive Schlagstücks beträgt 90.7 kg. Durch Zusatzgewichte kann die Masse des Fallgewichts in Schritten von ca. 10 kg bis auf etwa 200 kg angehoben werden: Die Anlage konnte somit folgende maximale potentielle Energie des Fallgewichts zur Verfügung stellen:

$$E_{pot,max} = m_h \cdot g \cdot h_{0,max} = 200 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 1.35 \text{ m} \approx 2650 \text{ J} \quad \text{Gl. 2}$$

Für die Versuche wurden Fallhöhen von 1.00 m bis 1.25 m und Massen zwischen 90.7 kg und 132.0 kg gewählt. Die vorhandene potentielle Energie variierte demnach zwischen 890 J und 1620 J.

Abbildung 11 zeigt Sequenzen aus einem Versuch. Im linken Bild ist das Fallgewicht in seiner Ausgangsposition (nicht sichtbar). Der Probekörper liegt frei auf den beiden Auflagern. Im Vordergrund, oberhalb der linken Balkenhälfte, ist die Einrichtung für die Wegmessung zu erkennen (Details siehe Abbildung 12).

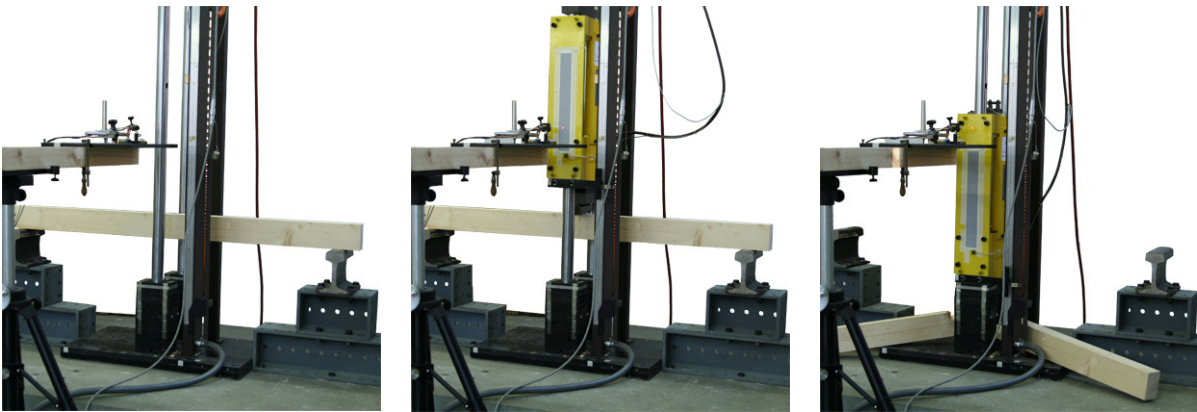


Abbildung 11: Sequenzen eines Versuchsdurchgangs. Links die eingebaute Probe. In der Mitte trifft das Fallgewicht auf den Probekörper und rechts die Situation am Ende des Versuchs. Der Balken ist gebrochen und das Fallgewicht ruht auf den Puffern. Erkennbar ist auch die Einrichtung für die Wegmessung, siehe Abbildung 12 für entsprechende Details.

Das mittlere Bild entspricht der Situation beim Aufprall des Fallgewichts auf den Probekörper und im rechten Bild ist die Endlage des gebrochenen Probekörpers sowie des Fallgewichts festgehalten. Im gezeigten Beispiel ist der Probekörper in etwa mittig gebrochen, was jedoch nicht immer zutraf. Bei stark aussermittigen Brüchen bestand die Gefahr, dass sich der längere Balkenteil auf dem Betonsockel abstützte, was zu Schwierigkeiten bei der Datenauswertung führen konnte.

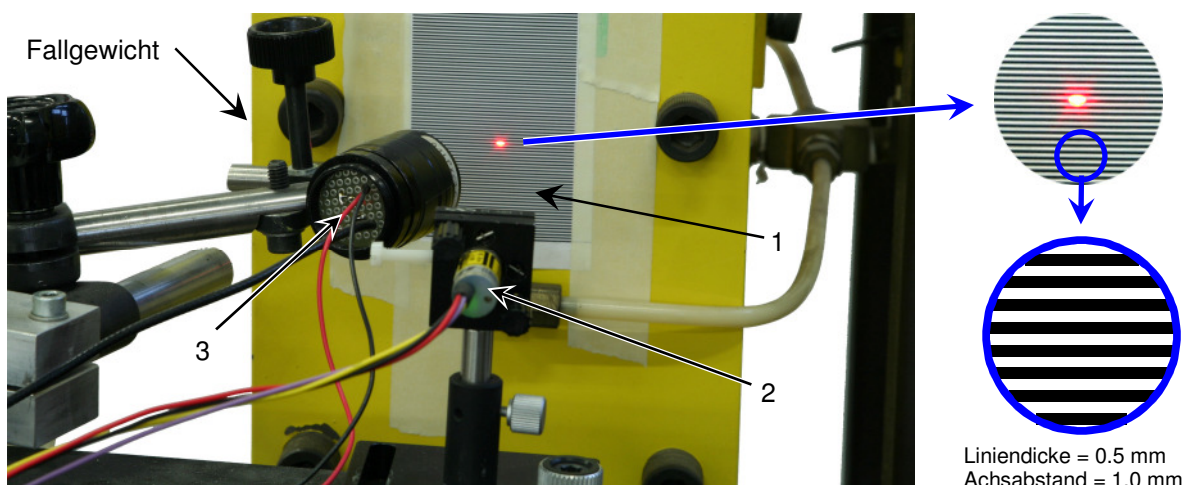


Abbildung 12: Einrichtung zur Wegmessung bestehend aus Zielmarke (1), Leuchtdiode (2) und Photozelle (3).

3.7 Elektronische Messung und Bestimmung der Bruchschlagarbeit

3.7.1 Messeinrichtung

Die elektronische Messung und Ermittlung der Bruchschlagarbeit erfolgte mit zwei voneinander unabhängigen Verfahren. Dies ermöglichte eine Kontrolle bzw. Verifizierung der erhaltenen Ergebnisse. Einerseits wurde der Kraft – Weg – Verlauf aufgezeichnet und auf dessen Basis das Arbeitsintegral bestimmt. Andererseits wurde die Geschwindigkeit des Fallgewichts bzw. des Pendelhammers vor und nach dem Durchschlagen des Probekörpers gemessen und aus der Differenz der jeweiligen kinetischen Energien die Bruchschlagarbeit ermittelt. Die Messungen erfolgten mit einer Wiederholungsrate von 50 kHz, was der Generierung je eines Wertesatzes alle 20 μ s entspricht.

Die Wegmessung erfolgte optisch, wie in Abbildung 12 gezeigt. Ein auf dem Fallgewicht bzw. dem Pendelhammer befestigtes Ziel in Form eines Strichrasters wurde mit einer Leuchtdiode beleuchtet. Die Intensität des reflektierenden Lichts wird mit einer Photozelle gemessen und aufgezeichnet. Das hierbei aufgezeichnete Signal verläuft im Idealfall rechteckig. In der Realität verlief es sinusförmig wobei die Länge einer Halbwelle der Strichdicke bzw. dem lichten Strichabstand auf dem Ziel entspricht (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13, links).

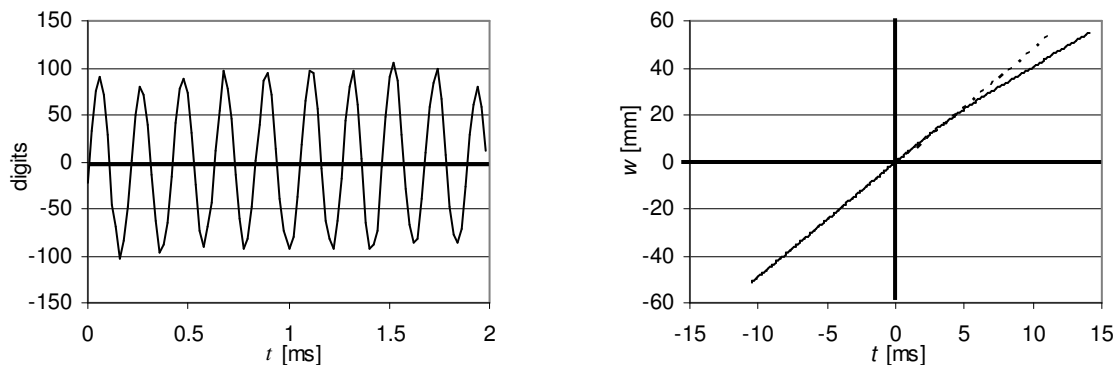


Abbildung 13: Das Wegsignal - Zeit Diagramm (links) verdeutlicht die Güte des tatsächlich aufgezeichneten Signals. Die gezeigten ca. 9.5 Wellenlängen entsprechen 9.5 mm Weg des Fallhammers. Im Weg – Zeit Diagramm (rechts) entspricht der Ursprung dem Auftreffen des Hammers auf den Probekörper. Die Abweichung des gemessenen vom theoretischen ungebremsten Verlauf (gestrichelte Linie) ist ein Mass für die verbrauchte Bruchenergie.

Das linke Bild in Abbildung 13 verdeutlicht den Verlauf des Weggebersignals während der Dauer von 2 ms beginnend ab dem Aufschlag des Fallgewichts auf den Probekörper. Die Variationen der Amplituden und Wellenlängen sind auf die beim Versuch vorhandenen generellen Beleuchtungsbedingungen sowie auf die Güte des Ausdrucks des Strichrasters zurückzuführen. Das gezeigte Signal wurde insofern justiert, als dass die ursprünglich vorhandene Abweichung vom Nulldurchgang korrigiert wurde und das Signal somit annähernd symmetrisch um die x-Achse schwingt. Aus dem rechten Bild der Abbildung 13 geht der Verlauf der Geschwindigkeit ab etwa 50 mm vor - bis ca. 50 mm nach dem Auftreffen des Fallgewichts ($t = 0$, $w = 0$) hervor. Die Geschwindigkeit entspricht der Steigung der Kurve im Weg – Zeitdiagramm. Der Verlauf auf dem relativ zur Fallhöhe kurzen Abschnitt vor dem Auftreffen ist annähernd geradlinig. Die Abweichung des aufgezeichneten Geschwindigkeitsverlaufs des Fallgewichts nach dem Auftreffen auf den Probekörper vom theoretischen ungebremsten Verlauf ist deutlich erkennbar. Der Auswertung wurden die mittleren Geschwindigkeiten 20 mm vor dem Auftreffen und 20 mm nach dem Bruch zu Grunde gelegt.

Die Kalibrierung der Kraftmessung erfolgte statisch. Für das Pendelschlagwerk und die Fallgewichtsanlage kamen zwei verschiedene Messsysteme zum Einsatz.

Beim Pendelschlagwerk wurden die beiden Pendelhämmer entnommen und in einer Druckprüfmaschine eingebaut, statisch unter verschiedenen Laststufen belastet und dabei die zugehörigen Gebersignale registriert. Die Regression des Kraft – Spannungsverlaufs wurde als Kalibrierung für die folgenden Messungen zu Grunde gelegt. Hierbei zeigte sich, dass die Kraftmessung des 50 J Hammers ein unstabiles Signal lieferte und somit wurde dieser nur begrenzt für die Versuche eingesetzt.

Bei der Fallgewichtsanlage wurde nicht die Kraft, wie bei den Pendelschlagversuchen, sondern die Beschleunigung mittels eines entsprechenden Gebers gemessen (Abbildung 10). Der Geber, ein "Hottinger B12/500" ist auf der Oberseite des Fallgewichts befestigt. Die statische Kalibrierung des Gebers erfolgt in den drei Richtungen stehend, liegend und auf dem Kopf stehend, was den Werten $+1\text{ g}$, 0 g und -1 g entspricht (mit $g = \text{Erdbeschleunigung} = 9.81\text{ m/s}^2$). Die den Beschleunigungen entsprechenden Gebersignale wurden registriert. Somit ist durch die Kalibrierung keinesfalls der gesamte mögliche Messbereich des Gebers von nominell -100 g bis $+100\text{ g}$ abgedeckt. Die aus den drei Messpunkten ermittelte Regression wurde daher für den gesamten Bereich extrapoliert.

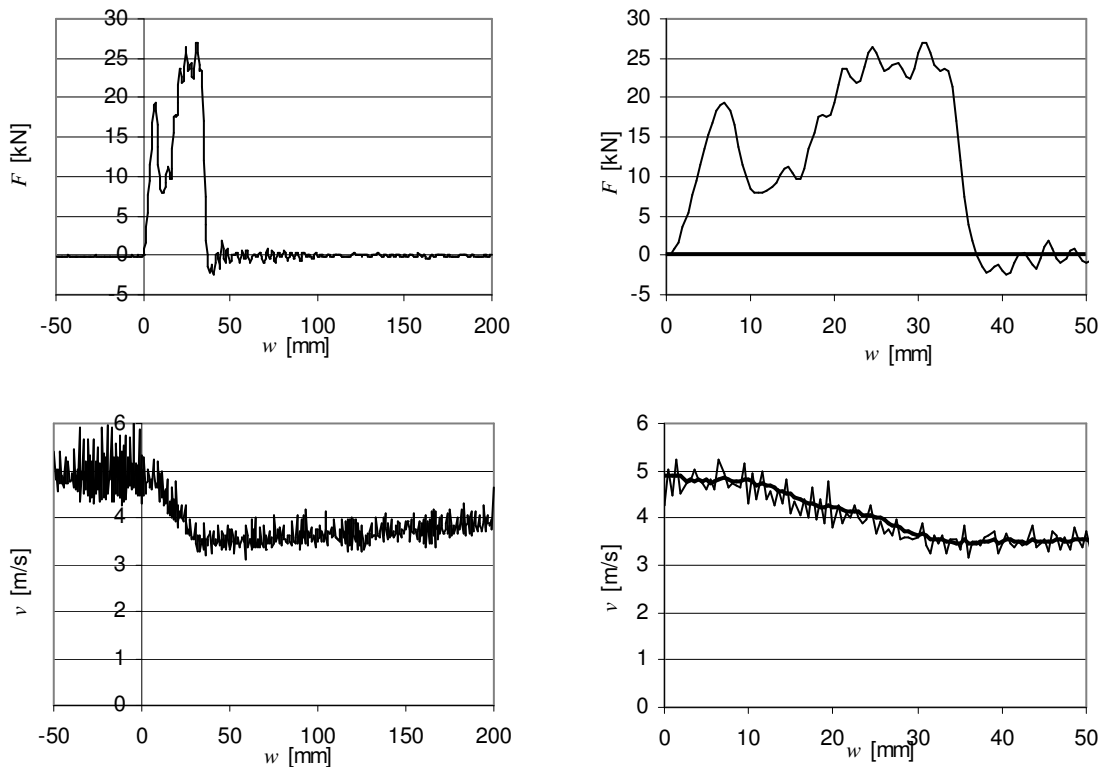


Abbildung 14: Typischer Kraft-Weg- (oben) und Geschwindigkeits-Weg- Verlauf (unten) beim Versuch mit einem Kantholz in der Fallgewichtsanlage. Die zwei Diagramme rechts zeigen den interessanten Bereich vom Auftreffen des Gewichts bis zum Bruch jeweils in vergrößerter Darstellung.

3.7.2 Ermittlung der Bruchschlagarbeit über kinetische Energie

Die kinetische Energie E_{kin} wird allgemein aus der Geschwindigkeit v und der Masse m eines Körpers in Bewegung ermittelt.

$$E_{kin} = 0.5 \cdot m \cdot v^2 \quad \text{Gl. 3}$$

Die Geschwindigkeit im freien Fall ergibt sich allgemein aus der Fallhöhe eines Körpers (hier: des Fallgewichts) und der Erdbeschleunigung g . Hierbei unberücksichtigt sind Reibungseinflüsse und der Luftwiderstand des Körpers.

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \text{Gl. 4}$$

Die beim Auftreffen des Fallgewichts auf den Probekörper vorhandene theoretische Geschwindigkeit $v_{0,theo}$ ist abhängig von der Distanz h_0 , welche den lichten Abstand zwischen der Aufschlagkante des Schlagstücks und der Oberkante des Probekörpers vor der Auslösung darstellt (siehe Abbildung 7 und Abbildung 10). Dieser lichte Abstand stellt die Fallhöhe im Versuch dar.

$$v_{0,theo} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Geschwindigkeitsmessungen zeigten, dass die gemessenen Geschwindigkeiten v_0 nur minimal von der theoretisch errechneten Geschwindigkeit abwichen und somit Reibungs- und Luftwiderstandseinflüsse vernachlässigt werden konnten. Für die weitere Analyse wurde aber grundsätzlich die gemessene Geschwindigkeit v_0 zu Grunde gelegt.

Nach dem Auftreffen auf dem Probekörper wird der freie Fall des Gewichts solange behindert, bis der vollständige Bruch des Probekörpers erfolgt ist. Danach ist der weitere unbehinderte freie Fall des Gewichts wieder möglich. Es wird angenommen, dass der Weg w_{max} , den das Gewicht vom Aufschlag bis zum vollständigen Bruch des Probekörpers zurücklegt der Durchbiegung des Probekörpers zu diesem Zeitpunkt entspricht. An der Stelle von w_{max} wäre ohne Behinderung durch den Probekörper mit der folgenden theoretischen Geschwindigkeit des Fallgewichts $v_{1,theo}$ zu rechnen:

$$v_{1,theo} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_0 + w_{max})} \quad \text{Gl. 6}$$

Die theoretische Geschwindigkeit des Fallgewichts wurde für die konkrete Auswertung um die Differenz der gemessenen Aufprallgeschwindigkeit v_0 zur theoretischen Geschwindigkeit beim Aufprall $v_{0,theo}$ angepasst.

$$v_{1,theo,adj} = v_{1,theo} - (v_0 - v_{0,theo}) \quad \text{Gl. 7}$$

Im vorliegenden Fall wurde die verbrauchte Bruchschlaggerbeit $W_{imp,k}$ letztlich aus der Differenz ΔE_{kin} der theoretischen (auf Basis $v_{1,theo,adj}$) und der tatsächlich ermittelten (auf Basis der gemessenen Geschwindigkeit v_1) kinetischen Energie des Fallgewichts an der Stelle des Bruchs des Probekörpers bestimmt.

$$W_{imp,k} = \Delta E_{kin} = 0.5 \cdot m_h \cdot (v_{1,theo,adj}^2 - v_1^2) \quad \text{Gl. 8}$$

3.7.3 Ermittlung der Bruchschlaggerbeit über das Arbeitsintegral

Mit der bekannten Masse des Fallgewichts m_h sowie der aufgezeichneten Beschleunigung $a_h(t)$ lässt sich die auf das Fallgewicht einwirkende Kraft $F_{imp}(t)$ zu jedem Zeitpunkt des Schlagbiegevorgangs ermitteln.

$$F_{imp}(t) = |m_h \cdot a_h(t)| \quad \text{Gl. 9}$$

Bei der gemessenen Beschleunigung handelt es sich um eine Verzögerung. Da die Beschleunigung demnach entgegengesetzt dem Wegvektor wirkt, ist der Zahlenwert der Beschleunigung ein negativer Wert.

Der vom Fallgewicht zu einem beliebigen Zeitpunkt t zurückgelegte Weg $w(t)$ ergibt sich entweder direkt aus der Aufzeichnung des Wegsignals (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13) oder durch zweifache Integration des Beschleunigungssignals $a_h(t)$.

$$w(t) = \iint a_h(t) dt \quad \text{Gl. 10}$$

Für die Auswertung wurde konkret das aufgezeichnete Wegsignal verwendet. Dessen Güte konnte durch einen direkten Vergleich mit dem aus der Integration gewonnenen Wert beurteilt werden. Somit konnte der Kraft – Weg – Verlauf ermittelt werden, wie er in Abbildung 14 beispielhaft gezeigt ist. Die Integration der Kraft über den Weg, das Arbeitsintegral, ergibt direkt die bei der Schlagbiegung aufgewendete Arbeit $W_{imp,i}$.

$$W_{imp,i}(t) = \int_{w=0}^{\max} F_{imp}(t) dw(t) \quad \text{Gl. 11}$$

Die während des Bruchs vom Fallgewicht an den Probekörper abgegebene Energie $\Delta E(t)$ lässt sich auch für jeden Zeitpunkt wie folgt bestimmen [18]:

$$W_{imp} = \Delta E(t) = 0.5m_h \cdot \left(2a_h h_0 - \left(\sqrt{2a_h h_0} - \frac{1}{m_h} \cdot \int_0^t F_{imp}(t) dt \right)^2 \right) \quad \text{Gl. 12}$$

Mittels der beiden zumindest teilweise unabhängig voneinander bestimmten Grössen $W_{imp,k}$ und $W_{imp,i}$ war eine Kontrollmöglichkeit und Verifikation der Ergebnisse möglich. Die ermittelten Bruchschlagarbeiten wurden einander gegenübergestellt und es zeigte sich eine gute Korrelation der Werte, wie aus Abbildung 15 entnommen werden kann.

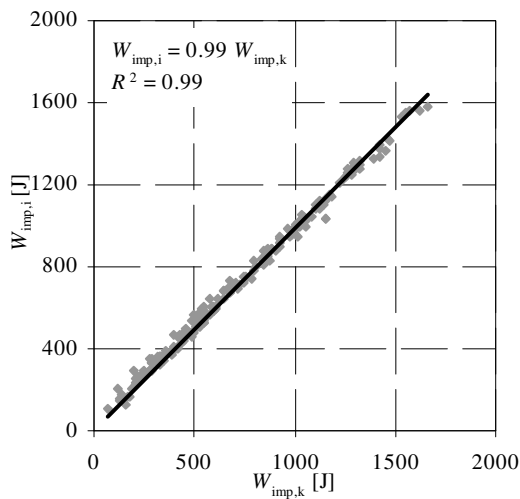


Abbildung 15: Korrelation der aus kinetischer Energie und Arbeitsintegral ermittelten Bruchschlagenergien für $n = 191$ Versuche an Kanthölzern.

Dementsprechend konnten die oben beschriebenen Brucharbeiten als gleichwertig betrachtet werden. Für die weitere Auswertung wurde grundsätzlich die mit Hilfe des Arbeitsintegrals $W_{imp,i}$ ermittelte Bruchschlagenergie herangezogen.

3.8 Auswertung der Arbeitsintegrale

Der Kraft – Wegverlauf zeigt vier Phasen. Beim Auftreffen des Schlaggewichts auf dem Probekörper steigt die Kraft rasch bis zu einem ersten Maximum an und fällt danach wieder ab. Der Balken wird beschleunigt und biegt sich infolge des Impulses durch, während der freie Fall des Gewichts entsprechend verzögert wird. Am Ende des Anfangsimpulses steigt die Kraft wieder an bis zum Erreichen der Maximalkraft. Der dabei zu beobachtende oszillierende Kraftverlauf ist vorwiegend Eigenschwingungen des Balkens infolge des ersten Impulses zuzuschreiben [8]. Die Amplituden der Oszillationen können auch deutlich grösser sein als in diesem Beispiel. Nach dem Erreichen der Maximalkraft erfolgt der Bruch des Probekörpers und die Kraft fällt schlagartig auf Null ab. Dies deutet auf einen spröden Bruch hin und wird auch in der Literatur so beschrieben [8].

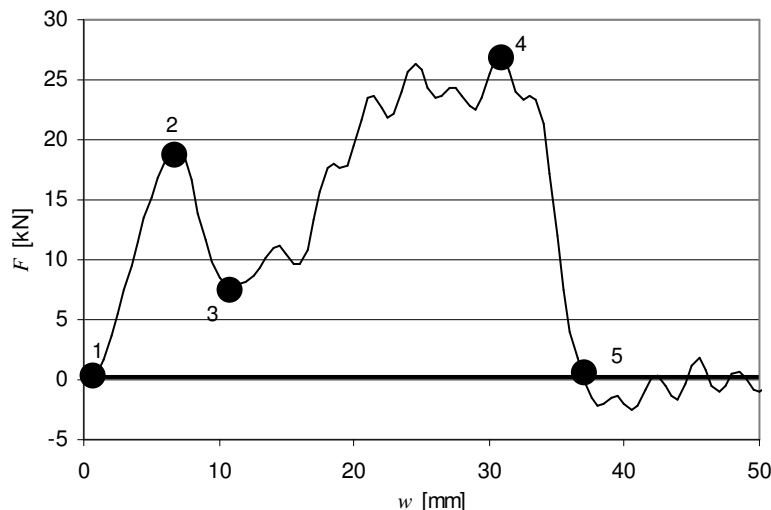


Abbildung 16: Typischer Kraft – Wegverlauf und relevante Punkte für die Auswertung des Arbeitsintegrals.

Folgende Punkte des Kraft – Wegsverlaufs wurden registriert und zur Auswertung herangezogen, siehe Abbildung 16:

- 1 - Auftreffen des Fallgewichts auf dem Probekörper, untere Grenze des Arbeitsintegrals
- 2 - Maximale Kraft im primären Impuls
- 3 - Ende primärer Impuls
- 4 - Maximale Kraft
- 5 - Abfall der Kraft auf 0, Bruch des Probekörpers, obere Grenze des Arbeitsintegrals

Der oben gezeigte Kraft- Weg Verlauf mit einem schlagartigen Abfall der Kraft auf Null ermöglichte eine relativ einfache und eindeutige Auswertung des Arbeitsintegrals. Bei zahlreichen Versuchen konnte allerdings die obere Integrationsgrenze nicht so eindeutig bestimmt werden. Dies war insbesondere bei Versuchen mit grösseren Balkenschlankheiten λ zu beobachten, wo der Kraftverlauf deutlich stärker oszillierte. Daher bedurfte es der Festlegung eines einheitlichen Bruchkriteriums. Der Bruch wurde mit dem Ende des Impulses, in welchem letztmalig mehr als 50% der Maximalkraft erreicht wurde, definiert. Dieses Krafniveau entsprach für die schwächsten Probekörper in etwa einer resultierenden Biegespannung in der Grössenordnung von 20 MPa und garantierte somit, dass die Resttragfähigkeit des angebrochenen Querschnitts nicht mehr der (ursprünglich vorhandenen) Festigkeitsklasse C24 entsprach.

In der Abbildung 17 sind Beispiele für entsprechende Kraft – Weg Verläufe gezeigt. Die linke Grafik zeigt einen Versuch mit einem spröden, schlagartigen Bruch des Probekörpers. Nach dem Abfall der Kraft auf Null sind noch leichte Nachschwingungen erkennbar. Diese sind auf das Fortschleudern der Probe sowie allenfalls auf ein Nachschwingen des Beschleunigungssensors zurückzuführen. Die obere Integrationsgrenze ist mit dem Absinken der Kraft auf Null definiert. Die aufgewendete

Bruchschlagarbeit ergibt sich aus der Integration gemäss Gl. 11 und entspricht der grau markierten Fläche. In der rechten Grafik ist der Verlauf bei einem zähen Bruch mit mehreren aufeinander folgenden Impulsen aufgezeigt. Das Kraftmaximum der einzelnen Impulse nimmt stetig ab.

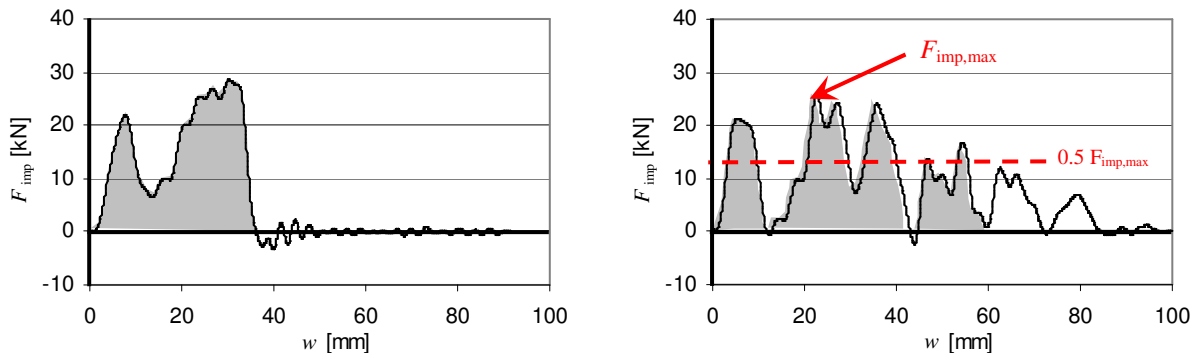


Abbildung 17: Kraft – Wegverlauf bei Versuchen mit der Fallgewichtanlage, welche ein sprödes (links) und zähes (rechts) Bruchverhalten zeigen. Die grau hinterlegten Flächen entsprechen den bei der Auswertung berücksichtigten Bruchenergien.

Bei den Versuchen mit den fehlerfreien Kleinproben standen neben der Ermittlung der Bruchschlagarbeit über das Arbeitsintegral W_{imp} bzw. über die Differenz der kinetischen Energie des Hammers vor und nach dem Durchschlagen der Probe ΔE_{kin} auch die Ablesung der durch den Schleppzeiger angezeigten Bruchschlagarbeit W_{mp} zur Verfügung. Die am Pendelschlagwerk direkt ablesbare Arbeit enthält auch sämtliche nach dem Bruch stattfindenden Ereignisse, so z.B. das Mitführen und allfällige Fortschleudern des (teilweise) gebrochenen Probekörpers. Daher wurde bei diesen Versuchen zusätzlich noch das Arbeitsintegral mit der oberen Integrationsgrenze $t = 6$ ms bestimmt. Nach dieser Zeit war bei praktisch allen Versuchen die Kraft endgültig auf Null gefallen. Die Zeit $t = 6$ ms entspricht einem zurückgelegten Weg des Pendelhammers von ca. 30 mm beginnend mit dem Auftreffen auf den Probekörper, so wie dies in Abbildung 18 gezeigt ist. Somit ist ein direkter Vergleich mit dem durch den Schleppzeiger des Pendelschlagwerks angezeigten Wert möglich.

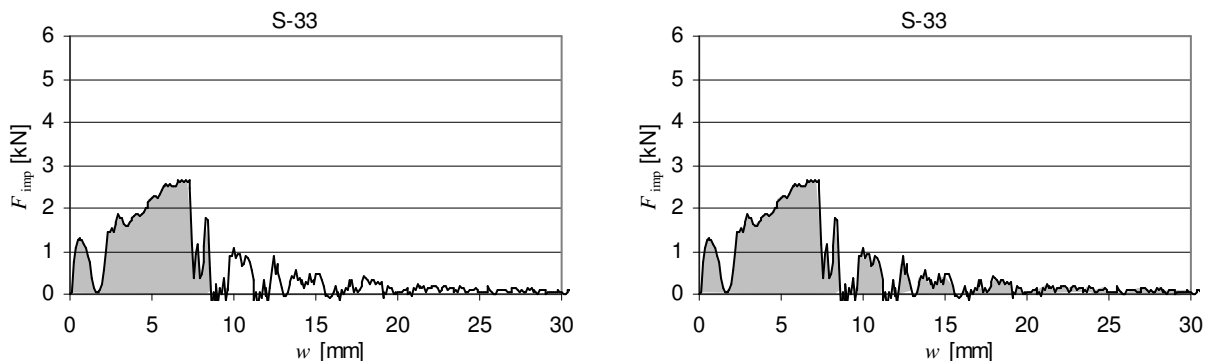


Abbildung 18: Vergleich der bei den Versuchen mit fehlerfreien Kleinproben ermittelten Arbeitsintegrale W_{imp} (links) und W_{tot} (rechts) gezeigt am Beispiel des Probekörpers S-33. Massgebend ist die jeweils grau hinterlegte Fläche. Bei der "totalen" Bruchschlagenergie sind also auch noch die Anteile vorhanden, welche durch das Mitführen und das (allfällige) Fortschleudern der gebrochenen Probe hervorgerufen wurde.

Die Korrelationen der "totalen" Bruchschlagarbeit W_{tot} mit der Bruchschlagarbeit W_{imp} sowie mit der durch den Schleppzeiger angezeigten Bruchschlagarbeit W_{mp} sind in Abbildung 19 gezeigt. Es wird deutlich, dass W_{tot} im Mittel um etwa 7% grösser ist als W_{imp} während W_{tot} andererseits um etwa 13% unter dem Schleppzeigerwert W_{mp} liegt. Der erstere Fall ist deutlich erklärbar, wird doch die Integrationsgrenze für W_{imp} nach dem oben beschriebenen Bruchkriterium von 50% F_{max} festgesetzt. Dies bedeutet, dass für alle Proben, für welche noch Kräfte nach dem Erreichen des Bruchkriteriums

aufgezeichnet wurden, W_{tot} den Wert von W_{imp} übersteigen muss, wie dies auch deutlich aus der Abbildung 18 hervorgeht. Bei der im Beispiel gezeigten Probe S-33 beträgt der Unterschied etwa 25%, was den Maximalwert innerhalb dieser Serie darstellt.

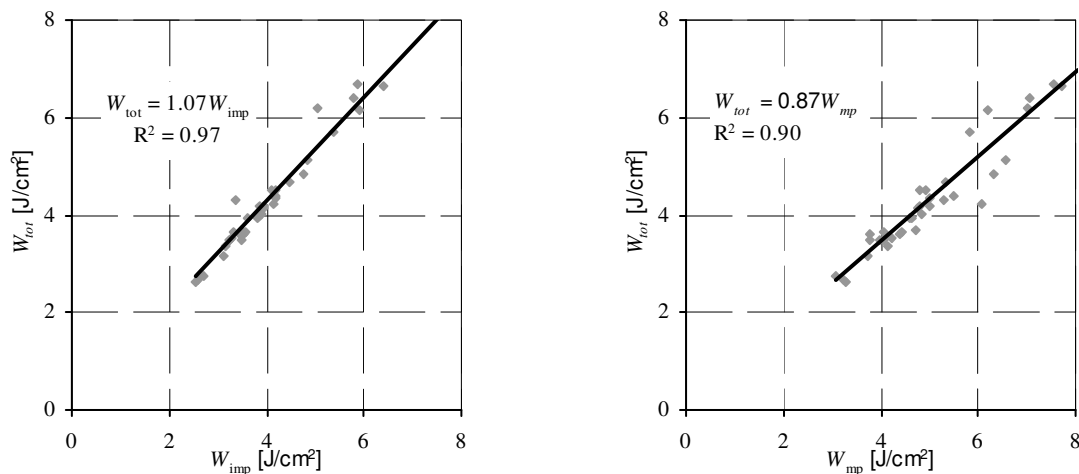


Abbildung 19: Korrelation der "totalen" Bruchschlagarbeit W_{tot} mit der Bruchschlagarbeit W_{imp} (links) sowie mit der durch den Schleppzeiger angezeigten Bruchschlagarbeit W_{mp} (rechts) am Beispiel von $n = 36$ Versuchen mit Probekörpern aus Fichte.

Schwieriger nachvollziehbar ist der Unterschied zwischen der aus der Integration des Kraftsignals gewonnenen Arbeit W_{tot} und dem am Schleppzeiger abgelesenen Wert W_{mp} . Hier sollten eigentlich identische Werte erwartet werden. Die durch Integration bestimmte Arbeit erreicht aber im Mittel lediglich 87% des Schleppzeigerwerts (siehe Abbildung 19, rechts).

3.9 Statische 3-Punkt Biegeversuche

Zum Vergleich des Biegeverhaltens unter schlagartiger sowie unter statischer Belastung wurden 3-Punkt Biegeversuche mit Kanthölzern durchgeführt. Hierzu wurden die Serien mit den Spannweiten $\ell_{\text{eff}} = 136$ cm verwendet und zwar flachkant sowie hochkant (siehe Tabelle 3). Die Versuche wurden auf einer Standard Zug- Druckprüfmaschine Zwick ausgeführt, welche mit Anbauteilen für die Durchführung von Biegeprüfungen adaptiert wurde. Die Geometrien der Lasteinleitung und der Auflager entsprach weitestgehend jenen der Schlagbiegeversuche. Für eine bessere Vergleichbarkeit mit den Schlagbiegeversuchen wurde die Durchbiegung aus dem Weg der Traverse der Prüfmaschine ermittelt. Die auf dieser Basis ermittelten Verformungsmoduln bzw. Federkonstanten k , E-Moduln $E_{0,\text{stat},3\text{P}}$ und Bruchenergien W_{stat}/A enthalten demnach auch Schubverformungen und Eindrückungen an den Auflagern sowie bei der Lasteinleitung.

3.10 Ermittlung der Ergebniswerte

Sowohl bei den statischen als auch bei den Schlagbiegeversuchen wurden die Maximalkraft als auch die Bruchenergie ermittelt. Aus der Maximalkraft wurde mit der Theorie der normalen Balkenbiegung die Biegefestigkeit f_m bzw. $f_{m,i}$ bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass es sich in beiden Fällen um 3-Punkt Biegung handelte. Für die Ermittlung der Biegefestigkeit wurde grundsätzlich das maximale Moment in Balkenmitte herangezogen, unabhängig von der genauen Lage des Bruchs (siehe Abbildung 20). Dies bedeutet, dass die angegebenen Festigkeiten als absolut mögliche Maximalwerte angesehen werden müssen. Weiterhin muss beachtet werden, dass im Gegensatz zu einem Standard 4-Punkt Biegeversuch an jeder Stelle des Balkens auch die maximale Querkraft vorhanden ist.

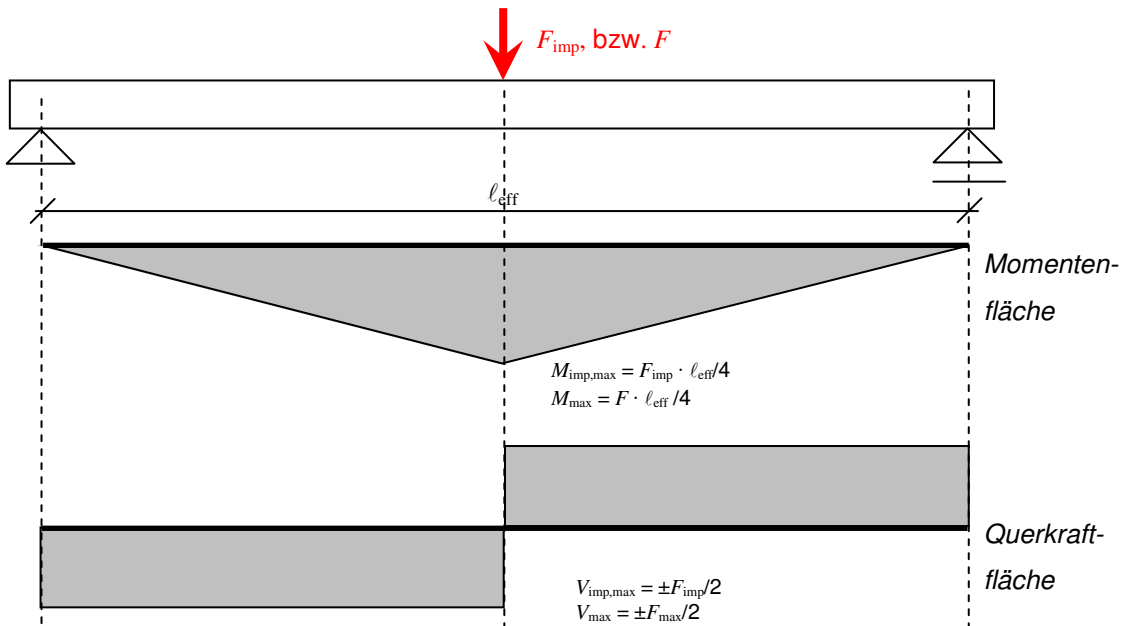


Abbildung 20: Momenten- und Querkraftverlauf beim statischen 3-Punkt Biegeversuch und beim Schlagbiegeversuch.

In mehreren Arbeiten zur Schlagbiegefestigkeit von Hölzern, wie z.B. von Jansson [12] und Sukontasukkul [16] erfolgte die Auswertung der Schlagbiegefestigkeit unter der Berücksichtigung von Trägheitskräften und der entsprechenden benötigten Energie. Hierbei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass ein Teil der Energie des Schlaghammers/Fallgewichts dafür gebraucht wird, den Probekörper entgegen seiner Trägheit zu beschleunigen. Weiter wird Schlagenergie verbraucht durch Eindrückungen im Holz sowie allfällige Verformungen des Schlaghammers/Fallgewichts. Um diesen Faktoren Rechnung zu tragen wurden auch die Probekörper mit Beschleunigungsaufnehmern versehen und somit deren Beschleunigung in Balkenmitte ermittelt. Dies erlaubt die Bestimmung einer generalisierten Trägheitslast F_t . Die Differenz aus der gemessenen Last F_{imp} und der Trägheitslast F_t ergibt die "wahre Biegelast" F_b . In den vorgenannten Arbeiten wird diese "wahre Biegelast" als Grundlage für die Ermittlung der Schlagbiegefestigkeit herangezogen.

In der hier vorliegenden Untersuchung ist dies nicht der Fall. Die Beschleunigung in Balkenmitte wurde nicht gemessen, somit besteht auch keine Möglichkeit für eine solche Auswertung. In den genannten Literaturstellen sind keine Hinweise vorhanden, welche eine Abschätzung der Größenordnung für die wahre Biegelast ermöglichen. Für die in diesem Bericht genannten Werte der Schlagbiegefestigkeit und der Bruchschlagarbeit ist dies auch nicht von erheblicher Bedeutung, da die Einflüsse anderer Parameter auf den Schlagbiegewiderstand im Vordergrund stehen. Wichtig bei der Betrachtung der hier ermittelten Werte ist aber, dass insbesondere die angegebenen Schlagbiegefestigkeiten $f_{m,i}$ als Maximalwerte angesehen werden müssen. Dies ergibt sich aus folgenden Umständen:

- Bei den Schlagbiegeversuchen handelt es sich um 3-Punkt Biegeversuche. Bei diesen Versuchen ist das maximale Biegemoment an nur genau einer Stelle, der Balkenmitte, vorhanden (siehe Abbildung 20). Es ist unwahrscheinlich, dass die schwächste Stelle der Probekörper genau an dieser Stelle zu liegen kommt.
- Die Auswertung erfolgte grundsätzlich immer auf Basis maximalen Biegemoments, unabhängig von der genauen Lage des Bruchs.
- Mögliche Trägheitseffekte sind, wie weiter oben bereits diskutiert, nicht berücksichtigt.

3.11 Versuchsreihenfolge und verfügbare Schlagenergie

Zuerst wurden die Kanthölzer geprüft. Ausgehend von publizierten Werten für die Bruchschlagenergie W_{imp}/A von Fichtenhölzern (kleine fehlerfreie Proben, [2]) von 4.0 J/cm^2 bis 5.0 J/cm^2 und Querschnittsflächen in einer Grössenordnung von 75 cm^2 bis 90 cm^2 wurde von einer benötigten Schlagenergie von mindestens 450 J ausgegangen. Für die Vorversuche wurde dieser Mindestwert verdoppelt. Es zeigte sich jedoch, dass einige Probekörper nicht oder nicht vollständig durchschlagen wurden. Daher wurde die verfügbare Schlagenergie durch Vergrösserung der Fallhöhe und/oder Erhöhung der Masse des Fallgewichts angehoben. Die verfügbare Schlagenergie wurde in der Folge in gleicher Weise den Anforderungen der einzelnen Serien angepasst wie dies in der Tabelle 5 aufgeführt ist.

Tabelle 5: Versuchsreihenfolge der Schlagbiegeversuche mit der Fallgewichtanlage. Angegeben sind Fallhöhe h_0 und Masse m des Fallgewichts, verfügbarer Schlagenergie E_{pot} und theoretischer Auftreffgeschwindigkeit v_0 des Fallgewichts.

Reihenfolge	Serie	n	h_0	m	E_{pot}	v_0
		[]	[m]	[kg]	[J]	[m/s]
1	P-148-e,S1	37	1.00	90.7	890	4.43
2	P-148-e,S2	42	1.25	90.7	1110	4.95
3	s-208-e	27	1.25	132.3	1620	4.95
4	s-172-e	21	1.25	132.3	1620	4.95
5	s-148-f	20	1.25	132.3	1620	4.95
6	s-148-f	7	1.25	90.7	1110	4.95
7	s-148-e	27	1.25	90.7	1110	4.95
8	s-136-e,i	48	1.25	133.8	1640	4.95
9	s-136-f,i	48	1.25	133.8	1640	4.95
10	b-208	60	1.25	90.7	1110	4.95
11	b-136	60	1.25	90.7	1110	4.95
12	b-136-mc	30	1.25	90.7	1110	4.95
13	b-172-mc	30	1.25	90.7	1110	4.95

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Allgemeine Angaben zur Ergebnisdarstellung

Bei der Darstellung der Versuchsergebnisse in Tabellen und Diagrammen werden folgende Bezeichnungen verwendet:

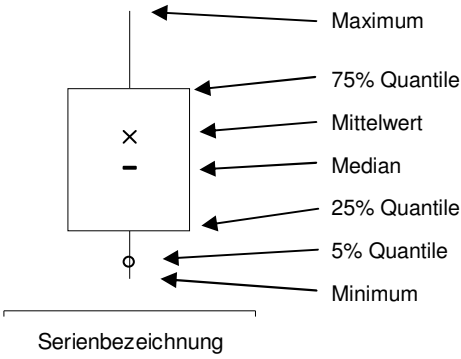
Tabelle		Boxplot	
	Serienbezeichnung		
n	Anzahl Werte		
MW	Mittelwert		
StA	Standardabweichung		
CoV	Variationskoeffizient		
Q_{05}	5%-Quantile		

Abbildung 21: Verwendete Bezeichnungen in den Ergebnistabellen und Grafiken

Die Quantilwerte Q_{05} , Q_{25} und Q_{75} sowie der Median wurden durch Interpolation zwischen je zwei benachbarten Punktwerten ermittelt.

Bei Vergleichen von Datensätzen wurde grundsätzlich ein t-Test durchgeführt. Wird in den folgenden Abschnitten auf "signifikante" Zusammenhänge hingewiesen, so ist damit immer ein statistisch signifikanter Zusammenhang auf der 5% Ebene gemeint, sofern nicht explizit etwas Anderes erwähnt wird.

4.2 Ergebnisse der Versuche mit fehlerfreien Kleinproben

Die Versuche mit den fehlerfreien Kleinproben dienten in erster Linie der Erprobung und Kalibrierung der Versuchseinrichtung. Da die Ergebnisse dieser Versuche nicht zum Schwerpunkt des Projekts gehörten, sondern eher eine notwendige aber willkommene Zugabe darstellen, werden sie im Folgenden nicht intensiv diskutiert. Die erzielten Werte sind in der folgenden Tabelle 6 und Abbildung 22 lediglich zusammengefasst.

Tabelle 6 Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ und Bruchschlagarbeit W_{imp}/A für die fehlerfreien Kleinproben.

	f_{imp} [MPa]					W_{imp}/A [J/cm ²]			
	SP-24	SP-12	BE-24	BE,TM-24		SP-24	SP-12	BE-24	BE,TM-24
<i>n</i>	30	6	41	80		30	6	41	80
MW	113	107	160	125		3.91	5.15	5.61	2.58
StA	11.3	16.1	22.3	21.2		0.95	1.58	1.39	0.95
CoV	10	15	14	17		0.24	0.31	0.25	0.37
Q ₀₅	97.4		117	96.7		2.63		2.77	1.31

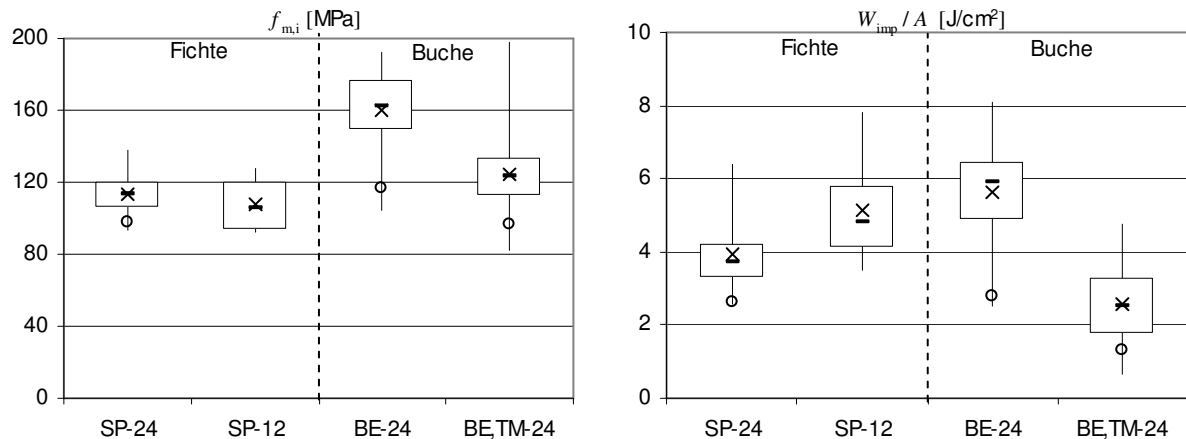


Abbildung 22: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 6.

Die erzielten mittleren Bruchschlagarbeiten liegen für die Standardversuche mit Fichtenholz (Serie SP-24) im tieferen Bereich und mit Buchenholz (Serie BE-24) deutlich unterhalb der bei Sell [2] publizierten Werte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass hier (Tabelle 6) die durch Integration gewonnenen Werte angegeben sind, jene in der Literatur aber vermutlich (genaue Angabe fehlt) auf Standardversuchen (Pendelschlagwerk mit Schleppzeigerablesung) beruhen. Werden die hier im Versuch ermittelten Schleppzeigerwerte W_{mp} herangezogen (vergleiche Abbildung 18 und Abbildung 19), so entsprechen diese für die Fichte im Mittel ($W_{mp,mean} = 4.97 \text{ J/cm}^2$) den publizierten Werten (4.0 bis 5.0 J/cm²) und für die Buche ($W_{mp,mean} = 8.13 \text{ J/cm}^2$) entsprechen sie dem unteren Bereich der publizierten Werte (8.0 bis 12.0 J/cm²). Bei diesen Betrachtungen muss aber auf die relativ geringe Anzahl an Versuchen hingewiesen werden.

Dennoch lässt sich als eine wichtige Erkenntnis zeigen, dass die auf dem normierten Schlagbiegeversuch beruhenden Werte bezüglich einer Abschätzung des Tragverhaltens bei schlagartiger Belastung eher ungeeignet sind, da sie das obere Ende der aufnehmbaren Energie markieren und somit für diesen Zweck als zu hoch angesetzt angesehen werden müssen.

4.3 Ergebnisse der Versuche mit Kanthölzern und Brettern

4.3.1 Brucharten und Bruchbilder

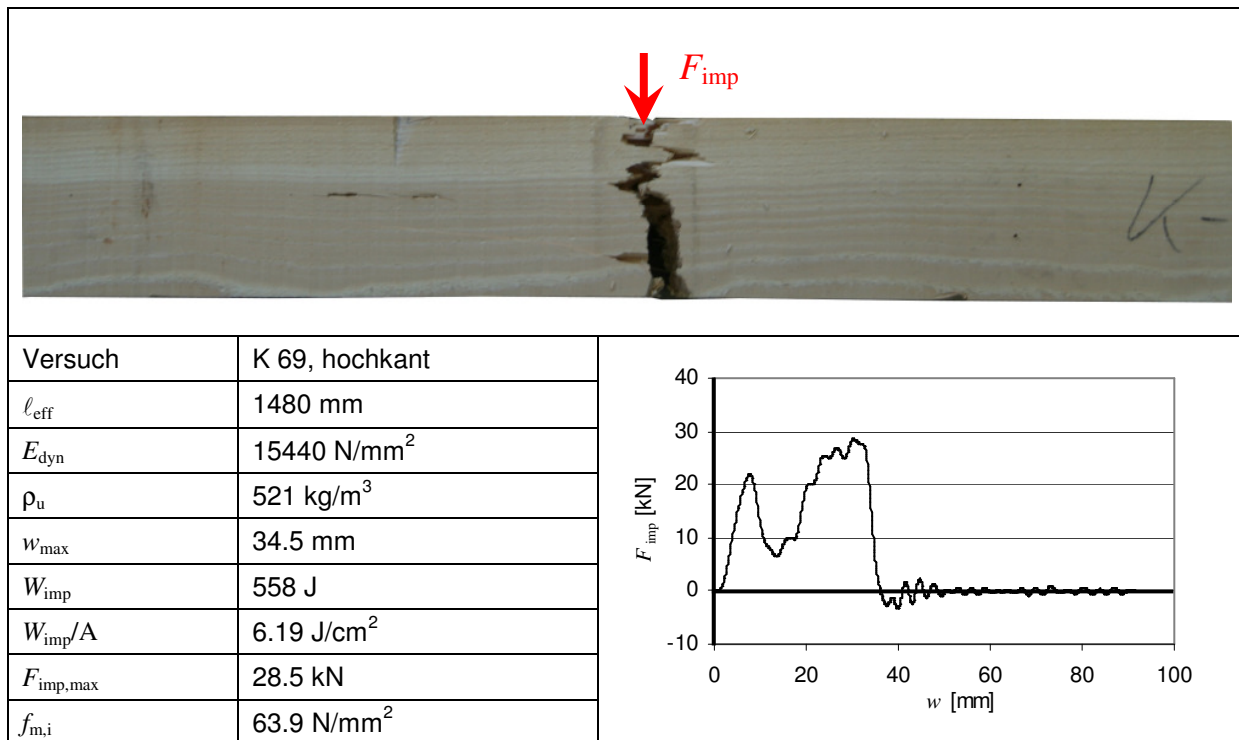


Abbildung 23: Probekörper mit einem mittigen, glatten Bruch. Die erzielte Bruchschlagenergie liegt im -, die Schlagbiegefestigkeit liegt über dem Durchschnitt der Serie.

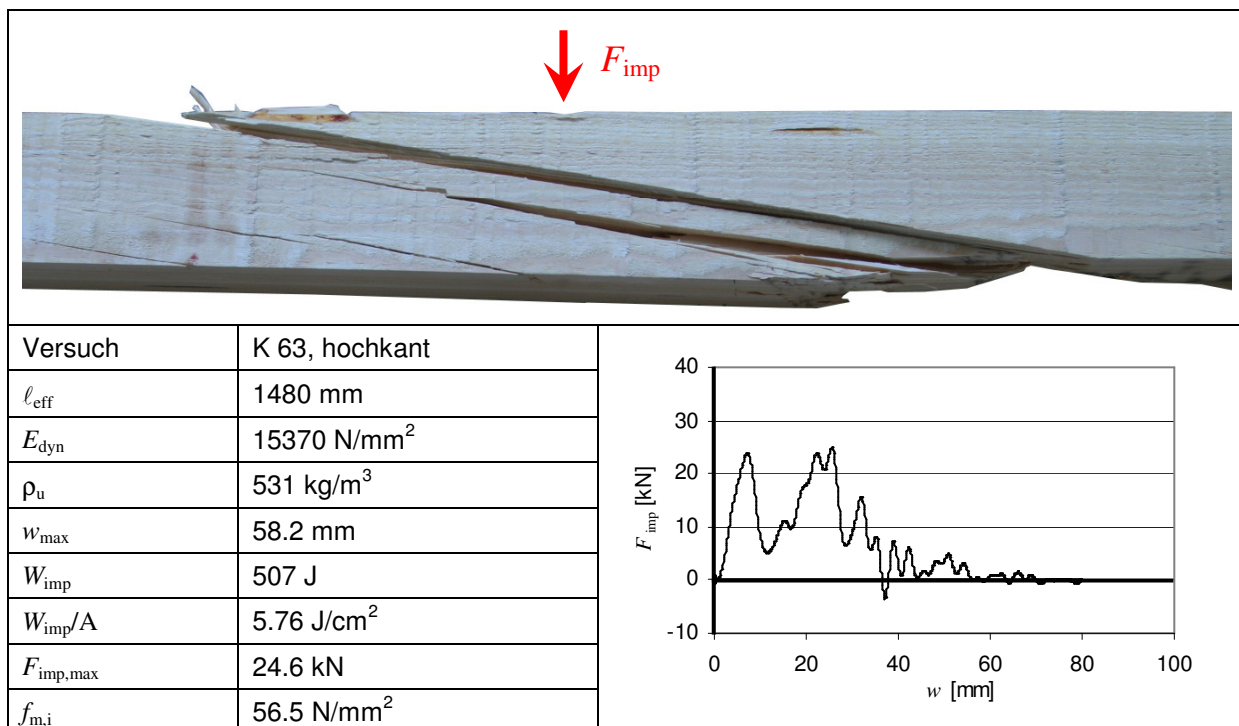


Abbildung 24: Probekörper mit mittigem Bruch und ausgeprägter genereller Schrägfaserigkeit. Die erzielte Bruchschlagenergie sowie die Schlagbiegefestigkeit liegen etwa im Durchschnitt der Serie.

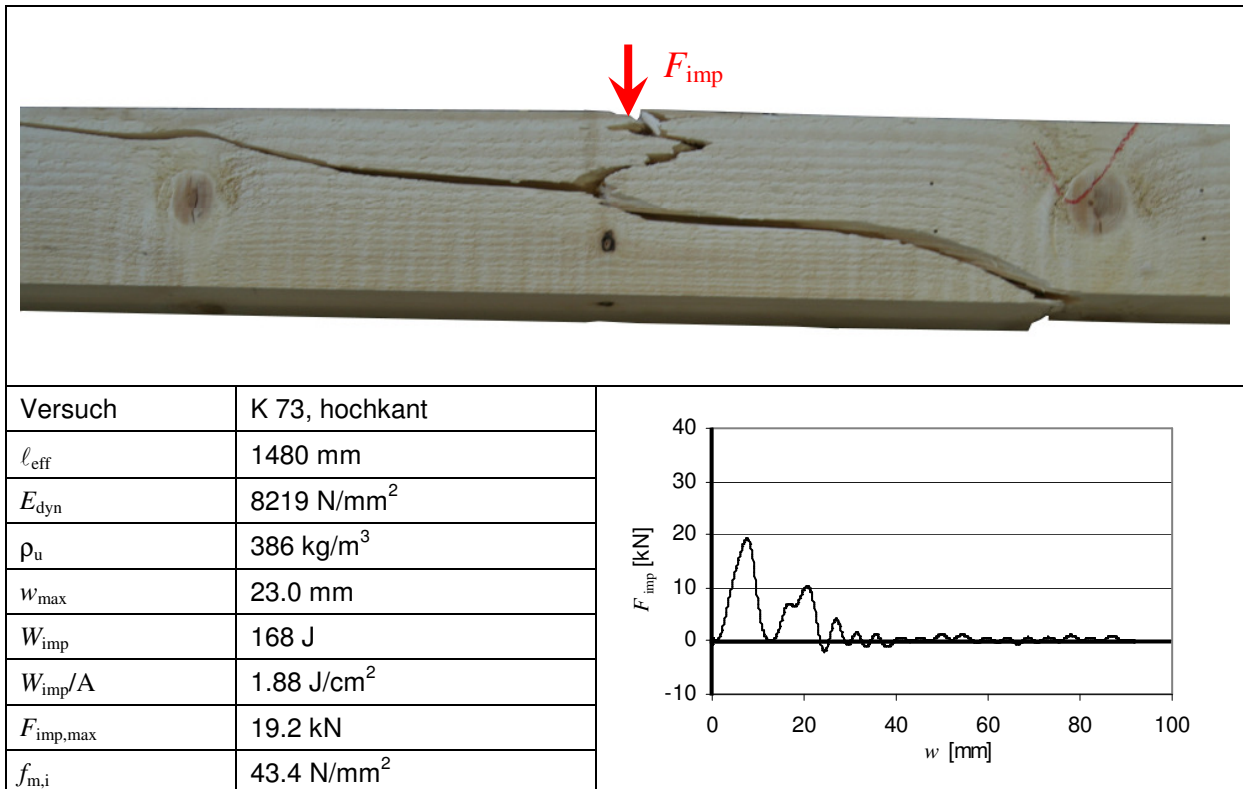


Abbildung 25: Probekörper mit lokaler Schrägfaserigkeit infolge von Ästen. Die Maximalkraft wurde hier schon im ersten Belastungsimpuls erreicht. Die erzielte Bruchschlagenergie liegt stark unter dem Durchschnitt der Serie, ebenso die Schlagbiegefestigkeit.

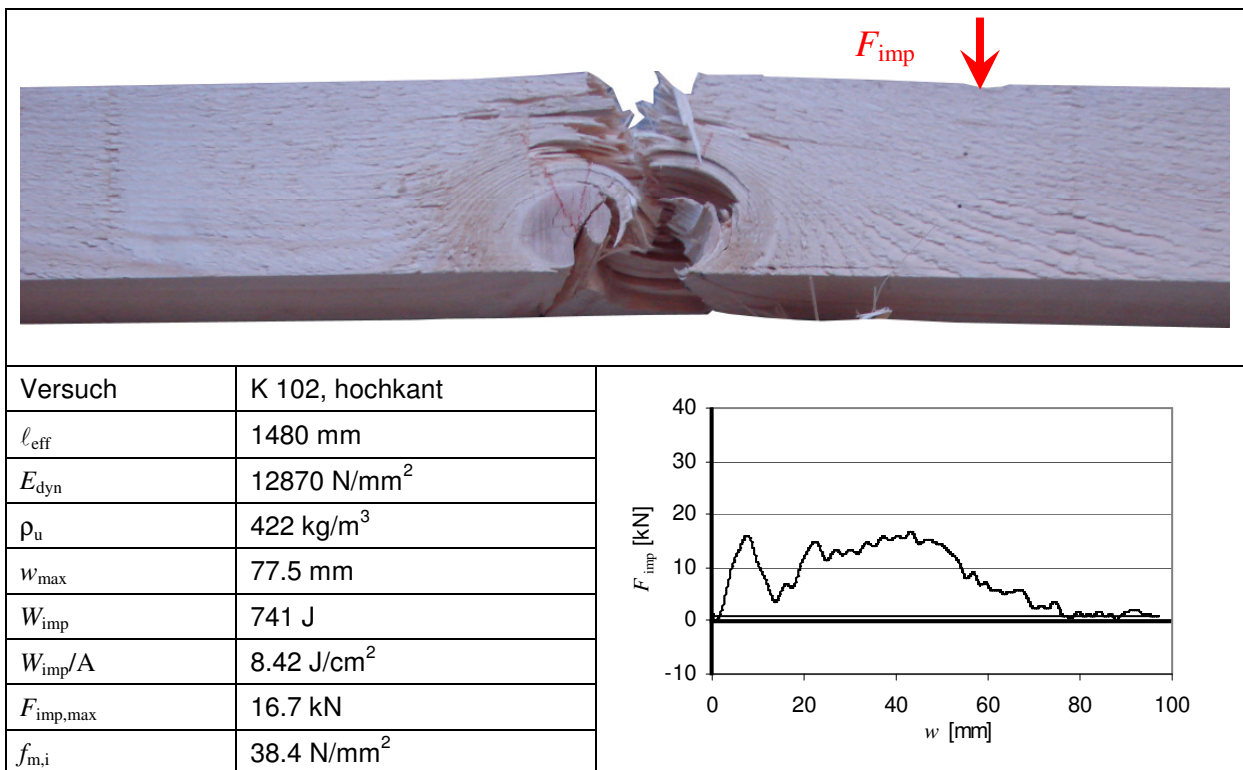


Abbildung 26: Probekörper mit grossem Ast in der Biegezugzone und aussermittigem Bruch. Die Bruchstelle befindet sich etwa 15 cm von der Lasteinleitungsstelle entfernt. Die erzielte Bruchschlagenergie liegt über -, die Schlagbiegefestigkeit hingegen deutlich unter dem Durchschnitt der Serie.

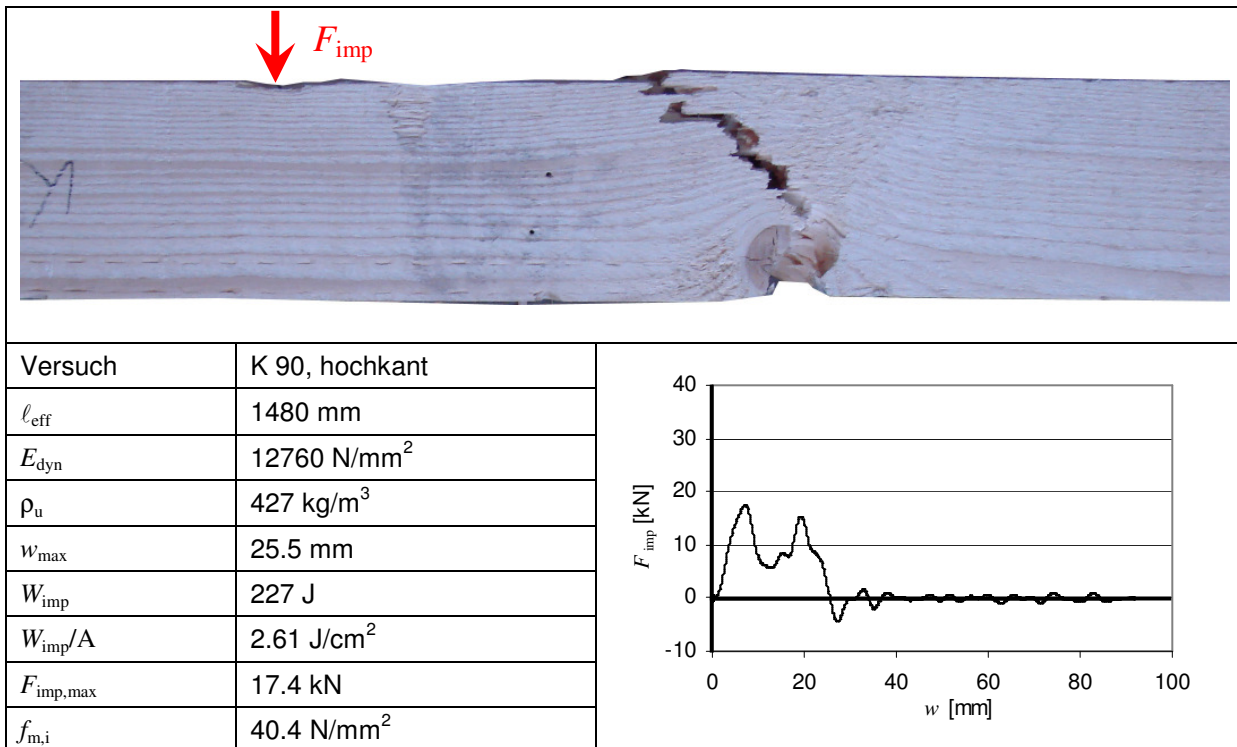


Abbildung 27: Probekörper mit Ast in der Biegezugzone und aussermittigem Bruch. Die Maximalkraft wurde bereits im ersten Impuls erreicht und die Bruchstelle befindet sich etwa 25 cm von der Lasteinleitungsstelle entfernt. Die erzielte Bruchschlagenergie und die Schlagbiegefestigkeit liegen deutlich unter dem Durchschnitt der Serie.

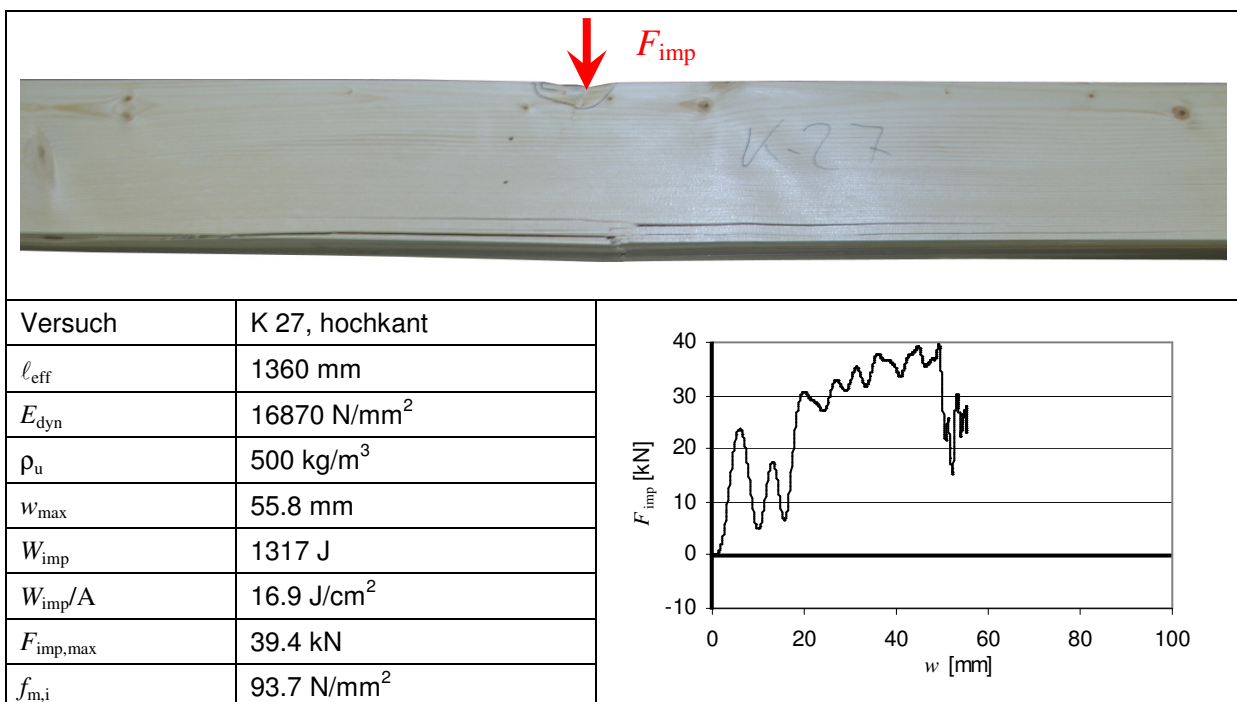


Abbildung 28: Der Probekörper ist nur teilweise angebrochen. Die erzielte Bruchschlagenergie sowie die Schlagbiegefestigkeit liegen deutlich über dem Durchschnitt der Serie.

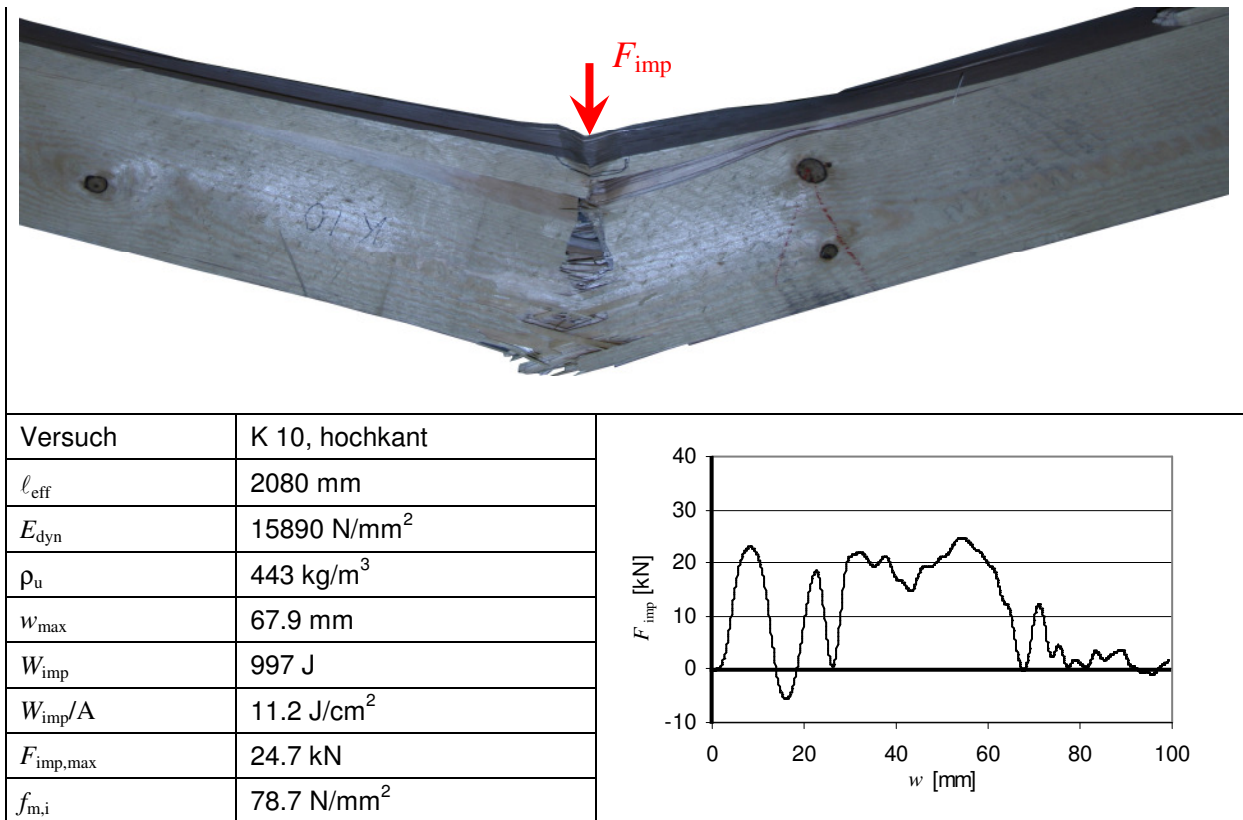


Abbildung 29: Probekörper mit grosser Spannweite und glattem Bruch. Der Probekörper ist im Bereich der Lasteinleitung in der Druckzone nicht vollständig gebrochen. Die erzielte Bruchschlagenergie sowie die Schlagbiegefestigkeit liegen etwa im Durchschnitt der Serie.

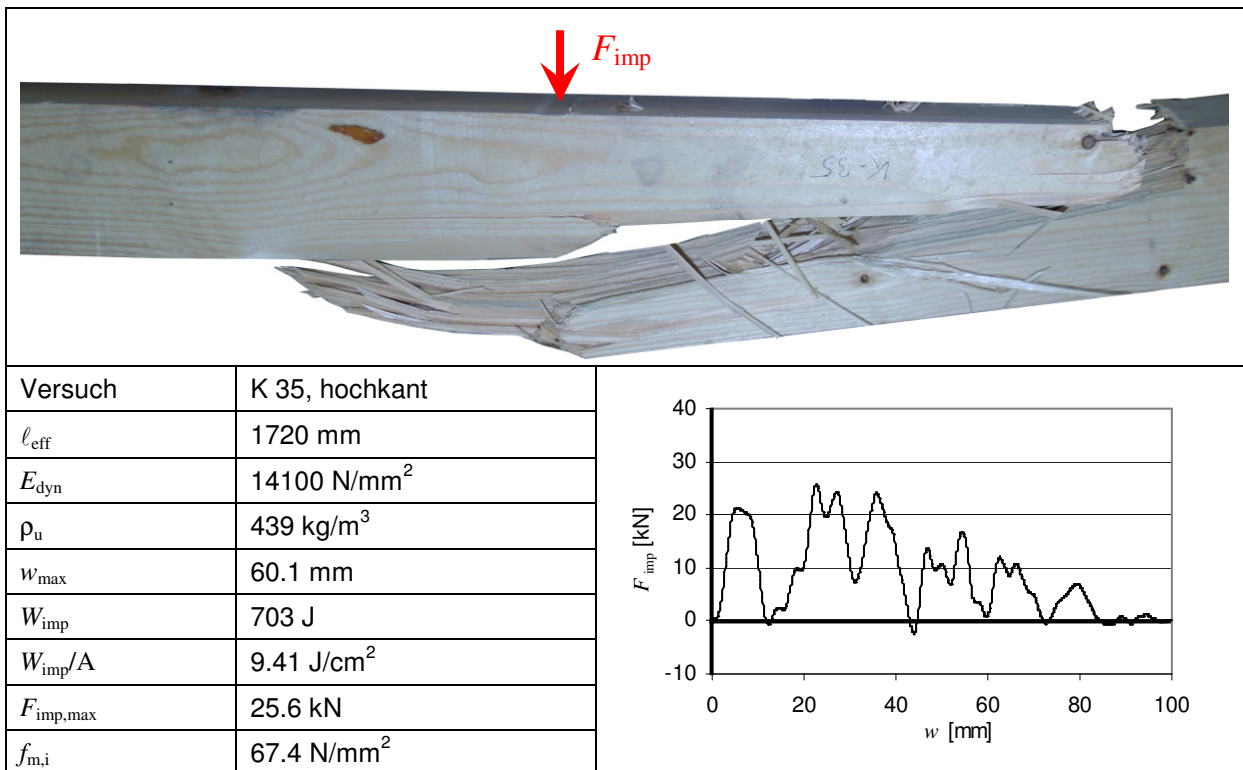


Abbildung 30: Probekörper mit grosser Spannweite und langfaserigem Bruch. Nicht erkennbar ist hier ein vorhandener Ast auf der Biegezugseite. Die erzielte Bruchschlagenergie liegt etwa im -, die Schlagbiegefestigkeit unter dem Durchschnitt der Serie.

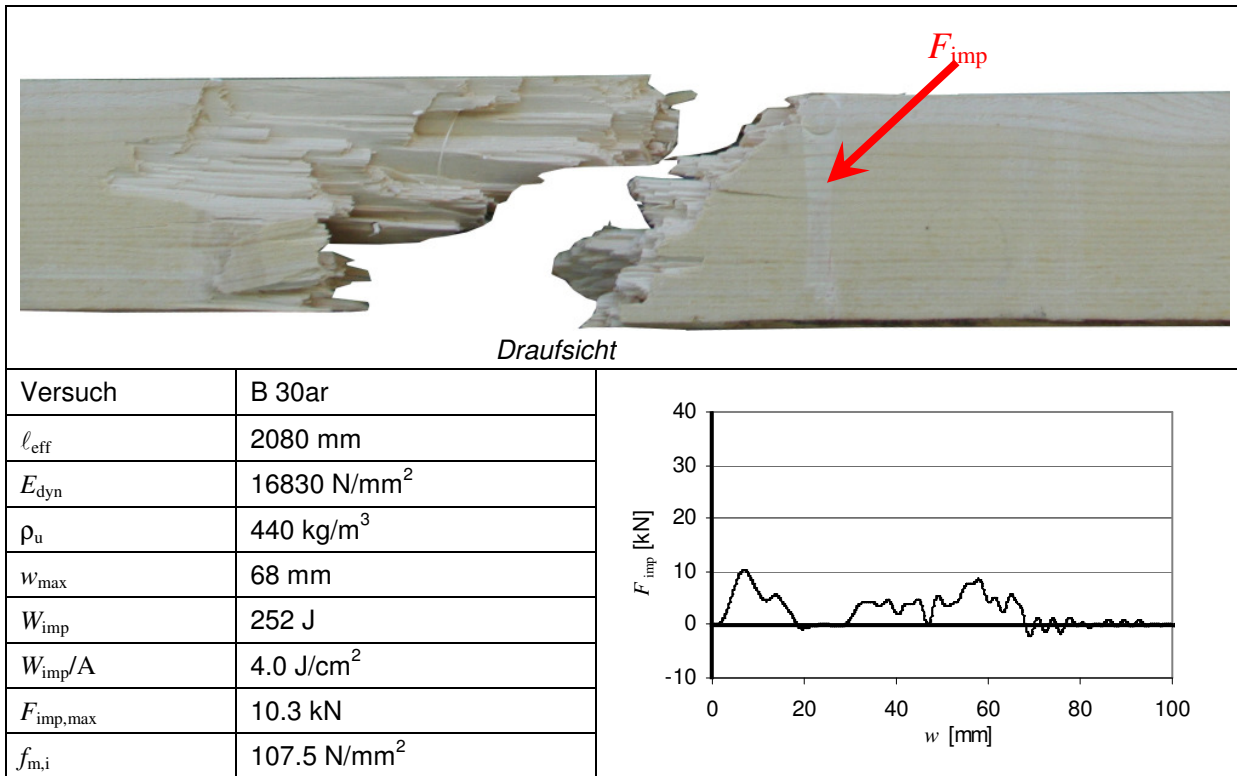


Abbildung 31: Brett mit langfaserigem Bruch und grosser Spannweite. Die Maximalkraft wird schon im ersten Impuls erreicht. Die erzielte Bruchschlagenergie und die Schlagbiegefestigkeit liegen deutlich unter dem Durchschnitt der Serie.

Die Kraft-Verformungsdiagramme in Abbildung 23 bis Abbildung 31 zeigen auf, wie unterschiedlich das Schlagbiegeverhalten von Holzproben sein kann. Insbesondere für die Proben mit grossen Schlankheiten, wie z.B. in Abbildung 29 bis Abbildung 31 zu sehen, kann erkannt werden, dass der Kraft-Weg-Verlauf sehr unregelmässig ist und die Maximalkraft z.T. bereits im ersten Belastungsimpuls erreicht wird. Eine eindeutige Zuordnung der Bruchbilder zu einem bestimmten Kraft-Verformungsverhalten war nicht möglich.

Bei einigen Proben sank die Kraft nach dem ersten Impuls auf Null oder teilweise auf negative Werte ab (Überschwingen des Beschleunigungssensors). In dieser Phase erreichte der Probekörper eine höhere Durchbiegungsgeschwindigkeit als die Geschwindigkeit des Fallgewichts. Zu diesem Zeitpunkt besteht kurzfristig kein Kontakt mehr zwischen Fallgewicht und Balken, wie z.B. Bocchio [14] auf Basis von Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera berichtet.

Auf praktisch allen Bildern sind auch die Eindrücke durch das Schlagstück des Fallhammers erkennbar. Bei der Erzeugung dieser Eindrücke wurde ebenfalls Verformungsarbeit geleistet. Diese konnte jedoch in ihrer Grösse nicht bestimmt werden und wurde demnach bei der Auswertung nicht gesondert berücksichtigt.

4.3.2 Bruchschlagarbeit

Wie bereits im Abschnitt 3.8 "Auswertung der Arbeitsintegrale" angeführt, wurde die Bruchschlagarbeit durch Integration der Kraft - Weg - Verlaufs ermittelt. Schwierig war hierbei insbesondere die Festlegung der oberen Integrationsgrenze. Die im Folgenden angegebenen Werte wurden mit der unter 3.8 beschriebenen Methode ermittelt und die Ergebnisse sind in Tabelle 11 und Abbildung 32 zusammengefasst. Generell fällt auf, dass die Mittelwerte höher liegen als in der Literatur (z.B. Sell [2]) für Fichte ($W_{imp}/A = 4.0 \text{ J/cm}^2$ bis 5.0 J/cm^2 , ermittelt an fehlerfreien Kleinproben) angegeben werden. Mit Ausnahme der Serien mit einer Spannweite von 148 cm unterscheiden sich die Mittelwerte der Serien nicht statistisch signifikant voneinander. Für die niedrigere Bruchschlagarbeit der Serien mit einer Spannweite von 148 cm, welche auch vergleichbar geringere Schlagbiegefestigkeiten erreichten, können mehrere Faktoren verantwortlich sein. Hier könnten ein geringerer dynamischer E-Modul (vergleiche Abbildung 5) oder gegebenenfalls der Einfluss von Ästen verantwortlich sein. Diese beiden Parameter werden weiter unten noch diskutiert. Ebenfalls auffällig ist, dass der Variationskoeffizient CoV für alle Serien relativ gross ist und beispielsweise denjenigen der Schlagbiegefestigkeit deutlich übersteigt (siehe folgende Abschnitte).

Tabelle 7: Übersicht der ermittelten auf den Querschnitt bezogenen Bruchschlagarbeiten W_{imp}/A [J/cm^2] aller Serien mit nomineller Holzfeuchte von 12%. Die effektiv vorhandene Holzfeuchte ist Tabelle 3 zu entnehmen.

	s-208-e	s-172-e	P-148-e	s-148-e	s-148-f	s-136-e,i	s-136-f,i	s-136-e,s	s-136-f,s	b-208	b-136
n	24	21	79	27	27	47	48	45	46	60	58
MW	10.4	10.5	7.7	6.0	5.9	9.2	8.8	8.2	7.7	9.1	8.8
StA	4.9	3.6	3.0	2.7	3.2	4.5	4.7	4.9	4.9	5.2	5.7
CoV	47	34	39	46	54	49	53	60	63	57	64
Q_{05}	3.3	5.5	2.9	2.7	2.2	3.5	2.2	1.7	2.2		

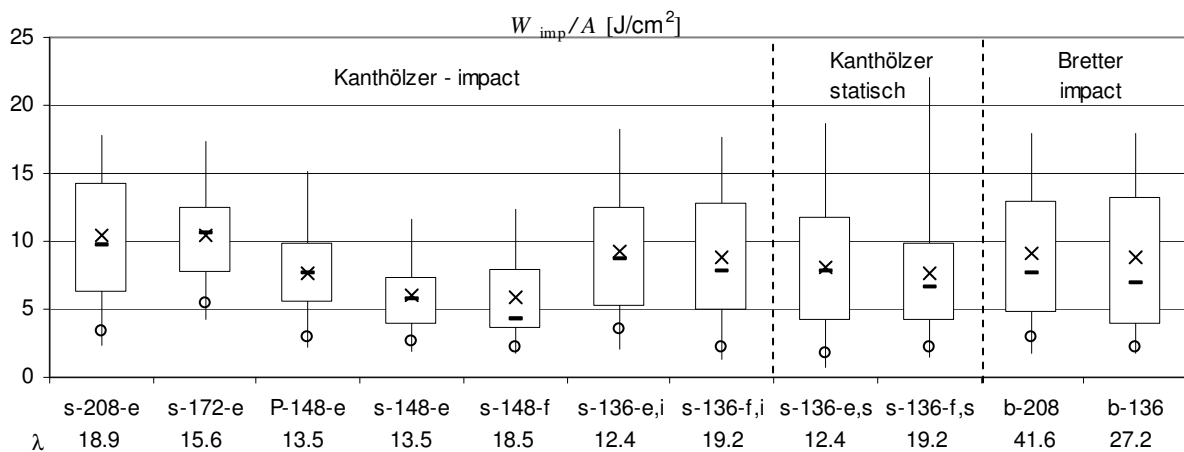


Abbildung 32: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 7.

4.3.3 Maximalkraft

Die registrierten Maximalkräfte aller Schlagbiegeserien mit einer nominellen Holzfeuchte von $u = 12\%$ schwankten zwischen minimal 7.0 kN. und maximal 42.8 kN. Die entsprechenden Lastfaktoren, also die Quotienten aus registrierter Maximalkraft und Gewichtskraft des Fallhammers, reichten von 9.2 bis 39.0. Die Maximalkräfte der einzelnen Serien unterschieden sich nicht derart, wie dies bei statischen Biegeversuchen zu erwarten wäre. Wie Tabelle 8 und Abbildung 33 entnommen werden kann, waren die Mittelwerte der Maximalkraft der Serien mit grösseren Spannweiten auf einem ähnlichen Niveau oder sogar teilweise höher, als diejenigen mit kürzeren Spannweiten. Weiter unten wird untersucht, wie sich das auf die Schlagbiegefestigkeit auswirkt bzw. inwiefern andere Parameter wie das Vorhandensein von Ästen oder der dynamische E-Modul hierfür verantwortlich sind.

Jansson [12] führte an der University of British Columbia (UBC) Schlagbiegeversuche mit Fichte (Sitka Spruce, *Picea sitchensis*) durch (siehe auch Leijten et al. [19]). Die Probekörper hatten einen Querschnitt von $38 \cdot 89 \text{ mm}^2$ bei einer Spannweite von 1095 mm ($\lambda = 12.3$), waren also kleiner als unsere Proben, und waren gemäss dem Vorhandensein von Ästen und Schrägfaserigkeit in zwei entsprechende Klassen eingeteilt. Die Schlaggeschwindigkeit wurde mittels drei verschiedener Fallhöhen (50 mm, 150 mm und 300 mm) des 345 kg schweren Fallgewicht variiert und führte zu nominalen Zeiten bis zum Bruch von 10 ms bis 30 ms, also bezüglich diesen Zeiten in der Grössenordnung unserer Versuche. Bei diesen Versuchen wurden Maximallasten von im Mittel 13.5 kN bis 16.5 kN für die bessere Klasse und 11.9 kN bis 13.8 kN für die schlechtere Klasse erreicht, wobei die höheren Kräfte tendenziell bei den kürzeren Zeiten bis zum Bruch erreicht wurden.

Tabelle 8: Übersicht der ermittelten Maximalkräfte F_{max} bzw. $F_{imp,max}$ [kN] aller Serien mit nomineller Holzfeuchte von 12%. Die effektiv vorhandene Holzfeuchte ist Tabelle 3 zu entnehmen.

	s-208-e	s-172-e	P-148-e	s-148-e	s-148-f	s-136-e,i	s-136-f,i	s-136-e,s	s-136-f,s	b-208	b-136
n	25	21	79	27	28	47	48	47	48	60	58
MW	27.4	29.1	22.4	23.3	22.8	27.8	23.4	22.2	17.3	11.5	15.6
StA	4.7	4.0	4.7	4.8	4.5	6.9	5.0	6.4	4.6	1.4	3.4
CoV	17	24	21	20	20	25	21	29	27	13	22

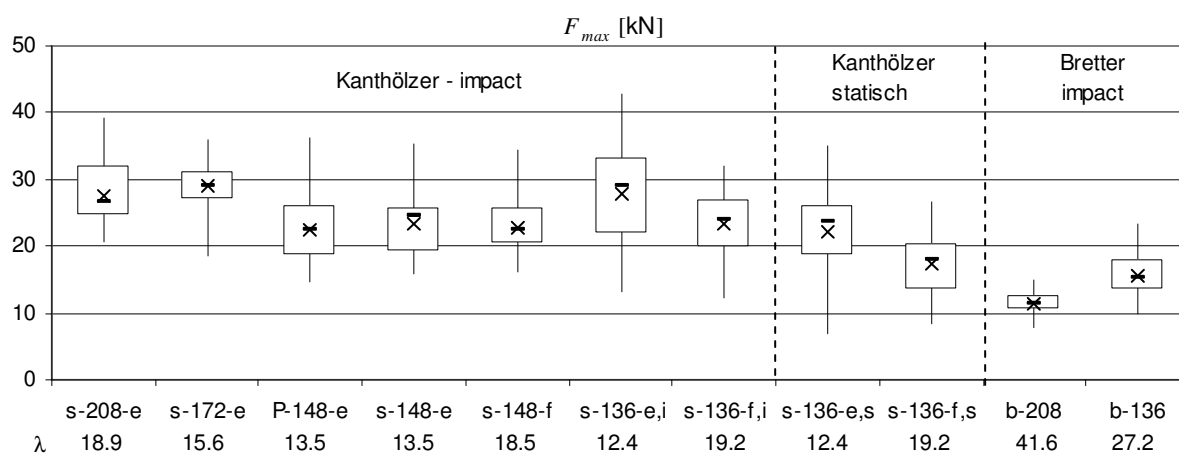


Abbildung 33: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 8

4.3.4 Schlagbiegefestigkeit

Die Schlagbiegefestigkeit wurde, wie unter 3.10 erläutert, auf der Basis normaler Balkentheorie ermittelt, und die Ergebnisse sind in der Tabelle 9 sowie der Abbildung 34 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Serien bestehen und die Mittelwerte der Serien stark streuen. Besonders auffällig ist die vergleichsweise sehr hohe Schlagbiegefestigkeit der Bretter mit den Spannweiten von 136 cm und 208 cm. Bei der Serie mit 208 cm Spannweite wurde die Maximalkraft in 80% der Versuche bereits im ersten Impuls erreicht, so wie dies beispielsweise in Abbildung 31 dargestellt ist. Es muss davon ausgegangen werden, dass Trägheitseffekte massgeblich zu diesen hohen Festigkeiten beitragen.

Die Serien mit Spannweiten 148 cm (impact) und 136 cm (impact und statisch) wurden sowohl hochkant als auch flachkant geprüft. Hier zeigt sich der Einfluss der Trägerhöhe und somit auch des Schlankheitsgrads und der Biegesteifigkeit auf die Schlagbiegefestigkeit in einer Weise, wie dies auch von statischen Versuchen her bekannt ist und durch die hier durchgeführten statischen Versuche bestätigt wird. In den flachkant geprüften Serien wurden durchweg signifikant höhere Festigkeiten als in den entsprechend hochkant geprüften Serien erzielt.

Die 5%-Quantilwerte der statisch geprüften Serien belegen, dass die Holzqualität in etwa der Festigkeitsklasse C24 entsprach. Eine definitive Zuordnung auf Basis der erzielten Festigkeiten ist jedoch nicht möglich, da die Ergebnisse aus 3-Punkt Biegeversuchen stammen. Die Serien mit 136 cm Spannweite erlauben einen direkten Vergleich der Schlagbiegefestigkeit mit der statischen Biegefestigkeit. Hier zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied dahingehend, dass die Schlagbiegefestigkeit höher ist als die statische Biegefestigkeit. Dies wird weiter im Abschnitt 4.3.7 näher ausgeführt.

Tabelle 9: Übersicht der ermittelten Biegefestigkeiten $f_{m,i}$ und $f_{m,3P}$ [MPa] aller Serien mit nomineller Holzfeuchte von 12%. Die effektiv vorhandene Holzfeuchte ist Tabelle 3 zu entnehmen.

	s-208-e	s-172-e	P-148-e	s-148-e	s-148-f	s-136-e,i	s-136-f,i	s-136-e,s	s-136-f,s	b-208	b-136
n	25	21	79	27	27	47	48	47	48	60	58
MW	87.0	75.8	64.3	53.1	71.1	66.1	86.2	52.7	63.6	122	108
StA	14.9	10.2	13.4	10.6	13.7	16.5	18.5	15.0	17.1	15.1	21.8
CoV	17	13	21	20	19	25	21	29	27	12	20
Q_{05}	66.5	63.0	43.7	38.9	52.4	41.8	55.8	25.4	39.2	100	75.5

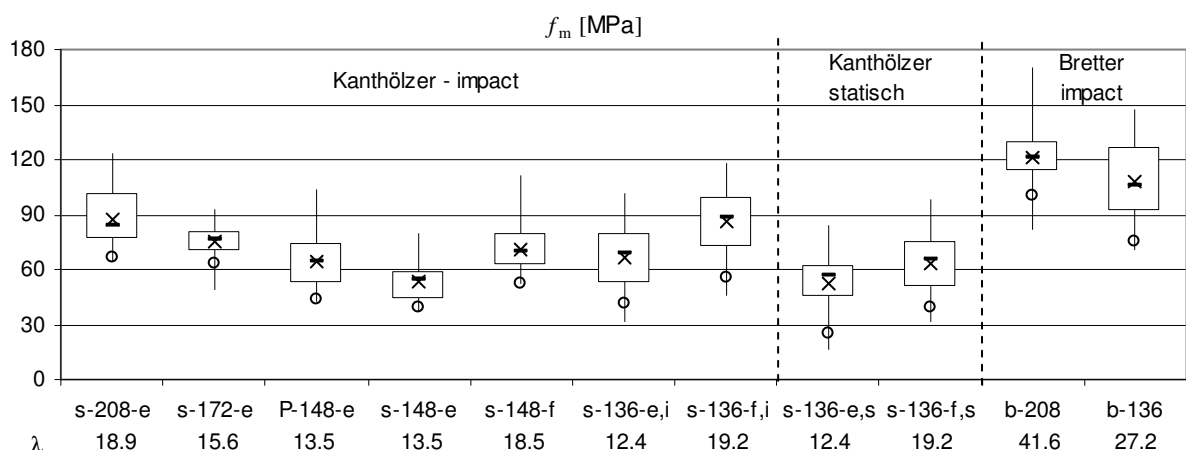


Abbildung 34: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 9

Es ist schwierig, die Ergebnisse mit Werten aus anderen Untersuchungen zu vergleichen. Leijten [15] ermittelte in seiner Studie mit Querschnitten von $130 \cdot 40 \text{ mm}^2$ bei einer Spannweite von 1400 mm

($\lambda = 35$) statische Biegefestigkeiten von im Mittel 72.2 MPa für Douglasie und 55.1 MPa für Lärche. Diesen standen Schlagbiegefestigkeiten von 63.5 MPa und 24.3 MPa gegenüber. Hierbei muss beachtet werden, dass die Schlagbiegefestigkeiten unter Berücksichtigung von Trägheitseffekten ermittelt wurden. Dies dürfte der Hauptgrund dafür sein, dass die Schlagbiegefestigkeiten geringer und im Fall von Lärche sogar deutlich geringer sind als die jeweilige statische Biegefestigkeit. Gründe für die insbesondere bei Lärche sehr geringen Schlagbiegefestigkeiten werden indes nicht genannt.

Werden die oben bei den Maximalkräften bereits diskutierten Ergebnisse von Jansson [12] in Festigkeiten überführt, so resultieren Schlagbiegefestigkeiten von im Mittel 64.9 MPa bis 90.0 MPa (Variationskoeffizienten $\text{CoV} = 16\% - 33\%$) wenn Trägheitseffekte nicht berücksichtigt werden. Verglichen über alle Serien liegen die Werte von Jansson generell in einem ähnlichen Bereich. Andererseits sind die von Jansson ermittelten Werte höher, wenn diese explizit mit jenen der Serie s-136-e,i, welche praktisch einen identischen Schlankheitsgrad aufweist, verglichen werden.

Die Abbildung 35 zeigt den Zusammenhang von Bruchschlagarbeit und Schlagbiegefestigkeit. Sowohl für die Bretter als auch für die Kanthölzer lässt sich eine Abhängigkeit nachweisen. Die Korrelationen innerhalb der einzelnen Serien waren mit Ausnahme der Serien s-148-e und s-148-f teilweise noch deutlich ausgeprägter, mit Determinationskoeffizienten bis zu $R^2 = 0.69$.

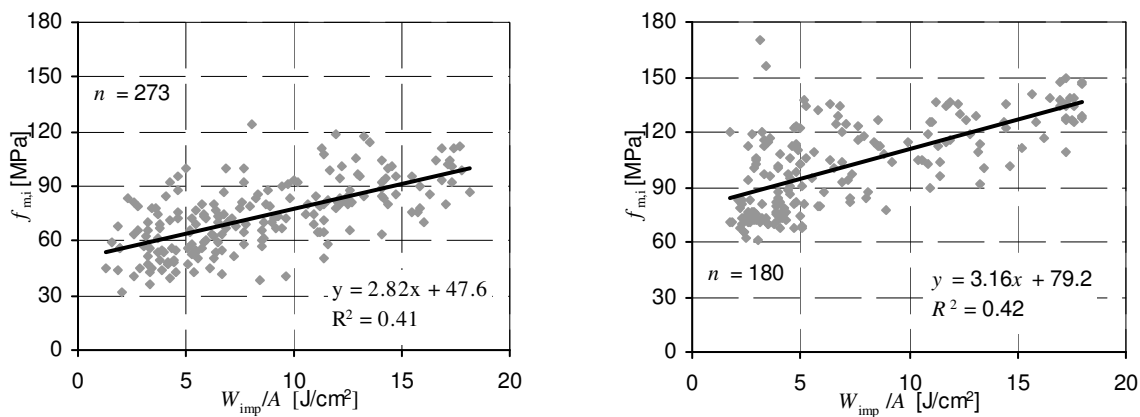


Abbildung 35: Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ gegenüber Bruchschlagarbeit W_{imp}/A für alle Kanthölzer (links) und alle Bretter (rechts).

4.3.5 Schlagbiegefestigkeit und Bruchschlagarbeit der Vorversuchsserien

Die Vorversuche wurden durchgeführt, um die Fallgewichtsanlage inklusive der Messvorrichtung einzurichten. Ein wichtiger Punkt war hierbei auch die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der ermittelten Werte. Dies geschah durch die Vergleichsmessung mit Drillingsproben, d.h. mit je drei Probekörpern die aus dem jeweils selben Kantholz gewonnen wurden (vergleiche hierzu auch Abbildung 3). Die Vorversuche wurden in 2 Teilerien ausgeführt, die sich vor allem durch die zur Verfügung gestellte Schlagenergie unterschieden (vergleiche Tabelle 5). Daher war auch dieser Einfluss auf das Schlagbiegeverhalten von Interesse. Verglichen wurden insbesondere die Schlagbiegefestigkeit und die Bruchschlagarbeit. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 sowie Abbildung 36 und Abbildung 37 zusammengefasst. Als Vergleich sind die Werte der Hauptversuche mit der identischen Spannweite 148 cm (s-148-e) ebenfalls aufgeführt.

Es zeigt sich, dass die Kanthölzer der Vorversuche sowohl eine signifikant höhere Schlagbiegefestigkeit als auch eine signifikant höhere Bruchschlagarbeit als die Kanthölzer der Hauptserie aufweisen. Innerhalb der Vorversuche sind bezüglich der Bruchschlagenergie keine signifikanten Unterschiede auszumachen, weder zwischen den beiden Teilerien S1 und S2 noch zwischen den einzelnen Balkenabschnitten A, B und C. Bei den Schlagbiegefestigkeiten ist allerdings ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Teilerien zu erkennen. Es ist nicht möglich, diesen Unterschied eindeutig einem bestimmten Parameter zuzuordnen, insbesondere auch deshalb, weil sich der dynamische E-Modul sowie die Dichte der beiden Teilerien nicht signifikant unterscheiden. Möglicherweise spielt jedoch die verfügbare Schlagenergie und besonders die Auftreffgeschwindigkeit zumindest eine gewisse Rolle. Jansson [12] zeigte auf, dass bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten die Schlagbiegefestigkeit tendenziell eher abnimmt, was auch bei den beiden Teilerien S1 und S2 zutreffend ist.

Tabelle 10: Übersicht der ermittelten Schlagbiegefestigkeiten $f_{m,i}$ [MPa] der beiden hochkant geprüften Kantholzserien mit einer Spannweite von 148 cm. Die Vorversuchsserie P-148-e ist hierbei aufgeteilt in zwei Unterserien S1 und S2 sowie in die drei Kantholzabschnitte A, B und C gemäss Abbildung 3.

	s-148-e	P-148-e	P-148-e,S1	P-148-e,S2	P-148-e,A	P-148-e,B	P-148-e,C
n	27	79	37	42	23	23	23
MW	53.1	64.3	68.7	60.39	64.3	64.1	66.3
StA	10.6	13.4	15.4	10.0	13.9	11.8	15.1
CoV	20	21	22	16	22	18	23
Q_{05}	38.9	43.7	46.3	43.7	44.4	49.2	47.2

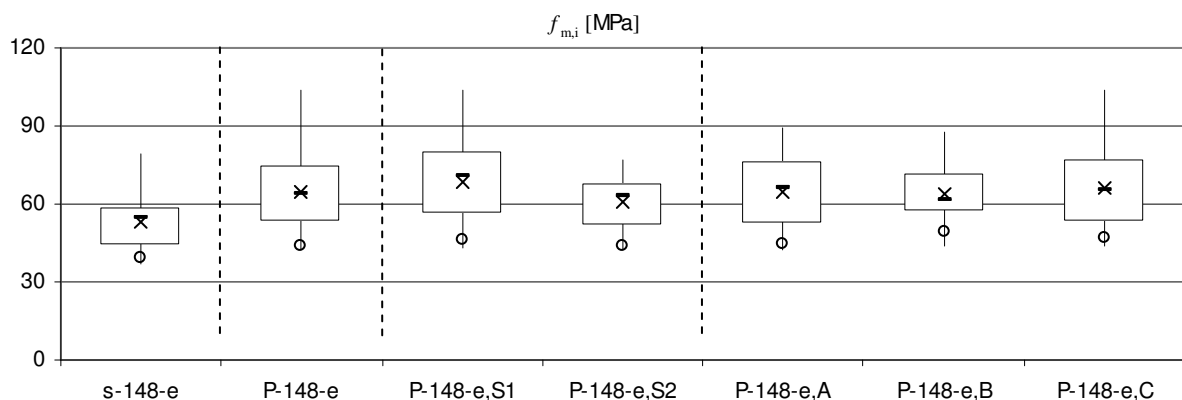


Abbildung 36: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 10.

Bei 23 der insgesamt 30 Kanthölzer der Vorversuchsserie wurden alle 3 Abschnitte (A, B und C gemäss Abbildung 3) geprüft. Aus Tabelle 10 und Tabelle 11 kann entnommen werden, dass zwischen den Mittelwerten der Serien keine signifikanten Unterschiede bestehen, weder bei der Schlagbiegefestigkeit noch bei der Bruchschlagarbeit. Dies vermittelt den Eindruck, dass die einzelnen Abschnitte eines Kantholzes jeweils ähnliche Bruchschlagwiderstände aufweisen. Werden allerdings die Bruchschlagwiderstände der drei Abschnitte jedes Kantholzes direkt miteinander verglichen, so zeigt sich, dass dies nicht der Fall ist, weder bei der Bruchschlagarbeit noch bei der Schlagbiegefestigkeit. Es kann diesbezüglich gefolgert werden, dass andere Parameter wie beispielsweise die Astigkeit einen grossen Einfluss auf den Bruchschlagwiderstand haben müssen. Dies wird weiter unten diskutiert.

Tabelle 11: Übersicht der auf den Querschnitt bezogenen Bruchschlagarbeiten W_{imp}/A [J/cm^2] der hochkant geprüften Kantholzserien (und Teilserien) mit einer Spannweite von 148 cm. Die Vorversuchsserie P-148-e ist hierbei aufgeteilt in zwei Unterserien S1 und S2 sowie in die drei Kantholzabschnitte A, B und C gemäss Abbildung 3.

	s-148-e	P-148-e	P-148-e,S1	P-148-e,S2	P-148-e,A	P-148-e,B	P-148-e,C
n	24	79	37	42	23	23	23
MW	10.4	7.7	7.7	7.6	7.9	7.7	8.1
StA	4.9	3.0	2.6	3.3	3.2	3.1	2.8
CoV	47	39	34	44	40	40	35
Q_{05}	3.3	2.9	3.3	2.9	2.9	3.1	4.4

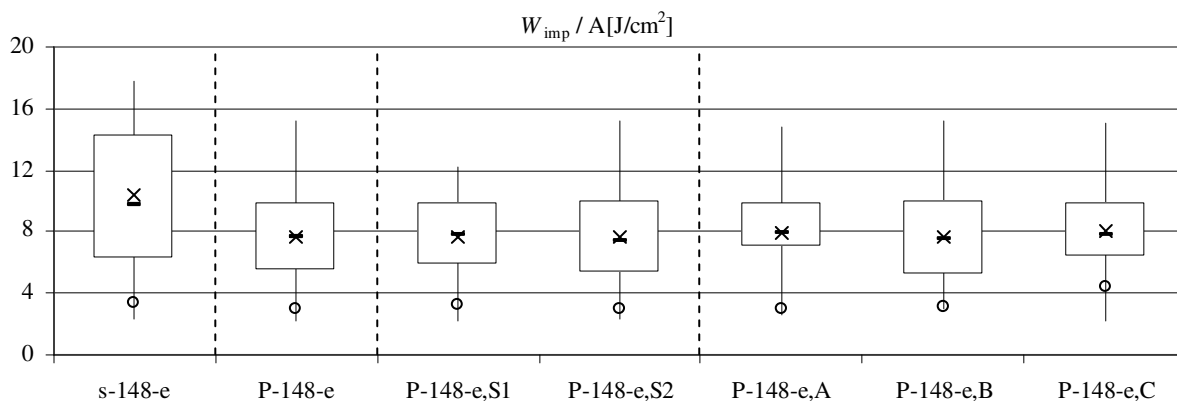


Abbildung 37: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 11

4.3.6 Einfluss von Ästen

Für die Untersuchung des Einflusses von Ästen auf die Schlagbiegefestigkeit wurden die Probekörper nach dem Bruch optisch daraufhin untersucht, ob im Bereich des Bruchs ein Ast oder mehrere Äste vorhanden waren oder nicht und demnach einer von zwei entsprechenden Gruppen zugeordnet. Äste mit Durchmessern kleiner 8 mm wurden hierbei nicht berücksichtigt. Beispiele für Probekörper ohne Äste im Bruchbereich sind in Abbildung 24, Abbildung 28, Abbildung 23 und Abbildung 29 gezeigt während Probekörper mit Ästen in Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 30 zu sehen sind.

Grundsätzlich sind die Festigkeiten der Unter-Serien ohne Äste im Bruchbereich höher als diejenigen mit Ästen, wie aus Abbildung 38 hervorgeht. Eine Ausnahme bildet hierbei die flachkant geprüfte Serie mit 148 cm Spannweite. Statistisch signifikante Unterschiede auf der 5-% Ebene sind jedoch nur in den beiden Serien mit Spannweiten von 148 cm (hochkant) und 136 cm (hoch- und flachkant) vorhanden.

Tabelle 12: Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ [MPa] für die hochkant geprüften Serien der Kanthölzer. Der Index "-k" bezeichnet den Teil der jeweiligen Serie mit im Bruchbereich vorhandenen Ästen.

	208-e	208-e-k	172-e	172-e-k	148-e	148-e-k	148-f	148-f-k	136-e	136-e-k	136-f	136-f-k
n	13	12	15	6	8	19	16	11	29	18	27	21
MW	90.6	83.1	77.6	71.2	60.0	50.2	70.8	71.6	70.9	58.4	92.5	78.2
StA	12.8	16.4	8.7	13.0	9.7	9.8	16.5	9.0	14.2	17.4	18.5	15.4
CoV	14	20	11	18	16	19	23	13	20	30	20	20
Q_{05}	69.3	65.3	64.6	53.3	48.6	38.2	52.1	56.8	46.3	38.7	60.0	54.1

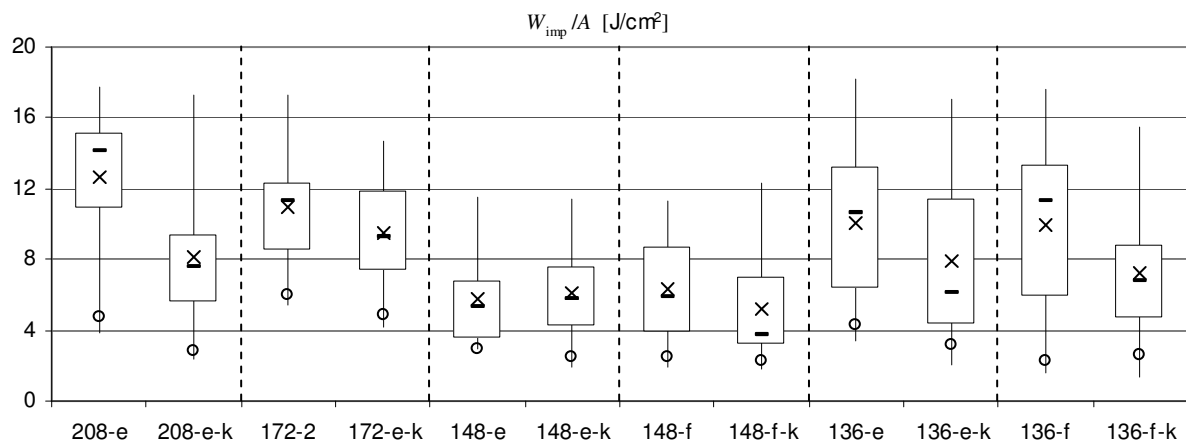


Abbildung 38: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 12

Der Einfluss der Äste auf die Schlagbiegefestigkeit ergab, über die genannten Serien hinweg betrachtet, eine Festigkeitsreduktion von im Mittel etwa 13% bis 27% und auf dem Niveau der 5% Quantile etwa 3% bis 23%. Jansson [12] hatte bei seinen Versuchen das Material ebenfalls in zwei Klassen hinsichtlich der Astigkeit und Schrägfaserigkeit eingeteilt. Bei seiner Untersuchung variierte die Reduktion der mittleren Schlagbiegebruchlasten von guter zu schlechter Klasse zwischen 13% und 30%, also in ähnlicher Weise wie in dieser Studie.

Bei der Bruchschlagenergie macht sich das Vorhandensein von Ästen im Bereich des Bruchs weniger bemerkbar als bei der Schlagbiegefestigkeit. Tendenziell ist zwar auch hier erkennbar, dass die Bruchschlagarbeit der Kanthölzer ohne Äste höher ist als diejenige der Kanthölzer mit Ästen, wobei

wiederum die flachkant geprüfte Serie mit 148 cm Spannweite eine Ausnahme bildet. Lediglich bei den Serien mit 208 cm Spannweite und 136 cm Spannweite (flachkant) ist in Abbildung 39 ein deutlicher Einfluss erkennbar, und die Verringerung der Bruchschlagarbeit ist hier statistisch signifikant, im Gegensatz zu allen anderen Serien. Ein Grund hierfür könnte sein, dass der Bruch bei solchen Probekörpern im Astbereich rasch eintritt, der vorhandene ungebrochene Restquerschnitt sich jedoch bis zum vollständigen Bruch noch zäh verhält und somit weiter in der Lage ist, Energie aufzunehmen, wie dies beispielsweise in der Abbildung 26 zu sehen ist.

Tabelle 13: Bruchschlagarbeit W_{imp} / A [J/cm²] für die hochkant geprüften Serien der Kanthölzer. Der Index "-k" bezeichnet den Teil der jeweiligen Serie mit im Bruchbereich vorhandenen Ästen.

	208-e	208-e-k	172-e	172-e-k	148-e	148-e-k	148-f	148-f-k	136-e	136-e-k	136-f	136-f-k
n	12	12	15	6	8	19	16	11	29	18	27	21
MW	12.7	8.1	10.9	9.5	5.8	6.1	6.3	5.2	10.1	7.9	10.0	7.3
StA	4.4	4.3	3.6	3.8	2.9	2.7	3.2	3.2	4.2	4.8	4.9	3.9
CoV	35	53	33	41	51	45	50	61	42	61	49	53
Q ₀₅	4.7	2.8	6.0	4.8	2.9	2.5	2.5	2.3	4.3	3.2	2.3	2.6

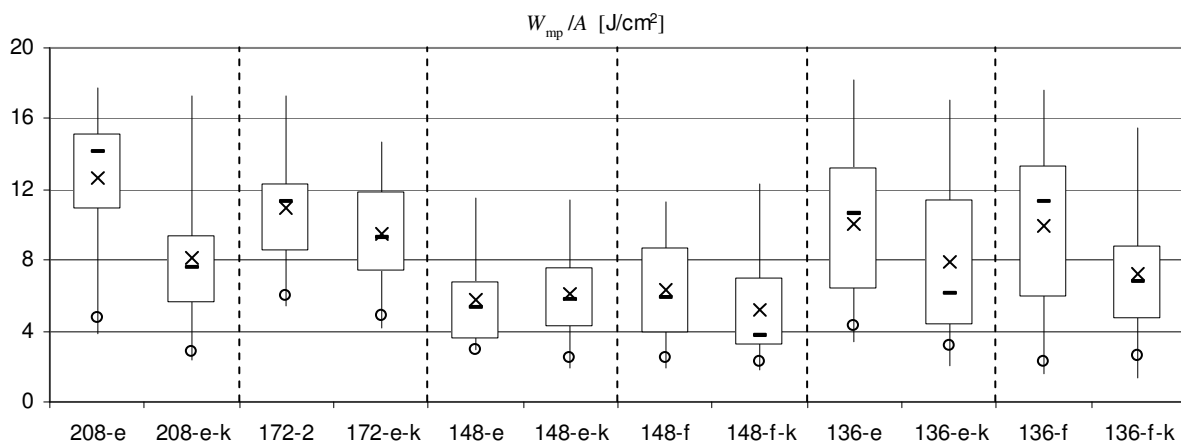


Abbildung 39: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 13.

4.3.7 Statischer Biegewiderstand und Schlagbiegewiderstand

Von besonderem Interesse ist die Grössenordnung des Schlagbiegewiderstands im Verhältnis zum statischen Biegewiderstand. In der Literatur finden sich für Proben in Bauteilgrösse lediglich die Angaben bezüglich der Schlagbiegefestigkeit, die Bruchschlagarbeit wird, wenn überhaupt, nur für fehlerfreie Kleinproben verglichen.

Das Verhalten von Kanthölzern unter einer Schlagbiegebelastung wurde mit dem Verhalten unter einer statischen Belastung verglichen. Hierzu dienten die Serien mit der Spannweite 136 cm. In Abbildung 40 sind typische Beispiele aufgeführt. Es lässt sich hierbei keine eindeutige Tendenz erkennen. Es sind sowohl ähnliche Verformungsverläufe und Bruchlasten erkennbar, wie in den beiden rechten Diagrammen der Abbildung 40 aber auch deutlich unterschiedliche wie in den beiden linken Diagrammen dieser Abbildung.

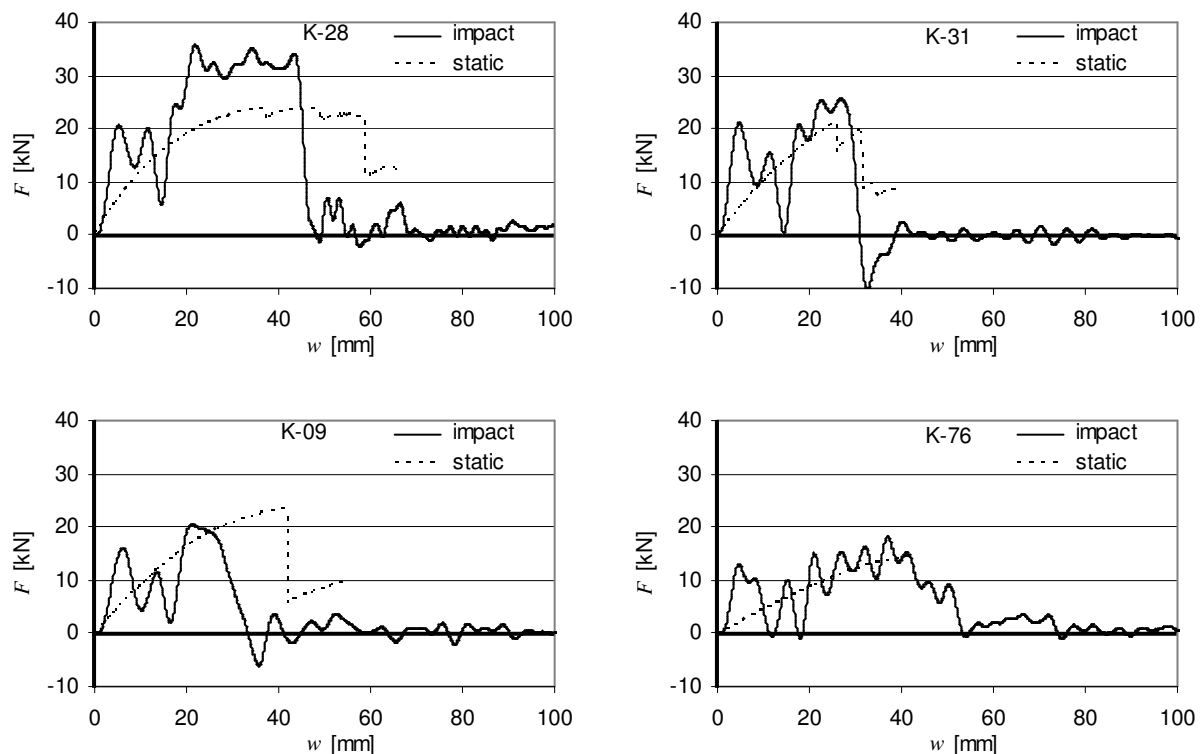


Abbildung 40: Kraft - Verformungsverlauf unter statischer- (static) und Schlagbiegebelastung (impact) für 4 verschiedene Kanthölzer.

Dieses Bild spiegelt sich auch dann wider, wenn die Biegefestigkeiten und Bruchenergien direkt miteinander verglichen werden, wie dies in Abbildung 41 für die Zwillingsproben mit einer Spannweite von 136 cm gezeigt ist. Das eindeutiger Bild lässt sich hier für die Biegefestigkeit bestimmen. Hier übersteigt die Schlagbiegefestigkeit die statische Biegefestigkeit in 80% aller Fälle und dies teilweise deutlich. Eine lineare Korrelation mit dem Ursprung im Nullpunkt ergibt eine Beziehung von:

$$f_{m,i} = 1.27 \cdot f_{m,3P} \quad \text{mit } R^2 = 0.24 \quad \text{Gl. 13}$$

und zeigt somit auf, dass die Schlagbiegefestigkeit im Mittel 27% über der statischen Biegefestigkeit liegt. Auf dem Niveau der 5% Quantile war der Unterschied grösser und betrug 65% bei den hochkant geprüften Kanthölzern und 42% bei den flachkant geprüften Kanthölzern.

Die Schlagbiegefestigkeit wurde ohne die Berücksichtigung von Trägheitseffekten ermittelt (vergleiche hierzu die Ausführungen in Abschnitt 2.3.2).

Zur Verifikation können diese Ergebnisse mit publizierten Ergebnissen verglichen werden. Sukontasukkul [16] fand für Parallam (PSL) unter Berücksichtigung von Trägheitseffekten eine um 30% höhere Schlagbiegefestigkeit verglichen mit der statischen Biegefestigkeit. Bei Leijten [19]

hingegen wurde ebenfalls unter der Berücksichtigung von Trägheitseffekten eine mittlere Schlagbiegefestigkeit von lediglich 88% der statischen Biegefestigkeit für Douglasie festgestellt.

Hinsichtlich der Bruchenergie ist die Korrelation zwischen statischer Bruchenergie und Bruchschlagenergie weniger deutlich als bei der Festigkeit (Abbildung 41, rechts) und die Bruchschlagenergie ist hier nicht signifikant höher als die statische Bruchenergie (vergleiche auch Boxplots der Serien in Abbildung 32).

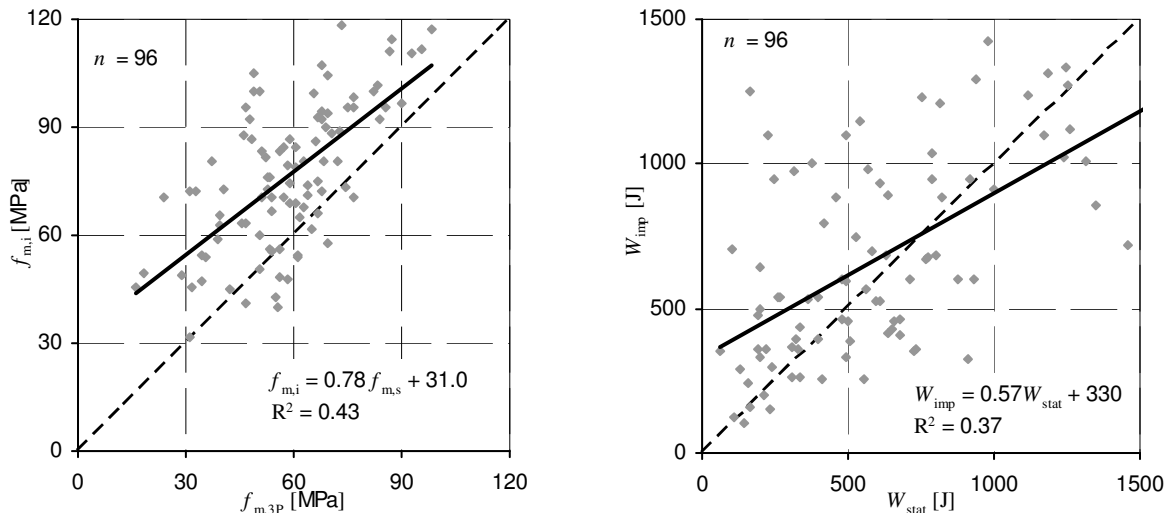


Abbildung 41: Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ gegenüber statischer Biegefestigkeit $f_{m,3P}$ (links) und Bruchschlagarbeit W_{imp} gegenüber statischer Arbeit W_{stat} (rechts) für Kanthölzer mit einer Spannweite von 136 cm (hochkant und flachkant).

4.3.8 Einfluss der Dichte

Die Dichte wird allgemein als ein Parameter angesehen, welche gut mit Festigkeitseigenschaften von Hölzern korreliert. Daher wurde untersucht, ob dies auf Basis unserer Daten bestätigt werden kann. In Abbildung 42 kann erkannt werden, dass auf Basis aller Versuche mit den Kanthölzern sowohl eine Abhängigkeit der Schlagbiegefestigkeit als auch eine Abhängigkeit der Bruchschlagarbeit von der Dichte zu erkennen ist. Das Bestimmtheitsmass ist mit $R^2 = 0.25$ bzw. $R^2 = 0.16$ über alle Versuche hinweg gesehen gering. Werden jedoch die einzelnen Serien getrennt betrachtet so variiert R^2 zwischen 0.24 und 0.55 und zeigt somit relativ deutlich den Zusammenhang zwischen Dichte und dem Schlagbiegewiderstand auf. Aus Abbildung 42 kann ebenfalls erkannt werden, dass die Steigung der Beziehung Dichte - Schlagbiegefestigkeit ähnlich ist wie derjenige, welche aus den entsprechenden Werten für $f_{m,k}$ und ρ_{mean} in der Norm EN 338 hervorgeht.

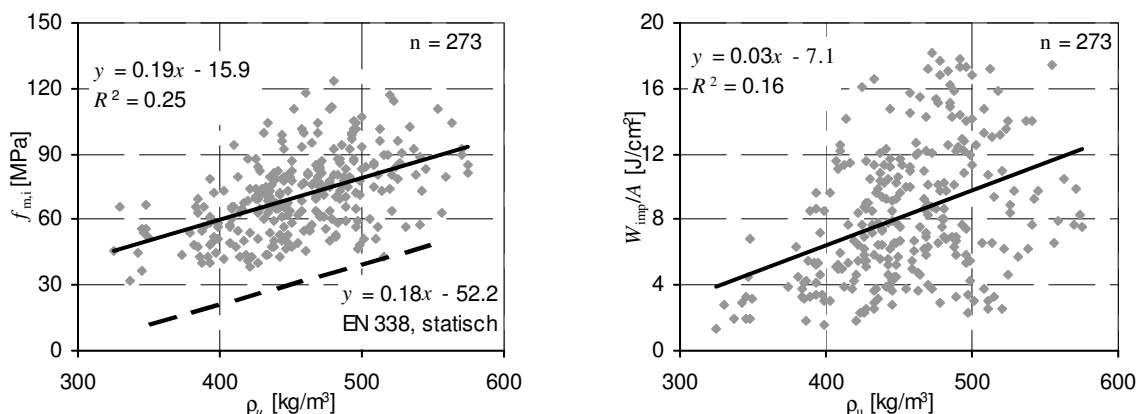


Abbildung 42: Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ und Bruchschlagarbeit W_{imp}/A der Kanthölzer in Abhängigkeit der Rohdichte ρ_u .

4.3.9 Einfluss des dynamischen E-Moduls

Neben der Dichte ist auch der (dynamische) E-Modul ein Indikator für statische Festigkeiten von Hölzern und daher konnte angenommen werden, dass dies auch für die Schlagbiegeeigenschaften gelten könnte. Anhand der in Abbildung 43 aufgezeigten Beziehungen kann diese Annahme bestätigt werden. Auch für die Einzelserien korrelierten Schlagbiegefestigkeit und Bruchschlagarbeit sehr gut mit dem dynamischen E-Modul, mit Bestimmtheitsmassen R^2 zwischen 0.10 und 0.69. Auffällig waren hier lediglich die beiden Serien mit s-148-e und s-148-f, bei welchen die entsprechenden Daten deutlich schlechter miteinander korrelierten, als für die übrigen Serien. Gründe hierfür konnten nicht eruiert werden.

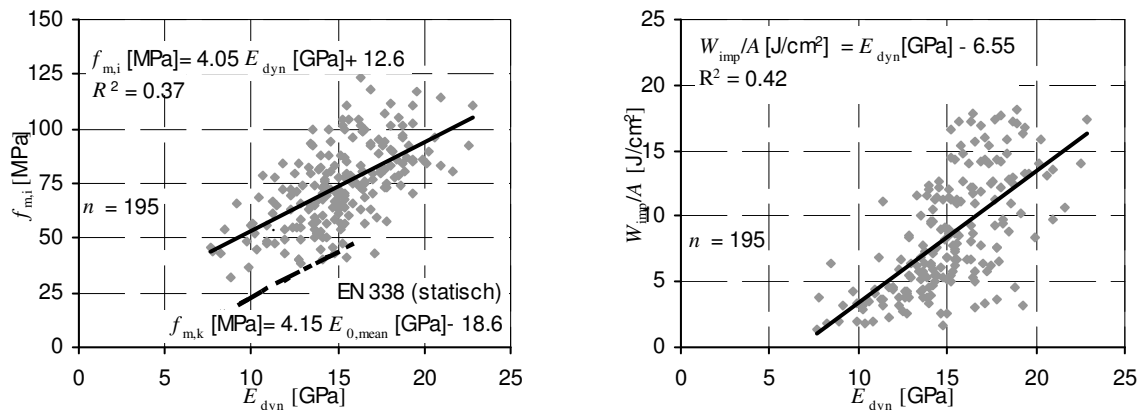


Abbildung 43: Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ und Bruchschlagarbeit W_{imp}/A in Abhängigkeit des dynamischen E-Moduls der Kanthölzer aus den Hauptversuchen.

4.3.10 Einfluss des Schlankheitsgrads

In der Literatur findet sich beispielsweise bei Kollmann [5] für fehlerfreie Kleinproben aus verschiedenen Holzarten und Holzwerkstoffen eine deutliche Abhängigkeit der Bruchschlagarbeit vom Schlankheitsgrad λ . Mit steigendem Schlankheitsgrad (ab $\lambda = 10$) nimmt die auf den Querschnitt bezogene Bruchschlagarbeit tendenziell zu. In der Abbildung 44 kann in der rechten Grafik erkannt werden, dass ein solcher Zusammenhang mit den von uns ermittelten Werten für die Bruchschlagarbeit nicht bestätigt werden kann. Allerdings zeigt die linke Grafik eine deutliche Abhängigkeit der Schlagbiegefestigkeit vom Schlankheitsgrad λ .

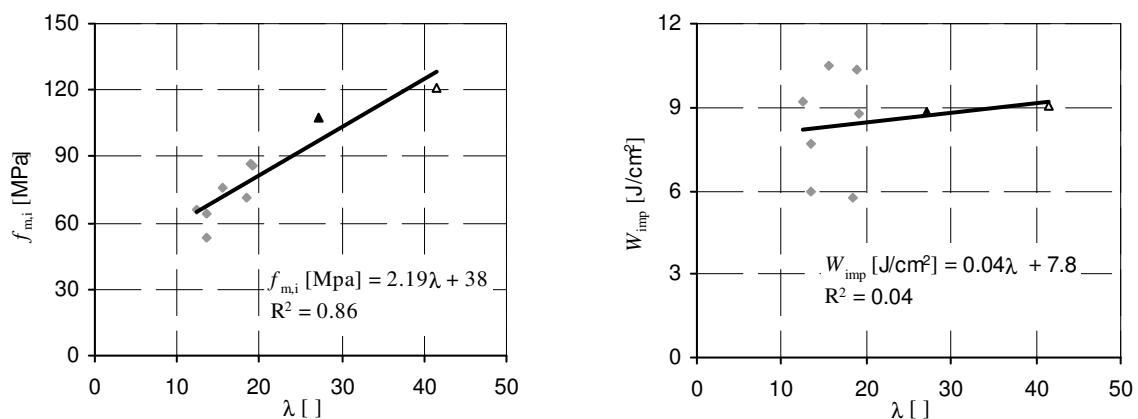


Abbildung 44: Mittlere Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ und mittlere Bruchschlagarbeit W_{imp}/A in Abhängigkeit des Schlankheitsgrads λ für alle Serien mit nomineller Holzfeuchte von 12%. Die grauen Punkte stehen für die Kanthölzer, die Dreiecke für die Bretter.

4.3.11 Einfluss der Biegesteifigkeit

Die Federsteifigkeit wurde aus den Daten der statischen 3-Punkt-Biegeversuche ermittelt. Die Biegesteifigkeit ist bei den hier vorliegenden Abmessungen der Kanthölzer mit nahezu ähnlichen Querschnitten in erster Linie abhängig von der Spannweite (und somit auch vom Schlankheitsgrad λ) sowie vom E-Modul des jeweiligen Probekörpers. Es ist somit nicht überraschend, dass der Einfluss der mittleren Biegesteifigkeit auf die mittlere Schlagbiegefestigkeit und die mittlere Bruchschlagarbeit ähnlich ist wie derjenige des Schlankheitsgrads λ . Dies bedeutet hier eine abnehmende Biegefestigkeit mit zunehmender Federsteifigkeit sowie kein erkennbarer Einfluss der Federsteifigkeit auf die Bruchschlagenergie.

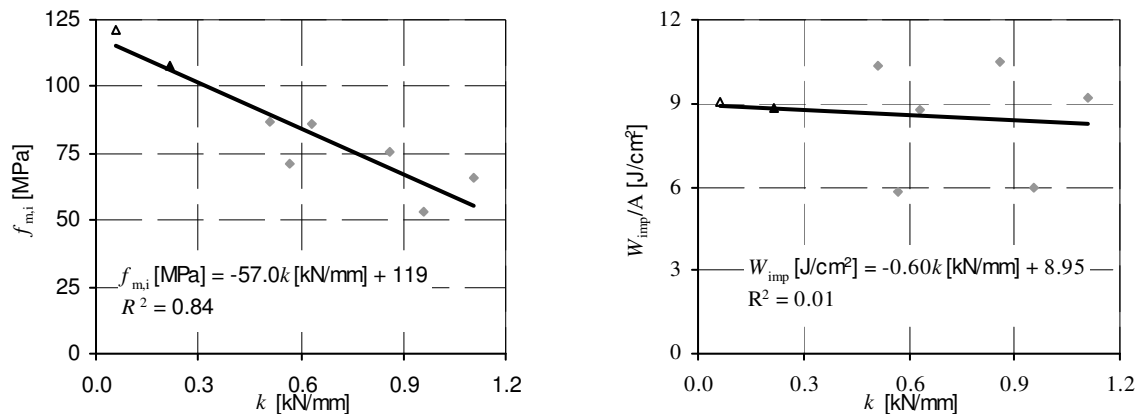


Abbildung 45: Mittlere Schlagbiegefestigkeit f_{mi} und mittlere Bruchschlagarbeit W_{imp}/A in Abhängigkeit der mittleren Federsteifigkeit k für alle Kantholzserien mit nomineller Holzfeuchte von 12%. Die grauen Punkte stehen für die Kanthölzer, die Dreiecke für die Bretter.

4.3.12 Einfluss der Holzfeuchte

Zum Einfluss der Holzfeuchte auf das Schlagbiegeverhalten finden sich in der Literatur Angaben auf Basis von Versuchen an fehlerfreien Kleinproben. Kollmann [5] fasste mehrere Untersuchungen zusammen und zeigte auf, dass beispielsweise die Bruchschlagarbeit für Fichte bei zunehmender Holzfeuchte zwischen 0% und 15% Holzfeuchte abnahm (um etwa 2.5% pro 1% Holzfeuchte), bei höheren Feuchten dann aber wieder zunahm. Basis hierfür waren Untersuchungen von Ghelmeziu [6]. Hinsichtlich des Einflusses der Feuchtigkeit auf die Schlagbiegefestigkeit gibt es praktisch keine Angaben in der Literatur. Als Indiz kann die Abhängigkeit der statischen Biegefestigkeit von der Holzfeuchte herangezogen werden. Aus der SIA 265 kann demzufolge die Festigkeit bei einer Zunahme der Holzfeuchte von 12% auf 20% um 20% oder mehr abnehmen (zutreffende Faktoren $\eta_w = 1.0$ für $u = 12\%$ bzw. $\eta_w = 0.8$ für $u = 12\%$ bis 20% und $\eta_w = 0.6$ für $u > 20\%$).

Der Einfluss der Holzfeuchte wurde mit den Gerüstbrettern untersucht. Hierbei zeigte sich auf Basis der Bretter mit einer Spannweite $\ell_{\text{eff}} = 136$ cm, dass sowohl die Bruchschlagarbeit als auch der Schlagbiegefestigkeit bei einer Erhöhung der Holzfeuchte u von im Mittel 10.6% auf 20.7% signifikant abnahmen, wobei der Unterschied bei der Bruchschlagarbeit besonders deutlich ausfiel (siehe Tabelle 14 und Abbildung 46). Die Festigkeitsreduktion betrug auf Basis der Daten der Bretter mit 136 cm Spannweite im Mittel 23% und die Abnahme der Bruchschlagarbeit war mit 46% praktisch doppelt so gross. Auf dem 5%-Quantilniveau sind die Unterschiede allerdings deutlich geringer (bei den Festigkeiten) bzw. praktisch nicht mehr vorhanden (bei den Bruchschlagenergien).

Tabelle 14 Schlagbiegefestigkeit $f_{m,i}$ und Bruchschlagarbeit W_{imp}/A für die Brettserien mit normaler und mit hoher Holzfeuchte

	$f_{m,i}$ [MPa]					W_{imp}/A [J/cm ²]			
	b-208	b-136	b-172-mc	b-136-mc		b-208	b-136	b-172-mc	b-136-mc
u [%]	10.5 ± 1.1	10.6 ± 1.2	20.5 ± 2.3	20.7 ± 1.9		10.5 ± 1.1	10.6 ± 1.2	20.5 ± 2.3	20.7 ± 1.9
n	60	58	30	30		60	58	30	30
MW	122	108	75.9	83.2		9.07	8.8	4.43	4.75
StA	15.1	21.8	9.3	12.9		5.16	5.7	2.02	2.06
CoV	12	20	12	15		57	60	46	43
Q ₀₅	100	75.5	63.7	67.9		2.94	2.17	2.45	2.34

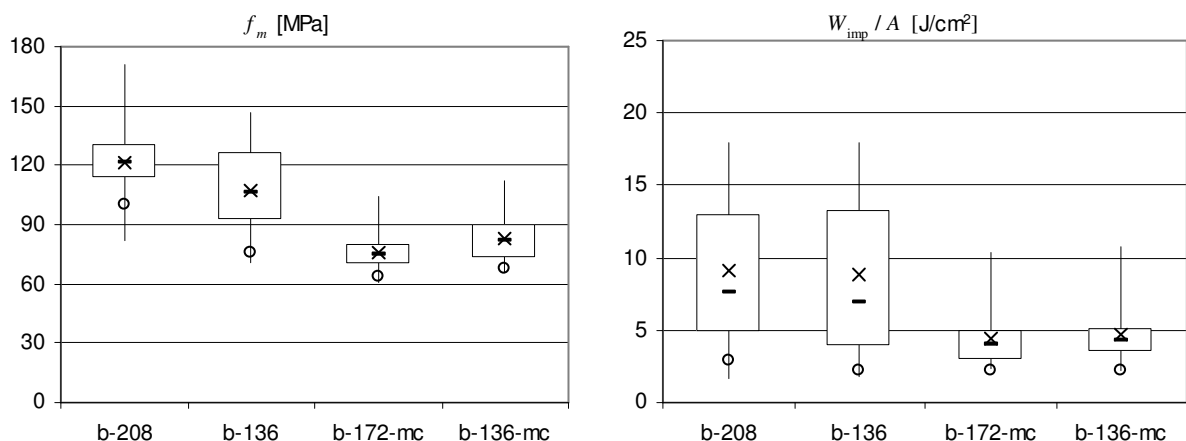


Abbildung 46: Boxplots zu den Daten aus Tabelle 14.

5. Hinweise für eine Bemessung

Der grösste Unterschied zwischen der Bemessung eines Bauteils auf eine statische Belastung und auf eine schlagartige Belastung besteht in der Ermittlung der Grösse der Einwirkungen. In einem Balken entsteht eine Biegespannung in identischer Grösse, unabhängig davon, ob beispielsweise der Gegenstand mit einer Masse von 100 kg in Balkenmitte aus einer Person, einem Wassersack oder einem Stahlklumpen besteht. Werden allerdings die drei beispielhaften Gegenstände aus 1 m Höhe auf die Mitte des Balkens fallen gelassen, so entstehen höchst unterschiedliche Auswirkungen im Balken. Dies gilt sowohl für die Festigkeit, also für Kräfte und resultierende Spannungen, als auch für Energiebetrachtungen, also die potentielle Schlagenergie und die aufnehmbare Verformungsarbeit.

Die in den Versuchen ermittelten Daten erlauben es, Hinweise bezüglich einer entsprechenden Bemessung zu geben. Generell muss überlegt werden, ob ein Nachweis auf Basis von einwirkenden Kräften und vorhandenen Festigkeiten und/oder ein Nachweis auf Basis der vorhandenen Schlagenergie und der aufnehmbaren Bruchschlagnarbeit erfolgen soll. Beide möglichen Verfahren bergen ihre Tücken.

Beim Festigkeitsnachweis ist insbesondere die korrekte Bestimmung der einwirkenden Kräfte schwierig, da diese massgeblich von den Steifigkeiten des Lastkörpers und des betroffenen Bauteils abhängig sind. Auf der Widerstandsseite ist die Bestimmung von maximal aufnehmbaren Kräften und resultierenden Spannungen im Versuch relativ einfach. Allerdings sind hierin Trägheitskräfte enthalten, welche je nach Art der Bemessung gesondert berücksichtigt werden müssen.

Bei einem Nachweis über die Schlagenergie und die aufnehmbare Bruchschlagnarbeit lässt sich die Lastseite, also die vorhandene kinetische Energie, relativ einfach über die Masse des Lastkörpers und dessen Geschwindigkeit beschreiben. Auf der sicheren Seite liegend, kann die vorhandene Energie als zu leistende Verformungsarbeit gesamthaft dem Bauteil zugewiesen werden. Hier liegt die Schwierigkeit nun aber auf der Widerstandsseite. Die aufnehmbare Bruchschlagnarbeit ist im Versuch schwierig zu bestimmen, da der Zeitpunkt des Bruchs vor allem bei zähem Verhalten des Probekörpers nicht eindeutig festgelegt werden kann. Zudem enthält die im Versuch ermittelte Bruchschlagnarbeit ebenfalls Anteile aus Trägheitseffekten, welche unter Umständen gesondert berücksichtigt werden müssen. Und für eine genauere Betrachtung muss die im Lastkörper enthaltene Energie analog zum Festigkeitsnachweis ebenfalls unter Berücksichtigung der Steifigkeiten auf den Lastkörper und das Bauteil aufgeteilt werden.

Wie bereits eingangs unter 2.2.2 aufgeführt, werden schlagartige Belastungen heute im Normalfall bei einer Bemessung derart erfasst, dass hierfür auf der Einwirkungsseite Ersatzlasten bzw. dynamische Vergrösserungsfaktoren angesetzt werden. Den hieraus resultierenden Auswirkungen (z.B. Biegespannungen) werden auf der Widerstandsseite Bemessungswerte von Spannungen entgegengestellt, welche Lastdauerfaktoren für eine erhöhte Festigkeit bei kurzzeitiger Belastung enthalten (nach Eurocode 5 bzw. SIA 265). Der Nachweis für den Anprall eines Fahrzeugs an die Stütze einer Brücke ist beispielsweise so zu führen, dass der aus einer Ersatzlast Q_{dx} von 1500 kN für den frontalen Anprall beim Bauwerkstyp Strasse ausserorts (SIA 261) resultierenden Biegespannung im betroffenen Bauteil eine im Vergleich zum statischen Belastungsversuch um 10% bzw. 40% erhöhte Biegefestigkeit $f_{m,d}$ (Faktoren k_{mod} bzw. η_t nach EC5 bzw. bzw. SIA 265, vergleiche Abbildung 1 auf Seite 7) entgegenzustellen. Die von uns erzielten Ergebnisse stehen dieser Vorgehensweise nicht entgegen, lagen doch die Schlagbiegefestigkeiten im Mittel um etwa 27% und auf dem 5% Quantilniveau sogar um bis zu 65% über der jeweiligen statischen Biegefestigkeit (vergleiche hierzu Tabelle 9, Abbildung 34 und Abschnitt 4.3.7). Den besonderen Bedingungen bei einer schlagartigen Belastung könnte dadurch Rechnung getragen werden, dass in den Normen eine zusätzliche Klasse der Lasteinwirkungsdauer unterhalb von "sehr kurz" inklusive eines zugehörigen Lastdauerfaktors eingeführt wird (vergleiche hierzu Tabelle 1 und zugehörige Diskussion im Abschnitt 2.2.2). Andererseits muss hierbei auch beachtet werden, dass in der vorliegenden Forschungsarbeit alle Werte mittels 3-Punkt Biegeversuchen ermittelt wurden und die in Normen aufgeführte statische Biegefestigkeit f_m auf Versuchen mit 4-Punkt Biegung beruht, und somit die Verhältnisse also nicht ohne Weiteres 1:1 übertragen werden können.

Für einige spezielle Bauteile bzw. Bauelemente existieren klar definierte Anforderungen dafür, wie der Widerstand gegen eine schlagartige Belastung über Versuche nachzuweisen ist. Dies ist insbesondere für Bauteile der Fall, bei denen die Wahrscheinlichkeit, dass eine solche Belastung innerhalb seiner Nutzungsdauer ein- oder mehrmals auftritt, relativ gross ist. Beispiele hierfür sind

tragende Fussbodenbeläge, Fassadengerüste, Rückhaltesysteme an Strassen und Lärmschutzeinrichtungen. In der nachfolgenden Tabelle 15 sind die wichtigsten Parameter für die Versuche an solchen Bauteile aufgeführt.

Tabelle 15: Übersicht der stossartigen Belastungen auf ausgewählte Bauteile bei genormten Versuchen.

Bauteil	Norm	Last	Masse [kg]	Fallhöhe [m]	Energie [J]
Tragende Fussbodenbeläge	SN EN 1195	Ledersack mit Stahlkugeln	30	n.d.	n.d.
Fassadengerüste, Spenglergang	SN EN 12810-2	Stahlkugel auf Dämpfungselement	100	2.50	2500
Rückhaltesysteme an Strassen	SN EN 1317-2	Handelsübliche Fahrzeuge mit definierten Geschwindigkeiten	n.d.	n.d.	verschieden
Lärmschutzeinrichtungen Nachweis der Steinwurfresistenz	SN EN 1794-1	Schlagbolzen	n.d.	n.d.	30
Lärmschutzeinrichtungen Nachweis gegen herabfallende Wandteile	SN EN 1794-2	Doppelkegel aus Stahl	400 oder 45	1.50 oder 1.10	6000 oder 500

n.d. = nicht definiert

Es zeigt sich, dass diese Einwirkungen im Gegensatz zu den weiter oben beschriebenen und durch die Norm SIA 261 abgedeckten Lastfällen aus der SIA 261 nicht als Ersatzlasten in kN sondern direkt oder indirekt als Schlagenergie in J angegeben werden. Im Folgenden wird anhand des Beispiels Spenglergang eines Fassadengerüsts erläutert, wie die Ergebnisse unserer Versuche im Bezug auf bestehende Normanforderungen zu werten sind.

Physikalisch betrachtet lässt sich eine Einwirkung, welche aus einem Gegenstand mit einer Masse und einer Geschwindigkeit besteht, am Besten mit der kinetischen Energie beschreiben. Beim Auftreffen der Masse auf ein Hindernis wird die vorhandene Energie in Verformungsarbeit umgewandelt. Vereinfacht ausgedrückt teilen sich das Bauteil und der bewegte Gegenstand die zu leistende Arbeit umgekehrt proportional zu ihren Steifigkeiten auf. Bei den von uns durchgeführten Versuchen kann das Fallgewicht als ideal steif angenommen werden. Daher ist es nicht in der Lage, einen massgeblichen Teil der in ihm enthaltenen Energie selbst über Arbeit abzubauen. Sämtliche Arbeit muss somit vom Probekörper geleistet werden, in erster Linie durch Biegeverformungen, aber zum Teil auch durch Eindrückungen im Holz.

Je nach Art der bewegten Masse kann die Aufteilung der Energie auf die Masse selbst und auf das Bauteil höchst unterschiedlich ausfallen. Stürzt oder springt beispielsweise eine Person auf ein Brett, so nimmt sie mit Sicherheit ein ordentliches Mass der Fallenergie im eigenen Körper auf und demnach muss das Brett nur einen Teil der vorhandenen Energie aufnehmen und durch Verformungsarbeit abbauen.

Gemäss Artikel 47 der Bauarbeitenverordnung [20] muss der Spenglergang eines Gerüsts für eine dynamische Beanspruchung bemessen werden. Diese kann beim Sturz einer Person vom Dach auftreten. Als Spenglergang muss im Normalfall grundsätzlich der oberste Gerüstgang angesehen werden. Für die Bemessung von Gerüstbrettern stand über Jahre hinweg die EKAS Richtlinie Nr. 6513 zur Verfügung. Diese wurde Ende 2007 zu Gunsten von mehreren Europäischen Normen (siehe Auflistung in [21]) zurückgezogen. Dementsprechend erfolgt heute die Bemessung von Gerüstbrettern, welche einer schlagartigen Belastung ausgesetzt werden könnten (Spenglergang), auf der Grundlage des Anhangs B der Norm SN EN 12810-2. Dort ist ein Prüfverfahren für Beläge von Spenglergängen angegeben. Die Prüfung ist vom Hersteller auszuführen. Dabei wird eine 100 kg schwere Stahlkugel mit einem Radius von 50 cm aus einer Höhe von 2.50 m auf den Belag fallen

gelassen. Die resultierende verfügbare potentielle Energie beträgt demnach 2500 J. Zum Vergleich: bei unseren Versuchen wurden bei den Brettern potentielle Energien von ca. 1100 J bereitgestellt. Zur Simulation der Steifigkeit des menschlichen Körpers wird auf den Belag an der Aufprallstelle ein Kissen mit definierten Eigenschaften aufgelegt, welches den Aufprall dämpft (siehe Abbildung 47). Die Versuche sind entsprechend der Grösse des Gerüstbelags an mindestens je zwei verschiedenen Stellen von mindestens drei Belagselementen des Belags auszuführen, wie dies in Abbildung 48 gezeigt ist. Die Anforderung ist, dass jeder Belag dem Aufprall des Gewichts standhält und anschliessend noch eine Mindesttragfähigkeit aufweist, welche der statischen Belastung durch die Kugel entspricht.

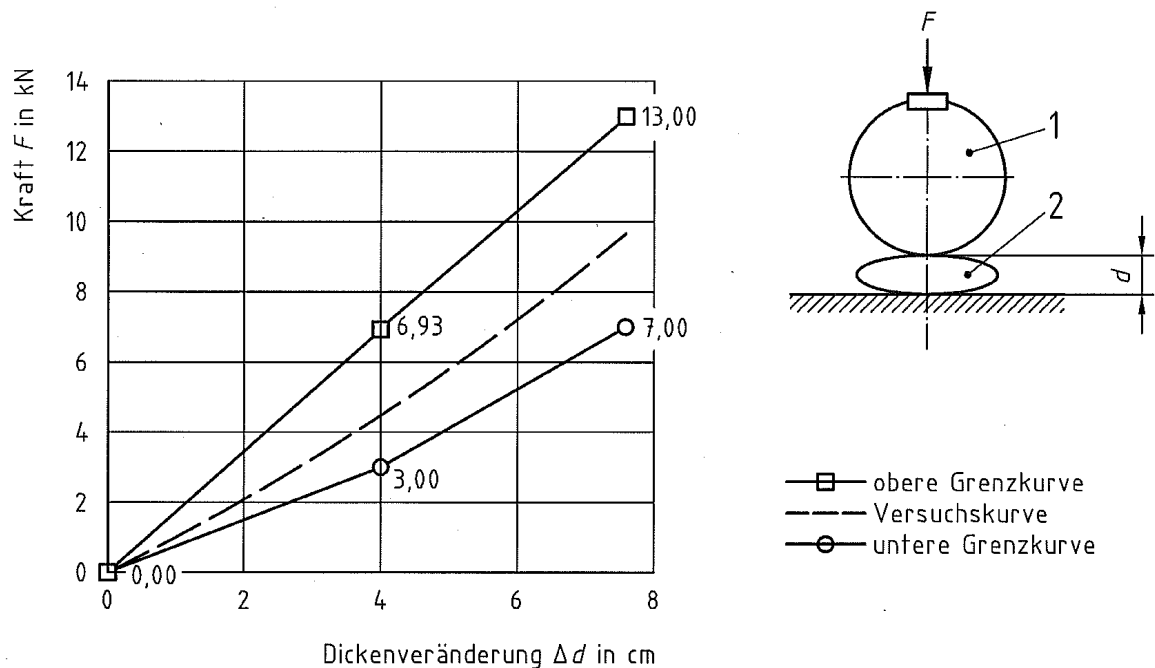


Abbildung 47: Steifigkeitskennlinie des Dämpfungskissens (2) unter der Kugel (1) gemäss dem in SN EN 12810-2 beschriebenen Belastungsversuch für Gerüstbeläge eines Spenglergangs.

Aus der in Abbildung 47 gezeigten möglichen Bandbreite der Kennlinie gehen statische Federsteifigkeiten des Dämpfungselements in einem Bereich von $k = 0.075 \dots 0.17 \text{ kN/mm}$ hervor. Um einen übersichtsmässigen Vergleich mit der Beanspruchung der Bauteile in unseren ungedämpften Versuchen herstellen zu können, müssen die Energien entsprechend den Steifigkeiten aufgeteilt werden. Die statischen Federsteifigkeiten betrugen im Mittel $k = 0.6 \text{ kN/mm} \dots 1.1 \text{ kN/mm}$ bei den Kanthölzern und $k = 0.06 \text{ kN/mm} \dots 0.20 \text{ kN/mm}$ bei den Brettern, jeweils in Abhängigkeit von der Spannweite und dem E-Modul des Probekörpers. Somit kann grob abgeschätzt werden, dass die Federsteifigkeiten des Dämpfungskissens und der von uns verwendeten Bretter in etwa gleich gross sind und somit beim oben beschriebenen Normversuch Brett und Kissen etwa die gleiche Energie aufnehmen würden. Dies bedeutet, dass die Bretter im Normversuch etwa die Hälfte, also $2500 \text{ J} / 2 = 1250 \text{ J}$ an Energie aufnehmen und in Verformungsarbeit umwandeln können müssten.

Wird diese Energie auf den Querschnitt unserer Probekörper von ca. $b \times h = 13 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 65 \text{ cm}^2$ bezogen, ergibt dies eine Bruchschlagarbeit von $W_{\text{imp}} / A = 1250 \text{ J} / 65 \text{ cm}^2 = 19.2 \text{ J/cm}^2$. Ein Vergleich mit den im Versuch erzielten Werten, beispielsweise jenen in Tabelle 14 und Abbildung 46 zeigt, dass die von uns getesteten Bretter nicht in der Lage wären, einer solchen Belastung zu widerstehen.

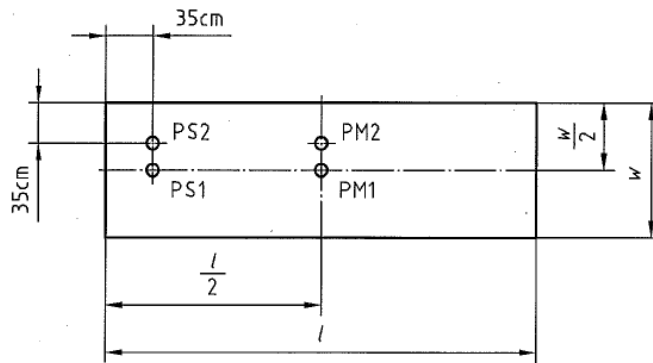


Abbildung 48: Vorgegebene Auftreffpunkte für die Kugel auf dem Gerüstfeld gemäss SN EN 12810-2. Für Breiten des Belags mit $w \leq 70$ cm sind die Punkte PS1 und PM1 massgebend.

Von besonderem Interesse ist nun noch eine Abschätzung bezüglich des Widerstands eines kompletten Gerüstbelags aus Gerüstbrettern gegen eine solche Versuchsbelastung. Ein solcher Belag besteht normalerweise aus zwei nebeneinander liegenden Brettern mit einem Querschnitt von je $b \times h = 330 \times 50 \text{ mm}^2$. Es wird eine typische Systembauweise mit einer Spannweite von $\ell_{\text{eff}} = 4.00 \text{ m}$ angenommen. Auf Basis des mittleren E-Moduls der getesteten feuchten Bretter von $E_{0,\text{stat},3P} \approx 8.50 \text{ GPa}$ wird die mittlere Federsteifigkeit k des gesamten Gerüstbelags ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Last in idealer Weise an der Position PM1 gemäss Abbildung 48 angreift und somit beide Gerüstbretter zu je 50% an der Lastabtragung beteiligt sind.

$$k = \frac{48 \cdot EI}{l^3} = \frac{48 \cdot 8.50 \text{ kN/mm}^2 \cdot 660 \text{ mm} \cdot 50^3 \text{ mm}^3}{4000^3 \text{ mm}^3 \cdot 12} = 0.044 \text{ kN/mm} \quad \text{Gl. 14}$$

Wird nun auf Basis eines angenommenen linearen Spannungs-Verformungsverhaltens abgeleitet, dass sich die aufzunehmende Energie umgekehrt proportional zu ihren Federsteifigkeiten auf das Kissen und die Gerüstbretter aufteilen, so ergibt sich für die Gerüstbretter:

$$W_{\text{imp}} = W_{\text{pot}} \cdot \frac{k_{\text{Kissen}}}{(k_{\text{Kissen}} + k_{\text{Bretter}})} = 2500 \text{ J} \cdot \frac{(0.075 \dots 0.17) \text{ kN/mm}}{((0.075 \dots 0.17) + 0.044) \text{ kN/mm}} = 1575 \text{ J} \dots 1985 \text{ J} \quad \text{Gl. 15}$$

Bezogen auf den Gesamtquerschnitt von 2 Gerüstbrettern von $b \times h = 66 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 330 \text{ cm}^2$ ergibt sich eine aufzunehmende Energie von:

$$W_{\text{imp}} / A = 1570 \text{ J} \dots 1985 \text{ J} / 330 \text{ cm}^2 = 4.75 \text{ J} \dots 6.0 \text{ J/cm}^2$$

Werden diese Werte mit denjenigen aus den Versuchen verglichen (Tabelle 14 und Abbildung 46), so zeigt sich, dass insbesondere von den feuchten Brettern, wenn überhaupt, nur ein kleiner Teil in der Lage wäre, diese Energie aufzunehmen.

Somit ist auch nachvollziehbar, warum in entsprechenden Unterlagen der Suva [21] betreffend Gerüstbeläge ausgeführt wird, dass aktuell (5/2008) keine Holzbeläge für Gerüstböden von Spenglergängen bekannt sind, welche die oben genannte Anforderung erfüllen.

6. Schlussfolgerungen und Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mittels Schlagbiegeversuchen an Kanthölzern und Brettern aus Schweizer Fichtenholz Daten über deren Schlagbiegeverhalten zu gewinnen und auf dieser Basis ein Bemessungskonzept für entsprechende Bauteile und Belastungen zu erarbeiten. Hierzu wurden an 168 Kleinproben, 373 Kantholzabschnitten und 180 Brettabschnitten Versuche durchgeführt. Aus den Versuchsergebnissen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Daten der zwei angewandten Messmethoden kinetische Energie und Kraft-Weg-Diagramm korrelierten gut und ermöglichten somit eine entsprechende Verifikation der Ergebnisse. Die Auswertung der Versuche, insbesondere für die Probekörper mit grösseren Spannweiten / Schlankheiten, gestaltete sich schwierig, da der dynamische Anteil der Gesamtverformung relativ gross war.
- Die Schlagbiegefestigkeit der Kanthölzer mit einer Spannweite von 136 cm lag im Mittel um etwa 27% über der statischen 3-Punkt Biegefestigkeit. Bei einem Vergleich mit publizierten Werten der Schlagbiegefestigkeit muss beachtet werden, dass die hier ermittelten Werte nicht um allfällige Trägheitseffekte bereinigt worden sind. Beim Vergleich mit publizierten oder normierten statischen Biegefestigkeiten muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass die Versuchsergebnisse als 3-Punkt Biegeversuche ausgeführt wurden. Die erzielten Ergebnisse sprechen nicht dagegen, dass bei einem Festigkeitsnachweis der Ansatz einer im Vergleich zur statischen Biegefestigkeit erhöhten Festigkeit für schlagartige Beanspruchungen erfolgt.
- Die Schlagbiegefestigkeit nimmt mit der Rohdichte, dem (dynamischen) E-Modul, der Holzfeuchte, dem Schlankheitsgrad sowie der statischen Biegefestigkeit zu und nimmt ab mit der Federsteifigkeit und dem Vorhandensein von Ästen im Bruchquerschnitt.
- Die mittlere auf den Querschnitt bezogene Bruchschlagenergie der Kanthölzer und Bretter erwies sich als grösser als die publizierten und in den orientierenden Versuchen erzielten mittleren Werte für fehlerfreie Kleinproben. Die mittlere Bruchschlagenergie nimmt zu mit der Rohdichte, dem (dynamischen) E-Modul, der Holzfeuchte, der statischen Brucharbeit und teilweise mit dem Vorhandensein von Ästen im Bruchquerschnitt.
- Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, für den Schlagbiegewiderstand einen Festigkeitsnachweis und/oder einen Nachweis auf Basis der einwirkenden Energie im Vergleich zur aufnehmbaren Bruchschlagarbeit zu führen. Beide Verfahren weisen Vor- und Nachteile auf.
- Für beide Bemessungsverfahren existieren normierte Beispiele in der Praxis, beispielsweise für Fahrzeuganprall an Stützen (Festigkeitsnachweis) und für Gerüstböden von Spenglergängen (indirekt ein Nachweis der aufnehmbaren Bruchschlagarbeit über Versuche).
- Für eine allgemeine Bemessung auf Schlagbiegung geben die durch die Versuche gefundenen Zusammenhänge wichtige Hinweise und Hilfen. Andererseits ist es nicht möglich, eine allgemein gültige Bemessungsregel aufzustellen, dies insbesondere deshalb, weil neben den Parametern auf der Widerstandsseite auch diejenigen auf der Lastseite berücksichtigt werden müssen. Hier ist vor allem das Verhältnis der Steifigkeiten von Last und Bauteil zu nennen.
- Die am Beispiel der Anforderung an Spenglergänge aufgezeigten Verhältnisse machen deutlich, dass die in der Vergangenheit häufig anzutreffende Ausführung aus einer Lage Gerüstbrettern in diesem Bereich nicht mehr möglich ist. Dies konnte über die Versuchsergebnisse sowie mit darauf aufbauenden Beispielerrechnungen bestätigt werden.

Fazit und Ausblick:

Mit der vorliegenden Arbeit auf Basis einer im gesamten deutschen Sprachraum erstmalig durchgeführten Untersuchung stehen wertvolle Daten bezüglich des Schlagbiegeverhaltens von Kanthölzern und Brettern aus Schweizer Fichtenholz zur Verfügung. Für Bauteile, welche ähnliche Eigenschaften und Abmessungen aufweisen, wie die in den Versuchen verwendeten Probekörper, lassen sich auf Basis der Versuchsergebnisse deren möglicher Schlagbiegewiderstand beispielsweise auf dem Mittelwert-, Minimum- oder 5%-Quantilniveau gut abschätzen. Die vorliegenden Daten werden daher auch eine wichtige Hilfe sein hinsichtlich der aktuellen und zukünftigen Erstellung von Expertisen auf diesem Gebiet, z.B. im Rahmen von Gerüstunfällen.

Eine allgemein gültige Bemessungsregel für Schlagbiegung kann allerdings nicht abgeleitet werden. Für ein solches Vorhaben wäre es erforderlich, über ein grosses Forschungsprogramm die notwendigen zusätzlichen Daten zu ermitteln und auch entsprechende Modellierungen auszuarbeiten. Dieses wurde vor dem Hintergrund der Präsentation der Versuchsergebnisse bei einem CIB-W18 Meeting im August 2009 auf internationaler Ebene intensiv diskutiert und als wünschenswert erachtet. Sofern sich auf Europäischer Ebene eine ausreichende Anzahl an Partnern findet, kann ein entsprechendes Projekt lanciert werden.

Auch im Bereich der Grundlagen zur Schlagbiegung deckten die gemachten Untersuchungen mehrere Bereiche auf, in denen noch ein grosses Forschungspotential besteht. Interessante Fragestellungen beziehen sich beispielsweise darauf, warum die Bruchschlagenergie von grossen Proben diejenige von fehlerfreien Kleinproben deutlich übersteigt und welchen Einfluss Parameter wie verfügbare Schlagenergie oder Trägheitseffekte effektiv auf das Schlagbiegeverhalten haben.

Die Empa Abteilung Holz wird auf der Basis des gewonnenen Know-hows und mit der zur Verfügung stehenden Infrastruktur das Thema Schlagbiegung weiter verfolgen und versuchen, als Initiant und/oder Partner an zukünftigen entsprechend ausgerichteten Projekten mitzuarbeiten.

7. Danksagung

Das Projektteam dankt der Fa. Schilliger Holz AG, Küssnacht am Rigi, vielmals für die grosszügige Bereitstellung von Versuchsmaterial!

8. Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Einheit	Bedeutung / Erklärung
a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Querschnittsfläche
a_h	m/s^2	Beschleunigung des Fallhammers
b	m	Breite
b-		Brett (board)
BE		Buche (beech)
C		Gebrauchsgrenze
CoV	%	Variationskoeffizient
-e		hochkant (edgewise)
E		Einwirkung
EC		Eurocode
E_{dyn}	Pa	Dynamischer E-Modul
E_{kin}	J	Kinetische Energie
E_{pot}	J	Lageenergie, potentielle Energie
$E_{0,stat,3P}$	Pa	Statischer E-Modul, bestimmt im 3-Punkt Biegeversuch
F	N	Kraft, Last
F_b	N	wahre Biegekraft
F_{imp}	N	Schlagkraft
F_t	N	Trägheitskraft
-f		flachkant (flatwise)
f_m	Pa	Biegefestigkeit
$f_{m,3P}$	Pa	Biegefestigkeit ermittelt im statischen 3-Punkt Biegeversuch
$f_{m,i}$	Pa	Schlagbiegefestigkeit
f_{mki}	Pa	charakteristische Biegefestigkeit
g	m/s^2	Erdbeschleunigung, 9.81 m/s^2
h	m	Höhe, Querschnittshöhe, Dicke
h_{nom}	m	nominale Querschnittshöhe, nominelle Dicke
h_0	m	Fallhöhe des Pendelschlaghammers bzw. des Fallgewichts
h_1	m	Maximale Höhe der Auslenkung des Pendelschlaghammers nach dem Durchschlagen der Probe
i		Schlagbiege-, impact
,i		stossartige Belastung (impact loading)
imp		Schlagbiege-, impact
k	N/mm	Federkonstante
-k		Äste an Bruchstelle vorhanden
k_{mod}		Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt gem. EC 5
ℓ	m	Länge
ℓ_{eff}	m	Spannweite
m	kg	Masse
M	Nm	Biegemoment

Zeichen	Einheit	Bedeutung / Erklärung
M_{imp}	Nm	Biegemoment infolge Schlagbelastung
m_b	kg	Masse des Schlagbiegeprobekörpers zwischen den Auflagern
m_h	kg	Masse des Fallgewichts
-mc		hohe Holzfeuchte ([high] moisture content)
mean		Mittelwert
MW		Mittelwert
n	-	Anzahl Probekörper
P-		Vorversuch (preliminary test)
Q_{05}		5%-Quantilwert
Q_{25}		25%-Quantilwert
Q_{75}		75%-Quantilwert
Q_{dx}	N	Horizontale Bemessungslast
R		Widerstand
R^2		Bestimmtheitsmass
s-		Kantholz (square-cut timber)
,s		statische Belastung (static loading)
SP		Fichte (spruce)
StA		Standardabweichung
t	s	Zeit
TM		thermisch modifiziert
u	%	Holzfeuchte
v	m/s	Geschwindigkeit
V	N	Querkraft
v_0	m/s	Gemessene Auftreffgeschwindigkeit des Fallgewichts/Pendelschlaghammers
$v_{0,theo}$	m/s	Theoretische Auftreffgeschwindigkeit des Fallgewichts/Pendelschlaghammers
v_1	m/s	Gemessene Geschwindigkeit des Fallgewichts/Pendelschlaghammers nach dem Durchschlagen des Probekörpers
$v_{1,theo}$	m/s	Theoretische Geschwindigkeit des Fallgewichts/Pendelschlaghammers nach dem Durchschlagen des Probekörpers
$v_{1,theo,adj}$	m/s	Theoretische Geschwindigkeit des Fallgewichts/Pendelschlaghammers nach dem Durchschlagen des Probekörpers, korrigiert um die Differenz von theoretischer zu gemessener Auftreffgeschwindigkeit
V_{imp}	N	Querkraft infolge Schlagbelastung
w	m	Weg in Richtung z-Achse (=vertikale Achse), Weg des Fallgewichts
W	J	Arbeit
W_{imp}	J	Bruchschlagarbeit
$W_{imp,i}$	J	Bruchschlagarbeit, bestimmt aus Integration des Kraft-Verformungsverlaufs des Fallhammers
$W_{imp,k}$	J	Bruchschlagarbeit, bestimmt aus der kinetischen Energie des Fallhammers
W_{pot}	J	Potentielle Energie = Lageenergie
W_{tot}	J	Bruchschlagarbeit, total
W_{mp}	J	Bruchschlagarbeit, angezeigt durch Schleppzeiger (maximum pointer)
W_{stat}	J	Statische Arbeit

Zeichen	Einheit	Bedeutung / Erklärung
α_0	°	Ausgangswinkel beim Pendelschlagversuch
α_1	°	Winkel nach einmaligem Durchschwingen des Hammers ohne Probekörper beim Pendelschlagversuch
α_2	°	Winkel zum Wendepunkt des Hammers nach Durchschlagen des Probekörpers beim Pendelschlagversuch
η_{mod}		Beiwert zur Erfassung des Einflusses der Dauer der Einwirkung und des Feuchtegehalts nach SIA 265/1
η_t		Beiwert zur Berücksichtigung der Zeitdauer der Einwirkung nach Norm SIA 265
η_w		Beiwert zur Erfassung des Einflusses der Holzfeuchte nach Norm SIA 265
ρ_u	kg/m ³	Rohdichte bei Holzfeuchte u

9. Literatur und Normen

9.1 Literatur

1. Schüler, T., K.-D. Röbenack, and R. Steinmetzger, *Untersuchung von Absturzunfällen bei Hochbauarbeiten und Empfehlungen von Massnahmen zu deren Vermeidung*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, ed. B.f.A.u. Arbeitsmedizin. Vol. Fb 922. 2001, Dortmund/Berlin: Wirtschaftsverlag NW. 120.
2. Sell, J., *Eigenschaften und Kenngrössen von Holzarten*. 1997, Zürich: LIGNUM, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz.
3. *Wood Handbook*. 1999: Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-113.
4. SIA, *Dokumentation D 0185: Einführung in die Norm SIA 265*. 2003, Zürich, Schweiz: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. 171.
5. Kollmann, F., *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2 ed. Vol. 1. 1951, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer.
6. Ghelmeziu, N., *Untersuchungen über die Schlagfestigkeit von Bauhölzern*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1938. **1**(15): p. 585-601.
7. Monnin, M., *L'essay des bois*, in *Congrès de Zurich 1931: Essay des bois*. 1932, Editions A.I.E.M: Zürich. p. 85-115.
8. Krech, H., *Grösse und zeitlicher Ablauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1960. **18**(3): p. 95-105.
9. Partl, M. and H. Strässler, *Temperatureinfluss auf das Biege- und Schlagbiegeverhalten von Fichtenholz*. Holzforschung und Holzverwertung, 1977. **29**(5): p. 94-101.
10. Liska, J.A., *Effect of rapid loading on the compressive and flexural strength of wood*. 1950, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
11. Madsen, B., *The Effect of Impact Loading*, in *Structural Behaviour of Timber*. 1992, Timber Engineering Ltd.: North Vancouver.
12. Jansson, B. *Impact Loading of Timber Beams*. in *1st RILEM Symposium on Timber Engineering*. 1999. Stockholm, Sweden: RILEM Publications s.a.r.l.
13. Leijten, A.J.M. *Literature review of impact strength of timber and joints*. in *World Timber Engineering WCTE*. 2000. Whistler, Canada.
14. Bocchio, N., P. Ronca, and J.-W. van de Kuilen. *Impact Loading Tests on Timber beams*. in *Innovative Wooden Structures and Bridges*. 2001. Lahti, Finland.
15. Leijten, A.J.M., *Heat treated wood and the influence on the impact bending strength*. HERON, 2004. **49**(4): p. 349-359.
16. Sukontasukkul, P., F. Lam, and S. Mindess, *Fracture of parallel strand lumber (PSL) under impact loading*. Materials and Structures, 2000. **33**(231): p. 445-449.
17. Goerlacher, R., *Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz*. Holz Als Roh-Und Werkstoff, 1984. **42**(6): p. 219-222.
18. Banthia, N., et al., *Impact testing of concrete using a drop-weight impact machine*. Experimental Mechanics, 1989. **29**(1): p. 63-69.
19. Leijten, A.J.M. and B. Jansson. *Load duration factors for instantaneous loads*. in *CIB - W18 Meeting Thirty-Six*. 2003. Colorado.
20. *Verordnung über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer bei Bauarbeiten (Bauarbeitenverordnung, BauAV)*, S. Eidgenossenschaft, Editor. 2005 (Stand 1. Januar 2009).
21. von Mühlönen, B., *Anforderungen an Sicherheitsbauteile*, Suva, Editor. 2008.

9.2 Normen

DIN 51222: 1995, *Prüfung metallischer Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch - Besondere Anforderungen an Pendelschlagwerke mit einem Nennarbeitsvermögen ≤ 50 J und deren Prüfung*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN 52189: 1981, *Prüfung von Holz; Schlagbiegeversuch; Bestimmung der Bruchschlagarbeit*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

EN ISO 148-2: 2008, *Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 2: Prüfung der Prüfmaschinen (Pendelschlagwerke) (ISO 148-2:2008)*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SIA 260: 2003, *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken*, SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

SIA 261: 2003, *Einwirkungen auf Tragwerke*, SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

SIA 265: 2003, *Holzbau*, SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

SIA 265/1: 2009, *Holzbau - Ergänzende Festlegungen*, SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

SN EN 338: 2003, *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 408: 2003, *Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1198: 1997, *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Tragverhalten tragender Fussbodenbeläge*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1317-2: 2001, *Rückhaltesysteme an Strassen - Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1794-1: 2003, *Lärmschutzeinrichtungen an Strassen - Nichtakustische Eigenschaften - Teil 1: Mechanische Eigenschaften und Anforderungen an die Standsicherheit*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1794-2: 2003, *Lärmschutzeinrichtungen an Strassen - Nichtakustische Eigenschaften - Teil 2: Allgemeine Sicherheits- und Umweltsicherungsanforderungen*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1990: 2002, *Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1991-1-7: 2006, *Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 1995-1-1: 2004, *Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauwerken - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, CEN Europäisches Komitee für Normung.

SN EN 12810-2: 2003, *Fassadengerüste aus vorgefertigten Bauteilen - Teil 2: Besondere Bemessungsverfahren und Nachweise*, CEN Europäisches Komitee für Normung.