



FH-DIPLOMSTUDIENGANG "HOLZTECHNIK UND HOLZWIRTSCHAFT"
Studiengangskennzahl 0019

Systemeffekte von aus Konstruktionsvollholz aufgebauten Querschnitten

D I P L O M A R B E I T

eingereicht von:

Reinhard BRANDNER

Matrikel-Nr.: 02.1.0019.002

Hauptreferent:

Univ. Doz. Dr. Karl ENTACHER

Coreferenten:

DI Manfred AUGUSTIN

Univ. Prof. DI Dr. techn. Gerhard SCHICKHOFER

Kuchl, im Mai 2006

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit wurde im Rahmen des Projektes P03 qm_online vom Kompetenzzentrum der holz.bau forschungs gmbh finanziert und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz sowie dem Industriepartner Holzindustrie Preiding GmbH, durchgeführt.

Das Projekt wurde durch Förderungen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), der Steirischen Wirtschaftskammer GmbH sowie seitens des Landes Steiermark und der Stadt Graz unterstützt.

Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die vorgegebenen Quellen nicht benutzt und die, den benutzten Quellen entnommenen Stellen, als solche erkenntlich gemacht habe.

Reinhard BRANDNER

Graz, am 22. Mai 2006

*Gewidmet in Liebe und Dankbarkeit
Martina und unser beider Familien.*

VORWORT

Der Rohstoff Holz ist bezeichnend für eine kaum überblickbare Anwendungsvielfalt und in seinem Dasein als ein stiller aber steter Begleiter der humanen Kultur. Er prägt wie kaum ein anderes Material den Gedanken der Nachhaltigkeit beginnend als natürlich nachwachsender und über Jahrtausende in seiner Struktur und Funktionalität optimierter Rohstoff, über das Produkt sowie die anschließende Rückführung in den natürlichen stofflichen Kreislauf.

Eines der Hauptanwendungsgebiete dieses Rohstoffes besteht in der Verwendung als Baustoff, im Hoch- und Tiefbau. Als Material natürlichen Ursprunges unterliegt er jedoch in seinem jahrzehntelangen Wachstums- und Reifungsprozess einer Unzahl an äußeren Einflüssen und weist dadurch, auch innerhalb einer Spezies und eines Wuchsgebietes, erheblichen Streuungen in seinen Materialeigenschaften auf. Diese Bandbreite der Eigenschaften, welche ihrerseits den harmonischen Charakter dieses Naturstoffes kennzeichnet, ist hinsichtlich der Berechenbarkeit und im Einsatz, im Vergleich zu Konkurrenzprodukten zum Beispiel der Beton-, Ziegel- und Stahlindustrie, als nachteilig zu betrachten. Durch diese schwer einschätzbare Breite mechanischer Potentiale und der hinzukommenden Anisotropie ergibt sich eine damit verbundene erhöhte Unsicherheit in der Vorhersagegenauigkeit der statistischen Kennwerte der Bemessung auf Basis von Versagenswahrscheinlichkeiten. Dies schlägt sich im Vergleich zu anderen Baumaterialien in erhöhten Sicherheitsbeiwerten nieder.

Hinzu kommt die Globalisierung im Holzbe- und Verarbeitungsbereich, welche eine weitgehende Herkunftskontrolle des Rohmaterials zur eventuellen Reduzierung der Bandbreite von Materialeigenschaften erschwert. Dies vermindert den Argumentationswiderstand des Baustoffes Holz gegen die substituierenden Produkte.

Um die Potentiale von Holz als lastabtragender Baustoff vermehrt einer Nutzung zuzuführen sind die Streuungen der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Steifigkeit und Festigkeit, zu reduzieren. Ein Weg in diese Richtung stellt die Schaffung von Sortierklassen dar. Die mehr oder minder ausgeprägte Klassenbildung nach der Steifigkeit, der Festigkeit und der Rohdichte auf Basis von statistischen Zusammenhängen ermöglicht eine erhöhte Vorhersagegenauigkeit der für die Berechnung wichtigen

Kennwerte, und zudem ein gezielter, marktorientierter Einsatz von Holzprodukten. Eine weitere Möglichkeit stellt die Nutzung von Ausgleichseffekten durch definierten Aufbau von Einzelkomponenten zu bevorzugt parallelen Systemen dar. Auf Basis dessen führen die Entwicklungen der letzten Jahre und Jahrzehnte zu einer verstärkten Produktentwicklung, wie etwa dem Brettschichtholz (BSH). Als neuere Entwicklungen und Fortschritte der letzten Jahre wären Brettspertholz, Konstruktionsvollholz, Duo- und Triobalken zu nennen. Diese Produkte stellen somit weitere Fortschritte zu einem zuverlässigen Bauprodukt dar. Der gezielte Aufbau von Systemen, unter Berücksichtigung der technologischen Eigenschaften von Holz führt hierbei zu einer Homogenisierung der Materialeigenschaften und somit zu einer Verringerung der Streuungen, vordergründig der Festigkeiten und Steifigkeiten, gegenüber jener der Einzelkomponenten.

Inhalt dieser Arbeit ist es, diese Streuungsreduzierung bei bevorzugt parallelen Systemaufbauten aus stehend belasteten keilgezinktem Konstruktionsvollholzquerschnitten zu untersuchen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Mitwirkenden dieses Projektes bedanken. Allen voran bei Herrn Univ. Prof. DI Dr. tech. Gerhard Schickhofer für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit im Rahmen des Projektes P03 qm_online des Kompetenzzentrums holz.bau forschungs gmbh / Graz, sowie für die Offenheit gegenüber dem Zugang zur Themenbearbeitung, das persönliche Interesse, die Weichenstellung für nationale und internationale Kontakte und die angeregten Diskussionen. Weiters danke ich Herrn DI Manfred Augustin für die Hilfestellung bei der Literatur- und Normenrecherche, aber vor allem für die Impulse für neue Denkansätze welche nachhaltig den Weg des Fortschrittes der Arbeit beeinflussten. Mein großer Dank gilt auch Herrn DI Dr. Thomas Bogensperger. Er war mir ein steter Förderer und stand mit starkem persönlichem Einsatz hinter der Modellierung von Systemen zur theoretischen Abklärung von Effekten. Ich bedanke mich bei Herrn DI Georg Jeitler und Herrn DI Reinhard Katzengruber, für das Vertrauen, die Unterweisungen und die Mithilfe. Ich danke dem gesamten Team der holz.bau forschungs gmbh und des Institutes Holzbau und Holztechnologie an der Technischen Universität Graz für die offene und freundschaftliche Aufnahme in einem jungen dynamischen und innovativen Team, sowie den Mitarbeitern des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) der Technischen Universität Graz, allen voran Herrn DI Dr. Bernhard Freitag, für die Ermöglichung der Durchführung der Versuche am Produkt 'Balkenbinder'. Zu Dank verpflichtet bin ich auch der Firma Holzindustrie Preding

GmbH, Herrn Hans Peter Leitinger, und Herrn Ing. Andreas Huber, als Projektpartner und stete Förderer. Vor allem Herr Hans Peter Leitinger zeichnet sich durch sein großes Engagement für den Bereich der angewandten Forschung aus. Mein Dank gilt der Firma Kulmer Holz-Leimbau GmbH / Pischelsdorf, Herrn Kahlbacher, welche mir durch ihr Wissen um die Block- und Flächenverklebung den Aufbau der Balkensysteme ermöglichten. Des Weiteren danke ich allen helfenden Händen für die Durchführung der unzähligen Versuche.

Ganz besonders danke ich aber Herrn Univ. Doz. Dr. Karl Entacher für die Betreuung der Diplomarbeit seitens der Fachhochschule Salzburg, Standort Kuchl. Er war mir ein treuer Gesprächspartner und durch seine einprägsamen Darstellungen und Erklärungen ein Initiator für mein Interesse an der angewandten Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Jedoch wäre all dies nicht möglich ohne die Unterstützung meiner Familie, allen voran Martina, meine Eltern und Geschwister, sowie die Eltern von Martina und Schwester. Dieses Umfeld der Wärme und Werte ermöglichte durch Zuspruch und Verständnis den nötigen Rückhalt um meinen zweiten Bildungsweg erfolgreich abzuschließen. Dieser Rückhalt war es auch der mich vor vier Jahren aufbrechen ließ eine Ausbildung zur Vertiefung des Wissens und Ergründung des Rohstoffes Holz sowie der um ihn entwickelten Wirtschaft zu erlernen sowie zu intensivieren. Ich bedanke mich recht herzlich.

INHALTSANGABE

Zusammenfassung	IX
Zusammenfassung - Deutsch	IX
Summary - English.....	XII
1 Zieldefinition	1
2 Einleitung	3
2.1 Exkurs: Definition 'System' und 'Systemverhalten'	4
2.2 Systemaufbauten - Untergliederung	6
2.2.1 Systeme, welche über lastverteilende Strukturen miteinander gekoppelter Komponenten aufgebaut sind.....	6
2.2.2 Systeme aufgebaut aus kontinuierlich verbundenen Komponenten	7
2.3 Einflussparameter	8
2.4 Einteilung der Systemeffekte	17
2.4.1 Effekte mechanischen Ursprunges	17
2.4.2 Effekte statistischen Ursprunges	17
3 Literaturrecherche	21
3.1 Systeme aus über lastverteilende Strukturen miteinander gekoppelten Komponenten	21
3.1.1 'load sharing'.....	22
3.1.2 'load redistribution'.....	37
3.2 Systeme aufgebaut aus kontinuierlich verbundenen Komponenten	41
3.2.1 Systembetrachtung parallel - seriell	42
3.2.2 Einfluss der Materialeigenschaften auf den Potentialgewinn in einem System aus kontinuierlich verbundenen Komponenten	53
3.2.3 Lastumverteilungsmechanismen	53
3.2.4 Verhalten der Steifigkeit in kontinuierlich verbunden Systemen	54
3.2.5 Weitere Ergebnisse aus Untersuchungen von Systemen aus kontinuierlich verbundenen Komponenten	55
3.2.6 Erkenntnisse aus Untersuchungen an Faserbündelmodellen (FBM).....	58
3.3 Zusammenfassung.....	64
4 Normenrecherche	66
4.1 Europäischer Raum	66
4.1.1 ON B 4100-2:2003.....	66
4.1.2 DIN 1052:2004.....	66
4.1.3 SIA 265:2003	68
4.1.4 ON EN 1995-1-1:2006	69

4.1.5	ON EN 1995-2:2005	70
4.1.6	enBR:2005 (eurocodenahe Bemessungsrichtlinie)	72
4.2	International (Amerika, Kanada, Australien)	74
4.2.1	LRFD:1996	74
4.2.2	NDS:2001	74
4.2.3	Wood Design Manual 1995 inklusive Literatur, sowie relevante Regelungen des O86.1-94:1994	74
4.2.4	Ontario Highway Bridge Code, Canadian regulations	78
4.2.4.1	Regelungen des Canadian Wood Council, im Buch "Wood highway bridges", 1992	78
4.2.4.2	Regelungen des Canadian Wood Council, im Buch "Introduction to design in wood", 1994	79
4.2.4.3	Regelungen des Ministry of Transportation, im Buch "Ontario highway bridge design", 1991	80
4.2.5	AS 1720.1:1997	82
4.3	Zusammenfassung	85
5	Versuchstechnik	89
5.1	Darlegung der Motivation in der Durchführung der einzelnen Untersuchungsreihen	89
5.2	Betrachtung der Parameter in Hinblick auf Kapitel 2.3	90
5.3	Allgemeine Darstellung des Materials, der Untersuchungsreihen sowie der Prüfpläne	95
5.3.1	Art und Aufbau der Komponenten innerhalb der Untersuchungsreihen	95
5.3.1.1	Untersuchungsreihe ZUG_60-78	95
5.3.1.2	Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160	96
5.3.1.3	Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 sowie ZUG_ZK_40-78	97
5.3.1.4	Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160	98
5.3.1.5	Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200	99
5.3.2	Verbindung der Komponenten zu Systemen	100
5.4	Allgemeine Darstellung der Methoden zur Berechnung und Auswertung der Versuchsergebnisse	101
5.4.1	Bestimmung allgemeiner physikalischer Größen	101
5.4.1.1	Bestimmung der Abmessungen	101
5.4.1.2	Ermittlung der Masse	101
5.4.1.3	Bestimmung der Holzfeuchte	101
5.4.1.4	Bestimmung der mittleren Jahrringbreite (JRB)	102
5.4.1.5	Bestimmung der Lage im Stamm (STL)	102
5.4.1.6	Ermittlung der Bruchursache	104
5.4.1.7	Ermittlung der Rohdichte	110
5.4.2	Bestimmung des dynamischen E-Moduls	111
5.4.3	Durchführung der Zugversuche	113
5.4.4	Durchführung der Biegeversuche	117
5.4.5	Korrektur der ermittelten mechanischen Größe auf die Referenzfeuchte $u = 12\%$ der ON EN 384:2004	123
5.4.5.1	Korrektur der Steifigkeitswerte	123

5.4.5.2	Korrektur der Rohdichtewerte	124
5.4.6	Ermittlung der Systemfaktoren k_{sys} der einzelnen Untersuchungsreihen.....	124
5.5	Methoden der statistischen Auswertung	125
5.5.1	Statistische Kennwerte	126
5.5.1.1	Lageparameter	126
5.5.1.2	Streuungsparameter	127
5.5.2	Regressions- sowie Korrelationsanalyse	128
5.5.2.1	Lineare Regressionsanalyse	128
5.5.2.2	Lineare Korrelationsanalyse	131
5.5.3	Boxplots	132
5.5.4	QQ-Plots	133
5.5.5	Erläuterungen zu den betrachteten statistischen Verteilungsmodellen	134
5.5.5.1	Empirische Häufigkeit	134
5.5.5.2	Normalverteilung.....	136
5.5.5.3	Logarithmische Normalverteilung	138
5.5.5.4	Weibullverteilung	140
5.5.6	Bestimmung eines repräsentativen statistischen Verteilungsmodells unter Betrachtung der besprochenen Varianten.....	142
5.5.7	Bestimmung charakteristischer Kennwerte nach der ON EN 384:2004, sowie der prEN 14358:2004	150
5.5.7.1	Berechnung der Kennwerte nach der ON EN 384:2004.....	150
5.5.7.2	Berechnung der Kennwerte nach der prEN 14358:2004.....	153
6	Ergebnisse der Zug- und Biegeprüfungen	155
6.1	Untersuchungsergebnisse der ersten Reihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160	155
6.1.1	Daten aus den Zugversuchen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78.....	156
6.1.2	161	
6.1.3	Daten aus den Biegeversuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160.....	162
6.2	Ergebnisse der Zugversuche von nach der Ultraschallgeschwindigkeit vorsortierten BSH-Lamellen der Reihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78	167
6.2.1	Daten der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78	168
6.2.2	Daten der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78	174
6.3	Ergebnisse aus den Biegeversuchen von Duobalken und Balkenbindern	181
6.3.1	Daten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160.....	182
6.3.2	Daten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200.....	186
7	Vertiefende Auswertung sowie Interpretation der Versuchsergebnisse	191

7.1	Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Reihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160	191
7.1.1	Auswertung der Versagensursachen	191
7.1.2	Auswertungen der Beziehungen und Beziehungsstärken zwischen ausgewählten Kennwerten.....	201
7.1.3	Erkenntnisse aus der Untersuchung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle	206
7.2	Erkenntnisse aus den Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78.....	210
7.2.1	Kurze Darstellung des Auswerteschemas beider Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, zur Ermittlung der Steifigkeit und Festigkeit einzelner Bruchabschnitte	211
7.2.2	Darstellung des Verlaufes der Steifigkeiten und Festigkeiten der einzelnen Serien der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78	217
7.2.3	Untersuchungen der Verhältnisse Querschnittsfläche zur Kraft in definierten Abschnitten des Kraft-Weg Diagramms	221
7.3	Erkenntnisse aus den Untersuchungen am Produkt 'Balkenbinder'	227
7.3.1	Bestimmung von Referenzmaßen und Größenfaktoren des Produktes 'Balkenbinder'	227
7.4	Vertiefende Betrachtungen des 'load sharing'	235
7.5	Definition allgemein gültiger Beziehungen sowie der Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur und den betrachteten Normenwerken	241
7.5.1	Anmerkungen zur Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys}	241
7.5.2	Untersuchung der Schiefe und Kurtosis der Festigkeitswerte in Abhängigkeit der Systemgröße n	245
7.5.3	Untersuchung des Lageparameters α sowie des Steigungsparameters β der 3p WV	245
7.5.4	Ermittlung einer allgemeinen Funktion zur Beschreibung der Streuungsveränderung der Festigkeit, in Abhängigkeit der Systemgröße n	246
7.5.5	Betrachtung des Mittelwertes der Festigkeit, in Abhängigkeit der Systemgröße n	250
7.5.6	Gegenüberstellung von Modellen zur Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys}	251
7.5.6.1	<i>Formalismen zur Ermittlung der Verteilungsparameter sowie der Systembeiwerte</i>	<i>252</i>
7.5.6.2	<i>Gegenüberstellung der theoretischen Modelle zur Abschätzung der Systembeiwerte</i>	<i>257</i>
7.5.6.3	<i>Gegenüberstellung der theoretisch untersuchten Modelle der Systembeiwerte mit den Versuchsergebnissen</i>	<i>262</i>
8	Schlussbemerkungen und Ausblick	265
9	Zitierte Quellen.....	268
9.1	Literatur.....	268
9.2	Normenauszüge sowie Veröffentlichungen zur Erklärung von Normen	275
9.3	Vereinbarungen	275
9.4	Normen	275
9.4.1	Außereuropäische Normen	275

9.4.2	National und Europäische Normen	277
10	Anhang.....	I
10.1	Anhang A - Abkürzungen	I
10.1.1	Allgemeine Abkürzungen.....	I
10.1.2	Abkürzungen zur Charakterisierung von Versagensmerkmalen.....	I
10.1.3	Technische und mathematische Abkürzungen	II

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassung - Deutsch

Systemeffekte von aus Konstruktionsvollholz aufgebauten Querschnitten

Holz als natürlich gewachsenes Rohmaterial, ist charakterisiert durch sein linear elastisch-plastisches Verhalten in Abhängigkeit der Holzart, der Belastungssituation, seiner Anisotropie, dem Kriechverhalten, sowie seiner hohen Inhomogenität im Vergleich zu substituierenden Konstruktionswerkstoffen. Durch die Anordnung von Komponenten zu Systemen, welche unter vertikaler Belastung als einheitliche Struktur nach außen erscheinen, kann eine reduzierte Streuung der mechanischen Eigenschaften Festigkeit und Steifigkeit beobachtet werden. Eine weitere Möglichkeit der Anordnung ist die Kombination von lastverteilenden und lastabtragenden Strukturen. Das Gesamtsystem erscheint ebenfalls als Einheit, jedoch sind die lastabtragenden Komponenten nicht direkt miteinander gekoppelt; die lastverteilende Struktur dient als indirekte Verbindung. Bei beiden Varianten der Systeme können erhöhte Werte von mechanischen Eigenschaften, im Vergleich zu Einzelkomponenten, lukriert werden. Eine ist die gesteigerte Sicherheit der Parameter Festigkeit und Steifigkeit; eine andere ist die quantitativ bewertbare Erhöhung der 5 % Quantile der Festigkeit. Diese Erhöhung ist in den gegenwärtigen Normen als 'Systembeiwert' oder 'load sharing factor', errechnet aus dem Verhältnis der 5 % Quantile der Festigkeit des Systems im Vergleich zur jener der Einzelkomponente, verankert. Der Beiwert selbst fungiert als Multiplikator der betreffenden charakteristischen Festigkeitswerte wie Biegung und Zug, basierend auf den mechanischen Potentialen der Einzelkomponenten. Die Anwendung des Systembeiwertes (k_{sys}) ist abhängig von den Regelungen der nationalen Normen und umfasst das Anwendungsgebiet von lamellierten Deckplatten für Brücken oder Fußböden bis hin zu Trägerstrukturen wie Duo- oder Triobalken, oder Systemen von Fußboden, Decken oder Wandkonstruktionen. In allen Fällen kommt es durch Interaktionen zwischen Komponenten und Elementen zu mechanisch- und statistisch-basierten Effekte.

In dieser Diplomarbeit wurde das Hauptaugenmerk auf die Untersuchung von Systemen von kontinuierlich steif miteinander verbundenen Komponenten aus Konstruktions-

onsvollholz (KVH[®]) gelegt. Systeme werden definiert als Strukturen, aufgebaut aus parallelen Komponenten und seriellen Elementen, und werden beschrieben als parallel agierende subserielle Einheiten. Am Beginn wurden eine intensive Literaturstudie, sowie eine nationale und internationale Normenrecherche betreffend die Regelungen von Systemeffekten, durchgeführt. Die Ergebnisse spiegeln eine große Bandbreite genereller Ideen, Prüf- und Simulationsresultate, in Kombination mit einem weiten Gebiet von anwendbaren Beiwerten, wieder. Offensichtlich beinhalten die Regelungen von Systemen aus steif und kontinuierlich verbundenen Komponenten große Unsicherheiten sowie differente Auffassungen und Komplexität in der Definition des gesteigerten Potentials, mit dem Ziel die Sicherheit von Ingenieurkonstruktionen in konservativer Hinsicht nicht zu reduzieren. Basierend auf den aus der Literatur gewonnenen Ideen wurde ein Versuchsprogramm festgelegt, um das Forschungsgebiet von Systemeffekten näher zu beleuchten. Vier Untersuchungsreihen aus Konstruktionsvollholz (KVH[®]) der Holzart Fichte (*pinus Abies*) wurden auf Versagen geprüft, eine auf Zug und eine auf Biegung, in Anlehnung an die ON EN 408: 2005. Der Systembeiwert wurde anhand von Systemen aus zwei sowie vier Komponenten bestimmt. Der nächste Schritt war die Bestimmung des Systempotentials von horizontal angeordneten 2x2 und 2x3 Strukturen basierend auf zwei Komponenten. Die Komponenten der visuellen Sortierklasse \geq S10, in Anlehnung an ON DIN 4074-1:2004 (Festigkeitsklasse \geq C24, nach der ON EN 338:2003) wurden miteinander, auf Basis von Polyurethanharzen welches auch für die Keilzinkung verwendet wurden, verklebt. Des Weiteren wurden zwei Untersuchungsreihen von Systemen, aufgebaut aus Ultraschallgeschwindigkeit vorsortierten BSH-Lamellen der Sortierklasse MS17, in Anlehnung an ON DIN 4074-1:2004 (Festigkeitsklasse \geq C40, nach der ON EN 338:2003) als Einfach-, Zweifach-, Dreifach- und Vierfachkombinationen auf Zug geprüft. Mit Bedacht wurde die 5 % Quantile, aufgrund der Sensibilität des k_{sys} als Verhältniswert, berechnet. Die empirischen Daten, gewonnen aus den Versuchsergebnissen, wurden mit statistischen Verteilungsmodellen, wie der Normalverteilung (NV), zwei- und dreiparametrischen logarithmischen Normalverteilung (LNV) und Weibullverteilung (WBV) verglichen. Zur Bestimmung des repräsentativsten Verteilungsmodells wurde, gestützt auf quantitativen und qualitativen Beurteilungskriterien, eine Analyse mit Hilfe von QQ-Plots und 'least square methods' durchgeführt. Die Datensätze reflektieren eine generell reduzierte Streuung der mechanischen Eigenschaften. Zudem stieg der Mittelwert der Festigkeit an. Als Folge dessen resultiert eine erhöhte 5 % Quantile der Festigkeit welche zu einem gestiegenen Systempotential, ausgedrückt als k_{sys} , führt.

Der Systemeffekt wurde auf empirischem Wege für Zug und Biegung bestimmt. Es ist zu unterscheiden zwischen dem Anteil aus der sich reduzierenden Streuung und jenem des gesteigerten Mittelwertes der Festigkeit, welche beide zu einer Erhöhung der 5 % Quantile beitragen. Die reduzierte Streuung erscheint logisch hinsichtlich der Betrachtung der Homogenisierung und aus den Interaktionen von parallelen und seriellen Systemen, in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten (n). Es wurde Wert auf die Definition einer generellen Funktion zur Beschreibung der relativen Änderung des Variationskoeffizienten (COV) der Festigkeit in Relation zu n gelegt. Hierzu wurden alle Versuchsergebnisse, ergänzt um Resultate von vertikalbelasteten BSH-Lamellen und Ergebnissen von Brettsperrholzplatten (BSP), mit $COV_1 = 100\%$ und COV_n in Beziehung zu diesem Wert, dargestellt. Empirischen Beobachtungen und dem Ziel einer Definition einer generellen Beziehung unter Inkludierung des Parameters COV_1 zufolge, wurde ein mathematischer Zusammenhang definiert. Der tendenziell gestiegene Mittelwert der Festigkeit wird auf das Ergebnis von 'load sharing' und 'load redistribution' zwischen Elementen und Komponenten, in Kombination mit statistischen Effekten, zurückgeführt, erscheint jedoch in seiner Ausprägung als zu progressiv. Unter der Annahme eines konstanten Mittelwertes, als konservativer Ansatz, kann die Bestimmung des Systembeiwertes durch Einbeziehung eines repräsentativen statistischen Verteilungsmodells zur Beschreibung des Datensatzes und unter Berücksichtigung der Streuung durchgeführt werden. Des Weiteren erhöhen Systemeffekte die Sicherheit des Mittelwertes, aber auch der 5 % Quantile der Steifigkeit, was in der Weise relevant wäre, hätten wir die Intention der Einführung von Sortierklassen der Steifigkeit anstelle der Festigkeit. Dies würde zu einem neuen Denkansatz, basierend auf dem Wissen der zerstörungsfreien und im industriellen Einsatz messbaren Steifigkeit, führen und damit den höheren Stellenwert des E-Moduls in der Bemessung berücksichtigen. Im Vergleich dazu liegen der Ermittlung der Festigkeit Schätzungen aus Parametern wie Dichte, Steifigkeit sowie Annahmen auf Basis von Datensätzen und einer multiplen Regressionsfunktion zugrunde. Aufbauend auf dem gesteigerten Potential einer gezielten und intelligenten Kombination aus Einzelkomponenten zu Systemen ist es möglich erfolgreich mit substituierenden Konstruktionswerkstoffen zu konkurrieren und somit die Profitabilität und den anwendungsgerechten Einsatz der natürlichen Ressource Holz zu steigern.

Summary - English

System effects of cross sections build up by finger jointed construction timber

Wood as a raw material, naturally grown, is characterised by its linear elastic plastic behaviour, dependent on species and load situation, its anisotropy, creeping and its high inhomogeneity compared to other substituting construction materials. By arranging components in systems which work like one unit, e.g. edgewise loaded, a reduced variability of the mechanical properties strength and stiffness can be achieved. Another kind of arrangement is the combination of load distributing structures and load bearing structures. The whole system appears like one unit too, but the load bearing components are not directly linked together, the load distributing structure serves as an indirect connector. In both kinds of systems added values from mechanical properties can be generated, in comparison to single components. One value is the increase in the certainty of the parameters strength and stiffness; another is the significant shift of the 5 % quantil of strength values. This shift is expressed as 'system factor' or as 'load sharing factor' in current standards, computed as the ratio of 5 % quantil of strength of systems, compared to single components. The factor itself serves as a multiplier for the referring characteristic strength values, e.g. bending and tension, based on the mechanical potential of single components. The application of the system factor (k_{sys}) depends on the national standards and ranges from laminated decks for bridges or floors to beam structures like Duolam or Trilam, or systems like floor-, roof- or wall constructions. In both types, components and elements interact resulting in mechanically- and statistically-based effects. But nevertheless the factor itself is a conglomerate of a variety of effects resulting from interacting behaviour between elements, components and sub-systems.

In this diploma thesis emphasis is placed on systems of continuous and rigid connected components of finger jointed structural timber (KVH[®]). Systems are defined as structures, made up of parallel components and serial elements, and can be best described as parallel-acting sub-serial structures. First an intensive literature study and scanning of national and international regulations in standards concerning the system effect were carried out. The results reflect a wide variety of general ideas, testing and simulation results, in combination with a wide area of applicable coefficients. Obviously

the field of regulations concerning rigid and continuous connected systems reflects the uncertainty and different view and the complexity of defining the increased potential without reducing the safety of engineered constructions. Based on ideas gained from literature, a testing program was defined to stress the field of system effects. Four series of spruce (*picea Abies*) KVH[®] were tested to failure, one in tension and three in 4-point bending test arrangement, according to EN 408. First emphasis was placed on determining k_{sys} with systems of doubled and fourfold components. The next step was to define the system potential of horizontally arranged 2x2 and 2x3 structures, based on doubled components. The components of visual grade \geq S10, according to DIN 4074-1 (strength class \geq C24, according to EN 338) were glued together with an adhesive based on polyurethane, which was also used for finger joints. In addition two series of systems, build up by ultrasonic speed-sorted glulam lamellas of grading class MS17, according to DIN 4074-1 (strength class C40, according to EN 338), in single, double, triple and fourfold arrangements, were tested in tension. Emphasis was placed on the computing of the 5 % quantil because of the sensibility of the k_{sys} as the ratio. Empirical data gained from testing was compared to statistical models like normal distribution, 2 and 3 parametric logarithmic normal distributions and Weibull distributions. To determine the most relevant distribution model analysis, based on quantitative and qualitative aspects was carried out. Tools like QQ-plots and least square method were applied. The data sets reflect the reduced variability of the mechanical properties. In addition, the mean of strength values also increased. Consequently the 5 % quantil of strength increased too, reflected in growing system potential expressed as k_{sys} .

The system effect was empirically determined in bending and tension. It has to be differentiated between the share of reduced variability and the share of increased mean of strength which both lead to higher 5 % quantils. The reduced variability seems logical from the point of view of homogenisation and as part of the interaction between serial and parallel systems, dependent on the quantity of components (n). The focus was set on defining a more general function to describe the relative change of the coefficient of variation (COV) of strength in relation to n . For that, all test results, added by past data sets of edgewise loaded glulam lamellas and current tests with cross laminated timber, were plotted with $COV_1 = 100\%$ and COV_n relating to this value. Based on empirical observation and the goal of defining a general relation by including the parameter COV_1 a function was defined. The tendencies increased mean of strength values seems to be the result of load sharing and load redistribution between elements

and components, in combination with statistical effects, but appears to be too progressive. Generally, based on the assumption of a constant mean, as a conservative approach, the determination of system effects can be fulfilled by assuming an appropriate distribution to describe the data set, by variability. Nevertheless, system effects also increase the assurance of mean and the 5 % quantil of stiffness, which would be relevant if there is the intention of introducing classes of stiffness instead of strength. This would lead to a new way of thinking based on the knowledge that stiffness is, in the case of engineer, couple more relevant than strength and also measurable in contrast to strength values, which are estimated by parameters like stiffness, density, and on insecure assumptions of data sets and a multiple regression function. Based on the increased potential of the intelligent combination of single components in systems, it is possible to compete successfully with substituting construction materials, to ensure the profitability and purposeful use of the natural resource wood.

1 ZIELDEFINITION

Das Thema dieser Diplomarbeit befasst sich mit der Untersuchung von Systemeffekten von aus Konstruktionsvollholz aufgebauten Querschnitten. Systemeffekte resultieren aus dem Aufbau von aus mehreren Komponenten bestehenden, vorwiegend parallelen Strukturen, welche bei Belastung als ein Bauteil nach außen wirksam werden. Der Verbund zwischen den Komponenten dieses Bauteiles führt durch den gegenseitigen Zwang zu Ausgleichseffekten der Streuungen der mechanischen Eigenschaften und somit zu einer Erhöhung der, für die Bemessung relevante Festigkeit. In den nationalen und internationalen Normenwerken werden diese Effekte über den Systembeiwert oder den 'load sharing factor', als ein den Bemessungswert der Festigkeit erhöhender Multiplikator, berücksichtigt.

Das Ziel dieser Arbeit ist eine übersichtliche, umfassende Darstellung nationaler und internationaler Forschungsergebnisse zu den Themen der Quantifizierung und Qualifizierung von Systemeffekten in Holzkonstruktionen sowie 'Systemwerkstoffen' aus Holz (siehe Kapitel 2.1). Dieses Wissen wird anschließend mit den betrachteten Regelwerken aus Europa, Nordamerika und Australien ergänzt sowie der Stand der Technik dargelegt.

Des Weiteren wurden sechs Versuchsserien unterschiedlichen Aufbaues zum Themenschwerpunkt kontinuierlich verbundener Systemstrukturen aus keilgezinktem Konstruktionsvollholz am Kompetenzzentrum der holz.bau forschungs gmbh an der Technischen Universität Graz, im Umfang von rund 60 m³ auf Zug und Biegung durchgeführt. Die gezielte Protokollierung der erfassbaren Einflussparameter sowie die anschließende umfassende Ausarbeitung der versuchstechnisch ermittelten Daten dienen der Erweiterung des Wissens und bilden die Basis für die abschließend dargestellten Schlüsse.

Unter Zusammenführung der gewonnenen Daten und Erkenntnisse sollen weitgehende, allgemeine Beziehungen erkannt werden, mit dem Ziel das Potential des Rohstoffes Holz entsprechend einer hochwertigen Nutzung zuzuführen und die Sicherheit in der Verwendung als lastabtragender Bauteil zu erhöhen.

Die Arbeit selbst schließt mit einer umfassenden Diskussion und einem Vorschlag zur Implementierung der definierten allgemeinen Beziehungen in der neuen Generation der Bemessungsnormen des Eurocode 5.

Das folgende Zitat von Hansson und Isaksson, 2001 beschreibt eindrücklich den momentanen Stand der Technik, und bietet Motivation zur Aufklärung der Thematik von Systemeffekten: "*The design of timber structures or systems is mainly based on the design of single elements. That is, the benefit of single elements interacting in a system is usually not taken into account.*".

2 EINLEITUNG

Holz, als natürlich gewachsener und über Jahrzehnte gereifter Rohstoff, unterliegt in seinen Materialeigenschaften auch innerhalb eines Baumes erheblichen Streuungen. Diese Streuungen können bei Prüfungen von Bauteilgrößen auf Zugbeanspruchung längs zur Faser durchaus 40 % und mehr betragen.

Auf Basis der neuen Sicherheitskonzepte in der Bemessung gilt die 5 % Quantile der Grundgesamtheit als charakteristischer Wert der Festigkeit. Dadurch kann das Potential der 95 % höheren Festigkeiten im Holz durch die große Bandbreite bei Weitem nicht genutzt werden.

Das Sortieren von Holz in Steifigkeits- und Festigkeitsklassen, visuell und maschinell, ist ein Weg um die Variation der Materialeigenschaften zu reduzieren und die Holzqualitäten einer gezielten Verwendung zuzuführen. Jedoch zeigt sich, dass Festigkeiten trotz maschineller Sortierung relativ große Streuungen innerhalb einer Klasse aufweisen. Dies liegt an der unzureichenden Möglichkeit alle relevanten Parameter ihrer Wirkung entsprechend zu erkennen bzw. Interaktionen zwischen reduzierenden Einflussgrößen über statistische Zusammenhänge gesichert bestimmen zu können.

Eine andere Möglichkeit die Streuungen des Materials zu reduzieren bietet ein gezielter Aufbau von Systemen in serieller oder paralleler Anordnung. Die Kombination von Elementen zu Komponenten zur Bildung von Systemen resultiert in Ausgleichseffekten, Umlagerungen von Belastungen und Homogenisierungen, welche nicht nur die Variabilität der mechanischen Eigenschaften reduzieren, sondern zudem, bei dafür geeigneten Aufbau, auch zu einer Reduktion der bei Holz stark ausgeprägten Anisotropie führen. Als Beispiel für ein solches Produkt wäre hier die Brettsperrholzplatte (BSP) zu nennen. Typische serielle Anordnungen von Komponenten sind keilgezinkte Lamellen sowie Stabelemente, wie zum Beispiel das Konstruktionsvollholz. Bereits bekannte und breit verwendete Systemprodukte in paralleler Anordnung sind Duo- und Triobalken, sowie Brettstapeldeckensysteme, sowie hochkantbeanspruchtes Brettschichtholz (BSH). Hierbei erscheint die allgemeine Definition von Systemen und des Terminus Systemverhalten als vordergründig.

2.1 Exkurs: Definition 'System' und 'Systemverhalten'

Nach www.wikipedia.org, 2005 bedeutet das Wort 'System' (griechisch systema - wörtlich das Gebilde, Zusammengestellte, Verbundene) im weitesten Sinne eine Zusammenstellung, Kombination von mehreren Elementen welche untereinander in Wechselwirkung stehen. Jedes System ist zudem aus Komponenten, Elementen, Subsystemen aufgebaut welche untereinander in Beziehung stehen und somit unter gegenseitiger Beeinflussung ein Zusammenspiel bewirken.

Das Verhalten von Systemen selbst wird beschrieben als Veränderung des Zustandes sowie der Zustandsgröße auf sichtbarer Makroebene, wobei das Ereignis daraus selbst definiert ist als Übergang von einem Zustand in einen anderen. Die Einflüsse und Wirkungen die dabei auftreten, können in Stoff-, Materie-, Energie-, sowie Informationsflüsse, sowie Kombinationen aus diesen, unterschieden werden. Des Weiteren sind Zusammenhänge zwischen Einfluss und Wirkung quantitativ und qualitativ zu unterteilen.

Das Verhalten von Systemen kann zusätzlich auf ihren Zustand zurückwirken und von neuem beeinflussen, auf direktem und indirektem Wege.

Auf Basis dieser Darstellungen werden für die weiteren Betrachtungen, in Anlehnung an Isaksson, 2001, folgende Definitionen festgehalten welche in der Abb. 2-1 grafisch dargestellt sind:

- Element:

Ein Element ist definiert als Volumen einer Materialmatrix mit nahezu identischen Eigenschaften, z.B. Faser, Cellulose- oder Lignin- Makromolekül, bzw. dessen Bausteine, wobei hier die Festlegung der Bezugseinheit in Abhängigkeit der Betrachtungstiefe zu wählen ist.

- Komponente:

Eine Komponente ist aufgebaut aus Elementen gleichen Materials mit unterschiedlichen, auch teils identischen Eigenschaften, in hauptsächlich serieller, aber auch paralleler Anordnung.

▪ System:

Unter einem System versteht man hierbei den Aufbau aus Komponenten in bevorzugt paralleler Anordnung. Diese parallele Anordnung führt zu Redundanzen innerhalb des Systems.

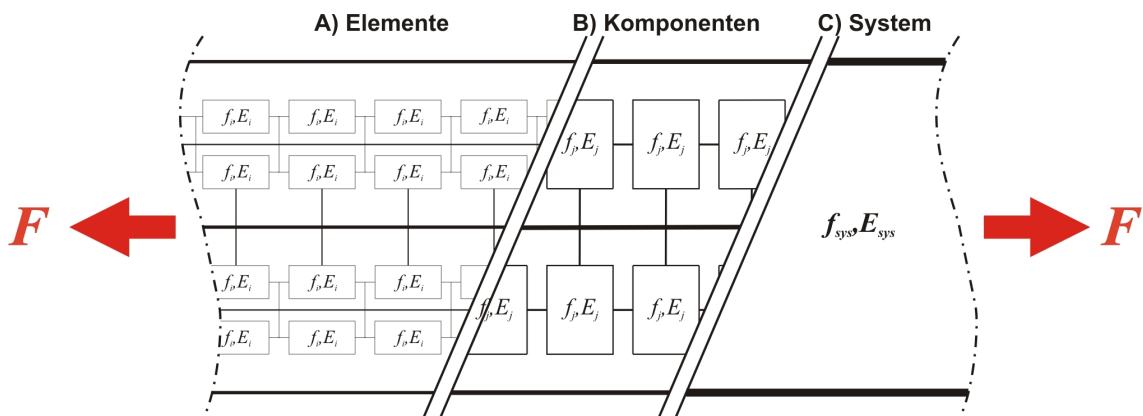


Abb. 2-1: Systemaufbau parallel mit subseriellen Untergruppen mit Festigkeit und Steifigkeit (f_{sys}, E_{sys}), aus i Elementen mit Festigkeiten und Steifigkeiten (f_i, E_i) und j Komponenten mit Festigkeiten und Steifigkeiten (f_j, E_j)

Die betrachteten Systeme im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf die vorwiegend parallele Anordnung von Komponenten unter Berücksichtigung serieller Subsysteme, welche aus der seriellen und parallelen Anordnung der Elemente innerhalb einer Komponente resultieren.

Aus der Betrachtung dieser Systemstrukturen treten Effekte durch das Zusammenspiel von Elementen innerhalb einer Komponente, sowie durch Interaktionen zwischen den systemaufbauenden Komponenten in Erscheinung. Isaksson, 2001 vermerkte dazu: "Using the definitions above there is one system effect when assembling elements to a member and another when assembling a system of members." Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Erfassung aller sich aus der Struktur ergebenden Wirkungslinien als komplexe Aufgabe darstellt.

Gliedert man die Betrachtungen in einzelne Abschnitte so lässt sich festhalten, dass die Interaktionen in Komponenten als Effekte der Größe darstellbar sind. Somit ergeben sich durch eine verstärkte Ansammlung von Elementen in größeren Komponenten Effekte in allen drei geometrischen Richtungen, der Breite, der Höhe und der Länge. In der Literatur und den Normen sind diese Effekte durch geeignete Faktoren mit den

Bezeichnungen k_{size} , k_{length} benannt, und zum Teil auch schon gut erforscht. Sehr viele dieser Untersuchungen und Modellierungen basieren auf Beobachtungen von Weibull, 1939 welcher aus dem Materialverhalten von spröden Systemen in Abhängigkeit der Probengröße den Volumeneffekt definierte und eine Beziehung nach der Formel 2-1, für die Beanspruchung auf Zug parallel zur Faser, empirisch herleitete. In der Gegenwart wurde auch von Dill-Langer et al., 2003 der Versuch unternommen Größeneffekte auf Basis von Faserbündelmodellen (FBM) über Modellierungen numerisch zu erfassen.

$$\left(\frac{f_1}{f_2}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k_v} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^{k_l} \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{k_b} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{k_h}$$

f_1, f_2	ermittelte oder zugewiesene Festigkeiten in Abhängigkeit des belasteten Volumens
V_1, V_2	Volumen der Untersuchungseinheiten
l_1, l_2	Längen der Untersuchungseinheiten
b_1, b_2	Breiten der Untersuchungseinheiten
h_1, h_2	Höhen der Untersuchungseinheiten
k_v	Volumenfaktor
k_l	Längenfaktor
k_b	Breitenfaktor
k_h	Höhenfaktor

Formel 2-1

Bei Betrachtung von Systemstrukturen aus vorwiegend paralleler Anordnung stellen sich diese als redundante Systeme dar, welche ihrerseits hinsichtlich des Aufbaues und des Wirkens in zwei Systemaufbauten gegliedert werden können und im folgenden Kapitel 2.2 näher definiert werden.

2.2 Systemaufbauten - Untergliederung

In den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 werden zwei Varianten von parallelen Systemaufbauten näher charakterisiert und erläutert. Diese Unterteilung bildet die Basis für die nachfolgende Literatur- und Normenrecherche.

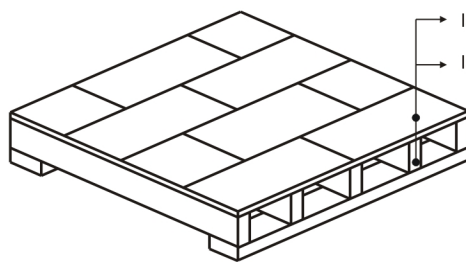
2.2.1 Systeme, welche über lastverteilende Strukturen miteinander gekoppelter Komponenten aufgebaut sind

Das hier bezeichnete System ist gekennzeichnet durch lastverteilende Komponenten welche diese Last in Abhängigkeit der Steifigkeit der Struktur weitgehend gleichmäßig auf die lastabtragenden Komponenten verteilen. Dabei ist unter der verteilenden Kom-

ponente eine als Platte oder Rahmen wirkende Komponente zu verstehen, welche in der horizontalen oder geneigten Ebene die Zuteilung der Belastungen auf die jeweiligen, in Abständen zueinander parallel angeordneten Trägerstruktur, gewährleistet. Die lastabtragende Struktur selbst besteht aus den beschriebenen parallelen Komponenten und ist zudem über den Trägerabstand, die Anzahl, sowie der mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Zudem ist das Systemverhalten in Abhängigkeit der Verbindung zwischen der lastverteilenden und der lastabtragenden Struktur zu definieren.

Als Beispiele sind hier Tragsysteme von Decken-, Fußboden-, Dachaufbauten, anzuführen, weiters die Strukturen von Wandaufbauten und andere Systemen welche in der beschriebenen Weise wirken (siehe Abb. 2-2).

Fußbodenaufbau
(schematisch)



Dachkonstruktion
(schematisch)

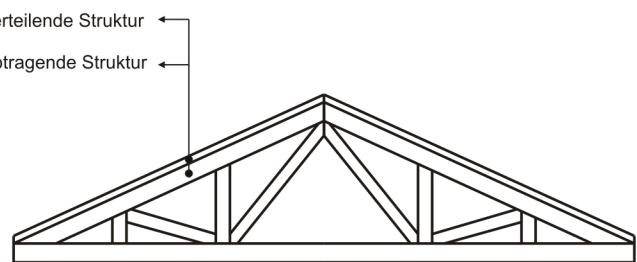


Abb. 2-2: schematische Darstellungen von Systemen aus lastverteilenden und lastabtragenden Strukturen

2.2.2 Systeme aufgebaut aus kontinuierlich verbundenen Komponenten

Diese Systeme sind charakterisiert durch die Anordnung von parallelen Komponenten, welche ohne Abstand untereinander so verbunden sind, dass sie nach außen als ein wirkendes Bauteil auftreten. Dabei ergeben sich innerhalb des Systems Zwänge zwischen den Komponenten, welche in der Stärke der Übertragung in Abhängigkeit der Verbindung sowie der Geometrie der Komponenten auftreten. Weiters ermöglicht die kontinuierliche Verbindung zwischen den Komponenten im Gegensatz zu Systemen mit lastverteilenden Strukturen eine direkte, erzwungene Kraftumlagerung und eine rasche und weitreichende Reaktionsfähigkeit in Form einer schlagartigen Belastungszunahme bei Teilausfällen auf die verbleibenden Komponenten und Elemente.

Als bekannte Beispiele sind hier vertikal belastete Duo- und Triobalken, sowie Brettstapeldecken, vorgespannte Brückenplatten, und weitere, in dieser beschriebenen Art wirkende Systemstrukturen, zu nennen (siehe Abb. 2-3).

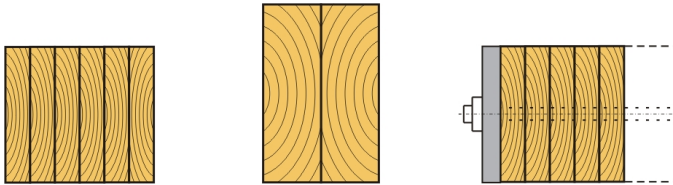


Abb. 2-3: Beispiele für Systeme aus kontinuierlich verbundenen Komponenten: hochkantbelastetes BSH (links), Duobalken (mitte), vorgespannte Brückenplatte (rechts)

Im Kapitel 2.3 werden die Einflussparameter, welche auf Systeme, aufgebaut aus Elementen und Komponenten, einwirken können, erfasst. Die 5 M (Material, Maschine, Mensch, Methode, Mitwelt), auch bekannt als Ishikawa Diagramm, nach der ÖVQ, 2005 dient als Anhaltspunkt für die Untergliederung dieser Einflussgrößen.

Im Kapitel 2.4 werden die Effekte, wie sie durch das Zusammenwirken von in Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen Systemen auftreten können, erfasst und unterteilt.

2.3 Einflussparameter

Die folgenden Darstellungen und Auflistungen dienen der Erfassung der Einflussgrößen auf das Verhalten von Systemen. Aufgrund des Aufbaues der Systeme aus Komponenten und Elementen sind deren Eigenschaften, zusätzlich zu den Parametern welche in direkter Weise auf das System einwirken, ausschlaggebend um die Potentiale von Systemen im Vergleich zu jenen der Einzelkomponenten darzustellen. Die Erfassung der Einflussparameter dient zur Abschätzung der Aussagekraft der Ergebnisse aus den Versuchen welche, aufgrund der erheblichen Streuungen im Material und des eingeschränkten Prüfumfanges, selbst in einer Bandbreite der Auftretenswahrscheinlichkeit zu betrachten sind.

Diagramm 2-1 gibt den Aufbau eines Ishikawa-Diagramms nach der ÖVQ, 2005 wieder. Diese Darstellung, auch als Ursachen-Wirkungsdiagramm oder Fischgrät-Diagramm bekannt, berücksichtigt im Wesentlichen die '5 M', Mensch, Maschine, Material, Methode und Mitwelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Unterteilung um das

'M' - Management erweitert um den Einfluss des Menschen in seinem Handeln ein zusätzliches Gewicht zu verleihen.

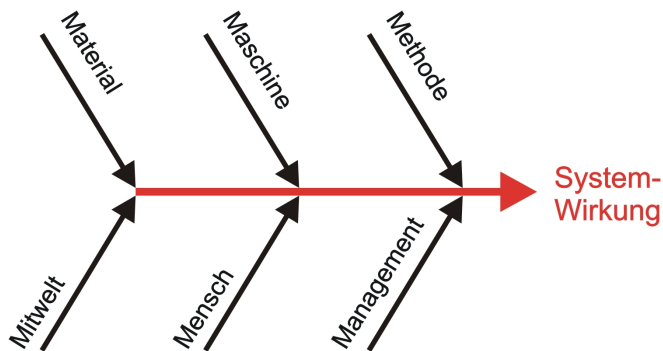


Diagramm 2-1: Darstellung der Systematik eines Ishikawa-Diagramms unter Berücksichtigung der '5 + 1 M'

Im Allgemeinen sind die Einflussgrößen hinsichtlich des Wirkungsbereiches in den Entstehungsphasen von Komponenten zu Systemstrukturen bis zu den im Einsatz und unter Last befindenden Bauteile zu unterscheiden. Im Wesentlichen in folgende 3 Bereiche:

- Entstehungs-, Ernte-, Erzeugungsphase von Komponenten
- Erzeugungsphase von Komponenten zu Systemstrukturen
- Im Einsatz und unter Last befindende Systemstrukturen

Die Tab. 2-1 beinhaltet in strukturierter Form eine Auflistung der Hauptgrößen der einzelnen Bereiche. All diese Bereiche und die Größen innerhalb dieser stehen in gegenseitiger Interaktion und sind somit nicht klar abzugrenzen. Es sei zum Verständnis auf die Abb. 2-4 verwiesen.

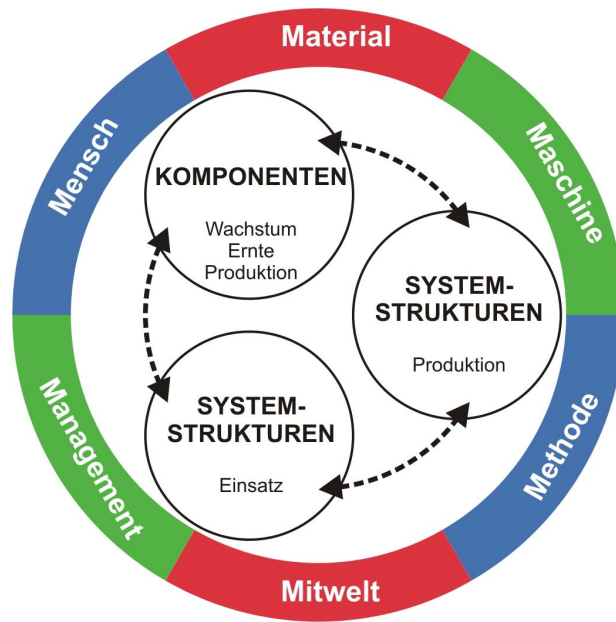


Abb. 2-4: symbolische Darstellung der Interaktionen zwischen den betrachteten Teilbereichen sowie Inkludierung der Betrachtungsfelder in Anlehnung an die Grundsätze des Ishikawa Diagramms

Die Erarbeitung der Einflussfaktoren in Tab. 2-1 dient zur Erfassung wesentlicher Parameter und erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr dient diese Auflistung der Versinnbildlichung der Fülle von Größen welche jede für sich, in unterschiedlicher Gewichtung, Wirkungen in Systemen im Allgemeinen, und im Besonderen Prüfergebnisse von Stichproben beeinflussen.

Tab. 2-1: Analyse der Einflussparameter auf die Systemwirkungen nach der Methode der '5+1 M' unter Bezugnahme auf die Unterteilung in die 3 genannten Bereiche: Entstehungs-, Ernte-, Erzeugungsphase von Komponenten (schwarz), Erzeugungsphase von Komponenten zu Systemstrukturen (blau), Im Einsatz und unter Last befindende Systemstrukturen (rot)

MATERIAL	
Herkunft / Wuchsgebiet	Wuchsgebiet in Abhängigkeit der Klimazonen der Erde
	Wuchsgebiet in Abhängigkeit der Höhenlage
	Stress bedingte Reaktionen (Reaktionsholz, traumatische Harzkanäle, etc.)
Physiologie / Anatomie	Nadelholz / Laubholz
	Spezies
	Charakteristiken im Aufbau (Zellenstruktur, Jahrringstruktur, etc.)

physikalische / mechanische Eigenschaften	Festigkeiten
	Steifigkeiten
	Rohdichte
	Feuchtigkeit
	Quellen - Schwinden, etc.
chemische Eigenschaften	Anteile der Elemente, Interaktionen, etc.
allgemeine Materialcharakteristik	duktil - spröde
	isotrop - anisotrop
	Langzeitverhalten unter Belastung (Kriechen)
	elastisch - plastisch; Anteil des linearen Abschnittes in der Kraft- Dehnungsbeziehung
	Verhalten in Abhängigkeit der Belastungsart (bei Zug, Druck, Biegung, Torsion, Schub, Knickung)
Streuungen / Interaktionen	der einzelnen Parameter
	innerhalb der Komponenten / Systemen zwischen den Komponenten / Systemen
Alter	Alter des Kambium
Holzlage im Baum	Stamm
	Wurzel
	Ast
Abmessungen	Länge, Breite, Höhe der Komponenten / Systeme
	Größeneffekte / Volumeneffekte
Sortierung	unsortiert
	Steifigkeitsklasse
	Festigkeitsklasse
	Sortierung nach optischen Kriterien, unabhängig der mechanischen Eigenschaften
Einschnittcharakteristik	Stammlage
	Einschnittbild
	Art der Einschnitttechnologie
Verbindungscharakteristik unter den Komponenten	stumpf
	Schäftung
	Keilzinkung
Oberflächenbeschaffenheit	Ebenheit (gehobelt, geschliffen, sägerau, etc.)
	Winkeltreue
	Gleichförmigkeit (Hobelschläge, Absätze, etc.)
Verbindungscharakteristik der Komponenten zu Systeme	lose - steif punktuell - vollflächig

men	regelmäßig - unregelmäßig
Verbindungsart sowie Qualität und Eignung für den Zusammenschluss der Komponenten zu Systemen	Nagelung
	Verschraubung
	Flächenpressung
	Verklebung
MASCHINE	
Waldpflegeeinrichtungen	Wertastung, Düngung, etc.
Ernteverfahren	Einzelstammnutzung, Kahlhieb
	Seilkran, Prozessor, Motormanuell, Harvester, etc.
Maschineneinstellung / Steuerung	Genauigkeit
	Wiederholbarkeit
	Flexibilität, Nachgiebigkeit
Lagerungs- und Transporteinrichtungen	Anpressdruck, etc.
	LKW, Bahn, Schiff, Förderbänder, etc.
Vorbehandlungsmaschinen	Entrindung, Fräsung, Kappung, Sortierung
Einschnitttechnologie	Gatter, Bandsäge, Kreissäge, Spaner
Steuer- und Regeltechnik	Robustheit
	Messkette (Signalerstellung, Signalumwandlung, Signalerfassung, Signalwiedergabe)
	Messsignalrate, Messpunkt, Zeitabstand
	Dynamik der Regelung - Grenzen der Regelung
	Interaktionen zwischen den Regelungen
Entkoppelung von anderen Systemen	Schwingungen
	Energieschwankungen
Weiterverarbeitung	Sortieranlagen
	Trocknungsanlagen (Frisch- Ablufttrocknung, Hochtemperaturtrocknung, Sattedampftrocknung, etc.)
	Transport / Sortierung / Zuschnittoptimierung (Führungspräzision, Abstand der Führungseinrichtungen untereinander (Rollen, etc.), Erkennung von fehlerfreien Bereichen, etc.)
	Kappung (Kappungslage gekoppelt mit Optimierung, Winkeltreue, Schneidenqualität, Schneidengeometrie, etc.)
	Keilzinkung (Zustand der Fräsgarnitur, Leimauftrag, Anpressdruck, Haltezeit, Präzision, etc.)
	Einrichtung für Klebstoffauftrag
	Einrichtung für Flächenpressung

	Hobelung (Technologie, Schneidengeometrie, Qualität, Winkeltreue)
Prüftechnik zur Festlegung der Kenngrößen von Komponenten / Systemen im Vorfeld	Steuerung (Kraft, Weg, Öldruck)
	Robustheit
	Wiederholgenauigkeit
	Kalibrierung, etc.
METHODE	
Wuchspflege / Standortpflege	Düngung, Wertastung, Auslichtung, Förderung von Z-Stämmen, etc.
Waldbewirtschaftungstyp	Kahlschlag, Einzelstammnutzung, Plenterwald
Ernteverfahren	manuell - semimanuell - maschinell
Einschnittverfahren	Art der Technologie
	Art der Vorbehandlung
Sortierung	standardisiert - bezogen auf den Einsatz - bezogen auf die Ausbeute
	visuell - maschinell
Transport / Lagerung	Technologien
Methoden der Weiterverarbeitung	Trocknung, Hobelung, Zinkung, etc.
Konditionierung / Reifung	Ausgleich des Feuchtegradienten nach der Trocknung, Klebstoffaushärtung, etc.
Prozessstabilität	Wiederholbarkeit
	Flexibilität
	Qualitätsniveau
Verbindung zwischen den Komponenten sowie von Komponenten zu Systemen	Art der Verbindung (lose, Keilzinkung, etc.)
	Langzeitverhalten
	fix - reversibel
	Fehleranfälligkeit
Prüfmethode zur Festlegung der Kenngrößen der Komponenten / Systeme im Vorfeld	Lasteinbringung (flächig - punktuell, abrupt - kontinuierlich, kontrolliert - unkontrolliert, etc.)
	Prüfung auf Biegung, Zug, Druck, ...
	Prüfkörpergröße (fehlerfreie Kleinproben - Bauteilgrößen)
	Bezugspunkte für die Erfassung der Messgrößen
	Wiederholgenauigkeit / Stabilität
	Relevanz der gewählten Prüfkfiguration im Vergleich zum Einsatz in der Praxis
	Prüfklima - Praxisklima

	Modell in der Betrachtung - Wirklichkeit
	analog / digital
	Messrate
Datenerfassung in der Produktion / während der Prüfung	Datenerfassungszeitpunkt (kontinuierlich, diskontinuierlich, definierte Zeitpunkte während der Prüfungsdurchführung)
	Echtzeitkontrolle
Einbausituation des Systems	Klima, Präzision, Flexibilität, etc.
	punktuell - flächig
Lasteinbringung	gleichmäßig - ungleichmäßig
	stoßartig - kontinuierlich
MENSCH	
Motivation / Einstellung	persönlicher Bezug, Lebenseinstellung, Stellung der Tätigkeit im Umfeld, etc.
	Wertschätzung gegenüber dem Produkt, der Tätigkeit
	Genauigkeit der Durchführung
	Qualität kontinuierlich - diskontinuierlich
Sorgfalt	unbewusste Vorsortierung - bewusste Vorsortierung
	Vorbeanspruchung durch unsachgemäßen Umgang, etc.
	Nachtrocknung durch unsachgemäßer Aussetzung außerhalb des Klimas im Einsatz
	Bildung, Weiterbildung
	standardisierte Tätigkeit - seltene, unerprobte Tätigkeit
	zeitlicher Abstand zwischen den Tätigkeiten (Lernkurve)
Wissen / Erfahrung	Relevanz und Zusammenhänge kennen / erkennen
	Einschulung / Unterweisung
	Interpretation
	Kontrolle
Entscheidungsfreiheit und Willigkeit	Kreativität, Selbstvertrauen, Zuspruch von Außen
	Improvisationen (sachgemäß / unsachgemäß)
zeitliche Freiheit	Zeitdruck
Tagesverfassung / persönliche Verfassung	Konzentrationsfähigkeit

Eigenkontrolle	Selbstcheck
Ablesegenauigkeit bei maschinellen Einrichtungen / Messeinrichtungen	Anzahl der Kommastellen visuell erkennbar bzw. tatsächlich seitens der Messeinrichtung erfassbar Wiederholgenauigkeit als Beispiel bei dynamischen Messungen
Planung und Bemessung	Sicherheiten Wissen / Erfahrung zur Annahme der Lastsituation (Eigen- und Fremdlasten) Großprojekte - Kleinprojekte
MITWELT	
Klein- und Großklimatische Bedingungen	Temperatur Luftfeuchte Luftdruck Zeitverhalten (stabil - diskontinuierlich, Änderungen abrupt - stetig)
natürliche Extremereignisse	Unwetter, Vulkanausbruch, Erdbeben, Hangrutsch, Trockenzeit, Überschwemmung, Windbruch, Schneebruch, etc.
Wasser- und Nährstoffversorgung	Zeitverhalten Intensität (Unterversorgung - Überversorgung)
Eintrag von Schadstoffen	Zeitverhalten Intensität Art der Schadstoffe
Sauberkeit	Arbeitsplatz Lagerung Transport
Mithilfe, Dynamik der Helfer	bei Reparatur, etc.
Marktsituation - Einfluss auf Produktion und Lagerung, etc.	steigende - stagnierende - degressive Nachfrage bei Einkauf und Verkauf periodische Schwankungen im Einkauf sowie Absatz Einkaufsmenge - Absatzmenge allgemein Produktionsvolumen Wertschätzung des Produktes am Markt Preispolitik
Stellung der Unternehmen und der Produkte bei den Stakeholdern als Einfluss auf Produktion, Lagerung, etc.	respektiert, anerkannt - missbilligt, kein Vertrauen
Prüf- und Auswerteverfahren	standardisiert - entkoppelte Lösungen

	Anzahl der Probekörper in der Stichprobe, sowie Anzahl der Stichproben
	statistische Auswertung nach Schema oder der Situation angepasst
	Ringanalyse - Institutslösung / Firmenlösung
Prozessstabilität	Beeinflussung der gesamten Produktionskette von Außen
Last	Anteil fixer zur variabler Last
	Zeitverhalten
Lebensdauer	Festlegung durch Dritte
MANAGEMENT	
Priorität	Rang des Produktes
Motivation / Einstellung	persönliche Bindung, etc.
Stabilität	des Führungsstabes / der Entscheidungen
Entscheidungszeitraum	kurzfristig - langfristig
Zeitmanagement	gut - schlecht
Koordination / Flexibilität / Kreativität	Planung, Reaktionsvermögen, Organisation, etc.
Wissen	Fachwissen - allgemeines Wissen
Art der Waldbewirtschaftung	Plenterwald, etc.
Kontrollmechanismen	für das Produkt
	für die Mitarbeiter
	für den Markt
Festlegung von Grenzen	Qualitätsniveau + Spielraum
	Klassen + Klassenbreite
	Warn- und Eingriffsgrenzen in der Produktion, sowie weiteren relevanten Abteilungen
Marketing als indirekte Einflussgröße	Produktdefinition
	Produktplatzierung
Planung und Ablauf der Prüfungen zur Festlegung der Kennwerte im Vorfeld	Akklimatisierung
	Prüfkonfiguration
	Zeitmanagement
	Prüfeinrichtungen

In wieweit sich die erfassten Parameter gegenseitig beeinflussen und welche Zusammenhänge all diese untereinander besitzen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Jedoch dient diese Darstellung als Basis für die Definition und Festlegung der Prüfverfahren und der dabei ermittelten Parameter, sowie zur Bewusstseinsbildung

inwieweit innerhalb von Prüfungen Einflussgrößen als weitestgehend konstant zu halten sind, um den Ergebnissen mehr an Gewicht und Vertrauen zukommen lassen zu können.

2.4 Einteilung der Systemeffekte

Die Effekte, welche durch die Kombination der Komponenten in den beschriebenen Systemaufbauten auftreten, können in folgende drei Hauptgruppen untergliedert werden:

- Effekte mechanischen Ursprungs
- Effekte statistischen Ursprungs
- Effekte auf Basis von Kombinationen beider

2.4.1 Effekte mechanischen Ursprunges

Die Effekte mechanischen Ursprunges betreffen vor allem die Lastverteilung proportional zur Steifigkeit bei miteinander verbundenen Komponenten, von den weicheren zu den steiferen Komponenten. Dieser Effekt wird als 'load sharing' in der Literatur und den Normen bezeichnet und ist nachfolgend in den Kapiteln 3.1 und 3.2 näher erläutert. Ein weiterer Effekt betrifft die Lastumverteilung nach erfolgtem Teilausfall von Komponenten sowie Elementen in einem System. Dies wird unter dem Begriff 'redistribution of load', in Anhängigkeit vom 'postyield behaviour' ebenfalls in Kapitel 3.1 und 3.2 beschrieben. Ein weiterer Effekt behandelt die Interaktionen zwischen den lastverteilenden Elementen und Komponenten und den lastabtragenden Elementen und Komponenten in Form von parallelen, in Abständen zueinander angeordneten Trägern. Der hier zugeordnete Begriff ist die 'partial composite action' und wird in Kapitel 3.1 beschrieben.

2.4.2 Effekte statistischen Ursprunges

Die Effekte statistischen Ursprungs beziehen sich hier auf die vorwiegend parallele Anordnung der Komponenten im Systemaufbau. Hierbei gilt es einerseits das System im Mikrobereich von Komponenten, aufgebaut aus Elementen, zu berücksichtigen, andererseits den Aufbau des Systems aus Komponenten im Makrobereich zu unterscheiden. Durch den parallelen Systemaufbau ergeben sich redundante Strukturen welche ihrerseits die Sicherheit gegen ein Versagen steigern. Hierbei resultieren positi-

ve Effekte aus der verringerten Wahrscheinlichkeit, dass Komponenten und Elemente mit geringem mechanischem Potential in Bereichen hoher Beanspruchung eingesetzt werden. Durch die steigende Anzahl von Komponenten in einem System ergeben sich zudem Ausgleichseffekte durch Umlagerungen zwischen schwachen und starken Teilbereichen der Komponenten. Andererseits erhöht diese steigende Anzahl auch die Auftretenswahrscheinlichkeit von sehr schwachen Teilbereichen in einem System. Weitere statistische Effekte bilden sich in der Streuung der mechanischen Eigenschaften, innerhalb und zwischen den Komponenten, ab. Bei positiver Korrelation zwischen der Steifigkeit und der Festigkeit stellt sich somit ein erhöhtes Potential des Ausgleiches und der Homogenisierung dar. Dieser Effekt resultiert aus der 'load sharing rule' wonach Komponenten die Last proportional zu ihrer Steifigkeit anziehen. Durch die positive Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit ist somit auch eine höhere Festigkeit bei steiferen Komponenten zu erwarten. Dieser Ausgleich bildet sich in einer Reduzierung der Streuungen ab welche ihrerseits eine Erhöhung der für die Bemessung wichtigen 5 % Quantile der Festigkeiten, unter Betrachtung eines weitgehend konstanten Mittelwertes, bewirken (siehe Diagramm 2-2).

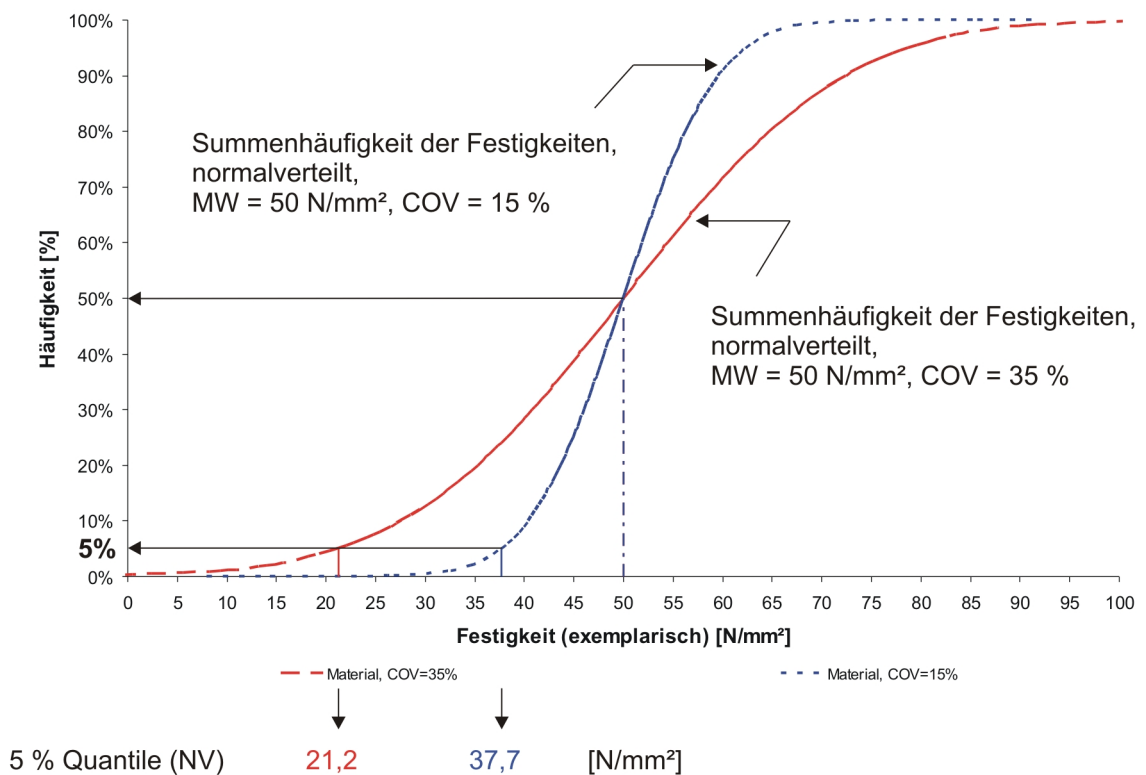


Diagramm 2-2: Einfluss der Streuung auf die Bestimmung der 5 % Quantile unter Betrachtung von normalverteilten Festigkeiten

Des Weiteren resultiert aus der Reduzierung der Streuungen der Festigkeiten auf der Materialseite, bei gleich bleibender Lastverteilung, eine Reduktion des Überlagerungsanteiles der Verteilungsfunktionen bei Betrachtung des probabilistischen Sicherheitskonzeptes. Dieser Aspekt führt somit auch zu einer möglichen Reduzierung des Sicherheitsbeiwertes des Materials (siehe Diagramm 2-3).

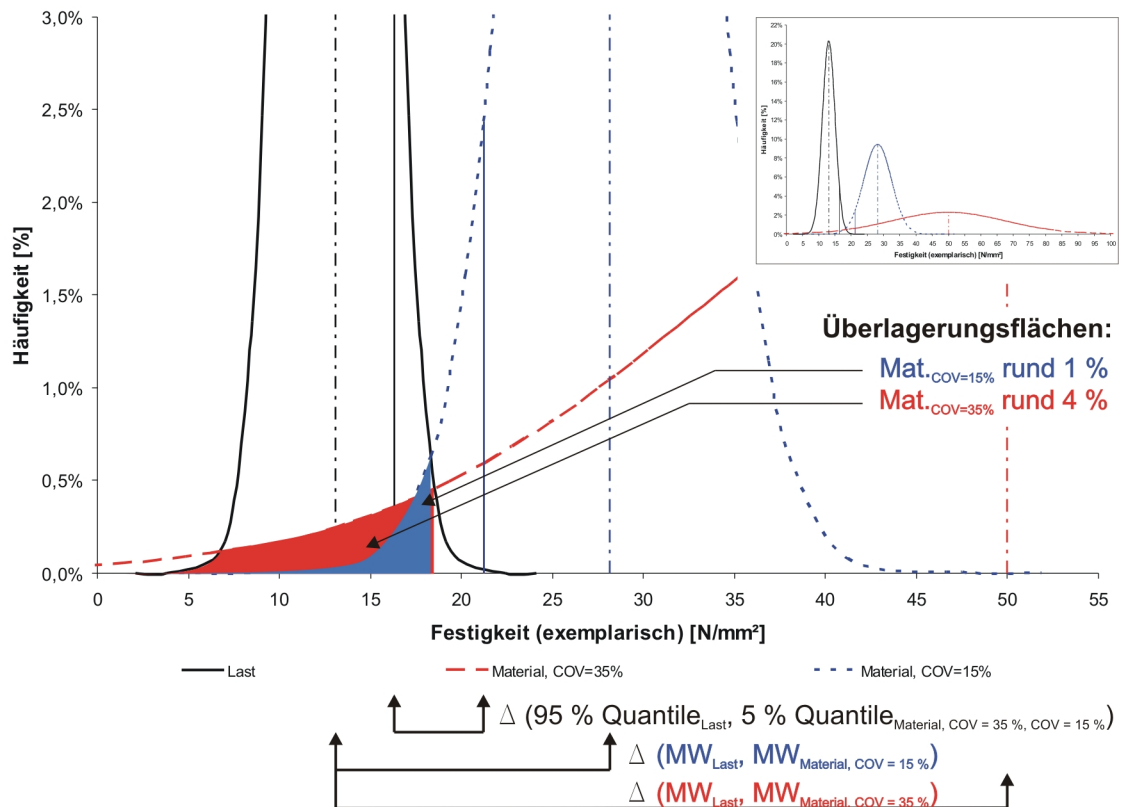


Diagramm 2-3: Betrachtung von Aspekten des probabilistischen Sicherheitskonzeptes der Bemessung

Diese Systemeffekte statistischen und mechanischen Ursprunges treten in der Realität gemeinsam auf und sind als solche in ihrer Tiefe nur in Modellen isoliert zu betrachten. Hierzu schrieben Cramer et al., 2000: "*Load sharing in wood assemblies is both a structural phenomenon and a statistical phenomenon.*". Modelle stellen als solche jedoch immer eine Annäherung der Problematik dar und sind hinsichtlich der betrachteten Teilbereiche optimiert. Gupta et al., 1992 vermerkten dazu: "*Models do not present reality, they only approximate it.*". Über Parameterstudien lässt sich eine Bandbreite der in Betracht gezogenen Einflussgrößen bestimmen welche anschließend jedoch mit Hilfe der Versuchstechnik zu verifizieren sind.

In den nationalen und internationalen Regelwerken werden die Systemeffekte über den Systemfaktor oder Systembeiwert in der Bemessung berücksichtigt. Diese Faktoren stellen ein Konglomerat aus den besprochenen Teileffekten dar. Um das Potential von Systemaufbauten erweitert und in ehrlicher Weise nützen zu können, ist eine möglichst getrennte Erfassung der Effekte zielführend, vor allem in Abhängigkeit der beeinflussenden Hauptparameter um nach der Aussage von Foschi et al., 1990 "*It is important to consider this system behaviour so as to not unduly penalise the performance of the products*", die Sicherheit in der Beurteilung von Systemwerkstoffen zu erhöhen und weiterführend gezielte Entwicklungen zu ermöglichen.

3 LITERATURRECHERCHE

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Publikationen im nationalen und internationalen Bereich recherchiert. In den folgenden Kapiteln werden einzelne Stellen, soweit sie für die Betrachtung der Themenstellung als relevant betrachtet wurden, exzerpiert. Im Abschluss wurde auf eine zusammenfassende Darstellung in Kurzform Wert gelegt.

3.1 Systeme aus über lastverteilende Strukturen miteinander gekoppelten Komponenten

Im Kapitel 2.2.1 wurde bereits eine allgemeine Definition dieser Systemstrukturen erarbeitet. Ziel der folgenden Darlegungen ist eine Sammlung von Erkenntnissen aus der durchgeführten Literaturrecherche. Viele Bereiche dieses Kapitels sind auch auf das Kapitel 3.2 im Sinne des dort beschriebenen Systems aus kontinuierlich verbundenen Komponenten anwendbar.

Als ein wesentliches Merkmal von Systemen ist die Erhöhung der bemessungsrelevanten 5 % Quantile der Festigkeit durch die Verringerung der Streuung gegenüber jener der Einzelkomponenten (Mtenga et al., 1995, Cramer et al., 2000, Rosowsky und Yu, 2004, Hansson und Isaksson, 2001) zu nennen. Dies ist ein Ergebnis aus folgenden Effekten wie sie auch in Mtenga et al., 1995, sowie, Hansson und Isaksson, 2002 beschrieben wurden:

- Es besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass Komponenten oder Elemente mit geringem mechanischen Potential in einem Bereich höchster Beanspruchung verbaut werden
- Weiters führt die positive Korrelation zwischen der Steifigkeit und der Festigkeit dazu, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass eine Komponente mit hohem Verformungswiderstand ebenfalls eine hohe Festigkeit besitzt und somit nach der Lastverteilungsregel, welche besagt, dass die Belastung auf die Komponenten proportional zu ihrer Steifigkeit auftritt, diese auch mehr an Belastung aufnehmen können.

Hansson und Thelandersson, 2000 hielten dazu folgendes fest: *"It is well known that there is a significant statistical system effect for trussed rafters related to the variability of strength within members. The low probability that sections with locally high stresses*

will coincide with weaker sections of the timber elements provides an extra safety margin, which is not considered in standard engineering design."

Die Systemwirkungen bei lastverteilenden Systemstrukturen resultieren aus dem Zusammenspiel der lastabtragenden Bereiche aus parallelen, zueinander in Abstand angeordneten Komponenten, und der lastverteilenden, plattenförmigen Struktur. Beide Anteile sind weitgehend vollflächig miteinander verbunden. Hierbei ist die grundsätzliche Aufgabe der lastabtragenden Komponenten die vertikalen Lasten abzuführen, und jene der lastverteilenden Struktur die vertikale und horizontale Belastung horizontal auf die Trägerstruktur zu verteilen. Auf Basis dieser Tragstruktur kommt es zu Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten und Elementen welche nach Rosowsky und Yu, 2004 in folgende Teileffekte untergliedert werden:

- 'load sharing'
- 'redistribution of load'
- 'partial composite action'

In den folgenden Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 werden das 'load sharing' und die 'redistribution of load' weitgehend getrennt behandelt. Die 'partial composite action' als Synonym für das Zusammenspiel der lastabtragenden Struktur und der lastverteilenden Struktur wird in diese vorhin genannten Verweise, im Zuge der Erfassung der Parameter, mitgeführt.

3.1.1 'load sharing'

Unter 'load sharing' (sprich Lastverteilung) wird die Lastverteilungswirkung der Plattenstruktur horizontal über die lastabtragende Struktur definiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die Last proportional zur Steifigkeit der Träger verteilt. Somit entfällt auf Träger hoher Steifigkeit eine höhere Belastung als auf weichere Komponenten (siehe Gromala und Sharp, 1988, Canadian Wood Council, 1994, Liu und Bulleit, 1995, Mtenga et al., 1995, Douglas und Line, 1996, Faherty und Williamson, 1999, Cramer et al., 2000, Hansson und Isaksson, 2002, und Rosowsky und Yu, 2004). Dies geschieht unter Beachtung des sich ergebenden Zwanges nahezu gleicher Verformungen der Träger bei ausreichend steifer Plattenstruktur und Verbindung zwischen Träger und Platte. Mtenga et al., 1995 liefert hierzu folgenden erweiterten Ansatz: "*Since there is strong evidence of load sharing in these roof system studies, there exists the possibility of*

loads distributing away from weak components and thus leading to a situation where the weak components does not necessarily control the failure of the system, as is assumed in the current design procedures." Dies steht zusammen mit der Aussage von Rosowsky und Yu, 2004: " *The member which fails first in a repetitive-member wood system may not be the weakest (e.g., lowest strength) member due to the fact that the weaker member likely will be less stiff and thus attract less load.*" im Widerspruch zur Betrachtung der derzeit üblichen Berechnung von Dachsystemen (ref. von Mtenga et al., 1995). Darin wird jeder lastabtragenden Komponente eine ihr zustehende 'tributary area' (Abb. 3-1), sprich eine anteilige Fläche, zur Lastabtragung zugewiesen. Dieser Ansatz setzt somit eine Gleichverteilung der abzutragenden Last voraus, unabhängig vom mechanischen Potential der Einzelkomponente.

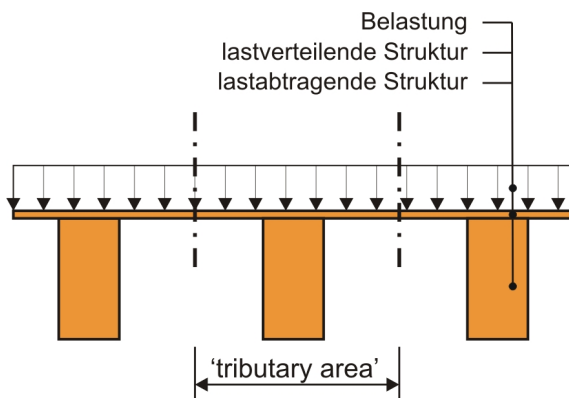


Abb. 3-1: Aufbau eines Systems aus lastverteilenden und lastabtragenden Strukturen, sowie Darstellung der Betrachtung der 'tributary area'

Bei Betrachtung von zwei frei gewählten Arbeitslinien von Einzelkomponenten in einem Kraft-Weg Diagramm (siehe Diagramm 3-1) lässt sich, unter Annahme eines starren Verbundes zwischen den Komponenten und Vollbeanspruchung beider Komponenten die Aussagen von Mtenga et al., 1995 und Rosowsky und Yu, 2004 bestätigen. Hierbei bedeuten A_{K1} , A_{K2} , A_{sys} die Querschnittsflächen der Komponenten K1, K2, sowie des Gesamtsystems (K1+K2). Die Verformungen als Wege sind mit den Bezeichnungen s_{K1} , s_{K2} und s_{sys} den jeweiligen Komponenten, sowie dem System, bei Beanspruchung auf dem Niveau des dargestellten Belastungslevels, zugewiesen. Das Kraft-Weg Diagramm selbst beinhaltet die Arbeitslinien der Komponenten, als Zusammenhänge zwischen der Belastung und der sich daraus ergebenden Verformung.

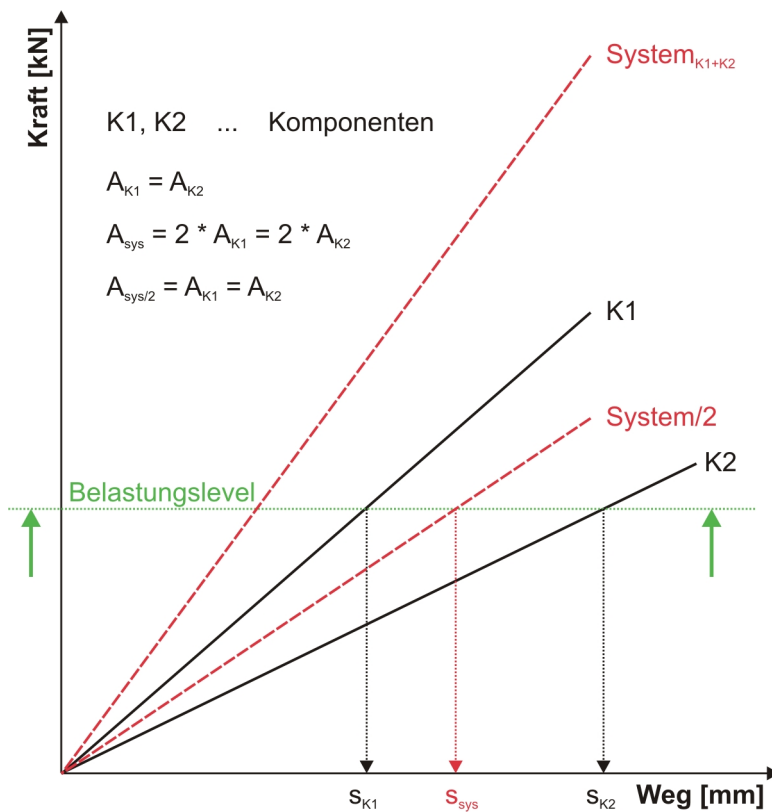


Diagramm 3-1: Kraft-Weg Diagramm zweier ideal spröder Arbeitslinien von unabhängig gewählten Komponenten, sowie Darstellung der 'load sharing rule' unter Betrachtung eines idealen Systemverhaltens

Das Systemverhalten bei lastverteilenden Strukturen wird somit in unterschiedlichem Maße von folgenden Parametern bestimmt:

- Seitens der lastabtragenden Struktur:
 - Materialverhalten (duktil, spröde)
 - Steifigkeit (E) und Festigkeit (f), sowie deren Streuungen
 - Korrelation (r) zwischen Steifigkeit und Festigkeit ($r(E,f)$)
 - Anzahl (n) der Träger im System
 - Abstand (a) der Komponentenschwerpunkte zueinander
 - freie Spannweite (l_0) der Tragstruktur

- Seitens der lastverteilenden Struktur:
 - Steifigkeit und Festigkeit, sowie deren Streuungen

- Korrelation zwischen Steifigkeit und Festigkeit bei Strukturen aus mehr als einer Komponente
- freie Spannweite

- Seitens der Verbindung zwischen lastverteiler- und lastabtragender Struktur
 - Art der Verbindung (lose, fest)
 - Steifigkeit der Verbindung (weich, starr)
 - Abstand der Verbindungen (punktuell, vollflächig)
 - Kennlinie / Arbeitslinie der Verbindung

- Seitens der Last
 - Höhe der Last
 - Verhältnis variabler zur fixen Last
 - Verteilung der Last (punktuell, vollflächig)
 - Zeitverhalten der Last (gleich bleibend - veränderlich)

Hinsichtlich der Einflüsse der unterschiedlichen Parameter bestehen stark variierende Auffassungen. So definierten Liu und Bulleit, 1995 einerseits die Streuungen der Festigkeiten, sowie andererseits die Eigenschaften der Trägerstruktur nach Teilausfällen von Komponenten ('postyield behaviour') als die am stärksten beeinflussenden Parameter für das Überlastungsverhalten von Systemen. Liu und Bulleit führten hierzu Untersuchungen auf Basis eines 3-linearen Federmodells, unter Berücksichtigung von Interaktionen zwischen den Komponenten, durch. Das Federmodell besteht aus einem analogen Träger, als Komponent, mit zugewiesener Belastung nach der 'tributary area'. Die Versagensbetrachtung eines Trägers im System lässt in der Modellierung ein Teilversagen mit Restfestigkeit und Wiederbelastung bei reduzierter Steifigkeit linear zu. Mit zunehmender Streuung der Festigkeiten erhöht sich die Reservekapazität, welche sich wiederum durch die Umlagerung der Belastungen nach Teilversagen auf Komponenten hoher Festigkeit und respektive hoher Steifigkeit positiv auswirkt. Der Begriff der 'Reservekapazität' bezeichnet jene Differenz zwischen der Festigkeit des Systems oder der Komponente beim ersten Teilausfall und der erreichten Festigkeit bei Systemversagen, und ist somit ein Maß für das Potential von Komponenten nach Teilausfall

noch am weiteren Tragverhalten mitzuwirken. Liu und Bulleit bezeichneten die Festigkeit als dominierenden Parameter für das Systemverhalten bei spröden Materialien. Bei elastisch-plastischem Materialverhalten erhöht sich gegenüber spröden Systemen bei reduzierter Streuung der Festigkeiten die Anzahl der Teilausfälle vor dem Systemversagen. Unter dem 'postyield' - Verhalten ist jenes mechanische Potential des Einzelträgers zu verstehen, welches nach einem Teilversagen noch zu erwarten ist. Dies schließt einen Abfall der Steifigkeit und Festigkeit eines Systems sowie von Komponenten nach einem Teilausfall nicht aus. Eine geringere Streuung der Steifigkeit reduziert die Systemfestigkeit, erhöht jedoch die Reservekapazität. Weiters wird angemerkt, dass die mechanischen Eigenschaften der Plattenstruktur bei duktilen Systemen einen größeren Einfluss besitzen als bei spröden Systemen. Die Steifigkeit der Verbindungsmittel wird als geringer Einfluss auf das Systemverhalten bewertet. Jedoch benötigt man die Verbindung zur Aufrechterhaltung eines mittragenden, sozialen Verhaltens nach erfolgtem Teilversagen von Komponenten. Zusammengefasst halten Liu und Bulleit, 1995 fest, dass eine hohe Reservekapazität der Komponenten nach Teilversagen, sowie eine große Streuung der Festigkeiten der Komponenten am stärksten zur Erhöhung der Systemfestigkeit beitragen. Auch das Ausfallsverhalten der Komponenten ist stark abhängig von der Reservekapazität, welche wiederum hauptsächlich bestimmt wird durch die Eigenschaften der Komponenten nach Teilversagen, der Streuung der Festigkeiten. Diagramm 3-3 bis Diagramm 3-8 stellen Zusammenhänge zwischen der Traglast des Systems und den betrachteten Einflussgrößen der jeweiligen Parameterstudie dar und reflektieren somit den jeweiligen relativen Einfluss. Des Weiteren lässt sich aus den Darstellungen die Form der Funktionsentwicklung erkennen. In die Betrachtungen inkludiert sind die Ergebnisse aus Modellierungen von sprödem- (rot) sowie elastisch-plastischem Materialverhalten (blau). Die Diagramme spiegeln im Wesentlichen die vorab zusammengefassten Erkenntnisse wieder. Deutlich ersichtlich ist das stark erhöhte Traglastvermögen von elastisch-plastischen Materialverhalten gegenüber Systemen aus spröden Komponenten.

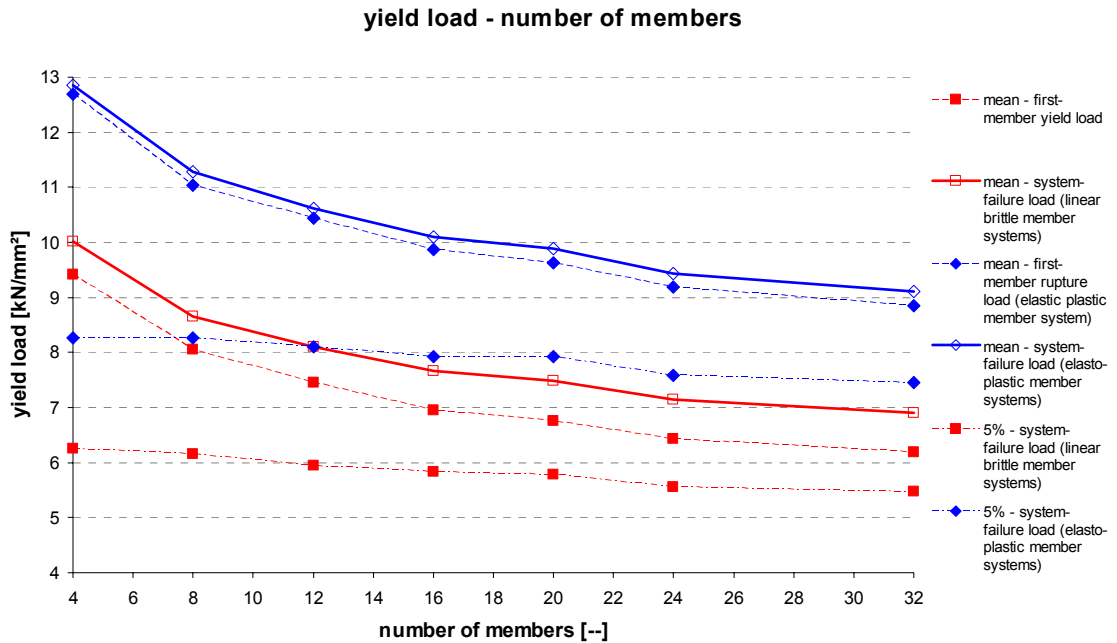


Diagramm 3-2: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der Anzahl der mitwirkenden last-abtragenden Komponenten, nach Liu und Bulleit, 1995

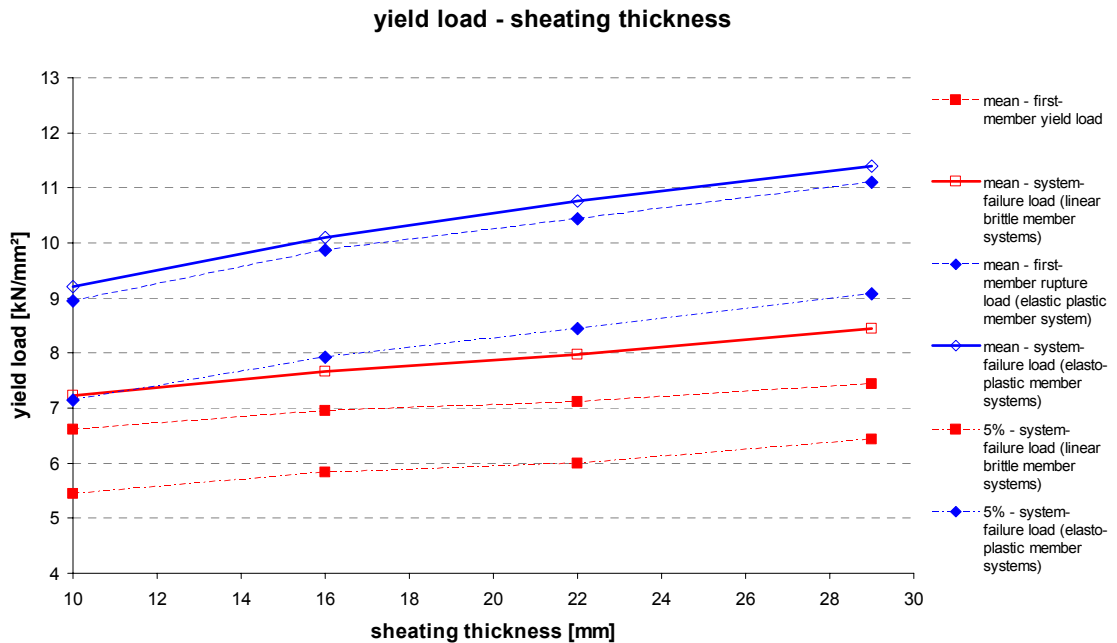


Diagramm 3-3: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der Stärke der lastverteilenden Struktur, nach Liu und Bulleit, 1995

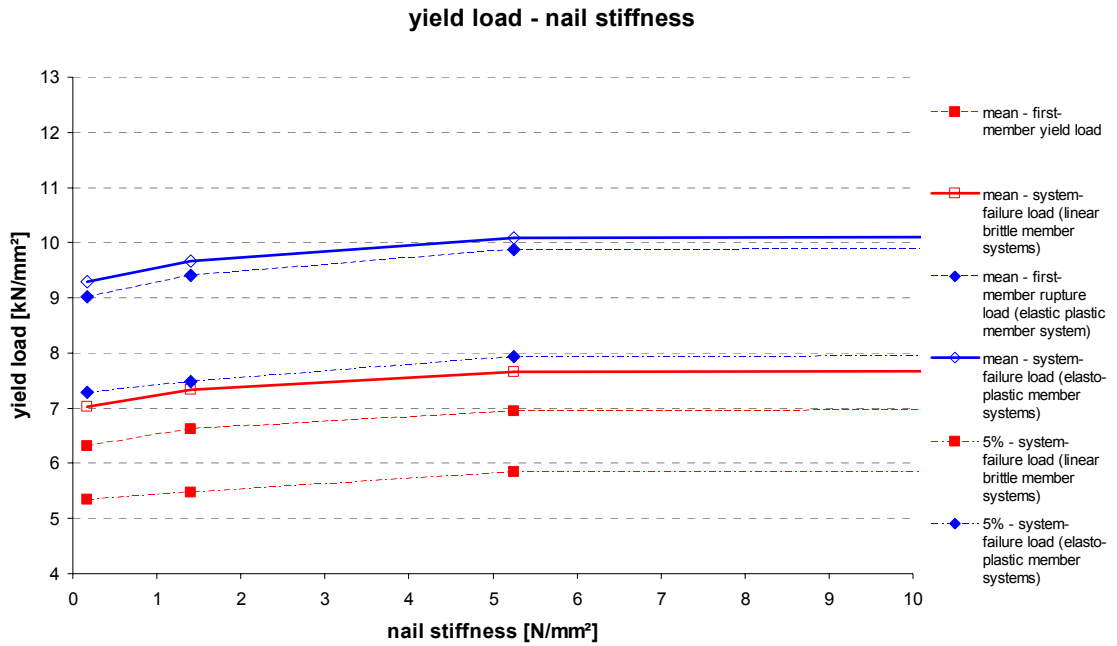


Diagramm 3-4: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der Verbindungssteifigkeit zwischen der lastverteilenden- und der lastabtragenden Struktur, nach Liu und Bulleit, 1995

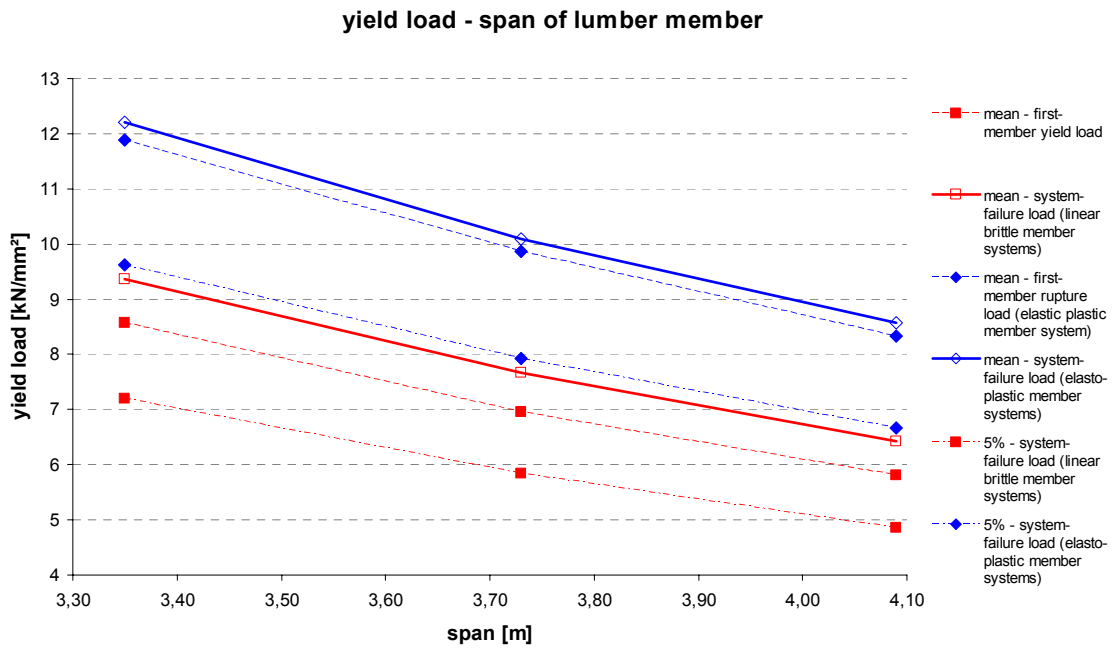


Diagramm 3-5: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der Spannweite der lastabtragenden Komponenten, nach Liu und Bulleit, 1995

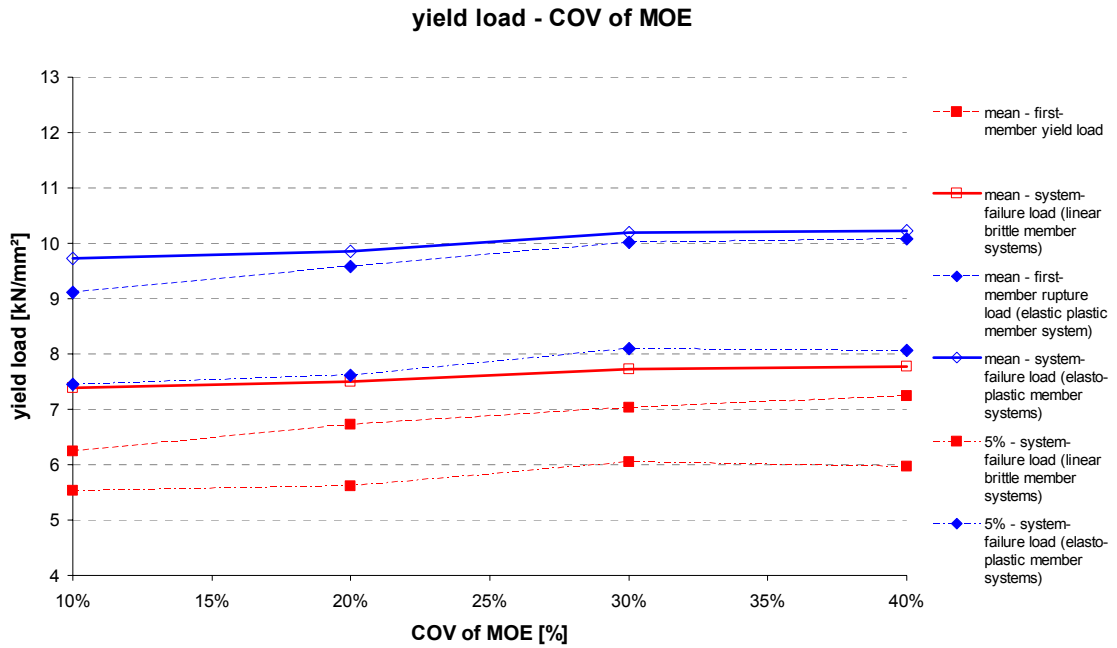


Diagramm 3-6: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der relativen Streuung von *MOE*, nach Liu und Bulleit, 1995

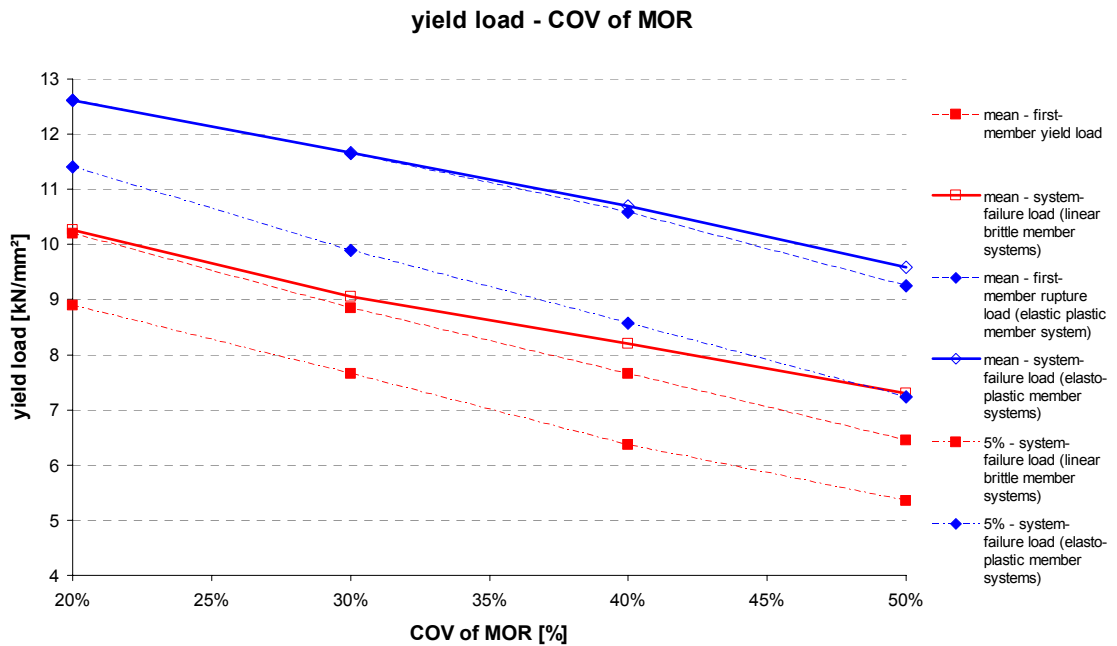


Diagramm 3-7: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der relativen Streuung von *MOR*, nach Liu und Bulleit, 1995

yield load - correlation of MOR and MOE

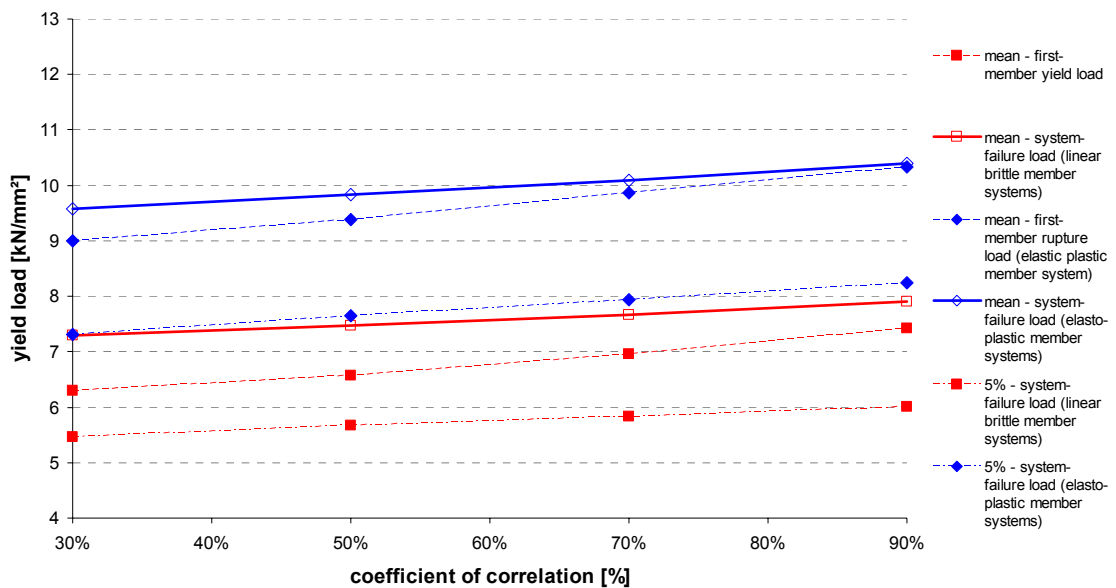


Diagramm 3-8: Darstellung der Ergebnisse aus der Parameterstudie der Korrelation zwischen MOR und MOE, nach Liu und Bulleit, 1995

Bulleit und Liu, 1994 beziehen das Langzeitverhalten in die Beurteilung des Systemzugewinnes mit ein und postulierten, dass durch das Zeitverhalten eine Ansammlung von Teilausfällen möglich ist welche schlussendlich auch zu einem Systemversagen führen kann. Die Ergebnisse dazu basieren auf Modellierungen nach dem Balken-Federmodell nach McCutcheon, 1977 und 1984. Bulleit und Liu, 1994 merkten an, dass der Faktor Zeit entscheidend den 'load sharing factor' reduziert und somit in der Betrachtung von Systempotentialen einzubeziehen ist. Dies wird in einer späteren Arbeit von Liu und Bulleit, 1995 bestätigt, worin sie zudem festhielten: *"In wood floor and roof systems, the beneficial component interactions increase the stiffness and strength of the system; on the other hand, creep rupture in wood results in a decrease of strength in the system. Reliability analysis without cumulative damage overestimates the reliability level. Thus, load duration effects must be included in reliability analysis."* Es sei in diesem Zusammenhang angemerkt, dass der Einfluss der Zeit auf das Tragverhalten von Holzkonstruktionen bekannt ist und diesem Umstand über Bemessungsfaktoren, verankert in den gültigen Normenwerken, Rechnung getragen wird (siehe Diagramm 3-9). Inwieweit sich das Langzeitverhalten von Systemen von jenem der Einzelkomponenten unterscheidet konnte nicht schlüssig recherchiert werden.

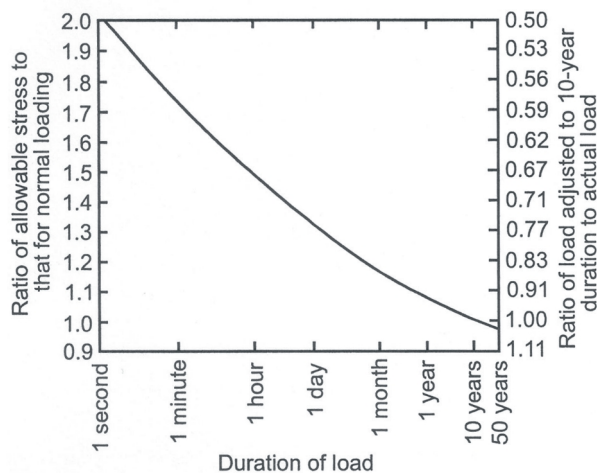


Diagramm 3-9: Zusammenhang des Tragvermögens von der Belastungszeit, entnommen dem Beitrag von Kretschmann und Green, 1999

Weites geben Bulleit und Liu, 1994 an, dass das Systemverhalten hauptsächlich von der Festigkeit sowie der Streuung der lastabtragenden Struktur, und nur in geringem Masse von der Korrelation zwischen der Festigkeit und Steifigkeit abhängig ist, und schließen mit der Aussage: "*Thus, the determination of ψ (Anm.: Systemfaktor) should be related to the COV of MOR.*"

Weitere Parameter, welche jedoch nur geringen Einfluss ausüben, sind die Stärke der Plattenstruktur, die Streuung der Steifigkeit der Träger, sowie die Steifigkeit der Verbindung zwischen Platte und Träger (Bulleit und Liu, 1994).

Douglas und Line, 1996 untersuchten die Leistungsfähigkeit von Systemen anhand von mechanischen Ansätzen und postulierten, dass sich der 'load sharing factor' mit ansteigender Streuung der Steifigkeit bzw. mit zunehmender Korrelation zwischen Festigkeit und Steifigkeit der Träger erhöht. Hinsichtlich der Anzahl der mitwirkenden Systemkomponenten wurde festgehalten, dass mit zunehmender Anzahl n die Wahrscheinlichkeit eines Teilausfalles bei gleichem Lastniveau zunimmt, gleichzeitig aber durch die Redundanzen an Komponenten ein progressiver Systemausfall weitgehend verhindert wird. Es wurde kritisch vermerkt, inwieweit Teilausfälle in der Praxis, in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit, toleriert werden können.

Gromala und Sharp, 1988 postulierten, dass eine geringe Streuung der Steifigkeiten und Festigkeiten die Sicherheit des Systems reduziert. Aufgrund der geringen Differenzen zwischen den Komponenten wird bei Teilausfällen eine Lastaufnahme der verblei-

benden Komponenten zunehmend unwahrscheinlicher, da die Reservekapazitäten zwischen den einzelnen Komponenten ebenfalls kaum Differenzen aufweisen. Dabei verweisen auf sie auf den ASTM D 2018-62:1962 welcher den 'load sharing factor' auf der Annahme eines mittelnden Effektes der unter gegenseitigem Zwang stehenden Komponenten definiert. Durch diesen Zwang von mindestens 3 parallelen Komponenten werden diese als parallel wirkendes System betrachtet. Aus diesen Annahmen ergeben sich folgende, in der Formel 3-1 und Formel 3-2, dargestellte Zusammenhänge.

$$f_{mean, System(n=3)} = f_{mean, Komponente}$$

$f_{mean, System(n=3)}$ Kennwert der Systemfestigkeit bei der Anzahl der mitwirkenden Komponenten $n = 3$
 $f_{mean, Komponente}$ Kennwert der Festigkeit der Einzelkomponente

Formel 3-1

$$f_{k, System} = \frac{f_{k, Komponente}}{\sqrt{n}}$$

$f_{k, System}$ charakteristische Festigkeit der Systemfestigkeit
 $f_{k, Komponente}$ charakteristische Festigkeit der Einzelkomponenten
 n Anzahl der mitwirkenden Komponenten in einem System

Formel 3-2

Nach dem ASTM D 2018-62:1962 stellt sich der 'load sharing factor' als Funktion der Steifigkeit der Komponenten, der Spannweite der Träger sowie des Trägerabstandes dar.

Gromala und Sharp, 1988 führten Modellierungen an Systemen auf Basis des Verteilungsmodells nach Weibull, 1939 durch wobei der Einfluss der Komponentenanzahl n über Variation des Formparameters, bei konstantem Lageparameter, einbezogen wurde. Auf Basis des statistischen Modells resultiert aus der Erhöhung des Formparameters ein ansteigender Mittelwert tendenziell gegen den Lageparameter (siehe Diagramm 3-10). Wie bereits Gromala und Sharp, 1988 sowie Rosowsky und Yu, 2004 postulierten, widerspricht dies dem Ansatz der Betrachtung eines ideal parallelen Systemwirkens bei konstantem Mittelwert, wie dies im ASTM D 2018-62:1962 festgehalten wurde.

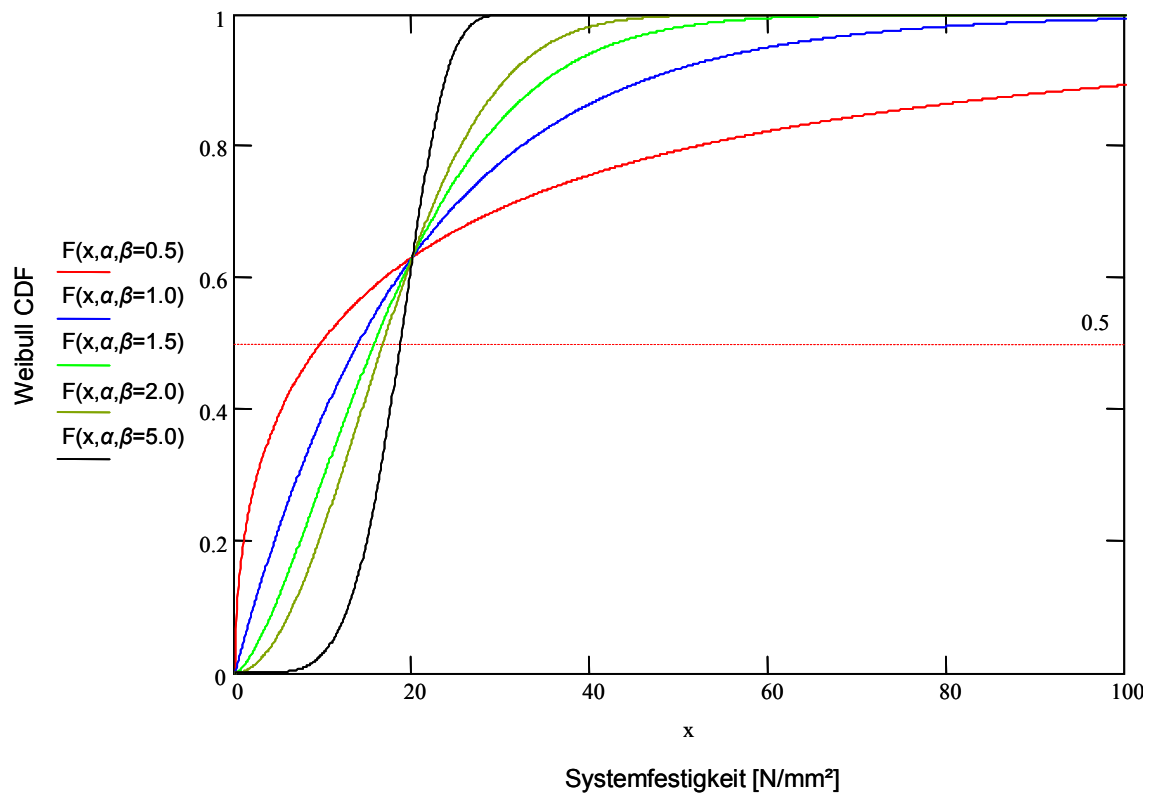


Diagramm 3-10: Darstellung der Verteilungsfunktionen der Weibullverteilung, in Abhängigkeit des Formparameters β , bei konstantem Lageparameter α .

Die Arbeit von Rosowsky und Yu, 2004 beinhaltet die Aufarbeitung der Regelungen seitens des LRFD:1996 welcher im Wesentlichen eine Fortsetzung des ASTM D 2018-62:1962 darstellt. Dabei wurde ein System, bestehend aus 3 lastabtragenden Komponenten, als Bezugsgröße definiert und die Faktoren des 'load sharing' dahingehend festgelegt. Bei Gromala und Sharp, 1988 wurde der Mittelwert der Festigkeiten des Systems jenem der Komponenten gleich gestellt, jedoch die relative Streuung nach der Formel 3-3 für $n = 3$ definiert. Die Bezugsgröße der Streuung der Festigkeiten der lastabtragenden Einzelkomponenten wurde mit $COV = 16\%$ festgelegt. Die Berechnungen erfolgten auf Basis der Normalverteilung. Somit ergibt sich über die Zusammenhänge nach Formel 3-4 und Formel 3-5 ein Zugewinn durch das System von 15 % bei der 5 % Quantile der Festigkeit und somit ein 'load sharing factor' von 1,15.

Die Annahmen von LRFD:1996 beruhen auf der Grundlage von normalverteilten Festigkeiten und eines konstanten Mittelwertes. Die relative Streuung von $COV = 16\%$ gilt im Sinne des probabilistischen Sicherheitskonzeptes als sehr konservativer Ansatz. Das Diagramm 3-11 stellt den 'load sharing factor' in Anlehnung an den LRFD:1996 in

Abhängigkeit der Eingangsstreuung dar und verdeutlicht das den Annahmen zugrunde gelegte Potential von ideal parallel wirkenden Systemen. Bei durchaus übliche Streuungen von $COV = 20 - 25 \%$ und unter Belassung der Komponentenanzahl $n = 3$ ergeben sich somit 'load sharing factors' von rund 1,21 und 1,30.

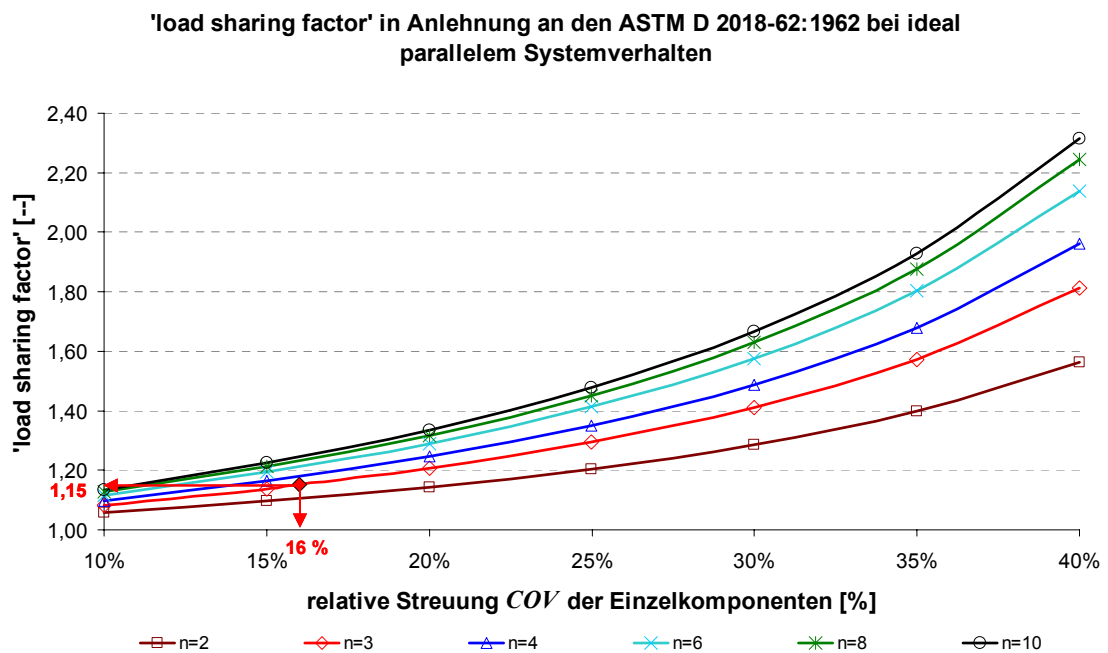


Diagramm 3-11: 'load sharing factor' in Abhängigkeit der Anzahl der lastabtragenden Komponenten n im System sowie in Abhängigkeit der relativen Streuung der Einzelkomponenten, in Anlehnung an ASTM D 2018-62:1962

Rosowsky und Yu, 2004 zitieren unter anderem Untersuchungen von Bulleit und Lui, 1994 bei denen sich der Systemfaktor im Wesentlichen von der Streuung der Festigkeiten und dem 'postyield behavior' abhängig darstellte. Weiters schlug man im Rahmen dieser Forschungen vor, den Faktor von 1,15 zu belassen solange das Ausmaß des 'postyield behavior' nicht geklärt werden kann. Bei Berücksichtigung der sich bei diesem Verhalten erhärtenden Systeme wird jedoch ein Systembeiwert von $\leq 1,4$ als möglich erachtet. Eine Arbeit von Wolfe, 1990 zitiert zeigt, dass die ebenfalls in die Untersuchungen inkludierte 'partial composite action' das Systemverhalten stärker beeinflusst als das 'load sharing'. Hierbei wurde das 'load sharing' als Kombinationseffekt resultierend aus der Systemgröße, dem gegenseitigem Zwang und der Verteilungsmodele der Festigkeiten und Steifigkeiten definiert. Von Rosowsky und Yu, 2004 wurde zudem angemerkt, dass sich der Systemeffekt mit zunehmendem Anteil lokaler Lastverteilung, sprich überproportionaler Lastverteilung bei Teilversagen auf benachbarte

Komponenten, reduziert. Dies resultiert aus der erhöhten Ausfallswahrscheinlichkeit von weiteren Teilkomponenten durch eine überproportionale Lastumverteilung.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{n=1}}{\sqrt{n}} \rightarrow \mu = konst. \rightarrow COV_n = \frac{COV_{n=1}}{\sqrt{n}}$$

σ_n	Standardabweichung der Normalverteilung in Abhängigkeit der Anzahl der Stichproben n
$\sigma_{n=1}$	Standardabweichung der Normalverteilung einer einzelnen Stichprobe
n	Anzahl der Stichproben
μ	Mittelwert der Normalverteilung
COV_n	relative Streuung der Normalverteilung in Abhängigkeit der Anzahl der Stichproben n
$COV_{n=1}$	relative Streuung der Normalverteilung einer einzelnen Stichprobe

Formel 3-3

$$COV_n = \frac{COV_{n=1}}{\sqrt{n}} \rightarrow \frac{16\%}{\sqrt{3}} = 9,2\% \rightarrow f_{k,n=1} \cdot 1,15 = f_{k, System}$$

COV_n	relative Streuung der Normalverteilung in Abhängigkeit der Anzahl der lastabtragenden Komponenten n im System
$COV_{n=1}$	relative Streuung der Normalverteilung der Einzelkomponente
n	Anzahl der lastabtragenden Komponenten im System
$f_{k,n=1}$	charakteristische Festigkeit der Einzelkomponente
$f_{k, System}$	charakteristische Festigkeit des Systems

Formel 3-4

$$k_{sys} = \frac{f_{05,n}}{f_{05,n=1}}$$

k_{sys}	'load sharing factor' als Multiplikationsfaktor zur Erhöhung der Bemessungswerte der Festigkeiten soweit der Faktor für die einzelne Belastungsart Gültigkeit besitzt
$f_{05,n}$	5 % Quantile der Systemfestigkeit
$f_{05,n=1}$	5 % Quantile der Festigkeit der lastabtragenden Einzelkomponenten

Formel 3-5

Hansson und Thelandersson, 2000 berücksichtigten weiters die Unterscheidung der Streuung innerhalb und zwischen den Komponenten und führten somit in der Betrachtung von Systemen die Ebene der Elemente ein. Es wurden zudem, auf Basis von Modellierungen von Dachsystemen unter Schneelast, Systemeffekte für lastabtragende Strukturen aus Skandinavischer Fichte (*Picea Abies*) und Radiata Kiefer (*Pinus Radiata*) ermittelt. Die Tab. 3-1 beinhaltet die Ergebnisse aus den Simulationen unter Ermittlung des 'load sharing factors' k_m durch Zuverlässigkeitsanalysen, sowie auf Basis der lastabtragenden Kapazität. Deutlich ersichtlich ist der Einfluss der Streuung der Festig-

keit der Einzelkomponenten ($COV_{n=1}$). Zwischen der Betrachtungsweise der Zuverlässigkeit, sowie der lastabtragenden Kapazität sind die Unterschiede unausgeprägt.

Tab. 3-1: k_m -Faktoren aus Simulationsergebnisse auf Basis von Untersuchungen von Hansson und Thelandersson, 2000 an lastabtragenden Strukturen in Dachsystemen unter Schneelast, sowie Vergleich mit Riberholt, 1990

	<i>Picea Abies</i>	<i>Pinus Radiata</i>
$COV_{n=1}$	20 %	35 %
k_m-Faktor (auf Basis von Zuverlässigkeitsanalysen)	1,20	1,79
k_m-Faktor (auf Basis der lastabtragenden Kapazität)	1,23	1,61
k_m-Faktor (vorgeschlagen von Riberholt, 1990)	1,17	1,40

Hansson und Isaksson, 2001 führten zudem Systemanalysen anhand von Zuverlässigkeitsberechnungen durch. Aus diesen Untersuchungen ergab sich der Trägerabstand als Haupteinflussfaktor auf den Systemeffekt. Weitere Einflussgrößen zur Erhöhung sind große Spannweiten, eine geringe Komponentenanzahl, eine hohe Reststeifigkeit und Festigkeit nach einem Teilversagen ('postyield behaviour'), sowie ein hoher Anteil fixer Belastung zu variabler Belastung.

Das Diagramm 3-12 beinhaltet die Gegenüberstellung von Teilergebnissen aus der Simulation einer losen sowie steifen Verbindung zwischen der lastverteilenden und der lastabtragenden Struktur. Die Auswahl der simulierten Systeme wurde so gewählt, dass alle anderen Parameter konstant belassen werden konnten. Das System mit loser Verbindung weist demnach rund 1/3 weniger Tragvermögen auf als bei Betrachtung von steifen Verbindungssystemen. Zudem ist die relative Streuung bei losen Verbindungen etwas höher als bei steifen Verbindungen.

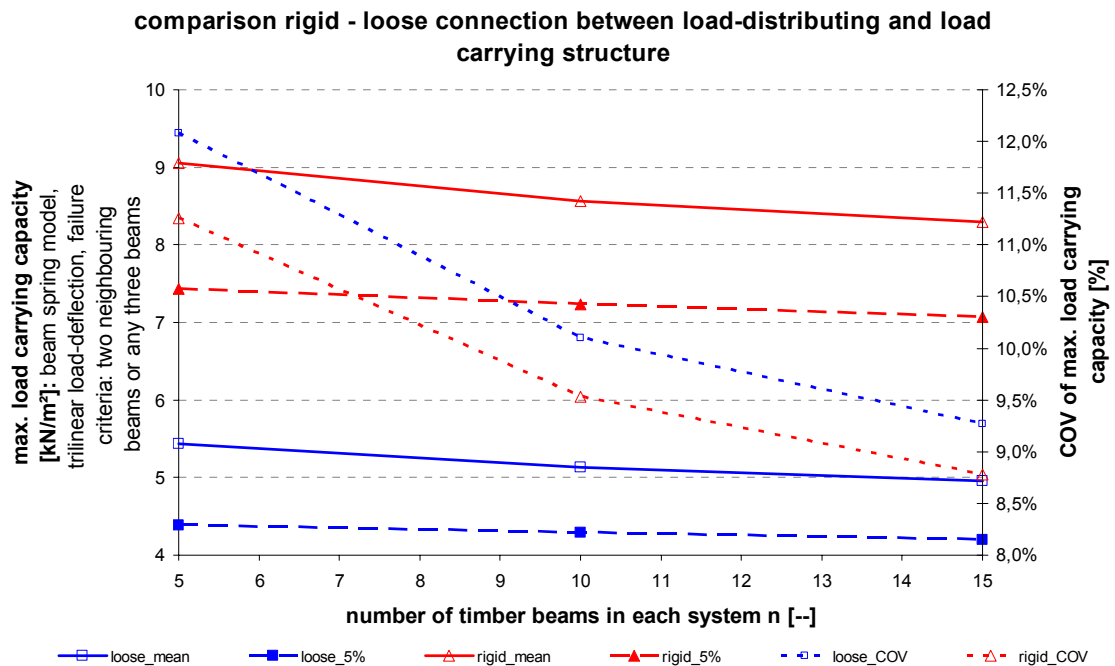


Diagramm 3-12: Darstellung der Ergebnisse aus der Simulation auf Basis eines 3-linearen Federmodells; Gegenüberstellung der Systeme 8 / 10 / 1 als Ergebnisse loser Verbindung zwischen lastverteilender und lastabtragender Struktur, sowie der Systeme 9 / 11 / 2 als Ergebnisse einer steifen Verbindung, entnommen von Hansson und Isaksson, 2001

Die Arbeiten von Cramer et al., 2000 ergaben, dass sich der Systemeffekt bei Verwendung von Verbindungsmitteln mit einer plastischen Kennlinie, stark erhöht. Als weitere, die Systemwirkung positiv beeinflussende Parameter, wurden eine hohe Steifigkeit der lastverteilenden Struktur und eine hohe Korrelation zwischen der Steifigkeit und Festigkeit der lastabtragenden Komponenten in Kombination mit großen Streuungen bei den Kennwerten genannt. Im Allgemeinen ist ein größtmöglicher 'load sharing' Faktor zu erwarten, wenn die Differenzen der Steifigkeiten und Festigkeiten, bei vorausgesetzter positiver Korrelation, zwischen den lastabtragenden Komponenten ebenfalls ein Maximum aufweisen.

3.1.2 'load redistribution'

Hinsichtlich der Lastumverteilung nach einem Teilversagen von Komponenten oder Elementen ('load redistribution') wurden in der Vergangenheit ebenfalls differente Hypothesen veröffentlicht. Mtenga et al., 1995 sprechen, bei Untersuchungen von Dachsystemen, von einer Lastverteilung im Umkreis von 3 - 4 benachbarten Trägern. Eine zitierte Arbeit von Mayo, 1978 besagt, dass direkt belastete Träger rund 50 - 76 % der Last (im Mittel rund 56 %) selbst abtragen. Eine Veröffentlichung von Wolfe und LaBis-

soniere, 1991 ergab bei Untersuchungen an Dachsystemen eine Lastumlagerung von rund 40 - 70 % von den direkt belasteten Trägern zu den benachbarten Komponenten. Weiters wurde angemerkt, dass die Verbindung zwischen der Platte und den Trägern zu einer Erhöhung der Systemsteifigkeit führte. Die Anzahl der Teilausfälle bis zum Systemversagen wurden nicht näher beschrieben.

Cramer et al., 2000 weisen auf die Problematik der Definition des System-Ausfallskriteriums hin, vor allem unter der Berücksichtigung von Plastizitäten im Materialverhalten der lastabtragenden Komponenten. Jedoch wird vermerkt, dass das Ausfallskriterium der Einzelkomponenten von jenem des Systems different ist.

In Anlehnung an Lynch, 1999 lassen sich die Ausfallsursachen in folgenden 3 Bereiche unterteilen:

- Ausfall von Komponenten oder Elementen aufgrund äußerer Lasteinwirkung
- Ausfall von Komponenten oder Elementen aufgrund von Lastumverteilungen nach Teilausfällen
- Ausfall von Komponenten oder Elementen durch das Zusammenspiel von steigender äußerer Belastung und zusätzlicher Belastungen aus den Umverteilungen

Zusätzlich lässt Lynch, 1999 Frühausfälle, ohne Einfluss auf die Systemfestigkeit, in seinen Betrachtungen zu und vermerkt: "*Ancillary component failures are early failures that do not appreciably affect the final system failure. In some sense their breaking strengths are approximately independent of the breaking strength.*".

Bulleit und Liu, 1994 untersuchten Systeme auf Basis des Modells von McCutcheon, 1977 und 1984, und vermerkten, dass Teilausfälle, mit dem Schwächsten beginnend, in der Reihenfolge des mechanischen Potentials der Einzelkomponenten eintraten. Dies widerspricht den Beobachtungen von Mtenga et al., 1995 und Rosowsky und Yu, 2004.

Bulleit und Liu, 1994 vermerkten weiters: "*Due to cumulative damage in wood, failure occurs in a member before the maximum stress reaches the MOR of the member*". Über das Ausfallskriterium von Systemen wurde festgestellt, dass auch bei bereits 4

erfolgten Ausfällen von Komponenten Systeme teilweise noch immer eine Laststeigerung von Außen zuließen.

Liu und Bulleit, 1995 zitierten eine Arbeit von Criswell, 1979 in welcher ein Systemausfall im Mittel ab 2 benachbarten Teilversagen erfolgte. Eine weitere genannte Arbeit von Wheat et al., 1986 gab als System-Ausfallskriterium 4 benachbarte Teilausfälle an. Liu und Bulleit, 1995 definierten zudem 3 Grenzfälle des Systemverhaltens:

- Nachgeben der ersten Komponente (z.B. durch Überschreitung der Festigkeit)
- Bruch der ersten Komponente (z.B. durch Überschreitung der maximalen Verformbarkeit)
- Systemausfall (das System kann keine weitere Laststeigerung aufnehmen)

Liu und Bulleit, 1995 hielten zudem Folgendes fest: *"In partial action, the sheathing will increase the stiffness and reduce the deflections of the lumber members. In two-way action, the sheathing will reduce the variability of the deflections among lumber members and redistribute the load to the unyielded or unruptured members once members yield or rupture."*

Es wurde zudem festgestellt, dass die Systemfestigkeit und die Festigkeit beim ersten Teilversagen mit der Anzahl der Komponenten steigen. Dies widerspricht dem statistischen Ansatz wonach mit zunehmender Anzahl von Komponenten in einem System die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Komponenten mit sehr geringen mechanischen Eigenschaften zunimmt. Weiters wurde beschrieben, dass diese Steigerungen vor allem bei der 5 % Quantile auftreten, wobei sich der Mittelwert als weitgehend stabil verhält. Untersuchungen von Systemen mit sprödem Materialverhalten ergaben zudem, dass die Systemfestigkeit rund 10 % über jenem Festigkeitsbereich des ersten Teilausfalles liegt. Weiters wurde postuliert, dass das Ausfallskriterium des Systems bei Trägern mit einer Streuung der Festigkeit von $COV > 30\%$ nach Teilausfällen von zwei benachbarten Trägern im Allgemeinen zutrifft, bei einer Streuung von $COV < 30\%$ bereits ein Teilausfall ausreicht. Bei Systemen, aufgebaut aus duktilen Komponenten, wird das Ausfallskriterium als stark abhängig von den 'postyield' Eigenschaften beschrieben.

Rosowsky und Yu, 2004 legen in ihren Ausführungen dar, dass bei Systemen, aus Komponenten mit überwiegend sprödem Materialverhalten und erzwungenen gleichen Verformungen, jene Komponente mit der sprödesten Kennlinie als erste versagt.

Die Tab. 3-2 beinhaltet eine abschließende Auflistung einiger Systembeiwerte, welche der im Zuge der Recherche bearbeiteten Literatur entnommen wurden. Beeindruckend hierbei sind einerseits der Umfang an Anwendungsgebieten sowie andererseits die dargestellte Bandbreite der zugewiesenen Systemfaktoren. Dies lässt vermuten, dass zur Bestimmung und Festlegung der Faktoren einer Funktion zur Beschreibung des Systempotentials, unter Berücksichtigung der Hauptparameter, als Lösung für eine weitgehend gesicherte Abschätzung von Nöten ist.

Tab. 3-2: Systembeiwerte lastverteilernder Systeme - Literatur und Normenangaben

Literaturquelle	Anmerkung	k_{sys}
Mtenga et al., 1995	für Dachsysteme	1,15 - 1,50
NDS:1991	--	1,15
Wolfe, 1990	für Deckensysteme	1,3 - 1,7
Rosowsky und Ellingwood, 1991	für Deckensysteme	1,2 - 1,3
Hansson und Isaksson, 2002	allg. für lastableitende Tragstrukturen	1,2 - 1,3
Canadian Wood Council, 1994	--	1,0 - 1,15
Foschi und Yao, 1987	für Dachsysteme	0,8 - 1,1
LRFD:1996	in Abhängigkeit des Materials	1,04 - 1,15
ASTM Standard D 1990-97:1999	--	1,15
Bulleit und Liu, 1994	ermittelt für Balken mit weichen Verbindungen zur Platte	$\leq 1,4$ (vorgeschlagen 1,25)
Douglas und Line, 1997	für beidseitig beplankte Stützwände	1,15 - 1,50
Polensek, 1976	für beidseitig beplankte Stützwände	1,56
Hansson und Isaksson, 2001	für Systeme mit weicher Verbindung zwischen den lastabtragenden und lastverteilernden Komponenten	1,15 - 1,20

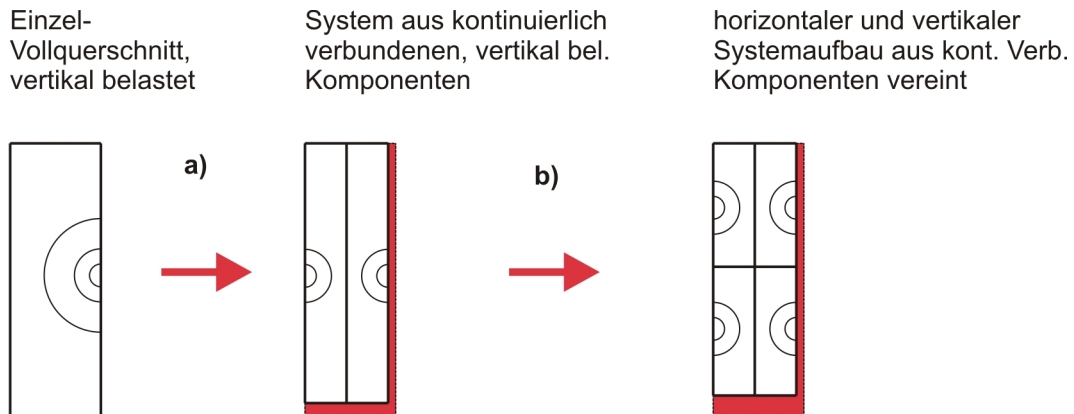
3.2 Systeme aufgebaut aus kontinuierlich verbundenen Komponenten

Die Effekte wie sie in kontinuierlich verbundenen parallelen Systemen auftreten, sind, wie in Kapitel 2.2 bereits dargestellt, sowohl mechanischen als auch statistischen Ursprungs. Beide Effekte bewirken zusammen einen Zugewinn des mechanischen, für die Bemessung der Festigkeit nutzbaren Potentials von Systemen gegenüber jenem der Einzelkomponenten. "*The K_H factor* (Anm.: Systembeiwert) *recognizes that system behaviour is better than it can be predicted from single member properties, because of the interconnection of the components and the reduced likelihood of having the worst defects in critical locations.*" (Canadian Wood Council, 1994).

Aufgrund des Aufbaues von Systemen aus bevorzugt parallelen Komponenten mit seriellen Subsystemen, kommt es innerhalb der Komponenten zwischen den Elementen zu statistischen Größeneffekten, sowie durch die parallele Anordnung der Komponenten zu Systemen zu statistischen Ausgleichseffekten, einer Homogenisierung. Die mechanischen Effekte ermöglichen zudem in beiden Bereichen eine Lastverteilung proportional zur Steifigkeit zwischen den Elementen und Komponenten, sowie die Möglichkeit der Lastumlagerung und Neuverteilung nach erfolgten Ausfällen von Teilbereichen. Aus dem parallelen Aufbau ergeben sich redundante Strukturen welche ihrerseits, zusammen mit den vorerst genannten Teileffekten, zur Verringerung der Streuung, und somit zur Erhöhung der 5 % Quantile und damit auch zu einer Erhöhung der Sicherheit beitragen.

Eine Kombination der erstgenannten Größeneffekte und Sicherheitseffekte tritt als Beispiel dann ein, wenn man einen Vollquerschnitt anstatt aus einem Stück aus mehreren parallelen Komponenten aufbaut. Hierbei führt einerseits der Größeneffekt zu einer Erhöhung der 5 % Quantile durch den Aufbau aus mehreren, kleineren Querschnitten, andererseits ergibt die Kombination von Komponenten einen statistischer Ausgleich aufgrund der parallelen Anordnung (Abb. 3-2). Hinzu kommen die bereits beschriebenen mechanischen Effekte, der Lastumleitung sowie der Neuverteilung der Last entlang von Kraftpfaden zwischen, in Zwang zueinander stehender Komponenten und Elemente. Da hierbei von einer vertikalen Anordnung der Komponenten ausgegangen wird ist der Zugewinn betreffend den Größeneffekt - hier Breiteneffekt - bei in der Praxis vorwiegend auftretender Biegebeanspruchung als gering zu bewerten. Madsen,

1989, Barrett und Fewell, 1990, Barrett et al., 1992, verweisen auf den geringen Einfluss der Breite im Bereich der 5 % Quantile der Biegefestigkeit.



- a) Aktivierung des Systembeiwertes k_{sys}
- b) Aktivierung des Größeneffektes k_t , sowie Homogenisierungseffektes

Abb. 3-2: schematische Darstellung der Entwicklung vom Einzel-Vollquerschnitt zum Systemaufbau und folglich reduzierten Querschnitten aus dem Potential-Zugewinn

In der dieser Arbeit zu Grunde gelegten Literatur wurden Systemwirkungen in der Weise untersucht, dass Komponenten gleichen Querschnittes, in unterschiedlicher Anzahl, parallel, vertikal angeordnet auf Versagen geprüft oder über Modelle betrachtet wurden. Dies entspricht auch dem Ansatz der normativen Regelungen (siehe Kapitel 1). Somit können die Größeneffekte der Einzelkomponenten als Parameter außer Acht gelassen werden.

3.2.1 Systembetrachtung parallel - seriell

Reece, 1949 schlug bereits sehr früh vor, das Potential von vertikal belasteten Systemen zu nutzen und unterstellte in seinen Betrachtungen ein ideal parallel wirkendes Systemverhalten: "*Suppose, however, that instead of using a single member, we employ a laminated construction and glue two members together so that they may act as one. This is the same thing as selecting a sample of two ...*".

Unter der Annahme von normalverteilten Festigkeiten und der sich daraus ergebender Berechnung der 5 % Quantile (siehe Formel 3-6) stellte sich ein erhebliches Potential der Festigkeit, durch die erhöhte 5 % Quantile, in Abhängigkeit der Streuung der Grundgesamtheit der Einzelkomponenten, dar (siehe Diagramm 3-13).

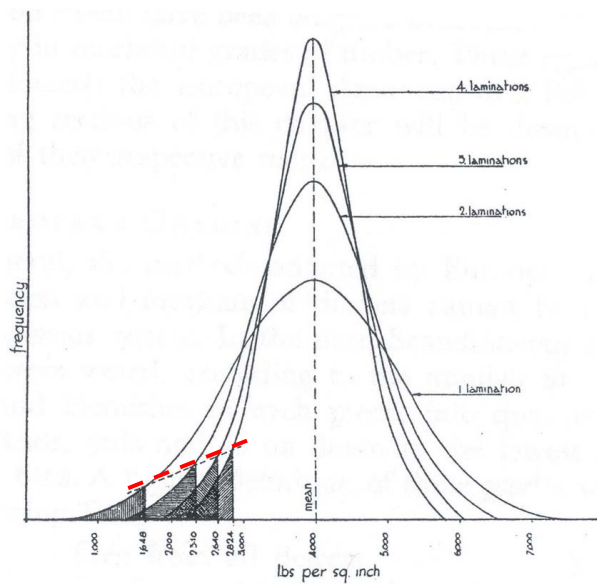


Diagramm 3-13: exemplarische Darstellung der Streuungsveränderung mit zunehmender Komponentenzahl in einem idealen parallelen System anhand der Dichtefunktionen normalverteilter Festigkeiten, sowie Anstieg der 5 % Quantile, nach Reece, 1949

"In the hypothetical case here quoted, the stress is more than doubled with the same probability of failure and although the values cannot be taken as typical it is evident that this application of statistical method will be of great importance to the development of laminated timber construction. If we refer to the original set of numbers as the "population" we can establish a mathematical relationship between its standard deviation of the averages of samples of twos, threes, fours, etc., such as we have just considered." (Reece, 1949).

$$f = \bar{x} - 1,96 \cdot \sigma$$

f	5 % Quantile der Festigkeit
\bar{x}	Mittelwert einer normalverteilten Festigkeit
σ	Standardabweichung einer normalverteilten Grundgesamtheit

Formel 3-6

Bakht und Jaeger, 1991 wiederum untersuchten analytisch und auf Basis von Versuchsdaten von Sexsmith et al., 1979 den 'load sharing factor' an Brückenplatten und schufen mit dieser Arbeit die Grundlage für die normativen Regelungen des 'load sharing factors' im OHBDC:1991, welcher auch unter Kapitel 4.2.4 ergänzend erläutert wird. Bakht und Jaeger, 1991 analysierten in ihrer Studie den Mittelwert der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl n der Komponenten und definierten hierfür Arbeitslinien von Materialien mit unterschiedlichem plastischem Anteil. Dabei beschrieben sie die

Ermittlung der effektiven Systemfestigkeit (MOR_{eff}) in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Festigkeit und Steifigkeit der jeweiligen Komponente und unter der Hypothese eines Systemversagens bereits beim ersten Teilausfall. Die formalen Beziehungen sind in der Formel 3-7 angeführt. *"It will be appreciated that the nonlinear behaviour of a timber beam will lead to redistribution of loads in the various beams of the group after first beam passed the proportional limit, but has not yet failed. ... It is obvious that in the kind of arrangement shown in this figure (Anm. Abb. 3-3), if linear elastic behaviour is assumed, the beams will attract loads in proportion to their respective flexural rigidities, or their respective values of E . It can also be appreciated readily that the beam with the lowest value of MOR / E will fail first. The load causing the failure of the first beam is examined first by assuming that the modulus of elasticity, E , of each beam is independent of the load level and the flexural rigidity of a beam drops to 0 immediately after failure."*

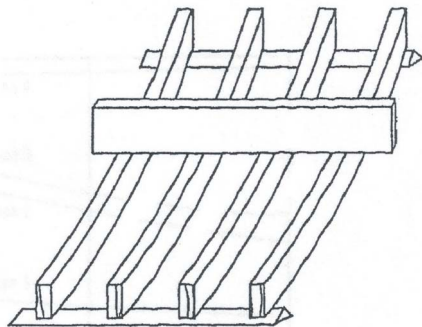


Abb. 3-3: parallele Komponenten unter Biegebelastung und unter Zwang bedingter gleichförmiger Durchbiegung, nach Bakht und Jaeger, 1991

$$MOR_{eff} = \left(\frac{MOR_i}{E_i} \right)_{\min} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

MOR_{eff}	effektive Systemfestigkeit
MOR_i	Festigkeit der i -ten Komponente im System
E_i	Steifigkeit der i -ten Komponente im System
n	Anzahl der Komponenten im System

Formel 3-7

Die theoretischen Betrachtungen ergaben, dass der relativ auf den Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten bezogene Mittelwert der Systemfestigkeit bei spröden Materialien mit zunehmender Anzahl der Komponenten am Anfang stark abfällt, sich

dann aber stabilisiert. Mit zunehmendem plastischen Anteil beziehungsweise duktilem Verhalten tendiert der relative Mittelwert am Anfang leicht anzusteigen um sich dann im Bereich des Bezugswertes entsprechend der Einzelkomponenten zu stabilisieren (siehe Diagramm 3-14 und Diagramm 3-15). Bakht und Jaeger, 1991 nahmen auf Basis dieser Erkenntnisse für die weitere Betrachtung den Mittelwert, in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten, als konservativ konstant an: *"It can be seen ... that the values of F_{μ} corresponding to the failure of the first laminate are somewhat smaller than those corresponding to the group failure load. This observation confirms that the simulation study described earlier, which related to the failure of the first laminate, underestimates F_{μ} . It can also be observed ... that F_{μ} corresponding to group failure is either very close to or greater than 1.0 for all species and all values of n . It is proposed that, as a conservatively safe measure, F_{μ} be taken as 1,0 for all cases."*

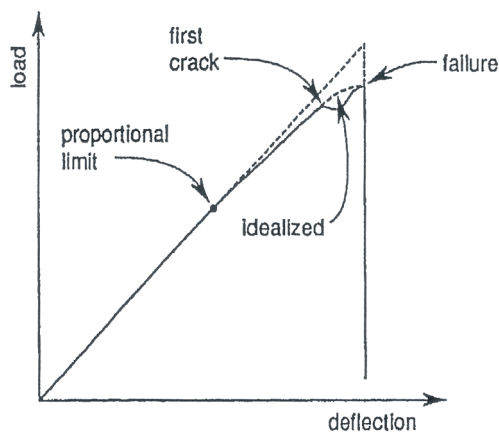


Diagramm 3-14: Beispiel einer Arbeitslinie sowie Idealisierung einer Komponente unter Biegung, Bakht und Jaeger, 1991

In der Arbeit wurde empirisch bestätigt, dass sich die Streuung mit zunehmender Anzahl der Komponenten reduziert. Weiters wurden zwei Grenzfälle für die relativ auf die Streuung der Einzelkomponenten bezogene Variation der Systemfestigkeit untersucht. Der erste Grenzfall beschreibt die Ausgangssituation für die relative Betrachtung der Streuungsänderung. Bei Anzahl der Komponenten $n = 1$ beträgt die relative Streuung $F_{\sigma} = 100 \%$ und reduziert sich im Grenzfall $n \rightarrow \infty$ auf $F_{\sigma} \rightarrow 0 \%$. Daraufhin wurde auf Basis von Versuchsergebnissen aus 3 unterschiedlichen Serien von vorgespannten Brückenplatten unterschiedlicher Komponentenanzahl, durchgeführt von Sexsmith et al., 1979, eine Funktion der relativen Streuung definiert, welche einerseits beide genannten Grenzfälle erfüllt, andererseits als sehr konservativer Ansatz die Streuungs-

änderung der Festigkeit in Abhängigkeit der Anzahl n der Komponenten beschreibt (siehe Formel 3-8 und Diagramm 3-16).

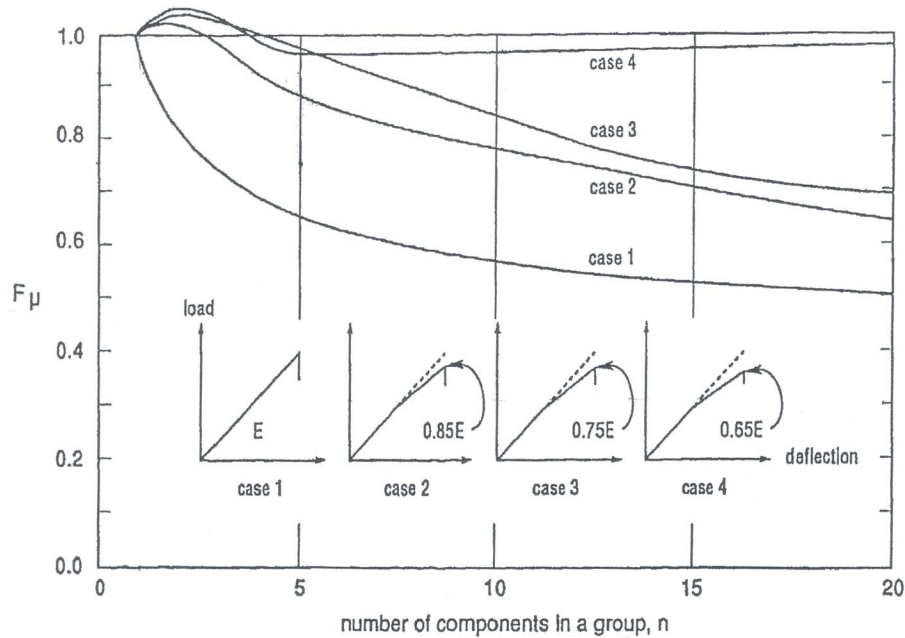


Diagramm 3-15: Einfluss der Anzahl der Komponenten n im System auf den relativen Mittelwert der Festigkeit, in Abhängigkeit des Anteiles der Plastizität, nach Bakht und Jaeger, 1991

Das Diagramm 3-17 stellt eine Gegenüberstellung der Ansätze zur Ermittlung der rel. Variation COV nach Bakht und Jaeger, 1991 sowie anhand eines ideal parallelen Systems bei gegebener Normalverteilung dar. Anhand von 2 Beispielen von $COV = 25\%$ sowie $COV = 15\%$ lässt sich der konservative Ansatz von Bakht und Jaeger, 1991 erkennen. Im weitesten Sinne handelt es sich bei der Funktion nach der Formel 3-8 um eine Verschiebung des idealen Ansatzes nach Formel 3-3 aus Kapitel 3.1.1.

$$F_{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{n+1}} \rightarrow COV_n = COV_{n=1} \cdot \sqrt{\frac{2}{n+1}} = \frac{COV_{n=1}}{\sqrt{n+1}} \cdot \sqrt{2}$$

F_{σ} Standardabweichung der Festigkeit relativ bezogen auf jene der Einzelkomponenten, in Abhängigkeit der Anzahl n der Komponenten im System
 n Anzahl der Komponenten im System

Formel 3-8

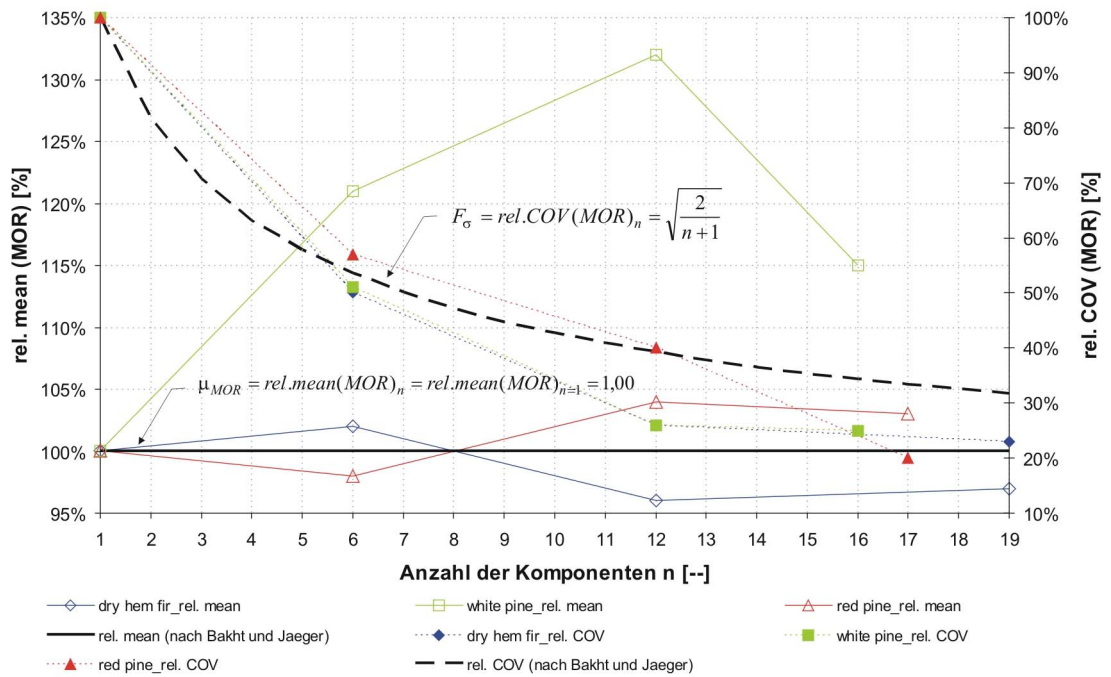


Diagramm 3-16: Darstellung der rel. Mittelwerte sowie rel. Streuungen der Festigkeiten der Versuchsserien nach Sexsmith et al., 1979, sowie Inkludierung der relativ-Funktionen des Mittelwertes und der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991 als Basis zur Festlegung des 'load sharing factors'

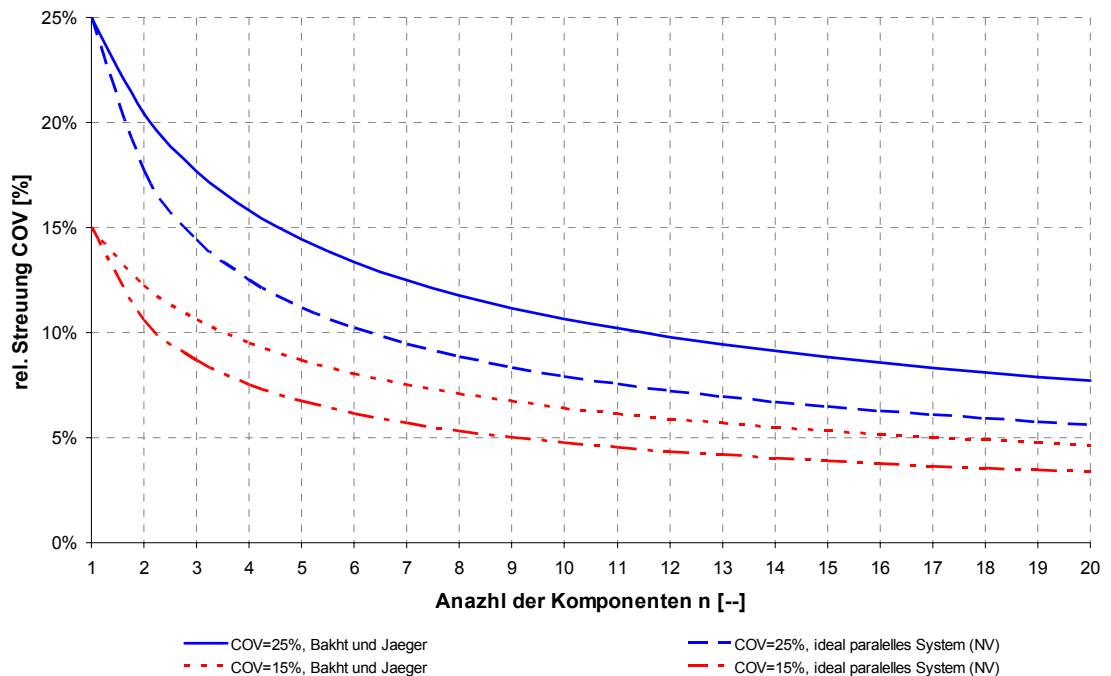


Diagramm 3-17: Gegenüberstellung der Funktionen der rel. Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991 und jener eines ideal parallelen Systems nach der Normalverteilung (siehe Formel 3-3 in Kapitel 3.1.1)

Die Streuung wurde von Bakht und Jaeger, 1991 als der Haupteinflussfaktor des 'load sharing factors' definiert: "*The variability of MOR is the dominant influence on the variability of the resistance of a component, or a group of components.*" Zudem wurde erkannt, dass das Berechnungsverfahren, wie sie in manchen Normenwerken bis heute verankert sind, die Berücksichtigung der Streuung der Einzelkomponenten als Parameter in der Festlegung des 'load sharing factors' nicht zulassen. Im Allgemeinen wird dieser Faktor aus dem Verhältnis der 5 % Quantile des Systems zu jenem der Einzelkomponenten ermittelt. Der formale Zusammenhang ist in der Formel 3-9 dargestellt.

$$k_m = \frac{(f_{bu})_n}{(f_{bu})_1}$$

k_m	'load sharing factor'
$(f_{bu})_n$	5 % Quantile der Systemfestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten n
$(f_{bu})_1$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten

Formel 3-9

Sie ermittelten einen Ansatz zur Inkludierung der Variation, unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus dem Verlauf der relativen Streuung, und führten Berechnungen auf Basis des statistischen Modells der Normalverteilung sowie der logarithmischen Normalverteilung, unter Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten durch: "*The interdependence of load effects and resistances has, in particular, a profound influence on the modification factor for load sharing.*" ... "*The influence of the variability of strength on the design cannot be fully assessed without including also the variability of load effects.*". Betrachtet wurde dabei die Anzahl der Komponenten n als Komponenten gleicher Verformung bei voller Belastung. "*It has been shown (Anm. Jaeger und Bakht, 1987) that the difference between the actual failure load of a group of timber components and the failure load obtained by assuming that all of the components have the average value of E and MOR , is a maximum when all the components are deformed equally.*".

Die Ergebnisse, sowie der Vorschlag für die Normung sind in Kapitel 4.2.4 und im Diagramm 3-18 dargestellt. Bakht und Jaeger, 1991 fügten jedoch hinzu: "*While the values of k_m listed in table 3 (Anm. Tab. 3-3) are acceptable, on a conservative basis, they cannot be regarded as valid for all conditions because they do not explicitly account for the reduction of the scatter of MOR values caused by the grouping of components.*"

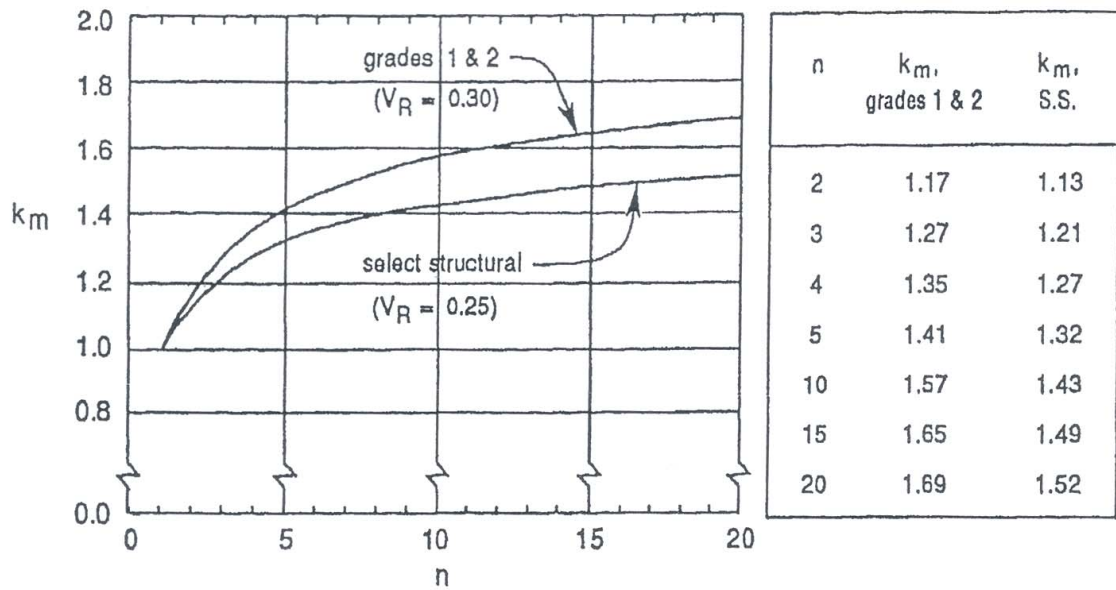


Diagramm 3-18: vorgeschlagene Funktionen und tabellarische Werte zur Festlegung des 'load sharing factors' k_m in Abhängigkeit der Sortierklasse und der zugrunde gelegten rel. Streuung, nach Bakht und Jaeger, 1991

Tab. 3-3: 'load sharing factor' k_m nach dem OHBDC:1983

Components	Grade	
	1 and 2	Select structural
Nailed, vertically laminated decks	1.20	1.20
Prestressed, vertically laminated decks	1.20	1.30
Wood - concrete composite decks	1.40	1.20
Other components spaced not more than 600 mm apart	1.10	1.10

Nemeth, 1967 erarbeitete, im Vorfeld seiner Modellierungen von Systemen aus 3 Lamellen, die Unterschiede zwischen einer horizontalen und vertikalen Anordnung unter Biegebeanspruchung. Die Tab. 3-4 gibt im Wesentlichen die Ergebnisse wieder und stellt darin beide Varianten der Anordnung, horizontal und vertikal, gegenüber.

Tab. 3-4: Gegenüberstellung horizontale und vertikale Lamellenanordnung nach Nemeth, 1967

Betrachtung	horizontale Anordnung	vertikale Anordnung
Charakterisierung der Belastung auf die Lamelle	Belastung auf die Lamelle abhängig von der Position zur Neutralfaser des Trägers	Belastung auf die Lamelle gleich, innerhalb der Lamelle abhängig vom Abstand zur Neutralfaser des Trägers
limitierende Parameter für die Biegefestigkeit	Äste und Schrägfaser, im Verhältnis der Größe, ungeachtet der Breite der Lamellen	Äste, in Abhängigkeit der Größe, sowie Schrägfaser, je nach Lage zur Neutralfaser
	Keilzinkenverbindungen in den äußeren Lamellen	Keilzinkenverbindungen, nach dem Verhältnis der Festigkeiten, betreffend den gesamten Balken
	Größeneffekte und Schrägfaser	Größeneffekte und Schrägfaser
limitierende Parameter für die horizontale Schubfestigkeit	Klebefestigkeit	Risse in radial geschnittenen Lamellen und in Lamellen aus Seitenware

Sandoz, 1994 untersuchte BSH welches im Zugbereich durch einen vertikalen Lamelenaufbau ergänzt wurde. Dieses Produkt wird als 'multi glued laminated timber' (MGLT) tituiert. Die mechanischen Potentiale verschiedener Aufbauvarianten (siehe Abb. 3-4) wurden dabei einer Biegebeanspruchung ausgesetzt. Die Ergebnisse weisen eine Erhöhung des charakteristischen Festigkeitswertes, bedingt durch eine reduzierte Streuung, von rund 25 bis 30 % gegenüber BSH auf. Es wurde festgehalten, dass die mechanischen Eigenschaften mit Anzahl und Qualität der stehenden Lamellen steigen. Sandoz, 1994 betrachtet hierzu das BSH als serielles System und das MGLT als paralleles System. Die Zuverlässigkeiten beider Systeme hinsichtlich des Versagens wurden nach der Formel 3-10 und der Formel 3-11, unter Annahme der Unabhängigkeit der Lamellen, berechnet. Es sei angemerkt, dass die unterstellte Unabhängigkeit zwischen den Lamellen nur im unbelasteten Zustand und unter der theoretischen Annahme des Fehlens von Eigenspannungen zugrunde gelegt werden kann. Sobald Spannungen durch innere oder äußere Belastungen im System auftreten, bewirken diese eine Lastverteilung zwischen den Komponenten, in Abhängigkeit der mechanischen Potentiale, vor allem der Steifigkeiten.

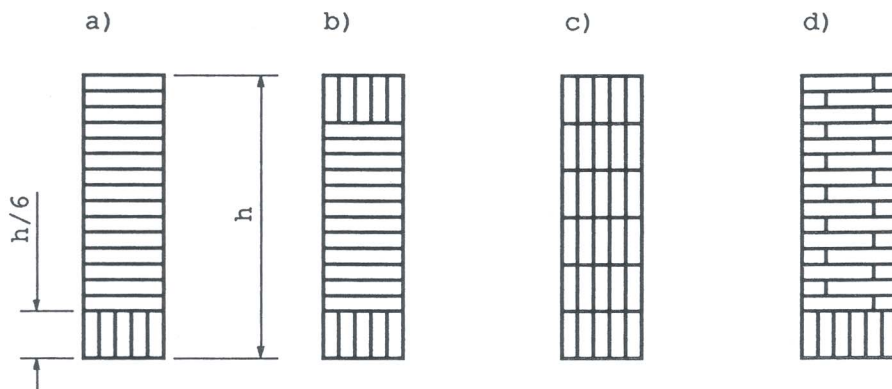


Abb. 3-4: Darstellung der untersuchten Aufbauvarianten des MGLT, nach Sandoz, 1994

$$GLT: R = \prod_{i=1}^k p_i$$

R 'reliability' - Zuverlässigkeit [%]
 p_i Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Merkmals bei der Einzelkomponente i [%]

Formel 3-10

$$MGLT: R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$$

R 'reliability' - Zuverlässigkeit [%]
 p_i Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Merkmals bei der Einzelkomponente i [%]

Formel 3-11

Die Ergebnisse der Versuche weisen eine Steigerung der mittleren Festigkeit um rund 12 %, und eine, aufgrund der reduzierten Streuung, Erhöhung der 5 % Quantile um rund 25 % auf. Das MGLT wies gegenüber BSH geringere Höheneinflüsse auf. Bei Biegeträgern kommt es mit zunehmender Höhe zur verstärkten Verlagerung der Belastung in Richtung der äußeren Zonen, auf den Zug- und Druckbereich. Bei dieser Belastung kann das MGLT durch die stehende redundante Anordnung der Lamellen im Zugbereich seine Vorteile zur Gänze ausspielen. Die Blockfuge zwischen den horizontalen Lamellen und der Zugsohle aus vertikalen Komponenten stellte sich jedoch als kritisch dar und führte zu einer erhöhten Ausfallshäufigkeit. Die Ursache liegt in durch Belastungen eingebrachte Spannungen zwischen den Lamellen, welche durch das unterschiedliche Belastungs- Verformungsverhalten, der aus vertikalen Lamellen aufgebauten Zugzone, gegenüber den horizontalen Lamellen indiziert werden.

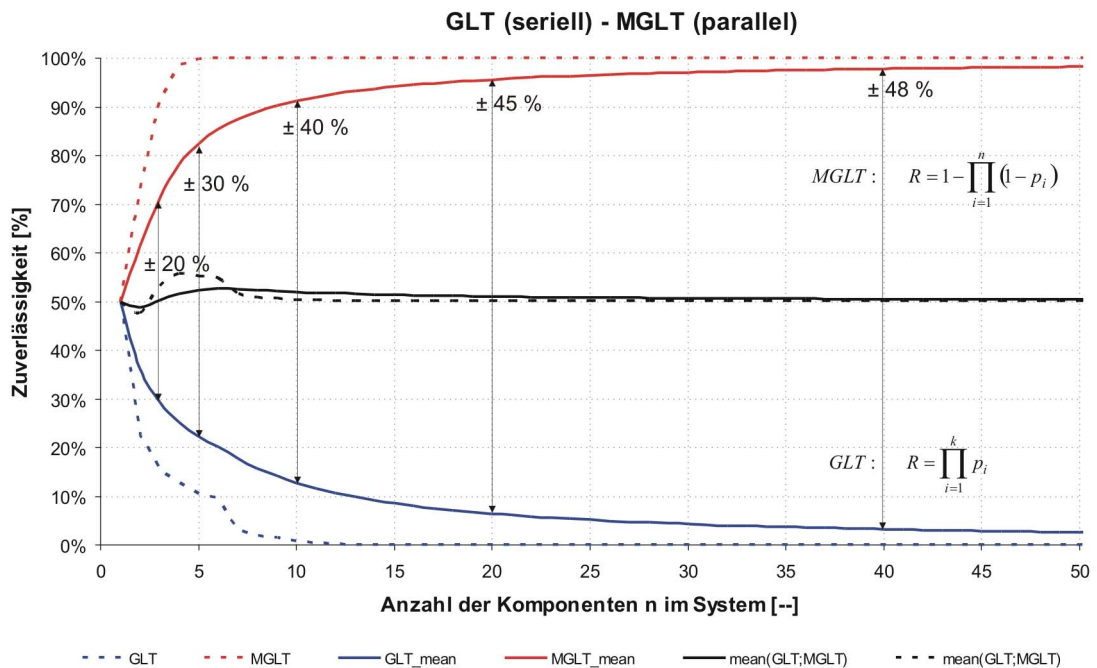


Diagramm 3-19: Gegenüberstellung der Zuverlässigkeit von seriellen (GLT) und parallelen Systemen (MGLT), in Anlehnung an Sandoz, 1994

Diagramm 3-19 beinhaltet eine Gegenüberstellung serieller (GLT = BSH) und paralleler Systeme (MGLT). Die Darstellung bezieht sich auf 100 generierte Zufallszahlen welche anschließend zu normalverteilten Festigkeiten transformiert wurden. Die gestrichelten Linien repräsentieren den Verlauf der Zuverlässigkeiten der virtuellen Festigkeitswerte, die durchgezogenen Linien jeweils die gebildeten Mittelwerte, bis zum jeweiligen Umfang der Komponenten. Die Zuverlässigkeiten wurden in erster Annäherung auf den Wert der maximalen Festigkeit als Bezugsgröße (= 100 %) relativiert. Die Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Funktionen serieller und paralleler Anordnung sind auf die Verwendung einer einzelnen Stichprobe zurückzuführen, in der allgemeinen Betrachtung ist ein gespiegelter Verlauf beider Funktionen gültig.

Deutlich erkennbar ist die ausgeprägte Zu- sowie Abnahme der Funktionen bei bereits geringer Anzahl an Komponenten im System, sowie der zunehmend abflachende, auslaufende Verlauf der Funktionen mit weiterer Steigerung der Komponentenanzahl. Ab rund 10 bis 15 Komponenten ist der zusätzliche Potentialgewinn / -Verlust praktisch abgeschlossen, die gemittelten Funktionen repräsentieren diesbezüglich durch die Mittelung einen verzögerten Verlauf.

3.2.2 Einfluss der Materialeigenschaften auf den Potentialgewinn in einem System aus kontinuierlich verbundenen Komponenten

Der Rohstoff Holz ist gekennzeichnet durch ein sprödes Bruchverhalten bei Zugbelastung parallel zur Faser, sowie einem elastisch plastischem Verhalten bei Beanspruchung auf Biegung und Druck, wobei vor allem Querdruck ein erhebliches plastisches Potential aufweist und Längsdruck durch einen deutlichen 'Entfestigungsbereich' (Bereich nach Erreichung der maximalen Spannung eines Spannungs-Dehungs Diagramms, charakterisiert durch geringen Festigkeitsverlust in Verbindung mit großen Dehnungen) gekennzeichnet ist (Brandner, 2006). Thelandersson und Larsen, 2003 vermerkten, dass die Möglichkeit der Lastumverteilung bei Teilversagen durch sprödes Materialverhalten im Bruchbereich nur eingeschränkt möglich ist. Umgekehrt betrachtet ergibt sich daraus der Schluss, dass der Zugewinn im System mit zunehmendem plastischem Materialverhalten ebenfalls erhöht. Eine Erklärung dafür ist, dass Komponenten mit geringem mechanischen Potential aber hoher Plastizität im Bruchbereich durch ihre große Verformbarkeit und dem zunehmenden Steifigkeitsabfall einerseits Belastungen auf steifere Komponenten abtragen, andererseits über einen großen Verformungsbereich hinweg weiterhin, trotz reduzierter zusätzlicher Lastaufnahme, zum Tragverhalten im System beitragen. Zudem versagen Komponenten mit hohem plastischem Anteil zunehmend durch geringere Lastabfälle, und dies weniger abrupt.

Thelandersson und Larsen, 2003 postulierten weiters die Möglichkeit der Erhöhung der Duktilität eines Systems durch Verwendung von duktilen Verbindungsmitteln zur Kopplung der Komponenten.

3.2.3 Lastumverteilungsmechanismen

Rouger und Barrett, 1995 sehen in der Beschreibung des parallelen Systems mit seriellen Subkomponenten die Möglichkeit einer Lastneuverteilung nach Teilausfällen.

Falk und Colling, 1995 führten die verstärkende Wirkung im Umfeld von durch festigkeitsreduzierenden Holzmerkmalen gestörten Bereichen auf den veränderten Kraftfluss über Nachbarkomponenten zurück, welche eine Lastumleitung bzw. auch Neuverteilung der Last nach Teilversagen von Komponenten oder Elementen zulässt. Der 'veränderte Kraftfluss' bezeichnet hier die Möglichkeit Kräfte von Zonen, welche über ihr Maß hinaus belastet werden, über Nachbarelemente oder Komponente umzuleiten.

Zudem ist bekannt, dass Äste oder lokale Schrägfaser (LSF) im Allgemeinen, die Festigkeit stark reduziert, diese Bereiche aber auch durch eine geringere Steifigkeit gekennzeichnet sind. Mit Bezug auf das 'load sharing' werden somit die Belastungen von den weichen Bereichen auf die sie umgebenden steiferen Zonen umgeleitet.

Kim und Kvam, 2004 definierten verschiedene Lastumverteilungsregeln, welche im Überblick in der Tab. 3-5 kurz beschrieben sind. Sie vermerkten: "*A load-share rule dictates how stress or load is redistributed to the surviving components after a component fails within the system.*".

Tab. 3-5: Auflistung der Lastverteilungsregeln, nach Kim und Kvam, 2004

Bezeichnung	Kurzerklärung
lokale Lastumverteilung (LLS) (engl. 'local load sharing')	Lastumverteilung nach Teilversagen in Abhängigkeit des Abstandes vom versagten Bereich
monotone Lastumverteilung (MLS) (engl. 'monotone load sharing')	Lastumverteilung unter der alleinigen Annahme, das sich die Last der Komponenten nach Teilversagen nicht reduziert
gleichmäßige Lastumverteilung (GLS) (engl. 'equal load sharing', 'global load sharing', 'uniform load sharing')	Lastumverteilung der Last der versagten Komponente (n) nach Teilversagen zu gleichen Anteilen auf die noch verbliebenen Komponenten

Turcotte et al., 2003 schrieben, betreffend der Lastverteilungsregeln in ihrer Arbeit: "*In the uniform load sharing hypothesis, the stress from a failed fiber is redistributed equally to the remaining fibers. This is a mean-field approximation. The alternative redistribution model is the local load sharing hypothesis. In this case the load on the failed fiber is redistributed to the neighbouring fibers. Local load sharing is applicable to strongly bonded fibrous (composite) materials, whereas equal load sharing is applicable to weakly bonded fibrous materials.*".

3.2.4 Verhalten der Steifigkeit in kontinuierlich verbunden Systemen

Davalos et al., 1996 untersuchten Systemeffekte der Steifigkeit an vorgespannten Elementen (stress laminated lumber = stresslam) sowie aus BSH aufgebauten Brückenplatten (glulam timber bridge decks). Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Mittelwert des E-Modul längs zur Faser in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten weitgehend

konstant verhält, die Streuung jedoch stark reduziert in Erscheinung tritt. Somit kann nach diesen Ergebnissen eine parallele Systembetrachtung für die Steifigkeit angenommen werden.

Bezüglich der Steifigkeit wurden von Williams et al., 1994 schon früher ein paralleles Systemverhalten angenommen, somit der Mittelwert als konstant betrachtet und die Änderung der Streuung nach Formel 3-12 beschrieben.

$$COV_{System} = \frac{COV_{Komponente}}{\sqrt{n}}$$

COV_{System}	relative Streuung der Festigkeiten der Systeme, bezogen auf Normalverteilung
$COV_{Komponente}$	relative Streuung der Festigkeit der Einzelkomponenten, bezogen auf Normalverteilung
n	Anzahl der parallel wirkenden Komponenten im System

Formel 3-12

Moody und Hernandez, 1997 untersuchten aus vertikalen sowie horizontalen Lamellen aufgebautes BSH. Die Arbeit zeigte, dass der Mittelwert des E-Moduls bei vertikalen Systemen rund 95 % dem der Einzelkomponenten betrug.

3.2.5 Weitere Ergebnisse aus Untersuchungen von Systemen aus kontinuierlich verbundenen Komponenten

Williams et al., 1994 führten Versuche an über Nagelung miteinander verbundenen 4 er Paketen aus 'posts' durch und hielten anhand der Ergebnisse fest, dass der Mittelwert der Systemfestigkeit rund 97 % dem der Einzelkomponenten entsprach. Ein hierbei zitierter Vergleich mit Bohnhoff et al., 1991, worin die Ergebnisse der versuchs-technisch ermittelten Festigkeiten von dreier Systemaufbauten beschrieben werden, ergab einen Mittelwert der Festigkeit von rund 89 % im Vergleich zu jenem der Einzelkomponenten. In Übereinstimmung mit Bakht und Jaeger, 1991 wurde das stark degressive Verhalten der Streuung festgestellt welches auf das 'load sharing' zurückgeführt wurde und einen Zugewinn an der 5 % Quantile von rund 30 - 50 % darstellte.

Nemeth, 1967 untersuchte anhand einer Modellierung Systemanordnungen bestehend aus jeweils 3 vertikalen Lamellen. Hierbei wurden die Festigkeiten und Steifigkeiten auf Basis von ermittelten Trägheitsmomenten der Äste und der daraus errechneten Astparameter generiert. Auf Basis dieser Trägheitsmomente wurden virtuell Komponenten

aufgebaut. Die Versuchsergebnisse der Systeme wurden anschließend mit Kennwerten von Einzelkomponenten, entnommen von Wood, 1960 und dem 'Wood Handbook', 1955 des U.S. Departments of Agriculture, verglichen. Hierbei zeigte sich ein weitgehend übereinstimmender Mittelwert ($MOR_{mean,n=1} = 9500 \text{ psi}$; $MOR_{mean,n=3} = 9377 \text{ psi}$) und eine deutliche Abnahme der Streuung ($MOR_{COV,n=1} = 16 - 22 \%$; $MOR_{COV,n=3} = 10,4 \%$). Es sei hier jedoch auf den indirekten Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und Kennwerten aus der Literatur hingewiesen.

McAlister, 1974 führte Versuche an Systemen aus 'Southern Pine', aufgebaut aus jeweils 2 vertikalen Lamellen welche miteinander in unterschiedlicher Weise verbunden waren, durch. Zudem wurden im Zuge der Probenentnahme Balkenquerschnitte in den Abmessungen des Systemaufbaues als Prüfkörper inkludiert. Die Tab. 3-6 enthält einen Auszug aus den Versuchsdaten. Die Kennwerte der Probenkollektive sind weitestgehend gut übereinstimmend und lassen Tendenzen, durch Vergleiche, erkennen. Es erscheint hierbei befremdend, dass die Streuung der Festigkeiten der Systeme gegenüber jener der Einzelkomponenten (Lamellen) in gleicher Weise auftritt, teilweise sogar erhöht. Jedoch zeigt sich der Mittelwert der Festigkeit als erhöht. Daraus ergibt sich, auf Basis der Berechnung nach der Formel 3-13, ein erhöhter 'allowable stress' (Bemessungswert) bei Systemen aus über Verklebung verbundener Komponenten (siehe Tab. 3-7). Beim Probenkollektiv 'Nagelung' ist bezüglich des 'allowable stress' der Einzellamellen sogar eine leichte Reduktion erkennbar. Die Balkenquerschnitte weisen im Vergleich mit den Systemquerschnitten, aber auch im Vergleich mit den Einzelkomponenten, eine erhöhte Streuung der Festigkeit auf. Die mittlere Steifigkeit stellt sich als weitgehend konstant mit unausgeprägter Steigerung im System dar.

$$allowable \ stress = \frac{MOR_{mean} - (1.64 \cdot MOR_{stand. dev.})}{2.1}$$

<i>allowable stress</i>	Bemessungswert
MOR_{mean}	Mittelwert der Festigkeit
$MOR_{stand. dev.}$	Standardabweichung der Festigkeit

Formel 3-13

Tab. 3-6: Auszug aus den Versuchsdaten von McAlister, 1974

	Probengruppe	<i>n</i>	<i>MOE</i> _{mean}	<i>MOR</i> _{mean}	<i>MOR</i> _{stand. dev.}	<i>COV</i>
	[--]	[--]	[1000 psi]	[psi]	[psi]	[psi]
Einzelkomponenten	Balken (Vergleichsgruppe System) (2" / 6" / 8 feet)	50	1460	5539	1823	33 %
	Lamellen (Vergleichsgruppe Komponente) (1" / 6" / 8 feet)	30	1630	5178	1204	23 %
System	2 Lamellen: Verbindung vernagelt (6 d Nagelung)	30	1670	5363	1347	25 %
	2 Lamellen: Verbindung verklebt, Neopren -Basis	30	1760	8159	2376	29 %
	2 Lamellen: Verbindung verklebt, Phenol-Resorcinharz -Basis	30	1720	8126	1933	23 %

Tab. 3-7: Auszug aus den Berechnungen anhand der Versuchsdaten von McAlister, 1974, sowie ergänzende Betrachtungen

	Probengruppe	allow. stress	<i>k</i> _{sys} (all. stress)	Vergleich mit Balken	Vergleich <i>MOE</i> _{mean}
	[--]	[psi]	[--]	[--]	[--]
Einzelkomponenten	Balken (Vergleichsgruppe System) (2" / 6" / 8 feet)	1214	--	1,00	--
	Lamellen (Vergleichsgruppe Komponente) (1" / 6" / 8 feet)	1530	1,00	--	1,00
System	2 Lamellen: Verbindung vernagelt (6 d Nagelung)	1500	0,98	1,23	1,02
	2 Lamellen: Verbindung verklebt, Neopren -Basis	2020	1,32	1,66	1,08
	2 Lamellen: Verbindung verklebt, Phenol-Resorcinharz -Basis	2360	1,54	1,94	1,06

3.2.6 Erkenntnisse aus Untersuchungen an Faserbündelmodellen (FBM)

In den letzten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts wurde der Versuch in Angriff genommen, die Effekte in Holz und anderen aus Fasern aufgebauten Materialien auf Basis von Faserbündelmodellen (FBM) quantitativ zu bewerten.

Dieses Modell ist generell definiert durch zueinander parallel angeordnete Fasern welche in eine Matrix eingebettet sind, und am Ende eingespannt auf Zug parallel zur Faser belastet werden. Dabei werden den einzelnen Fasern stochastisch Zugfestigkeiten aus einer zuvor definierten Verteilung zugewiesen, die Steifigkeitswerte jedoch als konstant betrachtet. Die Matrix selbst leistet zur Lastableitung nur bedingt einen Beitrag. Sie ermöglicht jedoch die Lastumverteilung nach Teilausfällen zu den noch bestehenden Fasern (siehe Abb. 3-5). "*Fiber bundle models are constructed so that a set of fibers is arranged in parallel, each one having identical elastic properties but statistically distributed strength values.*" (Dill-Langer et al., 2003).

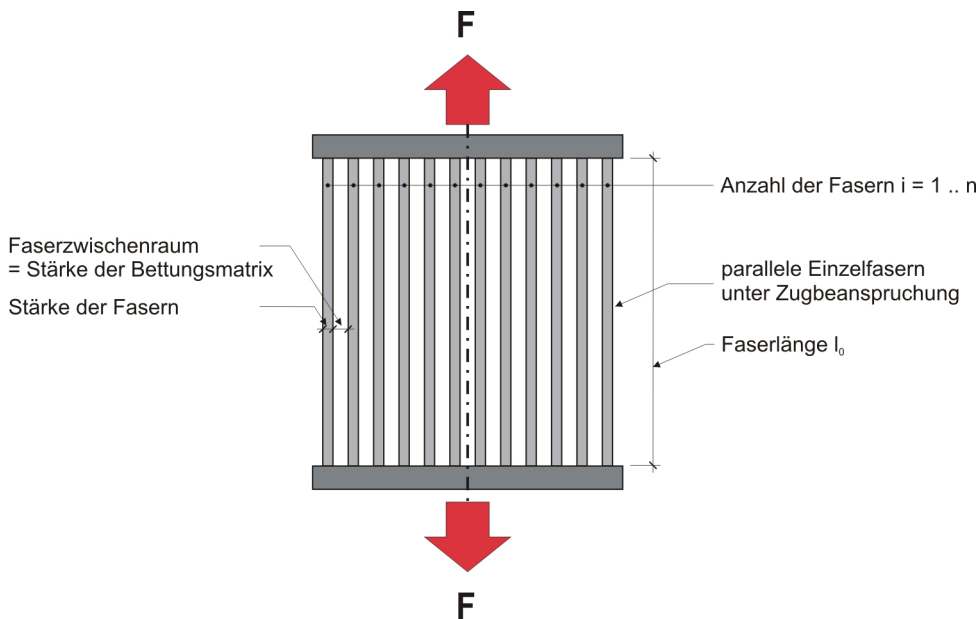


Abb. 3-5: schematische Darstellung des Faserbündelmodells (FBM)

Die Lastumverteilungskriterien entsprechen jenen bereits vorab besprochenen Varianten aus der Tab. 3-5. Zur Vertiefung ist zudem zu unterscheiden zwischen Einzelfaserbrüchen und lawinenartigen Ausfällen verursacht durch die Lastumverteilung, damit verbundener Laststeigerung auf die Komponenten und erneutem Teilausfall (Mignolet

und Mallick, 1995). Landis et al., 2000 ergänzten die Lastumverteilungskriterien der Tab. 3-5 von Kim und Kvam, 2004 mit der Möglichkeit der Darstellung über eine 'parametrisierte Weibullverteilung', sowie der Modellierung über 'weakest link' oder 'asymptotic analysis', welche vor allem bei der Betrachtung von größeren Längen sowie einer größeren Anzahl von Fasern im Bündel herangezogen werden kann. Zur Vollständigkeit sei auf die nach Landis et al., 2000 heute üblichen Varianten der Betrachtung mittels 'finite element analysis' sowie 'shear lag models' hingewiesen welche im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert werden. Landis et al., 2000 merkten zudem an, dass die Lastverteilung bei Systemen des FBM zwischen LLS und GLS zu festzulegen ist und schlossen aus den theoretischen Überlegungen auf einen Anteil von LLS von über 47 %. Weiters bestätigen die Ergebnisse die verringerte Streuung mit zunehmender Anzahl der Fasern, den Größeneffekt k_{size} , im speziellen den Längeneffekt k_{length} , wobei mit steigender Anzahl n die Festigkeit abnimmt.

Kloster et al., 1997 untersuchten im Rahmen ihrer Arbeit die Verteilung der Lawinengröße bei Teilausfällen und definierten den Begriff 'Lawinengröße' als Anzahl der durchgehend versagten Fasern je Lawine, die 'Lawinenlänge' hingegen als Anzahl durchgehend versagter Fasern zwischen intakten Fasern (siehe Abb. 3-6): "*When a weak structural element in a material with stochastically distributed strengths fails, the increased load on the remaining elements may cause further ruptures, and thus induce a burst avalanche of a certain size Δ , i.e., one in which Δ elements fail simultaneously. When the load is further increased, new avalanches occur.*". Zusätzlich wurden diese Größen unter Betrachtung von LLS und GLS untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass das GLS einem 'power law' von $\Delta^{(-5/2)}$ folgt (Δ = Lawinengröße) und somit gut vorhersehbar ist. Das LLS ist als solches nicht darstellbar. Hier fällt die Bruchverteilung mit größerer Bruchgröße schneller ab als bei GLS. Die zu erwartende Maximallast welche ein Faserbündel demnach aufnehmen kann, steigt bei Betrachtung von GLS proportional zu n , bei LLS proportional zu $n / \ln(n)$ an. Das Diagramm 3-20 stellt die maximale Last welche ein Faserbündel der Größe n in Abhängigkeit der Grenzfälle der Lastverteilung LLS und GLS aufnehmen kann. Die Darstellung bezieht sich auf die Erkenntnisse aus der Studie von Kloster et al., 1997. Unter der Annahme, dass im Durchschnitt jede Faser gleich viel an Belastung aufnehmen kann, steigt die Maximallast des Faserbündels bei GLS proportional zu n . Bei LLS ist jedoch ein jeher Abfall des Potentialzugewinnes ab bereits einer geringen Anzahl an Fasern n im Faserbündel durch die

überproportionalen Spannungsspitzen bei Teilausfällen und somit induzierten lawinenartigen Faserbrüchen erklärbar.

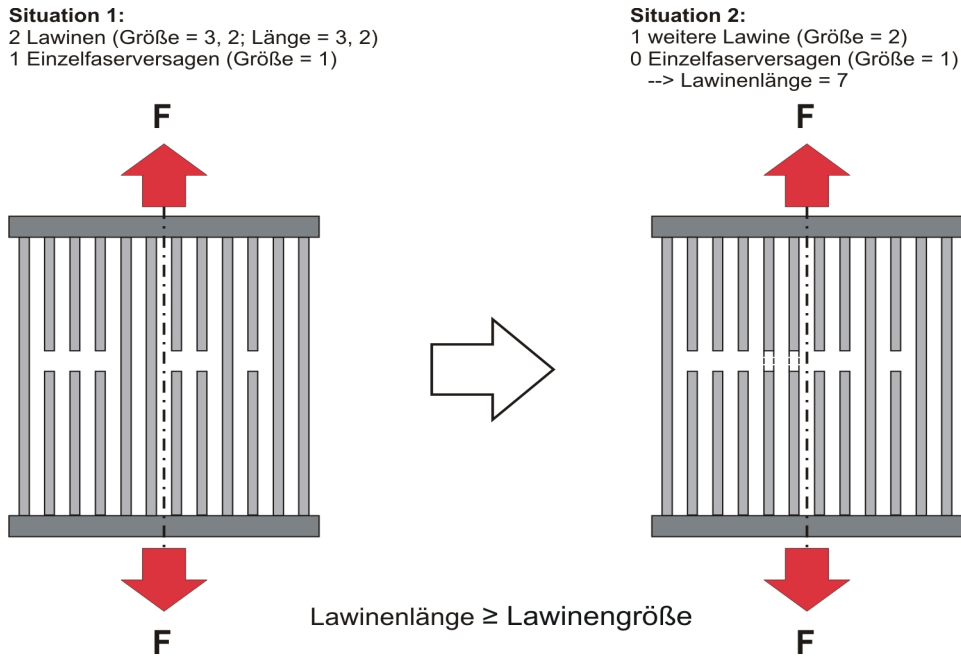


Abb. 3-6: Darstellung der Größe und Länge bei lawinenartigen Ausfällen von Fasern im FBM, in Anlehnung an Kloster et al., 1997

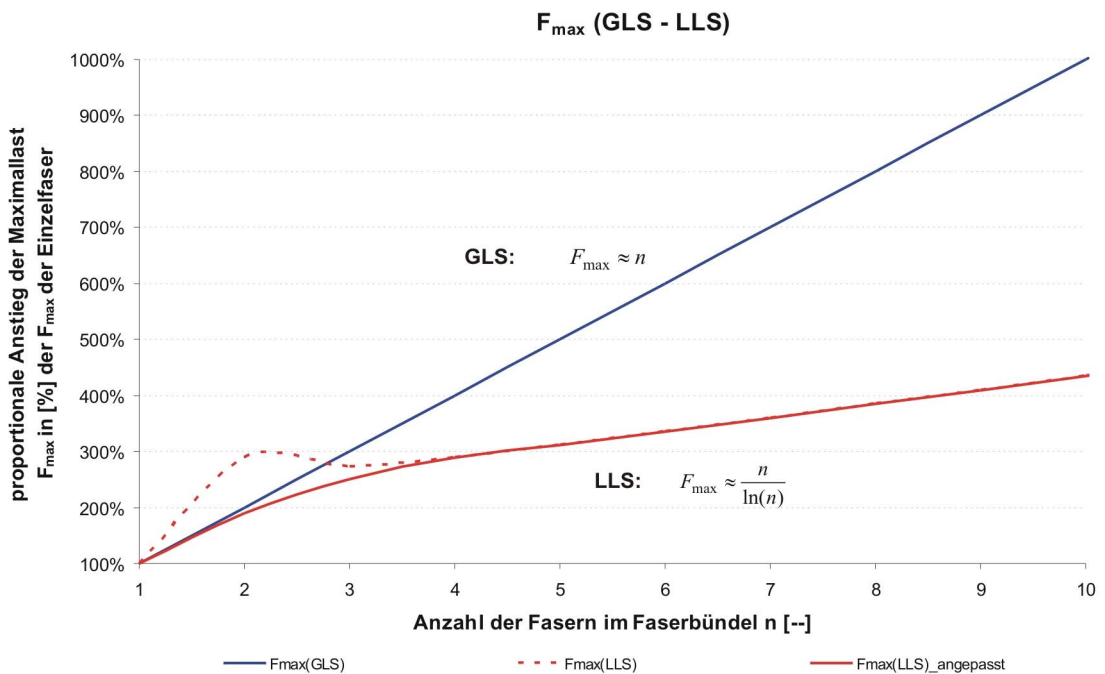


Diagramm 3-20: Darstellung der Maximallast welches ein Faserbündel, in Abhängigkeit der Grenzfälle LLS und GLS, sowie in Abhängigkeit der Faserbündelgröße, aufnehmen kann, in Anlehnung an Kloster et al., 1997

Nach den Erkenntnissen aus der Arbeit von Dill-Langer et al., 2003 ergibt sich der erste Faserausfall bei Erreichung der maximalen Zugfestigkeit der schwächsten Faser. Dies folgt aus der getroffenen Modellannahme einer konstanten Steifigkeit. In dieser Arbeit wurden theoretische Modellierungen und praktische Versuche durchgeführt. Die Resultate weisen darauf hin, dass ab einer Clustergröße von rund 4 bis 10 ausgefallener Fasern im Nadelholz das System instabil wird und daraufhin abrupt versagt: *"Assunking completely local load sharing it follows ... that the size of the critical cluster in softwood is N_c in the range of 4 – 10; so when a cluster of N_c broken fibers is formed, the sample becomes instable and fails abruptly."* In ihren Modellierungen implementierten Dill-Langer et al., 2003 zudem einen Parameter zur Darstellung des Systemverhaltens in Abhängigkeit der Anteile von LLS und GLS: *"Local load sharing implies that the global strength of samples decreases unlimited with the increase of the system size. ... Experiments showed that the rupture of wood fibers is caused by the flaws of various sizes existing along fibers. The distribution of fiber strength values is controlled by the size distribution of flaws."*

Hidalgo, 2003 untersuchte ebenfalls intensiv FBM und vermerkte, dass das relative Matrixvolumen, als nicht lastabtragende aber auch nicht versagende Struktur, proportional mit fortschreitendem Faserausfall zunimmt. Er ließ in seinen Betrachtungen ein mehrfaches Faserversagen zu und unterstellte ein linear elastisches Verhalten der Einzelfaser bis zum spröden Versagen. Hinsichtlich des Teilversagens der Fasern als Komponenten des Systems unterscheidet er 2 Varianten, die 'eingefrorene Unordnung', und die 'ereignisabhängige Unordnung', wobei die zweite Betrachtung eine Inkludierung von bruchinjizierten mikroskopischen Umordnungen zulässt (siehe Diagramm 3-21).

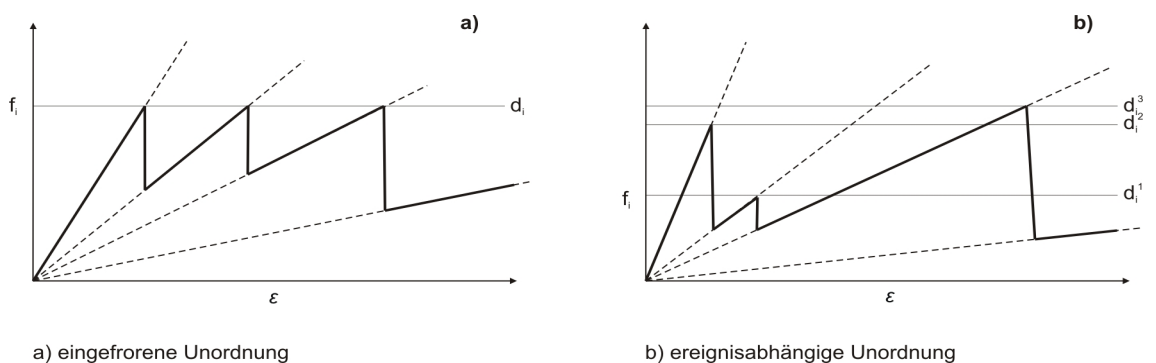


Diagramm 3-21: Schädigungsgesetze einer Einzelfaser i mit mehrfachem Faserversagen und Faserfestigkeiten d_i , nach Hidalgo, 2003

Das GLS unterliegt demnach einem Steifigkeitsbezug, sprich die Lastverteilung erfolgt proportional zur Steifigkeit der Komponenten. Dies entspricht der 'load sharing rule' wie sie bereits im vorangehendem Kapitel 3.1.1 besprochen wurde.

Des Weiteren wurde eine Analogie zu granularen Medien hergestellt. Er betrachtete hierbei ein invertiertes Systemverhalten unter Umkehrung der Schädigungssimulation der FBM und somit einer Druck- anstatt Zugbeanspruchung des FBM. Dabei kann man eine Verstärkung von Kraftpfaden zwischen den Komponenten, sowie Verfestigungen durch Umlagerungen von Kontakten feststellen. Dadurch ergibt sich eine erhöhte Steifigkeit und eine maximale Systemfestigkeit proportional zur Anzahl der Kontakte (siehe Abb. 3-7).

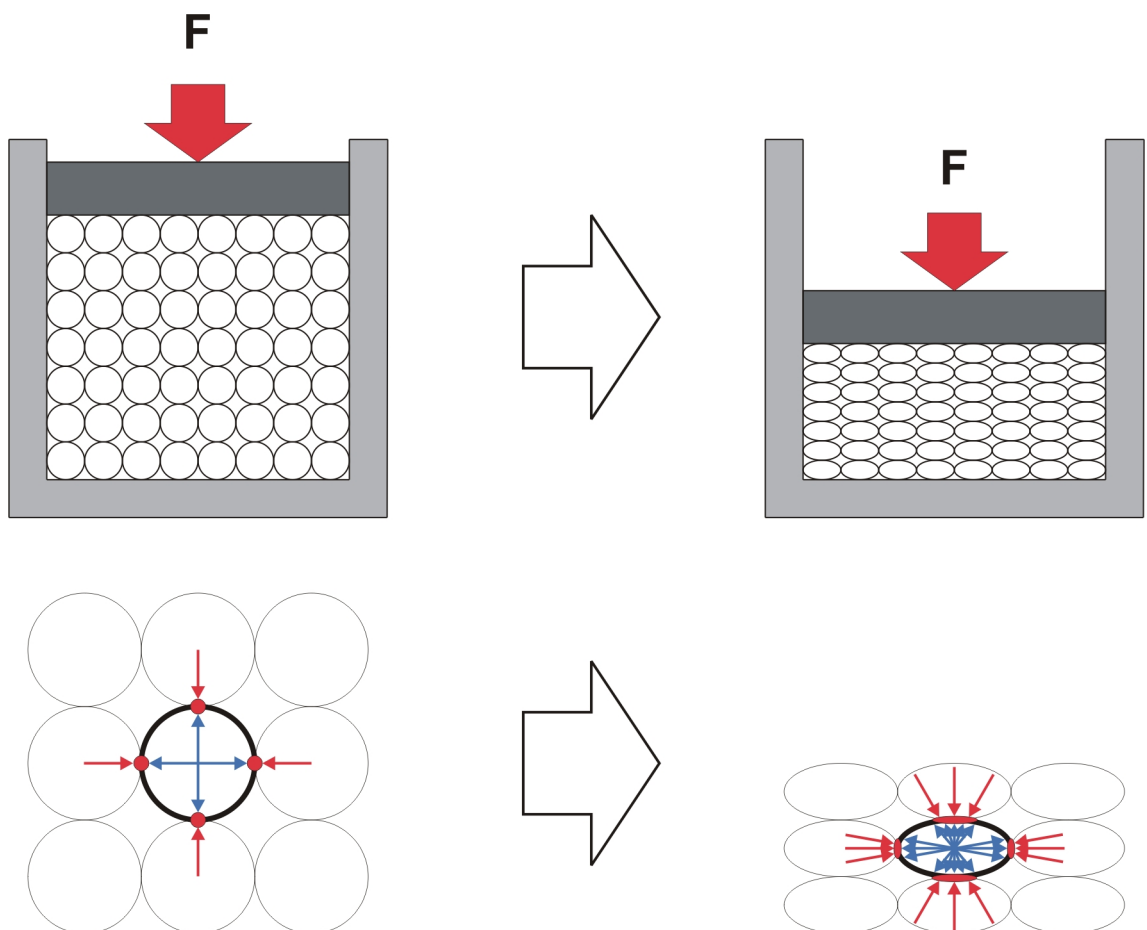


Abb. 3-7: schematische Darstellung der Verfestigungen in granularen Medien, einwirkende Kräfte und Reaktionskräfte, in Anlehnung an Hidalgo, 2003

Hidalgo et al., 2001 postulierten: "*The behaviour of a fiber bundle under external loading strongly depends on the range of interaction, i.e., on the range of load sharing*

among fibers." ... "In spite of the infinite range of interaction among fibers, a localization of the damage occurs for the case of quenched disorder (Anm. eingefrorene Unordnung, siehe Diagramm 3-21), this means that weaker fibers tend to break more often than stronger ones." ... "One of the most interesting aspects of the damage mechanism of disordered solids is that the breakdown is preceded by an intensive precursor activity in the form of avalanches of microscopic breaking events. Under a given external load F , a certain fraction of fibers fails immediately."

Turcotte et al., 2003 beschäftigten sich in ihrer Arbeit mit dem Zusammenspiel von Mikrobrüchen in Form von Teilausfällen. Sie postulierten, dass mit der Anzahl der Teilausfälle die Korrelation unter den Brüchen zunimmt, somit ein Teilversagen in steigendem Maße in Abhängigkeit anderer Teilbrüche auftritt: "Even if the material appears to be homogeneous, there will be a distribution of dislocations, flaws, and other heterogeneities present. As the applied stress is increased, microcracks occur randomly on the heterogeneities and are uncorrelated. As the density of microcracks increases the stress fields of the microcracks interact and the microcracks become correlated. The microcracks eventually coalesce to form a through-going fracture. This irreversible process is a part of damage mechanics."

Pradhan und Chakrabarti, 2004 untersuchten die Eigenschaften von FBM bei kontinuierlicher äußerer Laststeigerung und resultierender fortlaufender Schädigung. Die Grenzfälle LLS und GLS wurden in die Untersuchungen miteinbezogen. Nachfolgend sind ausgewählte Zitate exzerpiert: "*The stress strain curve for the model clearly shows three different regions: elastic or linear part (Hooke's region) when none of the fibers break ... plastic or nonlinear part due to the successive failure of the fibers ... and then finally the stress drops suddenly (due to the discontinuous drop in the fraction of surviving fibers ...)*" ... "*As soon as the fibers start failing, the stress-strain relationship becomes nonlinear. The dynamic critical behaviour remains essentially the same and the static (fixed point) behaviour shows elastic-plastic like deformation before rupture of the bundle.*" ... "*This indicates that the stress drop at the final failure point of the bundle is related to the extent (S_L) of the linear region of the stress-strain curve of the same bundle.*" ... "*The fatigue study in a homogeneous fiber bundle suggests if each fiber has a finite probability of failure below its normal strength, than the failure time of the bundle decreases exponentially.*". Ihren Ausführungen ist zu entnehmen, dass ein plastischer Bereich einer Arbeitslinie in einem Last-Verformungsdiagramm direkt mit zunehmenden

dem Auftreten von Teilausfällen in Verbindung zu bringen ist. Dies ist wiederum mit Hilfe des 'load sharings' erklärbar: Durch die Lastverteilung auf die Komponenten proportional ihrer Steifigkeit resultiert eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass steife Komponenten, durch die zusätzliche Belastung, früher versagen. Da der Wert der Steifigkeit immer einen Mittelwert des betrachteten Systems darstellt, wird das System zunehmend weicher. Dies äußert sich in einem plastischen Verlauf der Last-Verformungskurve.

3.3 Zusammenfassung

Die nun folgende Zusammenfassung beinhaltet eine gemeinsame Darstellung der recherchierten Literatur zu Systemen mit lastabtragender und lastverteilender Struktur sowie zu Systemen kontinuierlich verbundener Komponenten. Sie vereint in Kurzform stichwortartig die wesentlichen Punkte aus den vorangehenden Kapiteln 3.1 sowie 3.2 mit dem Fokus auf die Thematik dieser Arbeit.

- Der Rohstoff Holz ist charakterisiert durch ein linear plastisches Verhalten, Anisotropie, Ermüdungserscheinungen bei andauernder Lasteinwirkung, sowie einer gegenüber anderen Baumstoffen hohen Inhomogenität.
- Der Aufbau der hier besprochenen Systeme aus parallel angeordneten, hochkantbeanspruchten und miteinander verbundenen Komponenten ist beschreibbar als paralleles, subserielles System.
- Aufgrund dieses Aufbaues entstehen redundante Strukturen welche ihrerseits Lastumlagerungen sowie Lastumverteilungen nach Teilversagen zulassen und so Ausgleichseffekte erzielen.
- Der Systemeffekt resultiert aus den Interaktionen zwischen Komponenten, sowie aus Interaktionen zwischen den Elementen innerhalb einer Komponente. Diese Interaktionen resultieren aus der Reaktion der Elemente sowie Komponenten auf die von außen aufgebracht Belastungen und sind somit hinsichtlich dessen zu unterscheiden.
- Der Systemeffekt als Potential-Zugewinn an der 5 % Quantile der Festigkeit gegenüber jener von Einzelkomponenten wurde weitgehend bestätigt.

- Dieser Zugewinn resultiert aus Effekten statistischen und mechanischen Ursprunges und basiert vorwiegend aus der Verringerung der Streuung und somit einer erhöhten Sicherheit.
- Als Haupteinflussfaktoren wurden die Streuung der Festigkeit sowie auch die Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit genannt, im Zusammenspiel mit weiteren, hinsichtlich der Aussagekraft differenten Einflussgrößen. Im Allgemeinen lässt sich daraus schließen, dass der Systemeffekt, bei durch das Material gegebener Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit, im Wesentlichen als ein Effekt der Streuung der Festigkeiten beschrieben werden kann.
- Als Hauptteileffekte des Systemzugewinnes wurden das 'load sharing' sowie die 'load redistribution' ermittelt.
- Der Lastumverteilungsmechanismus bei Holz wurde seitens der Literatur als zwischen LLS und GLS liegend definiert. Die maximale Belastung die ein beschriebenes System in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten aufnehmen kann liegt somit zwischen der Proportionalität zu n und $n / \ln(n)$
- Es wurde vermerkt, dass ein im Bruchbereich plastisches Verhalten der Komponenten sich hinsichtlich des 'postyield behaviours' positiv auf den Systemeffekt auswirkt, ein ideal sprödes Verhalten aber keine Lastumverteilung nach erfolgtem Teilversagen von Komponenten oder Elementen zulässt.
- Die vorangehenden Darstellungen unter Kapitel 3.1 und 3.2 zeigen deutlich die Variationsbreite in der Bestimmung der Systembeiwerte. Diese Bandbreite resultiert zu einem Gutteil aus den differenten Betrachtungen unterschiedlicher Studien, sowie der großen Anzahl an im Ausmaß geringen aber doch in Summe beeinflussenden Faktoren bezüglich der Elemente, Komponenten sowie Systemstrukturen.
- Eine Festlegung des Systembeiwertes unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen erscheint nicht zielführend, vielmehr ist es anzuraten den Systemeffekt in Abhängigkeit der Hauptparameter in seiner Tendenz zu erfassen und unter Bedacht des probabilistischen Bemessungswesens mit Respekt auf das Material und der Sicherheit in den gültigen Normen zu verankern.

4 NORMENRECHERCHE

In den folgenden Kapiteln werden Regelungen zum Systemeffekt-Beiwert in nationalen und internationalen Normenwerken erläutert und anschließend in Kapitel 4.3 zusammengefasst. Es ist anzumerken, dass im Allgemeinen erhebliche Differenzen hinsichtlich der einzelnen Ansätze in den Regelungen bestehen und viele dieser Ansätze sehr konservativ, nach erster Einschätzung auf unzureichendem Datenmaterial beruhen. Zudem ist die Unterscheidung der in Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen Varianten der Systeme nicht immer gegeben oder nur eine dieser Varianten geregelt.

4.1 Europäischer Raum

In diesem Abschnitt werden die nationalen sowie europäischen Normenwerke hinsichtlich der Regelungen betreffend den Systemeffekt und dessen Anwendung in der Bemessung erläutert.

4.1.1 ON B 4100-2:2003

Es wurden keine Angaben zur Berücksichtigung von Systemeffekten gefunden.

4.1.2 DIN 1052:2004

Die folgenden Punkte sind der Deutschen Norm DIN 1052:2004, für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau, entnommen.

Die DIN 1052:2004 führt unter Punkt "8.1 Allgemeines", (8), (9) und (10), die Berücksichtigung von Systemwirkungen bei kontinuierlichen Lastverteilungssystemen von "... *ähnlichen Bauteilen bei gleichem gegenseitigen Abstand ...*" an, sofern diese seitlich miteinander verbunden sind. Dadurch ergibt sich eine Erhöhung der Festigkeitskennwerte der Bauteile um einen Systembeiwert $k_1 = 1,1$, wenn das "... *kontinuierliche Lastverteilungssystem so bemessen ist, dass es Lasten von einem Bauteil auf das benachbarte Bauteil übertragen kann ...*". Dabei darf der "... *Nachweis für das Lastverteilungssystem im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit einem Teilsicherheitsbeiwert ... von $\gamma_m = 1,0$ (Anm. Kurzzeitbelastung) geführt werden.*"

Des Weiteren ergibt sich die Anwendung eines Systembeiwertes k_1 bei Flächen aus Vollholzlamellen (10.7.2, (1)) "... beim Nachweis der Tragwirkung in Faserrichtung..." für die Erhöhung der Bemessungswerte der Biege- und Schubfestigkeit. Die Formel 4-1 und die Formel 4-2 geben den betreffenden formalen Zusammenhang wieder. Die DIN 1052:2004 stellt den Systembeiwert als eine Funktion der Anzahl der mitwirkenden Lamellen, der Verbindungsart dar und grenzt diesen zusätzlich auf Lamellen und die Belastungsformen Schub und Biegung ein. Die linearen Funktionen, mit einem ab 8 Lamellen konstanten Beiwert, sind in der Abb. 4-1 dargestellt. Die Berechnung der Anzahl der mitwirkenden Lamellen ist in der Formel 4-3 enthalten.

$$f_{m,l,d} = k_1 \cdot f_{m,d}$$

$f_{m,d}$	Bemessungswert der Biegefestigkeit der Lamelle
k_1	Systembeiwert nach Bild 30 der DIN 1052:2004

Formel 4-1

$$f_{v,l,d} = k_1 \cdot f_{v,d}$$

$f_{v,d}$	Bemessungswert der Schubfestigkeit der Lamelle
k_1	Systembeiwert nach Bild 30 der DIN 1052:2004

Formel 4-2

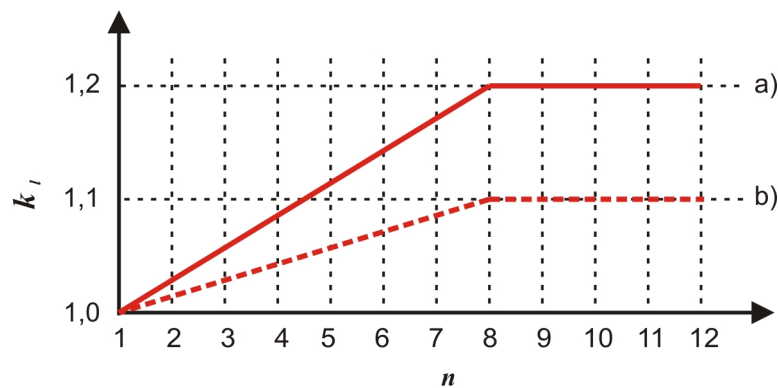
Die Anzahl der mitwirkenden Lamellen ergibt sich wie folgt:

$$n = \frac{b_{ef}}{b_{lam}} \quad \text{mit} \quad b_{ef} = \frac{M_{Träger}}{m_{Platte}}$$

b_{ef}	mitwirkende Breite
$M_{Träger}$	Biegemoment aus Trägerberechnung
m_{Platte}	Biegemoment aus Plattenberechnung
b_{lam}	Breite der Lamelle nach Bild 17 der DIN 1052:2004

Formel 4-3

Der Begriff 'Lamelle' selbst wird nicht definiert, ist jedoch im Allgemeinen mit dem Begriff der BSH-Lamelle in Verbindung zu verstehen und somit mit einer Stärke von rund $d = 45$ mm begrenzt. Damit wären Kantholzdimensionen bei der Berücksichtigung des Systembeiwertes von direkt miteinander verbundenen Komponenten ausgeschlossen. Nach Auskunft von Schickhofer und Gehri, anlässlich eines Beitrages von Brandner, 2005 ist der hier verwendete Begriff 'Lamelle' jedoch nicht auf die Brettdimension beschränkt und schließt Kantholzdimensionen mit ein.



- a) zusammengespante oder verklebte Lamellen
- b) nachgiebig verbundene Lamellen

Abb. 4-1: Systembeiwert k_1 für Lamellen in Abhängigkeit von der Anzahl n der mitwirkenden Lamellen, nach der DIN 1052:2004

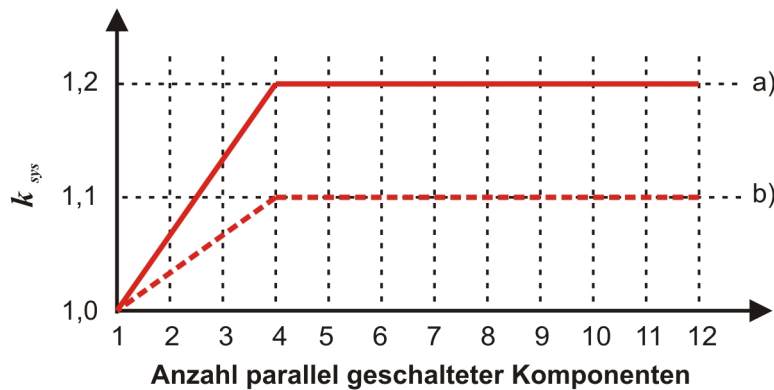
Im Anhang der DIN 1052:2004 enthält die Tabelle F.9 zusätzlich die Berücksichtigung eines Systembeiwertes $k_1 = 1,2$ bei "... Hochkantbeanspruchung der Lamellen von homogenen Brettschichtholz aus mindestens 4 nebeneinander liegenden Lamellen ..." unter Biegung.

4.1.3 SIA 265:2003

Die SIA 265:2003, als Schweizer Norm für den Holzbau, unterscheidet hinsichtlich der Systemwirkung unter Punkt 5.7.1 in (1) "Bauteile mit Ausgleichssystem", und in (2) "Kontinuierlich verbundene Bauteile". Die Systeme, aufgebaut aus ausgleichenden Komponenten, werden definiert als "... gleichartige und gleichbelastete Komponenten oder Bauteile senkrecht zur Tragrichtung durch ein verformungsausgleichendes System untereinander verbunden..." und ermöglichen wie die DIN 1052:2004 die Erhöhung des Bemessungswertes des Tragwiderstandes um einen Systemfaktor $k_{sys} = 1,1$, "... sofern keine genaueren Untersuchungen vorliegen und falls das Ausgleichssystem auf den Ausfall eines Bauteils bemessen wurde".

Unter 'Kontinuierlich verbundenen Bauteilen' werden "... gleichbelastete Komponenten mit gleichartigem Verformungsverhalten ..." verstanden, welche "... seitlich direkt derart untereinander verbunden (sind), dass sie wie ein Einzelbauteil wirken ...". Hierbei darf der "... Tragwiderstand des Bauteils bezüglich Biegung und Schub um den Systemfaktor k_{sys} erhöht werden.". "Der Systemfaktor k_{sys} ..." wird dargestellt als "... eine Funktion der Anzahl der mitwirkenden Komponenten, der Eigenschaften der Kompo-

nenten sowie der Verbindungsart.". "Werden keine genaueren Untersuchungen durchgeführt, dürfen die Systemfaktoren gemäß (Anm. siehe Abb. 4-2) angesetzt werden."



- a) flächenhaft untereinander verbunden (Verleimung oder Reibverbindung)
- b) punktuell, mechanisch untereinander verbunden (Nägel, Schrauben, Stabdübel usw.)

Abb. 4-2: Figur 22: Systemfaktor k_{sys} für Bauteile aus parallel geschalteten Komponenten, nach der SIA 265:2003

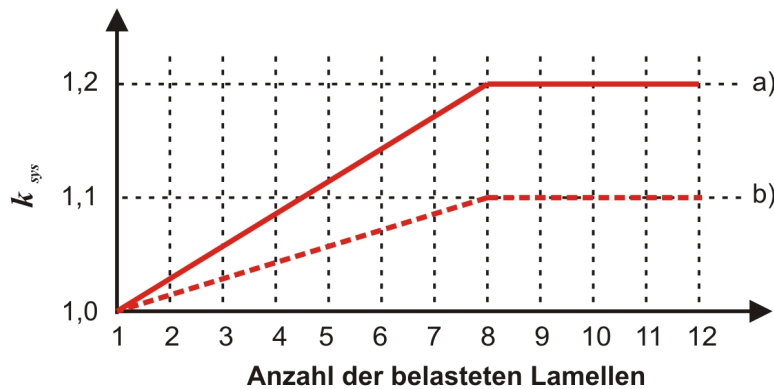
4.1.4 ON EN 1995-1-1:2006

Die europäische Norm ON EN 1995-1-1:2006 "Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau" beinhaltet unter Punkt 6.6 Normenabschnitte zur Berücksichtigung der Systemfestigkeit. Es sind Regelungen zu 'kontinuierlichen Lastverteilungssystemen' ((1) bis (3)), sowie für 'lamellierte Decken' (4) enthalten.

Die Definition und Handhabung entspricht in dieser Norm jenem der DIN 1052:2004 und ist gültig wenn "... mehrere ähnlich Bauteile bei gleichen gegenseitigen Abständen untereinander seitlich durch ein kontinuierliches Lastverteilungssystem miteinander verbunden ..." sind. Wiederum dürfen die "... Festigkeitskennwerte der Bauteile um einen Beiwert für die Systemfestigkeit ..." $k_{sys} = 1,1$ "...erhöht in Rechnung gestellt werden ..." unter der Voraussetzung, "... dass das kontinuierliche Lastverteilungssystem in der Lage ist, die Kräfte von einem Bauteil auf das benachbarte Bauteil zu übertragen...". "Der Nachweis der Beanspruchbarkeit des Lastverteilungssystems sollte unter der Annahme einer kurzen Lasteinwirkungsdauer geführt werden.". Des Weiteren enthält die ON EN 1995-1-1:2006 eine Anmerkung für Dachbinder mit einem maximalen Binderabstand von 1,2 m. Hierbei gilt die Annahme, "... das Dachlatten, Pfetten und Platten die Lasten zu den benachbarten Bindern übertragen können, vorausge-

setzt, dass diese lastverteilenden Bauteile über mindestens zwei Felder durchgehen und etwaige Stöße versetzt angeordnet sind."

Für lamellierte Decken gelten hingegen die Werte für den k_{sys} nach der Abb. 4-3 worin sich der k_{sys} als lineare Funktion in Abhängigkeit der Anzahl der belasteten Lamellen sowie der Verbindung untereinander darstellt.



- a) quervorgespannte oder verklebte Lamellen
- b) vernagelte oder verschraubte Lamellen

Abb. 4-3: Bild 6.12 - Beiwert für die Systemfestigkeit k_{sys} für lamellierte Decken aus Vollholz oder Brettschichtholz, nach der ON EN 1995-1-1:2006

4.1.5 ON EN 1995-2:2005

Der europäische Normenentwurf ON EN 1995-2:2005 "Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten - Teil 2: Brücken" enthält ebenfalls Angaben zur Berücksichtigung der Systemsteifigkeit (Punkt 6.1.1). Hierin wird einerseits auf den Abschnitt 6.7 der prEN 1995-1-1 verwiesen. Andererseits enthält Punkt (2) die formalen Zusammenhänge zur "... Berechnung der Biege- und Schubfestigkeiten der Deckplatten..." welche in Formel 4-4 und Formel 4-5 nachfolgend dargestellt sind. Weiters enthalten die Formel 4-6 und Formel 4-7 die Berechnung der Anzahl der belasteten Lamellen welche unter Abb. 4-4 schematisch dargestellt ist. Die Abb. 4-5 beinhaltet zudem Varianten von Deckplatten-Aufbauten wobei hierfür die Systembeiwerte nach der EN 1995-1-1 heranzuziehen sind. Betreffend der Variante d) dieser Darstellung gilt die Einschränkung auf die Anwendung der Funktionslinie 1 (siehe Abb. 4-3, Funktionslinie a)) des k_{sys} nach EN 1995-1-1.

$$f_{m,d,deck} = k_{sys} \cdot f_{m,d,lam}$$

$$\frac{f_{m,d,lam}}{k_{sys}}$$

Bemessungswert der Biegefestigkeit der Lamellen
 Systembeiwert, siehe EN 1995-1-1. Für Deckplatten entsprechend Bild 1.2 d sollte EN 1995-1-1 Bild 6.14 Linie 1 (siehe Abb. 4-3, Funktionslinie a)) verwendet werden.

Formel 4-4

$$f_{v,d,deck} = k_{sys} \cdot f_{v,d,lam}$$

$$\frac{f_{m,v,lam}}{k_{sys}}$$

Bemessungswert der Schubfestigkeit der Lamellen
 Systembeiwert, siehe EN 1995-1-1. Für Deckplatten entsprechend Bild 1.2 d) sollte EN 1995-1-1 Bild 6.14 Linie 1 (siehe Abb. 4-3, Funktionslinie a)) verwendet werden.

Formel 4-5

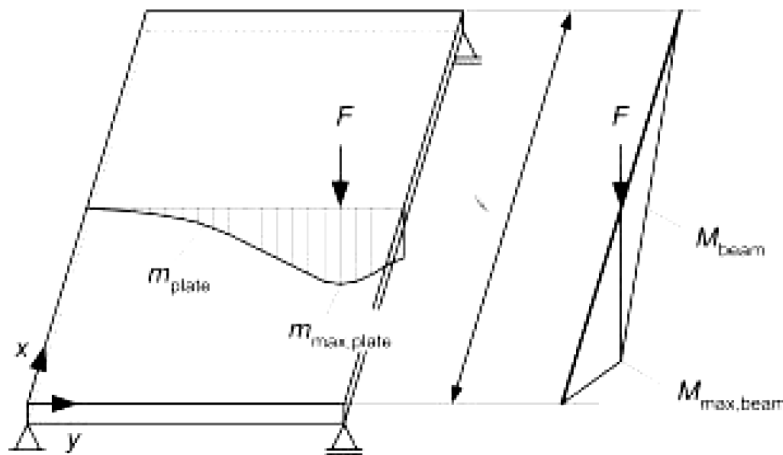


Abb. 4-4: Bild 6.1 - Beispiel der Biegemomentenverteilung in der Platte zur Ermittlung der wirksamen Breite, nach ON EN 1995-2:2005

Zur Berechnung des Systembeiwertes k_{sys} sollte die Anzahl der belasteten Lamellen angenommen werden zu:

$$n = \frac{b_{ef}}{b_{lam}}$$

b_{ef} wirksame Breite
 b_{lam} Breite der Lamelle

Formel 4-6

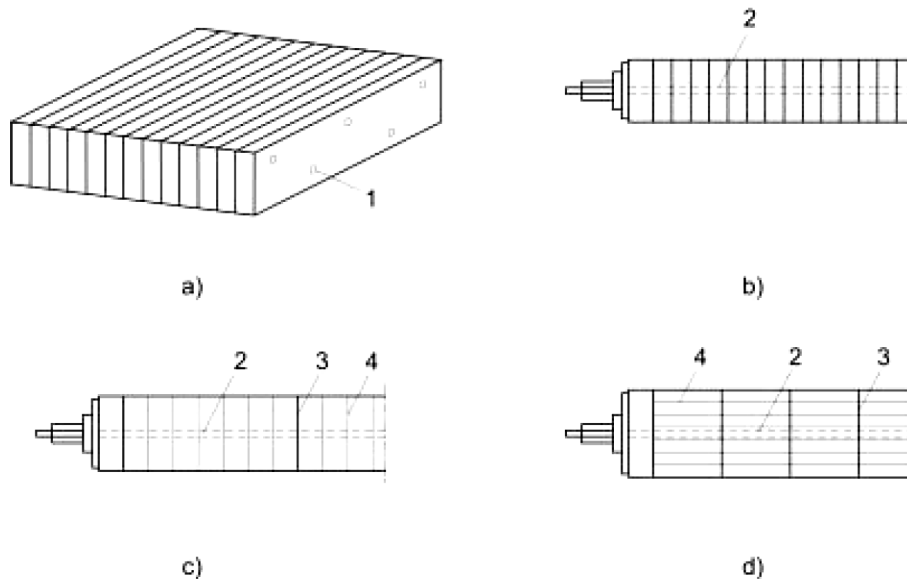
Die wirksame Breite b_{ef} sollte nach (3) angenommen werden zu (siehe Abb. 4-4):

$$b_{ef} = \frac{M_{\max,beam}}{m_{\max,plate}}$$

$M_{\max,beam}$
 $m_{\max,plate}$

Maximales Biegemoment eines Balkens der eine Platte ersetzt
Maximales Biegemoment in der Platte, errechnet mittels einer Plattenbe-
rechnung

Formel 4-7



Zeichenerklärung:

- 1 Nagel oder Schraube
- 2 Stab oder Spannglied zur Vorspannung
- 3 Klebefuge zwischen verleimten Lamellen
- 4 Klebefuge zwischen Schichten verleimter Lamellen

Abb. 4-5: Bild 1.2 - Beispiele von Deckplatten aus nebeneinander angeordneten Lamellen, nach der ON EN 1995-2:2005: a) Genagelte oder verschraubte Lamellen; b) Zusammengespannt, aber nicht geklebt (QS-Platten); c) Geklebte und zusammengespannte Teile, Lamellen nebeneinander (QS-Platten); d) Geklebte und zusammengespannte Teile, Lamellen übereinander (QS-Platten)

4.1.6 enBR:2005 (eurocodenahe Bemessungsrichtlinie)

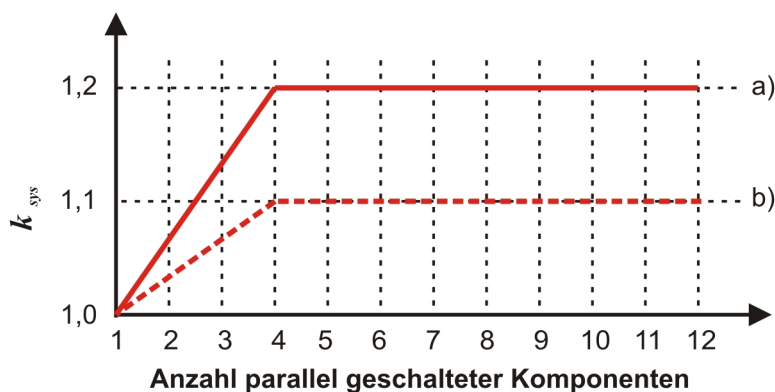
Die enBR:2005 (Eurocodenahe Bemessungsrichtlinie) ist ein Ergebnis des Projektes P07_standardisation des Kompetenzzentrums holz.bau forschungs gmbh an der Technischen Universität Graz, und dient zur Aufarbeitung des Eurocode 5 sowie der Darstellung von Unklarheiten und Implementierungen von Änderungsvorschlägen nach Untersuchungen seitens der holz.bau forschungs gmbh.

Der Punkt 3.6 "*Brettschichtholz (BSH)*" enthält unter anderem die Regelung, dass "... bei Hochkantbiegebeanspruchung der Lamellen von Brettschichtholz aus mindestens

vier nebeneinander liegenden Lamellen ..." die "... charakteristischen Werte der Biegefestigkeit $f_{m,k}$ mit dem Systembeiwert $k_{sys} = 1,2$ erhöht werden ..." dürfen.

Der Punkt 4.6 "Systemwirkungen k_{sys} " unterscheidet die Berücksichtigung des Beiwertes für die Systemfestigkeit $k_{sys} = 1,1$, bei Systemen aufgebaut aus mehreren ähnlichen Bauteilen mit gleichem gegenseitigem Abstand welche "... seitlich durch ein kontinuierliches Lastverteilungssystem miteinander verbunden ..." sind, und die Voraussetzung erfüllen, dass das kontinuierliche Lastverteilungssystem in der Lage ist die Kräfte von einem Bauteil auf das benachbarte Bauteil zu übertragen. "Der Nachweis für die Beanspruchbarkeit des Lastverteilungssystems darf unter der Annahme einer kurzen Lasteinwirkungsdauer geführt werden.". Die Anmerkung betreffend Dachbinder mit einem maximalen Binderabstand von 1,2 m entspricht jener der ON EN 1995-1-1:2006.

Bei "... gleich belasteten Komponenten mit gleichartigem Verformungsverhalten ..." welche "... seitlich direkt untereinander verbunden (sind), so dass sie wie ein Einzelbauteil wirken, darf der Tragwiderstand des Bauteils bezüglich der Biegefestigkeit um den Systemfaktor k_{sys} (Anm. nach Abb. 4-6), sofern keine genaueren Untersuchungen vorliegen) erhöht werden.". Hierbei gilt der Systemfaktor k_{sys} als "... eine Funktion in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten, der Eigenschaften der Komponenten sowie der Verbindungsart.".



- a) flächenhaft miteinander verbunden (Verklebung oder Reibverbund)
- b) punktuell, mechanisch untereinander verbunden (Nägeln, Schrauben, Stabdübel usw.) sowie blockverklebte oder quervorgespannte BSH-Träger

Abb. 4-6: Bild 4.7 "Systembeiwert k_{sys} für lamellierte Elemente", nach der enBR:2005

4.2 International (Amerika, Kanada, Australien)

4.2.1 LRFD:1996

"*LRFD - Load and Resistance Factor Design - Manual for Engineered Wood Construction*" beschreibt unter Punkt 4.4 "*Load Sharing Effects*" dass, wenn 'joists' in Übereinstimmung mit der AF&PA / ASCE 16-95, Section 5.3.4 "*Requirements for load sharing*" angeordnet sind, der Bemessungswert der Biegefestigkeit bei Systemen, im Gegensatz zu Einzelkomponenten, um einen Faktor erhöht werden kann. Die Erhöhung ist in Abhängigkeit der Streuung der Festigkeit des jeweiligen Stegmaterials des I-Trägers verankert und beträgt für Stege aus LVL ('laminated veneer lumber') sowie PSL ('Parallel strand lumber') rund 4 % (Faktor = 1,04), bei maschinell sortiertem Holz rund 7 % (Faktor = 1,07), und bei visuell sortiertem Steg-Material rund 15 % (Faktor = 1,15).

4.2.2 NDS:2001

Die "*NDS - National Design Specification - Design Values for Wood Construction:2001*" enthält unter "*Table 4B - Adjustment Factors*" Regelungen zum "*Repetitive Member Factor, C_r* ". Hierbei sollen Designwerte der Biegefestigkeit "*... for dimension lumber 2" to 4" thick ... multiplied by the repetitive member factor, $C_r = 1.15$, when such members are used as joists, truss chords, rafters, studs, planks, decking or similar members which are in contact or spaced not more than 24" on centers, are not less than 3 in number and are joined by floor, roof or other load distributing elements adequate to support the design load.*".

Weiters wird in Tabelle 4.3.9 das "*load distributing element*" als ein geeignetes System beschrieben, wenn "*... it is designed or has been proven by experience to transmit the design load to adjacent members, spaced as described above, without displaying structural weakness or unacceptable deflection ...*" wobei "*... subflooring, flooring, sheating, or other covering elements and nail gluing or tongue and groove joints, and through nailing generally meet these criteria...*".

4.2.3 Wood Design Manual 1995 inklusive Literatur, sowie relevante Regelungen des O86.1-94:1994

Das "*Wood Design Manual 1995*" des "*Canadian Wood Council*" beinhaltet ebenfalls Regelungen zur Berücksichtigung von Systemeffekten in der Bemessung. Unter Punkt

2.3 "*System Modifikation Factors*" wird die positive Wirkung der Systeme gegenüber Einzelkomponenten über folgende 3 Punkte erklärt:

- Unter Betrachtung des Systems als redundante Struktur und den Interaktionen zwischen den Systemkomponenten ergibt sich beim 'load-sharing system', dass diese Effekte in Abhängigkeit der relativen Steifigkeit der Komponenten auftreten.
- Die 'composite action' zwischen der lastverteilenden Struktur und der Verbindung zu den Komponenten erhöht die Systemwirkung.
- Weiters reduziert ein System die Wahrscheinlichkeit, dass schwache Komponenten in Bereichen hoher Belastung auftreten.

Auf Basis von Untersuchungen an 'repetitive systems' von Boden- und Deckensystemen auf Biegung wurde das Systemverhalten als Funktion von folgenden Variablen festgelegt:

- Stärke des lastverteilenden Systems (Bedeckung)
- Verhältnis der Steifigkeit der Bedeckung zur Steifigkeit der Komponenten, längs- und quer zur Faser
- Steifigkeit der Verbindung
- Streuung der Steifigkeit zwischen den Komponenten
- Streuung der Festigkeit zwischen den Komponenten
- Größe und Variabilität der aufgetragenen Belastungen
- statistische Korrelation zwischen Steifigkeit und Festigkeit der Komponenten
- Belastungsart (hier Biegung)

Als Parameter mit geringem Einfluss gelten die Trägerhöhe sowie der Trägerabstand.

Eine weitere Unterscheidung betrifft die Leistungsdefinition des Systems. Hier kann unterteilt werden in "*single member approach*", unter Betrachtung des Ausfalles der am höchsten belasteten Komponente, und "*first level system design*", beeinflusst von der Anzahl der Komponenten. Zur Bestimmung der Größe der Systemeffekte wurde das Verhältnis von möglichen Spannweiten bei festgelegtem Zuverlässigkeitsindex β bestimmt. Hierbei wurde die erreichbare Spannweite des Systems jenem der Einzelkom-

ponente unter Annahme einer gleichverteilten Belastung gegenübergestellt (siehe Abb. 4-7). Unter Variation der Eingangsparameter wurde somit ein Systembeiwert K_H zwischen 1.41 und 1.77, mit einem Mittelwert von 1.63 ermittelt.

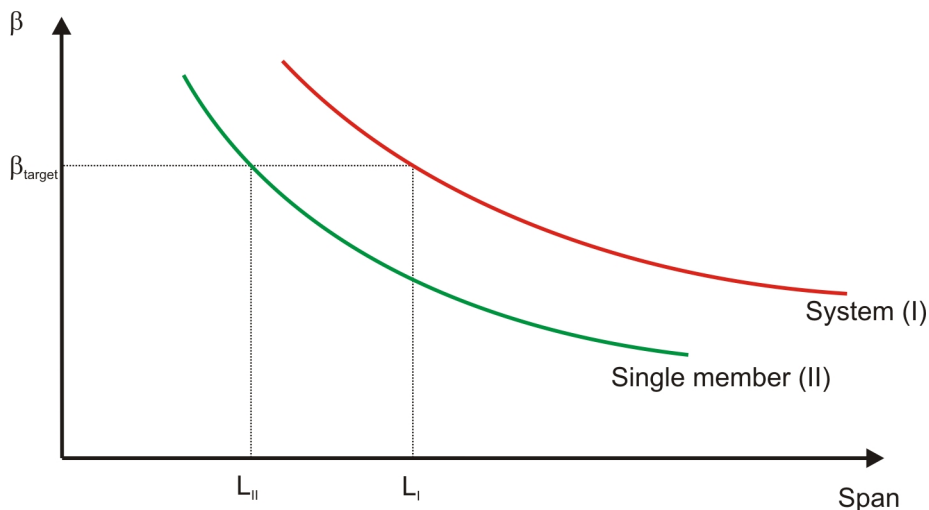


Abb. 4-7: Figure 12.4 "Effect of system behaviour on β - span relationship", nach dem Wood Design Manual, 1995

CSA O86.1-94:1994 gibt einen Wert von $K_H = 1.40$ für alle Varianten von Konstruktionen von Decken- und Dachkonstruktionen an. Ein Wert von $K_H = 1.10$ sollte für einheitlich gerichtete Deckungen normal zur Komponentenebene angewendet werden. Für Deckungen in paralleler Ausrichtung zu den Komponenten ist der $K_H = 1.00$ zu setzen.

Der "Clause 5.4.4 - System Factor, K_H " als Unterkapitel von 12.4 "Sawn Lumber" beschreibt die Anwendung des Systemfaktors K_H nach dem CSA O86.1-94:1994 "Engineering Design in Wood (Limit States Design)". Dieser beinhaltet unter Punkt 5 "Sawn Lumber", Unterkapitel 5.4.4 "System Factor, K_H " zwei Unterscheidungsfälle, "Case 1" und "Case 2".

Der "Case 1" beschreibt die Anwendung des Systemfaktors bei "... sawn lumber members in a system consisting of 3 or more essentially parallel members spaced not more than 610 mm apart and so arranged that they mutually support the applied load...". Die damit verbundenen Systemfaktoren sind der Tab. 4-1 zu entnehmen. Weiters wird angeführt, dass "Case 1" allgemein für Systeme aus Komponenten mit geringen Abständen zueinander zutrifft, wie etwa Deckenkonstruktionen, Systemkomponenten von Ge-

bäuden, und BSH. Zusätzlich besteht die Anwendbarkeit für jene Systeme, welche dem "Case 2" nicht entsprechen.

Der "Case 2" findet generell Anwendung für Systeme welche zusätzlich zu den Anforderungen von "Case 1" folgendes erfüllen:

- "... the joists, rafters, or studs are sheathed with plywood, waferboard, or OSB of minimum 9.5 mm thickness, or with 17 mm minimum thickness lumber in combination with panel covering such as underlayment or with wood finish flooring ..."
- "... the sheathing or subfloor is attached to the members to provide a minimum stiffness equivalent to that provided by 2-inch common nails at 150 mm centres at edges of sheathing panels, and 300 mm centres elsewhere ..."

Zudem wird festgehalten, dass "Case 2" allgemein Anwendung findet bei konventionellen Leichtbausystemen von Decken- und Dachkonstruktionen unter Verwendung von Konstruktionsrahmenholz und minimalen Anforderungen an Deckung und Verbindung. Die Faktoren für den "Case 2" sind somit anwendbar für die Kennwerte der Einzelkomponenten, nicht jedoch zusätzlich zu den Analysen der 'partial composite action'.

Ergänzend enthält Tab. 4-1 Regelungen für 'built-up beams' beschrieben als "...consisting of two or more individual members of the same depth that are fastened together so the beam will deflect as a unit ...".

Tab. 4-1: "System Factor, K_H " nach dem 086.1-94:1994

For specified strength in	Case 1*	Case 2†		
		Visually graded	MSR	Built-up beams
Bending	1.10	1.40	1.20	1.10
Longitudinal shear	1.10	1.40	1.20	1.10
Compression parallel to grain	1.10	1.10	1.10	1.00
Tension parallel to grain	1.10	N/A	N/A	1.00
All other properties	1.00	1.00	1.00	1.00

* See ... conditions applying to Case 1

† See ... conditions applying to Case 2

N/A not applicable

Unter Punkt 6.4.3 "System Factor, K_H " als Unterkapitel von 6 "Glued-Laminated Timber (Glulam)" wird der Systemfaktor definiert für "...members in a system consisting of three or more essentially parallel members spaced not more than 610 mm apart and so arranged that they mutually support the applied load...". Hierbei ist der Systemfaktor $K_H = 1,00$ für Belastung auf Zug parallel zur Faser, und $K_H = 1,10$ für alle anderen Belastungsrichtungen festgelegt.

4.2.4 Ontario Highway Bridge Code, Canadian regulations

4.2.4.1 Regelungen des Canadian Wood Council, im Buch "Wood highway bridges", 1992

In diesem Regelwerk wird ein 'load sharing factor k_m ' für "... multiple member systems..." vorgeschlagen, welche "... connected in such a way that they effectively share the applied loads". Das Diagramm 4-1 beinhaltet den 'load sharing factor' für Zug, Schub und Biegung, in Abhängigkeit von der Anzahl der Komponenten sowie der Sortierklasse. "They are not applicable to compression because load sharing in compression has not yet been adequately investigated.". Jedoch ist ein maximaler $k_m = 1,1$ bei Druckbeanspruchung in Ausnahmefällen anwendbar, wenn der Abstand zwischen den Komponenten ≤ 600 mm beträgt.

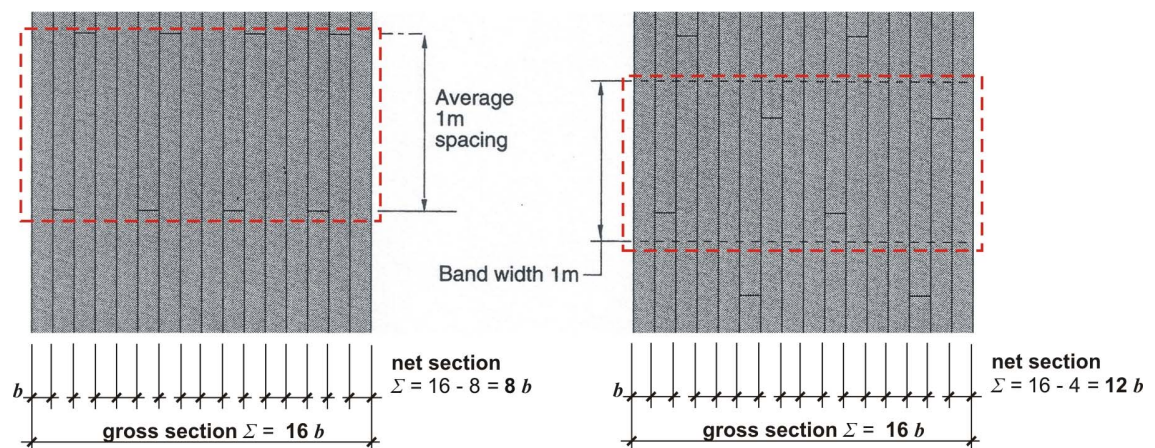
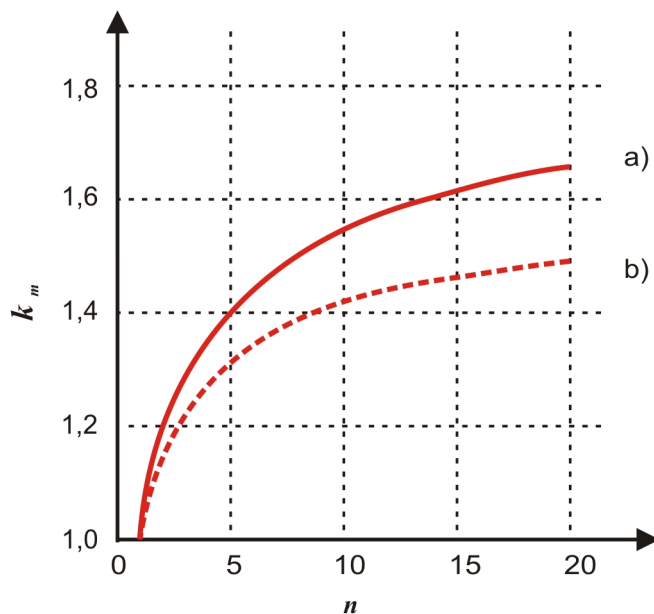


Abb. 4-8: Ermittlung der 'gross section' und 'net section' in Anlehnung an das Canadian Wood Council, 1992

Bei Beanspruchung auf Zug werden die Varianten "tension at the gross section" und "tension at the net section" unterschieden. "In the gross section calculation (Anm. siehe Abb. 4-8), the benefits of load sharing ... are doubtful. Even if the components are well

bolted together, they could fail at different locations along their lengths. That is, the applied tensile force ... may be able to seek the weakest section of each component. For this reason ... $k_m = 1.0$ ". Für "tension at the net section" (siehe Abb. 4-8) gilt das Diagramm 4-1, da "... the probability of all components being weak at the same location where holes or notches are located is low...".



a) grades 1 & 2 ($V_R = 0.30$)

b) selected structural ($V_R = 0.25$)

Diagramm 4-1: Figure 5.2 "Load sharing factor k_m ", in Anlehnung an Canadian Wood Council, 1992

4.2.4.2 Regelungen des Canadian Wood Council, im Buch "Introduction to design in wood", 1994

"When a system of parallel members act together to support a load there is the possibility that ... at any deflection ... stiffer and stronger pieces in a system ... will carry more load than the pieces of lower stiffness and strength".

"Case 1" Systeme sind hierbei anzuwenden bei "... systems of trusses or where composite action is otherwise recognized ... depending on the configuration of framing, sheathing and fastenings."

"Case 2" ist anzuwenden für Systeme von "... traditional solid lumber joist, rafter or stud systems with basic sheathing and fastenings." und beinhalten "... certain combinations of sheathing and fastening ...".

Tab. 4-2: System Factor, K_H , nach dem Canadian Wood Council

For specified strength in	Case 1	Case 2		
		Visually graded	MSR	Built-up beams
Bending	1.10	1.40	1.20	1.10
Longitudinal shear	1.10	1.40	1.20	1.10
Compression parallel to grain	1.10	1.10	1.10	1.00
Tension parallel to grain	1.10	1.00	1.00	1.00
All other properties	1.00	1.00	1.00	1.00

Für die angegebenen Festigkeiten von BSH, ausgenommen Zug, ist $K_H = 1,1$ anzuwenden, sofern die Systeme aus "... 3 or more essentially parallel members ..." im Abstand von maximal 610 mm voneinander positioniert sind "... that they mutually support the applied load."

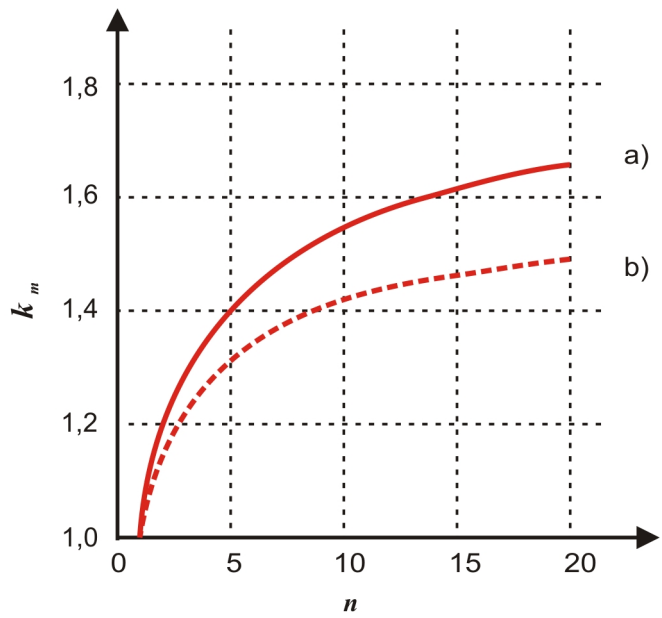
4.2.4.3 Regelungen des Ministry of Transportation, im Buch "Ontario highway bridge design", 1991

Unter Punkt 9 - 5.6 wird der "Load-sharing Factor" definiert für "... systems of members in flexure and shear, and for tension members at the net section only, load-sharing factor, k_m , shall be obtained from (Anm. siehe Abb. 4-9) for the grade of wood and the number of components, n , which deflect substantially equally in mutually supporting the load. For compression, k_m shall be taken as 1.1 for members spaced not more than 600 mm apart. For all other systems, k_m shall be taken as 1.0. For moments and shears in flexural members, n shall be taken as the number of components within the width D_e and $0.8 D_e$, respectively, where D_e is specified in (Anm. siehe Tab. 4-3) for various cases".

Tab. 4-3: Table 9-5.6 "Values of D_e ", nach dem OHBDC-91-01:1991

Case	D_e , (m)
Longitudinal, nail-laminated decks	0.85
Transverse, nail-laminated decks	0.40
Longitudinal, stress-laminated decks	1.75
Transverse, stress-laminated decks	0.75
Stringers of sawn timber stringer bridges	1.75
Longitudinal laminations of wood-concrete composite decks	1.60

Zudem enthält der Punkt 9 - 12.3 "Vertically laminated beams" die Anforderung, dass die Berechnung der Festigkeit von "...beams composed of vertical laminations..." kalkuliert werden sollte in Übereinstimmung mit "...load-sharing systems in sawn wood...".



- a) grades 1 & 2 ($V_R = 0.30$)
- b) selected structural ($V_R = 0.25$)

Abb. 4-9: Figure 9-5.6 "Load-sharing factor", nach dem OHBDC-91-01:1991, nach den Regelungen des Ministry of Transportation, 1991

Tab. 4-4: "Load sharing factors" in Abhängigkeit der Sortierklasse und der zugewiesenen Streuung, nach dem OHBDC-91-01:1991, nach den Regelungen des Ministry of Transportation, 1991

n	k_m grades 1 & 2 ($V_R = 0.30$)	k_m select structural ($V_R = 0.25$)
2	1.17	1.13
3	1.27	1.21
4	1.35	1.27
5	1.41	1.32
10	1.57	1.43
15	1.65	1.49
20	1.69	1.52

4.2.5 AS 1720.1:1997

Der Australische Standard AS 1720.1:1997 für "*Timber structures - Part 1: Design methods*" bildet die Grundlage der hier dargestellten Exzerpte zur Berücksichtigung von Systemwirkungen in der Bemessung.

Der Punkt 2.4.5 "*Strenght sharing between parallel members*" beschreibt Systeme für die gilt "*when a sawn timber structural member is one of a number of parallel acting elements that interact to assist each other to form a strength sharing structural system, then the characteristic capacities in bending for sawn structural timber may be increased by the strength sharing factor, k_9 ...*" wobei dieser Faktor "*... shall not apply to plywood, glued laminated timber and LVL members...*".

Unter 2.4.5.2 "*Strength sharing structural systems*" wird unterschieden zwischen (a) "*Combined parallel systems*" als Systeme "*... comprised of two or more elements that are effectively fastened together...*", und (b) "*Discrete parallel systems*" als Systeme mit "*... three or more members that are discretely spaced parallel to each other ... (to) support either an overlying set of members, usually laid at right angles to the supporting members, or a structural sheathing material...*".

Wobei "*... Effectively fastened together ...*" betreffend das System (a) definiert ist "*... that all of the elements are constrained to the same deformation under load...*", und eine steife Verbindung an einer Vielzahl an Punkten entlang der Komponenten als Variante erklärt wird. Zur Bestimmung des Faktors k_9 gilt die effektive Anzahl der Komponenten einer Einzelgruppe als Bezugsgröße.

Der Faktor k_9 der Variante (b) ist definiert durch die Anzahl der Komponenten errechnet nach der Formel 4-8.

$$n_{com} \times n_{mem}$$

n_{com}	Anzahl der Komponenten des 'combined parallel system' welche miteinander ein Einzelement bilden
n_{mem}	Anzahl der Komponenten des 'discrete parallel system' welche zueinander in Abstand stehen

Formel 4-8

Es ist dem Standard zu entnehmen, dass "... for a parallel system, in the event of the failure of a single supporting member ... the overlying members or sheathing material should be capable of transferring loads to adjacent supporting members ...".

Die Abb. 4-10 enthält Beispiele von parallelen Systemen mit den zugehörigen Werten nach der Tab. 4-5 nach dem AS 1720.1:1997. Die Formel 4-9 enthält die formalen Zusammenhänge zur Ermittlung des Faktors k_9 . Die Funktion selbst ist in Abhängigkeit des s / L - Verhältnisses und in Abhängigkeit der Gewichtung der Anteile beider Systeme zueinander im Diagramm 4-2 dargestellt. Das Diagramm 4-3 enthält eine Darstellung des "strength sharing factors" k_9 bei alleiniger Berücksichtigung von "combined parallel systems", in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten. Deutlich erkennbar ist der nichtlineare, degressive Verlauf der Funktion. Ab einer Komponentenanzahl von $n_{com} \geq 10$ wird ein gleich bleibend konstanter Wert angenommen.

$$1.0 \leq k_9 = g_{31} + (g_{32} - g_{31}) \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot s}{L} \right]$$

- | | |
|----------|--|
| g_{31} | Geometriefaktor in Abhängigkeit der Anzahl der Elemente (n_{com}) eines 'combined parallel system' nach der Tab. 4-5 |
| g_{32} | Geometriefaktor in Abhängigkeit der Anzahl der Elemente ($n_{com} \times n_{mem}$) eines 'discrete parallel systems' nach der Tab. 4-5 |
| s | Abstand zwischen den Schwerpunkten der Komponenten eines 'discrete parallel systems' (siehe Abb. 4-10) |
| L | die effektive Spannweite einer Komponente des parallelen Systems |

Formel 4-9

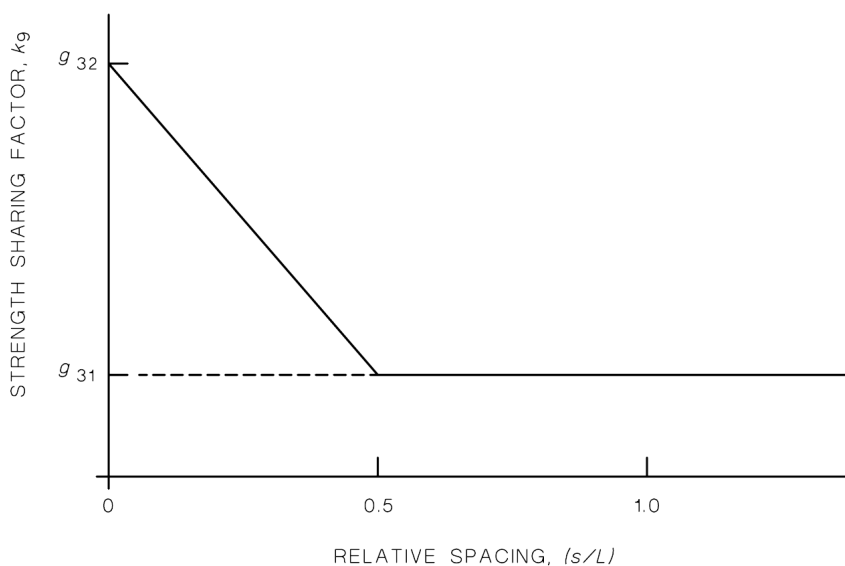
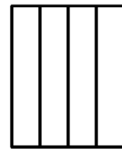
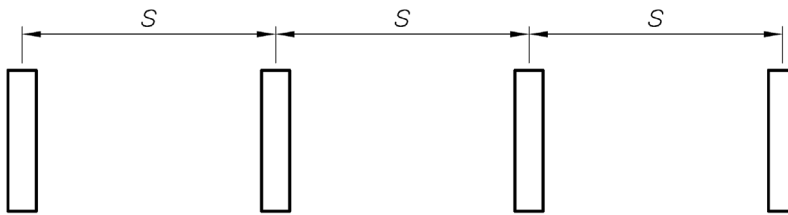


Diagramm 4-2: "Figure 2.4 - Strength sharing factor", nach dem AS 1720.1:1997



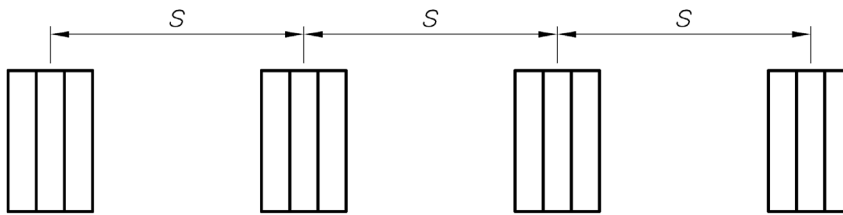
Example
 $n_{com} = 4$
 $\therefore g_{31} = 1.24$
 $n_{mem} = 1$
 $n_{com} \times n_{mem} = 4$
 $\therefore g_{32} = 1.24$

(a) Combined parallel system



Example
 $n_{com} = 1$
 $\therefore g_{31} = 1.0$
 $n_{mem} = 4$
 $n_{com} \times n_{mem} = 4$
 $\therefore g_{32} = 1.24$

(b) Discrete parallel system



Example
 $n_{com} = 3$
 $\therefore g_{31} = 1.20$
 $n_{mem} = 4$
 $n_{com} \times n_{mem} = 12$
 $\therefore g_{32} = 1.33$

(c) Combined and discrete parallel system

Abb. 4-10: "Figure 2.3 Parallel Systems", nach dem AS 1720.1:1997

Tab. 4-5: "TABLE 2.11 - Geometric factors for parallel systems", nach dem AS 1720.1:1997

Number of members in combined parallel system (n_{com})	g_{31}	Total number of members in parallel system ($n_{com} \times n_{mem}$)	g_{32}
1	1.00	1	1.00
2	1.14	2	1.14
3	1.20	3	1.20
4	1.24	4	1.24
5	1.26	5	1.26
6	1.28	6	1.28
7	1.30	7	1.30
8	1.31	8	1.31
9	1.32	9	1.32
10 or more	1.33	10 or more	1.33

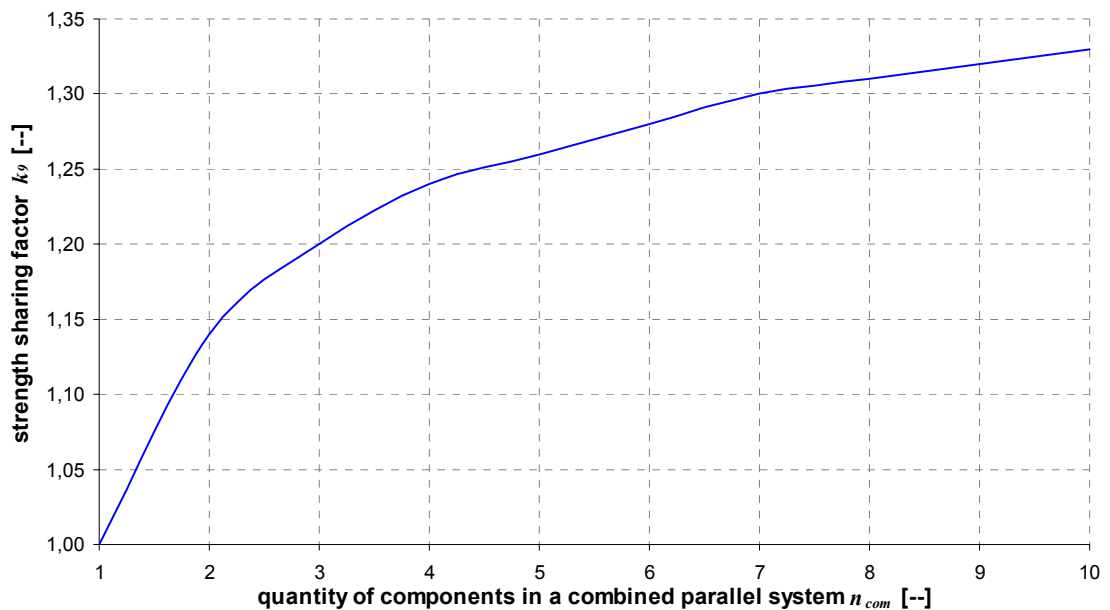


Diagramm 4-3: "strength sharing factors" von "combined parallel systems" in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten, in Anlehnung an AS 1720.1:1997

4.3 Zusammenfassung

Im Folgenden eine zusammenfassende Darstellung sowie ansatzweise Diskussion der Erkenntnisse aus den nationalen und internationalen Regelwerken in aufgelisteter Form.

- Regelungen zur Berücksichtigung von Effekten aus Systemen lastverteilender und lastabtragender Strukturen, sowie kontinuierlich verbundener Strukturen sind in europäischen sowie internationalen Normenwerken enthalten und ein Thema der Auseinandersetzung.
- Die nationale Norm ON B 4100-2:2003 enthält diesbezüglich keine Angaben.
- Die DIN 1052:2004 sowie die inhaltlich darauf aufbauende ON EN 1995-1-1:2006 regelt 'kontinuierliche Lastverteilungssysteme' mit einem die Festigkeitswerte allgemein (ohne Einschränkung) erhöhenden Systembeiwert von k_1 bzw. $k_{sys} = 1,1$, unter der Nachweisführung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit bei 'kurzer Lasteinwirkungsdauer'. Die ON EN 1995-1-1:2006 enthält die Anmerkung der Gültigkeit des Systembeiwertes bei Dachbindern innerhalb von Dachkonstruktionen, bei einem maximalen Binderabstand von 1,2 m.

- Die DIN 1052:2004 sowie die ON EN 1995-1-1:2006 beinhalten Regelungen für Systeme aus kontinuierlich verbundenen Komponenten. Hierbei gilt die Einschränkung auf Deckenkonstruktionen aus Vollholzlamellen bzw. lamellierte Decken. Ein Systembeiwert k_1 bzw. k_{sys} ist demnach als erhöhender Faktor für die Schub- und Biegefestigkeit einsetzbar. Die Funktion zur Bestimmung des k_1 bzw. k_{sys} ist in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Lamellen sowie der Verbindungsart zwischen den Lamellen definiert und erreicht nach linearem Anstieg ein Maximum ab 8 Lamellen. Der Begriff der 'Lamelle' ist nicht definiert.
- Die Anzahl der mitwirkenden Lamellen wird in der DIN 1052:2004 anhand der effektiven Breite b_{ef} bestimmt.
- Zudem enthält die DIN 1052:2004 eine Regelung für auf Biegung hochkantbeanspruchte BSH-Lamellen wobei ab einer Lamellenanzahl ab 4 ein Systembeiwert $k_1 = 1,2$ angesetzt werden darf.
- Auf Basis dieser Regelung muss angenommen werden, dass der Begriff 'Lamelle', getrennt vom Begriff der 'BSH-Lamelle', als auch für außerhalb der Brettstärke von $d = 45$ mm als gültig anzusehen ist, und somit auch für Systeme aufgebaut aus Kantholzdimensionen nach Abb. 4-1 angesetzt werden kann.
- Der Eurocode 5 enthält unter der ON EN 1995-2:2005 Angaben zur Berücksichtigung des Systembeiwertes bei der Biege- und Schubfestigkeit von Deckplatten, wobei zur Festlegung der Funktion die Angaben der ON EN 1995-1-1:2006 heranzuziehen sind. Auf Basis der ON EN 1995-2:2005 wird auch im Eurocode die Anzahl der mitwirkenden Lamellen über die effektive Breite b_{ef} bestimmt, zusätzlich ermöglicht wird jedoch, gegenüber der DIN 1052:2004, die Berücksichtigung von blockverleimten oder quervorgespannten BSH-Trägern als Lamellen.
- Die SIA 265:2003 regelt 'Bauteile mit Ausgleichssystem' mit einem Systembeiwert $k_{sys} = 1,1$, sofern keine genaueren Untersuchungen vorliegen und das Ausgleichssystem auf den Ausfall eines Bauteils bemessen wurde. Somit lässt die SIA 265:2003 eine erweiterte Regelung nach Abklärung offen und bezieht die Gebrauchstauglichkeit über das Ausfallskriterium mit ein.
- SIA 265:2003 liefert Angaben zur Festlegung des Systembeiwertes für Systeme aus 'kontinuierlich verbundenen Bauteilen'. Die Funktion des Systembeiwertes k_{sys} ist dargelegt, in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten, der Eigenschaften der Komponenten sowie der Verbindungsart. Diese Betrachtung

unterscheidet sich hiermit wesentlich von den Regelungen der DIN 1052:2004 sowie der ON EN 1995-1-1:2006 welche hier auf die Betrachtung von Lamellen einschränken, sowie die Eigenschaften dieser in der Darlegung der Funktion unberücksichtigt lassen. Die Funktion des k_{sys} nach der SIA 265:2003 erreicht nach linearem Anstieg ihr Maximum ab einer Anzahl der Komponenten von $n = 4$.

- Die enBR:2005 beinhaltet einen Mix aus der DIN 1052:2004, dem ON EN 1995-1-1:2006 und dem SIA 265:2003. Die Regelung von Lastverteilungssystemen ist inklusive der Anmerkung identisch mit jener des ON EN 1995-1-1:2006. Der Passus für die Regelung der hochkantbeanspruchten BSH-Lamellen ist identisch mit der DIN 1052:2004. Die Berücksichtigung der Systemwirkung bei kontinuierlich verbundenen Komponenten erfolgt in Anlehnung an die SIA 265:2003. Die Funktion des k_{sys} erreicht somit nach linearem Anstieg ab 4 Komponenten ihr Maximum, wobei inhaltlich auch, in Anlehnung an die ON EN 1995-2:2005, blockverklebte oder quervorgespannte BSH-Träger berücksichtigt werden.
- Im LRFD:1996 regelt die Berücksichtigung von 'load sharing effects' als Faktor zur Erhöhung der Biegefestigkeit bei I-Trägern, in Abhängigkeit der Streuung der Festigkeiten des Steg-Materials, soweit die Anordnung der 'Section 5.3.4' der 'AF&PA / ASCE 16-95' entspricht.
- Die NDS:2001 enthalten Faktoren zur Berücksichtigung des 'repetitive member factors' bei der Biegefestigkeit von Systemen aus 2 by 4, ab einer Anzahl von ≥ 3 in einem definierten System mit lastverteilender und lastabtragender Struktur.
- Inhalte des 'Wood Design Manual 1995' sind in Kombination mit den Standards des O86.1-94:1994 ebenfalls den Systemeffekten lastverteilender und lastabtragender Strukturen gewidmet. Es findet eine Unterscheidung der Höhe des Faktors hinsichtlich des Systemaufbaues, der Sortierung (visuell - maschinell), sowie der Belastungsrichtung und Art statt. Zudem sind Faktoren für 'built-up beams', und somit für Systeme aus kontinuierlich verbundenen Komponenten, enthalten.
- Der OHBDC-91-01:1991 regelt 'load sharing factors' für Deckplatten unterschiedlichen Aufbaues in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten, bestimmt über die effektive Breite D_e , sowie der Sortierklasse und der zugrunde gelegten Streuung. Die Funktionen sind nicht linear und degressiv, ab einer Komponentenanzahl von $n = 20$ wird ein konstanter Wert zu Grunde gelegt.

- Der AS 1720.1:1997 enthält als einziges, im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Normenwerke, eine gemeinsame Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Systemen aus lastverteilenden und lastabtragenden Strukturen ('discrete parallel systems'), sowie Systemen aus kontinuierlich verbundenen Komponenten ('combined parallel systems'). Hierbei wird der Systemeffekt über den Anteil des 'strength sharing' geregelt. Die Funktionen selbst sind in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten beider Systeme, des Abstandes zwischen den Komponenten, sowie dessen Spannweite definiert. Bei alleiniger Berücksichtigung des 'strength sharing factors' von 'combined parallel systems' ergibt sich ein nichtlineare, degressive Funktionsverlauf.

5 VERSUCHSTECHNIK

5.1 Darlegung der Motivation in der Durchführung der einzelnen Untersuchungsreihen

Die Motivation zur Durchführung von 6 Versuchsreihen liegt in der quantitativen sowie qualitativen Abschätzung des Systemeffektes und ist im Wesentlichen der Zieldefinition aus dem Kapitel 1 zu entnehmen. Ziel war die Untersuchung von Systemeffekten auf Zug längs zur Faser, sowie auf Biegung. Die Ermittlung des quantitativen Systemeffektes ist hier im Allgemeinen auf Basis einer Abschätzung der Veränderung der Streuung sowie des Mittelwertes der Festigkeit als Größen ausreichend. Zur qualitativen Abschätzung und tieferen Ergründung der Effekte und Teileffekte wurde auf eine weitgehende Protokollierung während und nach der Versuchsdurchführung Wert gelegt.

Die ersten beiden Versuchsreihen BIEGUNG_80-160 und ZUG_60-78 dienten der ersten Abschätzung des Systempotentials gegenüber jenen mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten aus KVH. Zudem wurde versucht über eine umfassende Protokollierung der Charakteristiken der Probekörper sowie Ereignisse während der Versuchsdurchführung den Systemeffekt weitreichender zu erfassen.

Die folgenden Versuchsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 wurden mit der Motivation durchgeführt, die Steifigkeit, als eine wesentliche Einflussgröße des Systemverhaltens, innerhalb der Komponenten als weitgehend konstant zu belassen und somit weiterführende Erkenntnisse im Wirken von Systemen zu lukrieren. Unter vorgehender Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit mittels des Prüfgerätes Sylvatest und ein anschließender gezielter Aufbau der Probekörper konnte der Vorgabe nach konstanter Steifigkeit weitgehend Rechnung getragen werden. Zudem wurde im Rahmen dieser Untersuchungen Augenmerk auf den Einfluss der Verbindung zwischen den Komponenten, anhand der beiden Grenzfälle lose und starr (Verklebung) gelegt. Vor allem Prüfungen an Systemen aus Komponenten ohne kontinuierliche seitliche Verbindung ermöglichten tiefgehende Einblicke in die Versagenscharakteristik.

Die Untersuchungsreihen BIEGUNG_BB_80-160 und BIEGUNG_BB_60-200 befassten sich mit der versuchstechnischen Ermittlung des mechanischen Potentials des Produktes "Balkenbinder", als ein Träger aus vertikal übereinander geschichteten, verklebten Systemen aus starr und kontinuierlich miteinander verbundenen Komponenten.

5.2 Betrachtung der Parameter in Hinblick auf Kapitel 2.3

Das Kapitel 2.3 beinhaltet eine Vielzahl an Einflussgrößen welche einerseits auf die Erzeugung der Komponenten sowie Systeme einen Einfluss bewirken, andererseits auch schlagend werden in der Art und Weise wie diese Systeme verbaut sowie belastet werden. Tab. 5-1 beinhaltet im Wesentlichen eine Auflistung jener Parameter welche bei der Versuchsdurchführung berücksichtigt wurden und beschreibt zudem die Weise wie dies geschah. Ziel ist es einerseits die Ergebnisse weitgehend miteinander, zumindest innerhalb der Versuchsserien der einzelnen Reihen vergleichbar zu gestalten, andererseits auch das Gewicht der Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen.

Tab. 5-1: Auflistung der Maßnahmen zur Reduzierung der Einflussgrößen in der Versuchsplanung und Durchführung, in Anlehnung an die Tab. 2-1 aus dem Kapitel 2.3

MATERIAL	
Herkunft / Wuchsgebiet	Die Herkunft der Versuchsreihen mit Systemen aufgebaut aus KVH-Komponenten wurde seitens des Produzenten mit dem Gebiet der Steiermark angegeben. Aufgrund der mangelnden Rückverfolgbarkeit auf den Forst sind die Höhenlage und das lokale Klima sowie sonstige Wuchsbedingungen nicht bekannt. Die Versuchsreihen der BSH-Lamellen sind seitens der Herkunft nicht bestimmt.
Physiologie / Anatomie	Alle Versuchsreihen entstammen Nadelholz der Spezies Fichte (<i>picea Abies karst.</i>)
physikalische / mechanische Eigenschaften	Im Rahmen der Möglichkeiten und des zustehenden Untersuchungszeitraumes wurden die Holzfeuchte sowie die Holztemperatur und das Prüfklima weitgehend konstant gehalten. Zudem wurde für jeden Probekörper die Holzfeuchte im Bruchbereich, sowie die Rohdichte, Steifigkeit und Festigkeit bestimmt.
Streuungen / Interaktionen	Jede Versuchsreihe baut auf eine Referenzserie aus Einzelkomponenten. Alle Serien zur Prüfung von Systemen wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften auf diese Referenzserie hin untersucht. Auf Basis deren können bedingt Aussagen über Interaktionen getroffen werden.
Holzlage im Baum	Es wurde für den Baubereich wirtschaftlich relevantes Stammholz untersucht.
Abmessungen	Die Abmessungen der systemaufbauenden Einzelkomponenten wurden innerhalb einer Versuchsreihe weitgehend konstant gehalten, für jeden Probekörper aber zudem bestimmt.

Sortierung	Die Sortierkriterien sowie die Sortierklasse innerhalb einer Versuchsreihe wurden konstant gehalten. Alle Probekörper innerhalb einer oder mehrerer Versuchsreihen wurden zudem innerhalb eines definierten und eingeschränkten Zeitraumes entnommen. Falls erforderlich, wurden die Probekörper im Labor anhand von definierten Kriterien nachsortiert.
Einschnittcharakteristik	Die Lage der Probekörper im Stamm wurde anhand von Proben aus dem Bruchbereich für jeden einzelnen Probekörper bestimmt.
Verbindungscharakteristik unter den Komponenten	Bei den Versuchsreihen mit KVH wurden die einzelnen Komponenten durch Keilzinkung verbunden. Die Serien der BSH-Lamellen beinhalten ausschließlich ungezinkte Ware.
Oberflächenbeschaffenheit	Die Probekörper wiesen eine für die Ansprüche von KVH und BSH übliche industrielle Hobeloberfläche auf. Die Rechtwinkeligkeit war weitgehend gegeben.
Verbindungscharakteristik der Komponenten zu Systemen	Alle Versuchsreihen von Systemen aufgebaut aus KVH wurden flächig verklebt. Versuche an Systemen aus BSH-Lamellen wurden lose sowie vollflächig miteinander verklebt durchgeführt.
MASCHINE	
Lagerungs- und Transporteinrichtungen	Der Transport der Komponenten und Systeme wurde mittels LKW durchgeführt, der Auf- und Abladeprozess mittels Gabelstapler oder Portalkran. Eine Vorbeanspruchung im Sinne von Überdehnungen durch unsachgemäße Hebevorgänge kann nicht ausgeschlossen werden, die Einrichtungen und die Vorgangsweise entsprechen den üblichen Standards.
Weiterverarbeitung	Die Komponenten wurden nach dem Einschnitt einer technischen Frisch-Abluft Trocknung zugeführt und im Zuge dessen ihre Zielfeuchte entsprechend dem Verwendungszweck eingestellt. Die Kanthölzer für die KVH Produktion wurden visuell in Verbindung mit maschinellen Sortiereinrichtungen (Golden Eye der Fa. Microtec GmbH / Brixen) hinsichtlich der Kriterien für die Zuordnung in die Sortierklasse \geq S 10, in Anlehnung an die ON DIN 4074-1:2004 sowie nach den Gütekriterien der Überwachungsgemeinschaft Konstruktionsvollholz e. V., 2003 sortiert. Zudem wurden die fertig produzierten KVH-Stangen einer Zugprüfung bis zu einem definierten 'proof level' einer 'proof loading' Anlage zugeführt.

	<p>Die Sortierung der BSH-Lamellen erfolgte ebenfalls maschinell seitens der Firma Kaufmann - Leimholz GmbH / Kalwang hinsichtlich der Kriterien für die Zuordnung in die maschinelle Sortierklasse MS 17, in Anlehnung an die ON DIN 4074-1:2004.</p> <p>Der Klebstoffauftrag für die Keilzinke erfolgte über einen Leimkamm. Der Auftrag des Klebstoffes für die Flächenverleimung wurde über ein Gießverfahren bewerkstelligt.</p>
Prüftechnik zur Festlegung der Kenngrößen von Komponenten / Systemen im Vorfeld	<p>Die Steuerung der Zugversuche (GEZU 750) erfolgte über den Öldruck. Die Biegeversuche, durchgeführt an der Universalprüfmaschine ZWICK Z 250 waren über den Weg gesteuert. Die Biegeversuche an den Prüfgerüsten 1 und 2 des LKI wurden Kraft- sowie weggesteuert bewerkstelligt.</p>
METHODE	
Transport / Lagerung	<p>Die Lagerung der Komponenten und Systeme erfolgte in überdachten Hallen sowie gegen eine überhöhte Abtrocknung durch eine Folie geschützt.</p>
Methoden der Weiterverarbeitung	<p>Die Produktion der KVH-Stangen erfolgte im Rahmen der industriellen Fertigung, die Probekörper wurden der laufenden, standardisierten Produktion entnommen. Aufgrund dessen sind hinsichtlich der Weiterverarbeitung alle Untersuchungsreihen aus KVH weitgehend vergleichbar.</p> <p>Die BSH-Lamellen wurden ebenfalls dem standardisierten, industriellen Fertigungsprozess entnommen.</p>
Konditionierung / Reifung	<p>Die Verwendung des Klebstoffes für die Keilzinken- und die Flächenverklebung wurde in Anlehnung an die technischen Merkblätter durchgeführt.</p>
Prozessstabilität	<p>Die Industriebetriebe zur Produktion des KVH und BSH unterliegen im Rahmen der Eigenüberwachung den Anforderungen an eine stichprobenartige Überprüfung der Prozessstabilität sowie der Einhaltung der Gütekriterien. Zudem werden diese Betriebe durch akkreditierte Prüfanstalten im Rahmen der Fremdüberwachung kontrolliert.</p> <p>Detailkenntnisse über die Prozessstabilität in den einzelnen Abschnitten sowie über die Schwankungsbreite liegen nicht vor.</p>
Verbindung zwischen den Komponenten sowie von Komponenten zu Systemen	<p>Die Verklebung der Keilzinken und der Flächen wurde mit geprüften und zugelassenen und dafür geeigneten Produkten durchgeführt.</p>

Prüfmethode zur Festlegung der Kenngrößen der Komponenten / Systeme im Vorfeld	Die Lasteinbringung bei den Prüfungen erfolgte kontrolliert, kontinuierlich. Je nach Untersuchungsreihe wurden Prüfungen auf Zug längs zur Faser und 4 Punkt Biegeprüfungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche ausschließlich an Großproben bewerkstelligt. Die Prüfbedingungen wurden in Anlehnung an die ON EN 408:2005 gewählt.
Datenerfassung in der Produktion / während der Prüfung	Die Datenerfassung erfolgte kontinuierlich mit einer konstanten Messrate innerhalb der Prüfungen an der gleichen Prüfeinrichtung.
Prüfkonfiguration	Die Prüfkonfiguration sowie die Prüfbedingungen wurden in Anlehnung an die ON EN 408:2005 gewählt.
MENSCH	
Motivation / Einstellung / Sorgfalt	Die Prüfungen sowie die Prüfplanung wurden größtenteils persönlich oder unter Anleitung und im Rahmen der möglichen Kontrolle durchgeführt. Das persönliche Interesse an der Sorgfalt der Durchführung in Hinblick auf die vorliegende Arbeit und die persönliche Bindung zum Material Holz ist als sehr hoch einzuschätzen.
Wissen / Erfahrung	Die erworbenen Kenntnisse im Rahmen der Ausbildung und die Erfahrung mit dem Werkstoff Holz in Verbindung mit dem Wissen aus der Arbeit am Kompetenzzentrum holz.bauforschungs gmbh sind in Hinblick auf die Einschätzung der Relevanz einzelner Punkte entscheidend. Aufgrund der Durchführung der Prüfungen innerhalb weniger Monate kann der Lerneffekt und die Standardisierung ebenfalls positiv bewertet werden. Zudem unterlag die jeweils ausführende oder meine Person einer Kontrolle und Überwachung durch Dritte, für die Prüftechnik und die Festlegung der Prüfparameter zuständigen Experten.
Entscheidungsfreiheit und Willigkeit	Die Prüfungen wurden ohne hindernden Zeitdruck durchgeführt. Des Weiteren wurde laufend über Zwischenauswertungen und Fremd- und Eigenkontrolle der Ergebnisse eine Überwachung der Prüfungen bewerkstelligt. Zudem wurde über die parallele handschriftliche Protokollierung sowie elektronische Sicherung der Versuchsdaten eine Eigenüberwachung und ständige Kontrolle ermöglicht.
MITWELT	
Klein- und Großklimatische Bedingungen	Das Prüfklima wurde weitestgehend konstant gehalten. Zudem wurden die Prüfungen größtenteils inner-

	halb der Sommermonate 2005 durchgeführt und unterlagen somit nicht den jahreszeitlichen Klimaschwankungen innerhalb der Prüfhalle.
Eintrag von Schadstoffen	Ein Eintrag von Schadstoffen sowie Fremdstoffen, über das übliche Maß hinaus, kann ausgeschlossen werden.
Sauberkeit	Auf Sauberkeit, ordnungsgemäße Lagerung und Stapelung wurde geachtet.
Mithilfe, Dynamik der Helfer	Die Versorgung der versuchstechnisch notwendigen Ressourcen war gegeben.
Prüf- und Auswerteverfahren	Die Auswertung erfolgte entsprechend den normativen Regelungen der ON EN 408:2005 in Verbindung mit den dort verankerten Prüfkfigurationen. Des Weiteren wurden Auswertungen nach ergänzenden normativen Regelungen sowie nach anerkannten statistischen Methoden durchgeführt.
	Die Anzahl der Probekörper innerhalb einer Untersuchungsreihe sowie einer Serie wurde aus Erfahrungen abgeschätzt sowie entsprechend der Ressourcen und dem Versuchsaufwand bestimmt. Es wurde Wert darauf gelegt, den Prüfumfang der Referenzserie möglichst umfangreich zu gestalten.
	Alle Untersuchungsreihen wurden am Gelände des Bautechnikzentrums der Technischen Universität Graz durchgeführt.
MANAGEMENT	
Priorität, Motivation / Einstellung	Die Ermittlung des Systemeffektes ist seit Jahren ein im Interesse des Institutes für Holzbau und Holztechnologie an der Technischen Universität Graz stehender Forschungsbereich. Zudem besteht seitens der unterstützenden und mitfinanzierenden Industrie eine hohe Motivation in der Abklärung dieser Thematik.
Koordination / Flexibilität / Kreativität	Die Planung sowie die Durchführung der Forschungsvorhaben wurden flexibel und rasch bewerkstelligt.
Wissen	Durch den universitären Charakter sowie die Verbindungen zur Wirtschaft kann auf Detailkenntnisse in einzelnen Bereichen, sowie auf umfassendes allgemeines Wissen zurückgegriffen werden. Dies vor allem auch in Hinblick auf die internationalen Kontakte innerhalb der Forschungslandschaft, sowie der zur Verfügung stehenden Normen und Literatur.

Kontrollmechanismen	<p>Im Rahmen der Erfassung der Daten aus der Eigenüberwachung sowie der Selbstkontrolle der Mitarbeiter besteht seitens der Industrie ein gewisses Maß an Produktionskontrolle.</p> <p>Seitens der Prüfanstalt wurden ebenfalls über Zwischenberichte, Kontrollen und Vergleiche Kontrollmechanismen angewendet.</p>
Festlegung von Grenzen	<p>Die Sortierklassen wurden seitens des Prüfplanes festgelegt. Zudem wurden bei Bedarf im Labor Nachsortierungen anhand definierter Kriterien vor und nach der Prüfung durchgeführt.</p> <p>Innerhalb der Produktion der Probekörper sind zudem normative sowie gütespezifische Kriterien definiert.</p>
Planung und Ablauf der Prüfungen zur Festlegung der Kennwerte im Vorfeld	<p>Die Probekörper wurden im Rahmen der Möglichkeiten einer Konditionierung zugeführt.</p> <p>Die Prüfbedingungen und die Konfiguration wurden, zur verbesserten internationalen Vergleichbarkeit in Anlehnung an die ON EN 408:2005 definiert.</p>

5.3 Allgemeine Darstellung des Materials, der Untersuchungsreihen sowie der Prüfpläne

Ziel dieses Abschnittes ist die Darstellung der einzelnen Versuchsreihen: BIEGUNG_80-160, ZUG_60-78, ZUG_ZL_40-78, ZUG_ZK_40-78, BIEGUNG_BB_80-160 und BIEGUNG_BB_60-200, ihres Umfanges und ihrer Ausrichtung der daraus zu gewinnenden Ergebnissen und Schlüssen. Die Probekörper aller Versuchsreihen entsprechen einem zufälligen Aufbau. Seitens der Reihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 wurde nach vorausgehender Sortierung der Einzelkomponenten nach der Ultraschallgeschwindigkeit randomisiert Pakete aus System bildenden Komponenten innerhalb des Wertebereiches zufällig und gleichverteilt gewählt.

5.3.1 Art und Aufbau der Komponenten innerhalb der Untersuchungsreihen

5.3.1.1 Untersuchungsreihe ZUG_60-78

Die Untersuchungsreihe ZUG_60-78 ist aufgebaut aus Komponenten von KVH®-Stangen eines in der Breite mittig aufgetrennten Querschnittes von ursprünglich rund $b / h = 165 / 60$ mm. Durch die visuelle, industrielle Sortierung der Stangen anhand der Merkmalerfassung am Gesamtquerschnitt war eine Nachsortierung der Stangen im

Labor nötig um die Forderung nach der Sortierklasse $\geq S10$ zu erfüllen. Dafür wurden die Kriterien der Äste sowie des Reaktionsholzanteiles in Anlehnung an die ON DIN 4074-1:2004 herangezogen. Tab. 5-2 stellt zusammen mit Abb. 5-1 in groben Zügen das Prüfprogramm dar.

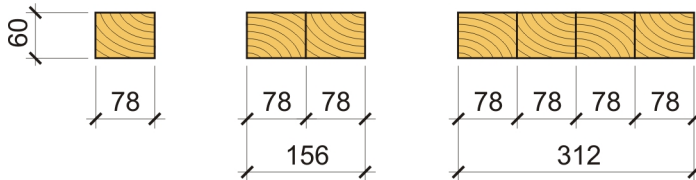


Abb. 5-1: Abmessungen und Aufbau der Probekörper der Versuchsreihe ZUG_60-78

Tab. 5-2: Prüfprogramm der Untersuchungsreihe ZUG_60-78 bestehend aus 3 Serien inklusive der Referenzserie Z_1_xx

Prüfreihe ZUG_60-78						
Serie	System-Aufbau (#b x #h)	Anzahl (geordnet)	Abmessungen (l / b / h)	Sortier- klasse	Keil- zinkung (ja / nein)	'proof- level' (N/mm ²)
[--]	[--]	[--]	[mm]	[--]	[--]	[N/mm ²]
Z_1_xx ¹⁾	1 x 1	80 #	5500 / 78 / 60	$\geq S10$	ja	7
Z_2_xx	2 x 1	50 #	5500 / 156 / 60	$\geq S10$	ja	7
Z_4_xx	4 x 1	35 #	5500 / 312 / 60	$\geq S10$	ja	7

1) Referenzserie

5.3.1.2 Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Die Reihe BIEGUNG_80-160 wurde, wie die Untersuchungsreihe ZUG_60-78, in einem relativ großen Prüfumfang gewählt und dient der allgemeinen Erkundung des Systempotentials von KVH-Stangen auf Biegung. Tab. 5-3 und Abb. 5-2 beinhalten im Wesentlichen das Prüfprogramm.

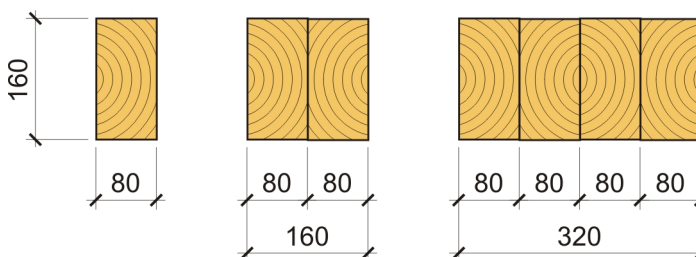


Abb. 5-2: Abmessungen und Aufbau der Probekörper der Versuchsreihe BIEGUNG_80-160

Tab. 5-3: Prüfprogramm der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160 bestehend aus 3 Serien inklusive der Referenzserie B_1_xx

Prüfreihe BIEGUNG_80-160						
Serie	System-Aufbau (#b x #h)	Anzahl (geordnet)	Abmessungen (l / b / h)	Sortier- klasse	Keil- zinkung (ja / nein)	'proof- level' [N/mm ²]
[--]	[--]	[--]	[mm]	[--]	[--]	[--]
B_1_xx ¹⁾	1 x 1	80 #	3200 / 80 / 160	≥ S10	ja	7
B_2_xx	2 x 1	50 #	3200 / 160 / 160	≥ S10	ja	7
B_4_xx	4 x 1	35 #	3200 / 320 / 160	≥ S10	ja	7

1) Referenzserie

5.3.1.3 Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 sowie ZUG_ZK_40-78

Die beiden Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 beinhalten Komponenten aus im Labor aufgetrennten BSH-Lamellen des ursprünglichen Querschnittes von rund $b / h = 165 / 40$ mm. Die Lamellen sind seitens einer industriellen Sortierung am Gesamtquerschnitt der Klasse MS17 zugewiesen und wurden nach dem Auftrennen keiner weiteren Sortierung zugeführt, jedoch der größte Ast der Lamelle im Prüfbereich im Prüfprotokoll notiert. Tab. 5-4 enthält in Verbindung mit Abb. 5-3 die Grundzüge des Prüfprogramms.

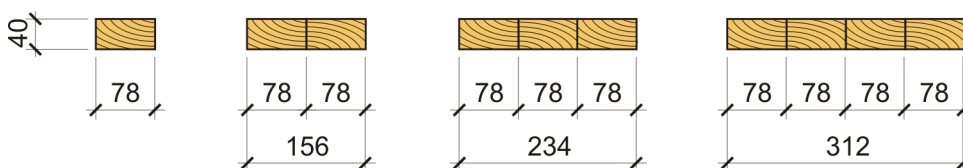


Abb. 5-3: Abmessungen und Aufbau der Probekörper der Versuchsreihe ZUG_ZL_40-78 sowie der Versuchsreihe ZUG_ZK_40-78

Tab. 5-4: Prüfprogramm der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78 sowie ZUG_ZK_40-78 bestehend aus 4 Serien inklusive der Referenzserien ZL_1_xx und ZK_1_xx

Prüfreihe ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78						
Serie	System-Aufbau (#b x #h)	Anzahl (geordert)	Abmessungen (l / b / h)	Sortier- klasse	Keil- zinkung (ja / nein)	'proof- level' [N/mm ²]
[--]	[--]	[--]	[mm]	[--]	[--]	[--]
ZL_1_xx ¹⁾ ZK_1_xx ¹⁾	1 x 1	27 #	3820 / 78 / 40	MS17 ²⁾	nein	--
ZL_2_xx ZK_2_xx	2 x 1	11 #	3820 / 156 / 40	MS17 ²⁾	nein	--
ZL_3_xx ZK_3_xx	3 x 1	8 #	3820 / 234 / 40	MS17 ²⁾	nein	--
ZL_4_xx ZK_4_xx	4 x 1	7 #	3820 / 312 / 40	MS17 ²⁾	nein	--

1) Referenzserie

2) BSH-Lamellen mittig aufgetrennt, jedoch auf gesamte Breite sortiert

5.3.1.4 Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch das mechanische Potential des Produktes Balkenbinder versuchstechnisch ermittelt. Der Querschnitt der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160 wurde in der Weise gewählt, dass die Serie B_2_xx der Reihe BIEGUNG_80-160 als Referenzserie weitestgehend herangezogen werden kann. Der Prüfplan sowie der Aufbau der Prüfkörper sind Tab. 5-5 und Abb. 5-4 zu entnehmen.

Tab. 5-5: Prüfprogramm der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160 bestehend aus 3 Serien inklusive Erwähnung der Referenzserie B_2_xx aus der Untersuchungsreihe BIEGUNG_B_80-160

Prüfreihe BIEGUNG_BB_80-160						
Serie	System-Aufbau (#b x #h)	Anzahl (geordert)	Abmessungen (l / b / h)	Sortier- klasse	Keil- zinkung (ja / nein)	'proof- level' [N/mm ²]
[--]	[--]	[--]	[mm]	[--]	[--]	[--]
B_2_xx ¹⁾	2 x 1	50 #	3200 / 160 / 160	≥ S10	ja	7
Ba_2_xx	2 x 2	20 #	6400 / 160 / 320	≥ S10	ja	7
Ba_3_xx	2 x 3	10 #	9400 / 160 / 480	≥ S10	ja	7

1) Referenzserie B_2_xx aus der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

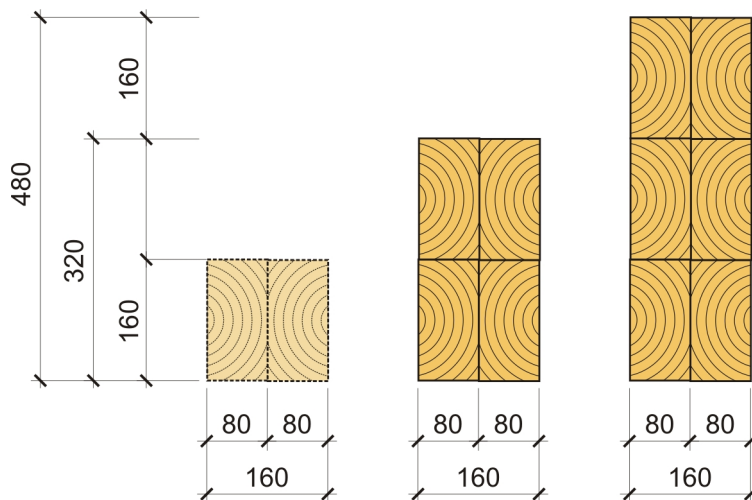


Abb. 5-4: Abmessungen und Aufbau der Probekörper der Versuchsreihe BIEGUNG_BB_80-160, inklusive Darstellung der Referenzserie B_2_xx der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

5.3.1.5 Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200

Im Zuge der Abklärung des mechanischen Potentials des Produktes "Balkenbinder" wurde eine zweite Versuchsreihe BIEGUNG_BB_60-200 geprüft.

Der Prüfaufbau sowie die Darstellung der Aufbauten sind Tab. 5-6 sowie Abb. 5-5 zu entnehmen.

Tab. 5-6: Prüfprogramm der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200 bestehend aus 3 Serien inklusive Erwähnung der Referenzserie Bb_1_xx

Prüfreihe BIEGUNG_BB_60-200						
Serie	System-Aufbau (#b x #h)	Anzahl (geordnet)	Abmessungen (l / b / h)	Sortier- klasse	Keil- zinkung (ja / nein)	'proof- level' [N/mm ²]
[--]	[--]	[--]	[mm]	[--]	[--]	[--]
Bb_1_xx ¹⁾	2 x 1	35 #	4100 / 120 / 200	≥ S10	ja	7
Bb_2_xx	2 x 2	20 #	7900 / 120 / 400	≥ S10	ja	7
Bb_3_xx	2 x 3	10 #	11700 / 120 / 600	≥ S10	ja	7

1) Referenzserie

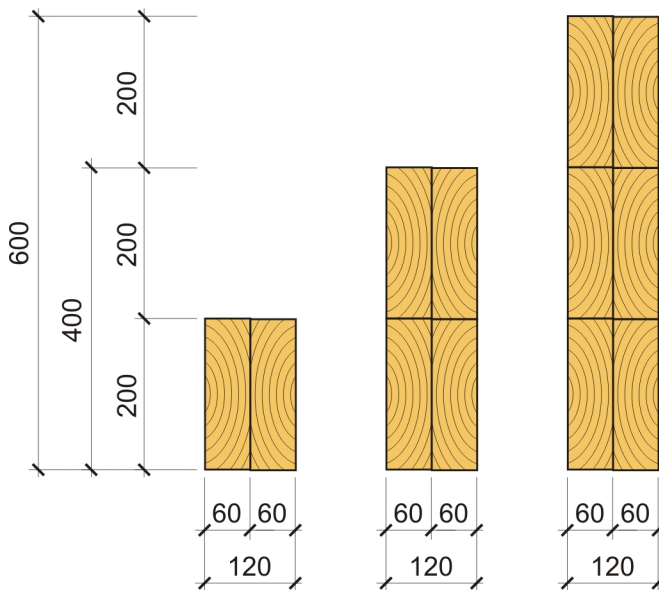


Abb. 5-5: Abmessungen und Aufbau der Probekörper der Versuchsreihe BIEGUNG_BB_60-200

5.3.2 Verbindung der Komponenten zu Systemen

Die Keilzinkung der Untersuchungsreihen aus KVH wurde industriell gefertigt. Die Beileimung der Zinkenflanken erfolgte mit einem Leimkamm. Für die Verbindung wurde der Klebstoff Purbond HB 530 der Fa. Collano AG / Schweiz eingesetzt.

Die Flächenverklebung der zu Systemen kontinuierlich verbundenen Komponenten wurde mit dem Purbond HB 110 der Fa. Collano ausgeführt. Ein für den Holzbau üblicher Pressdruck von $p \geq 0,6 \text{ N/mm}^2$ wurde angewendet.

Beide Klebstoffe basieren auf Polyurethan und sind für den tragenden Einsatz konzipiert.

5.4 Allgemeine Darstellung der Methoden zur Berechnung und Auswertung der Versuchsergebnisse

5.4.1 Bestimmung allgemeiner physikalischer Größen

5.4.1.1 Bestimmung der Abmessungen

Die Länge, Breite und Höhe der Probekörper wurden nach den Anforderungen in Anlehnung an die ON EN 408:2003 ermittelt. Hierzu befanden sich, in Abhängigkeit der Größe der Probekörper, Messschieber oder Maßbänder im Einsatz. Es wurde jeweils der gesamte Prüfkörper kurz vor der zerstörenden Festigkeitsprüfung sowie vor der Bestimmung des dynamischen E-Moduls einer Vermessung unterzogen.

5.4.1.2 Ermittlung der Masse

Die Bestimmung der Masse der Probekörper erfolgte unter der Verwendung von Waagen (digitale Standwaagen oder Kranwaagen). Es wurde jeweils der gesamte Probekörper vor der Festigkeitsprüfung oder der Bestimmung des dynamischen E-Moduls einer Massebestimmung unterzogen

5.4.1.3 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Ermittlung der Holzfeuchte nach der Darmmethode wurde in Anlehnung an die ON EN 13183-1:2002 für die Untersuchungsreihen ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 sowie ZUG_ZK_40-78 durchgeführt. Die Darrproben wurden hierzu weitestgehend dem Bruchbereich entnommen.

$$u = \frac{m_W}{m_H} = \frac{m_0 - m_H}{m_H}$$

u	Holzfeuchte [%]
m_W	Wassermasse [kg]
m_H	Holzmasse, darr [kg]
m_0	Masse der Probe unter Prüfbedingungen [kg]

Formel 5-1

Die Holzfeuchte der Untersuchungsreihen BIEGUNG_BB_80-160 sowie BIEGUNG_BB_60-200 wurden mit dem Feuchtemessgerät GANN, Hydromette M4050 der

Firma Gann GmbH / Gerlingen / Deutschland durch mehrfaches Messen der Feuchte im Bruchbereich ermittelt.

5.4.1.4 *Bestimmung der mittleren Jahrringbreite (JRB)*

Die mittlere Jahrringbreite ist nach der ON DIN 4074-1:2004 ein Sortiermerkmal. Zur Überprüfung der entsprechenden Sortierklasse einerseits, sowie zur Ermittlung von Parametern im Einflussfeld der Festigkeit andererseits, wurde diese Größe für alle geprüften Probekörper, anhand der aus dem Bruchbereich entnommenen Darrproben, bestimmt. Bei den Untersuchungsreihen BIEGUNG_BB_80-160 sowie BIEGUNG_BB_60-200 erfolgte die Ermittlung an einem Trennschnitt des Prüfkörpers, weitestgehend im Bereich des Bruches.

Die Vorgangsweise erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 1310:1997, und ist in der Abb. 5-7 kurz dargestellt. Die Angabe der mittleren Jahrringbreite in den Tabellen der einzelnen Untersuchungsreihen bezieht sich bei Systemen auf den Mittelwert der mittleren Jahrringbreiten aller beteiligten Komponenten.

5.4.1.5 *Bestimmung der Lage im Stamm (STL)*

Die Lage der Prüfkörper im Stamm ist ein indikativer Wert für das Einschnittbild sowie für jene Holzeigenschaften, welche sich tendenziell in Abhängigkeit des Alters des Kambiums darstellen. Die Abb. 5-6 gibt eine Auswahl dieser tendenziell über den Stammdurchmesser variierenden Eigenschaften wieder.

Die Bestimmung der Lage im Stamm fand im Rahmen dieser Untersuchungen an allen geprüften Probekörpern, für jede einzelne Komponente, anhand der Darrprobe aus dem Bruchbereich, statt. Bei den Untersuchungsreihen BIEGUNG_BB_80-160 sowie BIEGUNG_BB_60-200 erfolgte die Bestimmung an einem Trennschnitt des Prüfkörpers, weitestgehend im Bereich des Bruches. Die Vorgangsweise ist in der Abb. 5-7 dargestellt. Im Wesentlichen werden hierbei die Abstände des Schwerpunktes des Prüfquerschnittes zur vermeintlichen Mark des Stammes, mit Hilfe einer Folie, in x und y Richtung vermessen. Über die beiden Maße wird nach der Formel 5-2 die Stammlage STL als radialer Abstand des Schwerpunktes zum Mark ermittelt.

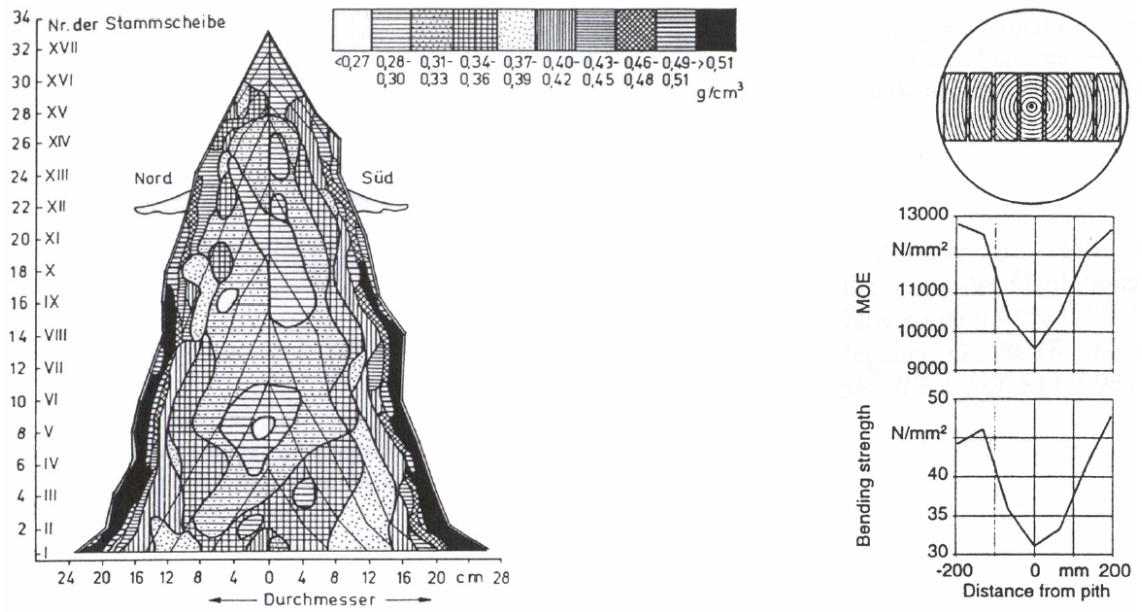


Abb. 5-6: Verteilung der Rohdichte über den Stammquerschnitt (links) sowie Variation der Steifigkeit und der Biegefestigkeit in Abhängigkeit des Abstandes zum Mark, nach Glos, 1999 bzw. Trendelenburg, 1995

$$STL = \sqrt{x^2 + y^2}$$

<i>STL</i>	Stammlage [mm]
<i>x</i>	Abstand des Schwerpunktes des Prüfquerschnittes zum vermeintlichen Mark in horizontaler Messrichtung [mm]
<i>y</i>	Abstand des Schwerpunktes des Prüfquerschnittes zum vermeintlichen Mark in vertikaler Messrichtung [mm]

Formel 5-2

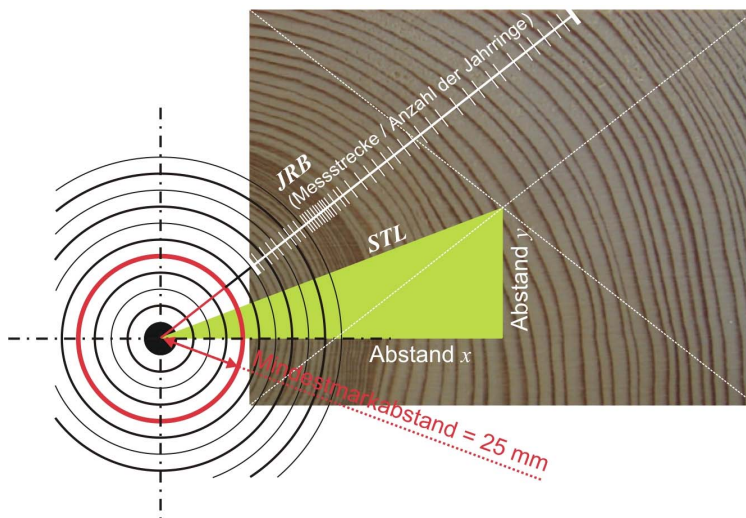


Abb. 5-7: Ermittlung der mittleren Jahringbreite *JRB* sowie der Lage des Prüfkörpers im Stamm *STL*

5.4.1.6 Ermittlung der Bruchursache

Ein Bruch beginnt in der Regel an einer Initialstelle welche in dieser Arbeit die Bruchursache definiert. Der weitere Bruchverlauf folgt dem Weg des geringsten Widerstandes und setzt sich damit im schwächsten Querschnittsbereich fort. Die Keilzinkenverbindung ist somit, als den Querschnitt reduzierende Verbindung, häufig im Wirkungsfeld des Energieabbaues. Die Bruchursache am bereits versagten Querschnitt, ohne das Wissen um den Bruchverlauf, ist nicht immer restlos erkennbar. Die Bestimmung stellt sich vor allem bei Querschnitten aus mehreren Einzelkomponenten als relativ diffizil heraus. Tab. 5-7 enthält eine Auflistung der Abkürzung wesentlicher Bruchursachen. Diese werden anhand von Abbildungen (siehe Abb. 5-8 bis Abb. 5-33) kurz erläutert. Die Auswertung erfolgte, nach Gruppierung wesentlicher Merkmale, für jede Serie getrennt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse innerhalb der Serien der jeweiligen Untersuchungsreihe ist den folgenden Abschnitten der Auswertung und Interpretation zu entnehmen (siehe Kapitel 1).

Tab. 5-7: Abkürzungen sowie Erklärung der Bruchursachen

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
LSF	lokale Schrägfaser (allg.)	RH	Reaktionsholz
GSF	globale Schrägfaser (allg.)	RS	Abhebung der Jahrringe voneinander
EA	Einzelast (LSF)	ZGB	Zinkengrundbruch
AA	Astansammlung (LSF)	FAZ	Flankenauszug bei der Keilzinkenverbindung durch fehlende oder unsachgemäß ausgeführte Verklebung (Zinkenversagen)
KA, SSA	Kantenast, Schmalseitenast (LSF)	P	Produktionsfehler (allg.)
WB	Wipfelbruch	Ai/nKZ	Ast in oder zu nahe an der Keilzinkenverbindung (P)
DW	Drehwuchs	TM	Trennmittelgeruch in der Keilzinke (P)
HE	Harzeinschluss	DF	Versagen in der Druckzone (Druckfalte)
RE	Rindeneinschluss	S	Sonstiges
HB	reiner Holzbruch ohne erkennbaren Einfluss eines festigkeitsmindernden Merkmales	SPB	Splitterbruch (HB)



Abb. 5-8: LSF, SSA; 4 Punkt Biegebeanspruchung

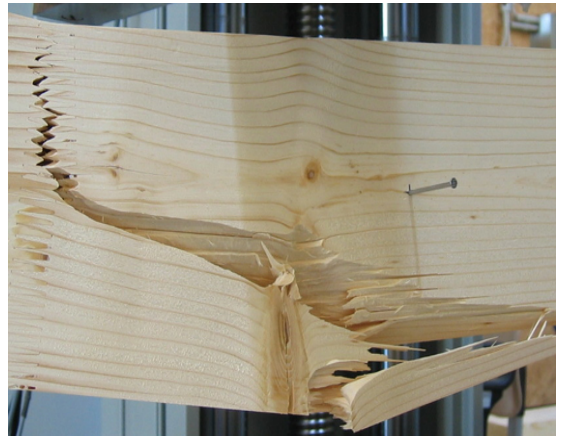


Abb. 5-11: LSF, SSA; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-9: LSF, P, Ai/nKZ; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-12: LSF, AA; Zugbeanspruchung



Abb. 5-10: LSF, SSA; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-13: LSF, AA; Zugbeanspruchung



Abb. 5-14: LSF, SSA, RS; Zugbeanspruchung



Abb. 5-15: GSF, DW; Zugbeanspruchung

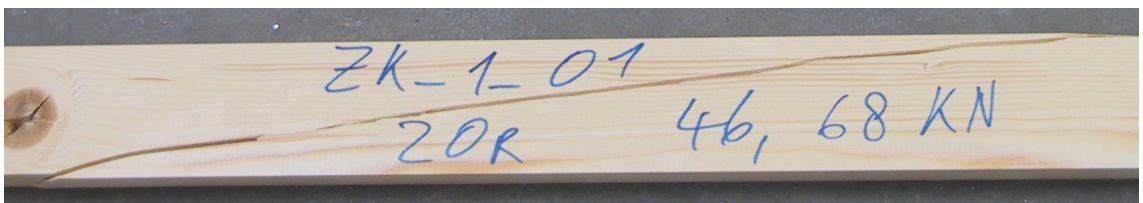


Abb. 5-16: GSF; Zugbeanspruchung



Abb. 5-17: GSF; 4 Punkt Biegebeanspruchung

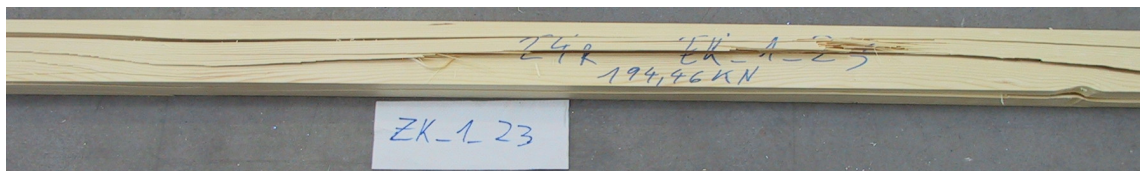


Abb. 5-18: HB, Splitterbruch; Zugbeanspruchung



Abb. 5-19: HB, Splitterbruch des Zugfaserbereiches; 4 Punkt Biegebeanspruchung

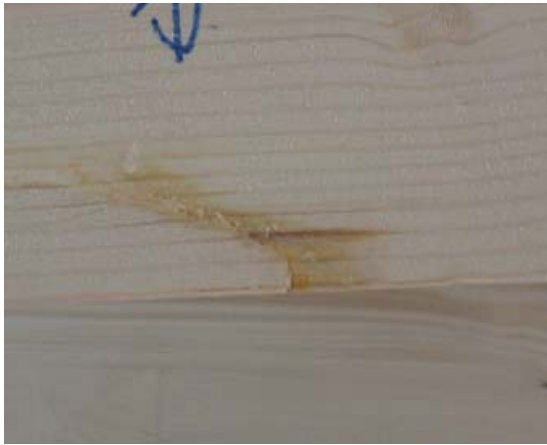


Abb. 5-20: HE, Querschnittsverminderung; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-23: RE, LSF; Zugbeanspruchung



Abb. 5-21: S, Querschnittsverminderung
trockener Riss; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-24: LSF, WB; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-22: HB, stumpfer Bruch; Zugbeanspruchung



Abb. 5-25: DF, Versagen in der Druckzone; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-26: ZGB; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-28: FAZ; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-27: ZGB; 4 Punkt Biegebeanspruchung

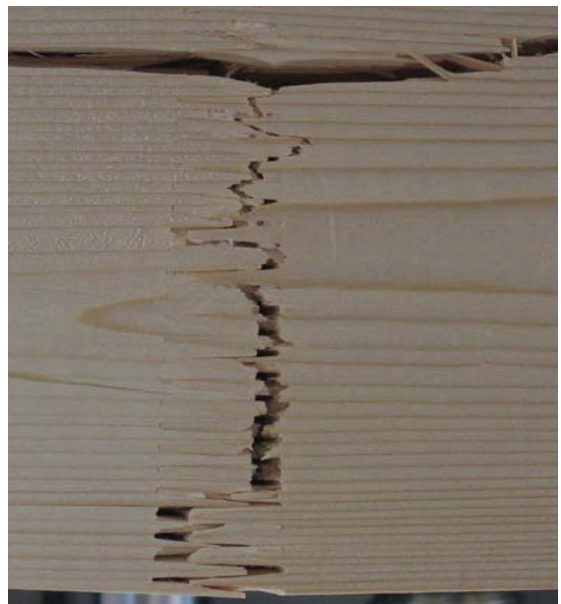


Abb. 5-29: FAZ im Randbereich; 4 Punkt Biegebeanspruchung

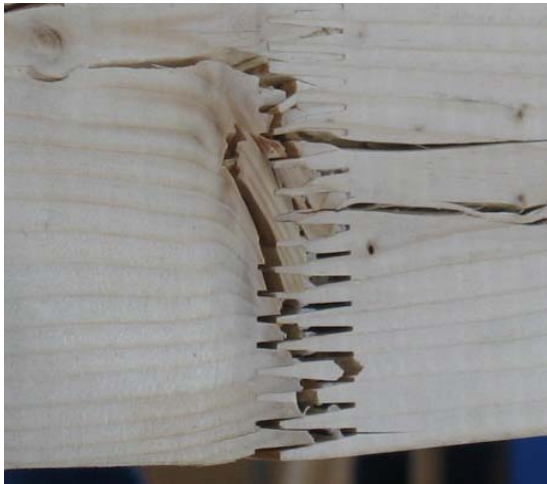


Abb. 5-30: P, Ai/nKZ; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-32: P, Ai/nKZ; Zugbeanspruchung



Abb. 5-31: P, Ai/nKZ, LSF; 4 Punkt Biegebeanspruchung



Abb. 5-33: Einpressungen im Bereich der Lasteinleitung; 4 Punkt Biegebeanspruchung

5.4.1.7 Ermittlung der Rohdichte

Die Rohdichte wurde in Anlehnung an die ON EN 408:2003 aus der Beziehung der Masse zum Volumen für jeden Prüfkörper bestimmt (siehe Formel 5-3). Aus diesem Grund repräsentiert die ermittelte Rohdichte einen Mittelwert der Dichte über den gesamten Verlauf des Probekörpers.

$$\rho_0 = \frac{m}{V} \cdot 10^9 = \frac{m}{l \cdot b \cdot h} \cdot 10^9$$

ρ_0	Rohdichte des Prüfkörpers unter Prüfbedingungen [kg/m ³]
m	Masse des Prüfkörpers [kg]
V	Volumen des Prüfkörpers [mm ³]
l	Länge bzw. gemittelte Länge des Prüfkörpers [mm]
b	Breite bzw. gemittelte Breite des Prüfkörpers [mm]
h	Höhe bzw. gemittelte Höhe des Prüfkörpers [mm]

Formel 5-3

5.4.2 Bestimmung des dynamischen E-Moduls

Der dynamische E-Modul besitzt im Allgemeinen eine sehr gute Korrelation zum statischen E-Modul und eignet sich somit auch als Größe zur Abschätzung der Festigkeit. Aufgrund dessen wurde der dynamische E-Modul für alle Prüfkörper der Untersuchungsreihen BIEGUNG_80-160 sowie ZUG_60-78 für jede einzelne Komponente ermittelt, um eventuell aus den Zusammenhängen mit der Festigkeit und Steifigkeit der geprüften Systeme Aussagen über das Systemverhalten treffen zu können.

Die Ermittlung des dynamischen E-Moduls im Labor auf Basis der Ultraschallgeschwindigkeit ist ein anerkanntes und erprobtes Verfahren und folgt aus den Parametern der Ultraschall-Laufzeit und Länge der Probekörper. Die Prüfungen erfolgten mit dem Sylvatest (Abb. 5-34). Unter Einbeziehung der Größen Rohdichte, Holzfeuchte und Prüfkörpertemperatur wurde der dyn. E-Modul errechnet und auf die Referenzgrößen korrigiert. Die Holzfeuchte sowie die Temperatur wurden mit dem Prüfgerät GANN Hydromette M4050 ermittelt. Der Formalismus zur Berechnung des dyn. E-Moduls ist nachfolgend in Formel 5-4 bis Formel 5-8 dargelegt.

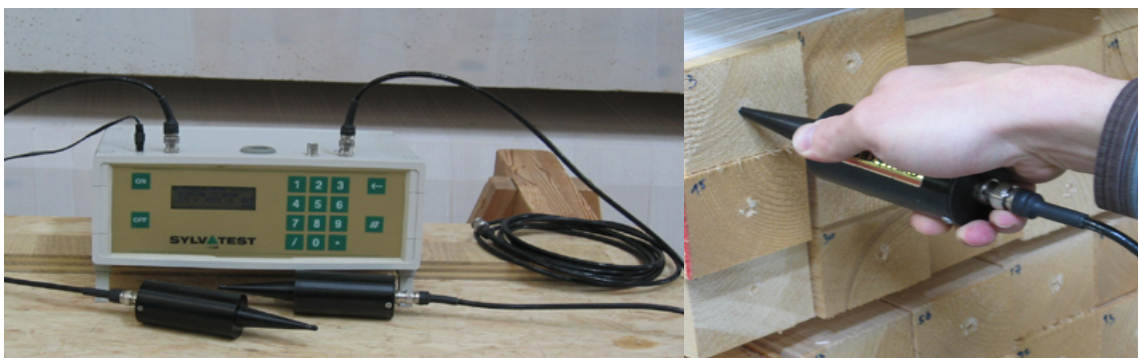


Abb. 5-34: Ultraschalllaufzeit-Messgerät „Sylvatest“ (links) sowie Anwendung der Konusschallköpfe (rechts)

$$v = \frac{l}{t} \cdot 10^6$$

v	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
l	Länge des Prüfkörpers [m]
t	Ultraschalllaufzeit [μ s]

Formel 5-4

$$E_{dyn} = v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6}$$

E_{dyn}	dynamischer E-Modul [N/mm ²]
v	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
ρ	gegebene Rohdichte bei Versuch [kg/m ³]

Formel 5-5

$$v_{12} = \frac{v}{[1 - 0,0053 \cdot (u - 12)]} \quad \text{für } u < 28\%$$

v_{12}	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s] korrigiert für eine Referenzholzfeuchte von $u = 12\%$
v	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s] bei gegebener Holzfeuchte u
u	Holzfeuchte [%] zum Zeitpunkt 0

Formel 5-6

$$v_{12,20} = \frac{v_{12}}{[1 - 0,0008 \cdot (T - 20)]} \quad \text{für } u = 12\%$$

$v_{12,20}$	Ultraschallgeschwindigkeit [m/s] korrigiert für eine Referenztemperatur von $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ und einer Referenzholzfeuchte von $u_{ref} = 12\%$
u_T	gemessene Holzfeuchte [%] bei gegebener Holztemperatur T
T	gemessene Holztemperatur [$^\circ\text{C}$]

Formel 5-7

$$E_{dyn,korr} = v_{12,20}^2 \cdot \rho_{12} \cdot 10^{-6}$$

$E_{dyn,korr}$	korrigierter dynamischer E-Modul [N/mm ²]
$v_{12,20}$	korrigierte Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
ρ_{12}	Rohdichte bezogen auf die Holzfeuchte $u = 12\%$ [kg/m ³]

Formel 5-8

5.4.3 Durchführung der Zugversuche

Die Zugversuche wurden an der GEZU 750 der Fa. Zum Wald / Erlenbach / Schweiz durchgeführt (siehe Abb. 5-35). Die Steuerung erfolgte auf Basis des Öldruckes der Hydraulik. Der Querdruck wurde dem Prüfmaterial entsprechend gewählt und betrug rund $p \leq 3,5 \text{ N/mm}^2$. Die Prüfkfigurationen sind den Abb. 5-38 und Abb. 5-39 zu entnehmen. Die Messung der Verformung für die Bestimmung des statischen E-Moduls erfolgte über die gesamte Prüflänge durch Aufzeichnung der Änderung des Maschinenweges auf der Seite der starren sowie der beweglichen Einspannung. Die Verformungen wurden über induktive Wegaufnehmer erfasst.

Die Eignung der Bestimmung des statischen E-Moduls über den Maschinenweg wurde für große Prüflängen bereits im Vorfeld an Untersuchungen der holz.bauforschungs gmbh nachgewiesen. Zudem wurde im Rahmen dieser Prüfungen parallel eine Abklärung des "Rutschens" der Proben unter Belastung bewerkstelligt (siehe Abb. 5-36). Die Ergebnisse bestätigen die Vorgangsweise im Rahmen der versuchstechnischen Toleranzen.

Zur Festlegung der Bezugslänge $l_{0,\text{Maschine}}$ als Größe zur Bestimmung der Dehnung wurden ebenfalls für die Untersuchungsreihe ZUG_60-78 an parallel durchgeführten Messungen absolviert. Hierbei wurde der E-Modul des Probekörpers auf Basis der Bezugslänge l_1 als Referenzgröße bestimmt und die Bezugslänge $l_{0,\text{Maschine}}$ dahingehend variiert bis die beiden ermittelten E-Module, auf Basis unterschiedlicher Verformungsmessungen, übereinstimmten (siehe Abb. 5-37). Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse legte man die Bezugslänge $l_{0,\text{Maschine}}$ von Mitte Klemmbacke bis Mitte Klemmbacke fest (siehe Abb. 5-38 und Abb. 5-39).

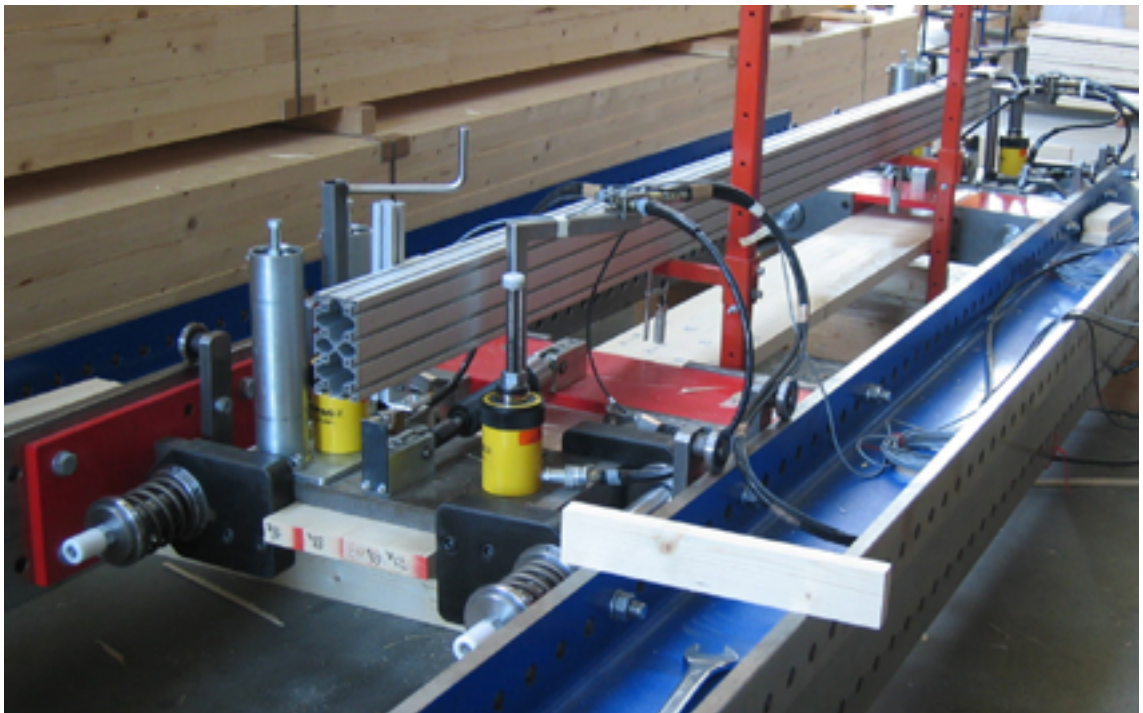


Abb. 5-35: Prüfmachine für Zug längs zur Faser, GEZU 750

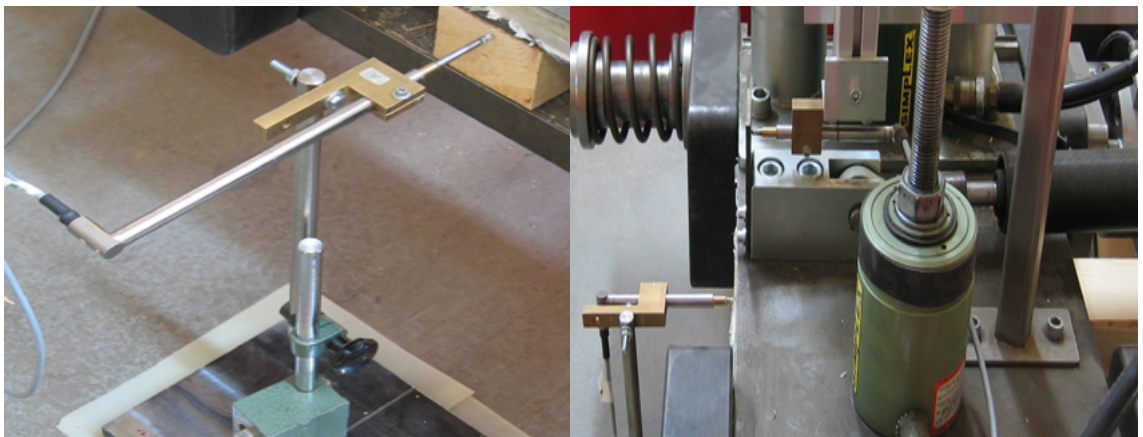


Abb. 5-36: Messung der Verformung am Stirnende beidseits der Probekörper zur Ermittlung des Rutschverhaltens der Versuchskörper unter Last

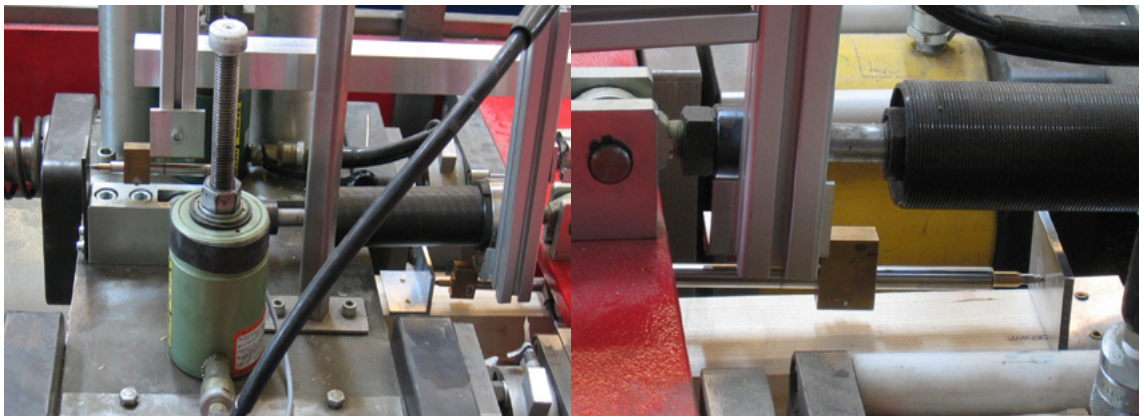


Abb. 5-37: Darstellung der Kalibrierung der Bezugslänge $l_{0, \text{Maschine}}$ über eine zweite Verformungsmessung, zur Berechnung des statischen E-Moduls über den Maschinenweg

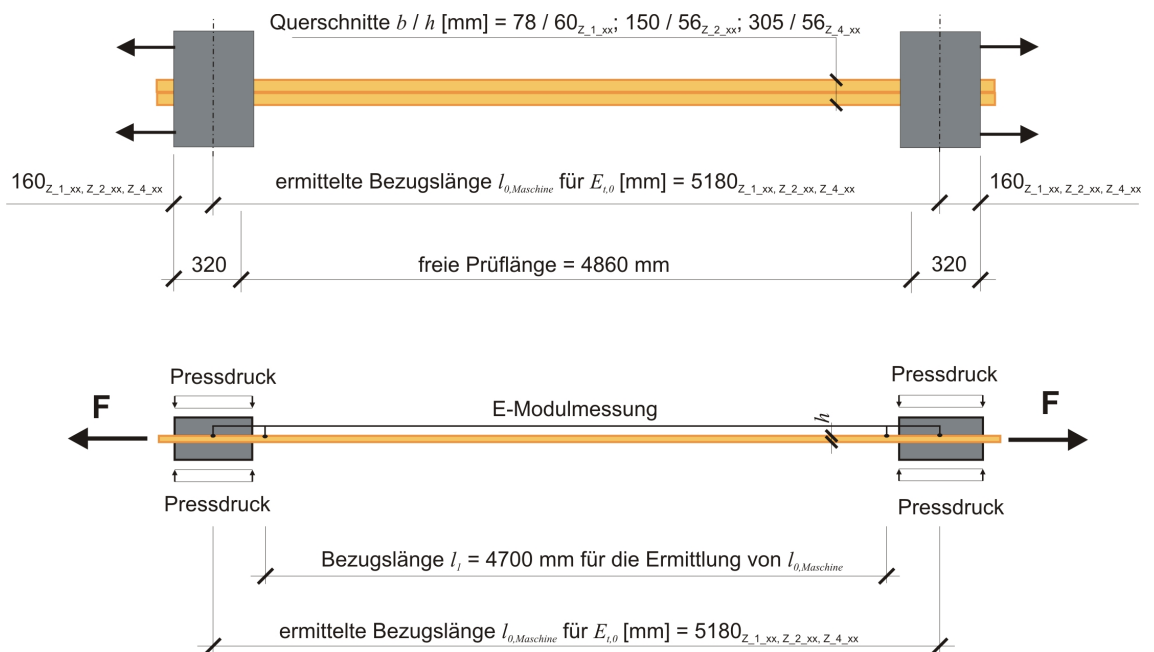


Abb. 5-38: Prüfkfiguration Zug längs zur Faser der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

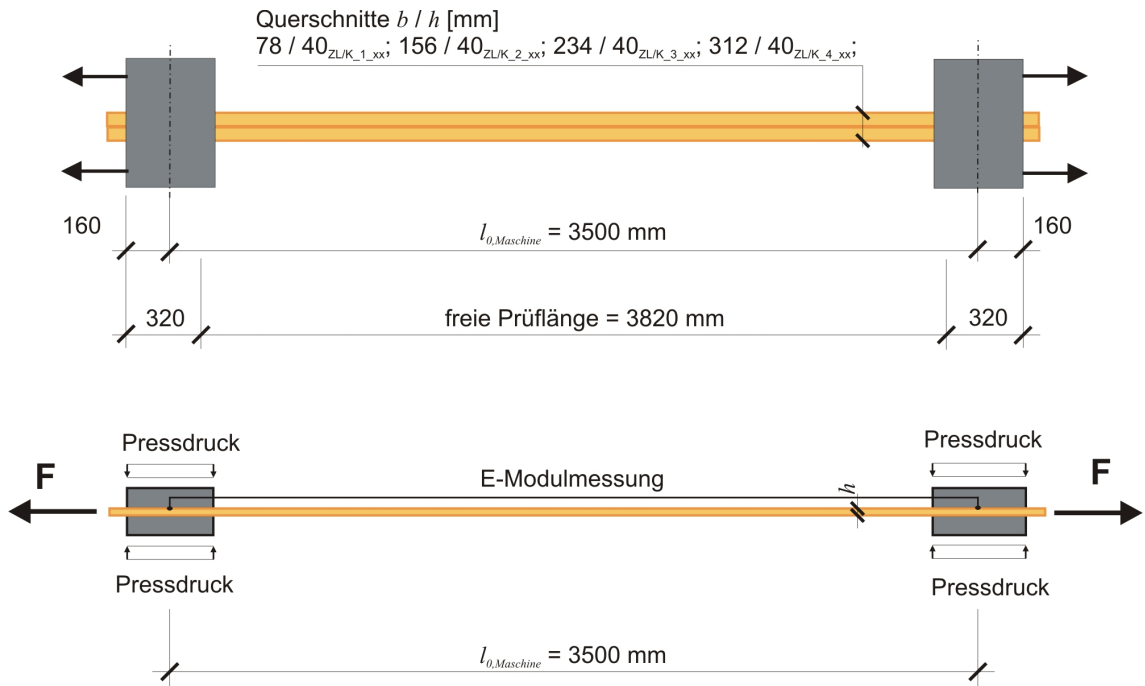


Abb. 5-39: Prüfkonfiguration Zug längs zur Faser der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 sowie ZUG_ZK_40-78

Der Zusammenhang zur Ermittlung des statischen Zug-E-Moduls längs zur Faser ist der Formel 5-9 zu entnehmen. Die Zugfestigkeit wurde aus dem Verhältnis der Maximalkraft und der Querschnittsabmessungen im Bruchbereich, in Anlehnung an die ON EN 408:2005 ermittelt. Der formale Zusammenhang ist in der Formel 5-10 dargestellt.

$$E_{t,0} = \frac{l_{0,Maschine} \cdot (F_2 - F_1)}{A \cdot (w_2 - w_1)}$$

$E_{t,0}$	Zug-Elastizitätsmodul längs zur Faser [N/mm ²]
$l_{0,Maschine}$	Bezugslänge zur Bestimmung des E-Moduls [mm]
$F_2 - F_1$	Laststeigerung im linearen Bereich der Last-Verformungs-Kurve [N]
$w_2 - w_1$	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$ [mm]
A	Querschnittsfläche aus $b \cdot h$ [mm ²]

Formel 5-9

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

$f_{t,0}$	Zugfestigkeit längs zur Faser [N/mm ²]
F_{max}	maximale Kraft [N]
A	Querschnittsfläche aus $b \cdot h$ [mm ²]

Formel 5-10

5.4.4 Durchführung der Biegeversuche

Die Durchführung der 4 Punkt Biegeversuche fand in Anlehnung an die ON EN 408:2005 statt. Die freie Prüflänge entsprach rund $18 h$, die Kraftereinleitung erfolgte in den Drittelpunkten. Die lokale Verformung wurde im querkräftfreien Bereich innerhalb des mittleren Drittels über eine Länge von $l_1 = 5 h$ über induktive Wegaufnehmer beidseits bestimmt.

Die Untersuchungsreihen BIEGUNG_80-160 sowie die Serien Ba_2_xx und Bb_1_xx der Reihen BIEGUNG_BB_80-160 und BIEGUNG_BB_60-200 wurden an der Universalprüfmaschine ZWICK Z 270 weggesteuert durchgeführt.

Die weiteren Serien Ba_3_xx, Bb_2_xx und Bb_3_xx wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) über Parallelschaltung der beiden 1 MN Prüfgerüste 1 und 2 bewerkstelligt. Hierbei wurde einerseits die lokal sowie die globale Verformung (über die gesamte freie Prüflänge) ebenfalls über induktive Wegaufnehmer bestimmt. Aufgrund von Steuerungsproblemen durch die zum Teil erheblichen Steifigkeitsunterschiede zwischen den Abschnitten der Prüfkörper beider Prüfgerüste wurde die Steuerung der Belastung für die E-Modulbestimmung nach der ON EN 408:2005 nach der Kraft, und danach bis zum Versagen über den Weg durchgeführt. Der Versuch der Mitberücksichtigung der Einpressungen an den Auflagern sowie die Ermittlung der Verformungen an den Enden der Träger unter Belastung scheiterten an den unzureichend rechtwinkelig gehobelten Querschnitten.

Zur Vermeidung der Kippneigung der geprüften schlanken Querschnitte wurde eine Kipphalterung, unter Bedacht auf eine ungehinderte Verformungsmöglichkeit des Trägers in vertikaler Richtung, eingesetzt.

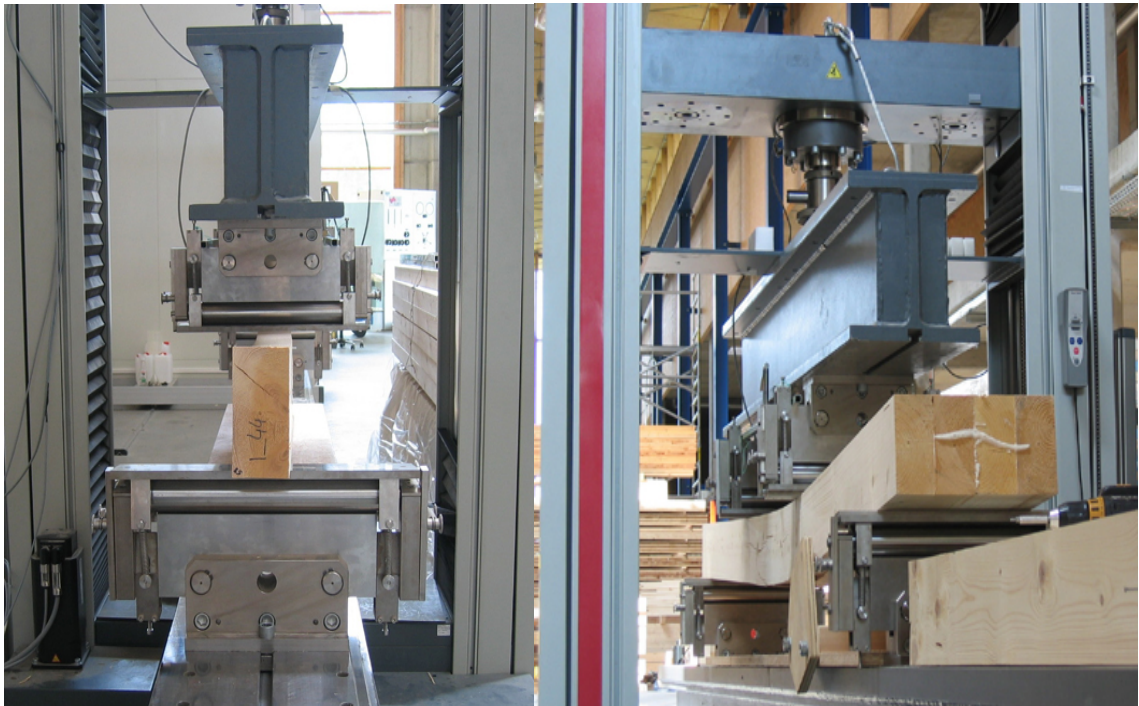


Abb. 5-40: Universalprüfmaschine ZWICK Z 270; Prüfkfiguration 4 Punkt Biegeprüfung

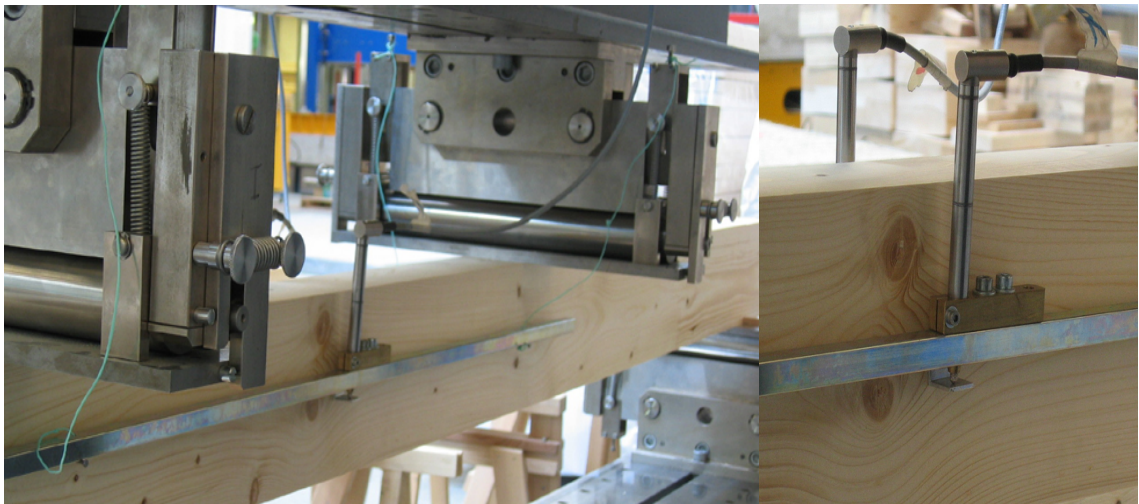


Abb. 5-41: Messgestänge und induktive Wegaufnehmer zur Ermittlung der lokalen Verformung im querkräftfreiem Bereich, 4 Punkt Biegeprüfungen an der Universalprüfmaschine ZWICK Z 270

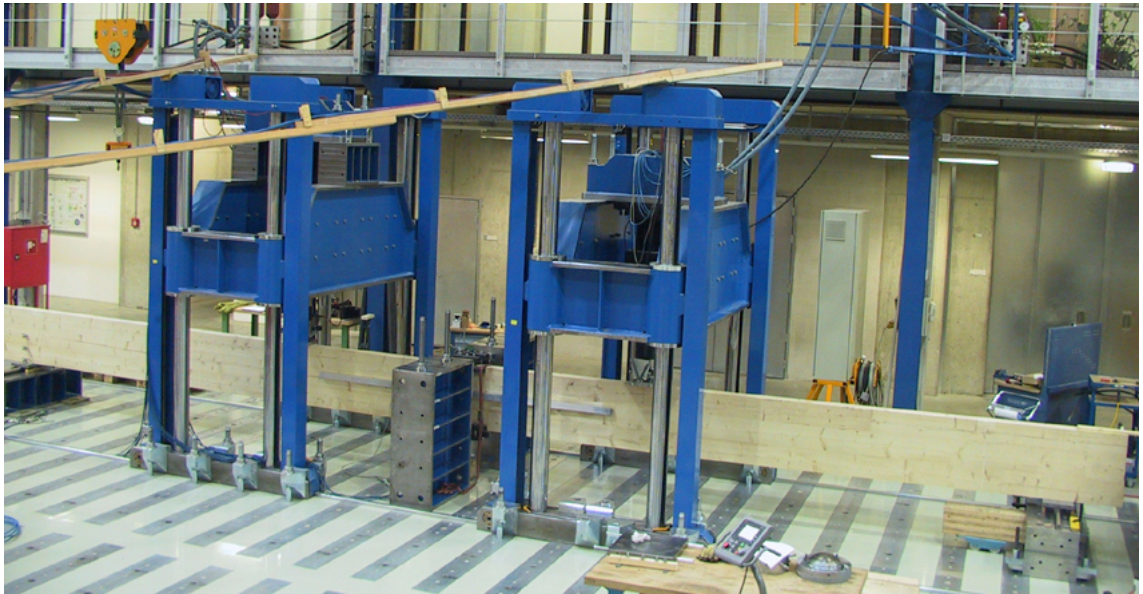


Abb. 5-42: 4 Punkt Biegeprüfung an den beiden parallel geschalteten 1 MN Prüfgeräten 1 und 2 des LKI

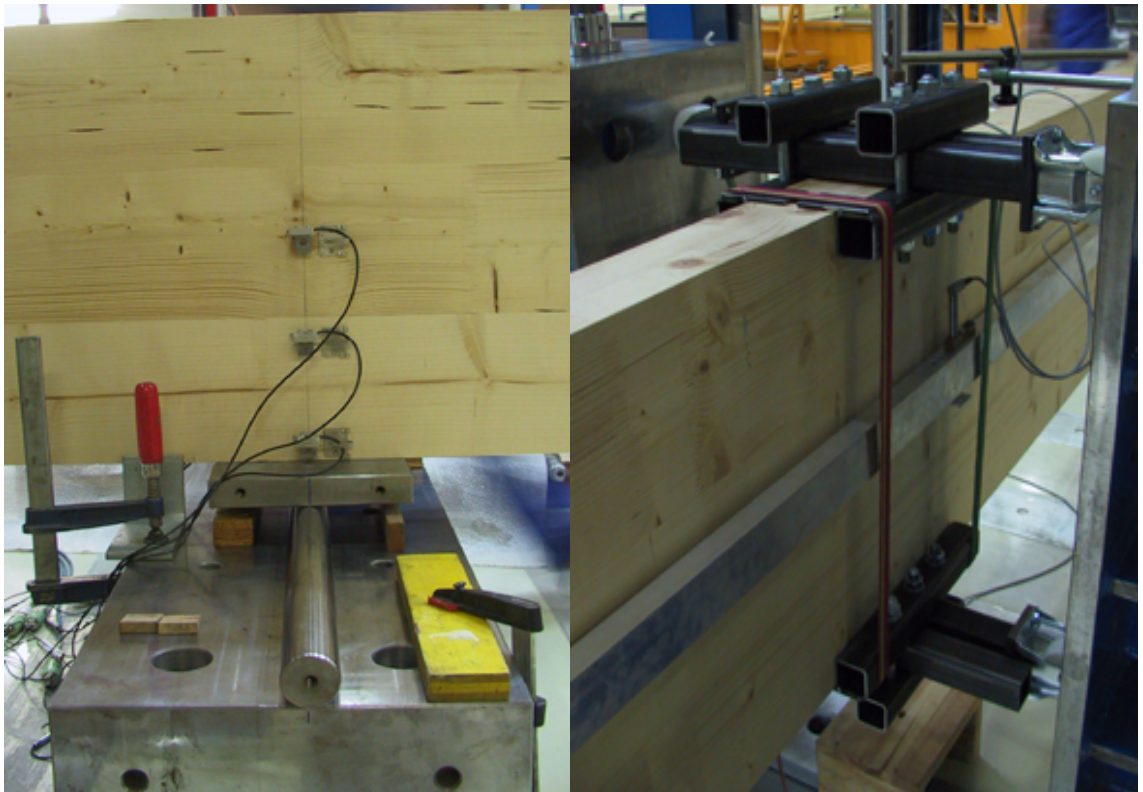


Abb. 5-43: 4 Punkt Biegeprüfung am LKI; Ausbildung des Auflagers sowie Darstellung der Messeinrichtung zur Ermittlung der Verformungen am Trägerende in 3 unterschiedlichen Trägerhöhen (unten, 1/4, Schwerachse) (links), sowie Darstellung der Kipphalterung, Messeinrichtung zur Bestimmung des lokalen sowie globalen Verformungsweges über induktive Wegaufnehmer (rechts)

Die Versuchskonfigurationen der Reihe BIEGUNG_80-160 ist Abb. 5-44 zu entnehmen. Die Anordnungen zur Prüfung der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160 sind in Abb. 5-45 und Abb. 5-46 dargestellt. Abb. 5-47 bis Abb. 5-49 beinhalten die Darstellungen der Konfigurationen zur versuchstechnischen Ermittlung der Biegefestigkeit sowie der Biege-E-Module der Reihe BIEGUNG_BB_60-200.

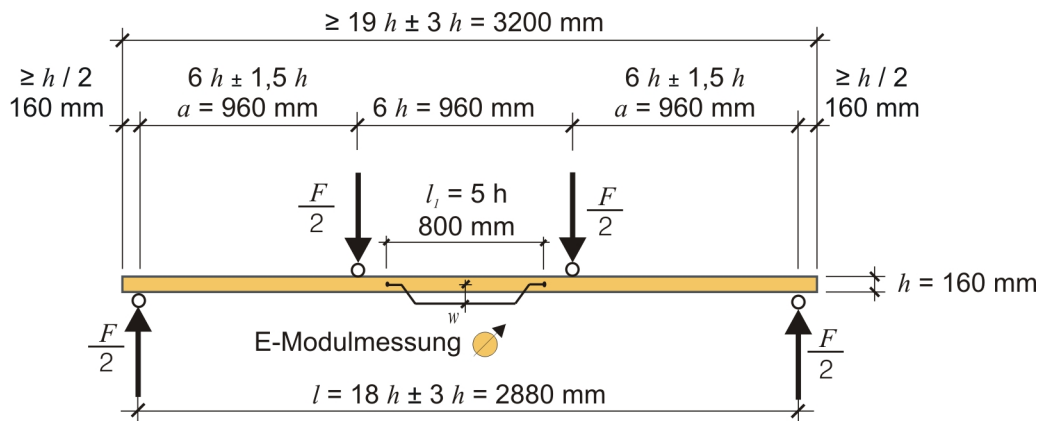


Abb. 5-44: Prüfkonfiguration 4-Punkt Biegung der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

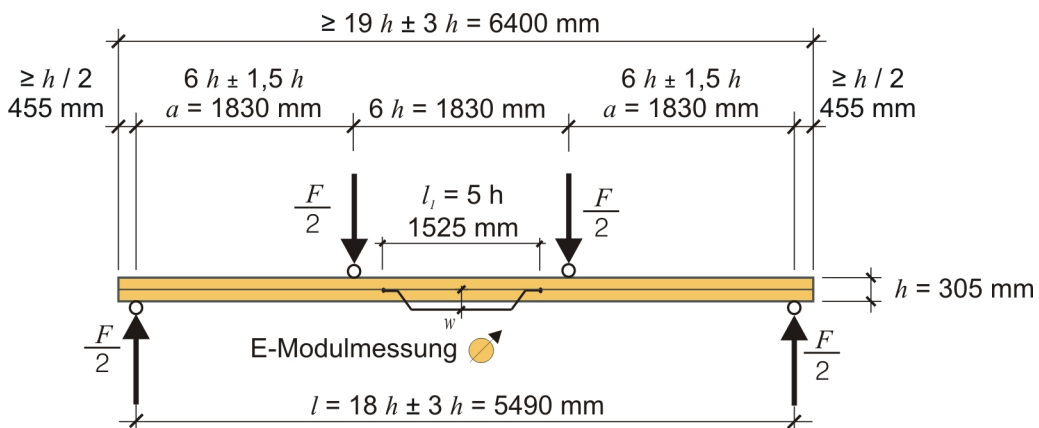


Abb. 5-45: Prüfkonfiguration 4-Punkt Biegung der Serie Ba_2_xx der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160

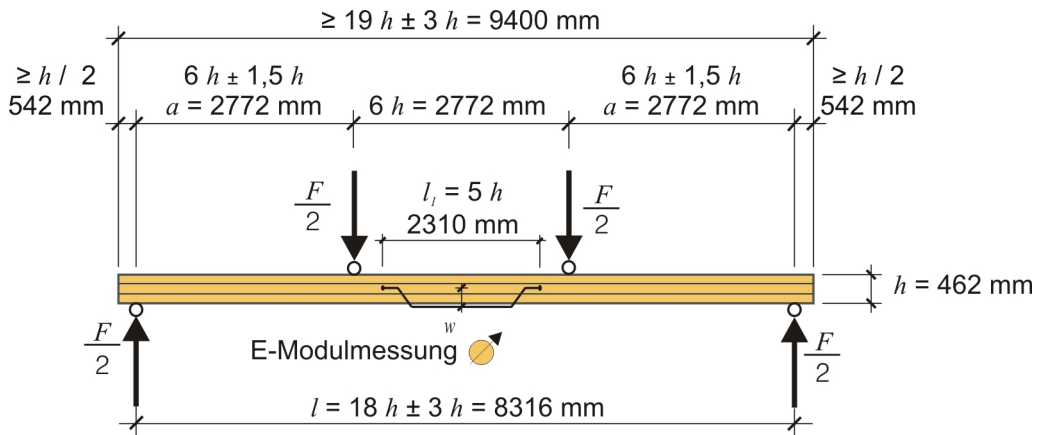


Abb. 5-46: Prüfkfiguration 4-Punkt Biegung der Serie Ba_3_xx der Untersuchungsreihe BIE-GUNG_BB_80-160

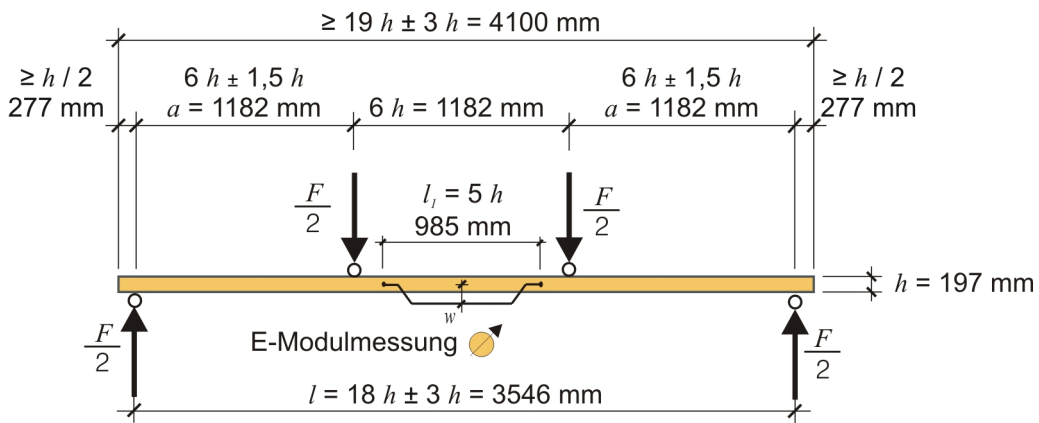


Abb. 5-47: Prüfkfiguration 4-Punkt Biegung der Serie Bb_1_xx der Untersuchungsreihe BIE-GUNG_BB_60-200

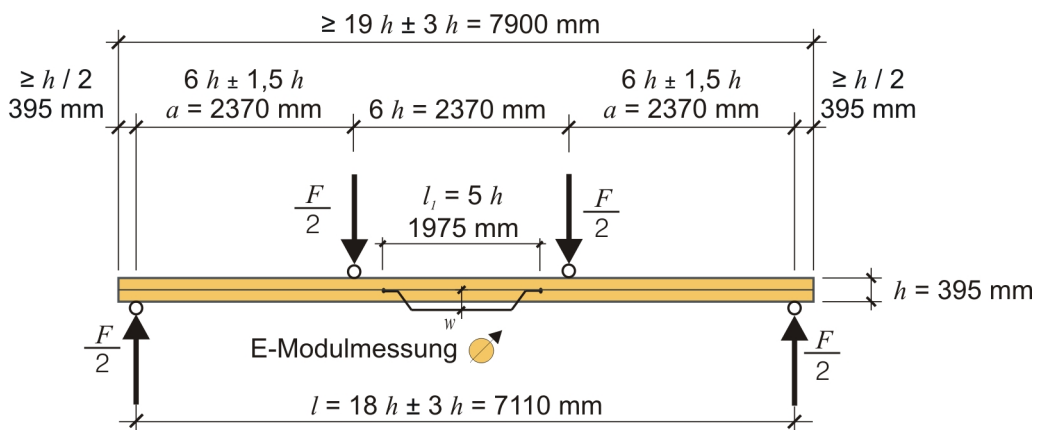


Abb. 5-48: Prüfkfiguration 4-Punkt Biegung der Serie Bb_2_xx der Untersuchungsreihe BIE-GUNG_BB_60-200

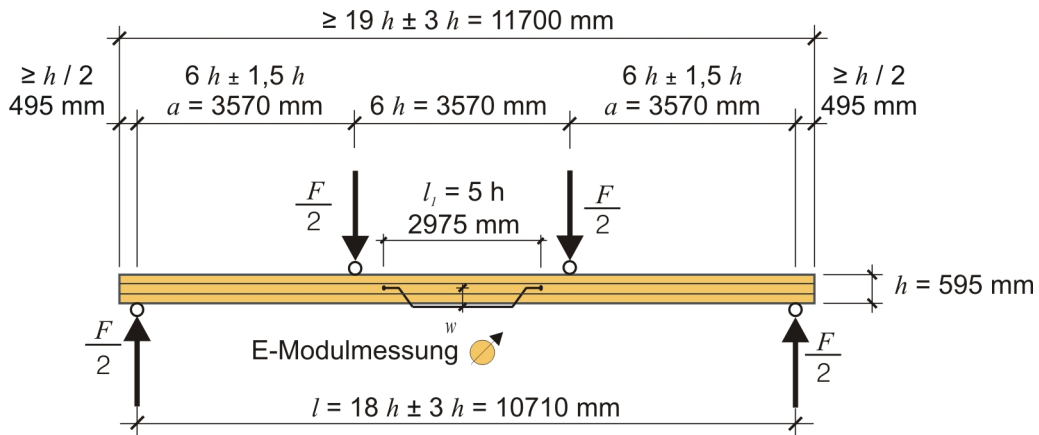


Abb. 5-49: Prüfkonfiguration 4-Punkt Biegung der Serie Bb_3_xx der Untersuchungsreihe BIE-GUNG_BB_60-200

Die Berechnung des lokalen und globalen Biege-E-Moduls erfolgte in Anlehnung an die ON EN 408:2005 und ist in der Formel 5-11 und der Formel 5-12 dargelegt. Die Biegefestigkeit als Verhältnis des Biegemomentes zum Widerstandsmoment wurde ebenfalls in Anlehnung an die ON EN 408:2005 ermittelt (siehe Formel 5-13).

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} \quad \text{mit} \quad I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$E_{m,l}$	lokaler Biege-E-Modul [N/mm ²]
a	Abstand zwischen der Laststelle und dem nächsten Auflager beim Biegeversuch [mm]
l_1	Bezugslänge zur Bestimmung des E-Moduls [mm]
$F_2 - F_1$	Laststeigerung im linearen Bereich der Last-Verformungs-Kurve [N]
$w_2 - w_1$	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$ [mm]
I	Trägheitsmoment [mm ⁴]
b	Breite des Prüfkörpers [mm]
h	Höhe des Prüfkörpers [mm]

Formel 5-11

$$E_{m,g} = \frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{b \cdot h^3 \cdot (w_2 - w_1)} \cdot \left[\left(\frac{3 \cdot a}{4 \cdot l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right]$$

$E_{m,g}$	globaler Biege-E-Modul [N/mm ²]
a	Abstand zwischen der Laststelle und dem nächsten Auflager beim Biegeversuch [mm]
l	Spannweite des Biegeversuches [mm]
$F_2 - F_1$	Laststeigerung im linearen Bereich der Last-Verformungs-Kurve [N]
$w_2 - w_1$	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$ [mm]
b	Breite des Prüfkörpers [mm]
h	Höhe des Prüfkörpers [mm]

Formel 5-12

$$f_m = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F_{\max}}{2} \cdot a}{W} = \frac{a \cdot F_{\max}}{2 \cdot W} \quad \text{mit} \quad W = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

f_m	Biegefestigkeit [N/mm ²]
M	Biegemoment [Nmm]
W	Widerstandsmoment [mm ³]
F_{\max}	maximale Kraft [N]
a	Abstand zwischen der Laststelle und dem nächsten Auflager beim Biegeversuch [mm]
b	Breite des Prüfkörpers [mm]
h	Höhe des Prüfkörpers [mm]

Formel 5-13

5.4.5 Korrektur der ermittelten mechanischen Größe auf die Referenzfeuchte $u = 12 \%$ der ON EN 384:2004

Eine Anpassung der mechanischen Kennwerte auf die Referenzfeuchte von $u = 12 \%$ ist nach der ON EN 384:2004 dann vorzunehmen, wenn die mittlere Holzfeuchte u_0 zwischen 10% und 18% beträgt. Nach der ON EN 384:2004 sind die Mittelwerte sowie die 5% Quantilwerte der definierten mechanischen Kennwerte dahingehend zu korrigieren.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurden die mechanischen Kennwerte der Steifigkeit sowie die Rohdichte der jeweiligen Probe in Verbindung mit der ermittelten Holzfeuchte korrigiert.

5.4.5.1 Korrektur der Steifigkeitswerte

Die Steifigkeitswerte sind nach der ON EN 384:2004 auf die Referenzfeuchte $u = 12 \%$ zu korrigieren, wobei eine Erhöhung der Steifigkeitswerte um $+ 2 \%$ pro $\%$ erhöhter Holzfeuchte des Probekörpers zur Referenzfeuchte vorzunehmen ist. Die Formel 5-14 stellt den Zusammenhang dar.

$$E_{12} = E_0 \cdot [1 + ((u_0 - 0,12) \cdot 2)]$$

E_{12}	E-Modul, bezogen auf die Referenzfeuchte $u = 12 \%$ [N/mm ²]
E_0	E-Modul, ermittelt nach den Prüfbedingungen und bezogen auf die Holzfeuchte u_0 bei Prüfbedingungen [N/mm ²]
u_0	Holzfeuchte bei der Prüfung [%]

Formel 5-14

5.4.5.2 Korrektur der Rohdichtewerte

Zudem ist die Rohdichte nach der Referenzfeuchte von $u = 12 \%$ in der Weise zu korrigieren, dass jede Rohdichte bei Prüfbedingungen mit erhöhter Holzfeuchte um $0,5 \%$ je $\%$ Feuchteunterschied zu verringern ist (siehe Formel 5-15).

$$\rho_{12} = \rho_0 \cdot [1 - ((u_0 - 0,12) \cdot 0,5)]$$

ρ_{12}	Rohdichte, bezogen auf die Referenzfeuchte $u = 12 \%$ [N/mm ²]
ρ_0	Rohdichte, ermittelt nach den Prüfbedingungen und bezogen auf die Holzfeuchte u_0 bei Prüfbedingungen [N/mm ²]
u_0	Holzfeuchte bei der Prüfung [%]

Formel 5-15

5.4.6 Ermittlung der Systemfaktoren k_{sys} der einzelnen Untersuchungsreihen

Die Systemfaktoren k_{sys} wurden als Verhältnisfaktoren zwischen den 5 % Quantilen der Festigkeiten der Systeme zu jener der Einzelkomponenten ermittelt. Der formale Zusammenhang ist in der Formel 5-16 dargestellt.

$$k_{\text{sys}} = \frac{f_{05,i}}{f_{05,1}} \quad \text{mit} \quad i = 1..n$$

k_{sys}	Systemfaktor [--]
$f_{05,i}$	5 % Quantile der Festigkeit aus Untersuchungen eines Systems aus $i = 1$.. n Komponenten [N/mm ²]
$f_{05,1}$	5 % Quantile der Festigkeit aus Untersuchungen von Einzelkomponenten oder Referenzsystemen [N/mm ²]
n	Anzahl der Komponenten in einem System [--]

Formel 5-16

Aufgrund der Ermittlung des Systemfaktors als Verhältnisgröße, ist eine korrekte Bestimmung der 5 % Quantile der Festigkeiten unerlässlich. Die 5 % Quantile als solche ist jedoch ein Extremwert im Bereich des unteren auslaufenden Astes von statistischen oder empirischen Verteilungen und kann versuchstechnisch weitgehend gesichert nur mit erheblichem Aufwand, hinsichtlich der Anzahl der Prüfungen sowie der Einhaltung konstanter Prüfbedingungen, bewerkstelligt werden. Man behilft sich somit häufig mit statistischen Modellen stetiger Verteilungsformen und schließt aus einer generellen

Anpassung des Modells an die begrenzte Anzahl an Versuchsdaten auf eine repräsentative Aussagekraft im Bereich von Extremwerten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Anpassung anhand verschiedener statistischer Kenndaten sowie durch die Betrachtung differenter, für die Festigkeit im Holz erprobter und üblicher Modelle, überprüft, um die jeweils repräsentativste Verteilungsform zu definieren. Der Ansatz der partiellen Anpassung eines Modells an einen definierten Verteilungsabschnitt (für die Bestimmung der 5 % Quantile beispielsweise der Abschnitt [0 %, 10 %] der Summenhäufigkeit) konnten aufgrund des dafür unzureichenden Prüfumfanges nicht durchgeführt werden.

Die Methoden der statistischen Auswertung sind dem folgenden Kapitel 5.5 zu entnehmen.

5.5 Methoden der statistischen Auswertung

Die unten angeführten Inhalte sind den Quellen Albernethy, 2000, Hartung et al., 2002, Augustin, 2004, Fischer, 2005, Zupan et al., 2005, sowie Zupan und Turk, 2002 und 2004 entnommen, sowie unter Fokussierung auf die hier angedachten Anwendungsfälle interpretiert. Die entnommenen Stellen werden, zur Erhaltung des Leseflusses, nicht gesondert vermerkt, ausgenommen sind Referenzierungen aus Normen.

Die im Folgenden erläuterten statistischen Methoden zur Bestimmung von Kennwerten sowie Zusammenhängen zwischen unterschiedlichen Größen werden für Stichproben, sprich für die vorliegenden Prüfumfänge der Serien, angewendet. Es wird damit versucht aus einem gegebenen Probenumfang anhand von wenigen Kenngrößen Trends für das Verhalten nicht prüfbare Grundgesamtheit abzuleiten.

Die ersten Schritte befassen sich mit der Beschreibung des Datenmaterials. Dies wird durch die Angabe von Lageparametern (Abschnitt 5.5.1.1) und durch Streuungsparameter (Abschnitt 5.5.1.2) erreicht. Es gelten dabei der Mittelwert und die Standardabweichung der Stichprobe als erwartungstreue Punktschätzer der wahren Werte der Grundgesamtheit. Unter "erwartungstreu" ist hier zu verstehen, dass der Schätzwert mit zunehmendem Probenumfang gegen den wahren Wert konvergiert.

Die weitere Auswertung beschäftigt sich mit den Zusammenhängen zwischen einzelnen ausgewählten Prüfgrößen. Über die Regressionsanalyse kann eine beschreibende Funktion bei gegebenem Zusammenhang ermittelt werden und im Anschluss über eine Korrelationsanalyse die Stärke des Zusammenhanges der untersuchten Größen bestimmt werden. Das Kapitel 5.5.2 liefert hierzu eine kurze Übersicht.

Der Abschnitt 5.5.5 umfasst in Kurzform die untersuchten Verteilungsmodelle zur Beschreibung ausgewählter Prüf- und Berechnungsgrößen.

5.5.1 Statistische Kennwerte

5.5.1.1 Lageparameter

Der Median (Zentralwert) repräsentiert die 50 % Quantile einer untersuchten Stichprobe oder Grundgesamtheit. Er ist genau jener Wert, für den gilt, dass die kumulierte Häufigkeit $F(x) = 0,5$ ergibt. Der Vorteil in der Bestimmung des Median liegt in seiner Stabilität gegenüber Extremwerten oder Ausreißern.

Allgemein versteht man unter einem Quantil einen Wert der Skala, welcher die Datenmenge in der Weise trennt, dass $1 - p$ -Prozent der Werte über dem Quantil, und p -Prozent der Werte unter dem Quantil zu liegen kommen. Sonderfälle bilden die Quartile, mit $p = 25 \%$, 50% (entspricht dem Median), und 75% .

Den arithmetischen Mittelwert (Formel 5-17) erhält man durch Teilung der Gesamtsumme aller Werte durch die Werteanzahl. Er ist instabil gegenüber Extremwerten und Ausreißern.

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

n Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
 x_i i -te Merkmalswert

Formel 5-17

Das Minimum min und das Maximum max dienen zur Abgrenzung des Wertefeldes.

5.5.1.2 Streuungsparameter

Die Spannweite (Formel 5-18) ist ein erstes Maß für die Streuung von untersuchten Daten und ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum.

$$w = \max - \min$$

max	Maximalwert einer Datenreihe
min	Minimalwert einer Datenreihe

Formel 5-18

Die Varianz ist ein Streuungsmaß in Abhängigkeit des arithmetischen Mittelwertes. Sie wird für Stichproben nach der Formel 5-19 berechnet.

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

n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
x_i	i -te Merkmalswert
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert einer Datenreihe
s^2	Quadrat der Standardabweichung

Formel 5-19

Die Standardabweichung (Formel 5-20) erhält man durch Ziehen der Quadratwurzel aus der Varianz.

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

n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
x_i	i -te Merkmalswert
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert einer Datenreihe
v	Varianz

Formel 5-20

Der Variationskoeffizient COV ('coefficient of variation') (Formel 5-21) repräsentiert die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung. Durch die Normierung zwischen 0 und 1 erhält der COV als Streuungsmaß zusätzliches Gewicht im Vergleich von unterschiedlichen Kennwerten und wird meist als Prozentwert angegeben.

$$COV = \frac{s}{\bar{x}} \quad [\%]$$

s Standardabweichung
 \bar{x} arithmetischer Mittelwert einer Datenreihe

Formel 5-21

5.5.2 Regressions- sowie Korrelationsanalyse

Die Regressionsanalyse hat das Ziel eine möglichst repräsentative mathematische Funktion zur Beschreibung eines Zusammenhanges zwischen zwei (einfache Regression) oder mehreren (multiple Regression) voneinander abhängigen statistischen Zufallsgrößen zu formulieren. Hierbei ist jede Form einer mathematischen Funktion (linear - nicht linear) denkbar.

Die Korrelationsanalyse ermöglicht die statistische Beschreibung des Zusammenhanges zwischen zwei oder mehreren voneinander abhängigen statistischen Zufallsgrößen. Als Maßzahl dienen das Bestimmtheitsmaß, sowie der Korrelationskoeffizient anhand derer die Stärke und die Richtung des Zusammenhanges (positiv - negativ) erkennbar ist.

Im Folgenden wird die lineare Regressionsanalyse kurz beschrieben. Sie dient häufig als Modell für Zusammenhänge zwischen holztechnologischen Merkmalen. Zudem bietet sie die Basis zur Bestimmung der Parameter der im Kapitel 5.5.5 beschriebenen Weibull Verteilung.

5.5.2.1 Lineare Regressionsanalyse

Gegeben seien die unabhängige Variable X sowie die davon abhängige Variable Y als Funktion $y = f(x)$. Auf Basis der linearen Funktionsgleichung nach der Formel 5-22 werden die Parameter a und b durch Minimierung der Differenzen der geschätzten \hat{y} Werte der Funktion zu den versuchstechnisch gewonnenen y Werten berechnet. Dies geschieht nach der 'least square method' (LSM), der Methode der kleinsten Quadrate, dargestellt in der Formel 5-23 für eine einfache lineare Regression.

$$\hat{y} = a + b \cdot x$$

\hat{y}	nach der linearen Regressionsgleichung geschätzter Merkmalswert der abhängigen Variable Y
a	Regressionsparameter; Abschnitt auf der y Achse
b	Regressionsparameter; Steigung
x	Merkmalswert der unabhängigen Variable X

Formel 5-22

$$LSM(a, b) = \sum_{i=1}^n (\hat{y} - y)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^2 \rightarrow Min$$

a, b	Regressionsparameter
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
y	Merkmalswert der abhängigen Variable Y
\hat{y}	nach der linearen Regressionsgleichung geschätzter Merkmalswert der abhängigen Variable Y
x_i	i -te Merkmalswert x
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X

Formel 5-23

Die Lösung dieser Optimierungsaufgabe erhält man durch partielles Ableiten der Funktion der Formel 5-23 und anschließendes 0 setzen. Die Vorgangsweise ist unter der Formel 5-24 dargestellt.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial LSM(a, b)}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n 2 \cdot (y_i - a - b \cdot x_i) \cdot (-1) \\ \frac{\partial LSM(a, b)}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n 2 \cdot (y_i - a - b \cdot x_i) \cdot (-x_i) \end{aligned} \right\} = 0$$

a, b	Regressionsparameter
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
y_i	i -te Merkmalswert y
x_i	i -te Merkmalswert x

Formel 5-24

Das Ergebnis sind die "Normalgleichungen" einer linearen Regressionsfunktion der Form nach der Formel 5-36. Durch Auflösung dieser Gleichungen erhält man die formalen Beziehungen zur Lösung der Regressionskoeffizienten a und b nach der Formel 5-26. Die Ermittlung des Parameters b lässt sich durch Umformung nach der Formel 5-27 vereinfachen als Verhältnis der Kovarianz, welche als Kennwert die Streuungen

beider Merkmale berücksichtigt, zur Varianz des unabhängigen Merkmales X . Diese Formel entspricht der Vorgangsweise bei Stichproben.

$$\sum_{i=1}^n y_i = n \cdot a + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i = a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2$$

a, b	Regressionsparameter
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
y_i	i -te Merkmalswert y
x_i	i -te Merkmalswert x

Formel 5-25

$$b = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \text{und} \quad a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}$$

a, b	Regressionsparameter
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
y_i	i -te Merkmalswert y
x_i	i -te Merkmalswert x
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte der unabhängigen Variable Y

Formel 5-26

$$b = \frac{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

b	Regressionsparameter
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
y_i	i -te Merkmalswert y
x_i	i -te Merkmalswert x
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte der unabhängigen Variable Y
s_{xy}	Kovarianz
s_x^2	Varianz der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X

Formel 5-27

5.5.2.2 Lineare Korrelationsanalyse

Das Bestimmtheitsmaß, als ein Maß des Zusammenhanges zwischen Merkmalen, beschreibt den Anteil der durch die unabhängige Variable X erklärten Varianz an der gesamten Varianz der abhängigen Variable Y (siehe Formel 5-28). B^2 verläuft dabei im Intervall $[0, 1]$, jedoch nicht linear.

$$B^2 = \frac{s_{\hat{y}}^2}{s_y^2} \quad \text{mit} \quad 0 \leq B^2 \leq 1$$

B^2	Bestimmtheitsmaß
$s_{\hat{y}}^2$	Varianz der abhängigen, durch die lineare Regression geschätzten Merkmalswerte der Variable Y
s_y^2	Varianz der abhängigen Merkmalswerte der Variable Y

Formel 5-28

Der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson gilt als Maßzahl für die Stärke des hier beschriebenen linearen Zusammenhanges von Merkmalen und basiert auf der Kovarianz. Hierbei verläuft der Korrelationskoeffizient im Intervall $[-1, +1]$ als maßstabunabhängige und normierte Kennzahl, jedoch nicht linear. Hierbei gibt das Vorzeichen selbst Auskunft über die Richtung des Zusammenhanges, so gilt bei einem positiven Korrelationskoeffizient ein gleichläufiger, und bei einer negativen Kennzahl ein gegenläufiger Zusammenhang.

$$r_{xy} = r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad \text{mit} \quad -1 \leq r \leq 1$$

r, r_{xy}	Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson
s_{xy}	Kovarianz
s_x	Standardabweichung der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X
s_y	Standardabweichung der Merkmalswerte der abhängigen Variable Y

Formel 5-29

Der Korrelationskoeffizient sagt jedoch nichts über die Art des Zusammenhanges von Merkmalen. Des Weiteren lässt sich aus einem $r_{xy} = 0$ nicht automatisch schließen, dass die Merkmale keinen Zusammenhang besitzen und somit voneinander unabhängig sind. Umgekehrt ist bei $-1 < r_{xy} < 1$ nicht der automatische Schluss eines ursächlichen Zusammenhanges gewährleistet, eine mögliche Scheinkorrelation zu prüfen.

Für den hier beschriebenen Fall einer Untersuchung des linearen Zusammenhanges gilt jedoch, dass $r^2 = B^2$. Des Weiteren lässt sich der Regressionskoeffizient b aus Kapitel 5.5.2.1 durch die Formel 5-30 ebenfalls darstellen.

$$b = r \cdot \frac{s_y}{s_x} \quad \text{mit} \quad b \cdot b' = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \cdot \frac{s_{xy}}{s_y^2} = r^2$$

r	Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson
b	Regressionsparameter
b'	Regressionsparameter der 2. Regressionsgeraden (x und y vertauscht)
s_x	Standardabweichung der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X
s_y	Standardabweichung der Merkmalswerte der abhängigen Variable Y
s_{xy}	Kovarianz
s_x^2	Varianz der Merkmalswerte der unabhängigen Variable X
s_y^2	Varianz der Merkmalswerte der abhängigen Variable Y

Formel 5-30

5.5.3 Boxplots

Boxplots bieten die Möglichkeit einer übersichtlichen grafischen Darstellung einer Beobachtungsreihe. Hierbei ermöglichen wenige grafische Elemente zusammen mit einer Werteskala eine rasche optische Erfassung einer gesamten Datenreihe hinsichtlich ihrer Lage, Streuung sowie ihres Verlaufes. Somit ist auch die Art der Verteilungsausprägung (symmetrisch - unsymmetrisch) sowie die Stärke dieses Merkmales abschätzbar. Die Abb. 5-50 stellt übersichtlich die wesentlichen Elemente eines Boxplots dar.

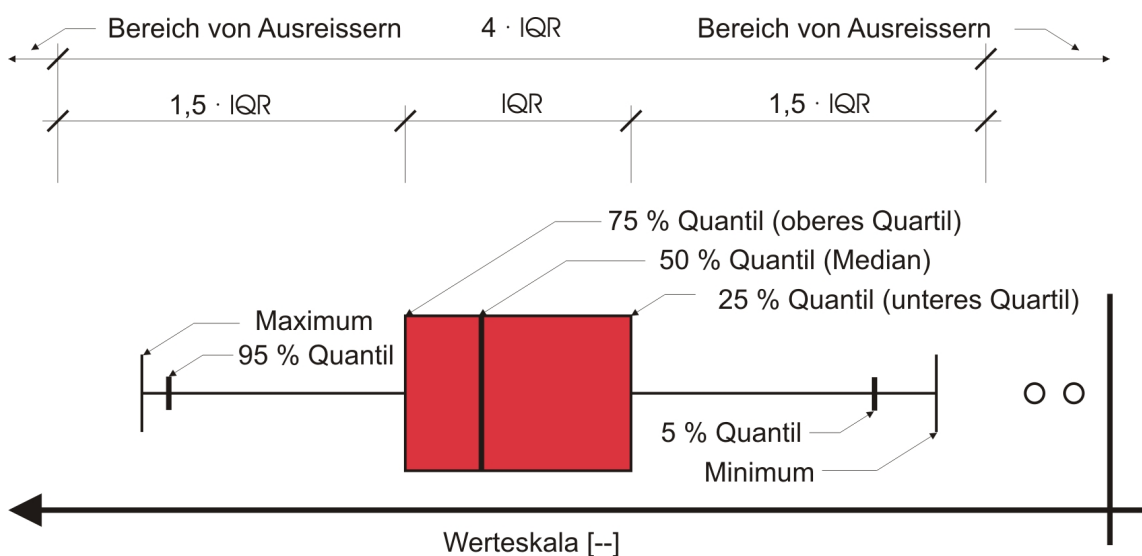


Abb. 5-50: schematische Darstellung von Elementen eines Box Plots

5.5.4 QQ-Plots

Ein QQ-Plot beinhaltet eine Gegenüberstellung der Quantile der empirischen Daten zu jenen des betrachteten Verteilungsmodells. Die Quantile der empirischen Häufigkeiten (siehe Abschnitt 5.5.5.1) werden hierzu verzerrt in einem "Wahrscheinlichkeitspapier" des jeweiligen statistischen Verteilungsmodells eingetragen und die Anpassung an die ebenfalls verzerrten Quantilwerte der Verteilung und somit die Repräsentanz des Modells visuell untersucht. Die Verzerrung des Modells und der empirischen Daten wird in der Weise gewählt, dass das Modell als Gerade im QQ-Plot erscheint.

Anhand dieser Darstellung, wie sie beispielsweise für die Normalverteilung dem Diagramm 5-1 zu entnehmen ist, können die den Quantilen zugewiesenen Werte des Verteilungsmodells direkt von der Abszisse abgelesen werden. Zudem ermöglicht ein QQ-Plot auch eine visuelle, abschnittsweise Betrachtung der Anpassung der empirischen Daten an das statistische Verteilungsmodell.

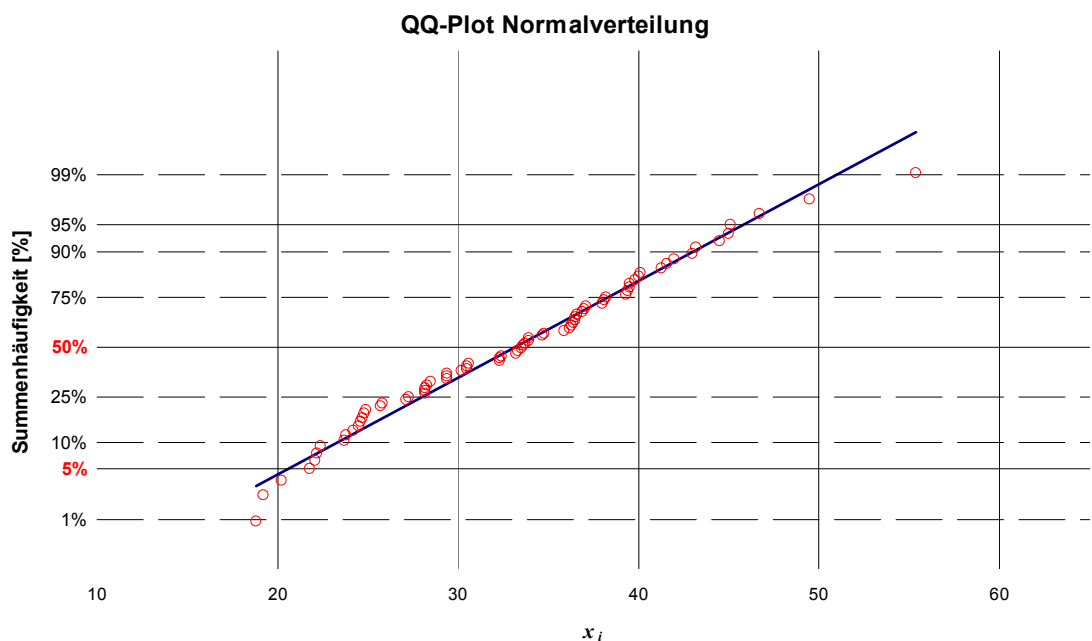


Diagramm 5-1: Beispiel eines QQ-Plots anhand einer Normalverteilung

5.5.5 Erläuterungen zu den betrachteten statistischen Verteilungsmodellen

5.5.5.1 Empirische Häufigkeit

Die empirische Häufigkeit wird im Allgemeinen durch Bestimmung der Rang-Summenhäufigkeiten aus den aufsteigend sortierten Daten berechnet. Diese Vorgangsweise entspricht im Wesentlichen der Ermittlung kumulierter relativer Häufigkeiten von stetigen, unklassierten Merkmalswerten einer Beobachtungsreihe. Hierbei weist die Basisvariante jedem Rang sowie dem zugehörigem Versuchswert die empirische Häufigkeit nach der Formel 5-31 zu. Es werden die Daten und deren Ränge als Grundgesamtheit betrachtet.

Bei Auswertungen an Stichproben ist anzumerken, dass sich mit abnehmender Anzahl des Stichprobenumfanges n ergibt, dass Werte in den auslaufenden Bereichen der Verteilungsschwänze zunehmend seltener auftreten. Bei Verwendung der Formel 5-31 ergibt sich somit ein zu geringer Abfall der empirischen Summenhäufigkeiten in den Randbereichen der Daten, da eine Berücksichtigung der im beschränkten Versuchsumfang ermittelbaren Extremwerten nicht ermöglicht wird. Aus diesem Grund sei die Verwendung der Gleichung nach der Formel 5-32 für rechtsschiefe Daten, sowie die Formel 5-33 für symmetrisch verteilte Daten empfohlen. Der Unterschied ist im Diagramm 5-2 auf Basis von generierten und transformierten Zufallzahlen dargestellt.

$$empH_{-1} = \frac{Rang}{n} \quad [\%]$$

Grenzfall 1: $empH_{-1 \rightarrow 0} \rightarrow Rang = 0$

Grenzfall 2: $empH_{-1 \rightarrow 1} \rightarrow Rang = n$

Formel 5-31

$$empH_{-2} = \frac{Rang - 0,3}{n + 0,4} \quad [\%]$$

Grenzfall 1: $empH_{-2 \rightarrow 0} \rightarrow Rang = 0,3$

Grenzfall 2: $empH_{-2 \rightarrow 1} \rightarrow Rang = n + 0,7$

Formel 5-32

$$empH_{-3} = \frac{Rang - 0,5}{n} \quad [\%]$$

Grenzfall 1: $empH_{-3} \rightarrow 0 \rightarrow Rang = 0,5$

Grenzfall 2: $empH_{-3} \rightarrow 1 \rightarrow Rang = n + 0,5$

Formel 5-33

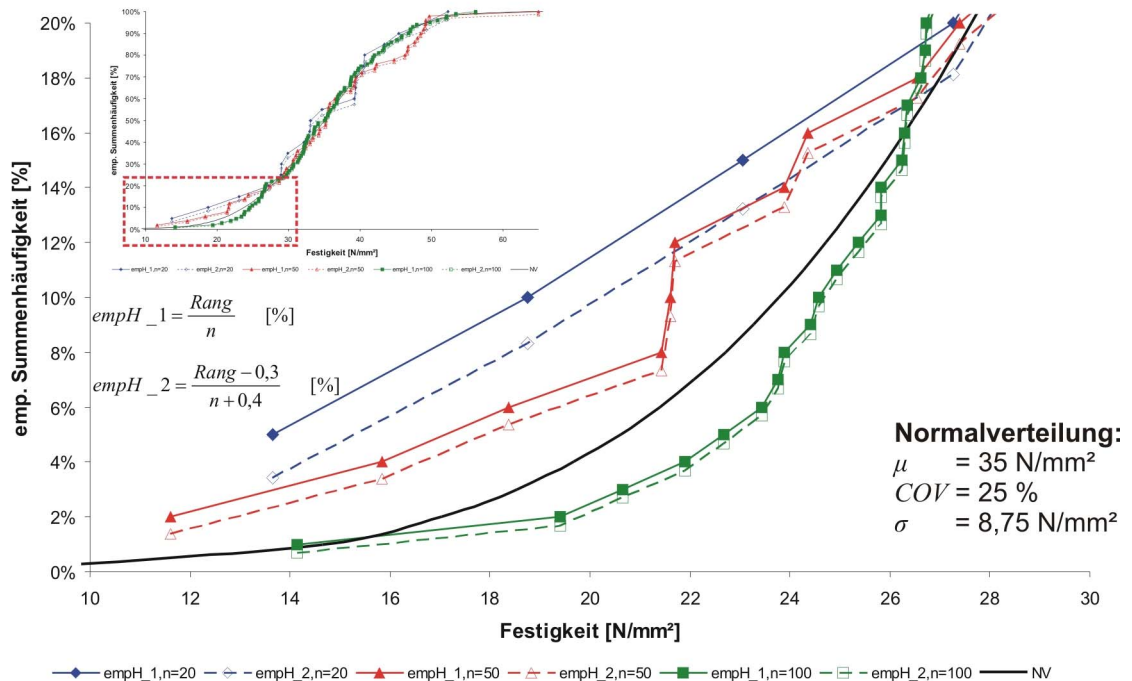


Diagramm 5-2: Darstellung 2 er Varianten empirischer Summenhäufigkeiten auf Basis einer normalverteilten Festigkeitsfunktion (schwarz) sowie zu dieser transformierte Zufallszahlen mit dem Stichprobenumfang $n = 20$ (blau), $n = 50$ (rot), $n = 100$ (grün)

Augrund der geringen Unterschiede in der Auswertung zwischen den Gleichungen der Formel 5-31 und der Formel 5-32 sowie des Vorliegens von bevorzugt dezentralen Daten wurde die empirische Häufigkeit in dieser Arbeit nach der Formel 5-32 berechnet.

Die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde durch Umformung der Gleichung aus der Formel 5-32 zur Ermittlung des Ranges berechnet. Eine anschließende Interpolation zwischen den zugewiesenen Versuchswerten des oberen und unteren ganzzahligen Ranges führte zum Ergebnis. Die Vorgangsweise ist in der Formel 5-34 und der Formel 5-35 dargestellt. Eine Extrapolation wurde nicht zugelassen, somit wurde

eine Berechnung der empirischen 5 % Quantile erst ab einer Probenanzahl $n \geq 20$ durchgeführt.

$$Rang_{p_{05}} = empH_{-2} \cdot (n + 0,4) + 0,3 = 0,05 \cdot n + 0,32$$

$Rang_{p_{05}}$	Rang zur Bestimmung der 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit nach der Formel 5-32
$empH_{-2}$	empirische Häufigkeitssumme nach der Formel 5-32 für $p_{05} = 0,05 = 5 \%$
n	Anzahl der Merkmalswerte

Formel 5-34

$$p_{05,empH} = Z_{Rang,u} + (Z_{Rang,o} - Z_{Rang,u}) \cdot (Rang_{p_{05}} - Rang_u)$$

$p_{05,empH}$	5 % Quantile der empirischen Häufigkeit nach der Formel 5-32
$Z_{Rang,u}$	zugewiesener Merkmalswert des abgerundeten, ganzzahligen Ranges $Rang_{p_{05}}$
$Z_{Rang,o}$	zugewiesener Merkmalswert des aufgerundeten, ganzzahligen Ranges $Rang_{p_{05}}$
$Rang_{p_{05}}$	Rang zur Bestimmung der 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit nach der Formel 5-32

Formel 5-35

5.5.5.2 Normalverteilung

Die Normalverteilung (NV), oder auch Gauß'sche Verteilung, ist eine stetige, symmetrische Verteilung und bekannt für die Breite Anwendbarkeit als Modell zur Charakterisierung von Merkmalen der Natur. Es handelt sich um einen 2 parametrischen Verteilungstyp, beschrieben durch den Mittelwert, als Lageparameter, und der Standardabweichung, als Streuungsparameter. Die Schätzung dieser Parameter aus einer Stichprobe erfolgt nach der Formel 5-17 und der Formel 5-20 des Kapitels 5.5.1. Die Dichtefunktion ist in der Formel 5-36 dargestellt. Die Verteilungsfunktion oder Summenhäufigkeit nach der Formel 5-37 erhält man durch Integration der Dichtefunktion.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad \text{mit} \quad -\infty < x < \infty, \quad -\infty < \mu < \infty, \quad \sigma^2 > 0$$

$f(x)$	Dichtefunktion der NV
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}
x	Merkmalswert

Formel 5-36

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(w) \cdot dw \quad \text{mit} \quad -\infty < w < x$$

Formel 5-37

Eine Sonderform stellt die standardisierte Normalverteilung dar. Diese wird durch eine Transformation nach der Formel 5-38 mit Mittelwert = 0 und Standardabweichung = 1 gewonnen. Ihre Dichtefunktion ist der Formel 5-39 zu entnehmen. Da die Verteilungsfunktion der Normalverteilung als solche nicht geschlossen lösbar ist, können über die Standardisierung jegliche Kennwerte der Verteilung tabellarisch erfasst werden und diese nach den Parametern der Normalverteilung transformiert werden.

Die Ermittlung der 5 % Quantile der Normalverteilung erfolgt nach der Formel 5-40.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{mit} \quad \mu = 0, \sigma = 1$$

z	transformierte Merkmalswert der standardisierten NV
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}
x	Merkmalswert

Formel 5-38

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} \quad \text{mit} \quad -\infty < z < \infty$$

$f(z)$	Dichtefunktion der standardisierten NV
z	transformierte Merkmalswert der standardisierten NV

Formel 5-39

$$x_{05} = \mu - 1,645 \cdot \sigma$$

x_{05}	5 % Quantile der NV
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}

Formel 5-40

5.5.5.3 Logarithmische Normalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung (LNV) gilt als eine weitere Sonderform der Normalverteilung. Hierbei wird der mögliche Wertebereich der Verteilung jedoch durch die Logarithmierung der Merkmalswerte auf ein Intervall von $[0, \infty]$ eingeschränkt. Es handelt sich um ein rechtsschiefes, dezentrales statistisches Modell für stetige Daten. Die Anwendung der logarithmischen Verteilung folgt für Merkmalsgrößen, welche keine negativen Werte annehmen können, wie zum Beispiel Festigkeiten oder Steifigkeiten. Eine repräsentative Anpassung der Festigkeiten im Holz durch dieses Modell wird zudem in der Literatur häufig postuliert.

Charakterisiert ist die logarithmische Normalverteilung durch 3 Parameter, der Lage (Mittelwert nach der Formel 5-41), der Streuung (siehe Formel 5-42) und der Verschiebung, ausgedrückt durch die Größe x_0 als positiver Startwert der Verteilung mit $x_0 \geq 0$. Die 2 parametrische LNV ist somit definiert durch $x_0 = 0$. Die Dichte- sowie die Verteilungsfunktion sind der Formel 5-43, sowie der Formel 5-44 zu entnehmen.

$$\bar{x}_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

n Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
 x_i i -te Merkmalswert

Formel 5-41

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(x_i) - \bar{x}_y)^2}$$

n Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
 x_i i -te Merkmalswert
 \bar{x}_y Mittelwert einer Datenreihe logarithmierter Merkmalswerte x_i

Formel 5-42

Der Parameter der 3 parametrischen LNV wurden im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der 'least square method', durch Minimierung der Fehlerquadrate zwischen der linearisierten empirischen Häufigkeit und der linearisierten LNV bestimmt. Diese Vorgangsweise entspricht somit der linearen Regression, welche im Abschnitt 5.5.2.1 bereits kurz beschrieben wurde.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \frac{1}{x - x_0} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2} \quad \text{mit } x_0 < x < \infty$$

$f(x)$	Dichtefunktion der LNV
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s
σ_y	Standardabweichung der logarithmierten Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s_y
μ_y	Mittelwert der logarithmierten Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}_y
x	Merkmalswert
x_0	'offset' oder Verschiebungsparameter der LNV

Formel 5-43

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(x) \cdot dx$$

Formel 5-44

Die Formel 5-45 und die Formel 5-46 beinhalten die Möglichkeit der Bestimmung der Lage und Streuung für Datenreihen bei denen nur der empirische Mittelwert sowie die empirische Standardabweichung bekannt sind, und davon ausgegangen werden kann, dass die Merkmalswerte einer LNV entstammen.

$$\mu_y = \ln \left(\frac{\mu^2}{\sqrt{\sigma^2 + \mu^2}} \right)$$

μ_y	Mittelwert der logarithmierten Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}_y
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}

Formel 5-45

$$\sigma_y = \sqrt{\ln \left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)}$$

σ_y	Standardabweichung der logarithmierten Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s_y
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt s
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit; für Stichproben gilt \bar{x}

Formel 5-46

Die Bestimmung der 5 % Quantile der LNV wurde nach den formalen Zusammenhängen der Formel 5-47 , entnommen von Augustin, 2004, durchgeführt.

$$x_{05} = \frac{\tilde{x}}{\lambda_{05}} \quad \text{mit} \quad \tilde{x} = x_0 \pm e^{\bar{x}_y} \quad \text{und} \quad \lambda_{05} = e^{1,645 \cdot s_y}$$

x_{05}	5 % Quantile der LNV
\tilde{x}	Median
s_y	Standardabweichung der logarithmierten Merkmalswerte einer Stichprobe
\bar{x}_y	Mittelwert der logarithmierten Merkmalswerte einer Stichprobe

Formel 5-47

5.5.5.4 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung (WV) ist bekannt als Lebensdauerverteilung und wurde von Weibull, auf Basis von empirischen Beobachtungen, definiert. Sie umfasst wie die LNV einen Wertebereich von $[0, \infty]$ und wird über die Parameter der Lage, der Streuung und der Verschiebung als 'offset' des Modells definiert. Die Dichtefunktion und die Verteilungsfunktion sind der Formel 5-48 und der Formel 5-49 zu entnehmen.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^\beta} \quad \text{mit} \quad x_0 \leq x < \infty \quad \text{und} \quad \alpha, \beta > 0$$

$f(x)$	Dichtefunktion der WV
x	Merkmalswert
α	Parameter der Lage der WV
β	Parameter der Steigung bzw. der Streuung der WV
x_0	'offset' oder Verschiebungsparameter der WV

Formel 5-48

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(x) \cdot dx = 1 - e^{-\left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^\beta}$$

Formel 5-49

Die Bestimmung der Parameter gestaltet sich im Allgemeinen schwierig und ist nur numerisch zu bewerkstelligen. In dieser Arbeit wurde die 'least square method' angewendet, sowohl zur Bestimmung der Kennwerte der 3 parametrischen, als auch der 2

parametrischen WV mit $x_0 = 0$. Die Ermittlung der linearisierten empirischen Daten sowie der WV wurden nach der Formel 5-50 und der Formel 5-51 bewerkstelligt. Die weiteren Schritte zur Bestimmung der Parameter der WV sind der Formel 5-52 und der Formel 5-53 zu entnehmen.

$$x_i = \ln(x_j - x_0)$$

x_0	'offset' oder Verschiebungsparameter der WV
x_i	i -te Merkmalswert x
x_j	i -te Merkmalswert x

Formel 5-50

$$y_i = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - empH_2_j} \right) \right]$$

y_i	i -te Merkmalswert y
y_j	j -te Merkmalswert y
$empH_2_j$	empirische Häufigkeit nach der Formel 5-32 des j -ten Merkmalswert y

Formel 5-51

$$\beta = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad \text{mit} \quad s_{xy} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad \text{und} \quad s_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

β	Regressionsparameter als Parameter der Steigung bzw. der Streuung der WV
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
y_i	i -te Merkmalswert y , nach der Formel 5-51
x_i	i -te Merkmalswert x , nach der Formel 5-50
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte x_i , nach der Formel 5-50
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte y_i , nach der Formel 5-51
s_{xy}	Kovarianz
s_x^2	Varianz der Merkmalswerte x_i , nach der Formel 5-50

Formel 5-52

$$\alpha = e^{-\frac{a}{\beta}} \quad \text{mit} \quad \alpha = \bar{x} - \beta \cdot \bar{y}$$

α	Regressionsparameter als Parameter der Lage der WV
β	Regressionsparameter als Parameter der Steigung bzw. der Streuung der WV
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte x_i , nach der Formel 5-50
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der Merkmalswerte y_i , nach der Formel 5-51

Formel 5-53

Die Bestimmung der 5 % Quantile der WV erfolgte durch Auswertung der Verteilungsfunktion der WV für das Ergebnis $F(x) = 0,05$, und ist in der Formel 5-54 dargestellt.

$$F(x) = 0,05 = 1 - e^{-\left(\frac{x_{05} - x_0}{\alpha}\right)^\beta} \quad \text{mit} \quad x_0 = 0 \rightarrow x_{05} = e^{\frac{1}{\beta} \cdot [\ln(-\ln(0,95)) + \beta \cdot \ln(\alpha)]}$$

x_{05}	5 % Quantile der WV
x_0	'offset' oder Verschiebungsparameter der WV
$F(x)$	Verteilungsfunktion der WV
α	Regressionsparameter als Parameter der Lage der WV
β	Regressionsparameter als Parameter der Steigung bzw. der Streuung der WV

Formel 5-54

5.5.6 Bestimmung eines repräsentativen statistischen Verteilungsmodells unter Betrachtung der besprochenen Varianten

Die statistischen Verteilungsmodelle der NV, 2pLNV, 3pLNV, 2pWV und der 3pWV wurden den empirischen Versuchsdaten, charakterisiert durch die empirische Häufigkeit nach der Formel 5-32, gegenübergestellt. Anhand von qualitativen und quantitativen Merkmalen wurde versucht, das repräsentativste statistische Modell zur Beschreibung der gegebenen Datenreihe, unter den gegebenen Aspekten, zu bestimmen. Dies war vor allem für jene Datenreihen nötig, worin eine Bestimmung der 5 % Quantile nach der empirischen Methode (siehe Formel 5-34 und Formel 5-35), aufgrund der zu geringen Probenumfänge mit $n < 20$, nicht gegeben war.

Zur Beurteilung der Datenreihen wurden diese in QQ-Plots dargestellt. Hierbei wurden die empirischen, linearisierten Daten jenen des auf die empirischen Daten angepassten, linearisierten statistischen Verteilungsmodells gegenübergestellt. Die Linearisierungsfunktionen für die Versuchswerte sind der Tab. 5-8 zu entnehmen.

Zudem wurden die Residuen, als Differenzen der empirischen Häufigkeit zum statistischen Modell errechnet und ebenfalls in Diagrammen visualisiert. Die Residuen-Plots bieten vor allem die Möglichkeit der Erkennung von Trends in der Anpassung des Modells an die Daten, über die gesamte Bandbreite der Datenreihe. Für eine erste Kontrolle der Höhe der Abweichungen sowie des Verlaufes wurde eine lineare Regressionsfunktion beigefügt.

Tab. 5-8: x und y Werte der QQ-Plots in Abhängigkeit der betrachteten statistischen Verteilungsmodelle

	x-Achse	y-Achse
NV	x_i	inverse standardisierte NV von $empH_{2_i}$
2p LNV	$\ln(x_i)$	inverse standardisierte NV von $empH_{2_i}$
3p LNV	$\ln(x_i - x_0)$	inverse standardisierte NV von $empH_{2_i}$
2p WV	$\ln(x_i)$	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - empH_{2_i}}\right)\right]$
3p WV	$\ln(x_i - x_0)$	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - empH_{2_i}}\right)\right]$

Als Beispiel zur Darstellung und Erklärung dienen die folgenden Plots, Diagramm 5-4 bis Diagramm 5-13, der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160. Das Diagramm 5-3 stellt die Summenhäufigkeiten der betrachteten Modelle dar und beinhaltet einen Vergleich der Mediane und 5 % Quantilwerte aller betrachteten Modelle.

Anhand dieser QQ-Plots sowie der Residuen-Plots wurde visuell die Anpassung der Datenreihen durch das statistische Modell beurteilt. Zur verbesserten praktischen Handhabung wurden die QQ-Plots mit transformierten Summenhäufigkeitswerten sowie einer transformierten Skala der Merkmalswerte ergänzt. Zudem wurde bei der Auswertung der Festigkeiten der Bereich um die 5 % Quantile (Abschnitt der Summenhäufigkeit im Intervall [0 %, 10 %]) einer weiteren visuellen Beurteilung unterzogen. Quantitativ wurde die Anpassung anhand der aufsummierten Absolutwerte der Residuen beurteilt.

Summenhäufigkeiten zugrundegelegter stat. Verteilungsmodelle

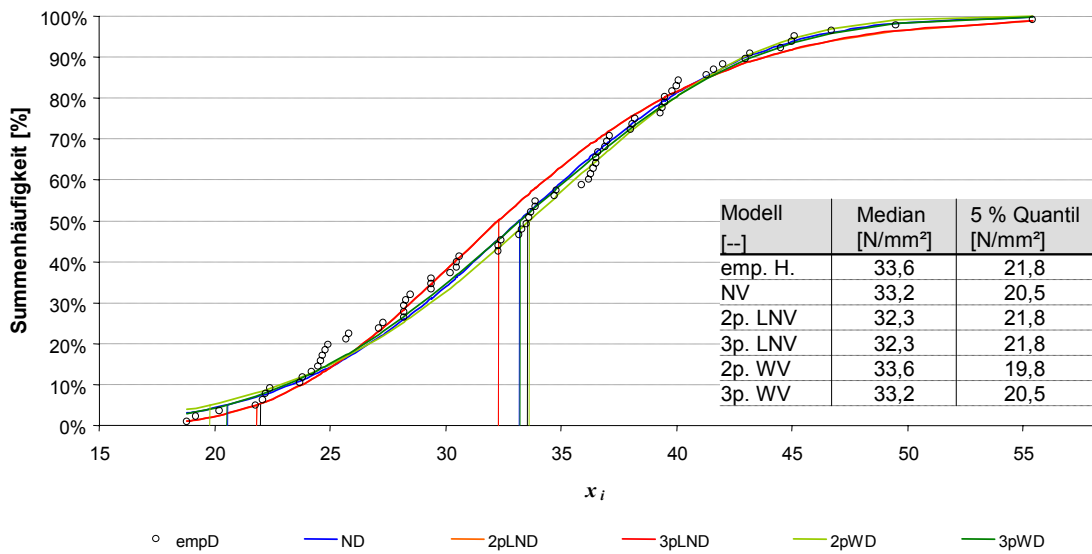


Diagramm 5-3: Darstellung der Summenhäufigkeits-Funktionen zugrunde gelegter statistischer Verteilungsmodelle, im Vergleich mit den empirischen Summenhäufigkeiten, ermittelt nach der Formel 5-32, sowie ein Vergleich der Mediane und 5 % Quantile, Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

QQ-Plot Normalverteilung

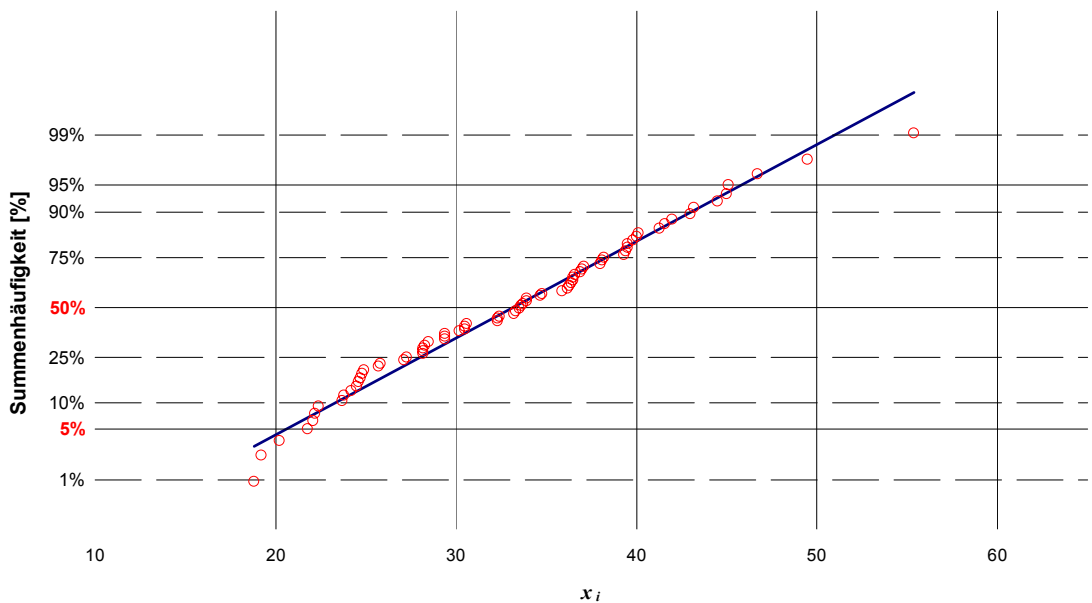


Diagramm 5-4: QQ-Plot - Normalverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Residuen bei Zugrundelegung einer Normalverteilung

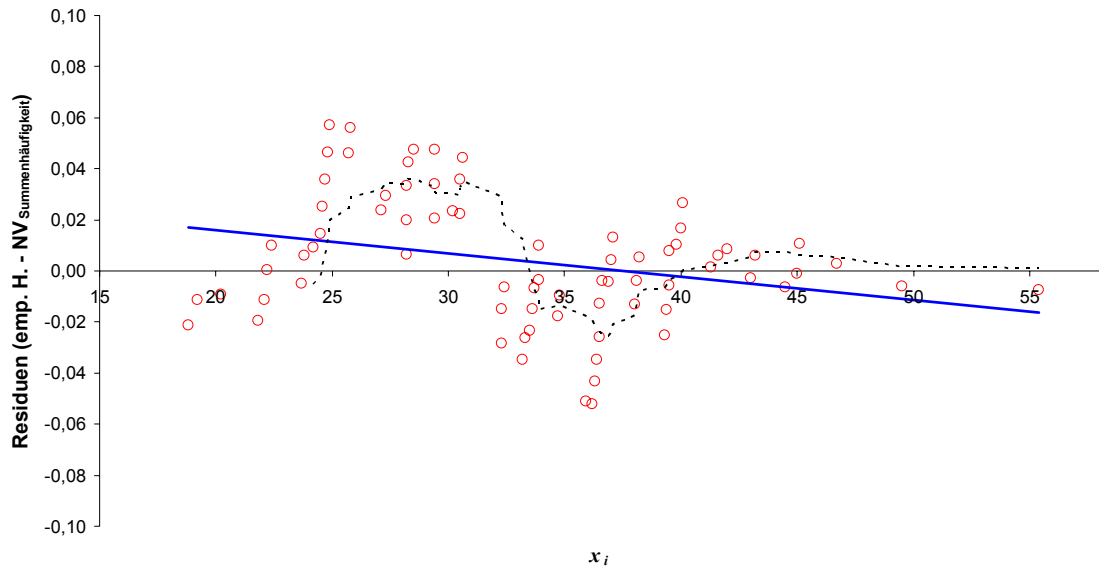


Diagramm 5-5: Residuen - Normalverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

QQ-Plot 2p. log. Normalverteilung

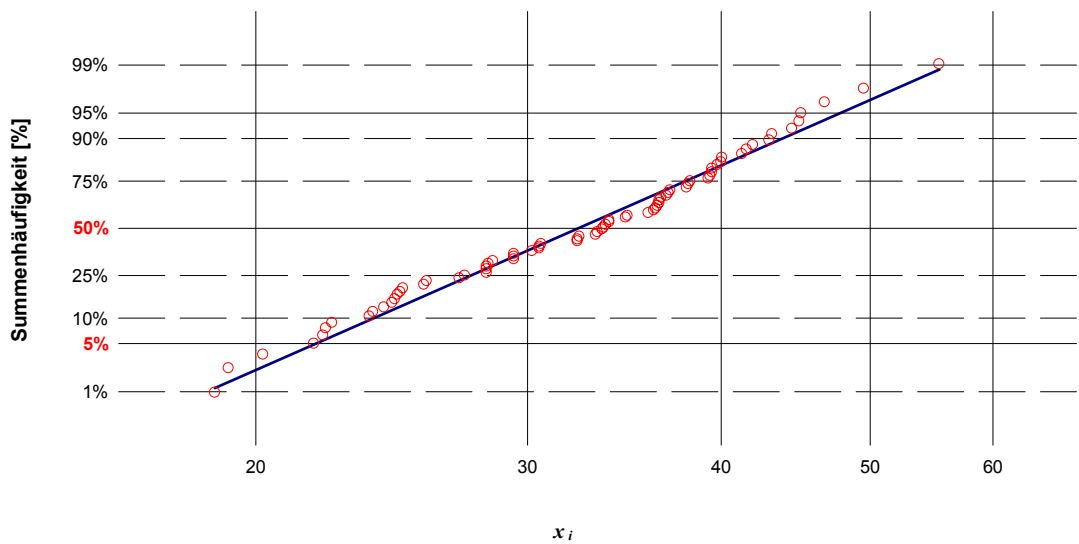


Diagramm 5-6: QQ-Plot - 2 p. log. Normalverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Residuen bei Zugrundelegung einer 2p. log. Normalverteilung

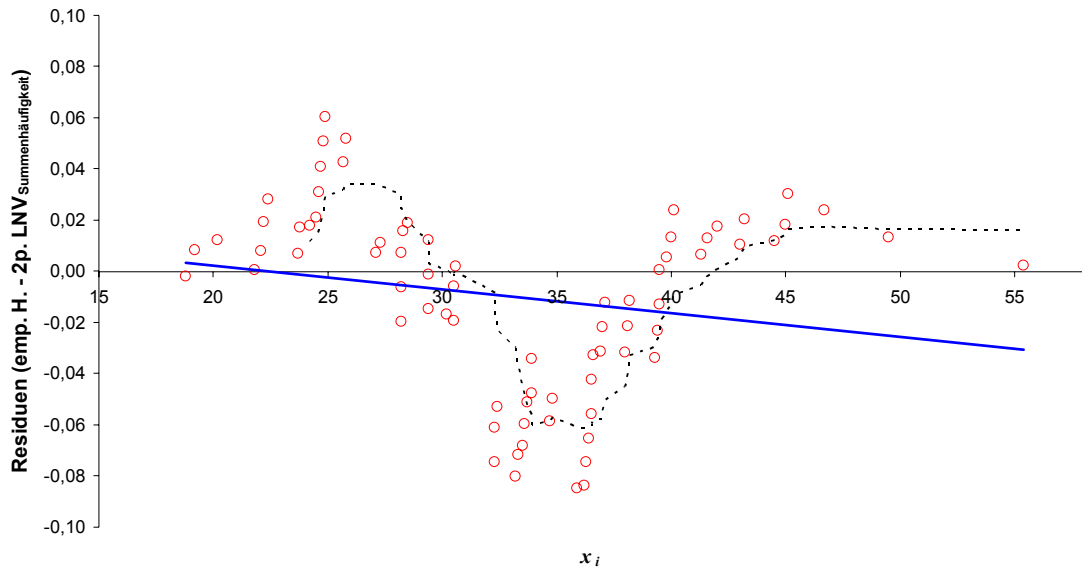


Diagramm 5-7: Residuen - 2 p. log. Normalverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

QQ-Plot 3p. log. Normalverteilung

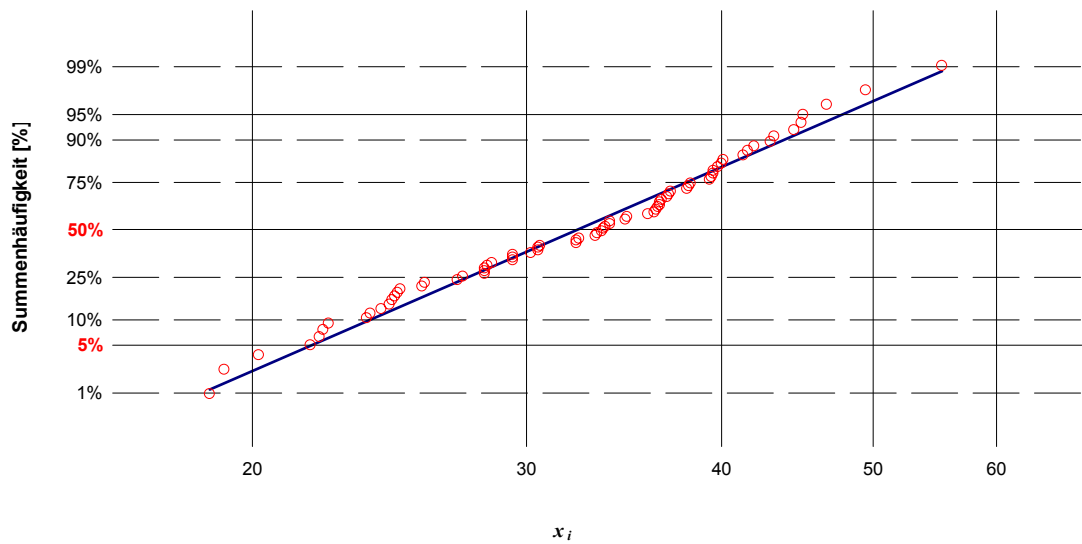


Diagramm 5-8: QQ-Plot - 3 p. log. Normalverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Residuen bei Zugrundelegung einer 3p. log. Normalverteilung

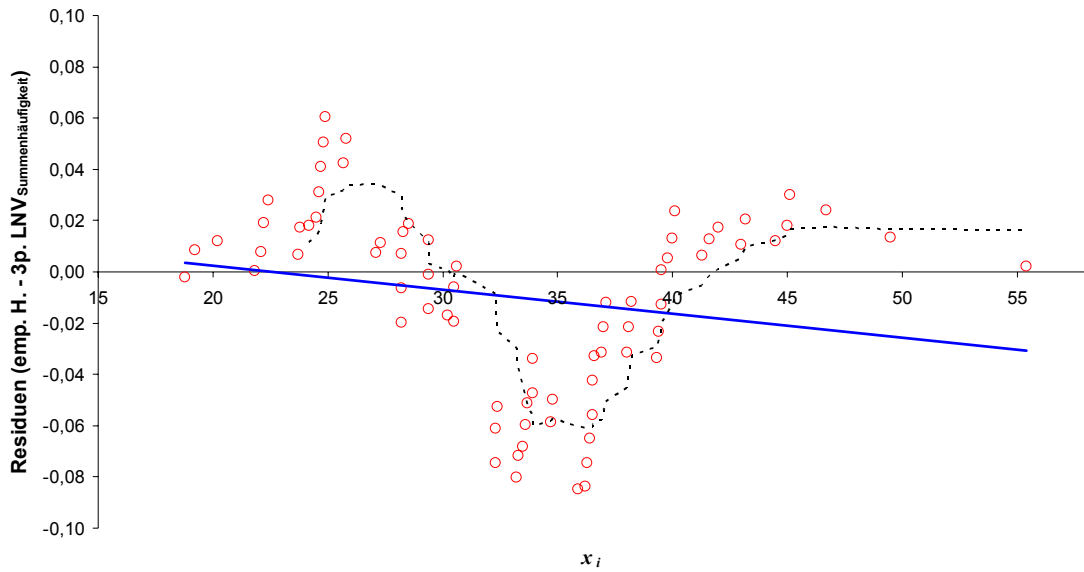


Diagramm 5-9: Residuen - 3 p. log. Normalverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

QQ-Plot 2p. Weibullverteilung

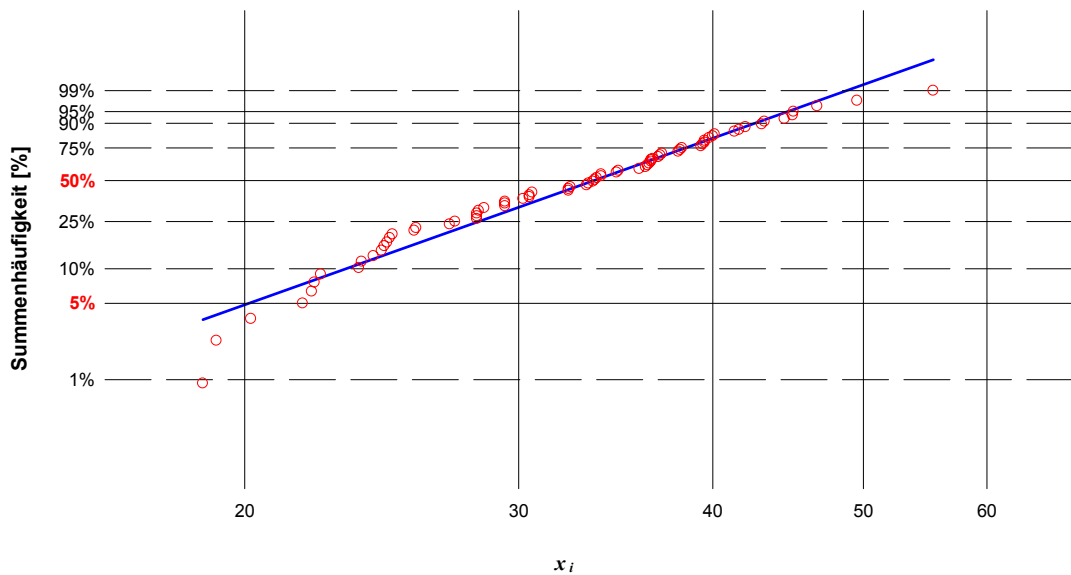


Diagramm 5-10: QQ-Plot - 2 p. Weibullverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

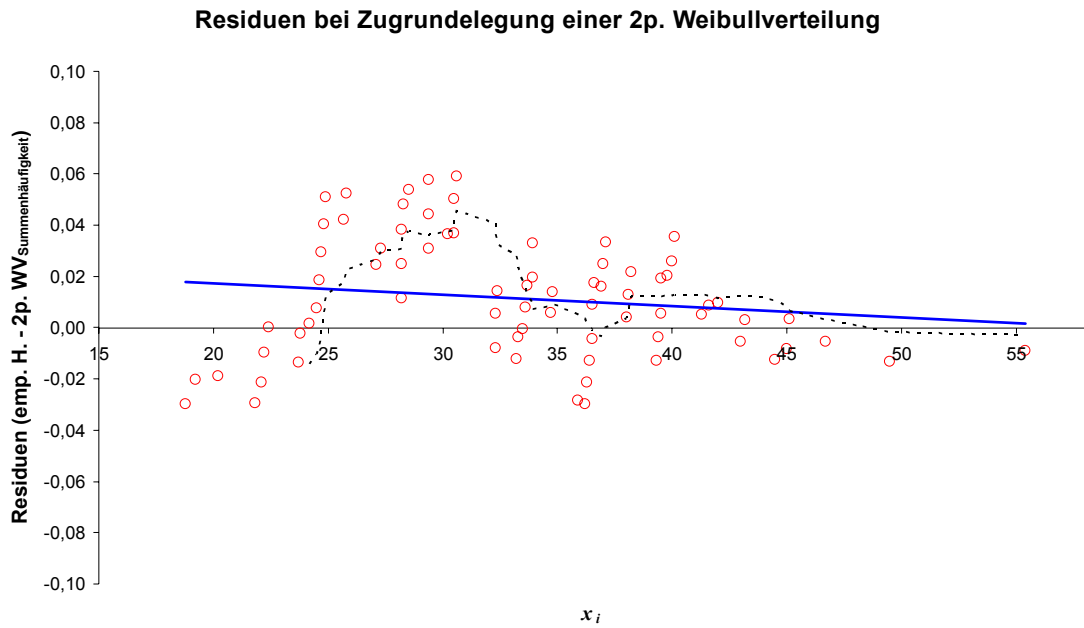


Diagramm 5-11: Residuen - 2 p. Weibullverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

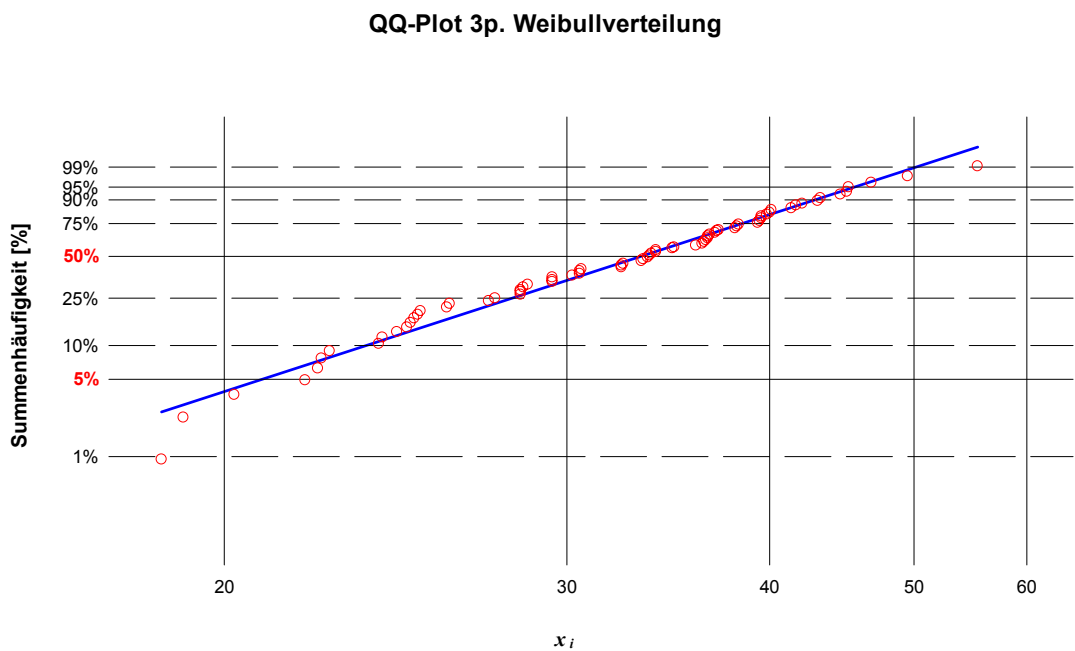


Diagramm 5-12: QQ-Plot - 3 p. Weibullverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

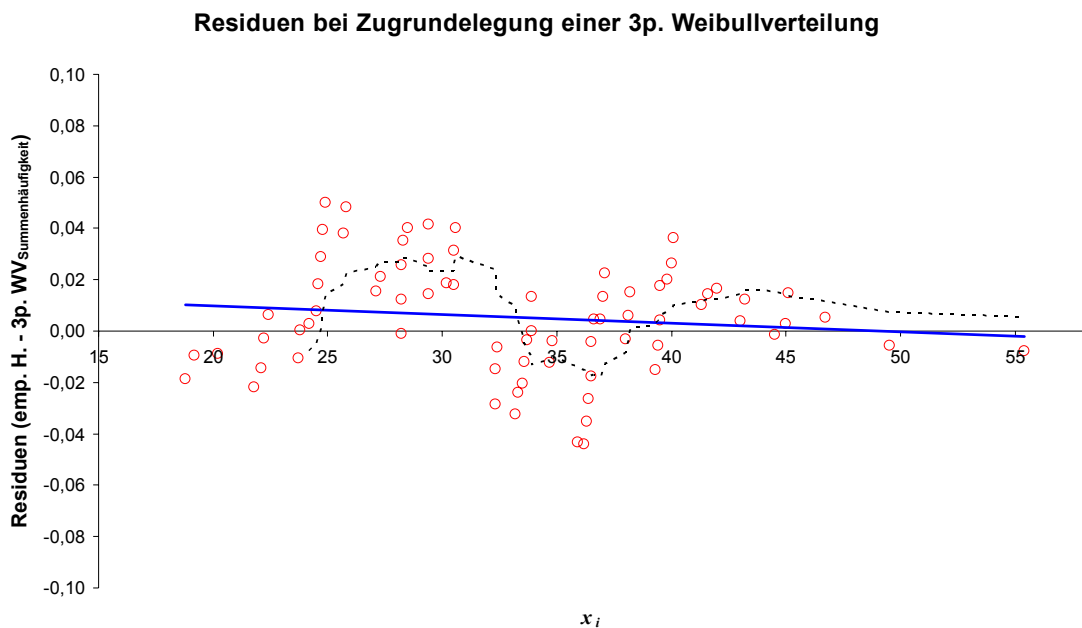


Diagramm 5-13: Residuen - 3 p. Weibullverteilung der Biegefestigkeiten der Serie B_1_xx, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Wie man Diagramm 5-4 bis Diagramm 5-13 entnehmen kann, wurde durch den dritten Parameter der LNV keine Verbesserung in der Anpassung an die empirischen Daten erreicht. Vor allem bilden die Residuen-Plots deutlich einen wellenartigen Verlauf der Differenzen zwischen den empirischen Daten und dem statistischen Modell ab, welches durch die eingefügte gestrichelte Trendlinie als gleitender Durchschnitt verdeutlicht wird. Ein solcher Verlauf deutet im Allgemeinen auf die Gegenüberstellung mit einem unpassenden theoretischen Modell hin. Der Residuen Plot der 3pWV weist in dieser Hinsicht die geringste Bandbreite im Wellenverlauf auf. Die lineare Trendlinie bildet als erste Beurteilungshilfe den Verlauf der Anpassung ab. Ist ein deutlicher Anstieg (positiv oder negativ) im Verlauf der Residuen erkennbar, deutet dies entweder auf einen Rechenfehler hin, oder auf eine in diesem Falle ungenügende Anpassung der Versuchsdaten durch das statistische Modell. Hier erweist sich der Vorteil des dritten Parameters der WV als positiv. Durch den zusätzlichen Kennwert der Verteilung wurde in Summe die beste Anpassung an den betrachteten Datensatz, unter den gegebenen Aspekten, erreicht.

5.5.7 Bestimmung charakteristischer Kennwerte nach der ON EN 384:2004, sowie der prEN 14358:2004

Nach der ON DIN 4074-1:2004 entsprechen die hier untersuchten Sortierklassen S10 sowie MS17 den Festigkeitsklassen C24 sowie C40 nach der ON EN 338:2003. Es gelten nach der ON EN 338:2003 der Mittelwert der Steifigkeit, sowie die charakteristischen Werte der Festigkeit und der Rohdichte als Kennzahlen zur Zuteilung eines Probenkollektives zu einer Festigkeitsklasse. Die entsprechenden, geforderten Kennwerte der Klassen C24 und C40 sind in der Tab. 5-9 dargestellt und der ON EN 338:2003 exzerpiert.

Tab. 5-9: Anforderungen an die Festigkeitsklassen C24 und C40 hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und Rohdichte, exzerpiert aus der Tab. 1 der ON EN 338:2003

	C24	C40
$f_{m,k}$ [N/mm ²]	24	40
$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	14	24
$E_{0,mean}$ [N/mm ²]	11000	14000
ρ_k [kg/m ³]	350	420

Der Berechnungsmodus, zur Bestimmung der Kennwerte für Vollholz, ist der ON EN 384:2004 zu entnehmen.

5.5.7.1 Berechnung der Kennwerte nach der ON EN 384:2004

Die ON EN 384:2004 fordert eine Mindestanzahl des Probenumfangs von $n \geq 40$. Die Bestimmung der empirischen 5 % Quantile der Festigkeit und der Rohdichte erfolgt nach dem Zählwertverfahren: Nach Reihung der Prüfwerte der Größe nach entspricht jener Prüfwert dem Rang $n / 20$ zugewiesenem Rang als 5 % Quantile. Ist dies jedoch kein ganzzahliger Rang darf zwischen den beiden benachbarten Rängen interpoliert werden.

Des Weiteren sind die Kennwerte der Steifigkeit und Rohdichte auf die Referenz-Holzfeuchte von $u = 12 \%$ zu korrigieren. Dies wurde bereits in Kapitel 5.4.5 erläutert.

Die charakteristische Festigkeit f_k ist nach der Formel 5-55 zu berechnen, wobei die 5 % Quantile im Vorfeld um den Größenfaktor nach der Formel 5-56 anzupassen ist. Der k_s Faktor berücksichtigt die statistische Unsicherheit im Schluss von Ergebnissen aus Stichproben auf die Grundgesamtheit und ist als Abminderungsfaktor im Sinne einer unteren Grenze eines Konfidenzintervalls der Abb. 5-51, in Abhängigkeit der Probenanzahl n , zu entnehmen. Der k_v Faktor berücksichtigt die postulierte geringere Streuung der 5 % Quantilwerte der Festigkeit bei maschineller Sortierung. Es gilt für maschinell sortiertes Holz mit einer Biegefestigkeit $f_{m,k} > 30 \text{ N/mm}^2$ sowie visuell sortiertem Vollholz ein $k_v = 1,0$. Für maschinell sortiertes Holz mit $f_{m,k} \leq 30 \text{ N/mm}^2$ gilt $k_v = 1,2$.

Die Aussagekraft von nach der ON EN 384:2004 bestimmten charakteristischen Festigkeitswerten wird hier nicht kommentiert.

$$f_k = f_{05} \cdot k_s \cdot k_v$$

f_k	charakteristische Wert der Festigkeit, nach der ON EN 384:2004
f_{05}	5 % Quantile der Festigkeit, nach der ON EN 384:2004
k_s	Faktor zur Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit bei Stichproben gegenüber der Grundgesamtheit, nach der ON EN 384:2004
k_v	Faktor zur Berücksichtigung der Methode der Sortierung (visuell - maschinell), nach der ON EN 384:2004

Formel 5-55

$$k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}$$

k_h	Größenfaktor zur Korrektur der Breite (bei Zug) bzw. der Höhe (bei Biegung) auf die Referenzabmessung von 150 mm [--]
h	Breite (Zug) bzw. Höhe (Biegung) des Probekörpers [mm]

Formel 5-56

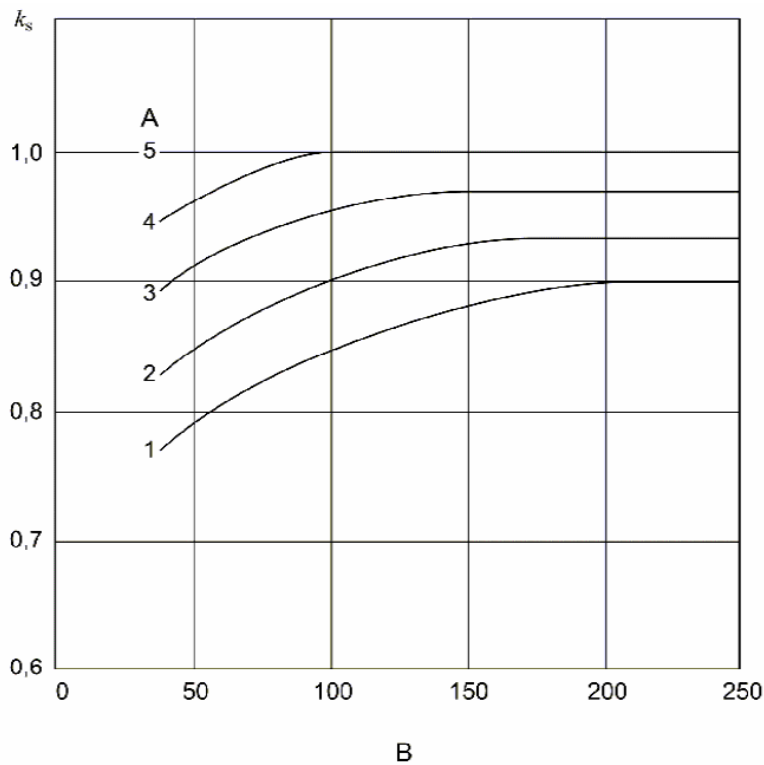


Abb. 5-51: k_s -Faktor zur Berücksichtigung der Probenanzahl mit A - Anzahl der Serien, B - Anzahl der Proben in der kleinsten Serie; nach der Abb. 1 der ON EN 384:2004

Die Bestimmung des Mittelwertes der Steifigkeit entspricht der allgemein üblichen Berechnung des arithmetischen Mittelwerts. Handelt es sich bei den Steifigkeitswerten aus den Versuchen um globale Biege-E-Module sind diese hinsichtlich des Schubanteiles zu korrigieren und nach der Formel 5-57 zu kalkulieren.

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \cdot 1,3 - 2690$$

\bar{E}	Mittelwert des globalen Biege-E-Moduls nach der ON EN 384:2004
E_i	i -ter Merkmalswert des globalen Biege-E-Moduls aus Versuchen des Probenumfangs n
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$

Formel 5-57

Die charakteristische Rohdichte ist nach der ON EN 384:2004 gleichbedeutend mit dem 5 % Quantil, und wird unter der Annahme von normalverteilten Merkmalswerten nach der Formel 5-58 berechnet.

$$\rho_k = \rho_{05} = \bar{\rho} - 1,65 \cdot s$$

ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte, nach der ON EN 384:2004
ρ_{05}	5 % Quantil der Rohdichte, nach der ON EN 384:2004
$\bar{\rho}$	arithmetischer Mittelwert der Rohdichte
s	Standardabweichung der Rohdichte

Formel 5-58

5.5.7.2 Berechnung der Kennwerte nach der prEN 14358:2004

Die prEN 14358 ist von der Konzeption nicht für die Auswertung von Kennwerten des Vollholzes gedacht, enthält jedoch ein anzustrebendes Verfahren in der Behandlung von Stichproben, vor allem mit einem Probenumfang von $n < 40$.

Die Brechung der charakteristischen Werte bzw. der unteren Grenze des Konfidenzintervalls von 5 % Quantilwerten der Festigkeit, basiert auf der Annahme von logarithmisch normalverteilten Merkmalswerten. Zudem gilt für das Konfidenzintervall $\alpha = 75$ %. Das Verfahren ist im Wesentlichen angelehnt an die ISO 12491:1997 und in der Formel 5-59 bis zur Formel 5-61 kurz dargestellt.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(m_i)$$

\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der logarithmierten Merkmalswerte m_i
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
m_i	i -te Merkmalswert m

Formel 5-59

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \bar{y})^2}$$

s_y	Standardabweichung einer Stichprobe, unter der Annahme einer LNV
n	Anzahl der Werte mit $i = 1 \dots n$
m_i	i -te Merkmalswert m
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der logarithmierten Merkmalswerte m_i

Formel 5-60

$$m_k = e^{(\bar{y} - k_s \cdot s_y)} \quad \text{mit} \quad k_s = \frac{k}{\sqrt{n}} \quad \text{mit} \quad k = p(nct)_{\alpha, n, \lambda} \quad \text{und} \quad \lambda = u_{1-p} \cdot \sqrt{n}, \quad \text{für} \quad COV \geq 5 \%$$

m_k	charakteristischer Wert, nach der prEN 14358:2004
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der logarithmierten Merkmalswerte m_i
s_y	Standardabweichung einer Stichprobe, unter der Annahme einer <i>LNV</i>
k_s	Faktor zur Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit bei Stichproben gegenüber der Grundgesamtheit, nach der prEN 14358:2004
$k, p(nct)_{\alpha, n, \lambda}$	α Quantil der nicht zentralen <i>t</i> -Verteilung (<i>nct</i>), mit <i>n</i> Freiheitsgraden und dem Parameter der Nichtzentralität λ , nach der prEN 14358:2004
λ	Nichtzentralitätsparameter der nicht zentralen <i>t</i> -Verteilung (<i>nct</i>)
u_{1-p}	(1 - <i>p</i>) Quantil der standardisierten <i>NV</i>
<i>COV</i>	Variationskoeffizient als Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert, nach der Berechnung unter Annahme der Normalverteilung

Formel 5-61

6 ERGEBNISSE DER ZUG- UND BIEGE-PRÜFUNGEN

Die folgenden Unterkapitel beinhalten in tabellarischer Form wesentliche statistische Kennwerte physikalischer und mechanischer Versuchsergebnisse und errechneten Daten der einzelnen Versuchsreihen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Kennwerte des dyn. E-Moduls, der Rohdichte, Holzfeuchte, mittlere Jahrringbreite und Stammlage der Systeme aus den gemittelten Einzelwerten der jeweiligen Komponenten ermittelt wurden.

Zudem beinhalten die folgenden Auflistungen auch bereits die 5 % Quantile der Festigkeiten der einzelnen Serien, in Abhängigkeit der zugrunde gelegten statistischen Verteilungsmodelle. Anhand dieser ersten Daten wurde weiters die Relativwerte k_{sys} und k_{rel} , als Bezug zwischen der 5 % Quantile der Systeme zu jener der Einzelkomponenten, berechnet.

Die Berechnung der charakteristischen Kennwerte, zur Überprüfung und Zuteilung der Festigkeitsklasse der einzelnen Serien nach der ON EN 338:2003, ist in jeder Versuchsreihe am Ende angefügt und bietet somit die Basis für erste Erkenntnisse über die Materialqualität.

6.1 Untersuchungsergebnisse der ersten Reihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160

Das Ziel in der Durchführung dieser beiden Untersuchungsreihen lag in der ersten Abschätzung des Systempotentials bei aus KVH[®] aufgebauten Querschnitten. Um weitgehend gesicherte Aussagen über das innewohnende mechanische Potential tätigen zu können, wurden die Versuchsumfänge relativ großzügig bemessen. Vor allem den Referenzserien Z_1_xx und B_1_xx wurde eine entsprechende Anzahl an Probekörpern zuerkannt um den für den Relativbezug in der Ermittlung des k_{sys} entscheidende 5 % Quantile, hinsichtlich der statistischen Unsicherheit, etwas zu begrenzen.

Die Untersuchungsreihe ZUG_60-78 wurde aus mittig aufgetrennten KVH[®] Querschnitten aufgebaut. Dies erfolgte, aufgrund der Begrenzung der Einspannungsmöglichkeiten in der Zugprüfeinrichtung. Aufgrund der Auftrennung und der vorgehenden Sortierung

auf Basis der gesamten Stangenbreite wurde eine Nachsortierung durchgeführt. Die Astkriterien sowie der Druckholzanteil wurden nach der ON DIN 4074:2004, nach den Grenzwerten für die Sortierklasse S10, überprüft.

Alle Stangen, welche nicht den Kriterien entsprachen, wurden aussortiert und sind somit nicht in der Auswertung enthalten.

6.1.1 Daten aus den Zugversuchen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

Die Tab. 6-1 gibt einen Überblick über die aus der Auswertung herausgenommenen Probekörper, der einzelnen Serien. Zudem ist der Ausschlussgrund enthalten.

Tab. 6-1: Auflistung jener Probekörper der einzelnen Serien, welche nicht in der Auswertung inkludiert wurden, sowie der Grund der Ausscheidung

Serie	Proben Nr.	Grund der Ausscheidung des Probekörpers aus der Auswertung
[--]	[--]	[--]
Z_1_xx	3, 4, 8, 12, 17, 20, 21, 22, 24, 25, 28, 33, 34, 35, 37, 46, 48, 49, 51, 52, 55, 57, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 72, 76, 80	in Betracht gezogene Sortierkriterien der ON DIN 4074-1:2004 für die Sortierklasse \geq S10 nicht erfüllt
Z_2_xx	3, 6, 9, 10, 18, 27, 32, 38, 49, 50	in Betracht gezogene Sortierkriterien der ON DIN 4074-1:2004 für die Sortierklasse \geq S10 nicht erfüllt
Z_4_xx	7, 8, 23, 24, 35	in Betracht gezogene Sortierkriterien der ON DIN 4074-1:2004 für die Sortierklasse \geq S10 nicht erfüllt

Die Tab. 6-2 bis Tab. 6-7 beinhalten statistische Kennwerte der Prüfserien Z_1_xx, Z_2_xx und Z_4_xx.

Tab. 6-2: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_1_xx

Serie Z_1_xx, $l / b / h = 5502 / 77,4 / 59,5$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	46 #	46 #	46 #	46 #
Min	62	9,5	1,1	18
Max	166	13,3	4,1	79
MW	106	11,6	2,5	51
Median	105	11,6	2,5	51
Stand. Abw.	28	0,7	0,7	10
COV [%]	26,3 %	5,8 %	28,9 %	18,4 %

Tab. 6-3: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_1_xx

Serie Z_1_xx, $l / b / h = 5502 / 77,4 / 59,5$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	46 #	46 #	46 #	45 #	46 #	46 #	46 #
Min	11 %	369	370	12780	9070	8980	13,4
Max	13 %	528	527	19850	15620	15700	36,1
MW	12 %	460	460	16030	11960	11900	23,0
Median	12 %	459	460	15860	11980	11960	22,6
Stand. Abw.	1 %	30	30	1460	1330	1380	6,2
COV [%]	4,8 %	6,6 %	6,4 %	9,1 %	11,1 %	11,6 %	26,8 %

Tab. 6-4: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_2_xx

Serie Z_2_xx, $l / b / h = 5502 / 151,0 / 55,8$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	41 #	41 #	41 #	41 #
Min	126	19,2	1,4	40
Max	305	23,0	4,5	71
MW	207	21,0	2,7	53
Median	212	20,7	2,6	53
Stand. Abw.	37	1,0	0,6	8
COV [%]	17,7 %	4,5 %	23,4 %	14,0 %

Tab. 6-5: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_2_xx

Serie Z_2_xx , $l / b / h = 5502 / 151,0 / 55,8$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	41 #	41 #	41 #	40 #	41 #	41 #	41 #
Min	10 %	414	416	13450	10050	9980	14,9
Max	13 %	497	498	17920	13870	13730	36,3
MW	12 %	452	453	15480	11790	11750	24,6
Median	12 %	449	20	15350	11690	11570	25,3
Stand. Abw.	0 %	20	20	1050	990	990	4,4
COV [%]	4,0 %	4,5 %	4,5 %	6,8 %	8,4 %	8,4 %	17,7 %

Tab. 6-6: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_4_xx

Serie Z_4_xx , $l / b / h = 5502 / 306,6 / 55,6$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	30 #	29 #	30 #	30 #
Min	356	40,6	1,6	48
Max	612	45,9	3,5	65
MW	481	42,9	2,4	55
Median	486	42,7	2,3	54
Stand. Abw.	70	1,5	0,5	4
COV [%]	14,5 %	3,5 %	20,1 %	7,5 %

Tab. 6-7: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_4_xx

Serie Z_4_xx , $l / b / h = 5502 / 306,6 / 55,6$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	30 #	29 #	29 #	30 #	29 #	29 #	30 #
Min	12 %	433	432	14270	10850	11030	20,8
Max	13 %	489	489	17070	14380	14480	35,8
MW	12 %	458	457	15790	12300	12380	28,3
Median	12 %	455	453	15730	12330	12260	28,4
Stand. Abw.	0 %	16,5	16	840	900	910	4,1
COV [%]	2,4 %	3,6 %	3,6 %	5,3 %	7,3 %	7,3 %	14,6 %

Die Werte der berechneten physikalischen und mechanischen Kennwerte sowie deren Streuungen der Referenzserie Z_1_xx liegen im üblichen Bereich. Deutlich zu erkennen sind die reduzierten Streuungen der Kennwerte der Systeme gegenüber jenen der Referenzserie. Dies zeigt sich in dem Diagramm 6-1 anhand der Daten der Zugfestigkeit einerseits in der verringerten Standardabweichung, sowie dem degressiven Funktionsverlauf der relativen Streuung (*COV*). Folglich ergaben die Versuche einen tendenziellen Anstieg der Mittelwerte der Festigkeit und Steifigkeit. Die Funktionswerte der Systemaufbauten aus 3 Einzelkomponenten sind in den Verlauf der Versuchsdaten interpoliert.

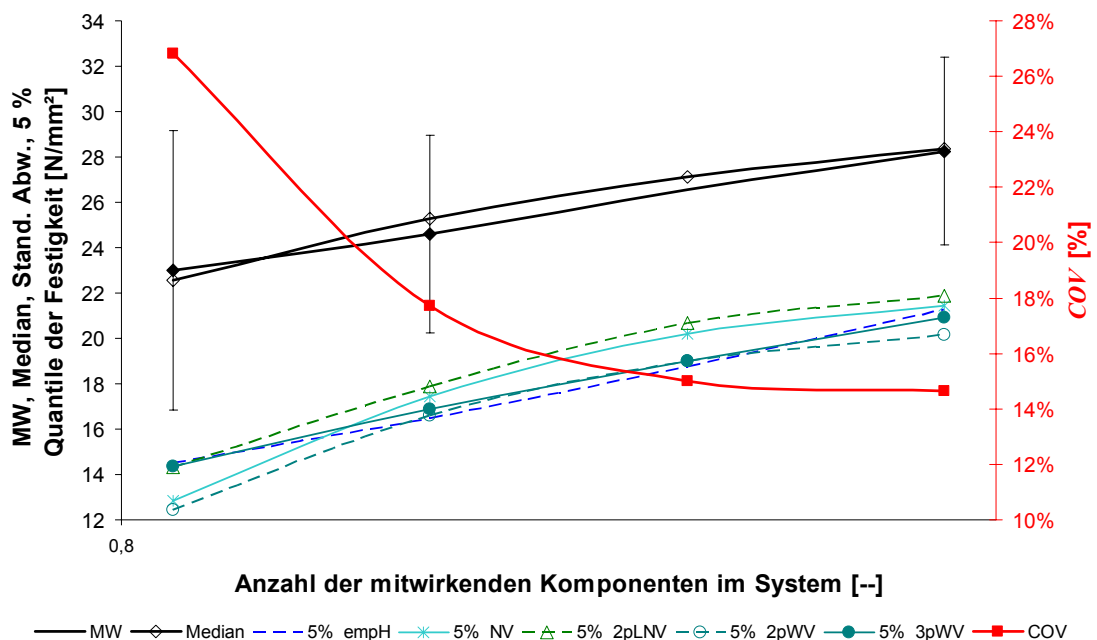


Diagramm 6-1: Darstellung von Kennwerten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System; Untersuchungsreihe ZUG_60-78

Das Zusammenwirken der verringerten Streuung und des erhöhten Mittelwertes der Festigkeiten der Systeme gegenüber den Einzelkomponenten führt zu einer Erhöhung der 5 % Quantile. Die Tab. 6-8 beinhaltet die errechneten Quantile, unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle. Zudem wurden die gewonnenen Kennwerte der Systeme zu jenen der Einzelkomponenten relativiert, der k_{sys} errechnet.

Die Ergebnisse spiegeln deutlich das gesteigerte mechanische Potential der Systeme wieder. Die k_{sys} -Faktoren, auf Basis der untersuchten statistischen Modelle, sind im Diagramm 6-2 dargestellt.

Tab. 6-8: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Systemfaktoren der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

ZUG_60-78		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	Z_1_xx	14,5	12,9	14,3	14,3	12,4	14,4
	Z_2_xx	16,5	17,4	17,9	17,9	16,6	16,9
	Z_4_xx	21,3	21,5	21,9	21,9	20,2	20,9
k_{sys} ²⁾ [--]	Z_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Z_2_xx	1,14	1,35	1,25	1,25	1,34	1,17
	Z_4_xx	1,47	1,67	1,53	1,53	1,63	1,45

1) die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhanges nach Formel 5-32 berechnet.

2) die angegebenen Systemfaktoren k_{sys} sind Verhältniswerte der 5 % Quantile der jeweiligen betrachteten Verteilungsfunktion und Serie zu jenem der Referenzserie Z_1_xx, und werden nach der Formel 5-16 berechnet. Die hervorgehobenen Quantilwerte sowie Faktoren entsprechen den Werten der nach der statistischen Betrachtung von unterschiedlichen Modellen am bestens angepassten Kennwerten.

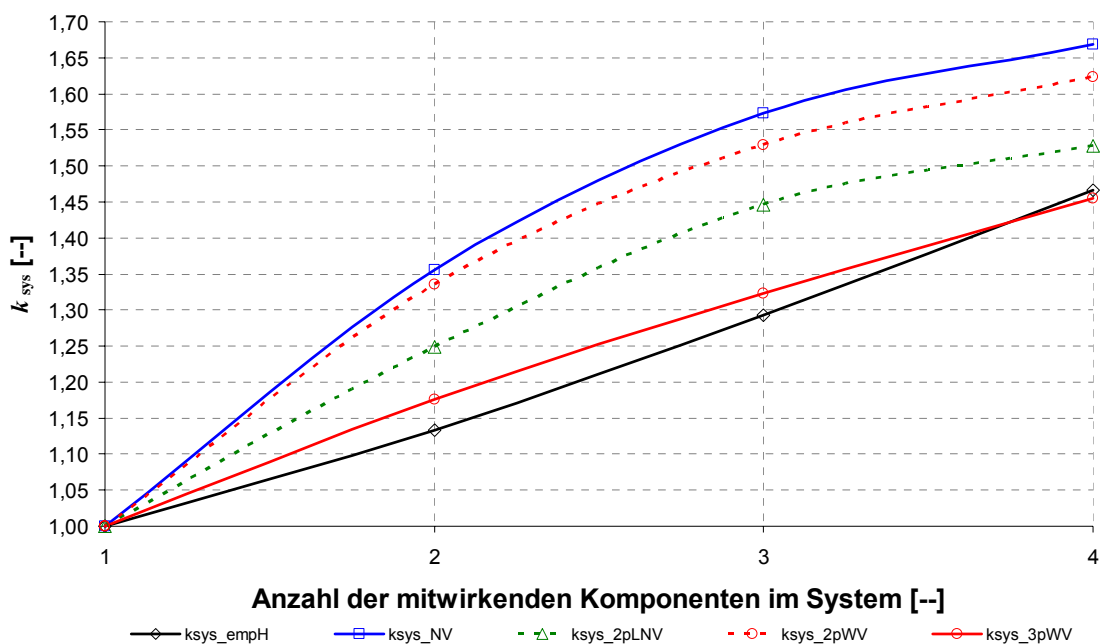


Diagramm 6-2: Darstellung der k_{sys} -Faktoren, auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der Untersuchungsreihe ZUG_60-78 und unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Die Tab. 6-9 enthält die charakteristischen Kennwerte der Serien dieser Untersuchungsreihe. Die Einzelkomponenten der Referenzserie Z_1_xx erreichen somit die Anforderungen der ON EN 338:2003 hinsichtlich der Festigkeitsklasse C24 nicht. Die mittlere Steifigkeit sowie die charakteristische Rohdichte überragen die Anforderungen. Die charakteristische Festigkeit, unter Berücksichtigung des Größenfaktors und der Probenanzahl, erfüllt die Mindestwerte mit rund 10 N/mm² gegenüber 14 N/mm² bei

weitem nicht. Es ist zwar aus Untersuchungen am Institut für Holzbau und Holztechnologie an der Technischen Universität Graz bekannt, dass die Zugfestigkeitswerte der Klasse C24, auf Basis der Sortierklasse S10 oder MS10 nicht im vollem Umfang erreichbar sind, eine so große Differenz, trotz Nachsortierung und Sortierklasse \geq S10, überrascht.

Tab. 6-9: charakteristische Kennwerte der Serien der Reihe ZUG_60-78 zur Zuteilung in eine Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003

ZUG_60-78	Z_1_xx	Z_2_xx	Z_4_xx
$f_{t,0,05}^{1)}$ [N/mm ²]	14,5	16,5	21,3
$k_s^{2)}$ [-]	0,79	0,78	--
$k_h^{2)}$ [-]	1,14 (bezogen auf die Einzelkomponente)		
$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	10,1²⁾ 12,0 ³⁾	12,4²⁾ 15,2 ³⁾	-- ²⁾ 18,6 ³⁾
$E_{t,0,mean}^{2)}$ [N/mm ²]	11900	11750	12380
$\rho_k^{4)}$ [kg/m ³]	412	420	430

- 1) 5 % Quantile nach der empirischen Häufigkeit für Extremwerte
- 2) Faktoren und Berechnung nach der ON EN 384:2004
- 3) charakteristischer Wert nach der prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach der ON EN 384:2004, als Vergleichswert zur ON EN 384:2004
- 4) charakteristischer Wert als 5 % Quantile nach der Normalverteilung, nach der ON EN 384:2004

6.1.2 Daten aus den Biegeversuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Die Tab. 6-10 gibt einen Überblick über die aus der Auswertung herausgenommenen Probekörper, der einzelnen Serien der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160. Weiters ist der Grund der Ausscheidung angeführt.

Tab. 6-10: Auflistung jener Probekörper der einzelnen Serien, welche nicht in der Auswertung inkludiert wurden, sowie der Grund der Ausscheidung

Serie [--]	Proben Nr. [--]	Grund der Ausscheidung des Probekörpers aus der Auswertung [--]
B_1_xx	18, 21, 23, 41, 44, 47	in Betracht gezogene Sortierkriterien der ON DIN 4074-1:2004 für die Sortierklasse \geq S10 nicht erfüllt
B_2_xx	34	in Betracht gezogene Sortierkriterien der ON DIN 4074-1:2004 für die Sortierklasse \geq S10 nicht erfüllt
B_4_xx	3, 13, 17, 27, 31, 33	in Betracht gezogene Sortierkriterien der ON DIN 4074-1:2004 für die Sortierklasse \geq S10 nicht erfüllt

Tab. 6-11 bis Tab. 6-16 stellen die Versuchsergebnisse der Serien B_1_xx, B_2_xx und B_4_xx dar.

Tab. 6-11: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_1_xx

Serie B_1_xx , $l / b / h = 3200 / 80,3 / 159,8$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	74 #	74 #	73 #	74 #
Min	13	16,0	0,9	15
Max	39	22,6	6,2	102
MW	24	18,7	3,4	46
Median	24	18,7	3,2	46
Stand. Abw.	5	1,6	1,3	13
COV [%]	22,8 %	8,3 %	39,3 %	28,7 %

Tab. 6-12: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_1_xx

Serie B_1_xx, $l / b / h = 3200 / 80,3 / 159,8$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,1}$ [N/mm ²]	$E_{m,1,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	u [%]
Anzahl	74 #	74 #	74 #	74 #	72 #	72 #	74 #
Min	15 %	392	381	10840	4960	5410	18,8
Max	21 %	555	535	16410	16940	19340	55,4
MW	18 %	454	442	13940	10420	11560	33,2
Median	17 %	453	441	14130	9880	11050	33,6
Stand. Abw.	1 %	39	38	1300	2520	2800	7,7
COV [%]	7,9 %	8,5 %	8,6 %	9,3 %	24,1 %	24,2 %	23,2 %

Tab. 6-13: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_2_xx

Serie B_2_xx, $l / b / h = 3200 / 150,0 / 155,7$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	49 #	49 #	49 #	49 %
Min	33	30,6	1,6	21
Max	73	38,9	5,0	61
MW	51	34,7	3,0	44
Median	50	34,3	2,9	44
Stand. Abw.	9	1,9	1,0	8
COV [%]	17,0 %	5,6 %	32,3 %	18,5 %

Tab. 6-14: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_2_xx

Serie B_2_xx, $l / b / h = 3200 / 150,0 / 155,7$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,1}$ [N/mm ²]	$E_{m,1,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	u [%]
Anzahl	49 #	49 #	49 #	49 #	49 #	49 #	49 #
Min	13 %	410	404	12210	7190	7550	25,2
Max	17 %	518	510	17050	16730	17520	55,8
MW	15 %	463	457	15230	12560	13290	38,8
Median	15 %	460	454	15320	12900	13610	38,4
Stand. Abw.	1 %	26	25	1020	2150	2260	6,6
COV [%]	6,9 %	5,5 %	5,6 %	6,7 %	17,1 %	17,0 %	16,9 %

Tab. 6-15: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_4_xx

Serie B_4_xx, $l / b / h = 3200 / 306,3 / 154,6$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	29 #	29 #	29 #	29 #
Min	81	61,6	2,0	32
Max	124	77,0	4,4	59
MW	97	68,1	3,3	43
Median	97	67,8	3,4	43
Stand. Abw.	11	3,6	0,8	6
COV [%]	11,4 %	5,4 %	23,3 %	13,0 %

Tab. 6-16: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_4_xx

Serie B_4_xx, $l / b / h = 3200 / 306,3 / 154,6$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,1}$ [N/mm ²]	$E_{m,1,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]	u [%]
Anzahl	29 #	29 #	29 #	29 #	29 #	29 #	29 #
Min	12 %	406	405	12970	8820	8950	30,7
Max	16 %	511	504	16030	14490	15450	47,2
MW	14 %	449	444	14690	11480	12070	37,1
Median	15 %	451	445	14680	11490	12080	37,0
Stand. Abw.	1 %	25	23	650	1390	1620	4,3
COV [%]	7,4 %	5,5 %	5,2 %	4,4 %	12,1 %	13,4 %	11,5 %

Die Ergebnisse der Serien der Reihe BIEGUNG_80-160 spiegeln die Tendenzen der Reihe ZUG_60-78 wieder. Allgemein nehmen die Streuungen der Kennwerte mit zunehmender Anzahl der Komponenten im System ab.

Diagramm 6-3 beinhaltet Darstellungen von statistischen Kennwerten der Festigkeit, in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten in einem System. Die Funktionswerte der Systemaufbauten aus 3 Einzelkomponenten sind in den Verlauf der Versuchsdaten interpoliert.

Der augenscheinlich hohe Wert der Holzfeuchte der Serie B_1_xx mit $u = 18$ % gegenüber der Serien B_2_xx und B_4_xx mit rund 14 bis 15 % ist auf die längere Akklimati-

onszeit, bedingt durch zusätzliche Transporte und der Verklebung als weiterer 'offline' Bearbeitungsschritt zurückzuführen. Im Vergleich mit der zeitgleich behandelten Reihe ZUG_60-78 ist hier die deutlich reduzierte Abtrocknung und Akklimatisierung, bedingt durch den größeren Einzelquerschnitt, nachvollziehbar. Tab. 6-17 beinhaltet die errechneten 5 % Quantile und k_{sys} -Werte (Darstellung in Diagramm 6-4), in Abhängigkeit der zugrunde gelegten statistischen Modelle.

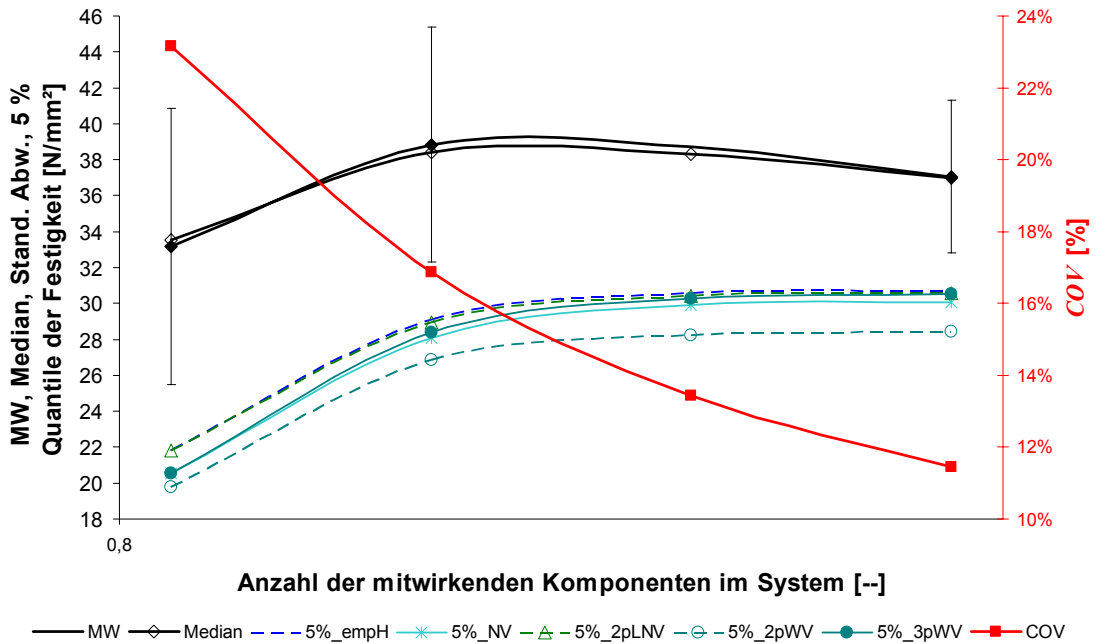


Diagramm 6-3: Darstellung von Kennwerten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System; Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Tab. 6-17: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Systemfaktoren der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

BIEGUNG_80-160		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{m,05}$ [N/mm²]	B_1_xx	21,8	20,6	21,8	21,8	19,8	20,5
	B_2_xx	29,1	28,1	29,0	29,0	26,9	28,4
	B_4_xx	30,7	30,1	30,6	30,6	28,4	30,5
k_{sys} ²⁾ [--]	B_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	B_2_xx	1,33	1,36	1,33	1,33	1,36	1,39
	B_4_xx	1,41	1,46	1,40	1,40	1,43	1,49

1) die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhangs nach Formel 5-32 berechnet.

2) die angegebenen Systemfaktoren k_{sys} sind Verhältniswerte der 5 % Quantile der jeweiligen betrachteten Verteilungsfunktion und Serie zu jenem der Referenzserie B_1_xx, und werden nach der Formel 5-16 berechnet. Die hervorgehobenen Quantilwerte sowie Faktoren entsprechen den Werten der nach der statistischen Betrachtung von unterschiedlichen Modellen am bestens angepassten Kennwerten.

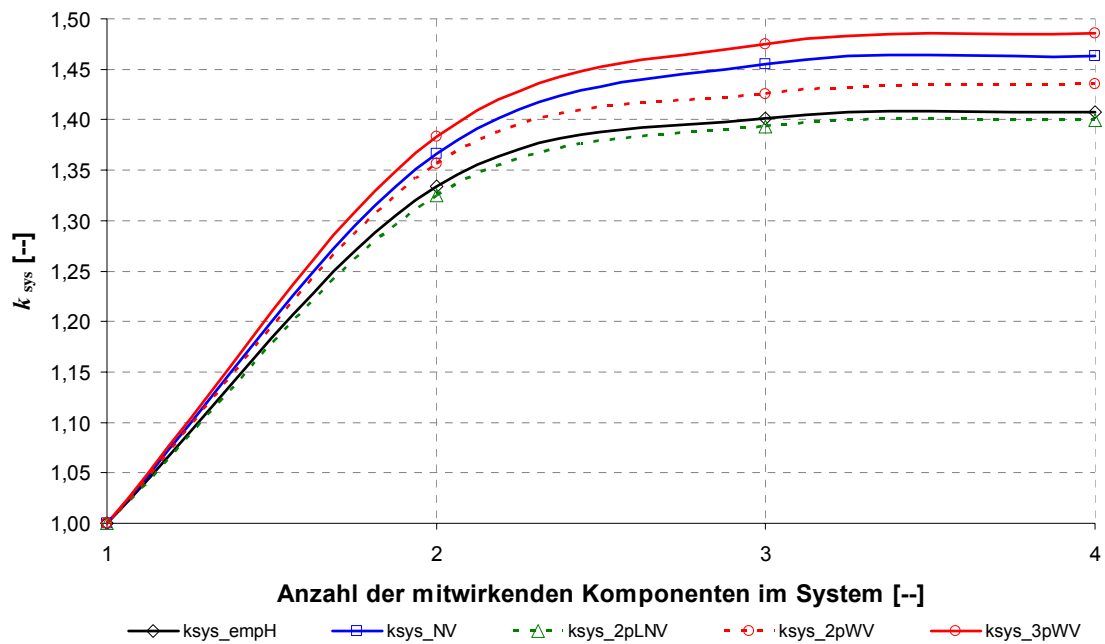


Diagramm 6-4: Darstellung der k_{sys} -Faktoren, auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160 und unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Die charakteristischen Kennwerte der Serien B_1_xx bis B_4_xx sind der Tab. 6-18 zu entnehmen. Die Berechnungen bilden die Basis für die Zuteilung der Einzelkomponenten zu einer Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003. Unter Betrachtung des mechanischen Potentials der Referenzserie B_1_xx ist augenscheinlich, dass die Mindestwerte der Anforderungen an die Festigkeitsklasse C24, nach der ON EN 338:2003, nicht voll erfüllt werden. Die mittlere Steifigkeit und die Rohdichte erreichen die Vorgaben. Wie bei der Untersuchungsreihe ZUG_60-78 ist die charakteristische Biegefestigkeit der limitierende Faktor.

Da weder die Zugfestigkeitswerte noch die Biegefestigkeitswerte die Vorgaben der ON EN 338:2003 für die Festigkeitsklasse C24 erfüllen, und das Material hinsichtlich der Sortierkriterien der Astigkeit und Reaktionsholzanteiles nach der ON DIN 4074-1:2004 im Labor nachuntersucht wurden, ist davon auszugehen, dass das Material dieser Fertigungschargen nicht C24 entspricht, und somit Aussagen über die Sortierklasse S10 nicht getätigt werden können.

Tab. 6-18: charakteristische Kennwerte der Serien der Reihe BIEGUNG_80-160 zur Zuteilung in eine Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003

BIEGUNG_80-160	B_1_xx	B_2_xx	B_4_xx
$f_{m,05}^{1)}$ [N/mm ²]	21,8	29,1	30,7
$k_s^{2)}$ [--]	0,82	0,79	--
$k_h^{2)}$ [--]	0,987 (bezogen auf die Einzelkomponente)		
$f_{m,k}$ [N/mm ²]	18,3²⁾ 21,5 ³⁾	23,6²⁾ 28,5 ³⁾	-- ²⁾ 30,2 ³⁾
$E_{m,l,mean}^{2)}$ [N/mm ²]	11560	13290	12070
$\rho_k^{4)}$ [kg/m ³]	380	415	406

1) 5 % Quantile nach der empirischen Häufigkeit für Extremwerte

2) Faktoren und Berechnung nach der ON EN 384:2004

3) charakteristischer Wert nach der prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach der ON EN 384:2004, als Vergleichswert zur ON EN 384:2004

4) charakteristischer Wert als 5 % Quantile nach der Normalverteilung, nach der ON EN 384:2004

6.2 Ergebnisse der Zugversuche von nach der Ultraschallgeschwindigkeit vorsortierten BSH-Lamellen der Reihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78

Folgende Unterkapitel beinhalten die Daten der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78. Hierbei lag das Augenmerk auf der versuchstechnischen Ermittlung von Systempotentialen unterschiedlicher Komponentenanzahl von mittig aufgetrennten BSH-Lamellen, wobei die Komponenten im Vorfeld, innerhalb eines Systems, über Bestimmung der Ultraschalllaufzeitgeschwindigkeit, respektive dyn. E-Modul, vorsortiert wurden. Die Probekörper einer Serie wurden jedoch innerhalb des Spektrums der Ultraschalllaufzeitgeschwindigkeiten gleichverteilt. Auf diese Weise versuchte man den Parameter E-Modul, als eine Haupteinflussgröße auf das Systemverhalten, weitgehend zu eliminieren. Zudem wurde, durch die Untersuchung der Grenzfälle der losen Verbindung und der starren Verbindung unter den Komponenten, der Versuch unternommen, einerseits diese Bereiche näher abzugrenzen, aber vor allem über das Bruchverhalten innerhalb der Systeme zusätzliche Informationen zu lukrieren. Um das Bruchverhalten weitgehend, und im Rahmen der einfachen versuchstechnischen Möglichkeiten, zu dokumentieren, wurde Wert auf eine einfache und klare Darstellung als Aufzeichnungshilfe während der Versuchsdurchführung Wert gelegt (siehe Abb. 6-1).

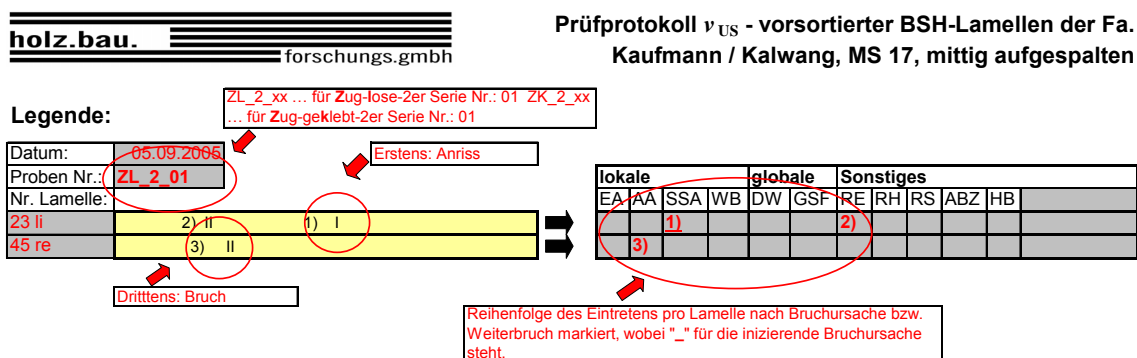


Abb. 6-1: Ausschnitt aus dem Prüfprotokoll zur Erfassung der Daten während der Versuchsdurchführung der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, ergänzt um wesentliche Erklärungen

6.2.1 Daten der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

Die Tab. 6-19 beinhaltet eine Auflistung von Probekörpern, welche nicht in der Auswertung berücksichtigt werden konnten.

Tab. 6-19: Auflistung jener Probekörper der einzelnen Serien, welche nicht in der Auswertung inkludiert wurden, sowie der Grund der Ausscheidung

Serie	Proben Nr.	Grund der Ausscheidung des Probekörpers aus der Auswertung
[--]	[--]	[--]
ZL_1_xx	1, 13, 20	Bruch unter der Klemmeinrichtung
	24, 28	Probekörper gerutscht, keine Enddaten verfügbar
ZL_2_xx	11	Probekörper gerutscht, keine Enddaten verfügbar
ZL_3_xx	8	Datenwandler ausgefallen, keine Enddaten verfügbar
ZL_4_xx	5, 7	Probekörper gerutscht, keine Enddaten verfügbar

Die Versuchsergebnisse der Reihe ZUG_ZL_40-78, aufgebaut aus lose verbundenen BSH-Lamellen, sind den Tab. 6-20 bis Tab. 6-27 zu entnehmen.

Tab. 6-20: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_1_xx

Serie ZL_1_xx, $l / b / h = 3985 / 78,1 / 39,9$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	21 #	28 #	26 #	26 #
Min	60	5,2	0,8	54
Max	197	7,3	2,8	141
MW	129	6,2	1,6	96
Median	125	6,1	1,7	96
Stand. Abw.	38	0,5	0,5	21
COV [%]	29,7 %	7,5 %	30,6 %	21,5 %

Tab. 6-21: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_1_xx

Serie ZL_1_xx, $l / b / h = 3985 / 78,1 / 39,9$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	26 #	24 #	24 #	24 #	21 #	21 #	21 #
Min	11 %	432	435	15110	12660	12350	19,2
Max	12 %	577	577	23440	20480	19910	63,0
MW	11 %	497	499	18840	16280	16030	41,4
Median	11 %	485	486	18610	16360	16280	40,0
Stand. Abw.	0 %	44	44	2380	2260	2240	12,6
COV [%]	3,8 %	8,8 %	8,8 %	12,7 %	13,9 %	14,0 %	30,3 %

Tab. 6-22: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_2_xx

Serie ZL_2_xx, $l / b / h = 3995 / 156,0 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	10 #	11 #	11 #	11 #
Min	146	11,1	1,2	81
Max	262	12,7	2,2	117
MW	200	12,0	1,7	97
Median	201	12,2	1,7	95
Stand. Abw.	39	0,5	0,3	12
COV [%]	19,4 %	3,9 %	15,2 %	11,9 %

Tab. 6-23: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_2_xx

Serie ZL_2_xx, $l / b / h = 3995 / 156,0 / 40,1$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	10 #	11 #	10 #	10 #	10 #	9 #	10 #
Min	11 %	443	444	16770	14560	14200	23,3
Max	12 %	503	506	20030	17730	17590	41,9
MW	11 %	480	481	18290	15850	15610	32,0
Median	11 %	487	488	17850	15780	15760	32,1
Stand. Abw.	0 %	19	20	1260	1040	1120	6,2
COV [%]	4,0 %	4,0 %	4,2 %	6,9 %	6,6 %	7,2 %	19,5 %

Tab. 6-24: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_3_xx

Serie ZL_3_xx, $l / b / h = 3982 / 234,0 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	7 #	8 #	8 #	8 #
Min	261	17,2	1,3	73
Max	398	19,5	2,4	90
MW	341	18,3	1,8	83
Median	365	18,4	1,8	83
Stand. Abw.	58	0,8	0,3	6
COV [%]	17,1 %	4,3 %	18,2 %	6,8 %

Tab. 6-25: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_3_xx

Serie ZL_3_xx, $l / b / h = 3982 / 234,0 / 40,1$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	7 #	8 #	7 #	7 #	7 #	6 #	7 #
Min	11 %	462	462	17280	14470	14220	27,8
Max	12 %	525	528	20360	17390	17030	42,3
MW	11 %	489	490	18340	15400	15280	36,3
Median	11 %	492	490	17660	15140	15120	38,8
Stand. Abw.	0 %	23	25	1160	1000	990	6,2
COV [%]	4,1 %	4,6 %	5,0 %	6,3 %	6,5 %	6,5 %	17,0 %

Tab. 6-26: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_4_xx

Serie ZL_4_xx, $l / b / h = 4012 / 312,0 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	5 #	7 #	5 %	5 #
Min	391	23,0	1,3	85
Max	468	26,8	2,5	109
MW	429	24,5	1,8	96
Median	413	24,0	1,8	91
Stand. Abw.	34	1,4	0,5	12
COV [%]	7,9 %	5,5 %	26,1 %	12,2 %

Tab. 6-27: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Serie ZL_4_xx

Serie ZL_4_xx, $l / b / h = 4012 / 312,0 / 40,1$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	6 #	7 #	6 #	6 #	5 #	4 #	5 #
Min	11 %	460	460	16860	14560	14310	31,2
Max	12 %	533	536	21480	16640	16660	37,3
MW	11 %	487	491	18360	15430	15290	34,3
Median	11 %	477	489	17720	15260	15100	33,0
Stand. Abw.	0 %	26	29	1680	800	1000	2,7
COV [%]	4,3 %	5,4 %	5,9 %	9,1 %	5,2 %	6,5 %	7,8 %

Trotz der sehr geringen Versuchsumfänge in den einzelnen Serien sind die Tendenzen der Homogenisierung, des Ausgleiches, erkennbar (siehe Diagramm 6-5).

Die Streuungen der E-Module reflektieren übliche Werte, was nicht überrascht, da die Sortierung nach der Steifigkeit der Komponenten innerhalb der Systeme vorgenommen wurde. Insgesamt wurden die Probekörper einer Serie über das gesamte Spektrum der Ultraschallgeschwindigkeit gleichverteilt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

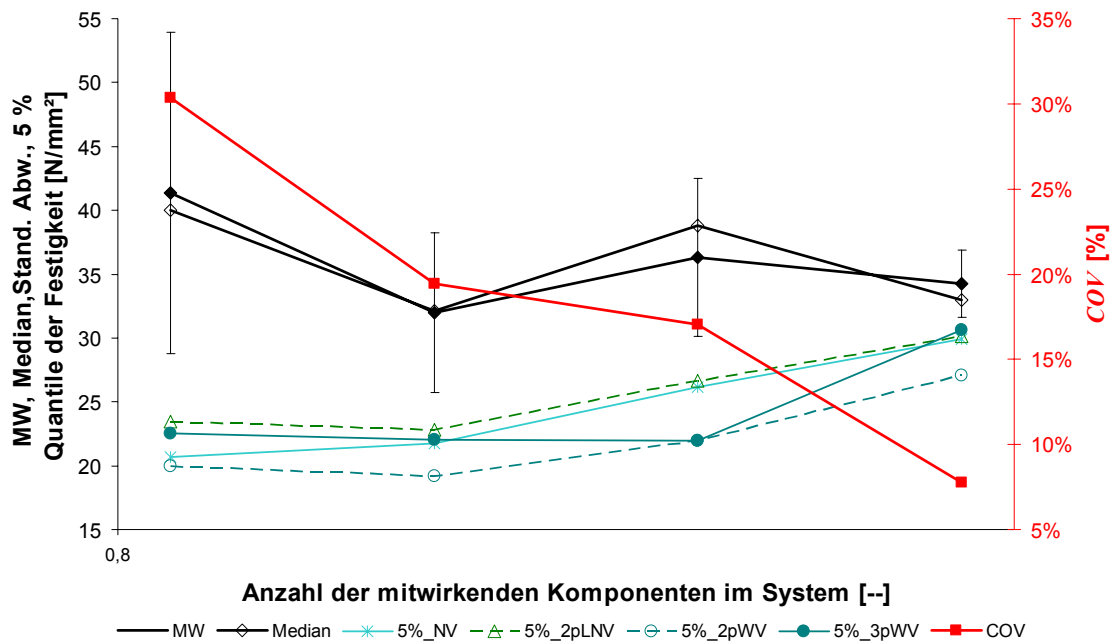


Diagramm 6-5: Darstellung von Kennwerten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System; Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

Des Weiteren sei, gegenüber der Reihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160, auf die erhöhte Rohdichte, die Stammlage (markferner Einschnitt), die verringerte Jahrringbreite, sowie die allgemein erhöhten mechanischen Kennwerte der Festigkeit und Steifigkeit hingewiesen. Dies ist auf die Sortierklasse MS17, nach der ON DIN 4074-1:2004, respektive der Festigkeitsklasse C40, nach der ON EN 338:2003, zurückzuführen. Die mittige Auftrennung der Bretter scheint keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte zu bewirken. Die versagensindizierenden Merkmale werden, aufgrund ihres geringeren Umfangs und Größe, im Vergleich zur Sortierklasse S10, trotz Halbierung der Bezugsbreite nur eingeschränkt ausschlaggebend und führen somit nicht zu einem starken 'down-grading' der Sortierklasse.

Die Tab. 6-28 beinhaltet wiederum die berechneten 5 % Quantile der Festigkeiten, unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Modelle, sowie die Relativwerte als k_{sys} . Das Diagramm 6-6 stellt die Systembeiwerte k_{sys} , in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten im System dar.

Tab. 6-28: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Systemfaktoren der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

ZUG_ZL_40-78		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	ZL_1_xx	21,5	20,7	23,5	23,5	20,0	22,5
	ZL_2_xx	--	21,8	22,8	22,8	19,2	22,0
	ZL_3_xx	--	26,1	26,7	26,7	22,0	22,0
	ZL_4_xx	--	29,9	30,1	30,1	27,1	30,7
k_{sys} ²⁾ [--]	ZL_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	ZL_2_xx	--	1,05	0,97	0,97	0,96	0,98
	ZL_3_xx	--	1,26	1,14	1,14	1,10	0,98
	ZL_4_xx	--	1,44	1,28	1,28	1,36	1,36

1) die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhanges nach Formel 5-32 berechnet.

2) die angegebenen Systemfaktoren k_{sys} sind Verhältniswerte der 5 % Quantile der jeweiligen betrachteten Verteilungsfunktion und Serie zu jenem der Referenzserie ZL_1_xx, und werden nach der Formel 5-16 berechnet. Die hervorgehobenen Quantilwerte sowie Faktoren entsprechen den Werten der nach der statistischen Betrachtung von unterschiedlichen Modellen am bestens angepassten Kennwerten.

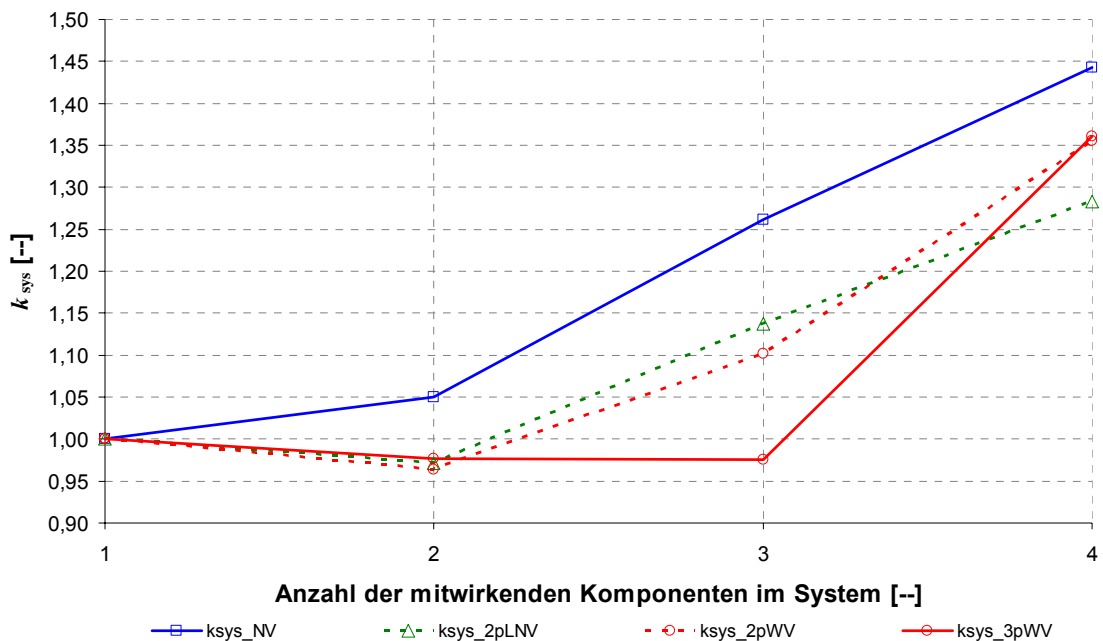


Diagramm 6-6: Darstellung der k_{sys} -Faktoren, auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78 und unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Die Kennwerte der Serien der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78 sind in der Tab. 6-29 dargestellt. Die Vorgaben der ON EN 338:2003 für die Erreichung der Festigkeitsklasse C40 wurden, hinsichtlich der Steifigkeit und der Rohdichte erfüllt; die Festigkeit

erreicht den geforderten Wert von 24 N/mm² bei weitem nicht. Eine Zuteilung dieser Probekörper zur Festigkeitsklasse C40 kann somit nicht vorgenommen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch die mittige Auftrennung der BSH-Lamellen die Festigkeit um diese Differenz verringert wurde.

Tab. 6-29: charakteristische Kennwerte der Serien der Reihe ZUG_ZL_40-78 zur Zuteilung in eine Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003

ZUG_ZL_40-78		ZL_1_xx	ZL_2_xx	ZL_3_xx	ZL_4_xx
$f_{t,0,05}^{1)}$	[N/mm ²]	21,5	--	--	--
$k_s^{2)}$	[--]	--	--	--	--
$k_h^{2)}$	[--]	1,14 (bezogen auf die Einzelkomponente)			
$f_{t,0,k}$	[N/mm ²]	-- ²⁾ 18,9 ³⁾	-- ²⁾ 18,3 ³⁾	-- ²⁾ 21,2 ³⁾	-- ²⁾ 25,0 ³⁾
$E_{t,0,mean}^{2)}$	[N/mm ²]	16030	15610	15280	15290
$\rho_k^{4)}$	[kg/m ³]	427	448	449	443

1) 5 % Quantile nach der empirischen Häufigkeit für Extremwerte

2) Faktoren und Berechnung nach der ON EN 384:2004

3) charakteristischer Wert nach der prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach der ON EN 384:2004, als Vergleichswert zur ON EN 384:2004

4) charakteristischer Wert als 5 % Quantile nach der Normalverteilung, nach der ON EN 384:2004

6.2.2 Daten der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78

Die Tab. 6-30 beinhaltet eine Auflistung von Probekörpern, welche nicht in der Auswertung berücksichtigt werden konnten.

Tab. 6-30: Auflistung jener Probekörper der einzelnen Serien, welche nicht in der Auswertung inkludiert wurden, sowie der Grund der Ausscheidung

Serie	Proben Nr.	Grund der Ausscheidung des Probekörpers aus der Auswertung
[--]	[--]	[--]
ZK_1_xx	15 (Festigkeitswert)	als Ausreißer deklariert
	1	Bruch unter der Einspannung
ZK_2_xx	11	Probekörper gerutscht, keine Enddaten verfügbar
ZK_3_xx	6	Datenwandler ausgefallen, keine Enddaten verfügbar
ZK_4_xx	4	Datenwandler ausgefallen, keine Enddaten verfügbar

Tab. 6-31: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_1_xx

Serie ZK_1_xx, $l / b / h = 3998 / 78,1 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	27 #	27 #	27 #	27 #
Min	47	5,2	1,1	64
Max	225	7,1	2,6	148
MW	134	6,0	1,6	91
Median	127	6,1	1,6	86
Stand. Abw.	43	0,5	0,4	24
COV [%]	32,2 %	7,7 %	23,4 %	26,1 %

Tab. 6-32: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_1_xx

Serie ZK_1_xx, $l / b / h = 3985 / 78,1 / 39,9$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	27 #	27 #	27 #	27 #	27 #	27 #	26 #
Min	11 %	410	411	13830	12110	11830	14,9
Max	12 %	565	566	19140	18950	18630	64,8
MW	11 %	480	482	16220	15410	15210	41,8
Median	11 %	484	485	16360	15450	15370	39,5
Stand. Abw.	0 %	35	35	1220	1860	1860	12,9
COV [%]	2,9 %	7,4 %	7,3 %	7,5 %	12,1 %	12,2 %	30,7 %

Tab. 6-33: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_2_xx

Serie ZK_2_xx, $l / b / h = 3992 / 156,0 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	9 #	11 #	11 #	11 #
Min	187	11,5	1,5	65
Max	346	13,4	2,0	120
MW	282	12,4	1,7	98
Median	288	12,4	1,7	100
Stand. Abw.	50	0,6	0,2	20
COV [%]	17,7 %	5,0 %	11,3 %	20,3 %

Tab. 6-34: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_2_xx

Serie ZK_2_xx, $l / b / h = 3992 / 156,0 / 40,1$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	11 #	11 #	11 #	11 #	9 #	9 #	9 #
Min	11 %	455	457	15940	13980	13780	29,9
Max	12 %	532	534	18640	17330	17120	55,3
MW	11 %	494	496	17300	15950	15760	44,9
Median	11 %	495	496	17310	15960	15770	46,0
Stand. Abw.	0 %	25	25	890	1180	1160	7,9
COV [%]	1,5 %	5,1 %	5,1 %	5,1 %	7,4 %	7,4 %	17,7 %

Tab. 6-35: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_3_xx

Serie ZK_3_xx, $l / b / h = 4010 / 234,0 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	7 #	8 #	8 #	8 #
Min	294	17,6	1,5	81
Max	624	19,7	2,1	106
MW	452	18,5	1,8	92
Median	442	18,5	1,8	90
Stand. Abw.	125	0,7	0,2	10
COV [%]	27,6 %	4,0 %	12,6 %	11,0 %

Tab. 6-36: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_3_xx

Serie ZK_3_xx, $l / b / h = 4010 / 234,0 / 40,1$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	8 #	7 #	7 #	7 #	7 #	7 #	7 #
Min	11 %	469	471	16500	14090	13880	31,3
Max	12 %	521	524	18360	18290	17870	66,4
MW	11 %	494	496	17390	16290	16050	48,2
Median	11 %	490	492	17250	16240	16220	47,0
Stand. Abw.	0 %	19	19	670	1380	1320	13,3
COV [%]	3,8 %	3,8 %	3,8 %	3,9 %	8,5 %	8,2 %	27,7 %

Tab. 6-37: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_4_xx

Serie ZK_4_xx, $l / b / h = 3982 / 312,0 / 40,1$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	6 #	7 #	7 #	7 #
Min	397	22,5	1,3	67
Max	719	27,8	1,9	124
MW	579	24,9	1,5	97
Median	583	25,4	1,5	94
Stand. Abw.	118	1,8	0,2	17
COV [%]	20,4 %	7,3 %	14,8 %	18,0 %

Tab. 6-38: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, Serie ZK_4_xx

Serie ZK_4_xx, $l / b / h = 3982 / 312,0 / 40,1$ mm							
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{dyn,12,20}$ [mm]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,12}$ [N/mm ²]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]
Anzahl	7 #	6 #	6 #	5 #	6 #	6 #	6 #
Min	11 %	447	473	16860	15110	11480	31,7
Max	12 %	552	554	19750	19250	18960	57,4
MW	11 %	497	502	18110	16540	15800	46,2
Median	12 %	499	500	18280	16000	15840	46,5
Stand. Abw.	0 %	37	31	1110	1600	2520	9,4
COV [%]	2,9 %	7,4 %	6,2 %	6,1 %	9,7 %	16,0 %	20,4 %

Tab. 6-31 bis Tab. 6-38 beinhalten die Versuchswerte und errechneten Kennwerte der Serien ZK_1_xx bis ZK_4_xx.

Eine Auswahl aus statistischen Kennwerten zur Beschreibung der Veränderung der Festigkeitswerte in Abhängigkeit der Serien ist Inhalt des Diagramm 6-7. Deutlich zu erkennen ist ein 'Springen' der Streuung der Festigkeiten und die damit verbundenen 5 % Quantile. Dies deutet einerseits auf die Variabilität der Einflüsse und der Sensibilität der Effekte innerhalb von Systemen hin, andererseits ist zu vermerken, dass die statistischen Kennwerte, aufgrund des begrenzten Probenumfangs, mit großen Unsicherheiten hinsichtlich der Aussagekraft einer Punktschätzung belegt sind.

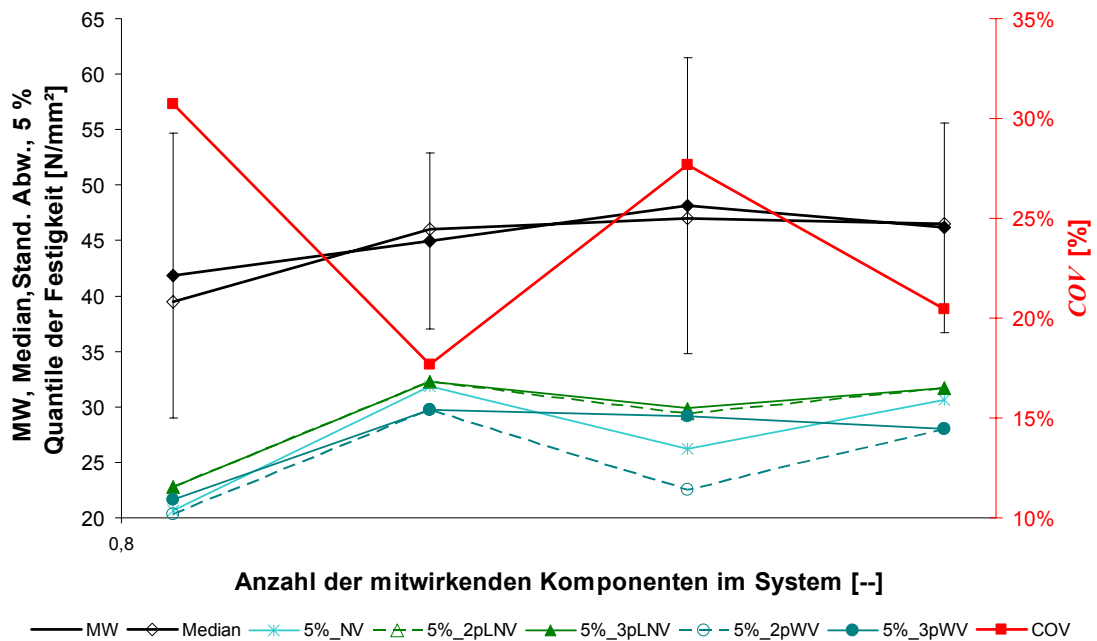


Diagramm 6-7: Darstellung von Kennwerten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System; Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78

Die 5 % Quantilwerte sind, in Abhängigkeit statistischer Modelle, in der Tab. 6-39, zusammen mit den Relativwerten k_{sys} , enthalten.

Tab. 6-39: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Systemfaktoren der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78

ZUG_ZK_40-78		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	ZK_1_xx	22,3	20,7	22,8	22,8	20,3	21,7
	ZK_2_xx	--	31,9	32,3	32,3	29,7	29,7
	ZK_3_xx	--	26,2	29,4	29,9	22,5	29,2
	ZK_4_xx	--	30,6	31,7	31,7	28,0	28,0
k_{sys} ²⁾ [--]	ZK_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	ZK_2_xx	--	1,54	1,42	1,42	1,46	1,37
	ZK_3_xx	--	1,27	1,29	1,31	1,11	1,35
	ZK_4_xx	--	1,48	1,39	1,39	1,38	1,29

¹⁾ die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhanges nach Formel 5-32 berechnet.

²⁾ die angegebenen Systemfaktoren k_{sys} sind Verhältniswerte der 5 % Quantile der jeweiligen betrachteten Verteilungsfunktion und Serie zu jenem der Referenzserie ZK_1_xx, und werden nach der Formel 5-16 berechnet. Die hervorgehobenen Quantilwerte sowie Faktoren entsprechen den Werten der nach der statistischen Betrachtung von unterschiedlichen Modellen am bestens angepassten Kennwerten.

Das Diagramm 6-8 enthält zudem die Visualisierung der k_{sys} -Werte.

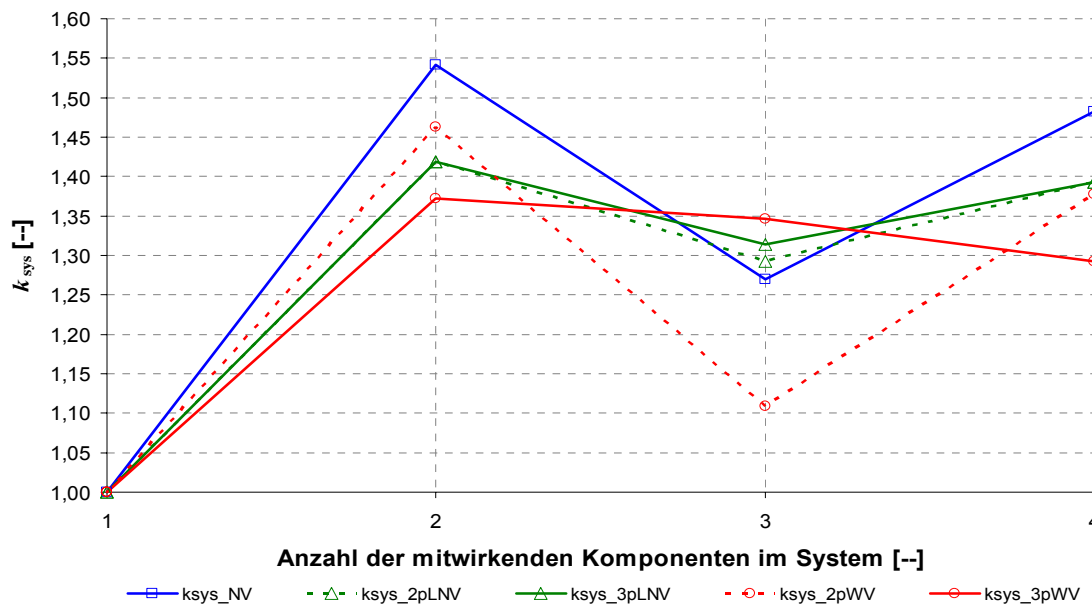


Diagramm 6-8: Darstellung der k_{sys} -Faktoren, auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78 und unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Die Tab. 6-40 stellt die Kennwerte der einzelnen Serien dieser Untersuchungsreihe dar. Es gilt hinsichtlich der Erreichung der Vorgaben der ON EN 338:2003 für die Festigkeitsklasse C40 dasselbe wie für die Serie ZL_1_xx der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78; eine Zuteilung zu dieser Klasse ist aufgrund der fehlenden Zugfestigkeit nicht möglich.

Tab. 6-40: charakteristische Kennwerte der Serien der Reihe ZUG_ZK_40-78 zur Zuteilung in eine Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003

ZUG_ZK_40-78	ZK_1_xx	ZK_2_xx	ZK_3_xx	ZK_4_xx
$f_{t,0,05}^{1)}$ [N/mm ²]	22,3	--	--	--
$k_s^{2)}$ [--]	--	--	--	--
$k_h^{2)}$ [--]	1,14 (bezogen auf die Einzelkomponente)			
$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	-- ²⁾ 18,4 ³⁾	-- ²⁾ 25,9 ³⁾	-- ²⁾ 22,1 ³⁾	-- ²⁾ 24,3 ³⁾
$E_{t,0,mean}^{2)}$ [N/mm ²]	15210	15760	16050	15800
$\rho_k^{4)}$ [kg/m ³]	423	454	465	451

¹⁾ 5 % Quantile nach der empirischen Häufigkeit für Extremwerte

²⁾ Faktoren und Berechnung nach der ON EN 384:2004

³⁾ charakteristischer Wert nach der prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach der ON EN 384:2004, als Vergleichswert zur ON EN 384:2004

⁴⁾ charakteristischer Wert als 5 % Quantile nach der Normalverteilung, nach der ON EN 384:2004

Tab. 6-41: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Systemfaktoren der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78 unter der Berücksichtigung der Berücksichtigung beider Referenzserien ZL_1_xx und ZK_1_xx als Serie ZLK_1_xx

ZUG_ZL_40-78		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	ZLK_1_xx	23,4	20,9	23,2	23,2	20,6	22,0
	ZL_2_xx	--	21,8	22,8	22,8	19,2	22,0
	ZL_3_xx	--	26,1	26,7	26,7	22,0	22,0
	ZL_4_xx	--	29,9	30,1	30,1	27,1	30,7
k_{sys} ²⁾ [--]	ZL_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	ZL_2_xx	--	1,04	0,98	0,98	0,93	1,00
	ZL_3_xx	--	1,25	1,15	1,15	1,07	1,00
	ZL_4_xx	--	1,43	1,30	1,30	1,32	1,40

1) die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhanges nach der Formel 5-32 berechnet.

2) die angegebenen Systemfaktoren k_{sys} sind Verhältniswerte der 5 % Quantile der jeweiligen betrachteten Verteilungsfunktion und Serie zu jenem der Referenzserie ZLK_1_xx, und werden nach der Formel 5-16 berechnet. Die hervorgehobenen Quantilwerte sowie Faktoren entsprechen den Werten der nach der statistischen Betrachtung von unterschiedlichen Modellen am bestens angepassten Kennwerten.

Tab. 6-42: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Systemfaktoren der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78 unter der Berücksichtigung der Berücksichtigung beider Referenzserien ZL_1_xx und ZK_1_xx als Serie ZLK_1_xx

ZUG_ZK_40-78		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	ZLK_1_xx	23,4	20,9	23,2	23,2	20,6	22,0
	ZK_2_xx	--	31,9	32,3	32,3	29,7	29,7
	ZK_3_xx	--	26,2	29,4	29,9	22,5	29,2
	ZK_4_xx	--	30,6	31,7	31,7	28,0	28,0
k_{sys} ²⁾ [--]	ZK_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	ZK_2_xx	--	1,53	1,39	1,39	1,44	1,35
	ZK_3_xx	--	1,25	1,27	1,29	1,09	1,33
	ZK_4_xx	--	1,46	1,37	1,37	1,36	1,27

1) die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhanges nach der Formel 5-32 berechnet.

2) die angegebenen Systemfaktoren k_{sys} sind Verhältniswerte der 5 % Quantile der jeweiligen betrachteten Verteilungsfunktion und Serie zu jenem der Referenzserie ZLK_1_xx, und werden nach der Formel 5-16 berechnet. Die hervorgehobenen Quantilwerte sowie Faktoren entsprechen den Werten der nach der statistischen Betrachtung von unterschiedlichen Modellen am bestens angepassten Kennwerten.

Die Bestimmung der 5 % Quantile wurde mit Bedacht vorgenommen. Vor allem der 5 % Quantilwert der Bezugsgröße, sprich jene der Festigkeit der Einzelkomponenten der Referenzserie, beanspruchte besondere Aufmerksamkeit. Aufgrund der Tatsache, dass die Serien ZK_1_xx und ZL_1_xx demselben Probenkollektiv entstammen, wer-

den nun, basierend auf der gebildeten 5 % Quantile der Versuchsdaten beider Serien, die Relativwerte k_{sys} gebildet. Dies ermöglicht vor allem eine verstärkte Absicherung der statistischen Aussagen über das Grundmaterial der Komponenten, und schafft eine solide Basis für den Relativbezug des k_{sys} . Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind der Tab. 6-44 und Tab. 6-45 zu entnehmen.

6.3 Ergebnisse aus den Biegeversuchen von Duobalken und Balkenbindern

Die folgenden Tabellen spiegeln statistische Kennwerte von physikalischen und mechanischen Kennwerten der Versuchsserien BIEGUNG_BB_80-160 und BIEGUNG_BB_60-200 wieder.

Ziel dieser Prüfungen war die Ergründung des mechanischen Potentials des Produktes 'Balkenbinder' anhand der Untersuchung von aus KVH® homogen aufgebauter Träger mit unterschiedlichem Querschnitt. Hierbei wurde einerseits der Querschnitt von $b / h = 80 / 160$ mm gewählt, welcher schon in der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160 Bestandteil der Untersuchungen war und somit, auf Basis der Untersuchungsergebnisse der zugehörigen Serien, eine vergleichende Abschätzung der Kennwerte der Komponenten, über den Duobalken und bis zum Produkt 'Balkenbinder', ermöglichen soll. Der zweite Querschnitt mit den Abmessungen $b / h = 60 / 200$ mm dient zum Vergleich und zur Basis der Abschätzung der festzulegenden Bezugshöhe für die Berechnung der Kennwerte der Festigkeit, sowie zur Erkundung des Höheneinflusses bei solcherart aufgebauten Querschnittsstrukturen. Beiden Querschnitten gemeinsam ist eine vorangegangene Erforschung relevanter Abmessungen für die spätere Vermarktung dieses Produktes, wobei diese Komponenten in ihrer Größe Zielquerschnitte repräsentieren.

Es ist hinsichtlich der Daten darauf hinzuweisen, dass sie auf einer relativ geringen Probenanzahl beruhen. Durch den Vergleich von zwei unterschiedlichen Querschnitten sowie durch die mögliche Einbindung der Versuchsreihe BIEGUNG_80-160 werden die Daten und die Auswertungen, im Zuge der darauf folgenden Interpretation, in ihrer Aussagekraft bestärkt.

6.3.1 Daten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160

Die Tab. 6-43 stellt jene Probekörper dar, welche in den folgenden Auswertungen unberücksichtigt bleiben.

Tab. 6-43: Auflistung jener Probekörper der einzelnen Serien, welche nicht in der Auswertung inkludiert wurden, sowie der Grund der Ausscheidung

Serie	Proben Nr.	Grund der Ausscheidung des Probekörpers aus der Auswertung
[--]	[--]	[--]
Ba_2_xx	--	--
Ba_3_xx	1	Probleme in der Versuchstechnik auf Basis zu unterschiedlicher Kräfte bei beiden Prüfgerüsten
	9	Hauptbruchursache FAZ

Die folgenden Tabellen (Tab. 6-44 bis Tab. 6-47) beinhalten die Kennwerte der 4 Punkt Biegeprüfungen der Serien Ba_2_xx und Ba_3_xx.

Tab. 6-44: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160, Serie Ba_2_xx

Serie Ba_2_xx, $l / b / h = 6401 / 153,5 / 304,8$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	20 #	20 #	20 #	20 #
Min	64	123,8	1,7	31
Max	104	143,8	4,7	53
MW	84	134,6	2,8	45
Median	85	134,7	2,9	47
Stand. Abw.	11	5,1	0,7	6
COV [%]	12,5 %	3,8 %	24,4 %	13,1 %

Tab. 6-45: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160, Serie Ba_2_xx

Serie Ba_2_xx, $l / b / h = 6401 / 153,5 / 304,8$ mm						
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]	$E_{m,l,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
Anzahl	20 #	20 #	20 #	20 #	20 #	20 #
Min	14 %	413	409	9860	10280	24,9
Max	15 %	483	479	13640	14150	40,3
MW	14 %	450	445	11140	11640	32,4
Median	14 %	450	446	10870	11430	32,5
Stand. Abw.	0 %	17	17	1030	1070	4,0
COV [%]	2,9 %	3,9 %	3,9 %	9,3 %	9,2 %	12,4 %

Tab. 6-46: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160, Serie Ba_3_xx

Serie Ba_3_xx, $l / b / h = 9402 / 153,9 / 460,9$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	8 #	8 #	8 #	8 #
Min	82	293,6	2,5	35
Max	128	314,4	4,4	48
MW	105	303,1	3,3	41
Median	108	302,0	3,3	41
Stand. Abw.	15	6,8	0,6	5
COV [%]	14,6 %	2,2 %	17,3 %	11,2 %

Tab. 6-47: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160, Serie Ba_3_xx

Serie Ba_3_xx, $l / b / h = 9402 / 153,9 / 460,9$ mm								
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]	$E_{m,l,12}$ [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
Anzahl	8 #	8 #	8 #	8 #	8 #	8 #	8 #	8 #
Min	14 %	440	433	9220	9840	8580	9170	20,9
Max	17 %	472	468	12370	12850	11470	11870	32,6
MW	15 %	456	449	10510	11130	10100	10700	26,9
Median	14 %	453	447	10010	10670	10010	10850	27,7
Stand. A.	1 %	10	11	1240	1160	830	810	3,9
COV [%]	9,6 %	2,3 %	2,5 %	11,8 %	10,5 %	8,2 %	7,6 %	14,5 %

Das Diagramm 6-9 stellt den Verlauf ausgewählter statistischer Kennwerte der Festigkeit, in Abhängigkeit der Serien, dar. Die Tab. 6-48 gibt zudem die errechneten 5 % Quantile sowie Relativwerte der Festigkeiten (siehe auch Diagramm 6-10) der einzelnen Serien, bezogen auf die Referenzserie B_1_xx wieder. Deutlich ersichtlich ist die Abnahme der Kennwerte mit zunehmender Anzahl der Komponenten im System, folglich der Prüfkörperhöhe. Die steigende Höhe erweist sich als ausschlaggebende Größe im Hinblick auf den Größen-Teileffekt k_h .

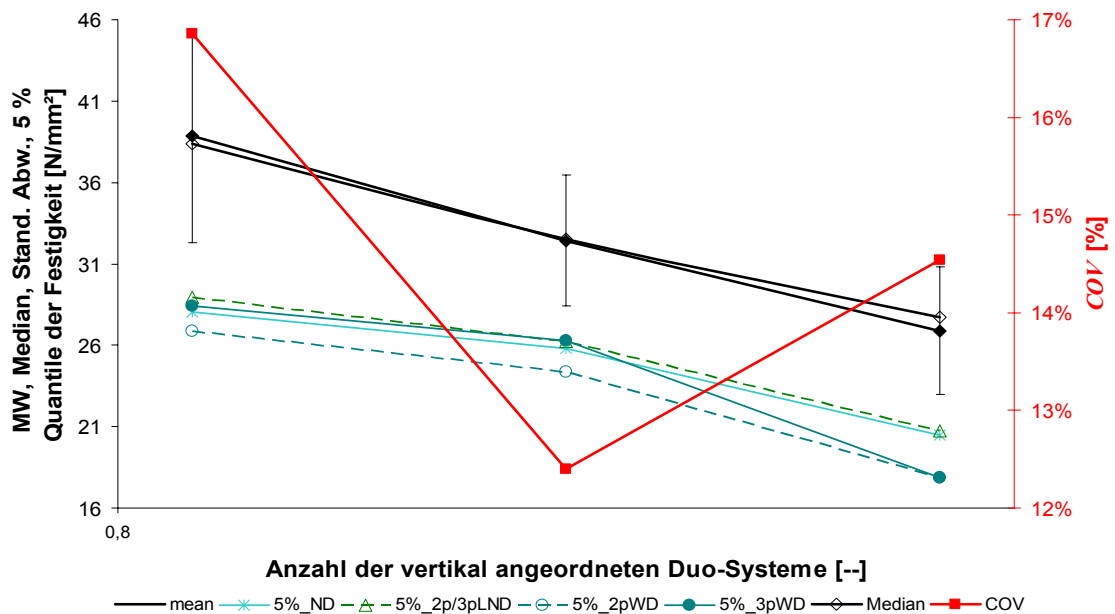


Diagramm 6-9: Darstellung von Kennwerten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System; Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160

Tab. 6-48: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Verhältnisfaktoren der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160, bezogen auf die Referenzserie B_2_xx

BIEGUNG_BB_80-160		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{m,05}$ [N/mm ²]	B_2_xx	29,1	28,1	29,0	29,0	26,9	28,4
	Ba_2_xx	25,6	25,8	26,2	26,4	24,4	26,3
	Ba_3_xx	--	20,5	20,7	20,7	17,9	17,9
k_{rel} ²⁾ [--]	B_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Ba_2_xx	0,88	0,92	0,90	0,91	0,90	0,93
	Ba_3_xx	--	0,73	0,71	0,71	0,67	0,63

1) die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhangs nach Formel 5-32 berechnet.

2) die angegebenen Verhältnisfaktoren k_{rel} sind ermittelt durch Bezug der 5 % Quantile der Biegefestigkeiten der Serien Ba_x_xx auf jene der Serie B_2_xx, der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

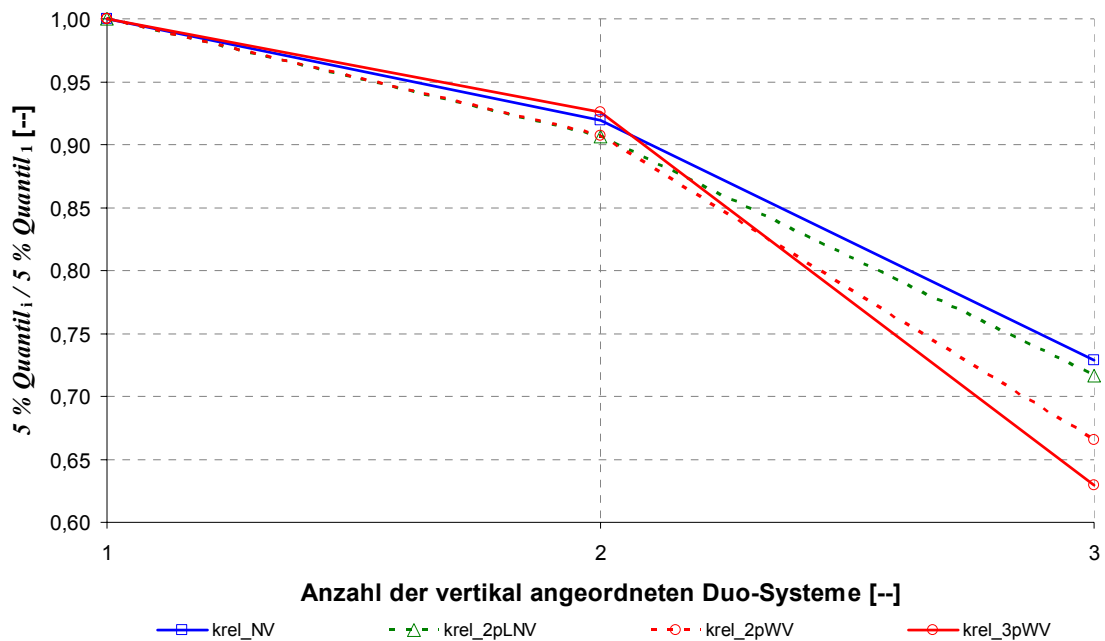


Diagramm 6-10: Darstellung der k_{rel} -Faktoren, auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160 und unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Tab. 6-49: charakteristische Kennwerte der Serien der Reihe BIEGUNG_BB_80-160 zur Zuteilung in eine Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003

BIEGUNG_BB_80-160		Ba_2_xx	Ba_3_xx
$f_{m,05}^{1)}$	[N/mm ²]	25,6	--
$k_s^{2)}$	[-]	--	--
$k_h^{2)}$	[-]	0,859	0,792
$f_{m,k}$	[N/mm ²]	-- ²⁾ 29,4 ³⁾	-- ²⁾ 24,2 ³⁾
$E_{m,l,mean}^{2)}$	[N/mm ²]	11640	11130
$\rho_k^{4)}$	[kg/m ³]	417	430

- 1) 5 % Quantile nach der empirischen Häufigkeit für Extremwerte
- 2) Faktoren und Berechnung nach der ON EN 384:2004
- 3) charakteristischer Wert nach der prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach der ON EN 384:2004, als Vergleichswert zur ON EN 384:2004
- 4) charakteristischer Wert als 5 % Quantile nach der Normalverteilung, nach der ON EN 384:2004

Die Kennwerte der Serien der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160 sind der Tab. 6-53 zu entnehmen. Die zu vergleichende Referenzserie der Einzelkomponenten, BIEGUNG_80-160 der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, wurde bereits in Kapi-

tel 0 besprochen und erreichte, aufgrund mangelnder Biegefestigkeit, die Vorgaben der ON EN 338:2003 für die Zuteilung zur Festigkeitsklasse C24 nicht. Die weitere Interpretation hierzu ist dem folgenden Kapitel zu entnehmen.

6.3.2 Daten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200

Die Tab. 6-50 beinhaltet jene Probekörper, welche in den folgenden Auswertungen unberücksichtigt bleiben.

Tab. 6-50: Auflistung jener Probekörper der einzelnen Serien, welche nicht in der Auswertung inkludiert wurden, sowie der Grund der Ausscheidung

Serie	Proben Nr.	Grund der Ausscheidung des Probekörpers aus der Auswertung
[--]	[--]	[--]
Bb_1_xx	15	Keilzinkung nebeneinander positionierter Komponenten auf gleicher Höhe
	17, 24, 25	Hauptbruchursache FAZ
Bb_2_xx	2	Hauptbruchursache FAZ
	3	offener Wipfelbruch, ohne Last
Bb_3_xx	1	Probleme in der Versuchstechnik auf Basis zu unterschiedlicher Kräfte in beiden Prüfgerüsten

Die Ergebnisse aus den Versuchen der Reihe BIEGUNG_BB_60-200 sind Tab. 6-50 bis Tab. 6-56 zu entnehmen.

Tab. 6-51: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200, Serie Bb_1_xx

Serie Bb_1_xx , $l / b / h = 4100 / 116,7 / 197,2$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	31 #	31 #	31 #	31 #
Min	38	36,4	1,9	24
Max	77	46,8	6,7	56
MW	52	42,8	3,5	37
Median	51	43,0	3,1	35
Stand. Abw.	9	1,9	1,3	8
COV [%]	17,8 %	4,5 %	35,9 %	21,1 %

Tab. 6-52: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200, Serie Bb_1_xx

Serie Bb_1_xx, $l / b / h = 4100 / 116,7 / 197,2$ mm						
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]	$E_{m,l,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
Anzahl	31 #	31 #	31 #	31 #	31 #	31 #
Min	12 %	385	382	9140	9440	30,1
Max	15 %	498	492	16320	16730	60,4
MW	13 %	454	451	12580	12910	40,5
Median	13 %	456	455	12770	13020	39,6
Stand. Abw.	1 %	21	20	1730	1780	7,3
COV [%]	6,9 %	4,6 %	4,5 %	13,8 %	13,8 %	18,0 %

Tab. 6-53: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200, Serie Bb_2_xx

Serie Bb_2_xx, $l / b / h = 7902 / 113,9 / 394,5$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	18 #	18 #	18 #	18 #
Min	52	151,4	2,4	31
Max	91	167,0	4,7	65
MW	67	160,5	3,6	38
Median	68	161,6	3,4	37
Stand. Abw.	10	4,2	0,7	8
COV [%]	14,2 %	2,6 %	19,9 %	20,4 %

Tab. 6-54: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200, Serie Bb_2_xx

Serie Bb_2_xx, $l / b / h = 7902 / 113,9 / 394,5$ mm								
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]	$E_{m,l,12}$ [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
Anzahl	18 #	18 #	18 #	18 #	18 #	18 #	18 #	18 #
Min	12 %	429	428	8970	9050	9320	9420	18,8
Max	15 %	468	465	12250	12560	11260	11630	36,3
MW	13 %	452	449	10650	10910	10160	10410	26,4
Median	13 %	455	451	10490	10760	10110	10310	25,8
Stand. A.	1 %	12	11	970	990	600	620	4,4
COV [%]	4,6 %	2,6 %	2,5 %	9,1 %	9,1 %	5,9 %	5,9 %	16,8 %

Tab. 6-55: statistische Kennwerte der Prüfergebnisse aus den Versuchen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200, Serie Bb_3_xx

Serie Bb_3_xx , $l / b / h = 11706 / 113,9 / 594,6$ mm				
	F_{max} [kN]	m [kg]	JRB [mm]	STL [mm]
Anzahl	9 #	9 #	9 #	9 #
Min	80	341,0	2,8	35
Max	118	368,6	4,8	50
MW	98	356,6	3,8	41
Median	99	360,0	3,9	40
Stand. Abw.	11	9,2	0,7	5
COV [%]	11,3 %	2,6 %	17,6 %	12,1 %

Tab. 6-56: statistische Kennwerte der Berechnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200, Serie Bb_3_xx

Serie Bb_3_xx , $l / b / h = 11706 / 113,9 / 594,6$ mm								
	u [%]	ρ_0 [kg/m ³]	ρ_{12} [kg/m ³]	$E_{m,l}$ [N/mm ²]	$E_{m,l,12}$ [N/mm ²]	$E_{m,g}$ [N/mm ²]	$E_{m,g,12}$ [N/mm ²]	f_m [N/mm ²]
Anzahl	9 #	9 #	9 #	9 #	9 #	9 #	9 #	9 #
Min	13 %	431	427	8820	8970	9070	9220	21,5
Max	16 %	468	460	12300	12980	11480	12120	31,2
MW	14 %	450	445	10390	10880	10090	10560	25,8
Median	15 %	452	448	10220	10710	10170	10660	25,1
Stand. Abw.	1 %	12	12	1060	1140	800	890	2,8
COV [%]	8,1 %	2,7 %	2,7 %	10,2 %	10,5 %	7,9 %	8,5 %	10,9 %

Das Diagramm 6-11 enthält den Verlauf der Kennwerte der Festigkeiten der einzelnen Serien und lässt somit deutlich den degressiven Trend, mit zunehmender Höhe der Prüfkörper sowie Komponentenanzahl, erkennen. Die Tab. 6-57 beinhaltet die 5 % Quantile der Festigkeiten unter Betrachtung der besprochenen statistischen Verteilungsmodelle. Ergänzend sind die Relativwerte, bezogen auf die Serie Bb_1_xx, dargestellt (siehe auch Diagramm 6-12).

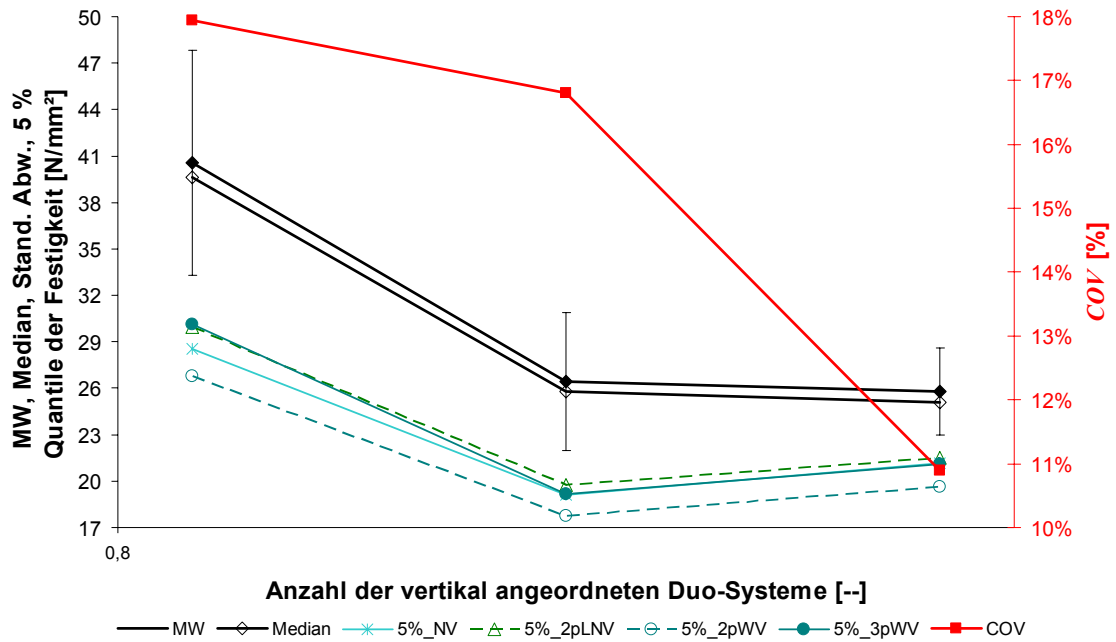


Diagramm 6-11: Darstellung von Kennwerten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System; Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200

Tab. 6-57: 5 % Quantile der Festigkeit sowie Verhältnisfaktoren der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200

BIEGUNG_BB_60-200		emp. H. ¹⁾	NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
$f_{m,05}$ [N/mm ²]	Bb_1_xx	30,8	28,6	30,0	30,1	26,8	30,1
	Bb_2_xx	--	19,1	19,8	19,8	17,8	19,2
	Bb_3_xx	--	21,2	21,5	21,6	19,6	21,1
k_{rel} ²⁾ [--]	Bb_1_xx	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Bb_2_xx	--	0,67	0,66	0,66	0,66	0,64
	Bb_3_xx	--	0,74	0,72	0,72	0,73	0,70

¹⁾ die 5 % Quantile der empirischen Häufigkeit wurde anhand des Zusammenhanges nach Formel 5-32 berechnet.

²⁾ die angegebenen Verhältnisfaktoren k_{rel} sind ermittelt durch Bezug der 5 % Quantile der Biegefestigkeiten der Serien Bb_2_xx und Bb_3_xx auf jene der Serie Bb_1_xx

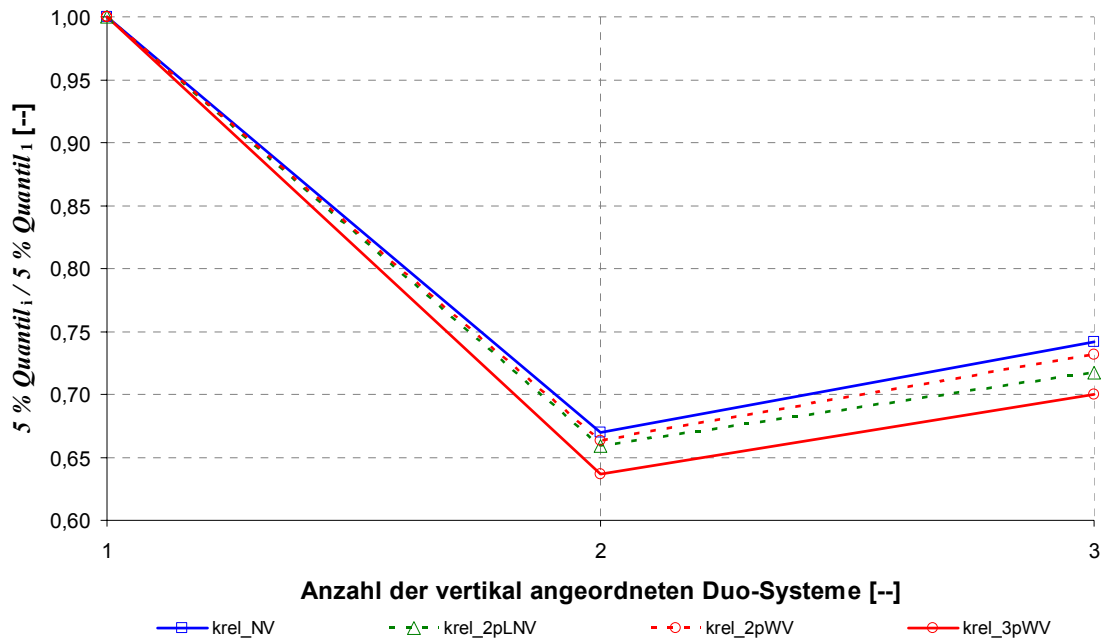


Diagramm 6-12: Darstellung der k_{rel} -Faktoren, auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Kennwerte der Festigkeiten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200 und unter Betrachtung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Tab. 6-58: charakteristische Kennwerte der Serien der Reihe BIEGUNG_BB_60-200 zur Zuteilung in eine Festigkeitsklasse nach der ON EN 338:2003

BIEGUNG_BB_60-200		Bb_1_xx	Bb_2_xx	Bb_3_xx
$f_{m,05}^{1)}$	[N/mm ²]	30,8	--	--
$k_s^{2)}$	[-]	--	--	--
$k_h^{2)}$	[-]	0,944	0,822	0,758
$f_{m,k}$	[N/mm ²]	-- ²⁾ 30,6 ³⁾	-- ²⁾ 23,0 ³⁾	-- ²⁾ 26,9 ³⁾
$E_{m,l,mean}^{2)}$	[N/mm ²]	12910	10910	10880
$\rho_k^{4)}$	[kg/m ³]	418	430	425

1) 5 % Quantile nach der empirischen Häufigkeit für Extremwerte

2) Faktoren und Berechnung nach der ON EN 384:2004

3) charakteristischer Wert nach der prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach der ON EN 384:2004, als Vergleichswert zur ON EN 384:2004

4) charakteristischer Wert als 5 % Quantile nach der Normalverteilung, nach der ON EN 384:2004

Die Tab. 6-58 stellt die Kennwerte der Serien der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_60-200 dar. Die weitere Interpretation ist dem folgenden Kapitel zu entnehmen.

7 VERTIEFENDE AUSWERTUNG SOWIE INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit der vertiefenden Auswertung sowie Interpretation der gewonnenen Versuchsergebnisse. Die Gliederung der ersten Kapitel findet nach den Schwerpunkten der ersten versuchstechnischen quantitativen Erfassung des Systemeffektes auf Biegung und Zug (Untersuchungsreihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160), der Ermittlung des Systempotentials von im weiteren Sinne Steifigkeit vorsortierten Brettern (ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78), sowie der Untersuchung des mechanischen Potentials des Produktes Balkenbinder (BIEGUNG_BB_80-160 und BIEGUNG_BB_60-200), statt.

Die daran anschließenden Kapitel dienen der Zusammenführung der gewonnenen Erkenntnisse, sowie deren Vergleich mit in der Literatur angegebenen Stellen und den in Betracht gezogenen Normenwerken. Ziel ist hierbei eine Definition von weitgehend allgemein gültigen Beziehungen zur einfachen Abschätzung des Systempotentials anhand weniger, aber aussagekräftiger Parameter.

7.1 Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Reihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160

Die beiden Untersuchungsreihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160 wurden mit dem Ziel der ersten Abschätzung des mechanischen Potentials von Systemen, aufgebaut aus Konstruktionsvollholz KVH[®], durchgeführt. Der Versuchsumfang wurde dabei, im Rahmen des Projektes, sehr umfangreich gestaltet. Die Probenanzahl ermöglicht eine weiterführende Analyse der Versagensursachen, Beziehungsstärken sowie weiterer Kenngrößen, in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Komponenten in einem System. Auf Basis der daraus gewonnenen Ergebnisse sollen weitgehend allgemeine Erkenntnisse für das Wirken von Systemen definiert werden.

7.1.1 Auswertung der Versagensursachen

Die Beurteilung der induzierenden Versagensmerkmale wurde für jeden Prüfkörper durchgeführt, um daraus Aussagen über das Bruchverhalten von Systemen, im Vergleich zu jenem der Einzelkomponenten, tätigen zu können. Es ist anzumerken, dass

sich die Beurteilung der Probekörper bestehend aus mehreren Einzelkomponenten zum Teil nur mit erheblichem Aufwand und nicht immer zur vollen Zufriedenheit bewerkstelligen ließ. Durch die starre Verbindung zwischen den Komponenten in Form einer Flächenverklebung kam es vorwiegend zu sehr abrupten, spröden Bruchvorgängen. Die Bestimmung der induzierenden Bruchursache erfolgte sodann aus der Erfahrung durch visuelle Begutachtung. Des Weiteren ist nur selten ein einziges Holzmerkmal für ein Versagen ausschlaggebend. Vielmehr handelt es sich um das Zusammenspiel mehrerer Merkmale, welche in einer ungünstigen Konstellation die Festigkeit des Probekörpers limitieren.

Aus diesem Grund wurden einzelne Bruchkriterien nach Erfahrung gewichtet. Die relativen Häufigkeiten der angesprochenen Merkmale sind nach den einzelnen Serien getrennt, Tab. 7-1 und Tab. 7-2, sowie Diagramm 7-1 und Diagramm 7-3 zu entnehmen. Diagramm 7-2 und Diagramm 7-4 enthalten ergänzend die relativen Häufigkeiten ausgewählter Bruchmerkmale.

Anhand der Auswertungen ist ersichtlich, dass die lokale und globale Schrägfaser den überwiegenden Anteil der Versagensursachen in Anspruch nimmt. Betrachtet man die einzelnen Häufigkeiten in Abhängigkeit der Komponentenanzahl im System, lässt sich erkennen, dass sowohl bei Biegung, als auch bei Zug der Anteil der lokalen Schrägfaser (LSF) als Bruchursache zunimmt. Bei der Biegung kristallisiert sich vor allem der Schmalseitenast (SSA) als das Bruchkriterium der LSF heraus. Reziprok dazu nimmt bei beiden Belastungsarten der Anteil der globalen Schrägfaser (GSF) ab. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass dieser Anteil innerhalb der Einzelkomponenten des Systems geringer ausfällt, lässt sich die Abnahme durch das Mittragverhalten, sprich "soziale" Verhalten, der benachbarten Komponenten, in Form von Lastumlagerungen, erklären.

Für die Keilzinke (KZ) gilt, dass der Anteil des Flankenauszuges (FAZ) bei Biegebeanspruchung steigt, dieser Anteil bei der Zugbelastung nahezu konstant bleibt. Hier sei angefügt, dass der Flankenauszug bei Biegung sehr häufig nur die Randzinken (äußeren Zinken) des Paketes betraf. Eine mögliche Ursache dafür ist die Druckverteilung bei der Verklebung der Keilzinke in der Produktion. Durch das Fehlen eines seitlichen Widerstandes an den Randzinken kann das Holz der Keilwirkung während der Verklebung nachgeben und somit dem Druck ausweichen. Zwar wurden die ersten ein bis zwei kritischen Randzinken bereits bei der Hobelung der KVH[®] Stangen entfernt, eine

Auswirkung dieses produktionsbedingten Pressdruckverlaufes ist jedoch in Betracht zu ziehen.

Die Keilzinkung verursacht generell durch das Zinkenspiel eine Querschnittsschwächung. Zudem führt das stirnseitige Zusammenfügen von Elementen aus Holz zu einer Störung des Faserverlaufes und somit zu einer Beeinträchtigung des natürlich optimierten Spannungsverlaufes über den Querschnitt. Aus diesem Grund unterliegt die Keilzinkung strengen Qualitätskriterien in der Fertigung. Die Ausführung dieser Verbindung ist daher nur in geradfasrigen, ungestörten Bereichen der Komponenten zugelassen. Ein Abstand für Äste von $\geq 3 \cdot d$, (d = Astdurchmesser) von der Keilzinkung ist nach der ON EN 385:2002 vorgeschrieben. Zudem muss die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinke 5 N/mm^2 über jener des Holzes liegen.

Die Versagensursache 'Ast in / neben der Keilzinkung' (A_i/nKZ) beschreibt einen, nach den Vorgaben der ON EN 385:2002, zu gering gewählten Abstand. Bei beiden Belastungsarten, Biegung und Zug, nimmt tendenziell der Anteil dieses Merkmales am Versagen des Probekörpers, mit zunehmender Komponentenanzahl im System, zu. Es lässt sich daraus schließen, dass diese Versagensursache mit zunehmender Systemgröße immer öfter schlagend wird und somit den Zugewinn am Systempotential in steigendem Maße limitiert. Daraus wiederum lässt sich ableiten, dass produktionsbedingte Mängel wie FAZ und A_i/nKZ allgemein zwar durch den Verbund von Einzelkomponenten im System verstärkt eingebunden sind, jedoch gegenüber den natürlichen Holzmerkmalen zunehmend den zusätzlichen Potentialzugewinn von Systemen beschränken. Eine Erklärung dafür ist die bereits im Wachstum der Struktur und des Spannungsverlaufes des Baumes integrierten Wuchsmerkmale im Vergleich zu den technischen Produktionsmerkmalen. So ist auch bekannt, dass nicht die Astgröße, sondern im Weiteren Sinne der Abstand des Astes zu einer Bezugskante ('Vorholz') als Sortierkriterium ausschlaggebend sein sollte.

Der Zinkengrundbruch (ZGB), als Versagen im Nettoquerschnitt des Probekörpers, verringert sich bei Biegung, erhöht sich jedoch bei Zugbelastung längs zur Faser, mit ansteigender Komponentenanzahl n im System. Generell ist die Wahrscheinlichkeit, dass Keilzinkungen der einzelnen Komponenten innerhalb des Systems auf derselben Stelle zu liegen kommen, eher gering. Dies sollte auch produktionstechnisch, in Hinblick auf die Querschnittsschwächung, vermieden werden. Bei Hochkantbiegebean-

spruchung findet im Allgemeinen eine hohe Belastung der Randfaser auf Zug sowie Druck statt, welche zur Neutralachse des Querschnittes einen Nulldurchlauf erfährt. Bei Zugbeanspruchung hingegen wird der gesamte Querschnitt gleichmäßig belastet. Bei Biegung steigt die Wahrscheinlichkeit einer seitlichen Abstützung der Keilzinkung durch eine benachbarte Komponente mit zunehmender Anzahl n . Daraus ergibt sich eine geringere Wahrscheinlichkeit, dass der Zinkengrundbruch als Versagensmerkmal die Systemfestigkeit limitiert. Bei Zug hingegen steigt zwar ebenfalls die Stützwirkung der benachbarten Komponenten und führt zu einem verbesserten Kraftfluss, jedoch tritt im vollen Maße die Querschnittsschwächung in Kraft, welche bei der Biegung nur im Randbereich der maximalen Belastung ausgesetzt ist, ein Anteil des Gesamtquerschnittes in dem eine Überbrückung der Schwächung durch benachbarte Komponenten durchaus tätig werden kann. Auch führen vorhandene Anrisse und/oder Steifigkeitsunterschiede zwischen den Randbereichen der Probekörper bei Belastung auf Zug zu leichten seitlichen Auslenkungen und somit zu großen zusätzlichen Momentbelastungen.

Tab. 7-1: Relative Häufigkeitswerte der Versagensursachen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

Serie	Versagensursache											
	LSF					GSF		KZ		Sonstiges		
	EA	SSA	AA	LSF (allg)	WB	GSF	DW	FAZ	ZGB	RE	RH	HB
Z_1_xx	17 %	15 %	28 %	7 %	1 %	11 %	8 %	0 %	7 %	1 %	2 %	5 %
Z_2_xx	0 %	0 %	0 %	69 %	0 %	8 %	0 %	3 %	13 %	0 %	4 %	2 %
Z_4_xx	0 %	0 %	0 %	72 %	0 %	4 %	0 %	2 %	12 %	0 %	9 %	0 %

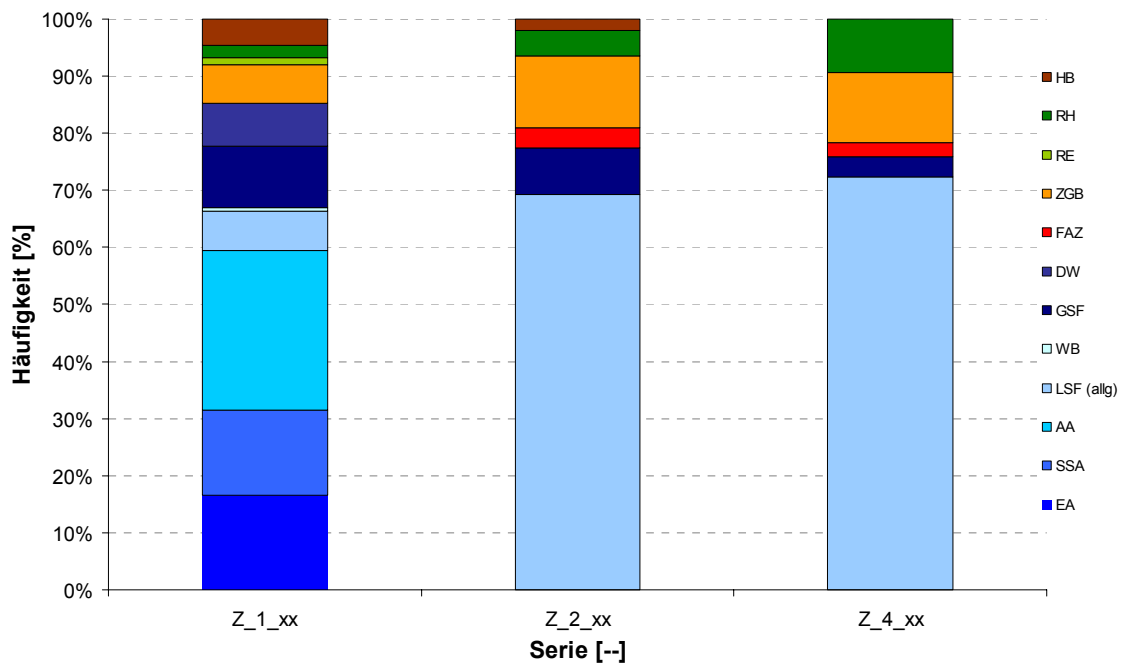


Diagramm 7-1: Darstellung der Auswertung bruchinduzierender Merkmale der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

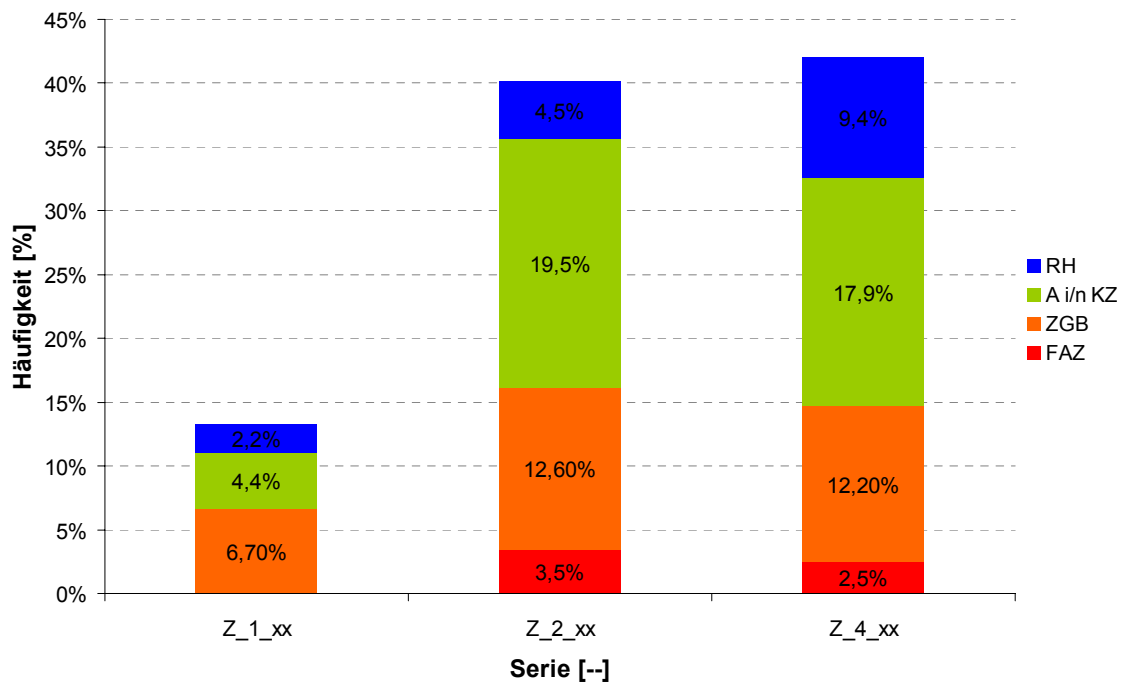


Diagramm 7-2: Darstellung einer Auswahl bruchinduzierender Merkmale der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

Tab. 7-2: Relative Häufigkeitswerte der Versagensursachen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Serie	Versagensursache											
	LSF					GSF		KZ		Sonstiges		
	EA	SSA	AA	LSF (allg)	WB	GSF	DW	FAZ	ZGB	RE	RH	HB
B_1_xx	2 %	29 %	7 %	6 %	2 %	10 %	3 %	3 %	34 %	0 %	3 %	1 %
B_2_xx	0 %	52 %	3 %	11 %	0 %	3 %	0 %	2 %	26 %	1 %	2 %	0 %
B_4_xx	1 %	73 %	0 %	5 %	0 %	2 %	0 %	11 %	5 %	0 %	3 %	0 %

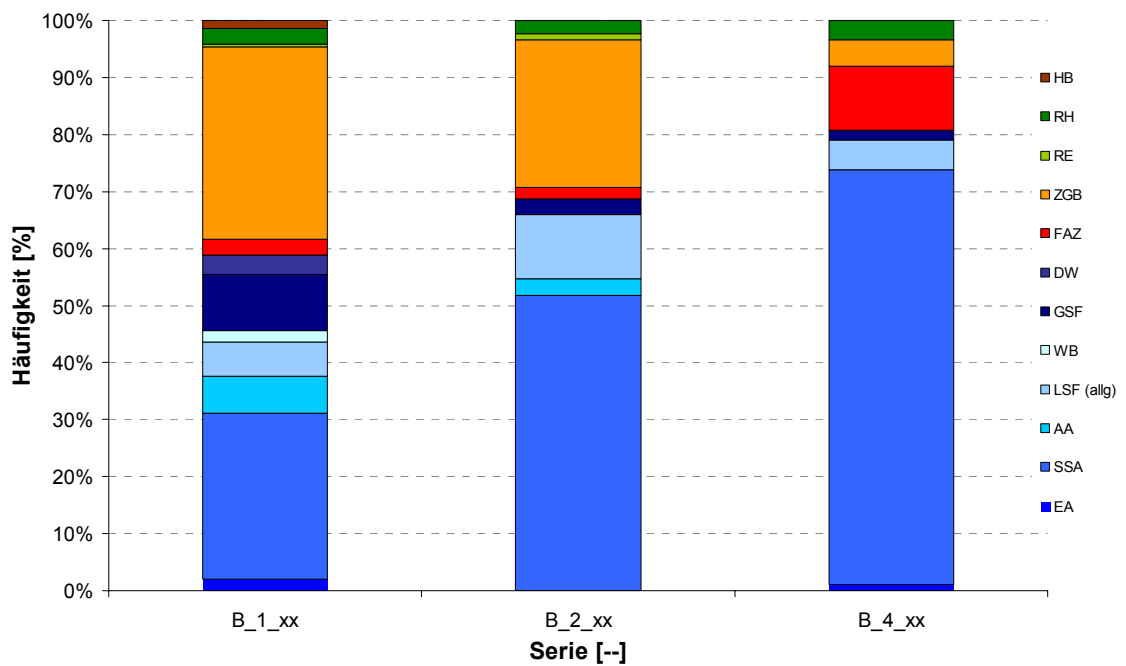


Diagramm 7-3: Darstellung der Auswertung bruchinduzierender Merkmale der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

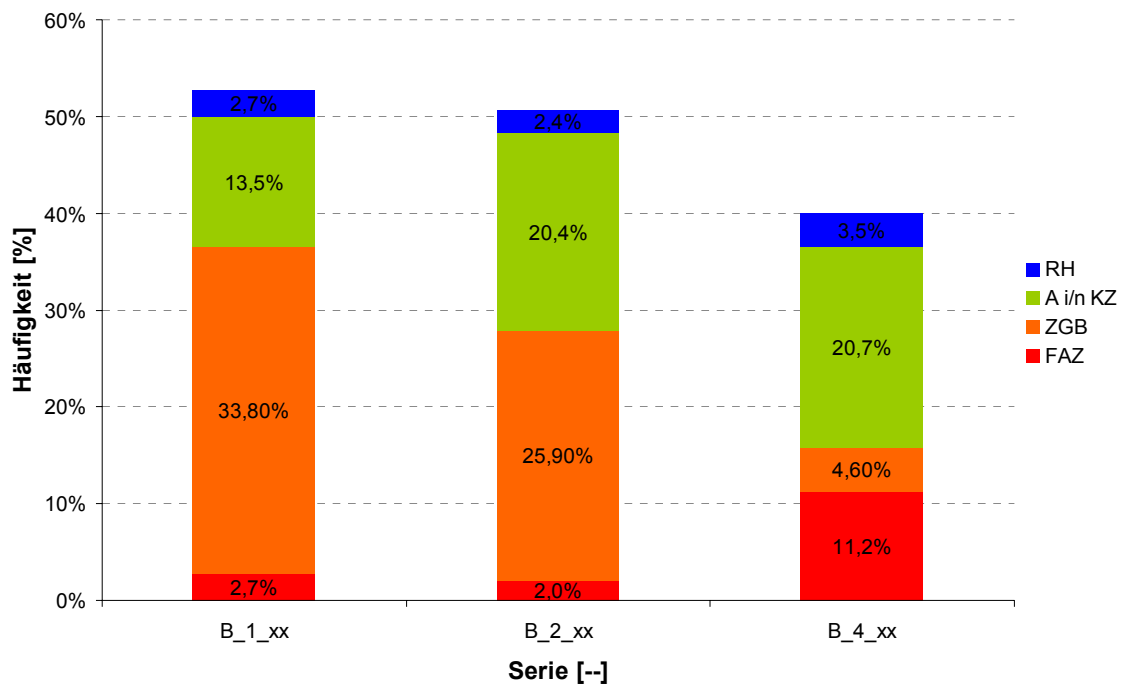


Diagramm 7-4: Darstellung einer Auswahl bruchinduzierender Merkmale der Untersuchungsreihe BIE-GUNG_80-160

Diagramm 7-7 bis Diagramm 7-8 enthalten Gegenüberstellungen der Bruchursachen der einzelnen Serien mit der Festigkeit, Steifigkeit und der Rohdichte. Es wurde Wert darauf gelegt einzelne Versagensmerkmale zu Gruppen zusammenzufassen um anhand größerer Prüfumfänge Tendenzen hinsichtlich ihrer Wertigkeit besser beurteilen zu können.

Betrachtet man die Box Plots der Festigkeiten (Diagramm 7-5 und Diagramm 7-8), so lässt sich festhalten, dass das Versagensmerkmal FAZ generell auf sehr hohem Festigkeitsniveau zu liegen kommt. Aufgrund der wenigen Proben welche diesem Bereich zugeordnet sind, ist eine Quantifizierung des Niveaus nicht möglich. In den Versagensbereichen der lokalen Schrägfaser (LSF, SF) sowie des Zinkengrundbruches (ZGB) und der Produktion ($P = A_i/nKZ$ und sonstige produktionsbedingte Mängel) lässt sich erkennen, dass die Festigkeit mit der Systemgröße n bei sich reduzierender Streuung zunimmt. Diese Tendenz ist vor allem zwischen $n = 1$ und $n = 2$ ausgeprägt. In Verbindung mit den Darstellungen der Steifigkeit (Diagramm 7-6 und Diagramm 7-9), sowie der Rohdichte (Diagramm 7-7 und Diagramm 7-10) zeigt sich, dass dieser Anstieg der Festigkeit nicht notwendigerweise mit einer höheren Steifigkeit bzw. Rohdichte einhergeht. Dieser Schluss würde, auf Basis der positiven Korrelation zwischen

diesen Größen, das Phänomen der tendenziell steigenden Festigkeiten erklären, aufgrund der hier dargestellten Ergebnisse ist dieser Ansatz nicht alleinig gültig. Vielmehr erfolgt durch die Anordnung von parallelen Komponenten ein Ausgleich zwischen diesen und somit ein Mittragverhalten von festigkeitsreduzierenden, merkmalsbehafteten Elementen durch merkmalsfreie Elemente innerhalb einer Komponente sowie zwischen Komponenten eines Systems.

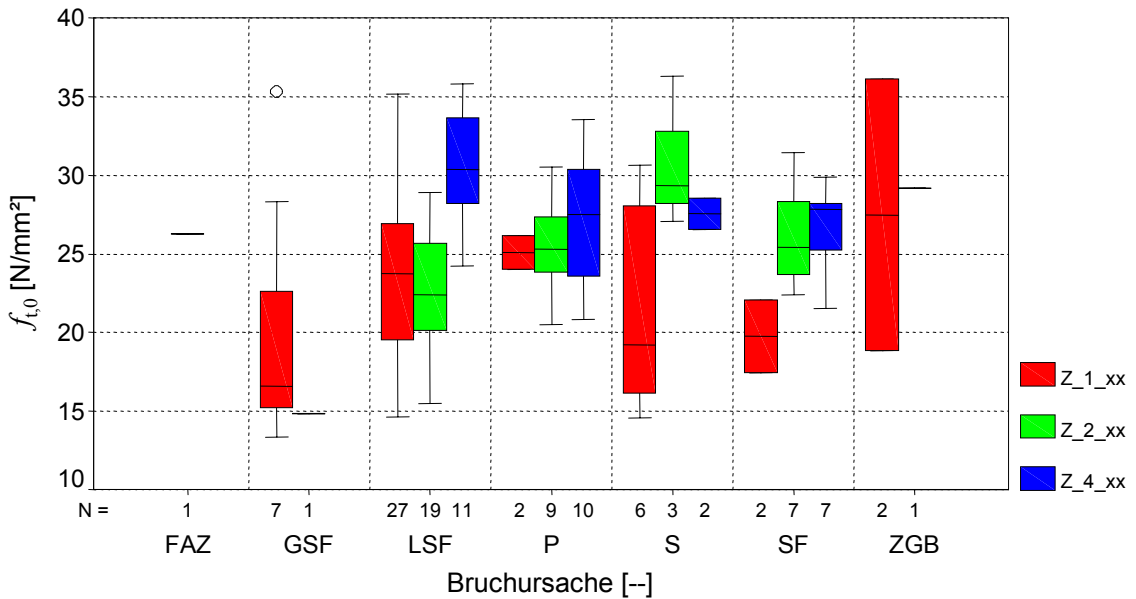


Diagramm 7-5: Gegenüberstellung der induzierenden Bruchursache mit der Zugfestigkeit der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

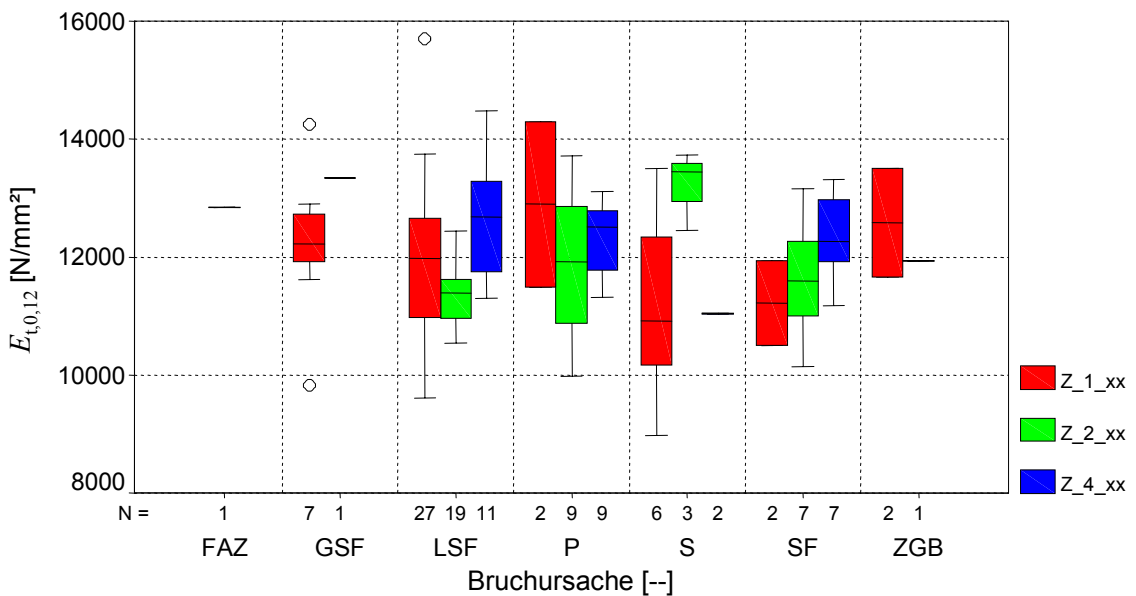


Diagramm 7-6: Gegenüberstellung der induzierenden Bruchursache mit dem Zug-E-Modul der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

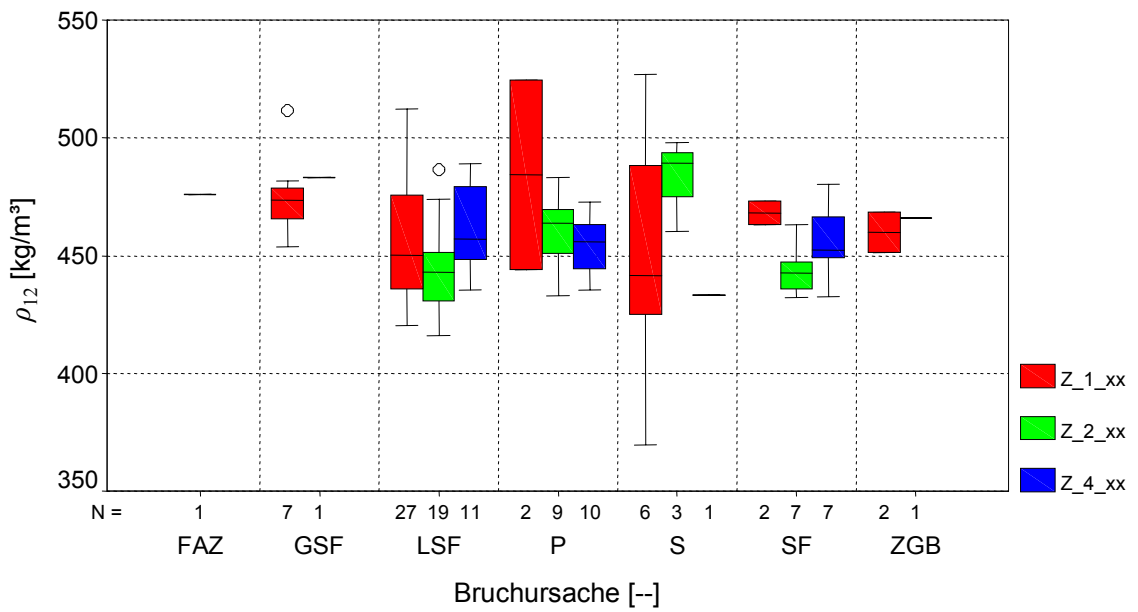


Diagramm 7-7: Gegenüberstellung der induzierenden Bruchursache mit der Rohdichte der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

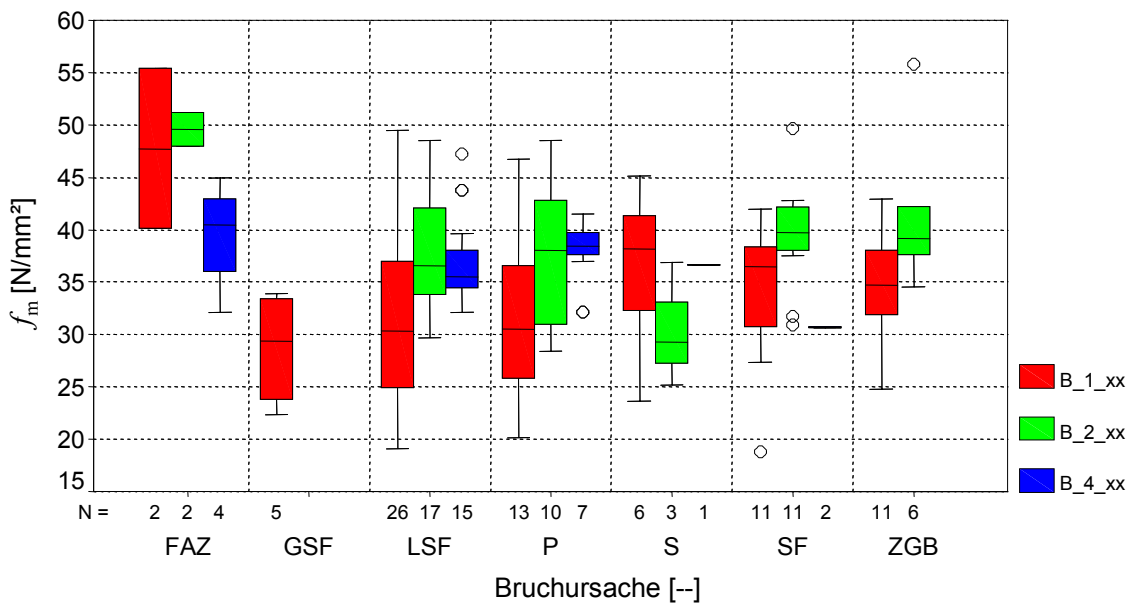


Diagramm 7-8: Gegenüberstellung der induzierenden Bruchursache mit der Biegefestigkeit der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

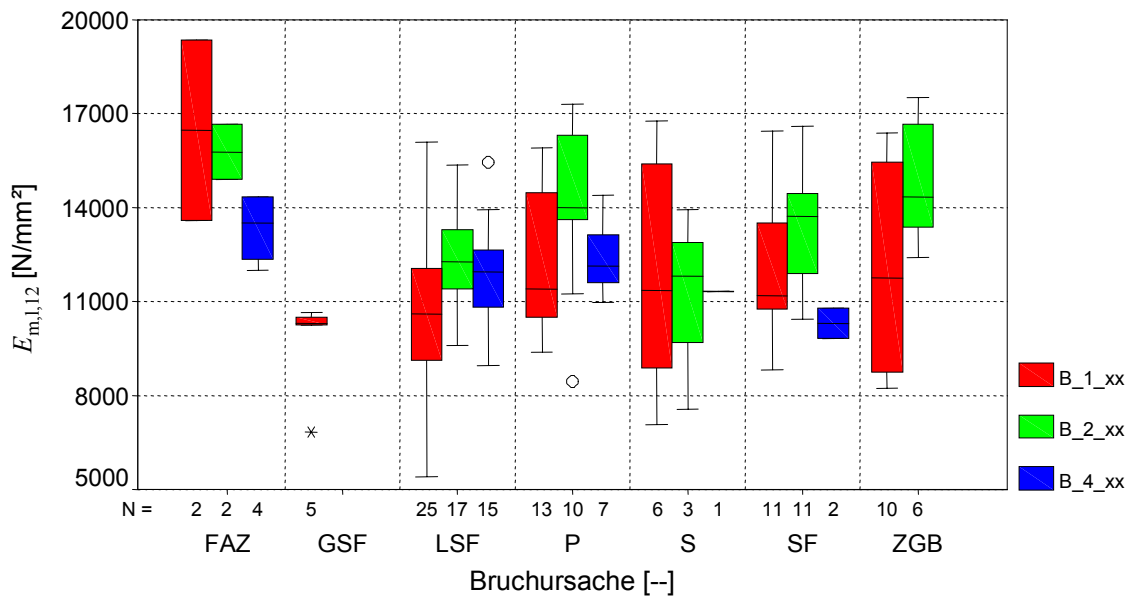


Diagramm 7-9: Gegenüberstellung der induzierenden Bruchursache mit dem Biege-E-Modul der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

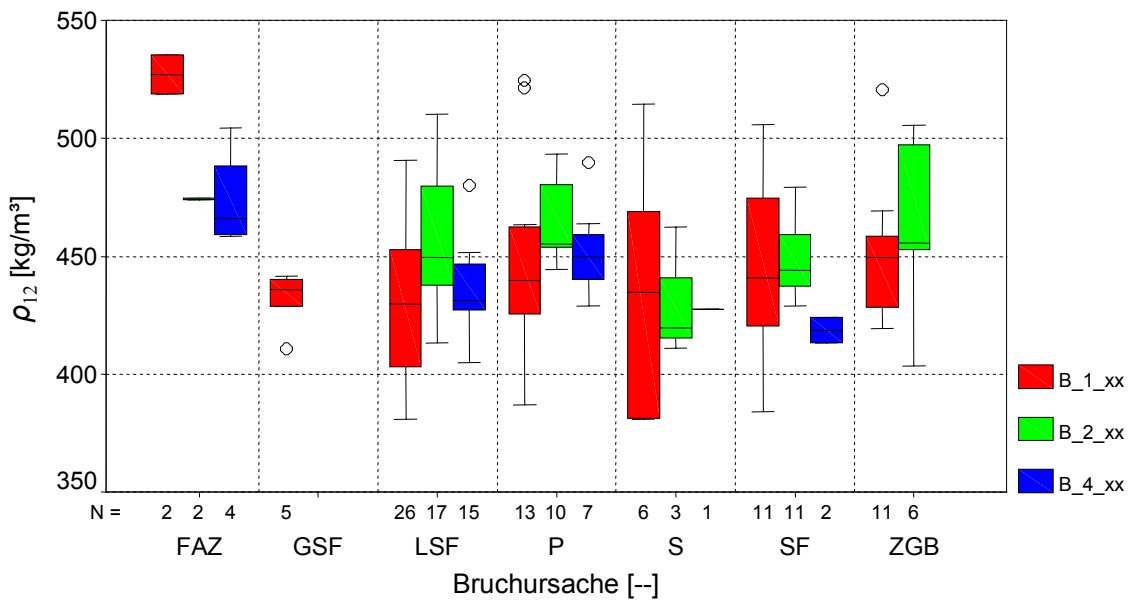


Diagramm 7-10: Gegenüberstellung der induzierenden Bruchursache mit der Rohdichte der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

7.1.2 Auswertungen der Beziehungen und Beziehungsstärken zwischen ausgewählten Kennwerten

Die Ermittlung von Beziehungen und Beziehungsstärken zwischen Kennwerten bildet die Grundlage für Erklärungen von Phänomenen, resultierend aus den Interaktionen zwischen Parametern dieser Kennwerte.

Zu Beginn des Kapitels 7.1.2 dieser Arbeit wurden die Beziehungsstärken zwischen den mechanischen Werten der Einzelkomponenten ermittelt, um anschließend aus eventuell auftretenden Veränderungen der gewonnenen Maßzahlen, wie zum Beispiel dem Korrelationskoeffizienten, in Abhängigkeit der Systemgröße n Schlüsse zu ziehen. Ein Hindernis stellt hier die unterschiedliche Probenanzahl innerhalb der Serien einer Untersuchungsreihe dar, welche maßgebend den Wert des Korrelationskoeffizienten beeinflusst. Zudem ist es anhand weniger Merkmalswerte nur bedingt zulässig allgemeine Schlüsse zu ziehen. Beim Rohstoff Holz kommt hinzu, dass die Materialeigenschaften an sich einer großen Streuung unterliegen, welche zudem durch die Ermittlung eines für sich eingeschränkten Prüfspektrums (nur eine Sortierklasse, definierter Einschnitt, etc.) die Erkennung von Tendenzen stark beeinträchtigt.

Tab. 7-3 und Tab. 7-4 enthalten die Korrelationsfaktoren der Serien Z_{1_xx} und B_{1_xx} . Diagramm 7-11 und Diagramm 7-12 geben die Zusammenhänge zwischen Kennwerten beider Serien, in Form von Streudiagrammen, wieder.

Die errechneten Zusammenhänge zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit (statisch und dynamisch) entsprechen Erfahrungswerten, ebenso die Korrelation zwischen dem dyn. E-Modul und dem statischen E-Modul. Die Rohdichte korreliert erfahrungsgemäß bei Bauholz bzw. Holz in Gebrauchsabmessungen stärker mit der Steifigkeit als der Festigkeit. Dies resultiert aus der Tatsache, dass diese beiden Größen eine Mittelung über den gesamten Querschnitt repräsentieren, wohingegen die Festigkeit nur eine lokale Information wiedergibt. Die negativen Zusammenhänge der mittleren Jahringbreite (*JRB*) mit der Festigkeit, Steifigkeit sowie Rohdichte, ergeben sich aus dem bekannten Umstand, dass bei Nadelhölzern die Rohdichte, und über die positive Korrelation auch die Steifigkeit und Festigkeit, mit zunehmender Jahringbreite abnimmt. Die *JRB* nimmt tendenziell mit dem Abstand vom Mark des Baumes ab. Der erwartete Zusammenhang zwischen der *JRB* und der *STL* ist ein negativer. Aufgrund des sehr geringen Spektrums des Einschnittes und der damit verbundenen geringen Variation der

STL lassen sich die betreffenden Korrelationsfaktoren nicht entsprechend deuten, Aussagen über Korrelationen zwischen den gegebenen Kennwerten und der *STL* sind somit nicht möglich und deshalb in Klammern gesetzt.

Tab. 7-3: Korrelationsfaktoren nach Pearson, Untersuchungsreihe ZUG_60-78, Serie Z_1_xx

ZUG_60-78 Z_1_xx	$f_{t,0}$	$E_{t,0,12}$	$E_{dyn,12,20}$	ρ_{12}	<i>JRB</i>	<i>STL</i>
$f_{t,0}$	1,00	0,67	0,66	0,39	-0,37	(-0,13)
$E_{t,0,12}$	0,67	1,00	0,91	0,77	-0,59	(-0,02)
$E_{dyn,12,20}$	0,66	0,91	1,00	0,77	-0,52	(-0,14)
ρ_{12}	0,39	0,77	0,77	1,00	-0,52	(0,05)
<i>JRB</i>	-0,37	-0,59	-0,52	-0,52	1,00	(0,21)
<i>STL</i>	(-0,13)	(-0,02)	(-0,14)	(0,05)	(0,21)	1,00

Tab. 7-4: Korrelationsfaktoren nach Pearson, Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, Serie B_1_xx

BIEGUNG_80-160 B_1_xx	f_m	$E_{m,1,12}$	$E_{dyn,12,20}$	ρ_{12}	<i>JRB</i>	<i>STL</i>
f_m	1,00	0,70	0,58	0,53	-0,60	(0,09)
$E_{m,1,12}$	0,70	1,00	0,70	0,61	-0,63	(0,06)
$E_{dyn,12,20}$	0,58	0,70	1,00	0,55	-0,56	(-0,08)
ρ_{12}	0,53	0,61	0,55	1,00	-0,67	(0,13)
<i>JRB</i>	-0,60	-0,63	-0,56	-0,67	1,00	(-0,04)
<i>STL</i>	(0,09)	(0,06)	(-0,08)	(0,13)	(-0,04)	1,00

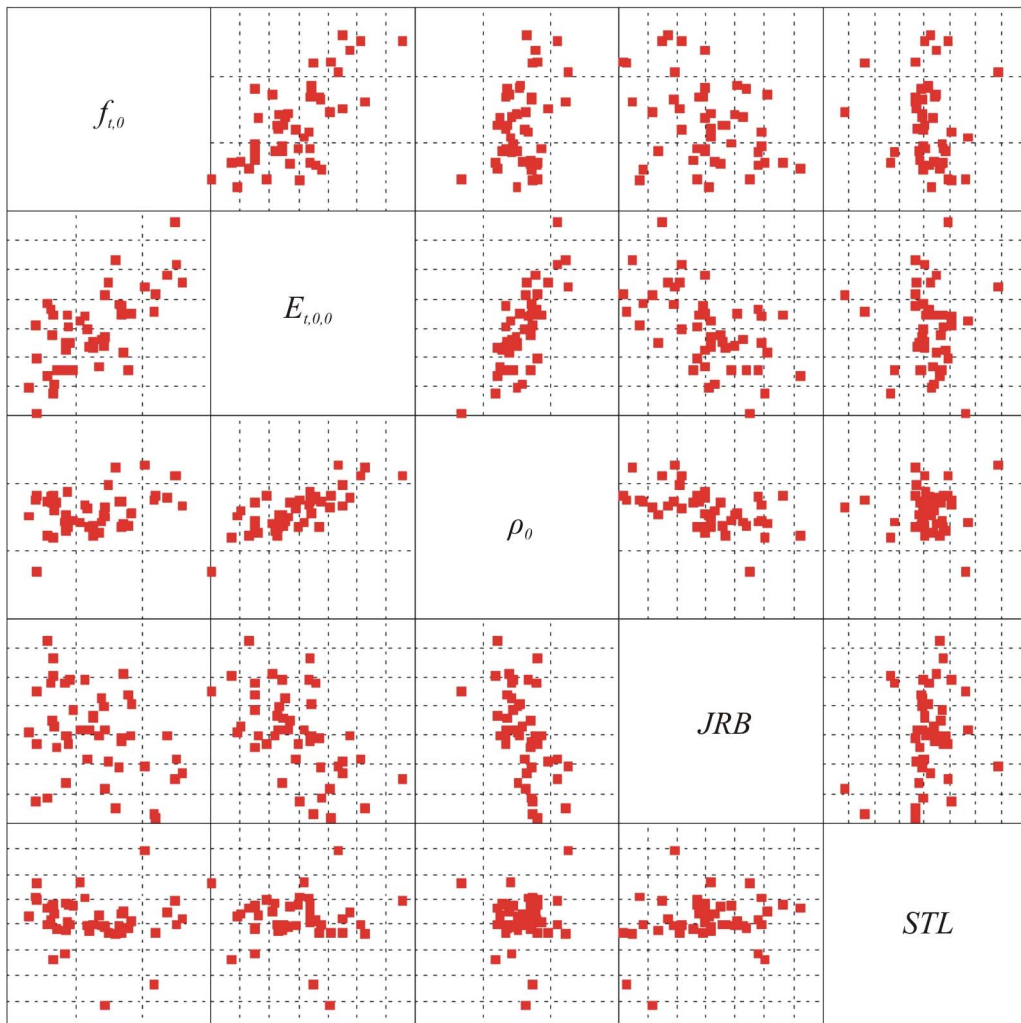


Diagramm 7-11: Matrix-Streudiagramme der Zusammenhänge zwischen mechanischen und physikalischen Größen der Serie Z_1_xx, der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

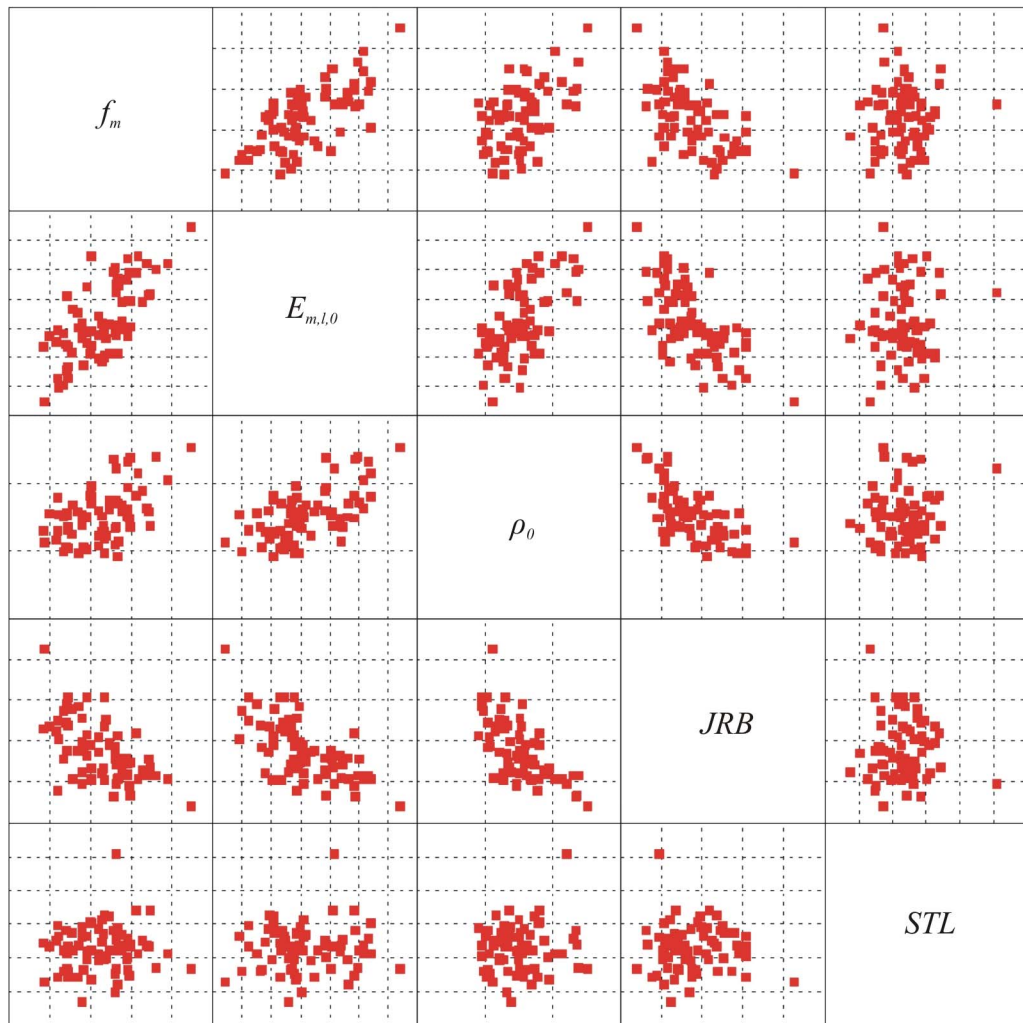


Diagramm 7-12: Matrix-Streudiagramme der Zusammenhänge zwischen mechanischen und physikalischen Größen der Serie B_1_xx, der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

Die Korrelationsfaktoren der weiteren Serien, Z_2_xx, Z_4_xx, und B_2_xx, B_4_xx, wurden ergänzend ermittelt. Ein Vergleich mit jenen Zusammenhängen der Referenzserien Z_1_xx und B_1_xx ergab das erwartete Bild der abnehmenden Faktoren, bedingt durch die abnehmenden Probenumfänge. Ein Vergleich zwischen den Serien einer Untersuchungsreihe ist somit nur bedingt möglich. Es konnten aber, im Rahmen der Interpretation, keine erkennbaren Tendenzen in Bezug der Änderung der Korrelation zwischen zwei Kenngrößen, in Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten n im System, festgestellt werden.

Wie im Kapitel 1 der Versuchstechnik vorab erläutert, wurden die dyn. E-Module jeder Einzelkomponente der Reihen ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160, vor der Verklebung, auf Grundlage der Ultraschalllaufzeit, Rohdichte und Länge der Probekörper,

berechnet. Eine Untersuchung der Korrelationen der Kennwerte Festigkeit, Rohdichte und stat. E-Modul mit dem mittleren, minimalen und maximalen dyn. E-Modul aus den Steifigkeitswerten der Komponenten eines Systems wurde durchgeführt. Die Ergebnisse der Tab. 7-5 und Tab. 7-6 weisen darauf hin, dass der mittlere dyn. E-Modul, errechnet aus der Mittelung der dyn. E-Module aller Komponenten in einem System, die höchsten Korrelationen mit den betrachteten mechanischen und physikalischen Größen aufweist. Dies führt zum Schluss, dass das Systemverhalten der Steifigkeit am Besten über ein paralleles System beschreibbar ist, und somit der Mittelwert, in Abhängigkeit von der Systemgröße, als konstant betrachtet werden kann. Als Resultat ergibt sich für die Steifigkeit ein Zugewinn in der Sicherheit des Mittelwertes und der 5 % Quantile, in Abhängigkeit der Streuungsveränderung, mit Bezug auf die Anzahl der Komponenten n im System.

Tab. 7-5: Korrelationsfaktoren zwischen statistischen Kennwerten des dyn. E-Moduls $E_{dyn,12,20}$ und der Festigkeit, Steifigkeit sowie der Rohdichte, der Untersuchungsreihe ZUG_60-78

ZUG_60-78		$f_{t,0}$	$E_{t,0,12}$	ρ_{12}
Z_1_xx	MW	0,66	0,91	0,77
Z_2_xx	Min	0,26	0,70	0,71
	Max	0,25	0,70	0,61
	MW	<u>0,32</u>	<u>0,90</u>	<u>0,84</u>
Z_4_xx	Min	0,23	0,44	0,24
	Max	0,13	0,81	0,77
	MW	<u>0,28</u>	<u>0,88</u>	<u>0,86</u>

Tab. 7-6: Korrelationsfaktoren zwischen statistischen Kennwerten des dyn. E-Moduls $E_{dyn,12,20}$ und der Festigkeit, Steifigkeit sowie der Rohdichte, der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160

BIEGUNG_80-160		f_m	$E_{m,1,12}$	ρ_{12}
B_1_xx	MW	0,58	0,70	0,55
B_2_xx	Min	0,53	0,62	0,58
	Max	0,59	0,56	0,52
	MW	<u>0,64</u>	<u>0,67</u>	<u>0,62</u>
B_4_xx	Min	0,28	0,33	0,32
	Max	<u>0,54</u>	0,49	0,43
	MW	0,50	<u>0,64</u>	<u>0,57</u>

7.1.3 Erkenntnisse aus der Untersuchung unterschiedlicher statistischer Verteilungsmodelle

Die Bestimmung der 5 % Quantile der Festigkeit wurde mit Bedacht auf die Ermittlung eines dafür geeigneten statistischen Verteilungsmodells vorgenommen. Hierbei wurden quantitative und qualitative Beurteilungen der Anpassung des Modells an die empirischen Daten durchgeführt. Tab. 7-7 und

Tab. 7-8 beinhalten die Zuordnung der statistischen Modelle zur Repräsentierung der betrachteten Kennwerte der einzelnen Serien und Untersuchungsreihen.

Tab. 7-7: Beurteilung der Anpassung der untersuchten statistischen Verteilungsmodelle an die jeweiligen Größen der Untersuchungsreihe ZUG_60-78 (es entsprechen: 1 = Z_1_xx, 2 = Z_2_xx, 4 = Z_4_xx)

ZUG_60-78		NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
ρ_0	FS		1			2,4
	VIS		1			2,4
	UB		1			2,4
$E_{dyn,12,20}$	FS			1		2,4
	VIS			1		2,4
	UB			1		2,4
$E_{t,0}$	FS	1		2		4
	VIS					1,2,4
	UB					1,2,4
$f_{t,0}$	FS	2				1,4
	VIS	2				1,4
	UB	2				1,4

FS Beurteilung der Anpassung der empirischen Daten durch das jeweilige statistische Modell, über den gesamten Funktionsverlauf, anhand der minimalen Fehlersumme der absoluten Differenzen zwischen der empirischen Häufigkeit nach der Formel 5-32 und des jeweiligen Verteilungsmodells

VIS visuelle Beurteilung der Anpassung der empirischen Daten durch das jeweilige statistische Modell, über den gesamten Funktionsverlauf, anhand von QQ-Plots und Residuen-Plots

UB visuelle Beurteilung der Anpassung der empirischen Daten durch das jeweilige statistische Modell, im unteren Bereich des Verteilungsschwanzes (0 bis 10 %), anhand von QQ-Plots und Residuen-Plots

Tab. 7-8: Beurteilung der Anpassung der untersuchten statistischen Verteilungsmodelle an die jeweiligen Größen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160 (es entsprechen: 1 = B_1_xx, 2 = B_2_xx, 4 = B_4_xx)

BIEGUNG_80-160		NV	2p. LNV	3p. LNV	2p. WV	3p. WV
ρ_0	FS			1		2,4
	VIS			1		2,4
	UB			1		2,4
$E_{dyn,12,20}$	FS				1,2	4
	VIS				1,2	4
	UB				1,2	4
$E_{m,l}$	FS	2	1,4			
	VIS		1,4			2
	UB		1,4			2
f_m	FS		4			1,2
	VIS					1,2,4
	UB					1,2,4

- FS Beurteilung der Anpassung der empirischen Daten durch das jeweilige statistische Modell, über den gesamten Funktionsverlauf, anhand der minimalen Fehlersumme der absoluten Differenzen zwischen der empirischen Häufigkeit nach der Formel 5-32 und des jeweiligen Verteilungsmodells
- VIS visuelle Beurteilung der Anpassung der empirischen Daten durch das jeweilige statistische Modell, über den gesamten Funktionsverlauf, anhand von QQ-Plots und Residuen-Plots
- UB visuelle Beurteilung der Anpassung der empirischen Daten durch das jeweilige statistische Modell, im unteren Bereich des Verteilungsschwanzes (0 bis 10 %), anhand von QQ-Plots und Residuen-Plots

Tendenziell ergab sich mit zunehmender Anzahl der Komponenten im System, dass die 3p. WV unter den betrachteten statistischen Verteilungsmodellen die empirisch ermittelten Daten am Besten repräsentiert.

Die Weibullverteilung ist nach Abernethy, 2000 vor allem für Datensätze mit Datenumfängen von $N < 20$ geeignet. Unter dieser Probenanzahl ist eine Beurteilung des repräsentativsten statistischen Modells unter Betrachtung unterschiedlicher Verteilungsformen generell schwierig, die Weibullverteilung durch eine weitgehend sehr gute Anpassung zu bevorzugen. Über einer Probenanzahl von $N > 20$ sollte jedoch ein Vergleich zwischen verschiedenen Modellen vorgenommen werden.

Die Probenumfänge der Serien von ZUG_60-78 und BIEGUNG_80-160 weisen durchwegs fallende Probenanzahlen auf. Es war aufgrund der Versuchsumfänge möglich einen Vergleich mit anderen statistischen Modellen durchzuführen. Trotz allem wurde, anhand der gesetzten Maßstäbe, das 3p. Weibull-Modell als 'best fitting' Modell ausgewählt. Es ist ergänzend anzumerken, dass die Differenzen zwischen den einzelnen Modellen durchwegs sehr gering zu Tage traten.

Diagramm 7-13 beinhaltet Darstellungen der 5 % Quantile der 2p. Modelle, NV, LNV, WV, in Abhängigkeit der jeweiligen Verteilungsparameter, der Lage und der Streuung. Für die NV zeigt sich ein linearer, mit dem Mittelwert und des Variationskoeffizienten ansteigender 5 % Quantilwert. Die 5 % Quantile der 2p. LNV weist ebenfalls einen weitgehend linearen Anstieg, in Abhängigkeit der Parameter Mittelwert und Variationskoeffizient (transformiert aus den Parametern der Normalverteilung) auf, jedoch zeigt sich bei geringen Mittelwerten ein nichtlineares Verhalten. Generell gilt, dass sich die LNV mit ansteigendem Mittelwert der NV annähert, bei geringen Mittelwerten jedoch durch die dezentrale Verteilungsform der sehr steile Anstieg im unteren Verteilungsabschnitt die 5 % Quantile, im Vergleich zur NV, reduziert.

Die 5 % Quantile der Weibullverteilung, in Abhängigkeit des Lageparameters α und des Steigungsparameters β , ist im Diagramm 7-13, rechts dargestellt. Die 5 % Quantile der WV steigt mit zunehmendem α linear an (siehe Diagramm 7-14). Der Formparameter oder auch Steigungsparameter β beeinflusst die 5 % Quantile durch einen mit α zunehmend nicht linearen Funktionsverlauf (siehe Diagramm 7-15). An dieser Stelle sei die Einteilung der Wertebereiche des Parameters β nach Albernethy, 2000 kurz erläutert:

- $\beta < 1,0$ kennzeichnet Frühausfälle
- $\beta = 1,0$ kennzeichnet durchschnittliche, zufällige Ausfälle und somit die durchschnittliche Lebensdauer; die WV entspricht hier der Exponentialverteilung
- $\beta > 1,0$ kennzeichnet Ermüdungsausfälle
- $\beta = 3,44$ hier kann die WV durch die NV approximiert werden

Diese Bereiche können im Wesentlichen den Funktionsabschnitten der 5 % Quantile, in Abhängigkeit von β , im Diagramm 7-13, rechts nachvollzogen werden.

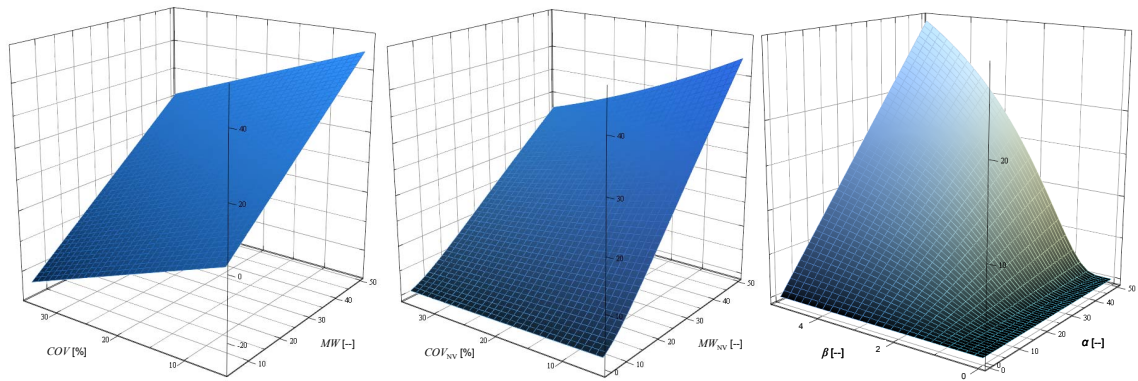


Diagramm 7-13: Bestimmung der 5 % Quantile der NV (links), LNV (Mitte) und WV (rechts) in Abhängigkeit des Lageparameters und der Streuung

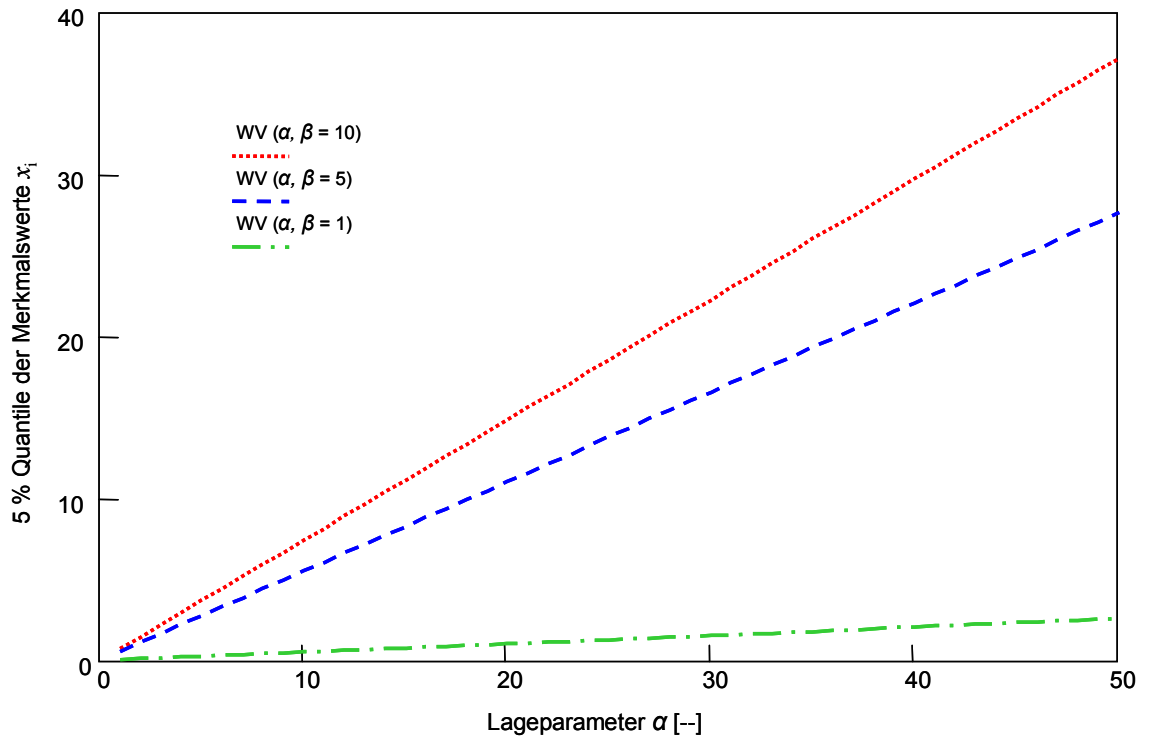


Diagramm 7-14: Bestimmung der 5 % Quantile der WV in Abhängigkeit des Lageparameters α

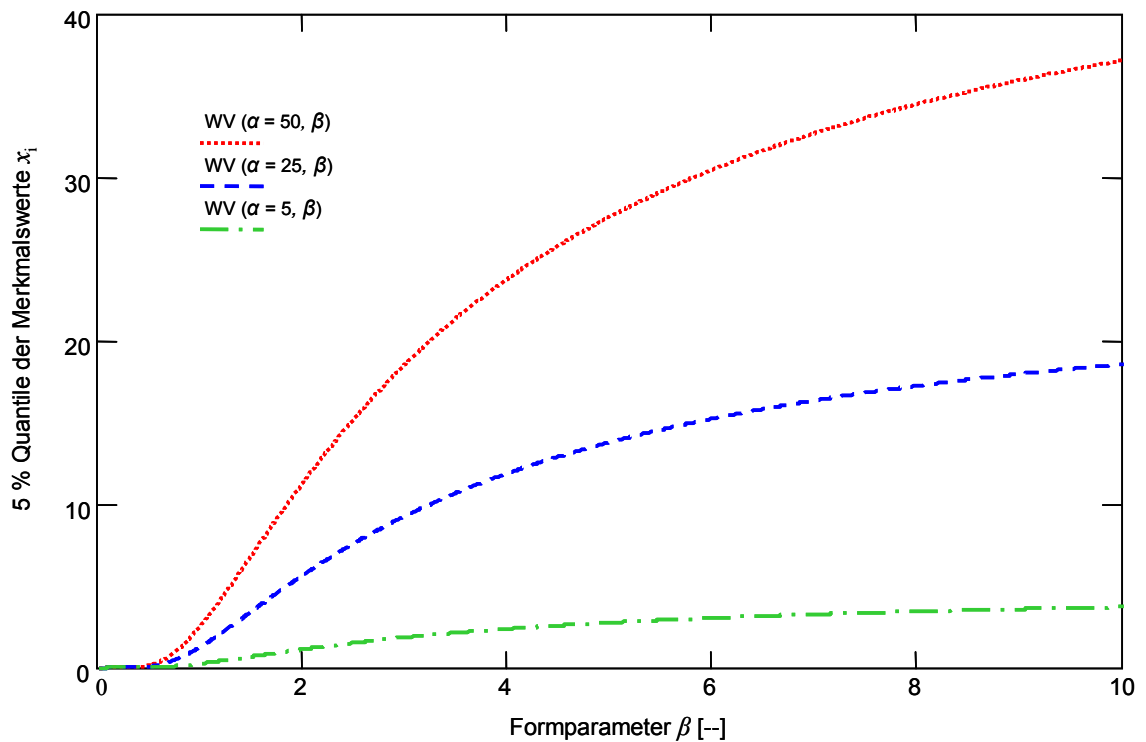


Diagramm 7-15: Bestimmung der 5 % Quantile der WV in Abhängigkeit des Formparameters β

Die Weibullverteilung wurde anhand empirischer Beobachtungen von physikalischen und mechanischen Zusammenhängen hergeleitet, und ist daher ein prädestiniertes Modell zur Beschreibung von Kennwerten aus diesem Bereich.

Auf Basis dieser Untersuchungen und Überlegungen werden die 5 % Quantilwerte der Festigkeit aller Untersuchungsreihen für die weiteren Betrachtungen nach der 3p. WV berechnet.

7.2 Erkenntnisse aus den Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78

Die Untersuchungsreihen_ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 wurden aus Brettern der Sortierklasse MS17 aufgebaut. Ziel dieser Versuche war die Ergründung des Systemverhaltens auf Zug, bei loser, sowie starrer Verbindung zwischen den Komponenten, sowie bei einem weitgehend gezielten Aufbau der Komponenten eines Systems über eine vorhergehende Sortierung der Lamellen nach der Ultraschallgeschwindigkeit, respektive Steifigkeit.

Das Zusammenspiel der Steifigkeit und Festigkeit im Systemverhalten wurde bereits in den Kapiteln 0 und 1 erläutert. Aus diesem Grund wurde hier der Versuch unternommen, den Parameter der Steifigkeit innerhalb der Systeme weitgehend konstant zu halten und somit neue Erkenntnisse aus dem Systemverhalten zu gewinnen. Die Zusammenfassung der Komponenten zu Systemen selbst wurde basierend auf den ermittelten Geschwindigkeiten des Ultraschallimpulses bewerkstelligt. Aus Erfahrung ist bekannt, dass diese Größe sehr gut mit dem statischen Zug-E-Modul korreliert.

Diagramm 7-16 gibt die Verteilung der Probekörper über die Bandbreite der ermittelten Ultraschallgeschwindigkeiten wieder. Auf der Abszisse sind die Geschwindigkeiten aufgetragen. Jeder einzelne Balken repräsentiert eine einzelne Lamelle als Komponente der auf der Abszisse zugewiesenen Systemgröße n . Balken gleicher Höhe innerhalb einer Gruppe entsprechen einem Probekörper. Es wurde Wert auf eine weitgehende Gleichverteilung der Proben innerhalb der Serien beider Untersuchungsreihen gelegt.

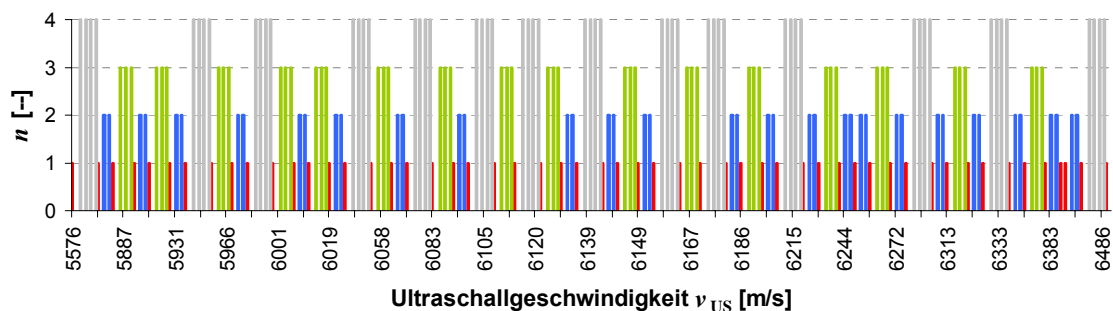


Diagramm 7-16: Bandbreite der Ultraschalllaufzeit-Geschwindigkeit, sowie Darstellung der Verteilung der Probekörper der Serien der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78

Die weiteren Ausführungen der durchgeführten Auswertungen sind den kommenden Kapiteln zu entnehmen.

7.2.1 Kurze Darstellung des Auswerteschemas beider Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, zur Ermittlung der Steifigkeit und Festigkeit einzelner Bruchabschnitte

Während der gesamten Prüfdauer wurde der Verlauf der Kraft sowie der Verformung bis zum Versagen des Systems oder der Einzelkomponente festgehalten. Das Versagen eines Probekörpers selbst galt ab einem Kraftabfall von $> 50\%$ der bis zu diesem Punkt aufgebrauchten Prüflast. Auf Basis dieser Daten wurden in weiterer Folge die

zugehörigen Spannungen und Dehnungen ermittelt, als Beispiel dient die Visualisierung in Diagramm 7-17.

Innerhalb des Prüfvorganges kam es, vor allem bei der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, zu markanten Teilversagensbereichen, gekennzeichnet durch einen Kraftabfall und Anriss oder Teilbruch am Probekörper, und somit zu einem Versagen eines Querschnittsbereiches der Probe. Diese Teilbrüche zeichnen sich in dem Kraft-Wegdiagramm des Probekörpers als abrupten Abfall der Kraft ab. Anhand der aufgezeichneten Daten ist es möglich, den verbleibenden, noch tragenden Anteil des Querschnittes iterativ in der Weise abzuschätzen, dass der Spannungs-Dehnungsverlauf der Probe vor dem Teilbruch tendenziell in den Verlauf der Spannungs-Dehnungsbeziehung nach dem Teilversagen auf gleicher Höhe weiterführt. Dies geschieht in der Annahme, dass ein von Beginn an durchgeführter Zugversuch am verbleibenden Restquerschnitt die ermittelte Spannungs-Dehnungsbeziehung beschrieben hätte. Der iterative Lösungsprozess selbst wird unter Variation der Fläche A der Formalismen zur Bestimmung der Zugfestigkeit und Steifigkeit durchgeführt.

Für den im Diagramm 7-17 dargestellten Probekörper ZL_4_06 ergab sich nach dem ersten Teilversagen somit ein Querschnittsverlust von $4,00 - 3,00 = 1,00$, sprich ein Versagen im Umfang von rund einer Lamelle. Weitere registrierte Teilversagen führten zu Verlusten von 99 % sowie 92 % eines Einzelquerschnittes von Lamellen. Erst ab rund 1,09 verbleibenden Lamellen, sprich ab einer Restfläche des geprüften Systems von rund 25 %, versagte der Querschnitt ZL_4_06 zur Gänze bzw. überschritt das Abbruchkriterium der Zugprüfeinrichtung mit einem Kraftabfall von > 50 % der letzten Prüfkraft. Des Weiteren kann man im Diagramm 7-17 ersehen, dass nach dem ersten Teilbruch eine weitere Laststeigerung, ohne den in der Auswertung mitberücksichtigten Querschnittverlustes, möglich war. Nach dem zweiten Teilversagen konnte die maximale Belastungsgrenze des Gesamtsystems, mit einem Restquerschnitt von rund 50 % nahezu erreicht werden, bevor das System durch einen dritten Teilbruch völlig versagte. Die Steifigkeits- und Festigkeitswerte der Abschnitte des Teilversagens, sowie die Kennwerte nach der Berechnung der ON EN 408:2005 der Probe ZL_4_06 sind der Tab. 7-9 zu entnehmen.

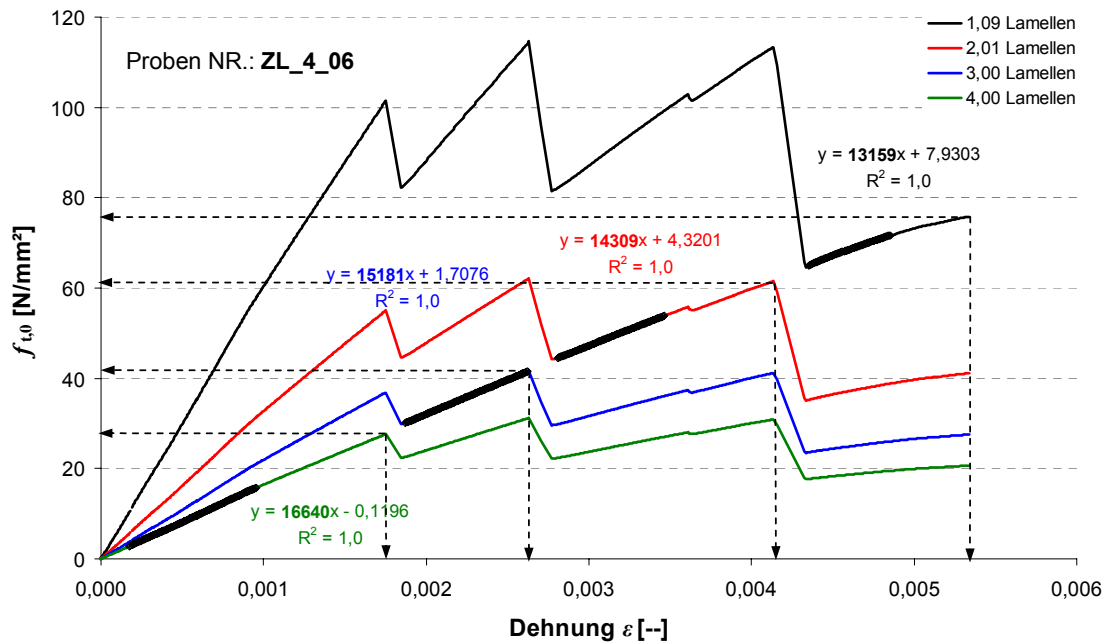


Diagramm 7-17: Spannungs-Dehnungsdiagramm des Probekörpers ZL_4_06, der Serie ZL_4_xx, Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

Tab. 7-9: Steifigkeits- und Festigkeitswerte markanter Bruchabschnitte der Probe ZL_4_06, Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

ZL_4_06	Querschnittsfläche vor dem Versagen [%]	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{t,0}$ [N/mm ²]
Prüfwert nach der ON EN 408:2005	100,0 %	31,2	16640
1. Teilversagen	100,0 %	27,6	16640
2. Teilversagen	75,0 %	41,6	15181
3. Teilversagen	50,3 %	61,5	14309
4. Teilversagen	27,3 %	75,6	13159

Alle Probekörper der Reihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, auch jene der Einzelkomponenten, wurden dieser Auswertungsmethode unterzogen. Ergänzend wurden, anhand der gewonnenen Information des Querschnittes und der Steigung der Spannungs-Dehnungsbeziehung, die E-Module sowie die Spannungen der verbleibenden Restquerschnitte ermittelt. Die Ergebnisse der Steifigkeit der Serien ZL_4_xx und ZK_4_xx sind Diagramm 7-18 und Diagramm 7-19 zu entnehmen.

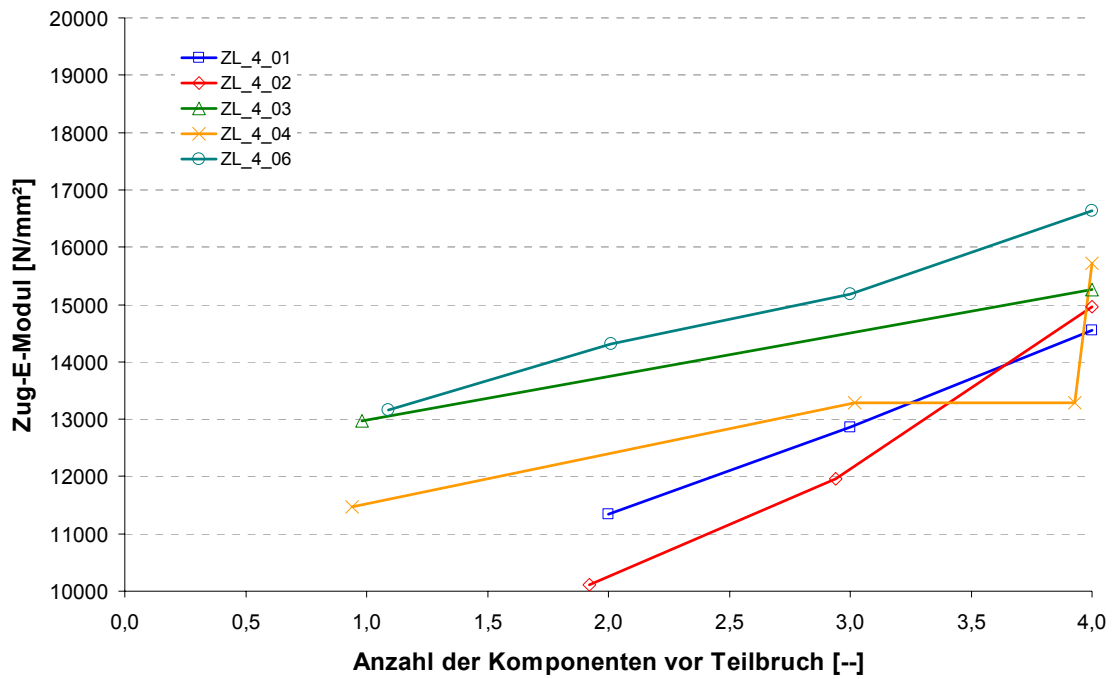


Diagramm 7-18: Veränderung des Zug-E-Moduls in Abhängigkeit des (Rest-) Querschnittes des Probekörpers vor einem weiteren (Teil-) Versagen, Serie ZL_4_xx der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

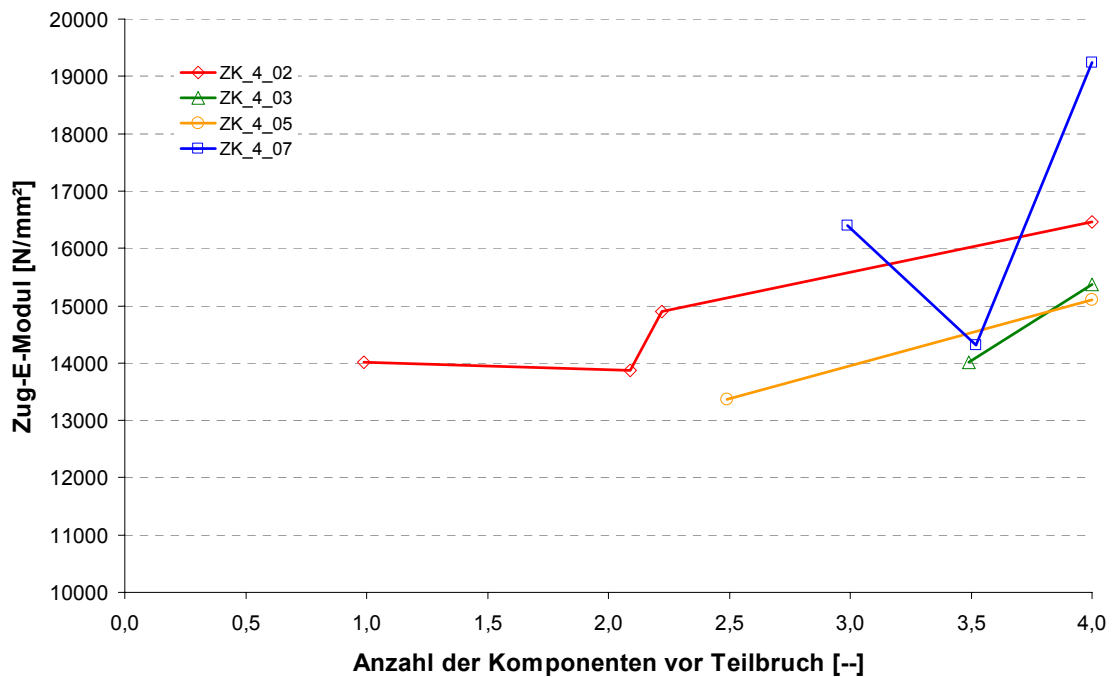


Diagramm 7-19: Veränderung des Zug-E-Moduls in Abhängigkeit des (Rest-) Querschnittes des Probekörpers vor einem weiteren (Teil-) Versagen, Serie ZK_4_xx der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-7

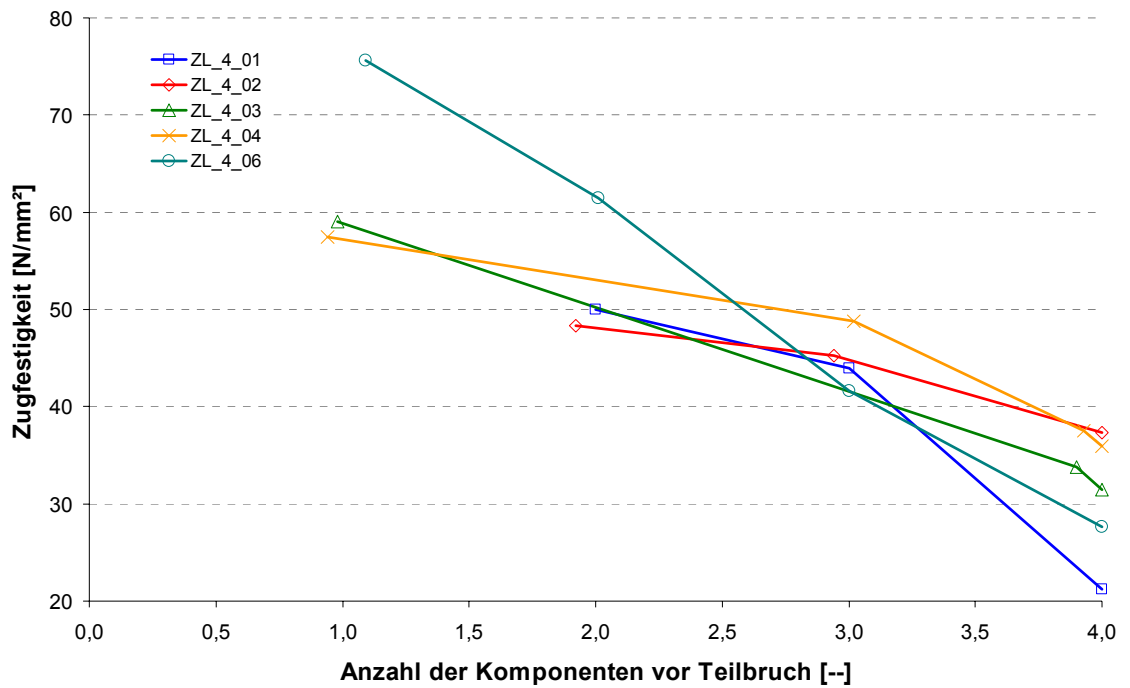


Diagramm 7-20: Veränderung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des (Rest-) Querschnittes des Probekörpers vor einem weiteren (Teil-) Versagen, Serie ZL_4_xx der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

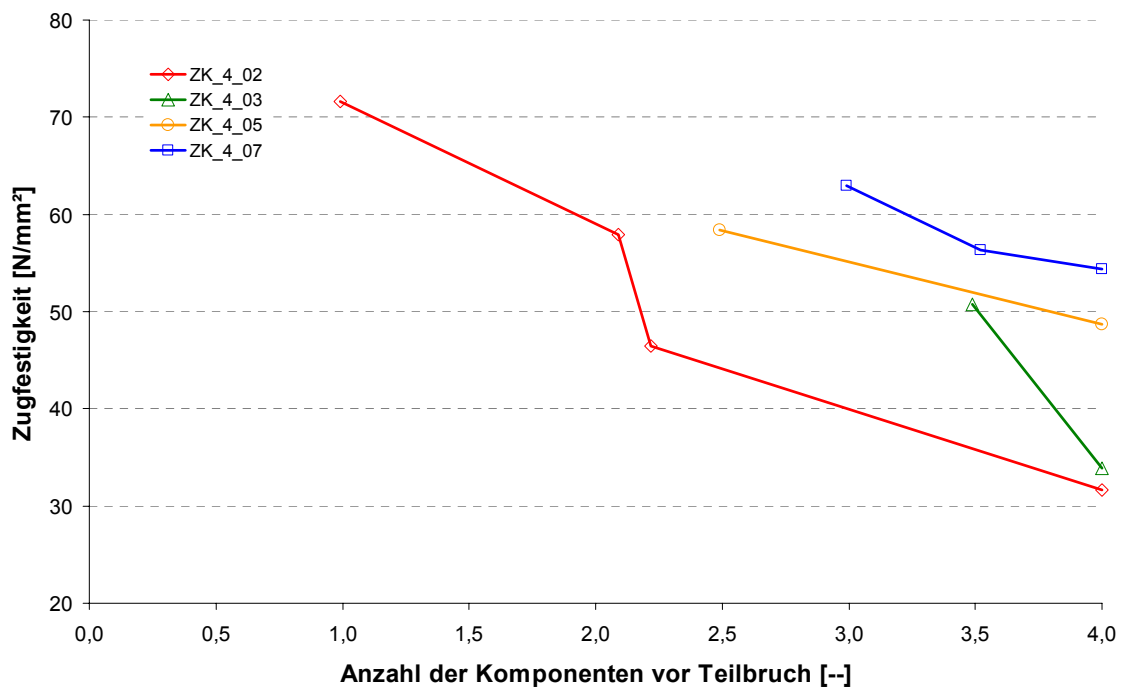


Diagramm 7-21: Veränderung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des (Rest-) Querschnittes des Probekörpers vor einem weiteren (Teil-) Versagen, Serie ZK_4_xx der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78

Tendenziell sinkt der E-Modul mit der Anzahl der Teilbrüche. Dies bestätigt das 'load sharing' Verhalten, welches bereits im Kapitel 3.1.1 erläutert wurde. Aufgrund der Tatsache, dass die Steifigkeit der Restquerschnitte einen Mittelwert der Elemente und Komponenten im verbleibenden System darstellt, ist davon auszugehen, dass der E-Modul des versagten Querschnittes im Verhältnis der Querschnittsflächen (Anteil versagte Fläche und Anteil der Querschnittsfläche vor dem Teilbruch) höher lag, und in folge dessen mehr Belastung auf sich zog. Die Bestätigung findet sich auch in den abnehmenden Steifigkeitswerten der Abschnitte darauf folgender Teilbrüche.

Das 'load sharing' wird aber auch durch die ansteigenden Festigkeitswerte der Restquerschnitte, im Vergleich zum Gesamtquerschnitt, sichtbar. Auch hierbei ist anzumerken, dass die Belastung auf den Querschnitt im Verhältnis der Flächenanteile höher lag als jene des verbleibenden Systems. Die Ergebnisse der Serien ZL_4_xx und ZK_4_xx hierzu sind in Diagramm 7-20 und Diagramm 7-21 dargestellt.

Das Zusammenspiel der höheren Steifigkeit und der damit verbundenen erhöhten Belastung führten, trotz des anzunehmenden ebenfalls gesteigerten Festigkeitspotentials schlussendlich zum Teilversagen des entsprechenden Bereiches des Systems. Eine vertiefende Betrachtung des 'load sharing' ist dem späteren Kapitel 7.4 gewidmet.

Weiterführende Auswertungen auf Basis der Daten der in diesem Abschnitt vorgestellten Auswertungsmethode sind den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen. Es sei darauf hingewiesen, dass durch die beschriebene Methode der Ermittlung des Restquerschnittes keine quantifizierte Bewertung der Ergebnisse stattfinden kann. Die Vorgangsweise entspricht den gegebenen Möglichkeiten dieses Teilprojektes und dient vordergründig dem Aufzeigen von Tendenzen im Systemverhalten, sowie einer Abschätzung des 'avalanche' Ansatzes aus der Thematik von Faserbündelmodellen (FBM) (siehe Kapitel 3.2.6). Anhand dieser Ergebnisse ist es möglich einen Einblick in das Versagen von Teilbereichen innerhalb eines Systems zu erhalten, sowie einen Eindruck dessen zu gewinnen, wann es zu einem Totalversagen ('avalanche failure') innerhalb des Systems kommt.

Die Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse ist nur begrenzt auf den konstruktiven Einsatz übertragbar. Die Versuche im Labor wurden über Öldruck gesteuert, sprich aus einer Mischung aus Kraft und Wegsteuerung, durchgeführt. Ein Teilversagen führt somit, aufgrund der kurzzeitig erhöhten Verformung resultierend aus der abfallenden Be-

lastung, in wesentlich weniger Fällen zum Totalversagen. In Konstruktionen selbst kommt es durch eine verbleibende, sich zum Teil auch steigernde Last zu keiner kurzfristigen Belastungsabnahme, die Last wird kraftgesteuert in die Konstruktion eingebracht. Jedoch kann ein 'Auffangen' der Traglast der versagten Abschnitte in Form von Umlagerungen in intakte Bereiche sehr wohl auch zu einer weiteren möglichen Steigerung des Tragvermögens im Gesamtsystem führen.

7.2.2 Darstellung des Verlaufes der Steifigkeiten und Festigkeiten der einzelnen Serien der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78

Vor Beginn der Erläuterung der Ergebnisse aus den bewerteten Abschnitten der Teilbrüche ist in diesem Kapitel eine Gegenüberstellung der Kennwerte der Steifigkeit und Festigkeit beider Untersuchungsreihen dargelegt. Diagramm 7-22 enthält die Mittelwerte der E-Module, sowie die Mittelwerte und 5 % Quantile der Festigkeiten (nach der 3p. WV) aller Serien, getrennt nach den Reihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78. Die Steifigkeitswerte liegen erwartungsgemäß sehr eng beieinander. Die Sortierung nach der Ultraschallgeschwindigkeit der einzelnen Bretter führte somit zum gewünschten Ergebnis. Die Differenzen der Mittelwerte der Zugfestigkeiten beider Untersuchungsreihen steigen tendenziell mit der Anzahl der Komponenten im System an. Die Zugfestigkeit der starr verbundenen Systeme erhöht sich leicht, wohingegen die mittlere Zugfestigkeit der lose verbundenen Systeme abfällt. Dies spiegelt sich auch in den 5 % Quantilwerten wieder. Trotz verringerter Streuung erhöht sich die 5 % Quantile der Zugfestigkeit der Reihe ZUG_ZL_40-78 erst ab der Serie ZL_4_xx, gegenüber dem Referenzwert der Serie ZL_1_xx.

Die fehlende Möglichkeit der erzwungenen Lastumverteilung innerhalb der Komponenten und Elemente eines Systems im Falle einer losen, nur über Endeinspannung miteinander verbundenen Systemkomponenten, führt in der Folge zu einer verringerten Ausprägung des Systempotentials. Tendenzen dieses Ansatzes sind ebenso den Verläufen der Steifigkeitswerte zu entnehmen. Trotz des anzunehmenden idealen parallelen Systemverhaltens sinkt der Mittelwert der Steifigkeit der Reihe ZUG_ZL_40-78, wohingegen er bei der Reihe aus Systemen von miteinander starr verbundenen Komponenten leicht ansteigt. Zu berücksichtigen ist hier eine eingeschränkte Aussagekraft resultierend aus dem geringen Prüfumfang.

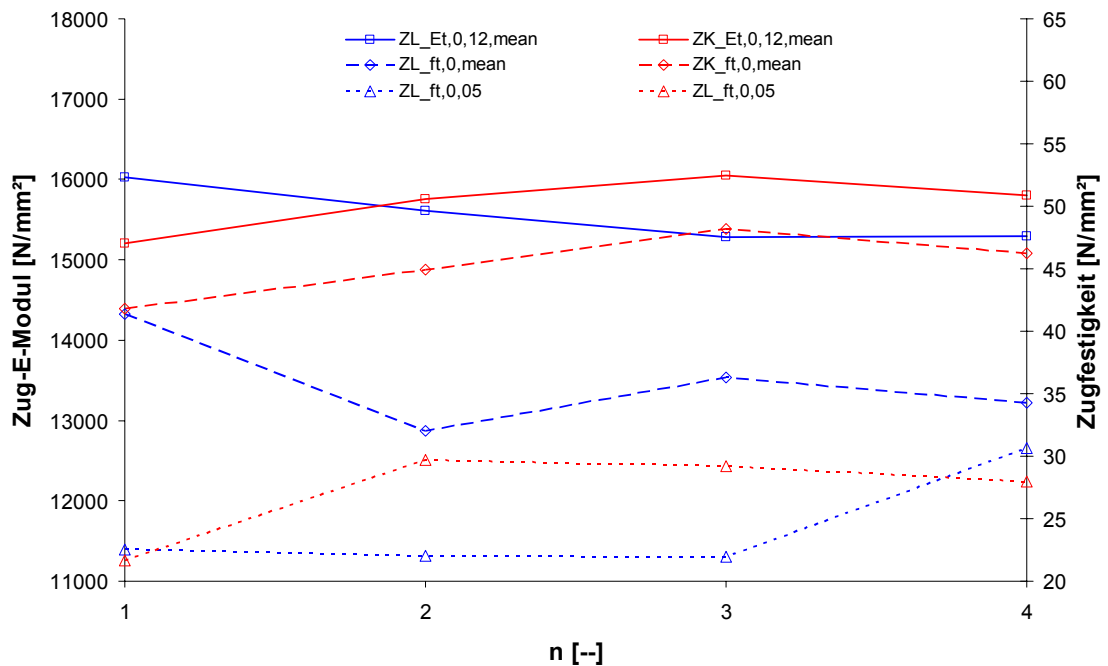


Diagramm 7-22: Mittelwerte der Steifigkeiten, sowie Mittelwerte und 5 % Quantile der Festigkeiten der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, in Abhängigkeit der Komponentenanzahl im System

Die Darstellungen (Diagramm 7-23 bis Diagramm 7-27) beinhalten eine Gegenüberstellung der Mittelwerte der Festigkeiten und Steifigkeiten von Gruppen nahezu gleicher Steifigkeit. Die Gruppierung wurde jeweils innerhalb eines eingeschränkten Ultraschallgeschwindigkeitsbereiches (siehe Diagramm 7-16) vorgenommen, und besteht aus 3 bis 4 Probekörpern der Referenzserien, ZL_1_xx sowie ZK_1_xx, 1 bis 2 Proben der Serien ZL_2_xx sowie ZK_2_xx, und jeweils einer Probe der Serien ZL_3_xx, ZL_4_xx, bzw. ZK_3_xx und ZK_4_xx. Somit kann nur bei den Referenzserien von einem Mittelwert, im Sinnen der Definition, gesprochen werden. Insgesamt konnten anhand der gewerteten Probenanzahl 5 Gruppen gebildet werden. Die Gruppen G4 und G7 mussten aufgrund unvollständiger Daten in einer der beiden Untersuchungsreihen aus dem Vergleich ausgeschieden werden.

Die Diagramme der Steifigkeiten geben weitestgehend einen sehr gleichmäßigen, und zum Teil sogar übereinstimmenden Verlauf der Kennwerte beider Untersuchungsreihen wieder. Tendenziell überragt die mittlere Steifigkeit der miteinander starr verbundenen Probekörper jene der Systeme aus Komponenten ohne flächige Verbindung.

Die Funktionsverläufe der Festigkeiten sind zum Teil versetzt gleichläufig, andererseits aber auch gegenläufig. Tendenziell übersteigen die Festigkeitswerte der Reihe ZUG_ZK_40-78 deutlich jene der Reihe ZUG_ZL_40-78, obwohl, die Serie ZK_1_xx oftmals einen niedrigere mittlere Festigkeit aufweist als die Serie ZL_1_xx.

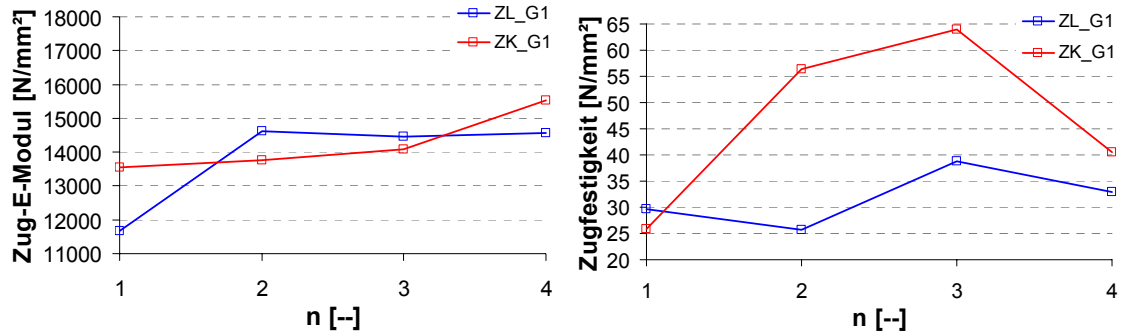


Diagramm 7-23: Mittelwerte der Steifigkeiten und Festigkeiten der Steifigkeitsgruppe G1, der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, in Abhängigkeit der Komponentenzahl im System

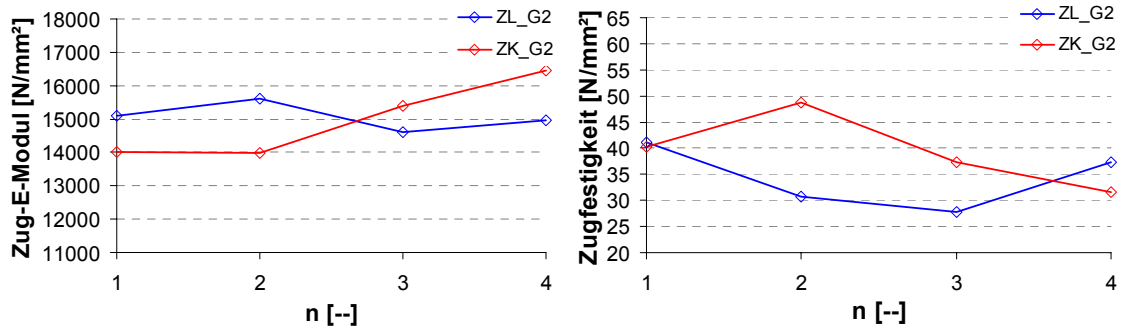


Diagramm 7-24: Mittelwerte der Steifigkeiten und Festigkeiten der Steifigkeitsgruppe G2, der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, in Abhängigkeit der Komponentenzahl im System

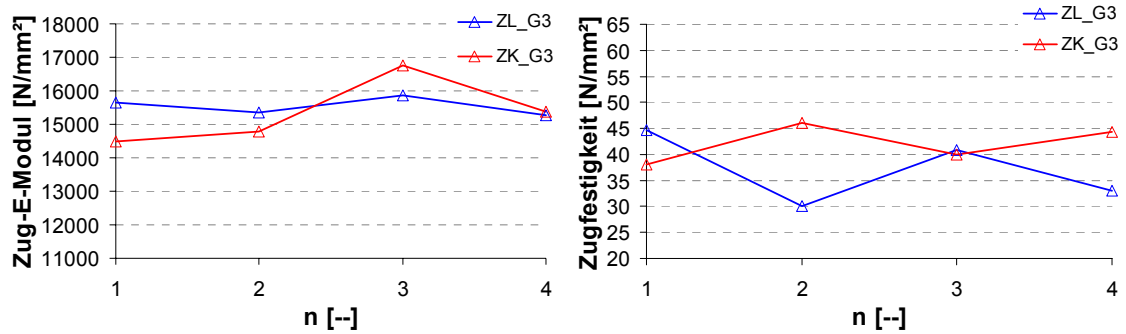


Diagramm 7-25: Mittelwerte der Steifigkeiten und Festigkeiten der Steifigkeitsgruppe G3, der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, in Abhängigkeit der Komponentenzahl im System

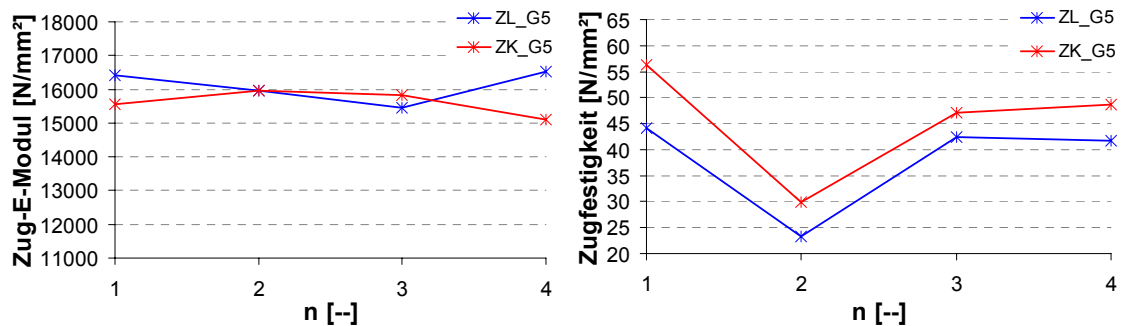


Diagramm 7-26: Mittelwerte der Steifigkeiten und Festigkeiten der Steifigkeitsgruppe G5, der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, in Abhängigkeit der Komponentenzahl im System

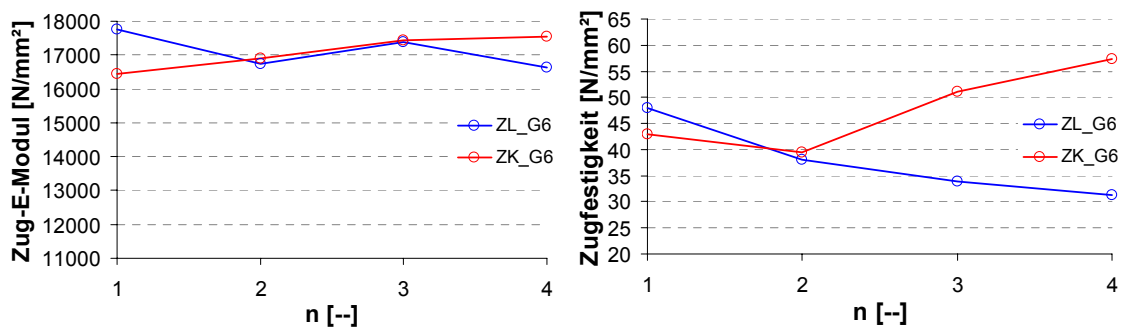


Diagramm 7-27: Mittelwerte der Steifigkeiten und Festigkeiten der Steifigkeitsgruppe G6, der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, in Abhängigkeit der Komponentenzahl im System

Zusammenfassend konnte auf Basis des Systemaufbaues von über Ultraschallgeschwindigkeit vorsortierten Brettern eine Steifigkeitssortierung durchgeführt werden. Deutlich zu erkennen ist auch der mit der Gruppennummer G1 bis G6 ansteigende Steifigkeitswert. Die Erhöhung der Festigkeit der Referenzserien ZL_1_xx und

ZK_1_xx ist hingegen mit zunehmender Gruppennummer nur unausgeprägt dargestellt, und reflektiert im weiteren Sinne die Streubreite der Korrelation zwischen dem E-Modul und der Festigkeit.

Der Unterschied des Festigkeitspotentials der beiden unterschiedlichen Systemaufbauten ist deutlich erkennbar, aufgrund der geringen Probenanzahl jedoch nicht quantifizierbar. Eine flächige, starre Verbindung von Komponenten zu Systemen ist, aufgrund des erzielbaren höheren Systempotentials, deutlich zu bevorzugen. Dies wird über eine erzwungene Kraftabtragung ('load sharing') entlang der Komponenten bewirkt. Eine Berücksichtigung dieses Umstandes ist bereits Teil der Regelungen der Normen ON EN 1995-1-1:2006, ON EN 1995-2:2005, SIA 265:2003, ON DIN 1052:2004 und der enBR:2005 (siehe Kapitel 4.1).

7.2.3 Untersuchungen der Verhältnisse Querschnittsfläche zur Kraft in definierten Abschnitten des Kraft-Weg Diagramms

Dieser Abschnitt widmet sich der näheren Betrachtung von Beziehungen zwischen der Kraft und der jeweiligen Querschnittsfläche von für die Auswertung eingegrenzten Abschnitten des Kraft-Weg Diagramms, in Abhängigkeit der Systemgröße n .

Diagramm 7-28 und Diagramm 7-29 enthalten Box Plots der Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78. In den Darstellungen sind die Restquerschnittsfläche beim Erreichen des Abbruchkriteriums der Versuchsdurchführung mit einem Lastabfall $> 50\%$ ($A_{LA>50\%}$), sowie die Beziehung des Restquerschnittes im Bereich der maximalen Systembelastung (A_{Fmax}), und schlussendlich eine Darlegung der Kraft bei Versuchsabbruch, im Verhältnis der maximalen Systemtraglast ($F_{LA>50\%}$) dargestellt.

Die beiden Diagramme weisen deutliche Unterschiede in den Ausprägungen und dem Verlauf der oben beschriebenen Kennwerte, in Abhängigkeit der Anzahl n der Komponenten im System, auf. Dem Diagramm 7-28 (Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78, Systeme aus lose miteinander verbundenen Komponenten) ist ein starker Abfall der Relativfläche $A_{LA>50\%}$, verbunden mit einer stark reduzierten Variation, zu entnehmen. Der Abfall der verbleibenden Querschnittsfläche beim versuchstechnisch ermittelten Systemversagen spiegelt die mit zunehmender Systemgröße ebenfalls ansteigende Anzahl von Teilbrüchen (TB) wieder. Der Systemaufbau selbst ist gekennzeichnet

durch eine fehlende kontinuierliche Koppelung der Komponenten und damit verbundenen ungezwungenen Lastverteilung untereinander. Daraus resultiert ein reduzierter Ausgleich welcher nur bedingt über die Einspannung der Prüfkörper in der Klemmeinrichtung aus der weitgehend parallelen Führung gegebener gleicher Verformungen zu Tage tritt. Innerhalb der freien Prüflänge ist es jeder Einzelkomponente möglich, über die Ansammlung merkmalsbehafteter (respektive geringeren Steifigkeit und Festigkeit) und merkmalsfreier Elemente (respektive höheren Steifigkeit und Festigkeit) einen Ausgleich der Einzelverformungen über die aufgezwungene Gesamtverformung zu erreichen. Trotzdem kommt es zu ausgeprägten Teilversagen, welche nicht notwendigerweise ein sofortiges Systemversagen induzieren. Vielmehr steigt die Anzahl von Teilbrüchen, wie bereits vermerkt, mit der Systemgröße tendenziell, aber abflachend an.

Mit zunehmender Anzahl n der Komponenten im System nimmt auch der verbleibende Querschnittsanteil im Bereich der maximalen Systemtraglast ab, wobei hier die Streuung der Werte ansteigt. So beträgt der Median der Querschnitte $A_{F_{\max}}$ der Serie ZL_4_xx rund 86 % der Systemfläche, wobei Werte im Bereich von 75 % bis 98 % beobachtet worden sind. Daraus ist ersichtlich, dass die Fähigkeit des Systems eine weitere äußere Laststeigerung trotz verringertem Tragquerschnitt aufzunehmen, mit der Anzahl lose verbundener Komponenten zunimmt, diese Ausprägung aber auch durch die ansteigende Streuung der Werte $A_{F_{\max}}$ mit einer zunehmend in Betracht zu ziehenden Unsicherheit belegt ist. Anhand dieser Darstellung kann der in der Literatur von Rouger und Barrett, 1995, Kloster et al., 1997, Turcotte et al., 2002, Dill-Langer et al., 2003, Hidalgo, 2003, Pradhan und Chakrabarti, 2004, und Kim und Kvam, 2004 genannte Ansatz eines Mehrfachteilversagens vor einem Systemversagen ('avalanche failure') trotz steigender Systembelastung von Außen, bestätigt werden. Eine Betrachtung des Systemausfalles bei bereits einem Teilversagen, wie von Bakht und Jaeger, 1991 oder nach den Regelungen des SIA 265:2003 postuliert, ist im Rahmen der eingeschränkten Aussagekraft bei gegebenem Probenumfang, und im Sinne des probabilistischen Sicherheitskonzeptes nicht von der Hand zu weisen, mit Zunahme der Systemgröße n aber im Sinne einer ehrlichen Betrachtung des Systemverhaltens loser Komponenten zu berücksichtigen.

Der Verlauf von $F_{LA>50\%}$ ist ebenfalls mit ansteigendem n degressiv, und deutet auf eine zunehmende Anzahl und Größe von Teilbrüchen nach Erreichung des maximalen

Systemtragvermögens hin. Der Median der Serie ZL_4_xx beträgt rund 54 %, sprich bei Versuchsabbruch wurde nur mehr eine Kraft von 54 % des maximalen Tragvermögens des Systems erreicht, bei jedoch in diesem Diagramm nicht dargestellten stark verminderten verbleibenden Restquerschnittes.

Die Eigenschaft von Bauteilen nach einem Teilversagen weiterhin Last in Verbindung mit einer großen Verformung abzutragen ist, im Hinblick auf die Einbindung von Systemen aus parallelen, zueinander ohne Abstand angeordneten Komponenten, als Teil der lastabtragenden Struktur, welche über lastverteilende Strukturen miteinander verbunden sind, als sehr positiv und wünschenswert zu beurteilen. Durch den Steifigkeitsabfall und dem damit verbundenen erhöhten Verformungsvermögen kommt es durch 'load sharing' zu 'load redistribution' auf noch intakte Bauteile höherer Steifigkeit, und somit zum gewünschten Ausgleich der Traglast bei nicht notwendigerweise gleich verteilten Belastungen.

Betrachtet man zum Vergleich das Diagramm 7-29, der Systeme aus starr miteinander verbundenen Komponenten, präsentiert sich ein, im Vergleich zum Diagramm 7-28 sehr differentes Bild. Im Wesentlichen sind die tendenziell mit der Systemgröße n abfallenden Kennwerte $A_{LA>50\%}$, A_{Fmax} und $F_{LA>50\%}$ erkennbar, jedoch in stark reduzierter Ausprägung. Generell ist eine Loslösung des Wertefeldes der ermittelten Relationen vom 100 % Level nicht gegeben. Zudem nimmt die Streuung von $A_{LA>50\%}$ mit n zu. Die Serie ZK_2_xx beinhaltet zudem nur 2 Werte von $A_{LA>50\%}$ und A_{Fmax} unter 100 %. Das Systemversagen fand durchwegs auf dem Niveau der maximalen Systemtraglast statt. Generell ist das Versagen der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78 einer spröden Materialcharakteristik zuzuweisen, und somit deutlich von der Reihe ZUG_ZL_40-78 zu unterscheiden. Da die Probekörper derselben Grundgesamtheit von Lamellen entstammen, sind die erkennbaren Differenzen auf die Unterschiede der Verbindung der Komponenten untereinander zurückzuführen. Das weitgehende Verbleiben der untersuchten Kennwerte $A_{LA>50\%}$, A_{Fmax} und $F_{LA>50\%}$ dieser Untersuchungsreihe am Niveau von rund 100 % weist auf einen nahezu idealen Spannungs- und Dehnungsausgleich unter den über Zwang miteinander verbundenen Komponenten und Elementen hin. Aus den aufgezeichneten Daten der Prüfprotokolle ist des Weiteren ersichtlich, dass die Abschnitte der Versagensstelle innerhalb der Komponenten der Systeme ZUG_ZL_40-78 generell größere Abstände zueinander aufweisen als jene der Reihe ZUG_ZK_40-78. Dies ist wiederum durch die örtliche Konzentration von Spannungs-

spitzen und Umlagerungseffekten aus 'load sharing' und 'load redistribution' starr verbundener Komponenten erklärbar und deutet in dieser Charakteristik auf eine vorwiegende lokale Lastverteilung, nach dem 'local load sharing' (LLS) hin. Hingegen führt die Möglichkeit des Ausgleiches von Spannungen innerhalb einer Komponente über die gesamte freie Prüflänge von lose, diskontinuierlich gekoppelten Systemkomponenten zu einem nahezu Versagen des schwächsten Querschnittsbereiches der Einzellamelle, und einer danach erfolgenden gleichmäßigen Belastungserhöhung aus dem ausgefallenen Bereich auf die intakten Komponenten. Somit führt diese weitgehend zu einer globalen Lastumverteilung, nach dem Prinzip des 'global load sharing' (GLS). Beide Lastumverteilungsmechanismen, LLS und GLS, unter anderem beschrieben von Kim und Kvam, 2004, treten jedoch nicht in Reinform auf, vielmehr handelt es sich um eine Verschiebung der Anteile beider Mechanismen. Somit kann, auf Basis der vorgenommenen Überlegungen sowie Ergebnissen und Prüfprotokollen die Aussagen von Kloster et al., 1997 und Dill-Langer et al., 2003 bekräftigt werden, wonach LLS und GLS die Grenzfälle symbolisieren, jedoch nicht in der Weise, sondern als Mischung, in Systemen aus Holz auftreten.

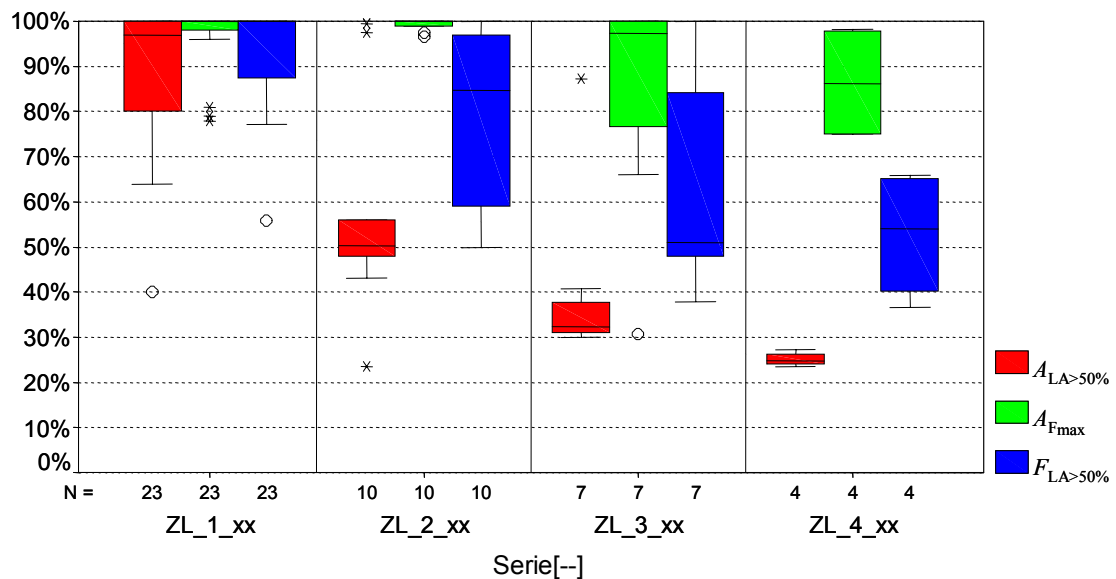


Diagramm 7-28: Darstellung von Beziehungen der Querschnittsfläche zur Kraft anhand definierter Abschnitte des Kraft- Weg Diagramms, Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

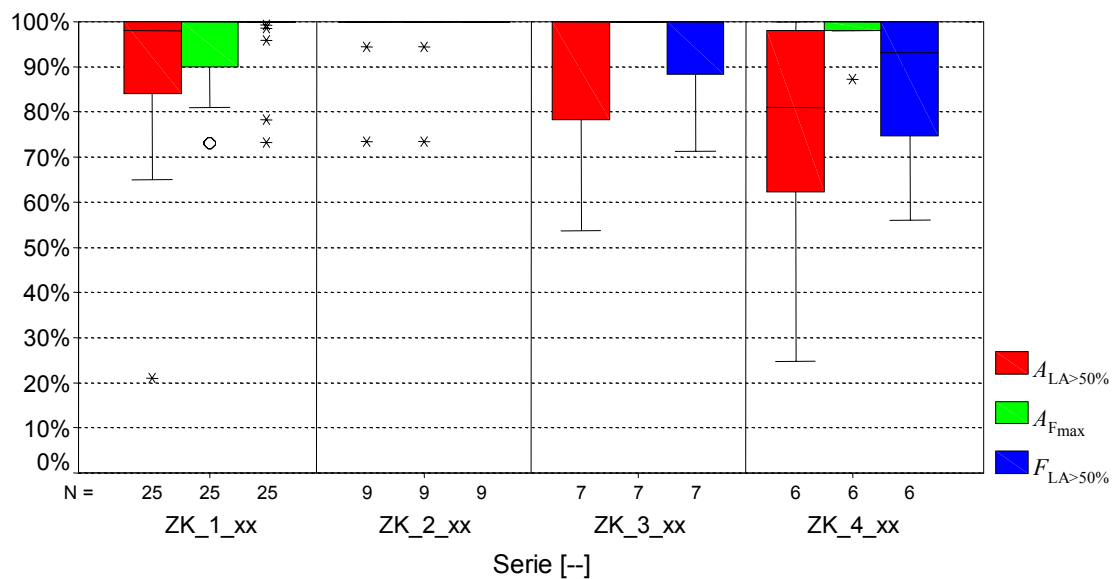


Diagramm 7-29: Darstellung von Beziehungen der Querschnittsfläche zur Kraft anhand definierter Abschnitte des Kraft- Weg Diagramms, Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78

Diagramm 7-30 und Diagramm 7-31 stellen anhand von Box Plots die relativ zum Systemquerschnitt bezogenen versagten Querschnittsflächen, in Abhängigkeit der Rangfolge des Teilbruchs und der Systemgröße n dar. Die maximale Anzahl der in der Auswertung berücksichtigten Teilversagen pro Versuchskörper wurde mit 4, respektive TB 1 bis TB 4, begrenzt.

Bei der Interpretation der Diagramme ist die jeweilig zugrunde liegende Probenanzahl (Angabe unter dem Boxplot mit N) zu berücksichtigen. So beträgt der mediane relative Querschnittsverlust der Serie ZL_1_xx beim 1. Teilbruch (TB 1) rund 30 %, wobei 13 # von 24 # (rund 54 %) des Probenumfangs einer weiteren Belastung ausgesetzt werden konnten. Die übrigen 11 # (rund 46 %) unterlagen bei TB 1 einem Systemversagen. Ein 3. Teilbruch ohne Systemversagen konnte nur bei 2 # von 24 # (rund 8 %) der Serie ZL_1_xx beobachtet werden. Hingegen konnten 4 # von 5 # Probekörper der Serie ZL_4_xx (rund 80 %) nach TB 3 einer weiteren Belastung unterzogen werden. Zur Bestätigung der zu Diagramm 7-28 und Diagramm 7-29 getroffenen Aussagen ist dem Diagramm 7-31 (ZUG_ZK_40-78) die verringerte Anzahl von Teilbrüchen gegenüber der Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78 zu entnehmen. Der Anteil an Probekörpern der Serie ZK_1_xx welche nach dem 3. Teilversagen noch zu keinem Systemausfall führten betrug 4 # von 25 # (rund 16 %), jener der Serie ZK_4_xx 1 # von 6 # (rund 17%). Es sei vermerkt, dass die relativen versagten Querschnittsanteile pro Teilbruch

tendenziell bei der Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78, gegenüber der Reihe ZUG_ZL_40-78, höher sind. Dies deutet ebenfalls auf einen, in Hinblick der Anzahl der Teilbrüche, schnelleren Systemausfall bei der Reihe ZUG_ZK_40-78 hin.

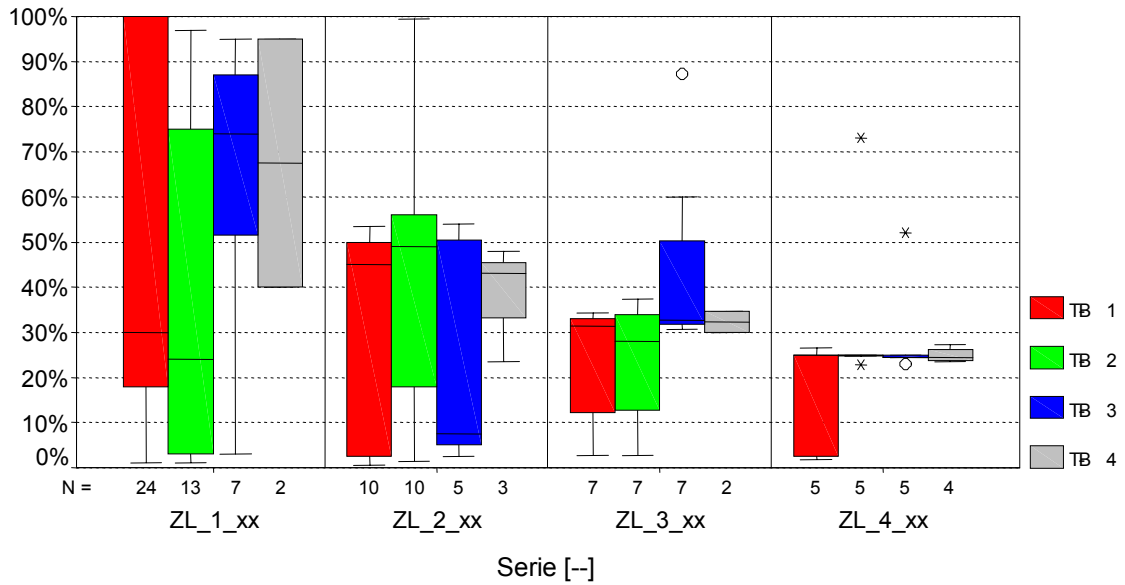


Diagramm 7-30: Darstellung der versagten Querschnittsflächen in Abhängigkeit des Ranges des Teilbrüches und der Systemgröße, Untersuchungsreihe ZUG_ZL_40-78

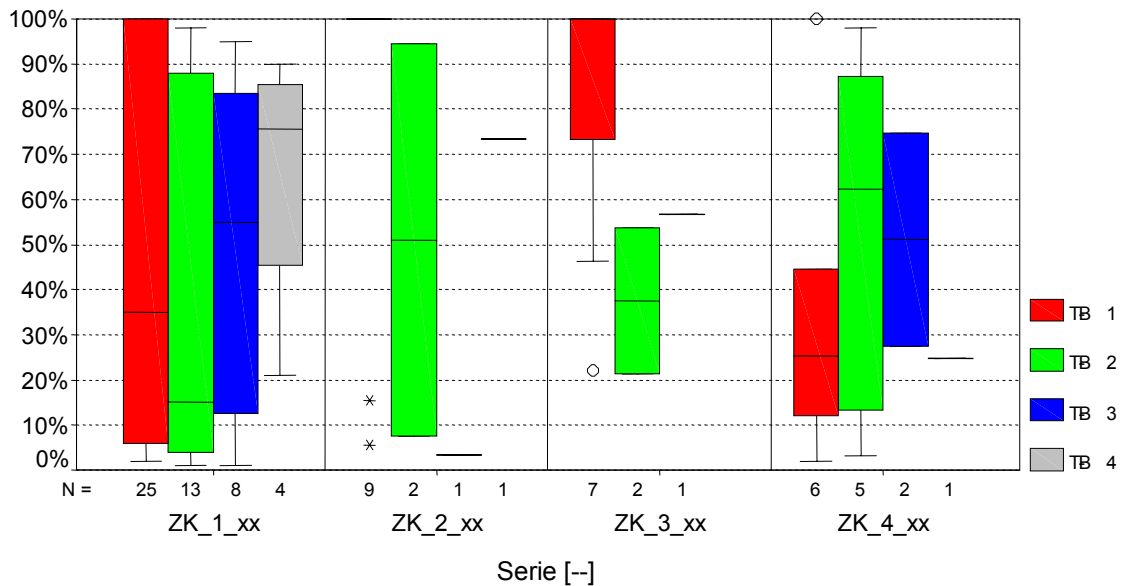


Diagramm 7-31: Darstellung der versagten Querschnittsflächen in Abhängigkeit des Ranges des Teilbrüches und der Systemgröße, Untersuchungsreihe ZUG_ZK_40-78

7.3 Erkenntnisse aus den Untersuchungen am Produkt 'Balkenbinder'

Das Produkt 'Balkenbinder' ist charakterisiert durch den vertikalen Aufbau von Systemquerschnitten aus kontinuierlich, starr verbundener Einzelkomponenten. Somit kommt es innerhalb des Querschnittes zu zwei unterschiedlichen Ausrichtungen von Klebefugen. Zu unterscheiden ist eine vertikale, im generellen unbelastete und nicht mitragende Klebefuge aus der Flächenverklebung der KVH[®] Stangen zu Systemquerschnitten, und eine horizontale, mittragende Blockverklebung welche sich aus der vertikalen Schichtung der Systemquerschnitte ergibt.

Im Zuge der versuchstechnischen Ermittlung des Systembeiwertes auf Zug und Biegung von aus KVH[®] aufgebauten Querschnitten wurden Versuchsreihen des Produktes 'Balkenbinder' auf Biegung durchgeführt. Das Ziel war einerseits die Ergründung des mechanischen Potentials sowie einer ersten Abschätzung von Bezugsgrößen, Größeneffekten und eventuellen Systemeffekten.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse basieren auf 2 Versuchsreihen unterschiedlicher Querschnitte der Einzelkomponenten und relativ geringen Prüfumfängen. Zudem führten Mängel in der KVH[®] Produktion zu einem stark in sich variierendem Versuchsmaterial. Probleme in der versuchstechnischen Bewerkstellung der Parallelschaltung zweier Prüfgerüste zur Durchführung von 4 Punkt Biegeprüfungen bis zu einer Länge von rund 10,7 m trugen ergänzend dazu bei, dass nicht alle Versuchsdaten des Prüfumfanges in die Auswertung inkludiert werden konnten. Trotzdem soll anhand der folgenden Erläuterungen die Vorgangsweise in der Bestimmung der als Ziel gesetzten Kennwerte erklärt werden, sowie erste Richtwerte aus den Daten abgeschätzt werden.

7.3.1 Bestimmung von Referenzmaßen und Größenfaktoren des Produktes 'Balkenbinder'

Der Inhalt dieses Kapitels ist die Darlegung der empirischen Festlegung von Referenzmaßen und Größenfaktoren (k_{size}) des untersuchten Produktes 'Balkenbinder', bezogen auf eine 4 Punkt Biegebelastung, nach der ON EN 408:2005. Geprüft wurden 'Balkenbinder' aus Komponenten der Querschnitte $b / h = 80 / 160$ mm, sowie $60 / 200$ mm. Der erstgenannte Querschnitt wurde bereits im Rahmen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160 geprüft. Nach Vergleich der zur Verfügung stehenden Kenndaten wie

Steifigkeit, Dichte, *JRB*, *STL*, etc. wurde die Serie B_1_xx als Referenzserie der Einzelkomponenten der Untersuchungsreihe BIEGUNG_BB_80-160 zugelassen. Ergänzend zum Prüfprogramm des 'Balkenbinders' wurde die Serie B_2_xx ebenfalls als Vergleichsserie in die Auswertungen der Reihe BIEGUNG_BB_80-160 übernommen. Auf Basis des Querschnittes $b / h = 60 / 200$ mm wurden Duobalken, sowie Strukturen aus zwei und drei vertikal übereinander geschichteten Duobalken geprüft. Eine Zusammenstellung der für die weiteren Betrachtungen relevanten Versuchsdaten ist der Tab. 7-10 zu entnehmen.

Tab. 7-10: Abmessungen und 5 % Quantile der Festigkeiten der für die Auswertung des Produktes 'Balkenbinder' herangezogenen Serien

Serie [--]	<i>l</i> (Spannweite) [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	$f_{m,05}$ (3p WV) [N/mm ²]
B_1_xx	2880	80,3	159,8	20,5
B_2_xx	2880	150,0	155,7	28,4
Ba_2_xx	5490	153,5	304,8	26,3
Ba_3_xx	8316	153,9	460,9	17,9
Bb_1_xx	3546	116,7	197,2	30,1
Bb_2_xx	7110	113,9	394,5	19,2
Bb_3_xx	10710	113,9	594,6	21,1

Basierend auf den Daten aus der Tab. 7-10 wurde das Diagramm 7-32 als Gegenüberstellung der 5 % Quantile der Festigkeit der jeweiligen Prüfhöhe, erstellt. Deutlich zu erkennen sind die mit der Höhe abnehmenden Kennwerte. Des Weiteren weist die Differenz zwischen der 5 % Quantile der Serie B_1_xx und jener von B_2_xx einen enormen Potentialzugewinn auf, welcher aus dem Systemeffekt, bestimmt im Rahmen der Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160, resultiert. Zur Ermittlung von Trends der Beziehung der Festigkeit zur Prüfkörperhöhe wurden Potenzfunktionen an die Ergebnisse der Untersuchungsreihen BIEGUNG_BB_80-160 und BIEGUNG_BB_60-200, sowie unter Berücksichtigung beider Serien ("Alle"), angepasst. Die Wahl der Potenzfunktion ergibt sich nach Weibull, 1939 aus der Beziehung zur Bestimmung von Größeneffekten, welche zur Wiederholung und als Ausgangsbasis für die weiteren Betrachtungen in der Formel 7-1 nochmals dargestellt ist. Der unterschiedliche, weitgehend parallele Verlauf der Potenzfunktionen der beiden Untersuchungsreihen ist auf die den Prüfwerten zu Grunde liegenden Einflüsse der Länge und Breite zurückzuführen.

Zur Abgrenzung der Referenzhöhen sind jene des Vollholzes ($h_{ref} = 150$ mm, nach der ON EN 384:2004) und des BSH Trägers ($h_{ref} = 600$ mm, nach ON EN 1194:1999) ebenfalls im Diagramm 7-32 eingetragen. Aufgrund der Sortierklasse der KVH[®] Stangen von $\geq S10$, nach der ON DIN 4074-1:2004, respektive Festigkeitsklasse $\geq C24$, nach ON EN 338:2003, wäre eine charakteristische Biegefestigkeit für die Referenzserie B_1_xx von $f_{m,k} \geq 24$ N/mm² zu erwarten. Diese Anforderung wurde bei weitem nicht erfüllt, ein 5 % Quantilwert von $f_{m,05} = 20,5$ N/mm², respektive $f_{m,k} = 18,3$ N/mm² (nach ON EN 384:2004), bzw. ein $f_{m,k} = 21,5$ N/mm² (nach prEN 14358:2004, unter Berücksichtigung des k_h nach ON EN 384:2004) (siehe Kapitel 0, Tab. 6-18) konnte prüftechnisch und im Rahmen der Auswertung ermittelt werden. Legt man das erreichte Festigkeitspotential der Einzelkomponenten B_1_xx den weiteren Betrachtungen zugrunde, stellt man einen Überschneidungsbereich der waagrechten Festigkeitslinie mit den angepassten Potenzfunktionen im Bereich von $h = 420$ bis 500 mm fest. Auf Basis einer ersten Festlegung der Referenzhöhe erscheint ein Wert von $h_{ref} = 450$ mm für das Produkt 'Balkenbinder' als Ausgangspunkt für die weiteren Berechnungen als sinnvoll. Die Referenzbreite wird mit dem üblichen Wert von $b_{ref} = 150$ mm, im Hinblick auf den Zielquerschnittsbereich des Produktes, belassen.

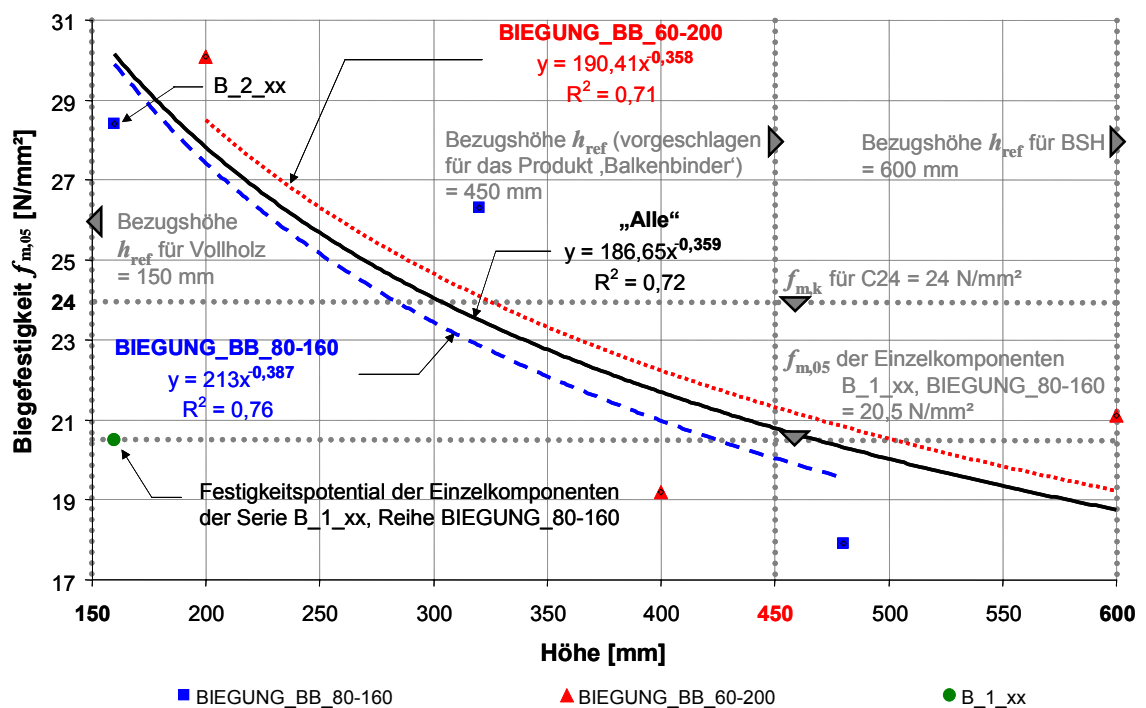


Diagramm 7-32: Darstellung der 5 % Quantile der Serien im Rahmen der Untersuchung des Produktes 'Balkenbinder', in Abhängigkeit der Höhe des Prüfkörpers

Anhand der Kennwerte der Versuchsserien sowie der Probenabmessungen und der abgeschätzten Referenzhöhe, wird aufbauend auf die Formel 7-1 eine Quantifizierung der Größeneffekte k_{size} , k_{length} , k_{width} und k_{depth} durchgeführt. Im Allgemeinen ist die Formel 7-1 nach Weibull, 1939 für spröde Werkstoffe, und somit bei Holz vorwiegend für eine Zugbelastung längs zur Faser anzuwenden. Bei Biegung weist der Werkstoff Holz ein elastisch plastisches Materialverhalten auf. Dieses Materialverhalten wurde bei den Biegeversuchen des Produktes 'Balkenbinder' großteils nur in unausgeprägter Form festgestellt. Ein plastischer Verlauf der Arbeitslinie im Kraft Weg Diagramm ist zumeist auf die vermehrten Einpressungen der Lasteinleitungsplatten in den Probekörper, und einer damit, über den Kolbenweg des Prüfgerüsts fiktiv gemessenen erhöhten Verformungsneigung zu erklären. Für eine erste Abschätzung erscheint somit die Anwendung der Formel 7-1 als ausreichend.

$$\left(\frac{f_1}{f_2}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k_v} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^{k_l} \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{k_b} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{k_h}$$

f_1, f_2	ermittelte oder zugewiesene Festigkeiten in Abhängigkeit des belasteten Volumens
V_1, V_2	Volumen der Untersuchungseinheiten
l_1, l_2	Längen der Untersuchungseinheiten
b_1, b_2	Breiten der Untersuchungseinheiten
h_1, h_2	Höhen der Untersuchungseinheiten
k_v	Volumenfaktor
k_l	Längenfaktor
k_b	Breitenfaktor
k_h	Höhenfaktor

Formel 7-1

Die 4 Punkt Biegeversuche wurden in Anlehnung an die ON EN 408:2005 durchgeführt. Nach der dort verankerten Prüfkfiguration wird ein konstantes Verhältnis zwischen der Höhe und der Spannweite über den Faktor 18, mit $l = 18 \cdot h$, realisiert. Aus diesem Grund ist die Länge, bzw. die Bezugslänge über die Höhe, bzw. Bezugshöhe darstellbar. Es ergibt sich für $l_{\text{ref}} = h_{\text{ref}} \cdot 18 = 18 \cdot 450 = 8100$ mm. Inkludiert man das konstante Verhältnis der Länge zur Höhe in die Formel 7-1, lässt sich eine Vereinfachung nach dem Formalismus der Formel 2-1 herleiten.

$$\left(\frac{f_1}{f_2}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k_V} = \left(\frac{b_2 \cdot h_2^2}{b_1 \cdot h_1^2}\right)^{k_V} = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{k_b} \cdot \left(\frac{h_2^2}{h_1^2}\right)^{k_h} = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{k_b} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{2 \cdot k_h}$$

f_1, f_2	ermittelte oder zugewiesene Festigkeiten in Abhängigkeit des belasteten Volumens
V_1, V_2	Volumen der Untersuchungseinheiten
b_1, b_2	Breiten der Untersuchungseinheiten
h_1, h_2	Höhen der Untersuchungseinheiten
k_V	Volumenfaktor
k_b	Breitenfaktor
k_h	Höhenfaktor

Formel 7-2

Unter Betrachtung der Volumina der Prüfkörper der einzelnen Serien und der ermittelten 5 % Quantilwerte lässt sich der Faktor k_V , unter Lösung einer Minimierungsaufgabe nach der Formel 7-3, berechnen.

$$\sum_{i=1}^n \left(f_{m,05,est_i} - f_{m,05,ref}\right)^2 \rightarrow Min \text{ mit } f_{m,05,est_i} = f_{m,05,Versuch_i} \cdot \left(\frac{V_{Versuch_i}}{V_{ref}}\right)^{k_V}$$

$f_{m,05,est(i)}$	auf das Referenzvolumen V_{ref} rückgerechnete 5 % Quantile der Festigkeit der i -ten Versuchsserie
$f_{m,05,ref}$	5 % Quantile der Festigkeit der Serie Ba_3_xx als angenommene Referenzgröße, entsprechend den festgelegten Referenzabmessungen
$f_{m,05,Versuch(i)}$	5 % Quantile der i -ten Versuchsserie
$V_{Versuch(i)}$	Volumen des Prüfabschnittes der i -ten Versuchsserie
V_{ref}	Referenzvolumen
k_V	Volumenfaktor

Formel 7-3

Auf Basis dieser Betrachtungen lässt sich auch eine Parameterstudie der Referenzhöhe h_{ref} , zu deren rechnerischen Bestimmung durchführen. Die rechnerische Ermittlung unter Bedacht der Minimierung der Fehlerquadrate ('least square method') zwischen dem Referenzwert und der anhand der Versuchsergebnisse rückgerechneten 5 % Quantile, bestätigte die Annahme von $h_{ref} = 450$ mm, mit der Bezugsgröße der 5 % Quantile der Festigkeit der Serie Ba_3_xx von $f_{m,05} = 17,9$ N/mm². In nahezu gleicher Weise wurden die Größenfaktoren k_b und k_h durch Lösung der Minimierungsaufgabe nach Formel 7-4 ermittelt.

$$\sum_{i=1}^n \left(f_{m,05,est_i} - f_{m,05,ref} \right)^2 \rightarrow \text{Min mit } f_{m,05,est_i} = f_{m,05,Versuch_i} \cdot \left(\frac{b_{Versuch_i}}{b_{ref}} \right)^{k_b} \cdot \left(\frac{h_{Versuch_i}}{h_{ref}} \right)^{2 \cdot k_h}$$

- $f_{m,05,est(i)}$ auf das Referenzvolumen V_{ref} rückgerechnete 5 % Quantile der Festigkeit der i -ten Versuchsserie
- $f_{m,05,ref}$ 5 % Quantile der Festigkeit der Serie Ba_3_xx als angenommene Referenzgröße, entsprechend den festgelegten Referenzabmessungen
- $f_{m,05,Versuch(i)}$ 5 % Quantile der i -ten Versuchsserie
- $b_{Versuch(i)}$ Breite der Prüfkörper der i -ten Versuchsserie
- b_{ref} Referenzbreite
- $h_{Versuch(i)}$ Höhe der Prüfkörper der i -ten Versuchsserie
- h_{ref} Referenzhöhe
- k_b Breitenfaktor
- k_h Höhenfaktor

Formel 7-4

Die Referenzwerte sowie die ermittelten Faktoren sind der Tab. 7-11 zu entnehmen.

Tab. 7-11: Referenzwerte und Faktoren für die 4 Punkt Biegebelastung, ermittelt auf Basis der Versuchsergebnisse des Produktes 'Balkenbinder'

Referenzwerte			Faktoren		
l_{ref}	8100	[mm]	k_l	--	[-]
b_{ref}	150	[mm]	k_b	0,64	[-]
h_{ref}	450	[mm]	k_h	0,22	[-]
V_{ref}	$54675 \cdot 10^4$	[mm ³]	k_v	0,27	[-]
$f_{m,05,ref}$	17,9	[N/mm ²]	--	--	--

Anhand dieser Abschätzungen der Faktoren zur Berücksichtigung der Größeneffekte lassen sich die Beziehungen zwischen den Abmessungen und der 5 % Quantile der Biegefestigkeit, dargestellt in Diagramm 7-33, festhalten.

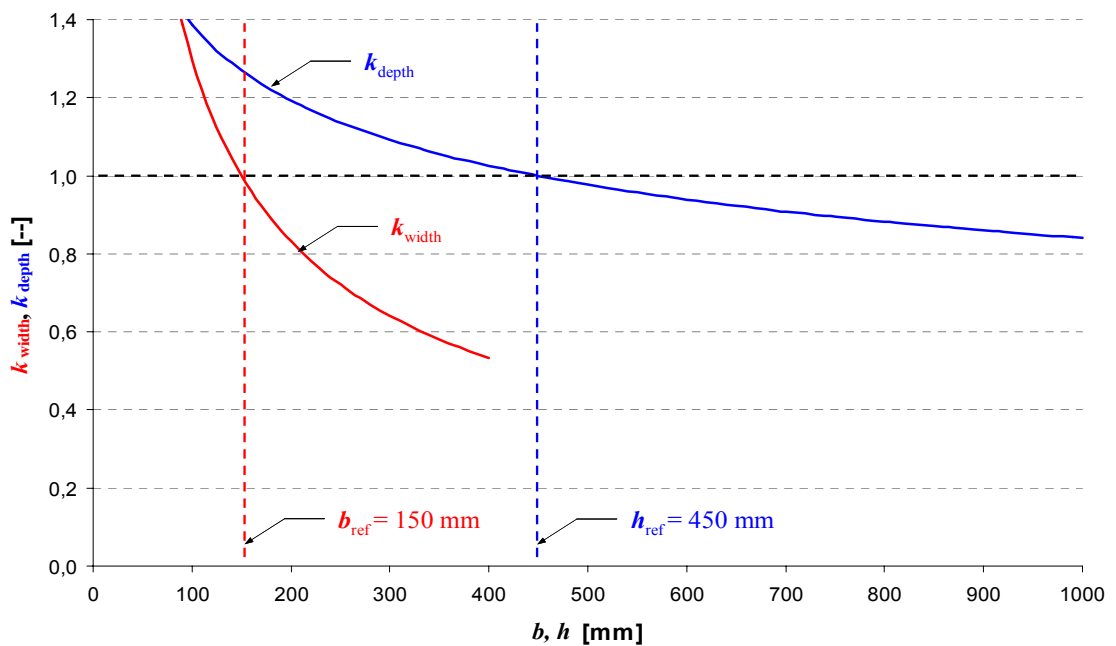


Diagramm 7-33: k_{width} und k_{depth} aus den ermittelten Größenfaktoren k_b und k_h des Produktes 'Balkenbinde'

Die Berechnung der Faktoren k_{width} und k_{depth} aus dem Diagramm 7-33 sind in Formel 7-5 und Formel 7-6 dargestellt, die Ermittlung des k_{size} ist der Formel 7-7 zu entnehmen. Die versuchstechnisch ermittelten Kennwerte sind sodann hinsichtlich ihrer Abmessungen an die Referenzwerte nach diesen Gleichungen durch Division der 5 % Quantile durch die ermittelten Faktoren anzupassen.

$$k_{width} = \left(\frac{b_{ref}}{b} \right)^{k_b} = \left(\frac{150}{b} \right)^{0,64}$$

k_{width}	Faktor zur Justierung der 5 % Quantile der Festigkeit einer Versuchsserie bei gegebener Probenbreite auf die Referenzbreite
b_{ref}	Referenzbreite
b	Breite des Prüfkörpers
k_b	Breitenfaktor

Formel 7-5

$$k_{depth} = \left(\frac{h_{ref}}{h} \right)^{k_h} = \left(\frac{450}{h} \right)^{0,22}$$

k_{depth}	Faktor zur Justierung der 5 % Quantile der Festigkeit einer Versuchsserie bei gegebener Probenhöhe auf die Referenzhöhe
h_{ref}	Referenzhöhe
h	Höhe des Prüfkörpers
k_h	Höhenfaktor

Formel 7-6

$$k_{size} = \left(\frac{b_{ref}}{b}\right)^{k_b} \cdot \left(\frac{h_{ref}}{h}\right)^{2 \cdot k_h} = \left(\frac{150}{b}\right)^{0,64} \cdot \left(\frac{450}{h}\right)^{0,44} = \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{0,27} = \left(\frac{54675 \cdot 10^4}{V}\right)^{0,27}$$

k_{depth}	Faktor zur Justierung der 5 % Quantile der Festigkeit einer Versuchsserie bei gegebener Probenhöhe auf die Referenzhöhe
h_{ref}	Referenzhöhe
h	Höhe des Prüfkörpers
k_h	Höhenfaktor

Formel 7-7

Vergleicht man die in der Tab. 7-11 dargestellten Faktoren mit den verankerten Größen der Normen und der Literatur betreffend der Biegung stellt sich folgendes dar:

Die ON EN 384:2004 beinhaltet einen Höhenfaktor für Vollholz von $k_h = 0,2$, bei $h_{ref} = 150$ mm. Die ON EN 1194:1999 regelt den k_{size} von BSH-Lamellen mit den Faktoren $k_h = 0,1$ und $k_l = 0,1$, bei gegebenen Referenzabmessungen von $h_{ref} = 150$ mm und $l_{ref} = 2000$ mm. Der k_{size} von BSH-Trägern wird bei gegebenen Referenzabmessungen $h_{ref} = 600$ mm und $b_{ref} = 150$ mm mit $k_b = 0,05$ und $k_h = 0,1$ geregelt.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Faktoren aus den europäischen Normenwerken zu konservativ angesetzt sind und hinsichtlich der Einbindung von wichtigen Einflussfaktoren, wie der Streuung der Festigkeit, diesbezüglich keine Möglichkeit und Berücksichtigung finden. So werden von Rouger und Barrett, 1995 ein $k_h = 0,4$ anhand von Daten aus Kanada ermittelt. Barrett und Fewell, 1990 veröffentlichten schon früher Werte für $k_h = 0,4$, bei $h_{ref} = 200$ mm.

Trotz allem erscheint der ermittelte Wert für $k_b = 0,64$ als weit überschätzt, vor allem in Hinblick auf den geringen Einfluss der Breite hinsichtlich der Biegefestigkeit. Es ist festzuhalten, dass Größeneffekte, sowie auch der in dieser Arbeit untersuchte Systemeffekt, bei der Festlegung der Holzfestigkeit einen wenig robusten Parameter darstellen. Bedingt durch die Fülle an Einflussfaktoren und der großen Streubreite der mechanischen Eigenschaften des Rohstoffes Holz ist ein umfangreiches Versuchsprogramm nötig um annähernd einen Eindruck des wahren Ausmaßes der einzelnen Faktoren zu gewinnen. Die vorhin bestimmten Faktoren können somit nicht allgemein für das Produkt 'Balkenbinder' nach der gegebenen Spezifikation angewendet werden.

Anhand des Potentialzugewinnes von der Einzelkomponente zum Duobalken, und der durch den vertikalen Aufbau verringerten Streuung der Festigkeits- und Steifigkeitswerte wurde das Potential des Produktes 'Balkenbinder' kurz dargestellt. Zur Abklärung und Quantifizierung der Kennwerte sind weitere Versuche notwendig.

7.4 Vertiefende Betrachtungen des 'load sharing'

Das 'load sharing', als ein Teilbereich der Systemeffekte, wurde bereits im Kapitel 3.1.1 der Literaturrecherche behandelt. Auch die internationalen Normenwerke, AS 1720.1:1997 und der OHBDC-91-1:1991, bedienen sich der Regelung des Systembeiwertes über den Effekt des 'load sharing'.

Zur Wiederholung versteht man unter 'load sharing', dass die Belastung auf ein System unter den Komponenten und Elementen proportional zu ihrer Steifigkeit abgetragen wird. Hierbei spielen sowohl statistische Effekte, als auch mechanische Effekte eine Rolle. Durch das Verhalten zweier Komponenten, betrachtet über die Parameter der Kraft und des Weges, oder der Steifigkeit und Festigkeit, welche zueinander im gegenseitigen Zwang stehen, ergeben sich nach der Art ihrer Materialcharakteristik Verteilungsmechanismen der Belastung bereits während der Lastaufbringung und ohne vorhergehendem Teilausfall. Das 'load sharing' ermöglicht auch eine Betrachtung der Lastumverteilung nach einem Teilversagen auf die noch intakten Elemente unter Inkludierung der 'load redistribution'. Statistisch betrachtet wird das 'load sharing' durch die positive Korrelation zwischen der Festigkeit und der Steifigkeit unterstützt. Auf Basis dieses Zusammenhanges ist im Regelfall eine steifere Komponente auch in der Lage eine höhere Last abzutragen.

Anhand des Kraft- Weg Diagramms unter Kapitel 3.1.1 wurde das Prinzip des Zwanges der Lastverteilung zwischen weicheren und steiferen Komponenten allgemein dargestellt. Ziel dieses Abschnittes ist die vertiefende Darstellung des 'load sharing'. Eine weitgehend allgemeine Herleitung eines Formalismus auf der Grundlage von Hypothesen, sowie die Betrachtung von Grenzfällen und generellen Zusammenhängen, in Abhängigkeit der Materialcharakteristik, werden anhand der Gegenüberstellung von Systemen aus jeweils zwei Komponenten dargestellt. Mit Verweis auf das Diagramm 3-1 in Kapitel 3.1.1, der Betrachtung von Komponenten gleichen Querschnittes, sowie mit Bezug auf die nachfolgenden Darstellungen (Diagramm 7-34 bis Diagramm 7-36) werden folgende Hypothesen getroffen:

▪ Hypothese 1:

Ein, im Rahmen dieser Arbeit definiertes System aus kontinuierlich verbundenen Komponenten kann maximal einer Verformung, entsprechend dem geringsten Wert der Einzelkomponenten, ausgesetzt werden ohne das ein Teilversagen im betreffenden Systemabschnitt auftritt.

▪ Hypothese 2:

Die Verformungs- oder die Dehngrenze des Systems bis zum ersten Teilausfall oder Versagen entspricht somit dem Minimum der Dehngrenzen aller Komponenten im System bzw. Systemabschnitt.

▪ Hypothese 3:

Unter der Betrachtung einer Zugbelastung längs zur Faser und der Einschränkung auf das Hook'sche Gesetz (Formel 7-8, gültig für den linearen Bereich des Spannungs-Dehnungsdiagramms), kann die Dehngrenze des Systems, ε_{sys} , nach der Formel 7-9 ermittelt werden.

$$f = \frac{F_{\text{max}}}{A} = E \cdot \varepsilon$$

f	Festigkeit
F_{max}	maximale Kraft
A	Querschnittsfläche
E	Steifigkeit
ε	Dehnung

Formel 7-8

$$\varepsilon_{\text{sys}} = \text{Min}(\varepsilon_i) = \text{Min}\left(\frac{f_i}{E_i}\right)$$

ε_{sys}	Dehngrenze des Systems
ε_i	Dehnung der i -ten Komponente im System
f_i	Festigkeit der i -ten Komponente im System
E_i	Steifigkeit der i -ten Komponente im System

Formel 7-9

▪ Hypothese 4:

Eine Verformung des Systems über den Grenzwert von ε_{sys} hinaus führt zu einem Teilversagen der betreffenden Komponente, oder in Folge der erforderlichen Umlagerungen resultierend aus den zusätzlich abzutragenden Lasten letztlich zu einem Systemversagen.

▪ Hypothese 5:

Unter der Annahme, dass die Komponenten in ihren Abmessungen und ihrer Form identisch sind, folgt aus der 'load sharing' Betrachtung im Diagramm 3-1 (Kapitel 3.1.1), dass die Systembelastung eine Summe der Einzelbelastungen an der Stelle ε_{sys} , als Begrenzungswert der Systemverformung, darstellt. Bezogen auf die Belastung der Einzelkomponente folgt eine Mittelung der Einzelbelastungen und daraus, unter den getroffenen Annahmen, eine Mittelung der Einzelfestigkeiten f_i , an der Stelle ε_{sys} .

▪ Hypothese 6:

Unter Betrachtung der vorhergehenden Hypothesen und unter Heranziehung des Hook'schen Gesetzes lässt sich die Systemfestigkeit f_{sys} an der Stelle ε_{sys} nach dem Formalismus von Formel 7-10 herleiten. Dieser Ansatz ist identisch mit jenem von Bakht und Jaeger, 1991.

$$f_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{i,\varepsilon_{\text{sys}}}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot \varepsilon_{\text{sys}}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot \text{Min}\left(\frac{f_i}{E_i}\right)}{n}$$

f_{sys}	Systemfestigkeit, berechnet für einen (Teil-) Ausfall und unter der Annahme eines ideal spröden Materialverhaltens
$f_{i,\varepsilon_{\text{sys}}}$	Festigkeit der i -ten Komponente im System, an der Stelle ε_{sys}
f_i	Festigkeit der i -ten Komponente im System
ε_{sys}	Dehnungsgrenze des Systems
ε_i	Dehnung der i -ten Komponente im System
E_i	Steifigkeit der i -ten Komponente im System

Formel 7-10

Die Ermittlung der Systemfestigkeit f_{sys} anhand des Ansatzes des 'load sharing' wurde erläutert. Es ist zu vermerken, dass das 'load sharing' zwischen den Komponenten aber auch zwischen den einzelnen Elementen eines Systems auftritt. Die Streuung der

Steifigkeiten und Festigkeiten innerhalb der Komponenten bilden die Basis dafür. Die Festigkeitswerte aus zerstörenden Prüfungen, wie etwa Zug längs zur Faser, geben jedoch nur Auskunft über die Festigkeit des schwächsten Bereiches, folglich nur ein Minimum der Festigkeitsbandbreite einer Komponente. Die parallel dazu messtechnisch ermittelte Verformung repräsentiert einen Mittelwert aus allen Teilverformungen innerhalb der Messlänge. Somit kann anhand der auf diese Weise ermittelten Versuchswerte keine Aussage über das wahre Ausmaß des 'load sharing' in quantifizierender und von den weiteren Einflüssen getrennter Weise, und entlang einzelner Abschnitte innerhalb des Systems getroffen werden. Aufgrund dessen wurde eine Modellbildung, auf Basis virtueller, stochastisch ermittelter Elemente und Komponenten gestartet um mit Hilfe von Simulationen und Parameterstudien den Anteil des 'load sharing' am Systemeffekt zu determinieren. Die Modellbildung ist bis dato noch nicht abgeschlossen, Ergebnisse werden nach dessen Vorliegen publiziert.

Als ein wesentlicher Schritt zur Abklärung des 'load sharing' dienen die Darstellungen von allgemeinen Spannungs-Dehnungsbeziehungen sowie deren Grenzfällen (Diagramm 7-34 bis Diagramm 7-36). Im Folgenden wird jeder Fall (Fall 1 bis Fall 6) anhand einer Kurzinterpretation dargelegt.

Es bedeuten in den Diagrammen:

$K1, K2$	Komponenten des Systems bzw. Systemabschnitte oder Elemente
f_1, f_2, f_{sys}	Festigkeit der Komponente 1 bzw. 2, sowie die Systemfestigkeit
E_1, E_2, E_{sys}	Steifigkeit der Komponente 1 bzw. 2, sowie die Systemsteifigkeit
ε_{sys}	Dehngrenze des Systems bzw. Systemabschnittes

- Fall 1: sprödes Materialverhalten, allgemeine Darstellung (Diagramm 7-34, links)

Der Fall 1 repräsentiert im Wesentlichen eine Zugbelastung eines Systems längs zur Faser. Die Annahme beruht auf einem Zusammentreffen einer merkmalsfreien Komponente oder eines Elementes (K1) und einer merkmalsbehafteten Komponente bzw. einem Element (K2). Unter der Annahme, dass die Festigkeit f_2 einem Prüfergebnis entspricht, ist zu entnehmen, dass bei einem starren Verbund und somit gegenseitigem Zwang zwischen K1 und K2 eine Systemfestigkeit $f_{sys} > K2$, vor einem Teilversagen, durch den Verbund erreicht wird.

- Fall 2: sprödes Materialverhalten, Grenzfall gleicher Festigkeiten (Diagramm 7-34, rechts)

Das Zusammentreffen von zwei Komponenten oder Elementen gleicher lokaler Festigkeit, jedoch unterschiedlicher Steifigkeit führt zu einer verringerten Systemfestigkeit in diesem Teilabschnitt.

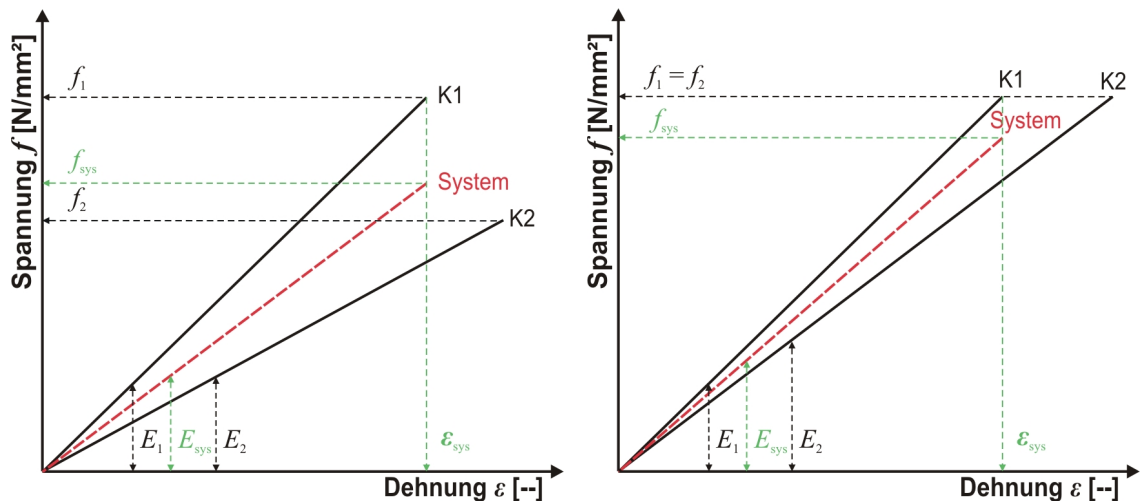


Diagramm 7-34: Spannungs-Dehnungsdiagramme zur Erklärung des 'load sharing': Fall 1 - allgemeine Betrachtung eines ideal spröden Systems (links); Fall 2 - Grenzfall gleicher Festigkeiten (rechts)

- Fall 3: sprödes Materialverhalten, Grenzfall gleicher Steifigkeiten (Diagramm 7-35, links)

Ein derart charakterisierter Systemabschnitt bedingt, dass die Systemfestigkeit der geringeren Komponenten-, bzw. Elementfestigkeit, aufgrund der Dehngrenze des Systems, der geringeren Komponentenfestigkeit entspricht.

- Fall 4: sprödes Materialverhalten, Grenzfall gleicher Dehnungen (Diagramm 7-35, rechts)

Da die Dehngrenze des Systems in diesem Fall den Dehngrenzen der beiden Komponenten bzw. Elementen entspricht, ermittelt sich die Systemfestigkeit als Mittelwert der beiden Komponenten- bzw. Elementfestigkeiten f_1 und f_2 .

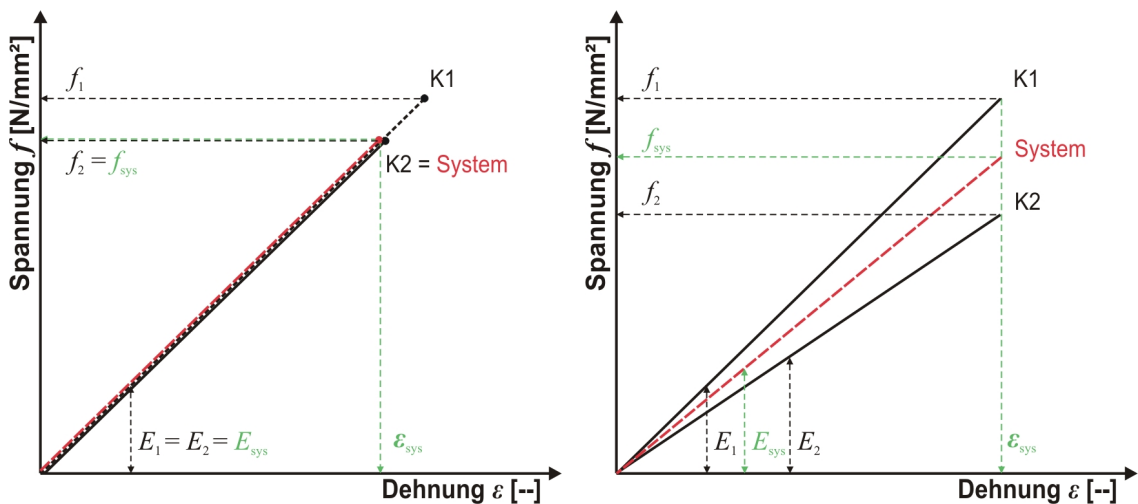


Diagramm 7-35: Spannungs-Dehnungsdiagramme zur Erklärung des 'load sharing': Fall 3 - Grenzfall gleicher E-Module (links); Fall 4 - Grenzfall gleicher Dehnungen (rechts)

- Fall 5: elastisch-plastisches Materialverhalten, allgemeine Betrachtung und Gegenüberstellung mit dem Fall 1 (Diagramm 7-36)

Die dargestellten Spannungs-Dehnungsbeziehungen weisen im Versagensbereich einen zunehmend plastischen Charakter auf. Komponenten auf Biegung weisen häufig eine derartige Charakterisierung auf, aber auch bei Zugbelastung längs zu Faser ist ein leichtes plastisches Verhalten im Bruchbereich, durch den absinkenden E-Modul, erkennbar. Durch die Plastizität erhöht sich bei gleicher Festigkeit die Verformung und ermöglicht somit eine erhöhte Dehngrenze des Systems gegenüber dem im Diagramm 7-36 gegenübergestellten spröden Systembereich. Das Resultat ist eine höhere Systemfestigkeit in Kombination mit einer leicht reduzierten Systemsteifigkeit, und einer erhöhten Systemdehnung, welche im Verbund von mehreren Systemen in größeren Strukturen durch das 'load redistribution' Verhalten einen Vorteil in einer verbesserten Lastumlagerung auf steifere Strukturkomponenten bereits vor einem Teil- oder Vollversagen ermöglicht.

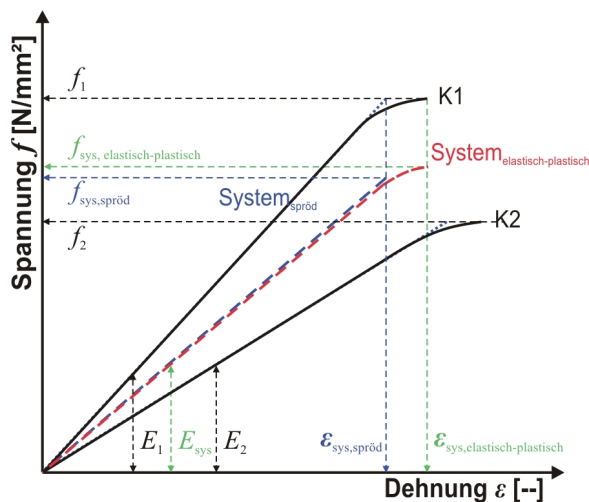


Diagramm 7-36: Spannungs-Dehnungsdiagramm zur Erklärung des 'load sharing': Fall 5 - allgemeine Betrachtung eines elastisch plastischen Systems im Vergleich zu einem spröden System

Aus den Erkenntnissen der dargestellten und interpretierten 'load sharing' Beziehungen ist eine Erhöhung des Mittelwertes der Festigkeit von Systemen gegenüber jener der Einzelkomponenten durchaus gegeben, zur Zeit jedoch nicht quantifizierbar. Aufgrund des Zusammenspiels von vielen Einzelfaktoren welche einen Einfluss auf das Systemverhalten ausüben ist ein konservativer Ansatz der Betrachtung des 'load sharing' anzuraten, solange keine genaueren Untersuchungen vorliegen.

7.5 Definition allgemein gültiger Beziehungen sowie der Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur und den betrachteten Normenwerken

Dieses abschließende Kapitel dient der Erfassung und Verfassung weitgehend allgemeiner Beziehungen und hat das Ziel eine Empfehlung für die Regelung des Systemverhaltens der hier betrachteten Strukturen innerhalb der Bemessungsnorm Eurocode 5 zu geben.

7.5.1 Anmerkungen zur Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys}

Die nachfolgenden Tabellen (Tab. 7-12 bis Tab. 7-17) enthalten die relevanten statistischen Kennwerte der einzelnen Serien je Untersuchungsreihe, sowie den Systembeiwert k_{sys} als Verhältniswert der 5 % Quantile nach der 3p WV. Ergänzend enthalten sind die relativen Anteile der Mittelwert- sowie der relativen Anteile der Streuung (COV) am Systembeiwert. Zur Ermittlung dieser Kennziffern wurden die Mittelwerte sowie die Variationskoeffizienten der Festigkeiten nach der NV abwechselnd als konstant ange-

nommen und aus der damit resultierenden Änderung der 5 % Quantile und folgend der Systembeiwerte die so ermittelten Werte den Prüfdaten in Relation gesetzt. Ebenfalls enthalten sind Betrachtungen der Systembeiwerte aus den Untersuchungsreihen ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 mit der Referenzserie ZLK_1_xx.

Tab. 7-12: Darstellung der Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} , sowie Erfassung relevanter Anteile; Prüfreihe ZUG_60-78

Serie	$f_{t,0,mean}$	$f_{t,0,05}^{1)}$	k_{sys}	MW Anteil am $k_{sys}^{2)}$	COV Anteil am $k_{sys}^{3)}$
[--]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[--]	[%]	[--]
Z_1_xx	23,0	14,4	1,00	--	--
Z_2_xx	24,6	16,9	1,17	63 %	37 %
Z_4_xx	28,3	20,9	1,45	81 %	19 %

1) 5 % Quantile der Festigkeit ermittelt nach der 3p WV

2) Anteil der Veränderung des Mittelwertes der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

3) Anteil der Veränderung der relativen Streuung der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

Tab. 7-13: Darstellung der Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} , sowie Erfassung relevanter Anteile; Prüfreihe BIEGUNG_80-160

Serie	$f_{m,mean}$	$f_{m,05}^{1)}$	k_{sys}	MW Anteil am $k_{sys}^{2)}$	COV Anteil am $k_{sys}^{3)}$
[--]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[--]	[%]	[--]
B_1_xx	33,2	20,5	1,00	--	--
B_2_xx	38,8	28,4	1,39	71 %	29 %
B_4_xx	37,1	30,5	1,49	39 %	61 %

1) 5 % Quantile der Festigkeit ermittelt nach der 3p WV

2) Anteil der Veränderung des Mittelwertes der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

3) Anteil der Veränderung der relativen Streuung der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

Tab. 7-14: Darstellung der Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} , sowie Erfassung relevanter Anteile; Prüfreihe ZUG_ZL_40-78

Serie	$f_{t,0,mean}$	$f_{t,0,05}^{1)}$	k_{sys}	MW Anteil am $k_{sys}^{2)}$	COV Anteil am $k_{sys}^{3)}$
[--]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[--]	[%]	[--]
ZL_1_xx	41,4	22,5	1,00	--	--
ZL_2_xx	32,0	22,0	0,98	2078 %	-1978 %
ZL_3_xx	36,3	22,0	0,98	1122 %	-1022 %
ZL_4_xx	34,3	30,7	1,36	-89 %	189 %

1) 5 % Quantile der Festigkeit ermittelt nach der 3p WV

2) Anteil der Veränderung des Mittelwertes der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

3) Anteil der Veränderung der relativen Streuung der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

Tab. 7-15: Darstellung der Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} , sowie Erfassung relevanter Anteile; Prüfreihe ZUG_ZL_40-78, mit der Referenzserie ZLK_1_xx

Serie	$f_{t,0,mean}$	$f_{t,0,05}^{1)}$	k_{sys}	MW Anteil am $k_{sys}^{2)}$	COV Anteil am $k_{sys}^{3)}$
[--]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[--]	[%]	[--]
ZLK_1_xx	41,6	22,0	1,00	--	--
ZL_2_xx	32,0	22,0	1,00	--	--
ZL_3_xx	36,3	22,0	1,00	--	--
ZL_4_xx	34,3	30,7	1,40	-82 %	182 %

1) 5 % Quantile der Festigkeit ermittelt nach der 3p WV

2) Anteil der Veränderung des Mittelwertes der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

3) Anteil der Veränderung der relativen Streuung der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

Tab. 7-16: Darstellung der Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} , sowie Erfassung relevanter Anteile; Prüfreihe ZUG_ZK_40-78

Serie	$f_{t,0,mean}$	$f_{t,0,05}^{1)}$	k_{sys}	MW Anteil am $k_{sys}^{2)}$	COV Anteil am $k_{sys}^{3)}$
[--]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[--]	[%]	[--]
ZK_1_xx	41,8	21,7	1,00	--	--
ZK_2_xx	44,9	29,7	1,37	39 %	61 %
ZK_3_xx	48,2	29,2	1,35	86 %	14 %
ZK_4_xx	46,2	28,0	1,29	70 %	30 %

1) 5 % Quantile der Festigkeit ermittelt nach der 3p WV

2) Anteil der Veränderung des Mittelwertes der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

3) Anteil der Veränderung der relativen Streuung der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

Tab. 7-17: Darstellung der Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} , sowie Erfassung relevanter Anteile; Prüfreihe ZUG_ZK_40-78, mit der Referenzserie ZLK_1_xx

Serie	$f_{t,0,mean}$	$f_{t,0,05}^{1)}$	k_{sys}	MW Anteil am $k_{sys}^{2)}$	COV Anteil am $k_{sys}^{3)}$
[--]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[--]	[%]	[--]
ZLK_1_xx	41,6	22,0	1,00	--	--
ZK_2_xx	44,9	29,7	1,35	43 %	57 %
ZK_3_xx	48,2	29,2	1,33	92 %	8 %
ZK_4_xx	46,2	28,0	1,27	76 %	24 %

1) 5 % Quantile der Festigkeit ermittelt nach der 3p WV

2) Anteil der Veränderung des Mittelwertes der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

3) Anteil der Veränderung der relativen Streuung der Festigkeit am Systemfaktor k_{sys} in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n

Die ermittelten Systembeiwerte weisen in ihrer Ausprägung eine relativ große Streubreite auf. Die Relativanteile des Mittelwertes und der Variation der Festigkeit am Systembeiwert sind ebenfalls sehr unterschiedlich zu interpretieren. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist der Anteil des tendenziell erhöhten Mittelwertes in Abhängigkeit von der Systemgröße eine gewichtige Größe und bedarf daher einer weiteren Untersuchung welche, wie in Kapitel 7.4 bereits vermerkt, mit Hilfe einer Simulation durchgeführt wird.

7.5.2 Untersuchung der Schiefe und Kurtosis der Festigkeitswerte in Abhängigkeit der Systemgröße n

Die Schiefe und die Kurtosis sind Maßzahlen der Statistik zur Beurteilung der Masseverteilung stetiger Daten. Generell gelten Datenreihen mit einer Schiefe und Kurtosis im Bereich von 0 als zentral, symmetrisch verteilt und deuten somit auf eine Anpassung der Datenreihe durch eine Normalverteilung hin.

Aufgrund der Systemwirkung und der Homogenisierung wurde eine theoretische Hypothese aufgestellt: Auf der Basis von Überlegungen und der Beobachtung ist zu erwarten, dass die Festigkeit von Systemen mit zunehmender Komponentenanzahl n gegen eine Normalverteilung tendiert. Zur Überprüfung dieser Überlegung wurde der Verlauf der Schiefe und der Kurtosis in Abhängigkeit von der Probenanzahl n anhand der Untersuchungsreihen ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 betrachtet.

Beide statistischen Kennwerte weisen eine enge Streubreite um den Nullwert auf. Die Schiefe verläuft in einem Intervall von $[-0,70; 0,50]$, die Kurtosis in einem Bereich von $[-2,50; 0,50]$. Eine Tendenz zur verstärkten Zentralisierung der Festigkeitsdaten mit ansteigender Probenanzahl n konnte nicht festgestellt werden. Die Überlegungen konnten somit weder widerlegt noch bestätigt werden, die relativ enge Streubreite der beiden statistischen Kennwerte um den Nullwert weist jedoch auf eine weitgehend zentrale und symmetrische Verteilung der Festigkeitsdaten hin.

7.5.3 Untersuchung des Lageparameters α sowie des Streuparameters β der 3p WV

Auf Basis der vorhergehenden statistischen Analysen wurde die 3p WV als repräsentatives statistisches Verteilungsmodell zur Charakterisierung der Festigkeitswerte der einzelnen Versuchsserien bestimmt. Anhand der Lage- und Streuparameter der 3p WV der einzelnen Serien wurde der Versuch unternommen, aus dem Verlauf der Parameter, in Abhängigkeit der Systemgröße n , einen Trend zu erkennen anhand dessen eine Funktion zur Abschätzung der Systemfestigkeit, auf Basis der Ergebnisse der Einzelkomponenten, definiert werden soll.

In der Untersuchung wurden alle vier Versuchsreihen, ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, inkludiert. Unter Betrachtung der Kennwerte der ersten beiden Reihen konnte an beiden Parametern α und β ein leicht abfallender Verlauf mit zunehmender Systemgröße festgestellt werden. Die Parameter der weiteren zwei Untersuchungsreihen lassen, aufgrund des sprunghaften und stark variierenden Verlaufes keine Interpretation zu.

Somit lässt sich festhalten, dass eine beschreibende Funktion zur Charakterisierung der Verteilungsparameter α und β , in Abhängigkeit von n und in Hinblick auf eine weitgehend breite Anwendbarkeit, anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht getätigt werden kann.

7.5.4 Ermittlung einer allgemeinen Funktion zur Beschreibung der Streuungsveränderung der Festigkeit, in Abhängigkeit der Systemgröße n

Die Streuung der Festigkeitswerte der Referenzserien, sprich der Einzelkomponenten, erscheint als wesentlicher Parameter zur Beschreibung des erreichbaren Systempotentials. Dies wurde bereits von Bakht und Jaeger, 1991 postuliert, und zeigt sich auch in den Regelungen des OHBDC-91-1:1991 und des LRFD:1988.

Die Abhängigkeit der Höhe des Systempotentials von der Streuung der Einzelkomponenten ist damit argumentierbar, dass eine hohe Streuung einer Serie auf eine große Inhomogenität der Komponenten untereinander hinweist, welche sich auch in einer großen Variation der mechanischen Eigenschaften der Elemente innerhalb einer Komponente abzeichnet. Eine hohe Streuung von Materialeigenschaften führt in der Regel zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Elementen sehr geringer Festigkeit und Steifigkeit. Aus den versuchstechnisch ermittelten Festigkeitswerten ist aufgrund der hohen Streuung nur ein sehr geringer 5 % Quantilwert gegeben. Durch die Kombination von Komponenten zu Systemen kommt es mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zur Überbrückung schwacher Elemente durch stärkere Bereiche mit einem vergleichsweise höheren mechanischen Potential. Infolge dessen führen Vergütungseffekte, resultierend aus dem 'load sharing' und dem 'load redistribution', zu einer Homogenisierung und somit zu einer verringerten Streuung und steigenden 5 % Quantile.

Anhand der Untersuchungsreihen ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78 soll eine weitgehend allgemeine Funktion zur Beschreibung des Verlaufes der relativen Streuung COV_n , in Abhängigkeit der COV_1 der Festigkeit der Einzelkomponenten definiert werden. Die vorliegenden Datensätze werden um die statistischen Kennwerte von Sexsmith et al., 1979 (Tab. 7-18), Schickhofer, 2004 und Jöbstl, 2006 (Tab. 7-19, Tab. 7-20 und Abb. 7-1) ergänzt.

Tab. 7-18: relativ auf $n = 1$ bezogene statistische Kennwerte der 4-Punkt Biegeversuche zur Ermittlung des k_{sys} an vertikal belasteten Lamellen, nach Sexsmith et al., 1979

dry hem fir					
n	[-]	1	6	12	19
$f_{m,mean,rel}^{1)}$	[%]	100 %	102 %	96 %	97 %
$f_{m,COV,rel}^{2)}$	[%]	100 %	50 %	26 %	23 %
white pine					
n	[-]	1	6	12	16
$f_{m,mean,rel}^{1)}$	[%]	100 %	121 %	132 %	115 %
$f_{m,COV,rel}^{2)}$	[%]	100 %	51 %	26 %	25 %
red pine					
n	[-]	1	6	12	17
$f_{m,mean,rel}^{1)}$	[%]	100 %	98 %	104 %	103 %
$f_{m,COV,rel}^{2)}$	[%]	100 %	57 %	40 %	20 %

1) relativ auf den Mittelwert der Einzelkomponenten ($n = 1$) bezogene Mittelwerte der Systeme

2) relativ auf die Streuung der Einzelkomponenten ($n = 1$) bezogene Streuung der Systeme

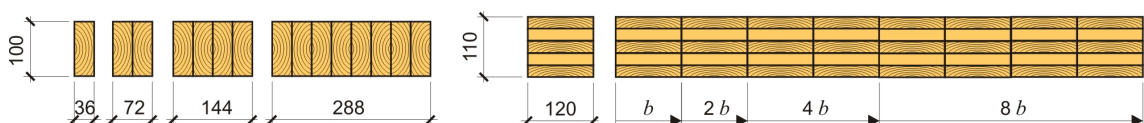


Abb. 7-1: Versuchsaufbau nach Schickhofer, 2004 (Lamellen, links) und Jöbstl, 2006 (BSP, rechts)

Schickhofer, 2004 untersuchte den Systemeffekt anhand von vertikal belasteten BSH-Lamellen aus Fichte (*picea Abies karst.*), der Festigkeitsklasse C16 / C24, nach der ON EN 338:2003, in 4-Punkt Biegeversuchen nach der ON EN 408:2005. Jöbstl, 2006 führte ebenfalls 4-Punkt Biegeprüfungen nach der ON EN 408:2005 durch. Er untersuchte das Systempotential von 5 Lagen Brettsper Holzplatten (BSP), ebenfalls aus

Fichte (*picea Abies karst.*), der Sortierklasse C24, nach der ON EN 338:2003. Die BSP wiesen einen orthogonalen Aufbau auf.

Tab. 7-19: statistische Kennwerte der 4-Punkt Biegeversuche zur Ermittlung des k_{sys} an vertikal belasteten BSH-Lamellen, nach Schickhofer, 2004

<i>n</i>	[--]	1	2	4	8
Anzahl¹⁾	[--]	20 #	9 #	9 #	9 #
$f_{m,mean}$	[N/mm ²]	36,8	38,5	37,5	38,1
$f_{m,COV}$	[%]	36,7 %	23,9 %	14,7 %	7,9 %
$f_{m,05}^{1)}$	[N/mm ²]	20,8	23,3	27,5	31,4
k_{sys}	[--]	1,00	1,12	1,33	1,51

¹⁾ Bestimmung der 5 % Quantile nach der 2p LNV

Tab. 7-20: statistische Kennwerte der 4-Punkt Biegeversuche zur Ermittlung des k_{sys} an Brettsperrholzplatten (BSP), nach Jöbstl, 2006

<i>n</i>	[--]	1	2	4	8
Anzahl¹⁾	[--]	37 #	16 #	14 #	10 #
$f_{m,mean}$	[N/mm ²]	38,0	39,1	39,3	37,2
$f_{m,COV}$	[%]	16,1 %	14,3 %	12,5 %	7,6 %
$f_{m,05}^{2)}$	[N/mm ²]	27,9	29,9	31,2	32,5
k_{sys}	[--]	1,00	1,07	1,12	1,17

¹⁾ Anzahl um Probekörper mit Rollschubversagen bereinigt

²⁾ Bestimmung der 5 % Quantile nach der NV

Nach Untersuchung der Änderung des relativen Streuungsverlaufes (COV_n / COV_1) mit zunehmendem n wurde, auf Basis von empirischen Beobachtungen und der Ermittlung einer die versuchsdatenrepräsentierenden mathematischen Funktion, eine Potenzfunktion nach der Formel 7-11 bestimmt.

$$COV_{n,rel} = n^{-2 \cdot COV_1} \rightarrow COV_n = COV_1 \cdot n^{-2 \cdot COV_1}$$

$COV_{n,rel}$	relativ auf den Variationskoeffizienten der Festigkeit der Einzelkomponenten bezogene Variation der Systeme aus n mitwirkenden Komponenten
COV_n	Variationskoeffizient der Festigkeit von Systemen aus n mitwirkenden Komponenten
COV_1	Variationskoeffizient der Festigkeit der Einzelkomponenten
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-11

Die Anpassung der Funktion an die relativen Streuungswerte der Versuchserien ist Inhalt des Diagramm 7-37 und Diagramm 7-38. Die Funktion zur Beschreibung der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991 ist den in ihren Darlegungen enthaltenen Versuchswerten von Sexsmith et al, 1979 ergänzend in Diagramm 7-38 eingetragen.

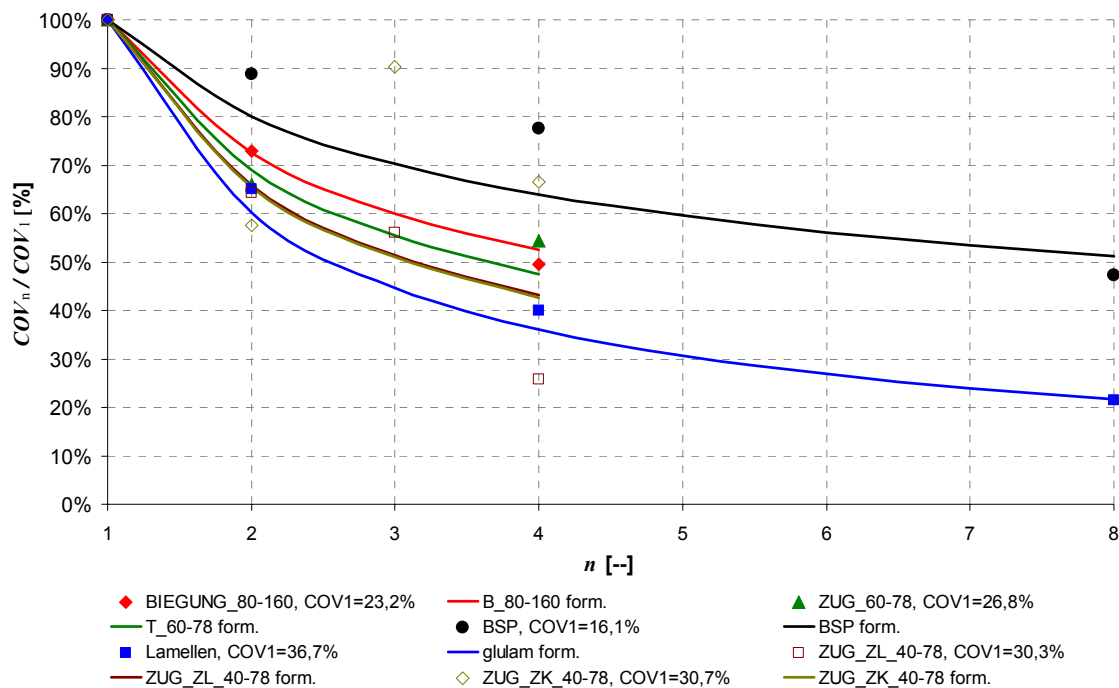


Diagramm 7-37: Gegenüberstellung der relativen Streuungswerte aus den Versuchen mit den Funktionen der relativen Streuungsveränderung nach der Formel 7-11; Untersuchungsreihen ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, sowie Ergebnisse von Schickhofer, 2004 (Lamellen) und Jöbstl, 2006 (BSP)

Unter gedanklicher Berücksichtigung von Konfidenzintervallen der relativen Streuungswerte kann aus Diagramm 7-37 und Diagramm 7-38 eine weitgehend repräsentative Anpassung der Funktion nach Formel 7-11 an die relativen Streuungswerte der Versuche geschlossen werden. Die Berücksichtigung dieser Funktion als Basis der Berechnung der Streuungsparameter eines statistischen Verteilungsmodells zur Charakterisierung der Systemfestigkeit wird anhand der vorliegenden Erkenntnisse vorgeschlagen.

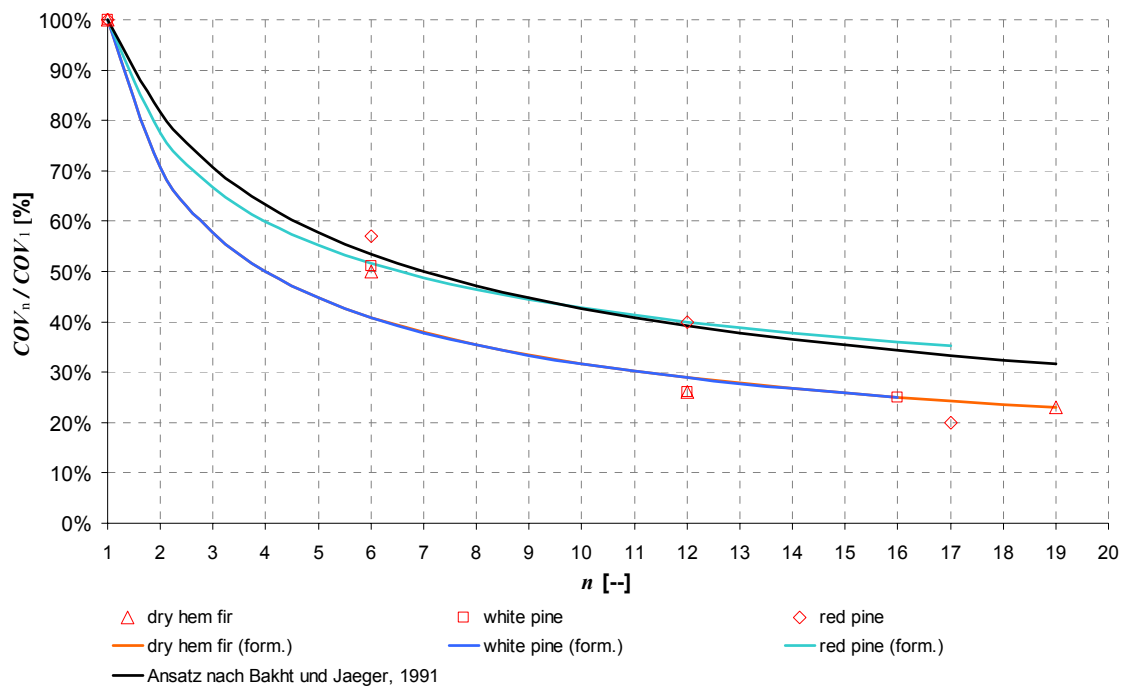


Diagramm 7-38: Gegenüberstellung der relativen Streuungswerte aus den Versuchen mit den Funktionen der relativen Streuungsveränderung nach der Formel 7-11 und der relativen Streuungsbeziehung nach Bakht und Jaeger, 1991 anhand der Ergebnisse von Sexsmith et al., 1979

7.5.5 Betrachtung des Mittelwertes der Festigkeit, in Abhängigkeit der Systemgröße n

Im Zuge dieses Kapitels wird, aufbauend auf das Kapitel 7.5.4 ebenfalls der Versuch unternommen für den Verlauf des Mittelwertes der Festigkeit, in Abhängigkeit von n , eine allgemeine Funktion zu definieren.

Diagramm 7-39 enthält relativ zum Mittelwert der Referenzserie, sprich der Einzelkomponenten, bezogene Mittelwerte der Untersuchungsreihen ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, ergänzt um Ergebnisse von Schickhofer, 2004, Jöbstl, 2006 und Sexsmith et al., 1979.

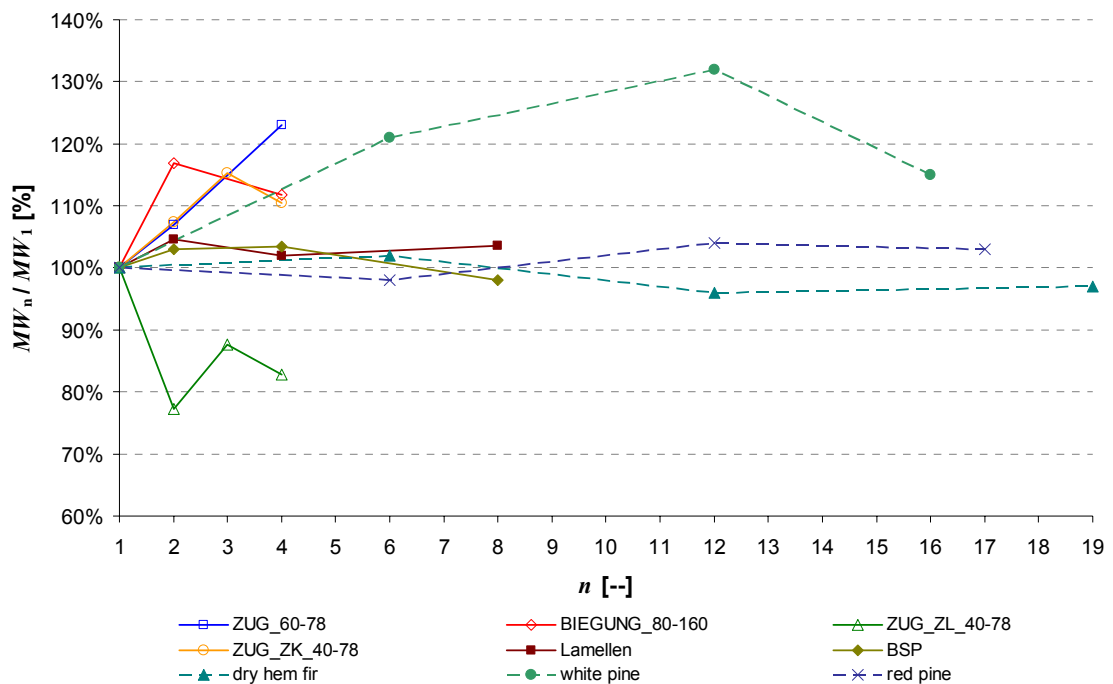


Diagramm 7-39: Darstellung der relativen Mittelwerte in Abhängigkeit der Systemgröße, der Untersuchungsreihen ZUG_60-78, BIEGUNG_80-160, ZUG_ZL_40-78 und ZUG_ZK_40-78, sowie Ergebnisse von Schickhofer, 2004 (Lamellen), Jöbstl, 2006 (BSP) und Sexsmith et al., 1979 (dry hem fir, white pine, red pine)

Aus den vorliegenden Daten und deren gegebener Streubreite, ist keine klare Tendenz des Verlaufes des Mittelwertes in Abhängigkeit von der Probenanzahl n erkennbar. Die Untersuchungen der Anpassung von mathematischen Funktionen nach der 'least square method' ergab ebenfalls kein repräsentatives Modell. Tendenziell ist eine Erhöhung des Mittelwertes mit ansteigendem n wahrscheinlicher als eine Verringerung. In Hinblick auf das probabilistische Sicherheitskonzept und in Übereinstimmung mit Reece, 1949, Nemeth, 1967, Bakht und Jaeger, 1991 sowie Liu und Bulleit, 1995 wird für die Ermittlung des Systembeiwertes ein konstanter Mittelwert, Unabhängig von n , vorgeschlagen, solange keine klärenden Untersuchungsergebnisse vorliegen.

7.5.6 Gegenüberstellung von Modellen zur Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys}

Im Rahmen dieses Kapitels werden Systemfaktoren nach der NV und LNV, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorhergehenden Kapitel 7.5.4 und 7.5.5 dargestellt. Zudem werden diese Modelle jenen aus der Literatur des ideal parallelen Systemwirkens, nach Reece, 1949, Sandoz, 1994 und dem ASTM D 2018-62:1962, und dem Ansatz der relativen Streuberechnung nach Bakht und Jaeger, 1991 gegenüber-

gestellt. Darstellungen des Verteilungsparameters Standardabweichung der NV und LNV, sowie des statistischen Kennwertes der 5 % Quantile, in Abhängigkeit der Systemgröße n , sind zur Ergründung der Modelle zur Ermittlung des Systembeiwertes enthalten.

7.5.6.1 Formalismen zur Ermittlung der Verteilungsparameter sowie der Systembeiwerte

Annahme eines ideal parallelen Systemwirkens (NV):

Unter Betrachtung eines ideal parallelen Systemwirkens, wie es von Reece, 1949 und Sandoz, 1994 postuliert wurde, sowie im ASTM D 2018-62:1962 verankert ist, wird das statistische Verteilungsmodell der Normalverteilung (NV), mit konstantem Mittelwert und der Streuung nach der Formel 7-12 betrachtet. Die Ermittlung des Systembeiwertes erfolgt nach der Formel 7-13.

$$\mu_n = \mu_1, \sigma_{n,P,NV} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}$$

μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_n	Mittelwert der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, NV
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,P,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme eines ideal parallelen Systemverhaltens, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-12

$$k_{sys} = \frac{f_{05,n}}{f_{05,1}} \rightarrow k_{sys,P,NV} = \frac{f_{05,n,P,NV} \{5\%; \mu_1; \sigma_{n,P,NV}\}}{f_{05,1,NV} \{5\%; \mu_1; \sigma_1\}}$$

k_{sys}	Systembeiwert
$k_{sys,P,NV}$	Systembeiwert unter der Annahme eines ideal parallelen Systemverhaltens
$f_{05,n}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten
$f_{05,1}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten
$f_{05,n,P,NV}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten, unter der Annahme eines ideal parallelen Systemverhaltens, NV
$f_{05,1,NV}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,P,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme eines ideal parallelen Systemverhaltens, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-13

Berechnung des Systembeiwertes unter Berücksichtigung der relativen Streuungsfunktion nach Bakht und Jaeger, 1991 (NV):

Bakht und Jaeger, 1991 ermittelten anhand der Versuchsergebnisse von Sexsmith et al., 1979 eine Funktion zur Beschreibung der relativen Änderung der Streuung, in Abhängigkeit von der Systemgröße n (siehe Formel 7-14). Dieser Zusammenhang wurde bereits in Kapitel 3.2.1 vorgestellt, und bietet die Basis für die folgenden Berechnungen des Systembeiwertes nach der Formel 7-15.

$$\mu_n = \mu_1, \sigma_{n,BJ,NV} = \sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{n+1}}$$

μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_n	Mittelwert der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, NV
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,BJ,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-14

$$k_{sys} = \frac{f_{05,n}}{f_{05,1}} \rightarrow k_{sys,BJ,NV} = \frac{f_{05,n,BJ,NV} \{5\%; \mu_1; \sigma_{n,BJ,NV}\}}{f_{05,1,NV} \{5\%; \mu_1; \sigma_1\}}$$

k_{sys}	Systembeiwert
$k_{sys,BJ,NV}$	Systembeiwert unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, NV
$f_{05,n}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten
$f_{05,1}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten
$f_{05,n,BJ,NV}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, NV
$f_{05,1,NV}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,BJ,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-15

Berechnung des Systembeiwertes unter Berücksichtigung der relativen Streuungsfunktion nach Bakht und Jaeger, 1991 (LNV):

Basierend auf den vorhergehenden Überlegungen werden nun die Formalismen zur Berechnung des Systembeiwertes anhand der LNV als statistisches Verteilungsmodell betrachtet. Als Basis dienen die Parameter des Mittelwertes und der Standardabweichung der NV, welche unter Zuhilfenahme der Transformationsformeln nach Zupan und Turk, 2004 als Parameter der LNV umgerechnet werden (siehe Formel 7-16 und Formel 7-17). Die Berechnung des Systembeiwertes ist der Formel 7-18 zu entnehmen.

$$\mu_n = \mu_1 \rightarrow \mu_{BJ,LNV} = \ln \left(\frac{\mu_1^2}{\sqrt{(\sigma_{n,BJ,NV}^2 + \mu_1^2)}} \right)$$

- | | |
|--------------------|--|
| μ_1 | Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV |
| μ_n | Mittelwert der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, NV |
| $\mu_{BJ,LNV}$ | transformierter Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV |
| $\sigma_{n,BJ,NV}$ | Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, NV |
| n | Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System |

Formel 7-16

$$\sigma_{n,BJ,NV} = \sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{n+1}} \rightarrow \sigma_{n,BJ,LNV} = \sqrt{\ln \left(\frac{\sigma_{n,BJ,NV}^2}{\mu_1^2} + 1 \right)}$$

- | | |
|---------------------|--|
| μ_1 | Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV |
| $\sigma_{n,BJ,NV}$ | Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, NV |
| $\sigma_{n,BJ,LNV}$ | transformierte Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, LNV |
| σ_1 | Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV |
| n | Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System |

Formel 7-17

$$k_{\text{sys}} = \frac{f_{05,n}}{f_{05,1}} \rightarrow k_{\text{sys},BJ,LNV} = \frac{f_{05,n,BJ,LNV} \{5\%; \mu_{BJ,LNV}; \sigma_{n,BJ,LNV}\}}{f_{05,1,LNV} \{5\%; \mu_{BJ,LNV}; \sigma_{1,BJ,LNV}\}}$$

k_{sys}	Systembeiwert
$k_{\text{sys},BJ,LNV}$	Systembeiwert unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, LNV
$f_{05,n}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten
$f_{05,1}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten
$f_{05,n,BJ,LNV}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, LNV
$f_{05,1,LNV}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\mu_{BJ,LNV}$	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\sigma_{1,BJ,LNV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\sigma_{n,BJ,LNV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Bakht und Jaeger, 1991, LNV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-18

Berechnung des Systembeiwertes unter Berücksichtigung der relativen Streuungsfunktion nach Formel 7-11 (NV):

Anhand des unter Kapitel 7.5.4 und in der Formel 7-11 enthaltenen mathematischen Modells zur Charakterisierung der relativen Änderung der Streuung der Festigkeiten in Abhängigkeit der Systemgröße n werden nun die Formalismen des Modells zur Ermittlung des Systembeiwertes nach der NV vorgestellt (siehe Formel 7-19 und Formel 7-20).

$$\mu_n = \mu_1, \sigma_{n,COV,NV} = \mu_1 \cdot COV_1 \cdot n^{-2 \cdot COV_1}$$

μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_n	Mittelwert der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, NV
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,COV,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, NV
COV_1	Variationskoeffizient der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-19

$$k_{\text{sys}} = \frac{f_{05,n}}{f_{05,1}} \rightarrow k_{\text{sys},\text{COV},\text{NV}} = \frac{f_{05,n,\text{COV},\text{NV}} \{5\%; \mu_1; \sigma_{n,\text{COV},\text{NV}}\}}{f_{05,1,\text{NV}} \{5\%; \mu_1; \sigma_1\}}$$

k_{sys}	Systembeiwert
$k_{\text{sys},\text{COV},\text{NV}}$	Systembeiwert unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, NV
$f_{05,n}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten
$f_{05,1}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten
$f_{05,n,\text{COV},\text{NV}}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, NV
$f_{05,1,\text{NV}}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,\text{COV},\text{NV}}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-20

Berechnung des Systembeiwertes unter Berücksichtigung der relativen Streuungsfunktion nach Formel 7-11 (LNV):

Basierend auf den vorhergehenden Darlegungen mit Bezug zur Formel 7-11 werden nun die Formalismen zur Berechnung des Systembeiwertes anhand der LNV als statistisches Verteilungsmodell betrachtet. Als Basis dienen wiederum die Parameter des Mittelwertes und der Standardabweichung der NV, welche unter Zuhilfenahme der Transformationsformeln nach Zupan und Turk, 2004 als Parameter der LNV berechnet werden (siehe Formel 7-21 bis Formel 7-23).

$$\mu_n = \mu_1 \rightarrow \mu_{\text{COV},\text{LNV}} = \ln \left(\frac{\mu_1^2}{\sqrt{(\sigma_{n,\text{COV},\text{NV}}^2 + \mu_1^2)}} \right)$$

μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
μ_n	Mittelwert der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, NV
$\mu_{\text{COV},\text{LNV}}$	transformierter Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\sigma_{n,\text{COV},\text{NV}}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-21

$$\sigma_{n,BJ,NV} = \sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{n+1}} \rightarrow \sigma_{n,BJ,LNV} = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_{n,BJ,NV}^2}{\mu_1^2} + 1\right)}$$

μ_1	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
$\sigma_{n,COV,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, NV
$\sigma_{n,COV,LNV}$	transformierte Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, LNV
σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-22

$$k_{sys} = \frac{f_{05,n}}{f_{05,1}} \rightarrow k_{sys,COV,LNV} = \frac{f_{05,n,COV,LNV} \{5\%; \mu_{COV,LNV}; \sigma_{n,COV,LNV}\}}{f_{05,1,LNV} \{5\%; \mu_{COV,LNV}; \sigma_{1,COV,LNV}\}}$$

k_{sys}	Systembeiwert
$k_{sys,COV,LNV}$	Systembeiwert unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11 LNV
$f_{05,n}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten
$f_{05,1}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten
$f_{05,n,COV,LNV}$	5 % Quantile der Festigkeit des Systems aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, LNV
$f_{05,1,LNV}$	5 % Quantile der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\mu_{COV,LNV}$	Mittelwert der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\sigma_{1,COV,LNV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, LNV
$\sigma_{n,COV,NV}$	Standardabweichung der Festigkeit der Systeme aus n Komponenten, unter der Annahme der Änderung der Streuung nach Formel 7-11, LNV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-23

7.5.6.2 Gegenüberstellung der theoretischen Modelle zur Abschätzung der Systembeiwerte

Die folgenden 3D Darstellungen (Diagramm 7-40 bis Diagramm 7-43) beinhalten Berechnungen des Systembeiwertes k_{sys} (z-Achse) nach den unter Kapitel 7.5.6.1 vorgestellten Berechnungsgrundlagen. Betrachtet werden die Annahme eines ideal parallelen Systemwirkens, das Modell basierend auf den Überlegungen von Bakht und Jaeger, 1991, sowie ein unter Berücksichtigung der Formel 7-11 aufbauendes Modell, in Abhängigkeit von n . Die folgenden Berechnungen basieren auf den Variablen Variationskoeffizient (COV_1) der NV sowie der Systemgröße n , zur Beschreibung der Systemgröße.

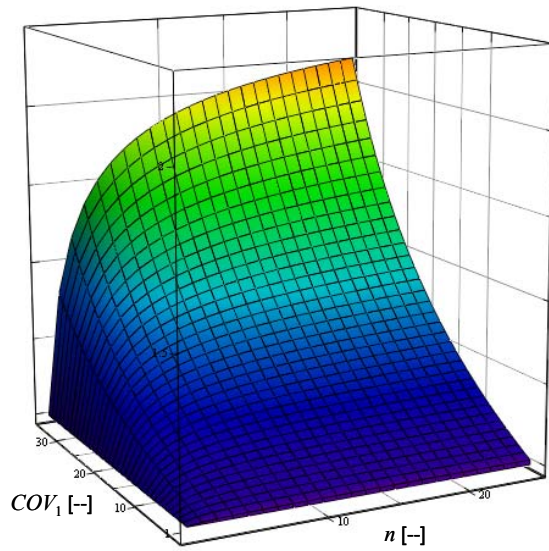


Diagramm 7-40: k_{sys} bei Annahme eines ideal parallelen Systems, NV

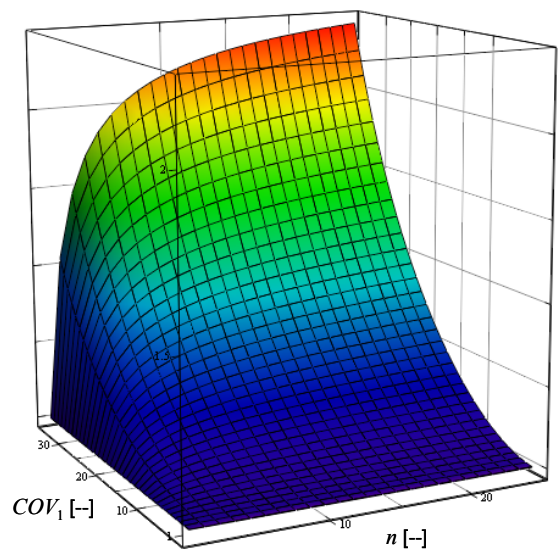
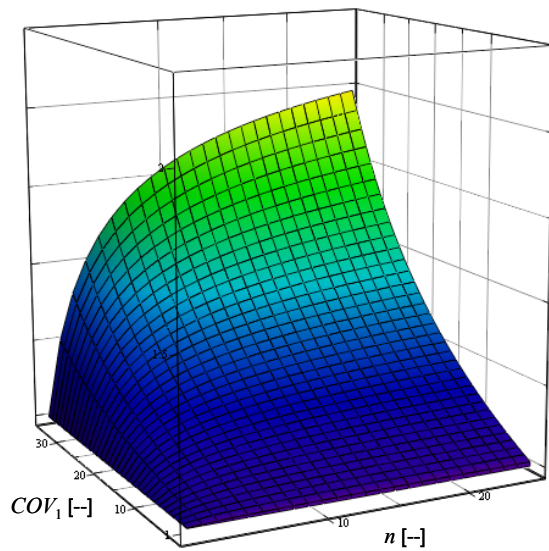


Diagramm 7-41: k_{sys} , nach Überlegungen von Bakht und Jaeger, 1991 (links), und nach der Formel 7-11 (rechts), NV

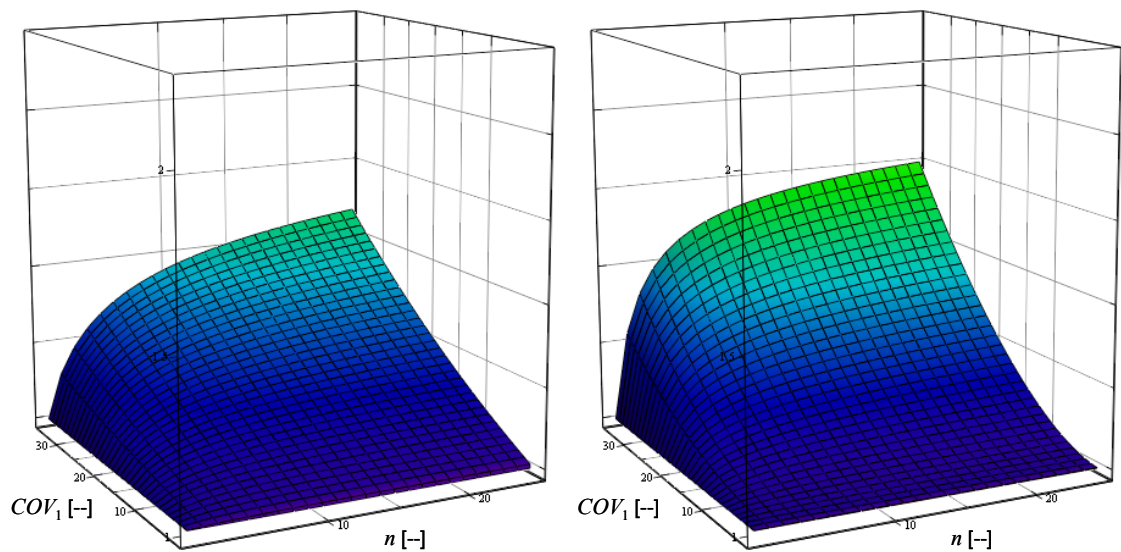


Diagramm 7-42: k_{sys} , nach Überlegungen Bakht und Jaeger, 1991 (links), und nach der Formel 7-11 (rechts), LNV

Wie man den Darstellungen (Diagramm 7-40 bis Diagramm 7-42) entnehmen kann, wird der Systembeiwert k_{sys} vordergründig von zwei Funktionen beschrieben: Erstens von einer Funktion des k_{sys} in Abhängigkeit von n , und zweitens von einer Funktion des k_{sys} in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten. Der erstgenannte Zusammenhang weist am Beginn einen starken Anstieg auf, welcher mit zunehmender Anzahl n weitestgehend abflacht. Dieser Verlauf entspricht im Wesentlichen den bekannten Funktionen aus den Normen des OHBDC-91-1:1991 und des AS 1720.1:1997. Die zweite Funktion weist einen mit zunehmendem Variationskoeffizienten der Festigkeit der Einzelkomponenten progressiven Verlauf auf.

Aus den Gegenüberstellungen der Modelle lässt sich ableiten, dass der Systembeiwert, ermittelt unter Berücksichtigung der Änderungen der Streuung nach der Formel 7-11, bei $COV_1 = 35\%$ den höchsten Systembeiwert liefert, bei Betrachtung der Normalverteilung sowie auch bei der log. Normalverteilung. Bei vergleichender Betrachtung der Annahme eines ideal parallelen Systemverhaltens und der 3 D Darstellung nach Bakht und Jaeger, 1991 (NV) bestätigt sich zudem die bereits in Kapitel 3.2.1 vermerkte, um einen konstanten Faktor verschobene Parallelität der beiden Funktionen, sowie der konservativere Ansatz von Bakht und Jaeger, 1991.

Aus der Konfrontation der Funktionsverläufe nach der Formel 7-11 und jenem nach Bakht und Jaeger, 1991, bei NV und LNV, lässt sich bei näherer Betrachtung des Be-

reiches COV_1 von 0 % bis 15 % ein nahezu linearer Anstieg des Systembeiwertes k_{sys} bei Bakht und Jaeger, 1991, mit einem flacheren, aber progressiven Anstieg der Funktion des Systembeiwertes k_{sys} nach der Formel 7-11 feststellen. Demzufolge kann vorerst daraus geschlossen werden, dass die Funktion nach Bakht und Jaeger, 1991 im unteren Wertebereich des COV_1 einen höheren k_{sys} liefert als die Funktion unter Berücksichtigung der Formel 7-11; diese Tendenz aber bei einem höheren COV_1 um. Zur Bestimmung des Überschneidungsbereiches wurden die Formeln der Berücksichtigung der sich mit n ändernden Streuung näher untersucht. Stellvertretend für die postulierte Formel von Bakht und Jaeger, 1991 wurde der Zusammenhang eines ideal parallelen Systemwirkens der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Formel 7-11, in der Formel 7-24, gegenübergestellt.

$$\frac{\sigma_1}{\sqrt{n}} = \sigma_1 \cdot n^{-2 \cdot COV_1} \rightarrow -0,5 \cdot \ln(n) = -2 \cdot COV_1 \cdot \ln(n) \rightarrow COV_1 = 0,25$$

σ_1	Standardabweichung der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
COV_1	Variationskoeffizient der Festigkeit der Einzelkomponenten, NV
n	Anzahl der mitwirkenden Komponenten im System

Formel 7-24

Bei einem Variationskoeffizienten von $COV_1 = 25\%$ entspricht somit der Systembeiwert k_{sys} nach der Formel 7-11 jenem unter der Annahme eines parallelen Systems. Somit bildet $COV_1 = 25\%$ die Grenze zwischen diesen Beziehungen und die Grenze, ab welcher der Systembeiwert nach der Formel 7-11 progressiver ansteigt als nach der Berechnung unter Annahme eines parallel wirkenden Systems. Aufgrund des am Anfang festgelegten Systemaufbaues aus parallelen, subseriellen Strukturen ist ein Systembeiwert k_{sys} zwischen dem seriellen und parallelen Systemansatz zu erwarten. Ein Systembeiwert k_{sys} höher dem parallelen Ansatz ist somit allgemein und im Speziellen nach dieser Definition nicht möglich und schränkt den Einsatzbereich der Formel 7-11 mit $COV_1 < 25\%$ ein. Eine Anpassung der Funktion durch einen zusätzlichen Parameter welcher das progressive Verhalten dämpft ist daher nötig. Zur Bestimmung des Parameters und dessen Einfluss auf den Verlauf der Funktion werden weitere Versuchsreihen empfohlen.

Zur weiteren Abschätzung des Bereiches $COV_1 > 25\%$ beinhalten Diagramm 7-43 bis Diagramm 7-45 Darstellungen der Standardabweichung nach NV und LNV, sowie der 5 % Quantile, unter Variation der Parameter COV_1 und n .

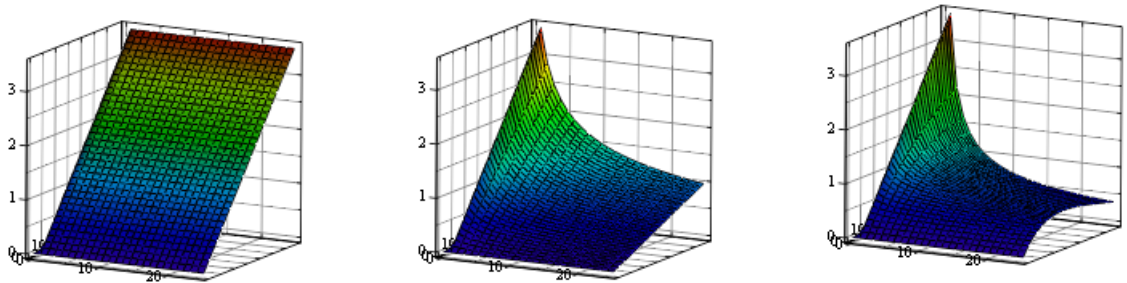


Diagramm 7-43: Standardabweichung der NV (links), nach Bakht und Jaeger, 1991, NV (Mitte), nach Formel 7-11, NV (rechts); COV_1 [0; 35 %] (Achse verdeckt), n [0; 25]

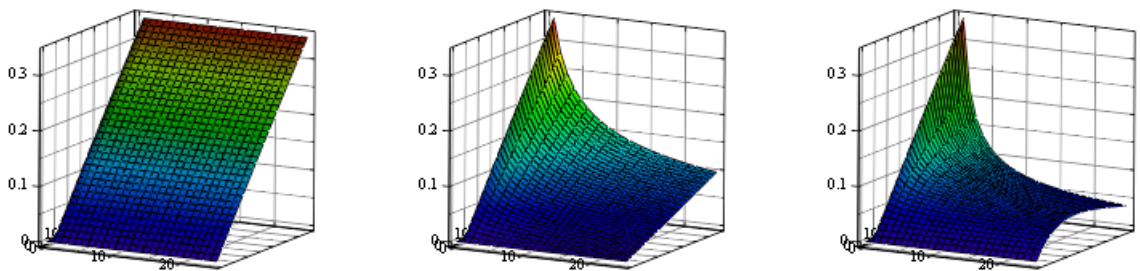


Diagramm 7-44: Standardabweichung der LNV (links), nach Bakht und Jaeger, 1991, LNV (Mitte), nach Formel 7-11, LNV (rechts); COV_1 [0; 35 %] (Achse verdeckt), n [0; 25]

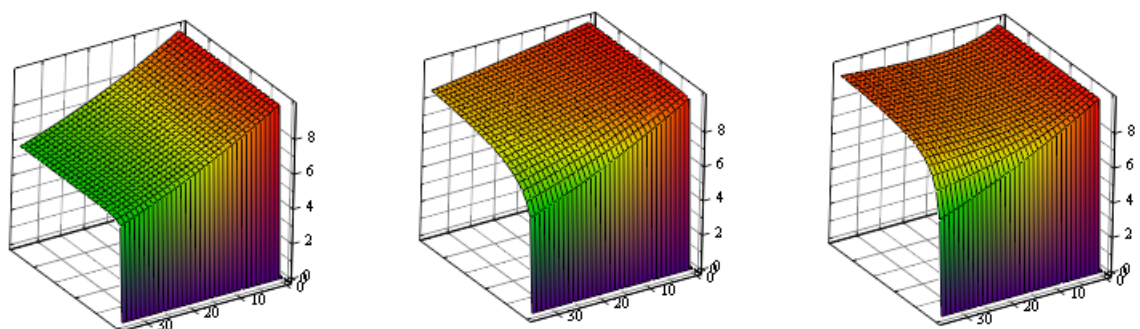


Diagramm 7-45: 5 % Quantil der LNV (links), nach der LNV nach Bakht und Jaeger, 1991, (Mitte), nach der LNV nach Formel 7-11 (rechts); COV_1 [0; 35 %], n [0; 25] (Achse verdeckt)

Aus der Betrachtung der vorgehenden Diagramme ist der unterschiedliche Verlauf der Standardabweichung und der 5 % Quantile, in Abhängigkeit der betrachteten Variablen COV_1 und n , zwischen den Modellen nach Bakht und Jaeger, 1991 und der Formel

7-11 ersichtlich. In Abhängigkeit von n weist die Funktion nach Bakht und Jaeger, 1991 einen flacheren Abfall auf, in Abhängigkeit von COV_1 zeigt sich ein zu erwartender linearer Anstieg der Standardabweichung. Unter Berücksichtigung der Funktion nach der Formel 7-11 in Abhängigkeit der $COV_1 < 25\%$ fällt ein nahezu linearer, aber steilerer Anstieg der Standardabweichung auf. Darüber hinaus zeichnet sich ein Abfall der Standardabweichung ab. Resultierend aus dem Verlauf der Standardabweichung ergibt sich bei Betrachtung der Funktionen der 5 % Quantile, folgendes Bild: Bei Berechnung der 5 % Quantile, unter Berücksichtigung der Funktion nach Bakht und Jaeger, 1991, zeigt sich ein mit ansteigendem COV_1 zu erwartender Abfall der 5 % Quantile. Dieser fällt bei geringem n sehr erheblich auf, im Bereich von $n > 10$ nimmt er einen nahezu linearen Verlauf an. Auch bei Berücksichtigung des formalen Zusammenhanges aus Formel 7-11 ist im Bereich von $COV_1 < 25\%$ ein linearer Abfall der 5 % Quantile zu beobachten, welcher jedoch bei $COV_1 > 25\%$, aufgrund des Abfallens der Standardabweichung, wieder ansteigt. Auch ist für diesen Fall ein linearer Übergang des Anstieges der 5 % Quantile in Abhängigkeit von n bereits früher gegeben.

Die Begründung dieses wechselnden Verhaltens der Beschreibung der Änderung der Streuung nach der Formel 7-11 liegt in der Tatsache, dass bei der Berechnung der 5 % Quantile die Streuung der Festigkeiten der Einzelkomponenten innerhalb des Verteilungsparameters der Standardabweichung zwei mal berücksichtigt wird. Somit ergibt sich ein mit COV_1 ansteigender Einfluss der Streuung, welcher zunehmend den Systemzugewinn in Form des Systembeiwertes k_{sys} überschätzt. Die Anwendbarkeit der Formel 7-11 ist, aus Sicht der theoretischen Überlegungen, bei $COV_1 > 25\%$ nicht gegeben.

7.5.6.3 *Gegenüberstellung der theoretisch untersuchten Modelle der Systembeiwerte mit den Versuchsergebnissen*

In diesem Abschnitt werden die aus Versuchen ermittelten Systembeiwerte k_{sys} jenen der betrachteten theoretischen Modelle zur Ermittlung des Systembeiwertes gegenübergestellt. In Betracht gezogen werden eine ideal parallele Systemwirkung, Überlegungen nach Bakht und Jaeger, 1991, und das Modell unter Berücksichtigung der Streuung in Abhängigkeit von n nach der Formel 7-11. Die Ergebnisse aus den Berechnungen unter der Annahme einer Normalverteilung (NV) sind im Diagramm 7-46 enthalten. Es wurden die Ergebnisse der Untersuchungsreihen ZUG_60-78 und BIE-

GUNG_80-160, sowie jene von Schickhofer, 2004 und Jöbstl, 2006 in die Auswertung inkludiert.

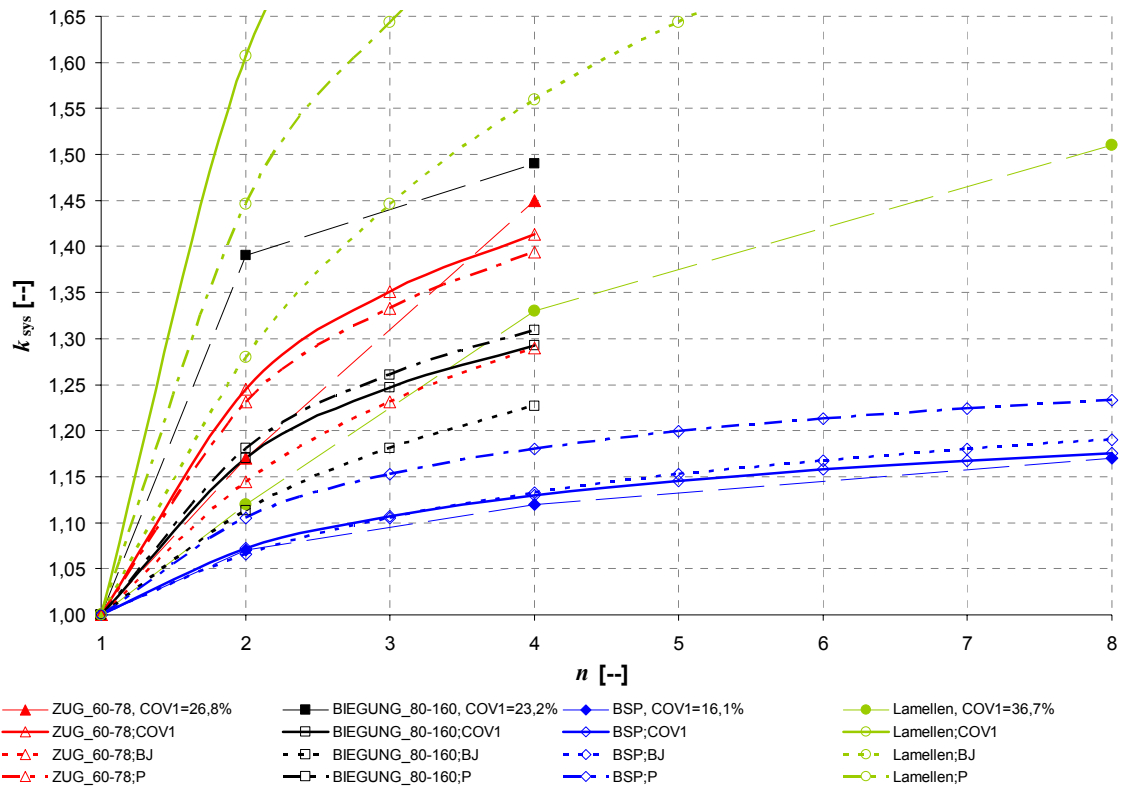


Diagramm 7-46: Gegenüberstellung der Systembeiwerte k_{sys} aus den Versuchsdaten mit den Modellen der parallelen Systemwirkung (P), nach Bakht und Jaeger, 1991 (BJ), und nach der Formel 7-11 (COV_1)

Das Modell des idealen parallelen Systemverhaltens kennzeichnet, aufgrund der Systembeschreibung unter Inkludierung der subseriellen Strukturen, die obere Grenze des Potentialzugewinnes. Am Beispiel der Untersuchungsreihe ZUG_60-78, mit einer Ausgangsstreuung der Referenzserie $COV_1 = 26,8 \%$, lässt sich nachvollziehen, dass die Funktion nach der Formel 7-11 ab $COV_1 > 25 \%$ zu progressiv verläuft und die Annahme des parallelen Systems übertreibt. Im Vergleich mit den Versuchsergebnissen ist auch festzuhalten, dass die Funktion nach Bakht und Jaeger, 1991 sehr konservativ die Versuchswerte wiedergibt. Aufgrund der Tatsache, dass der Anstieg der 5 % Quantile der Serie Z_4_xx im Vergleich zur Serie Z_2_xx nahezu nur auf den Anstieg des Mittelwertes zurückzuführen ist, kann keine Aussage darüber getroffen werden welches Modell die Ergebnisse der Untersuchungsreihe ZUG_60-78 am Besten repräsentiert. Unter Betrachtung der Anpassung an den Versuchspunkt Z_2_xx ist der weitere Verlauf nach der Funktion von Bakht und Jaeger, 1991 ebenfalls nicht auszuschließen.

Ähnliche Aussagen gelten für die Untersuchungsreihe BIEGUNG_80-160. Hier resultiert der hohe k_{sys} bei B_2_xx ebenfalls aus einem sehr hohen Anstieg des Mittelwertes im Vergleich zur Referenzserie B_1_xx.

Die Systembeiwerte der Versuchsreihe nach Jöbstl, 2006 an Brettsperrholzplatten (BSP) werden vom Modell, aufbauend auf die Formel 7-11, am besten wiedergegeben. Der Unterschied zur Funktion von Bakht und Jaeger, 1991 ist aber vernachlässigbar.

Anhand der Untersuchungsreihe der BSH-Lamellen, nach Schickhofer, 2004, mit einem $COV_1 = 36,7 \%$, wird ersichtlich, dass hier alle 3 Modelle zur Repräsentierung der k_{sys} Beiwerte versagen. Keiner der Versuchspunkte wird in den Modellen abgebildet, die Funktionsverläufe, basierend auf theoretischen Überlegungen, sind bei Weitem zu progressiv. Es ist jedoch nicht mit Sicherheit erklärbar, ob hier wirklich die Modelle versagen oder der Variationskoeffizient der Festigkeiten der Einzelkomponenten, aufgrund des geringen Prüfumfanges von 20 # versuchstechnisch zu hoch ermittelt wurde und folglich die mechanischen Eigenschaften der Komponenten der Systeme nur unzureichend repräsentiert. Ein Variationskoeffizient von $COV_1 = 36,7 \%$ ist zwar generell möglich, aber im Allgemeinen ist bei BSH-Lamellen aus Fichte eine Streuung im Bereich von 28 % bis 35 % zu erwarten.

8 **SCHLUSSBEMERKUNGEN UND AUSBLICK**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Systemeffekte, als Resultat von Ausgleichseffekten und Lastverteilungen zwischen Komponenten und Elementen theoretisch sowie anhand von Versuchen beleuchtet. Das Hauptaugenmerk dieses Projektes lag in der Erfassung und Charakterisierung von kontinuierlich verbundenen, parallelen und als System wirkende Strukturen.

Aufbauend auf einer durchgeführten nationalen und internationalen Literatur- und Normenrecherche (siehe Kapitel 3 und 4) wurden Systeme unterteilt, charakterisiert, Effekte differenziert und Grenzfälle hinsichtlich der Systemwirkung, der Lastverteilung und Lastumverteilung diskutiert. Die Ergebnisse dieser Recherchen repräsentieren eine mannigfaltige Bandbreite und Ausprägung von Potentialzugewinnen, basierend auf theoretischen Betrachtungen und Versuchen. Vergleicht man die Regelungen der Normen zum Systemeffekt spiegelt sich diese Bandbreite wieder. Unterschiede von mehreren hundert Prozent für die Beiwerte zwischen Systemen vergleichbarer Charakteristik sind gegeben.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse der Literatur- und Normenrecherche wurde der Systembeiwert für aus Konstruktionsvollholz (KVH[®]) aufgebaute Querschnitte versuchstechnisch auf Zug und Biegung bestimmt. Zudem fanden Biegeversuche am Produkt 'Balkenbinder', als Struktur von vertikal übereinander angeordneten Systemen aus KVH[®], statt. Ergänzend wurden Zugversuche an Systemen aus losen und starr verbundenen BSH-Lamellen, welche innerhalb eines Systems auf Grund der Ultraschallgeschwindigkeit, respektive Steifigkeit, vorsortiert wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsreihen und der Interpretation sind den Kapiteln 6 und 7 zu entnehmen.

Im Zuge der Interpretation wurde der Versuch unternommen allgemein gültige Beziehungen zur Charakterisierung von Teilbereichen der Systemwirkung sowie zur Abschätzung des Systemeffektes im Gesamten zu definieren. Im Rahmen der Möglichkeiten und des Zeitbudgets konnte das 'load sharing' in Verbindung mit 'load redistribution', sowie eine Betrachtung der Lastumverteilungsmechanismen GLS und LLS näher betrachtet werden. Untersuchungen der Versagensmerkmale, Korrelationen und Ver-

teilungparameter, in Abhängigkeit der Systemgröße, dienen der weiteren Erfassung der Wirkungsweise von Systemen bei deren Prüfung bis zum Versagen.

Zur Charakterisierung der Änderung der relativen Streuung COV in Abhängigkeit der Systemgröße n wurde ein mathematischer Zusammenhang definiert. Mit Hilfe von Versuchsergebnissen aus der Literatur konnte der Formalismus verifiziert werden. Aufgrund der breiten Anwendbarkeit dieser Funktion für verklebte Systeme aus BSH-Lamellen, BSP, KVH[®], und vorgespannten Systemen ('stress laminated bridge decks') ist zu schließen, dass sich die Streuung der Festigkeit der Einzelkomponenten, als ein Haupteinflussparameter für die Systemfestigkeit, weitgehend von den Parametern der Breite der Einzelkomponenten, der Holzart (untersucht wurden Nadelhölzer) und des Komponentenaufbaues (Lamellen, KVH[®]-Stangen, BSP) unabhängig verhält. Der definierte Formalismus bildet somit eine solide Basis für die weitere Modellbildung zur Beschreibung des Systemeffektes in Abhängigkeit des Parameters COV_1 der Festigkeit der Einzelkomponenten. Eine vergleichende Betrachtung mit den bereits in den Normen verankerten Modellen eines ideal parallelen Systemverhaltens und jenes nach Bakht und Jaeger, 1991 ergab, unter Verwendung der Normalverteilung zur Berechnung der 5 % Quantile, eine repräsentative Anpassung bei $COV_1 < 25 \%$. Aufgrund der zweifachen Berücksichtigung der Eingangsstreuung im Formalismus der Berechnung der 5 % Quantile der Festigkeit führen die Betrachtungen nach der definierten Funktion zunehmend zu einer Überschätzung des tatsächlichen Systempotentials. Eine Anpassung der Funktion durch einen weiteren Parameter welcher dieser Überschätzung entgegenwirkt ist zu untersuchen. Zusätzlich werden im Rahmen von weiterführenden Tätigkeiten andere statistische Modelle, wie zum Beispiel jenes der drei parametrischen Weibullverteilung, zur Berechnung der 5 % Quantile der Systemfestigkeit herangezogen. Anhand der Ergebnisse und der fehlenden Robustheit in der Ermittlung des Systembeiwertes ist deutlich ersichtlich, dass die zugrunde liegenden Prüfumfänge der einzelnen Serien zu gering sind um statistisch gesicherte Aussagen zu treffen.

Auf Basis der Erkenntnisse und der getroffenen Überlegungen kann zurzeit kein Vorschlag für die Regelung des Systemeffektes in der Bemessung des Eurocode 5 dargestellt werden. Es fehlen hierzu die Abklärung des Verlaufes des Mittelwertes der Festigkeit in Abhängigkeit von n , sowie eine, den Versuchsergebnissen über das gesamte in der Holzindustrie zu erwartende Spektrum der Streuung, repräsentierende Berücksichtigung des Variationskoeffizienten. Der lineare Verlauf des Systembeiwertes in den

derzeitigen Regelungen der europäischen Normen kann nicht bestätigt werden. Das Systempotential von Duo- und Triobalken wird bei weitem unterschätzt.

Im Zuge der Recherche und der Untersuchungen konnte zudem der Systemeffekt der Steifigkeit nachgewiesen werden. Die Steifigkeit ist in der Bemessung, neben der Festigkeit, ein wichtiger Materialparameter. Trotzdem werden Produkte aus Holz vordergründig nach der Festigkeit 'sortiert' und in Festigkeitsklassen eingeteilt und gehandelt. Eine Sortierung nach der Festigkeit ist aber im eigentlichen Sinne nicht möglich. Vielmehr wird diese Größe anhand von Parametern wie z.B. des zerstörungsfrei ermittelbaren dyn. E-Moduls, der Rohdichte und weiteren indikativen Größen, unter Zusammenführung in einer multiplen Regression, abgeschätzt. Solange man auf Basis von Sortiermethoden, welche in Summe auf Daten hoher Streuungen basieren, eine Einteilung der Holzprodukte wirtschaftlich durchführt, ist eine Reduktion der Variation von Festigkeitswerten innerhalb einer Klasse unter den derzeit üblichen Werten nicht möglich. Dies kommt, wie bereits erläutert dem erzielbaren Potentialzugewinn durch Systemprodukte sehr zugute. Trotz allem wird eine Einführung von Steifigkeitsklassen, im Sinne der Relevanz für die Bemessung, empfohlen. Somit wäre auch ein Systemeffekt der Steifigkeit, bezogen auf dessen 5 % Quantile, zu berücksichtigen.

Ein gezielter Aufbau von Systemstrukturen aus interagierenden Komponenten ist im Hinblick auf die Sicherheit von Konstruktionen aus Holz zu empfehlen. Die Verbindung von Mechanik, Technologie und Wirtschaft bietet die Chance für Neu- und Weiterentwicklungen von hochleistungsfähigen Holzprodukten. Es liegt an der Kreativität und dem Engagement der Interessensgruppen Holz als Werkstoff nach seinem Potential einer hochwertigen Verwendung zuzuführen. Die Erkennung und Berücksichtigung von Vergütungseffekten der Festigkeit und Steifigkeit durch gezielten Aufbau von Systemwerkstoffen ist ein wichtiger Weg in diese Richtung.

9 ZITIERTE QUELLEN

9.1 Literatur

Abernethy, R. B. (2000)

"The new Weibull Handbook: Reliability & Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Survivability, risk, Cost and Warranty Claims"
CIB/TIB Hannover: 4. Edition, 125790678, ISBN 0-9653062-1-6.

Augustin, M. (2004)

"Eine zusammenfassende Darstellung der Festigkeitssortierung von Schnittholz"
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Holzbau, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz.

Bakht, B., Jaeger, L. G. (1991)

"Load sharing in timber bridge design"
Canadian Journal of Civil Engineering, Canada: Vol. 18, pp. 312-319.

Barrett, J. D., Fewell, A. R. (1990)

"Size Factors for the Bending and Tension Strength of Structural Timber"
CIB-W18 A, Lisbon, Portugal: Paper 23-10-3.

Barrett, J. D., Lam, F., Lau, W. (1992)

"Size effects in visually graded softwood structural lumber"
CIB-W18, Åhus, Sweden: Paper 25-6-5.

Bohnhoff, D. R., Moody, R. C., Verrill, S. P., Shirek, L. F. (1991)

"Bending properties of reinforced and unreinforced spliced nail-laminated posts"
U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI: Research Paper FPL-RP-503, 24 p.

Brandner, R. (2005)

"P03 qm_online: Systemfaktor k_{sys} "
holz.bau forschungs gmbh, 20. Juni 2005, Graz, Austria: Vortrag (intern) im Rahmen der Präsentation des Projektes P03 qm_online anlässlich der 4. Fachbeiratssitzung am Kompetenzzentrum.

Brandner, R. (2006)

"Leistungspotential von Brettschichtholz: Längszug, Längsdruck und Querdruck"
holz.bau forschungs gmbh, Graz, Austria: Prüfbericht des Projektes nonK_{Ind} B_S_H.

Bulleit, W. M., Liu, W.-F. (1994)

"First-Order Reliability Analysis of Wood Structural Systems"
Journal of Structural Engineering, ASCE: Vol. 121, No. 3, pp. 517-529.

Cramer, S. M., Drozdek, J. M., Wolfe, R. W. (2000)

„Load sharing effects in light-frame wood-truss Assemblies“
Journal of Structural Engineering, ASCE: Vol. 126, No. 12, pp. 1388-1394.

Criswell, M. E. (1979)

"Selection of limit states for wood floor design"

Probabilistic mechanics and structural reliability, ASCE, New York, N.Y.: pp. 161-165, (ref. von Liu und Bulleit, 1995).

Davalos, J. F., Sonti, S. S., Shaik, S., Moody, R. C., Hernandez, R. (1996)

"System stiffness for stress-laminated timber bridge decks"

Proceeding of the International Wood Engineering Conference (IWEC), October 28-31, New Orleans, Louisiana, USA: Vol. 1, pp. 213-220.

Dill-Langer, G., Hidalgo, C. R., Kun, F., Moreno, Y., Aicher, S., Herrmann, H. J. (2003)

„Size dependency of tension strength in natural fiber composites“

Physica A, Elsevier Science B.V.: Vol. 325, pp. 547-560.

Douglas, B. K., Line, P. P. E. (1996)

"System effects in wood assemblies"

Proceeding of the International Wood Engineering Conference (IWEC), October 1996, Louisiana, USA: Vol. 3, pp. 371-375.

Douglas, B. K., Line, P. (1997)

"Innovations in design of light frame structures to resist high winds"

Proceeding of the ASCE Structures Congress '97, Portland, Oregon: pp. 855-859, (ref. von Rosowsky und Yu, 2004).

Faherty, K. F., Williamson, T. G. (1999)

"Wood engineering and construction Handbook, 3rd Edition"

McGraw-Hill Handbooks, McGraw.Hill, Inc., USA: ISBN 0-07-022070-0.

Falk, R. H., Colling, F. (1995)

"Laminating Effects in Glued-Laminated Timber Beams"

Journal of Structural Engineering, ASCE: Vol. 121, No. 12, pp. 1857-1863.

Fischer, G. (2005)

"Stochastik einmal anders: Parallel geschrieben mit Beispielen und Fakten, vertieft durch Erläuterungen"

Fakultät für Mathematik der Technischen Universität München, Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Deutschland:ISBN 3-528-03967-1.

Foschi, R. O., Yao, Z. C. (1987)

"Load Sharing Factors for Flat Roof Systems under Uniform Loads"

Department of Civil Engineering, University of British Columbia: Reliability of Wood Structures Research Project, Report No. 3, (ref. von Gromala und Sharp, 1988).

Glos, P. (1999)

"The great potential of wood as building material for the next century"

Fachbeitrag aus dem Tagungsband, 1st RILEM Symposium on Timber Engineering, Stockholm: p. 3-12, (ref. von Augustin, 2004).

Gromala, D., Sharp, D. (1988)

"Concepts for wood structural system performance"

Proceeding of the International Conference on Timber Engineering, Vol. 1, pp. 136-142.

Gupta, R., Gebremedhin, K. G., Grigoriu, M. D. (1992)

"Characterizing the Strength of Wood Truss Joists"

Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, USA: Paper 2770, In: Transactions of the ASAE - Selected Contributions in Engineering for Agriculture and other Bioresource Industries, American Society of Agricultural Engineers, USA: Vol. 35, No. 4, pp. 1286-1290.

Hansson, M., Thelandersson, S. (2000)

"Effect of within member variability on the reliability of timber trusses"

Proceeding of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), British Columbia, Canada.

Hansson, M., Isaksson, T. (2001)

"System effect in sheathed parallel timber beam structures"

CIB-W18, Venice, Italy: paper 34-8-1.

Hansson, M., Isaksson, T. (2002)

"System effect in sheathed parallel timber beam structures – Part II"

CIB-W18, Meeting 35, September 2002, Kyoto, Japan: paper 35-8-1, 16 p.

Hartung, J., Elpelt, B., Klösener, K. H. (2002)

"Statistik: Lehr und Handbuch der angewandten Statistik; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen"

Oldenbourg Verlag München Wien: 13., unwesentlich veränderte Auflage, ISBN 3-486-25905-9.

Hidalgo, R. C., Ferenc, K., Herrmann, H. (2001)

"Bursts in a fiber bundle model with continuous damage"

Physical Review E, The American Physical Society: Vol. 64, 066122, pp. 1-9.

Hidalgo, R. C. (2003)

"Statistical failure properties of fiber-reinforced composites"

Dissertation an der Fakultät Physik der Universität Stuttgart, Germany.

Jaeger, L. G., Bakht, B. (1987)

"Effect of deflection profile on the failure load of laminated timber bridges"

Proceeding of the Fifth International Conference on Probability in Soil and Structural Mechanics, May 25-29, Vancouver, B.C.: Vol. 1, pp. 440-443, (ref. von Bakht und Jaeger, 1991).

Jöbstl, R. A. (2006)

"P01 II shell_structures: 1. Zwischenbericht der Teilprojekte: Kriechen - Traglastermittlung: Statische Biegeprüfungen an BSP"

Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Graz, Austria: Vortrag (intern) im Rahmen der Präsentation des Projektes P01 II shell_structures anlässlich der 5. Fachbeiratssitzung am, 27. Januar 2006.

Kim, H., Kvam, P. H. (2004)

„Reliability Estimation Based on System Data with an Unknown Load Share Rule“
PubMed, NCBI, Springer, Netherlands: Vol. 10, No. 1, ISSN:1380-7870, pp. 83-94.

Kloster, M., Hansen, A., Hemmer, P. C. (1997)

„Burst avalanches in solvable models of fibrous materials“
Physical Review E, The American Physical Society: Vol. 56, No. 3, pp. 2615-2625.

Landis, C. M., Beyerlein, I. J., McMeeking, M. (2000)

„Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites“
Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Pergamon, Elsevier Science Ltd.: Vol. 48, pp. 621-648.

Liu, W.-F., Bulleit, W. M. (1995)

„Overload behavior of sheated lumber systems“
Journal of Structural Engineering, ASCE: Vol. 121, No. 7, pp. 1110-1118.

Liu, W.-F., Bulleit, W. M. (1995)

„Approximate reliability analysis of wood structural systems“
Structural Safety, Elsevier Science B. V.: Vol. 17, pp. 59-78.

Lynch, J. D. (1999)

“On the joint distribution of component failures for monotone load-sharing systems”
Journal of Statistical Planning and Inference, Elsevier Science B.V.: No. 78, pp. 13-21.

Madsen, B. (1989)

“Proposal for including size effects in CIB W18: A Timber Design Code”
CIB-W18 A, Berlin, Germany: Paper 22-100-2.

Mayo, A. P. (1978)

“Trussed rafter roofs: load distribution and lateral stability”
Building Research Establishment (BRE), Prince Risborough Laboratory, Aylesbury, Buckinghamshire, U.K.: Info. Paper IS 24/78, (ref. von Mtenga et al., 1995).

McAlister, R. H. (1974)

“Strength Characteristics of Two-Ply Vertically Laminated Beams of Southern Pine”
Forest Products Journal: Band 8, Nr. 8, pp. 39-43.

McCutcheon, W. J. (1977)

“Method for predicting the stiffness of wood joist floor systems with partial composite action”
Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin: USDA Res. Paper FPL 289.

McCutcheon, W. J. (1984)

“Deflection of uniformly loaded floors: a beam-spring analog”
Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin: USDA Res. Paper FPL 449.

Mignolet, M. P., Mallick, K. (1995)

"Random inelastic behaviour of composite materials with local load sharing"

Probabilistic Engineering Mechanics, Elsevier Science Limited, Great Britain: Vol. 10, pp. 83-93.

Moody, R. C., Hernandez, R. (1997)

"Glued-laminated Timber"

In: Smulski, Stephen, ed., Engineered Wood Products - A guide for Specifiers, designers and users, PFS Research Foundation, Madison, WI: Chapter 1, ISBN-096556736-0-X, pp. 1-1-1-39.

Mtenga, P. V., Cramer, S. M., Peyrot, A. H., Wolfe, R. W. (1995)

„System Factors for light-Frame Wood Truss Assemblies“

Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 2, pp. 290-300.

Nemeth, L. J. (1967)

"Determination of Allowable Working Stresses for Vertically Laminated Beams"

Forest Products Journal: Vol. 17, No. 4, pp. 23-30.

ÖVQ - Autorenkollektiv (2005)

"TQM - Verbesserung von Unternehmensprozessen"

Skriptum der ÖVQ zum Lehrgang QMT, ÖVQ Wien, Austria: Revision 03/2005.

Polensek, A. (1976)

"Rational design procedure for wood-stud walls under bending and compression loads"

Wood Science: Vol. 9, No. 1, pp. 8-20, (ref. von Rosowsky und Yu, 2004).

Pradhan, S., Chakrabarti, B. K. (2004)

"Failure properties of fiber bundle models"

International Journal of Modern Physics B, World Scientific Publishing Company: WSPC/Instruction File, July 10, 2004, 8:22, p.18.

Reece, P. O. (1949)

"Chapter 6: Statistical Analysis, 6.06: Averages", "Chapter 9: Beams, 9.07: Laminated Beams"

In: An introduction to the design of timber structures, E. & F. N. Spon LTD, Scientific & Technical Publications, London: pp. 100-106, 160-168.

Riberholt, H. (1990)

"Proposal for Eurocode 5 text on timber trussed rafters"

CIB-W18A - Timber structures, Technical University of Denmark: Paper 23-14-2.

Rosowsky, D. V., Yu, G. (2004)

"Partial factor approach to Repetitive-member system factors"

Journal of Structural Engineering, ASCE: Vol. 130, No. 11, pp. 1829-1841.

Rouger, F., Barrett, J. D. (1995)

"Size effects in timber"

Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e. V., Düsseldorf, Deutschland: In: Informationsdienst Holz - Holzbauwerke nach Eurocode 5: Grundlagen, Entwicklungen, Ergänzungen: STEP 3: ISSN 0446-2114.

Sandoz, J. (1994)

"The multi glue laminated timber"

Pacific Timber Engineering Conference (PTEC), July 11-15, 1994, Gold Coast Australia: Published by the Timber Research and Development Advisory Council, Queensland, Australia: Vol. 2, ISBN 1875432, pp. 611-617.

Schickhofer, G. (2004)

"Holzbau - Der Roh- und Werkstoff Holz"

Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz: Skriptum S-4-01A/2004, WS 2004/2005, Version 1.0, Kapitel 3.3.3: Ermittlung des Systembeiwertes k_{sys} aus Versuchen. Durchführung: H. Unterwieser.

Sexsmith, G. R., Boyle, P. D., Rovner, B., Abbott, R. A. (1979)

"Load sharing in vertically laminated, post-tensioned bridge decking"

Western Products Laboratory, Vancouver, B.C.: Technical Report No. 6, (ref. von Bakht und Jaeger, 1991).

Sharp, D., Gromala, D. (1988)

"System behaviour of single composite structural members"

Proceeding of the International Conference on Timber Engineering (ICOTE), Vol. 1, pp. 635-643.

Thelandersson, S., Larsen, H. J. - editors (2003)

"Timber engineering"

John Wiley & Sons Ltd., England: ISBN 0-470-84469-8.

Trendelenburg, R. (1995)

"Holz als Rohstoff"

Verlag Hanser, München: (ref. von Augustin, 2004)

Turcotte, D. L., Newman, W. I., Shcherbakov, R. (2003)

"Micro and macroscopic models of rock fracture"

Geophys. J. Int., RAS: Vol. 152, pp. 718-728.

U.S. Department of Agriculture (1955)

"Wood Handbook"

No. 72. (ref. von Nemeth, 1967)

Voß, W. sowie Autorenkollektiv (2004)

"Taschenbuch der Statistik"

Fachbuchverlag Leipzig, im Carl Hanser Verlag: 2., verbesserte Auflage, ISBN 3-446-22605-2.

Weibull, W. (1939)

„A Statistical Theory of the Strength of Materials“

Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm: Ingeniörsveteskapssakademins Handlingar Nr. 151.

Wheat, D. L., Gromala, D. S., Moody, R. C. (1986)

"Static behaviour of wood-joint floors at various limit states"

Journal of Structural Engineering, ASCE: Vol. 112, No. 7, pp. 1677-1691. (ref. von Liu und Bulleit, 1995).

Wikipedia, die freie Enzyklopädie

"Systemverhalten"

<http://de.wikipedia.org/wiki/Systemverhalten/> (14. Juni, 2005).

Williams, G. D., Bohnhoff, D. R., Moody, R. C. (1994)

"Bending Properties of four-layer nail-laminated posts"

U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory,
Madison, WI: Research Paper FPL-RP-528, 16 p.

Wolfe, R. W. (1990)

"Performance of light-frame redundant assemblies"

Proceeding of the Int. Timber Engineering Conference, H. Sugiyama, ed., Tokyo:
Vol. 1, pp. 124-131, (ref. von Rosowsky und Yu, 2004).

Wolfe, R. W., LaBissoniere, T. G. (1991)

"Structural performance of light-frame roof assemblies. II. conventional truss assemblies"

Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin: USDA Res. Paper FPL 499,
(ref. von Mtenga et al., 1995).

Wood, L. W. (1960)

"Factor of safety in design of timber structures"

American Society of Civil Engineers, Transactions: Paper No. 3051, Vol. 125,
Part 1, p. 1033. (ref. von Nemeth, 1967).

Zupan, D., Turk, G. (2002)

"On unbiased estimates of characteristic values"

WIT, Southampton, United Kingdom: C.A. Brebbia, pp. 385-394.

Zupan, D., Turk, G. (2004)

"Characteristic value determination for arbitrary distribution"

WIT, Southampton, United Kingdom: C.A. Brebbia, pp. 503-512.

Zupan, D., Srpčič, J., Turk, G. (2005)

"Characteristic value determination from small samples"

COST E24 Final Conference – Arcachon.

9.2 Normenauszüge sowie Veröffentlichungen zur Erklärung von Normen

Canadian Wood Council, (1992)

"Chapter 5: Design and Detailing Highlights, 5.3: Factored Resistances"

In: Wood highway bridges: Decks, Beams & Girders, Loads and Analysis: Detailing Specifications Trends. Canadian Wood Council, Canada: ISBN 0-921628-12-9, pp. 71-116.

Canadian Wood Council (1994)

"Chapter 1: Wood Structure and Properties, 1.5: Special Factors for Design in Wood", "Chapter 2: Bending, Compression, Tension - Selection Tables: Extracted from CAN/CSA-086.1-M89, 5.4.4: System Factor, KH"

In: Introduction to design in wood, Properties, Member Design, Fastenings, Shearwalls, Diaphragms, Applications. Canadian Wood Council, Canada: ISBN 0-921628-11-0, pp. 59-60, pp. 138.

Canadian Wood Council (1995)

"2.3: System Modification Factors"

In: Wood design manual 1995, Canadian Wood Council, Ottawa, Ontario, Canada: 2nd revised edition, ISBN 0-921628-33-1.

Canadian Standards Association (1994)

"O86.1-94 Engineering Design in Wood (Limit States Design): Structures (Design)"

In: Wood Design Manual 1995, Canadian Standards Association, Ontario, Canada: ISSN 0317-5669.

9.3 Vereinbarungen

Überwachungsgemeinschaft Konstruktionsvollholz e.V. (2003)

"Vereinbarung über KVH[®] (Konstruktionsvollholz) aus Fichte, Tanne, Lärche und Douglasie".

Präambel der Überwachungsgemeinschaft Konstruktionsvollholz e.V. und des Bund Deutscher Zimmermeister (BDZ), im Zentralverband des Deutschen Bauwerbes e.V., Deutschland.

9.4 Normen

9.4.1 Außereuropäische Normen

OHBC:1983

"Ontario highway bridge design code"

Ministry of Transportation of Ontario, Ontario: Downsview, (ref. von Bakht und Jaeger, 1991).

OHBDC-91-01:1991

"Ontario highway bridge design code, 3rd edition"

Ministry of Transportation, Quality and Standards Division, Canadian Cataloguing in Publication data, Ontario: 3rd Edition, ISBN 0-7729-9611-3, pp. 243.

LRFD:1988

"Supplement – Structural Timber: LRFD - Load and Resistance Factor Design - Manual for Engineered Wood Construction, Chapter 4: Design adjustment Factors"

Forest Products Research Society, Canadian Wood Council, Southern Forest Products Association, Southern Pine Inspection Bureau, West Coast Lumber Inspection Bureau, Western Wood Products Association, USA: ISBN 0-035018-41-7, pp. 31-36.

LRFD:1988

"Guideline: Wood I-Joists: LRFD - Load and Resistance Factor Design - Manual for Engineered Wood Construction, Chapter 4: Design adjustment Factors"

American Forest & Paper Association, American Wood Council, USA: pp. 9-11.

LRFD:1996

"Load and resistance factor design (LRFD) manual for engineered wood construction"

American Forest and Paper Association (AF&PA), Washington, DC. (ref. von Rosowsky und Yu, 2004).

NDS:1991

"National design specification (NDS) for wood construction"

National Forest Products Association, Washington, D.C., (ref. von Mtenga et al., 1995).

NDS:2001

"NDS – National Design Specification: Design Values for wood construction: Design Values, Table 4B: Adjustment Factors"

American Forest and Paper Association, American Wood Council, Washington, D.C., USA: 2001 Edition, pp. 36.

NDS:2001

"NDS – National Design Specification: For Wood Construction, Chapter 4.3 Adjustment of Design Values"

American Forest and Paper Association, American Wood Council, Washington, D.C., USA: 2001 Edition, revised standard, pp. 26-28.

ASTM 2018-62:1962

"Tentative Recommended Practice for Determining Design Stresses for Load-Sharing Lumber Members"

American Society for Testing and Materials, (ref. von Gromala und Sharp, 1988).

ASTM D 1990-97:1997

"Practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens"

ASTM Standards, Philadelphia, (ref. von Rosowsky und Yu, 2004).

AS 1720.1:1997

"Timber structures - Part 1: Design methods"

ISO 12491:1997

"Statistical methods for quality control of building materials and components"

9.4.2 National und Europäische Normen

ON EN 338:2003

"Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen"

ON EN 384:2004

"Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte"

ON EN 385:2002

"Keilzinkenverbindungen im Bauholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung"

ON EN 408:2005

"Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften"

ON EN 1194:1999

"Holzbauwerke Brettschichtholz: Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte"

ON EN 13183-1:2002

"Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren"

prEN 14358:2004

"Holzbauwerke - Befestigungsmittel und Produkte aus Holzwerkstoffen - Berechnung des 5 %-Quantils und Annahmekriterien für Proben"

ON EN 1995-1-1:2006

"Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau"

ON ON EN 1995-2:2005

"Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten - Teil 2: Brücken"

DIN EN 1310:1997

"Rund- und Schnittholz - Messung der Merkmale"

DIN 1052:2004

"Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau"

SIA 265:2003

"Holzbau"

ON DIN 4074-1:2004

"Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadel-schnittholz"

ON B 4100-2:2003

"Holzbau – Holztragwerke - Teil 2: Berechnung und Ausführung"

enBR:2005

"eurocodenahe Bemessungsrichtlinie - Holzbauwerke - Entwurf, Berechnung und Bemessung"

10 ANHANG

10.1 Anhang A - Abkürzungen

10.1.1 Allgemeine Abkürzungen

KVH®	keilgezinktes Konstruktionsvollholz nach den Kriterien der Überwachungsgemeinschaft Konstruktionsvollholz e.V., 2003
BSP	Brettsperrholzplatte
LLS	'local load sharing'
GLS	'global load sharing'
ELS	'equal load sharing'
LS	'load sharing'
FBM	'fiber bundle model', Faserbündel Modell
CDF	'cumulative distribution function', Summenhäufigkeit eines Verteilungsmodells
DF	'density function', Dichtefunktion eines Verteilungsmodells
ND, NV	'normal distribution', Normalverteilung, Gauß'sche Verteilung
LND, LNV	'logarithmic normal distribution', logarithmische Normalverteilung
WD, WV	'Weibull distribution', Weibullverteilung
2p	'2 parametric', 2-parametrig
3p	'3 parametric', 3-parametrig

10.1.2 Abkürzungen zur Charakterisierung von Versagensmerkmalen

LSF	lokale Schrägfaser
GSF	globale Schrägfaser
AA	Astansammlung
SSA	Schmalseitenast
KA	Kantenast

EA	Einzelast
WB	Wipfelbruch
DW	Drehwuchs
RE	Rindeneinschluss
RH	Reaktionsholz
HE	Harzeinschluss
DF	Druckfalte, Versagen in der Druckzone bei Biegebeanspruchung
SPB	Splitterbruch
HB	Holzbruch, keine gesonderten Anmerkungen
Ai/nKZ	Ast in oder neben der Keilzinkung
KZ	Keilzinke
ZGB	Zinkengrundbruch
FAZ	Flankenauszug bei der Keilzinkung
P	Versagen aufgrund eines Produktionsmangels
S	Sonstiges, sonstige Versagensursachen

10.1.3 Technische und mathematische Abkürzungen

n	Anzahl der mitwirkenden System-Komponenten
x, y	Variablen
$p(x)$	Wahrscheinlichkeit
$f(x)$	Funktion der Variable x , Dichtefunktion von x
$F(x)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion von x
$empH$	empirische Häufigkeit
min	Minimum
max	Maximum
COV	Variationskoeffizient
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit

\bar{x} , MW	Mittelwert der Stichprobe
\tilde{x}	Median der Stichprobe
\hat{a}, \hat{b}	Schätzer der Regressionsparameter
V	Varianz
s_{xy}	Kovarianz
B^2	Bestimmtheitsmaß
r, r_{xy}	Korrelationskoeffizient
IQR	'inter quantil range', innere Quantilbereich
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
s	Standardabweichung der Stichprobe
β	Steigungsparameter der Weibullverteilung
α	Lageparameter der Weibullverteilung
x_0	'offset', Verschiebung der unteren Grenze von statistischen Verteilungen
F	Kraft
F_{\max}	Maximalkraft bei zerstörenden Prüfungen
W	Widerstandsmoment
M	Moment
I	Trägheitsmoment
w	Verformung
m	Masse
m_0	Masse unter Prüfbedingungen
m_H	Masse des Holzes
m_W	Masse des Wassers
ε	Dehnung
ε_{sys}	Dehnungsgrenze des Systems vor einem ersten Teilausfall

f	Festigkeit
f_{05}	5 % Quantile der Festigkeit
f_k	charakteristische Festigkeit
f_{sys}	charakteristische Festigkeit
$f_{t,0}$	Festigkeit des Systems vor einem ersten Teilausfall
$f_{t,0,mean}$	Mittelwert der Zugfestigkeit
$f_{t,0,05}$	5 % Quantile der Zugfestigkeit
$f_{t,0,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit
f_m	Biegefestigkeit
$f_{m,0,mean}$	Mittelwert der Biegefestigkeit
$f_{m,0,05}$	5 % Quantile der Biegefestigkeit
$f_{m,k}$	charakteristischer Wert der Biegefestigkeit
E	Elastizitätsmodul, Steifigkeit
$E_{t,0}$	Zug-Elastizitätsmodul bei Prüfbedingungen
$E_{t,0,12}$	Zug-Elastizitätsmodul, korrigiert auf $u = 12 \%$
$E_{t,0,mean}$	Mittelwert des Zug-E-Moduls
$E_{m,l}$	lokaler Biege-Elastizitätsmodul bei Prüfbedingungen
$E_{m,l,12}$	lokaler Biege-Elastizitätsmodul, korrigiert auf $u = 12 \%$
$E_{m,l,mean}$	Mittelwert des lokalen Biege-E-Moduls
$E_{m,g}$	globaler Biege-Elastizitätsmodul bei Prüfbedingungen
$E_{m,g,12}$	globaler Biege-Elastizitätsmodul, korrigiert auf $u = 12 \%$
$E_{m,g,mean}$	Mittelwert des globalen Biege-E-Moduls
ρ_0	Rohdichte bei Prüfbedingungen
ρ_{12}	Rohdichte bei $u = 12 \%$ Holzfeuchte
ρ_{05}	5 % Quantile der Rohdichte

ρ_k	charakteristischer Wert der Rohdichte
u	Holzfeuchte
u_T	Holzfeuchte bei der Holztemperatur T
T	Holztemperatur
T_{ref}	Referenz-Holztemperatur
l	Länge
l_{ref}	Referenzlänge
l_0	freie Spannweite, freie Prüflänge
a	Achsabstand zwischen Trägern
b	Breite
b_{ref}	Referenzbreite
h	Höhe, Stärke
h_{ref}	Referenzhöhe
V	Volumen
V_{ref}	Referenzvolumen
A	Fläche
v	Geschwindigkeit des Ultraschallimpulses
v_{12}	Geschwindigkeit des Ultraschallimpulses bei $u = 12 \%$ Holzfeuchte
$v_{12,20}$	Geschwindigkeit des Ultraschallimpulses bei $u = 12 \%$ Holzfeuchte und $T = 20^\circ\text{C}$
E_{dyn}	dynamischer Elastizitätsmodul, bestimmt nach der Ultraschalllaufzeit
$E_{\text{dyn},12,20}$	dynamischer Elastizitätsmodul, bestimmt nach der Ultraschalllaufzeit, korrigiert auf $T = 20^\circ\text{C}$ und $u = 12 \%$
JRB	mittlere Jahringbreite
STL	Stammlage
k_{size}	Größenfaktor

k_{depth}	Höhenfaktor
k_{width}	Breitenfaktor
k_{length}	Längenfaktor
k_l	Längeneffekt
k_h	Höheneffekt
k_b	Breiteneffekt
k_v	Volumeneffekt
k_{sys}, k_m, k_l	Systemeffekt
k_v	Faktor zur Berücksichtigung des Sortierverfahrens
k_s	Faktor zur Berücksichtigung der Probenanzahl