

FE-gestützte Bemessung im Holzbau

Vortragender:

Töpler, Janusch

M.Sc.

Institut für Konstruktion
und Entwurf (KE)

Universität Stuttgart

janusch.toepler@ke.uni-stuttgart.de



- 2009-2015 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Stuttgart
- 2016-2017 Tragwerksplaner bei Breinlinger Ingenieure in Stuttgart
- seit 2018 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart (KE)

Autoren: Janusch Töpler, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts RP7 im Exzellenzcluster Integrative Computational Design in Architecture and Construction (IntCDC) an der Universität Stuttgart werden zurzeit Regelungen für die FE-gestützte Bemessung von Holzbauteilen entwickelt. In diesem Beitrag werden der aktuelle Stand des Forschungsvorhabens und die noch geplanten Untersuchungen vorgestellt. Schwerpunkte des Vorhabens sind die Verifizierung und Validierung von FE-Modellen, die bautechnische Nachweisführung anhand solcher Modelle und die Materialmodellierung im Holzbau.

1. Einleitung

Die Nutzung von FE-Software ist in der Baupraxis zwar weit verbreitet, jedoch beschränkt sich die Anwendung in der Tragwerksplanung in der Regel mit der Ermittlung von Schnittgrößen und Spannungen auf die Einwirkungsseite, während die Widerstände anhand normativ geregelter Bemessungsverfahren ermittelt werden. In diesem Forschungsvorhaben soll deshalb eine Richtlinie entwickelt werden, die es Tragwerksplanern ermöglicht, auch die Widerstandsseite mit Hilfe der FEM zu bestimmen und anhand dessen FE-gestützte Bemessungen innerhalb des Sicherheitskonzepts der Eurocodes durchzuführen. Ähnlich der versuchsgestützten Bemessung in DIN EN 1990 Anhang D [1] soll es Tragwerksplanern damit ermöglicht werden, innovative Bauweisen zu planen und im Rahmen der Eurocodes FE-gestützt nachzuweisen. Die Richtlinie soll dabei in Anlehnung an prEN 1993-1-14 [2] entwickelt werden, die in Zukunft FE-gestützte Bemessungen im Stahlbau regeln wird.

Wesentliche Bestandteile der Richtlinie werden die Modellbildung, die Verifizierung und Validierung von FE-Modellen und die anschließende Bemessung sein. Da der korrekten Modellierung des maßgeblichen Materialverhaltens von Holz eine besondere Bedeutung zukommt, sollen experimentelle Untersuchungen zur asymmetrischen elastischen Steifigkeitsmatrix von Holz durchgeführt werden. Exemplarisch für eine FE-gestützte Bemessung soll zudem das Tragverhalten imperfektionsempfindlicher Holzstützen aus BSH aus Nadelholz und FSH aus Laubholz untersucht und anhand von FE-Modellen Knickkurven entwickelt werden. Unterstützt werden diese Untersuchungen durch Imperfektionsmessungen an schlanken Holzbauteilen im Rahmen des Forschungsvorhabens DIBt - ZP 52-5-13.194 [3].

2. Aufbau der Richtlinie „FE-gestützte Bemessung im Holzbau“

Die Richtlinie gliedert sich in

- Modellbildung
- Berechnung
- Verifizierung und Validierung
- Bemessung
- Benchmarks

Im Kapitel Modellbildung wird auf die Erstellung von FE-Modellen im Holzbau allgemein und im Speziellen auf Randbedingungen, Materialmodelle, Imperfektionen und ähnliches eingegangen. Unter Berechnung werden die verschiedenen Berechnungsmethoden von linear elastisch bis geometrisch und materiell nichtlinear dargelegt. Mit der Verifizierung soll sichergestellt werden, dass ein FE-Modell korrekt implementiert ist und eine gute Annäherung an genaue mathematische (analytische) Lösungen (ggf. Benchmarks) liefert. Der Verifikationsprozess sollte deshalb eine ingenieurmäßige Kontrolle der Ergebnisse, eine Überprüfung der Diskretisierung (Elementtyp, Vernetzung und Netzfeinheit, Konvergenzcheck), eine Sensitivitätsuntersuchung und einen Vergleich mit bekannten Lösungen (ggf. Benchmarks) beinhalten. Durch den Vergleich von FE-Berechnungen mit experimentellen Untersuchungen kann gezeigt werden, dass ein Modell das gewünschte physikalische Verhalten richtig (bzw. annähernd genau) abbildet und so eine Validierung des FE-Modells durchgeführt werden. [2]

Ein verifiziertes und validiertes FE-Modell kann zur Führung der bautechnischen Nachweise (FE-gestützte Bemessung) herangezogen werden. Dabei kann zwischen drei Modellierungs- und Bemessungsebenen unterschieden werden: numerische Experimente, numerische Simulationen (siehe Kap. 4.2) und Bemessungen anhand numerischer Berechnungen. Die Vorgehensweise bei den Ansätzen ist in Abb. 1 dargestellt. Die Ansätze unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Komplexität und in ihrer Anwendung für eine Bemessung. Der komplexeste Modellierungs- und Bemessungsansatz sind die numerischen Experimente.

<i>Modellierungs- und Bemessungsansatz</i>	Numerische Experimente	Numerische Simulationen	Bemessung anhand numerischer Berechnungen
<i>Eingangswerte Geometrie und Material</i>	statistische Variablen entsprechend physikalischer Experimente	nominelle Werte	nominelle Werte
<i>Berechnung</i>	Methode 1: Monte-Carlo-Simulation Methode 2: reduzierte Anzahl d. Berechnungen zu Methode 1 mit streuenden Eingangswerten	Berechnung Beanspruchungen anhand nomineller Eingangswerte (<u>feinerer</u> Detailierungsgrad)	Berechnung Beanspruchungen anhand nomineller Eingangswerte (<u>größerer</u> Detailierungsgrad)
<i>Bemessung</i>	Methode 1: Direkte Ermittlung R_k Methode 2: Ermittlung R_k nach EC0 Anhang D → R_d nach EC0 Anhang D	Modellfaktor γ_{FE} $R_k = \frac{R_{FE}}{\gamma_{FE}}$ $R_d = \frac{R_k}{\gamma_M / k_{mod}}$	Ergebnisse sind Schnittgrößen, σ , ... Nachweise nach EC5

Abb. 1: Bemessungs- und Modellierungsansätze für eine FE-gestützte Bemessung [2]
(Widerstände mit R bezeichnet [1])

3. Experimentelle Untersuchungen zur elastischen Steifigkeitsmatrix

3.1 Übersicht

Anhand von Biege- und Druckversuchen an Furnierschichtholz (FSH) aus Laubholz (BauBuche) sollen vollständige Datensätze der elastischen Materialkonstanten zur Ermittlung der asymmetrischen Steifigkeitsmatrix bestimmt und für die Modellierung der Stützenversuche (Kap. 4) genutzt werden. Durch den Einsatz eines optischen Messsystems wie ARAMIS kann dabei eine vollständige Erfassung der 3D-Verformungen des Versuchskörpers erfolgen. Das geplante Versuchsprogramm ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Versuchsprogramm – Untersuchungen zur elastischen Steifigkeitsmatrix

Versuchstyp	Anzahl	Belastungsrichtung	Geometrie [mm]	Material
Biegeversuche	6	Parallel (P) zu Furnieren	1900x100x100	BauBuche
Biegeversuche	6	Senkrecht (S) zu Furnieren	1900x100x100	BauBuche
Druckversuche	12	Längs (L) zur Faser	500x100x100	BauBuche
Druckversuche	12	Parallel (P) zu Furnieren	300x100x100	BauBuche
Druckversuche	12	Senkrecht (S) zu Furnieren	300x100x100	BauBuche

Die Versuchskörper sollen vor Versuchsdurchführung im Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert werden, bis die Ausgleichsfeuchte erreicht ist.

Die Biegeversuche sollen als 3- und 4-Punkt - Biegeversuche an Versuchskörpern mit 1900x100x100 mm in Anlehnung an DIN EN 408 [4] durchgeführt werden. Die Belastung erfolgt weggesteuert bis maximal 40% der geschätzten Bemessungstragfähigkeit, um ein rein elastisches Materialverhalten sicherzustellen. Nach der Durchführung eines Versuchs mit Belastung parallel zu den Furnieren (P) soll der Versuchskörper um 90° um die Längsachse gedreht und senkrecht zu den Furnieren (S) belastet werden. Anhand der Versuche sollen die Biege-Elastizitätsmodule $E_{m,P}$ und $E_{m,S}$ bestimmt werden. Eine Variation der Stützweite zwischen 600 und 1800 mm innerhalb eines Versuchs soll eine Abschätzung der Schubmodule G_{PL} und G_{SL} ermöglichen [5]. Der geplante Versuchsaufbau ist in Tab. 2 dargestellt.

Aus jedem Biegeversuchskörper sollen zwei Versuchskörper für Druckversuche längs zur Faser (L) mit 500x100x100 mm herausgearbeitet werden. Die Versuchskörper werden, unter Verwendung einer Kugelkalotte an der Lasteinleitung, bis maximal 40% der geschätzten Bemessungstragfähigkeit weggesteuert zentrisch belastet. Nach Versuchsdurchführung sollen die Versuchskörper in 5 gleiche Teile aufgetrennt werden und die drei mittleren Einzelteile entsprechend der gewünschten Belastungsrichtung parallel/senkrecht zu Furnieren (P/S; dabei senkrecht zur Faser) wieder miteinander verleimt und geprüft werden. Dies wird im Anschluss nochmal wiederholt, sodass der mittlere Teil der Versuchskörper (siehe Tabelle 2 Beschriftung „Messfeld“) in allen drei Belastungsrichtungen geprüft werden kann.

Die Verformungsmessungen sollen mit einem optischen Messsystem wie z.B. ARAMIS durchgeführt werden, das durch 4 Kameras ein auf die Versuchskörper aufgebrachtes Punktmuster vermisst und daraus die 3-dimensionalen Verformungen des Versuchskörpers im Raum bestimmt. Aus den Verformungen können die Dehnungen und Querdehnzahlen abgeleitet werden. So sollen an 100x100x100 mm Teilstücken der Versuchskörper alle E-Module und Querdehnzahlen für FSH aus Laubholz (BauBuche) ermittelt werden.

Tab. 2: Versuchsaufbau – Untersuchungen zur elastischen Steifigkeitsmatrix

Versuchstyp	Versuchsaufbau	Ergebnis
Biegeversuche radial / tangential		$E_{m,PL/SL}$ $G_{PL/SL}$
Druckversuche parallel		E_L VLP/LS
Druckversuche radial / tangential		$E_{P/S}$ VPS/PL VSP/SL

4. Druckstützenversuche und ihre FE-gestützte Bemessung

4.1 Versuchsprogramm

Zur Ermittlung der Knickspannungslinien von imperfektionsempfindlichen Druckstützen aus FSH aus Laubholz (BauBuche), als Beitrag zum Demonstrator des Exzellenzclusters IntCDC und als Beispiel für FE-gestützte Bemessungen sind im Rahmen des Forschungsvorhabens Druckstützenversuche geplant. Um an vorhandene experimentelle Untersuchungen z.B. von Theiler und Frangi [6] anzuknüpfen, und zur Entwicklung eines universell anwendbaren FE-Modells sollen auch Stützen aus VH und BSH aus Nadelholz untersucht werden. Das geplante Versuchsprogramm ist in Tab. 3 dargestellt. Die Versuche sollen in einem 15 MN Stützenprüfstand mit einachsigem Kipplager am Kopf- und Fußpunkt und einer definierten Exzentrizität der Lasteinleitung zum gezielten Hervorrufen des Biegeknickens in eine definierte Richtung durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollen zur Validierung der FE-Untersuchungen dienen.

Tab. 3: Versuchsprogramm – Druckstützenversuche

Material	Anzahl	Geometrie [mm]	Schlankheit $\lambda = L / i$	geschätzte Traglast [kN]
VH Nadelholz / BSH Nadelholz	2 / 2	3000x300x300	35	1800 / 2800
	2 / 2	3000x160x160	65	330 / 580
	2 / 2	3000x100x100	104	60 / 100
FSH Laubholz (BauBuche)	3	3000x300x300	35	6000
	5	3000x210x210	50	2200
	5	3000x160x160	65	830
	5	3000x100x100	104	140

4.2 FE-gestützte Bemessung von Druckstützen

Als Vorgriff auf die geplanten Druckstützenversuche wird nachfolgend anhand der experimentellen Untersuchungen von Theiler und Frangi [6] eine FE-gestützte Bemessung exzentrisch belasteter Druckstützen mit der Methode der **numerischen Simulation** (Abb. 1) durchgeführt.

Theiler und Frangi [6] führten unter anderem Druckstützenversuche an BSH Stützen aus Nadelholz GL 24h mit Abmessungen 3200x160x140 mm mit einer exzentrischen Lasteinleitung von 15 mm in Richtung der starken Achse durch. Die Kipplager an Kopf- und Fußpunkten wirkten ebenfalls in Richtung der starken Achse. Ein BSH-Querschnitt war dabei aus je 4 Lamellen aufgebaut. Vor der Erstellung der Versuchskörper fand eine umfangreiche Dokumentation der Materialeigenschaften der einzelnen BSH-Lamellen statt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 (a) dargestellt.

Die FE-Modellierung der Stützenversuche erfolgt mit Abaqus 2018. Es werden 20-knotige reduziert integrierte Volumenelemente mit einer Breite von ca. 15 mm und einer Länge von 50 mm verwendet. Als erster Modellierungsansatz wird ein anisotropes elastisches Materialverhalten mit dem Mittelwert des E-Moduls E_L der 4 Lamellen einer Stütze gewählt. Die restlichen Materialparameter werden analog zu den von Neuhaus [7] gegebenen Werten gewählt.

Tab. 4: Elastische Materialparameter Modellierung Stütze S17 (Holzfeuchte $u = 12\%$)

E_L	E_R	E_T	G_{LT}	G_{LR}	G_{RT}	ν_{RT}	ν_{LT}	ν_{LR}
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]			
12.502	849	436	771	646	44	0,5993	0,5542	0,4096

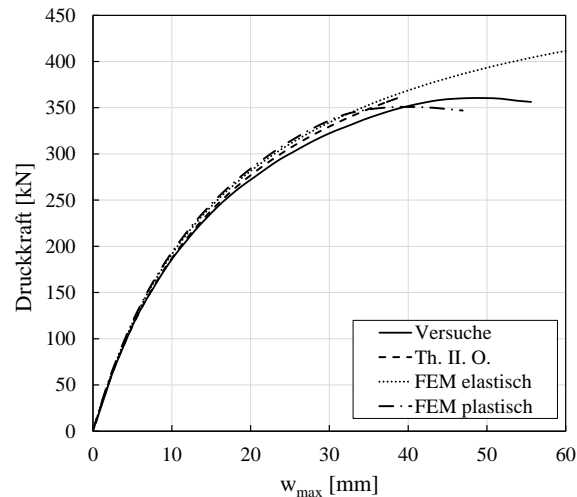
Im 1. Schritt wird die **Verifizierung** [2] des FE-Modells vorgenommen. Diese umfasst

- die **ingenieurmäßige Bewertung** des Modells. Es wird überprüft ob die Verformungen und Schnittgrößen dem zu erwartenden Verhalten entsprechen. Der Vergleich der Last-Verformungs-Kurven (siehe Abb. 2 (b), FEM elastisch und Versuche) von experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigt bereits eine gute Übereinstimmung.
- die Überprüfung der **Diskretisierung**. Dabei werden die Vernetzung (Elementgröße und -form, Elementtyp) und Solvereinstellungen geprüft und ein Konvergenzcheck von Verformungen und Spannungen durchgeführt. Das gewählte Modell erweist sich dabei als gut geeignet und die Elementlänge wird auf 100 mm erhöht.
- den Vergleich mit **bekanntem Lösungen**. Als Vergleich wird eine Berechnung anhand Theorie II. Ordnung gewählt. Numerische und analytische Ergebnisse stimmen dabei sehr gut überein (siehe Abb. 2 (b)), FEM elastisch und Th. II. O.). Die Vernachlässigung der Schubverformungen bei Theorie II. Ordnung Berechnungen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.
- eine **Sensitivitätsuntersuchung**. Es werden Material- und Geometriewerte sowie die Exzentrizität der Lasteinleitung variiert. Die Änderungen des Last-Verformungs-Verhaltens der numerischen Berechnungen decken sich mit den Ergebnissen der analytischen Berechnungen.

Eine erste Verifizierung, dass das Modell richtig implementiert wurde, ist somit abgeschlossen. Im 2. Schritt wird in der **Validierung** [2] ein Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen von Theiler und Frangi [6] vorgenommen. Aus Abb. 2 (b) (Vergleich Versuche und FEM elastisch) ist ersichtlich, dass bis zu einer Belastung von ca. 350 kN die Kraft-Verformungs-Kurven ähnlich verlaufen, wobei die Kurven mit größer werdender Belastung zunehmend voneinander abweichen. Dies kann z.B. in ungenauen Steifigkeitsannahmen und der Vernachlässigung von Imperfektionen (da unbekannt) begründet sein. Bei 300 kN weicht die numerische ermittelte Druckkraft um ca. 3 % und w_{\max} um ca. 9 % von den experimentellen Ergebnissen ab. Aufgrund der Unsicherheiten aus Materialeigenschaften und Imperfektionen ist dies eine aus-



(a) Versuchsaufbau
Druckstützenversuche [6]



(b) Last-Verformungs-Verhalten Druckstütze S17 experimentell [6], analytisch (Th. II. O.) und numerisch mit w_{max} als maximaler horizontaler Verformung in Feldmitte

Abb. 2: Versuchsaufbau und Ergebnisse der Druckstützenversuche

reichend geringe Abweichung, um das elastische FE-Modell als validiert zu betrachten.

Als nächstes wird das Materialmodell um ein bilineares elasto-plastisches Materialverhalten unter Druck ergänzt. Die Druck- und Zugfestigkeit wird im Verhältnis zum E-Modul E_L der Randlamellen gewählt (z.B. S17: $f_{c,0} = 38,2 \text{ N/mm}^2$; $f_{t,0} = 23,3 \text{ N/mm}^2$). Des Weiteren werden den 4 Lamellen eines Querschnitts im FE-Modell unterschiedliche Materialkennwerte entsprechend den Voruntersuchungen der Lamellen [6] zugewiesen. Diese beiden Ergänzungen des FE-Modells (elasto-plastisches Materialverhalten und Lamellen) werden in verkürzter Form verifiziert und validiert (1. Schritt a), b), d) und 2. Schritt). Die Kraft-Verformungs-Kurve dieses FE-Modells mit elasto-plastischen Materialeigenschaften verläuft sehr ähnlich im Vergleich zum elastischen FE-Modell (siehe Abb. 2 (b)), da die Materialeigenschaften der Lamellen der Stütze S17 nur sehr gering streuen. Das plastische Last-Verformungs-Verhalten von experimentellen und numerischen Untersuchungen ist vergleichbar, wobei die numerisch berechnete Tragfähigkeit bei 350,4 kN und die experimentell ermittelte Tragfähigkeit bei 359,8 kN liegt.

Das Versagensbild der experimentellen Untersuchungen der Stütze S17 zeichnete sich durch Stauchungen des Materials im Druckbereich im gesamten mittleren Drittel der Stütze aus [6]. Es handelte sich dabei um ein gutmütiges Versagen, bei dem die Prüflast nach Überschreiten der Tragfähigkeit bei zunehmenden vertikalen Verformungen nur geringfügig abnahm. Abbruchkriterium waren große horizontaler Verformungen. Im numerischen Modell treten ebenfalls zuerst signifikante plastische Dehnungen im Druckbereich auf, bevor bei ca. $w_{max} = 45 \text{ mm}$ die geschätzte Zugfestigkeit $f_{t,0}$ erreicht wird. Das Versagensverhalten von experimentellen und numerischen Untersuchungen ist für den Versuch S17 somit ähnlich. Auch die Stützenversuche S11 bis S20 weisen dieses Versagensverhalten auf.

Im 3. Schritt wird anhand des verifizierten und validierten FE-Modells beispielhaft eine Bemessung der von Theiler und Frangi [6] experimentell untersuchten Druckstützen aus BSH GL 24h mit einer Länge von 3,2 m mittels des Ansatzes der **numerischen Simulation** (siehe Abb. 1) durchgeführt. Bei einer numerischen Simulation muss die Zuverlässigkeit des FE-Modells mittels des Modellfaktors γ_{FE} berücksichtigt werden. γ_{FE} wird dabei durch den Vergleich von numerischen mit experimentellen Ergebnissen unter Berücksichtigung der in DIN EN 1990 Anhang D [1] gegebenen statistischen Verfahren ermittelt [2].

$$\gamma_{FE} = \frac{1}{m_x \cdot (1 - k_n \cdot V_x)} \geq 1,0 \quad (1)$$

mit m_x Mittelwert von R_{test} / R_{check}
 k_n Fraktilefaktor für charakteristische Werte nach DIN EN 1990 Anhang D Tabelle D.1 [1], V_x unbekannt sollte verwendet werden
 V_x Variationskoeffizient von R_{test} / R_{check}
 R_{test} experimentelle Tragfähigkeit
 R_{check} numerisch berechnete Tragfähigkeit

Zur Ermittlung von γ_{FE} werden die Stützenversuche S11 bis S20 von Theiler und Frangi [6] anhand des beschriebenen verifizierten und validierten numerischen Modells nachgerechnet. Materialkennwerte werden entsprechend der Messwerte von Theiler und Frangi [6] gewählt. Die experimentell und numerisch ermittelten Last-Verformungs-Kurven der Stützen S11 bis S20 sind in Abb. 3 dargestellt. Es kann eine gute Übereinstimmung von experimentell und numerisch ermittelten Last-Verformungs-Kurven festgestellt werden. Die Tragfähigkeiten nach experimentellen und numerischen Untersuchungen sind in Tab. 5 dargestellt. R_{test} und R_{check} weichen um maximal 9 % voneinander ab. Von R_{test} / R_{check} ist der Mittelwert $m_x = 1,01$ und der Variationskoeffizient $V_x = 0,034$. Bei 10 Versuchen ergibt sich k_n nach EC0 Anhang D zu $k_n = 1,92$. γ_{FE} kann anhand Gleichung (1) zu $\gamma_{FE} = 1,057$ ermittelt werden. Die charakteristische und die Bemessungstragfähigkeit kann wie folgt ermittelt werden [2]:

$$R_k = \frac{R_{FE}}{\gamma_{FE}} \quad (2)$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M / k_{mod}} \quad (3)$$

mit R_{FE} Tragfähigkeit nach numerischen Simulationen unter Berücksichtigung von nominellen Werten für Geometrie- und Materialeigenschaften
 γ_M und k_{mod} nach DIN EN 1995-1-1 [8]

Anhand der nominellen (hier: charakteristischen) Materialkennwerte für GL 24h nach DIN EN

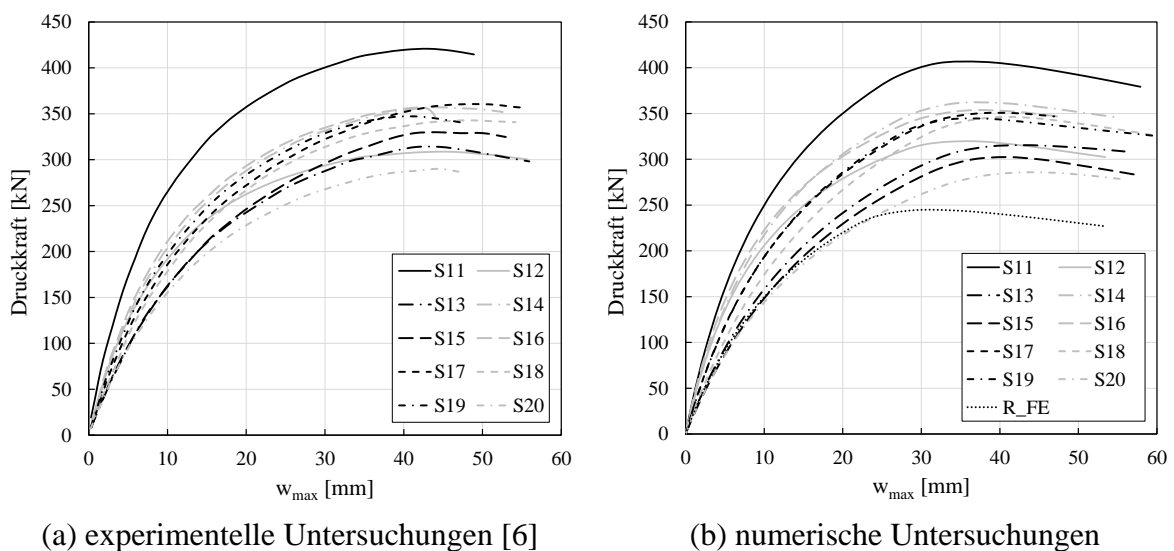


Abb. 3: Last-Verformungs-Verhalten experimentelle [6] und numerische Untersuchungen Druckstützen S11 bis S20, sowie R_{FE} mit w_{max} als max. horiz. Verformung in Feldmitte

14080 [9] (Querdehnzahlen nach Neuhaus [7]) kann mit dem beschriebenen verifizierten und validierten FE-Modells eine Tragfähigkeit von $R_{FE} = 244,5$ kN ermittelt werden (siehe Abb. 3 (b), R_{FE}). Unter Berücksichtigung von γ_{FE} erhält man $R_k = 231,3$ kN.

Tab. 5: Tragfähigkeiten nach experimentellen [6] und numerischen Untersuchungen

Stütze	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
R_{test} [kN]	421,2	308,0	313,8	357,3	329,9	356,7	359,8	343,1	346,4	289,8
R_{check} [kN]	406,4	319,8	315,5	361,4	302,4	353,2	350,4	346,4	344,1	285,5

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird der aktuelle Stand und die noch geplanten Untersuchungen zur Entwicklung einer Richtlinie für FE-gestützte Bemessungen im Holzbau vorgestellt. Anhand des Beispiels einer Druckstützenbemessung durch numerische Simulation mit einem verifizierten und validierten FE-Modell wird ein Bemessungsverfahren der Richtlinie „FE-gestützte Bemessung im Holzbau“ und dessen Ergebnisse erläutert. Dabei wird beispielhaft für die 3,2 m langen BSH Stützen aus GL 24h eine charakteristische Tragfähigkeit von 231,3 kN nach dem FE-Bemessungsverfahren „numerische Simulation“ ermittelt. Im Verlauf des Forschungsvorhabens sollen weiterhin insbesondere das Tragverhalten imperfektionsempfindlicher Stützen aus FSH aus Laubholz (BauBuche) untersucht und anhand der numerischen Bemessungsverfahren Vorschläge für Knickspannungskurven erarbeitet werden.

6. Danksagung

Das Forschungsvorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2120/1 – 390831618 gefördert.

Literatur

- [1] DIN EN 1990: *Eurocode 5: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010-12.
- [2] prEN 1993-1-14 (2nd Draft): *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis*. CEN/TC 250/SC3, 2019-07
- [3] Töpler, J.; Kuhlmann, U.: *Imperfektionsmessungen an stabilitätsgefährdeten Holzbauteilen*. DIBt - ZP 52-5-13.194, Laufzeit 2020 - 2021, Forschungsantrag, 05-2019.
- [4] DIN EN 408: *Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-10.
- [5] Albers, K.: *Querdehnungs- und Gleitzahlen sowie Schub- und Scherfestigkeiten von Holzwerkstoffen*. Universität Hamburg, Diss., 1970.
- [6] Theiler, M.; Frangi, A.: *Knickversuche mit Brettschichtholzstützen unter exzentrischer Normalkraftbeanspruchung*. ETH Zürich, Bericht IBK Nr. 263, 2015.
- [7] Neuhaus, F.-H.: *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit*. Ruhr-Universität Bochum, Diss., 1981.
- [8] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Hochbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010-12.
- [9] DIN EN 14080: *Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013-09.