

# Entwicklung und Analyse einer neuartigen Prüfmaschine für Kriechversuche unter konstant hohen Lasten

Bertram, Christian<sup>a,\*</sup>; Blaß, Hans Joachim<sup>a</sup>; Dietsch, Philipp<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Holzbau und Baukonstruktion

---

\*Vortragender:

## Bertram, Christian

M.Sc.

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Holzbau und Baukonstruktion

Karlsruher Institut für Technologie

bertram@kit.edu



- seit 2021 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am KIT
  - 2018-2021 Tragwerksplaner in Kirchzarten und Freiburg
  - 2010-2017 Studium des Bauingenieurwesens am KIT
  - 2008-2011 Ausbildung zum Zimmerer in Köln
- 

## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorgestellten Forschung sollen Kriechverformungen an Holzbauteilen im Bauteilmaßstab unter Querdruckbeanspruchung quantifiziert werden. Für die hierzu erforderlichen Kriechversuche ist ein Versuchsaufbau notwendig, der in der Lage ist, hohe Lasten über einen langen Zeitraum konstant aufrechtzuerhalten. Zu diesem Zweck wurde eine Prüfmaschine entwickelt, die mithilfe von in Serie geschalteten Hebelarmen und einer Totlast eine hohe Lastpotenzierung ermöglicht. Der Beitrag beschreibt den Entwicklungsprozess der Maschine sowie die Untersuchung von Einflüssen auf die Lastkonstanz anhand experimenteller Analysen zur Gelenkreibung und einer rechnerischen Betrachtung zur Schiefstellung eines Hebelarms.

## 1. Einleitung

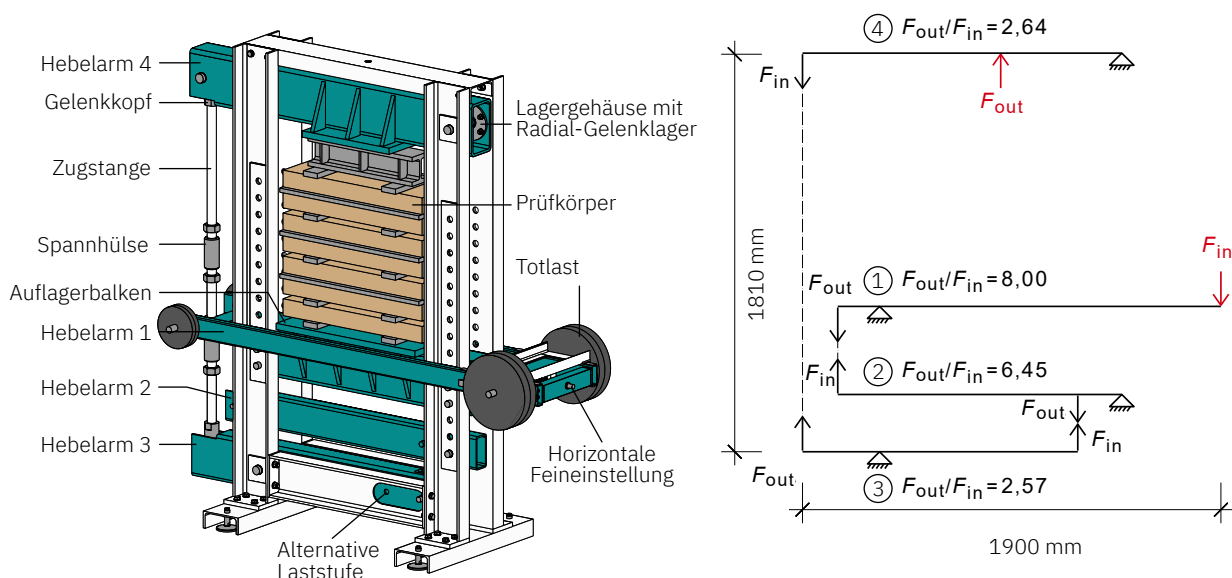
Im Holztafelbau wird häufig die Plattformbauweise angewandt, die durch ein Auflegen der Decken auf jeweils eingeschossige Wände gekennzeichnet ist. Dabei kommt es insbesondere in den unteren Stockwerken zu hohen Querdruckspannungen im Bereich der Deckenstöße. Dort werden Schwelle, Decke und Rähm quer zur Faser beansprucht. Aufgrund der vergleichsweise geringen Querdrucktragfähigkeit von Nadelholz sind Gebäude in Holztafelbauweise daher im Regelfall auf drei bis vier Stockwerke begrenzt. Aber nicht nur die begrenzte Tragfähigkeit bei Belastung quer zur Faser limitiert die Anwendung der Holztafelbauweise bei höheren Stockwerkszahlen. Auch die geringe Steifigkeit und Setzungen infolge von Kriechen quer zur Faser erschweren den Einsatz. Dieser Aspekt spielt besonders bei Gebäuden in Hybridbauweise eine große Rolle, bei denen die Gebäudeaussteifung häufig mit Wänden aus Stahlbeton realisiert wird. In diesen Fällen müssen die Setzungen im Stahlbeton mit denen des Holzbaus kompatibel sein. Während sich die Setzungen infolge elastischer Querdruckverformungen noch vergleichsweise gut abschätzen lassen, fehlen zur Ermittlung der Langzeitverformungen zuverlässige Kriechbeiwerte bei Beanspruchung quer zur Faser. Bei den im EC 5 [1] angegebenen Kriechbeiwerten wird derzeit nicht zwischen der Richtung der Beanspruchung unterschieden. Tatsächlich basieren die angegebenen Werte auf Versuchen an kleinteiligen Prüfkörpern unter Biegebeanspruchung [2].

Eine Auswertung der bestehenden Literatur zeigt jedoch bereits, dass bei Querdruckbeanspruchungen mit deutlich höheren Kriechverformungen zu rechnen ist [3, 4, 5]. Allerdings weisen die Untersuchungen bezüglich der ermittelten Kriechbeiwerte eine große Streuung auf. Hintergrund sind möglicherweise unterschiedliche Umgebungsklimata in Kombination mit vergleichsweise kleinen Prüfkörperabmessungen. Bei kleinen Prüfkörpern reagiert die Holzfeuchte sehr empfindlich auf sich ändernde Luftfeuchten. Daraus resultieren erhöhte Kriechverformungen infolge von Mechanosorption. Um belastbare Kriechbeiwerte für Bauteile unter Querdruckbeanspruchungen zu erhalten, erscheint es daher zweckmäßig, Kriechversuche an Prüfkörpern im Bauteilmaßstab durchzuführen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die durch Mechanosorption hervorgerufenen Kriechverformungen in einer mit dem realen Bauwerk vergleichbaren Größenordnung auftreten. Aufgrund der erhöhten Prüfkörperabmessungen gehen damit allerdings auch hohe Prüflasten einher, die für die Dauer der Versuche aufrechterhalten werden müssen.

## 2. Entwicklungsprozess und Funktionsweise

### 2.1. Entwicklungsschritte

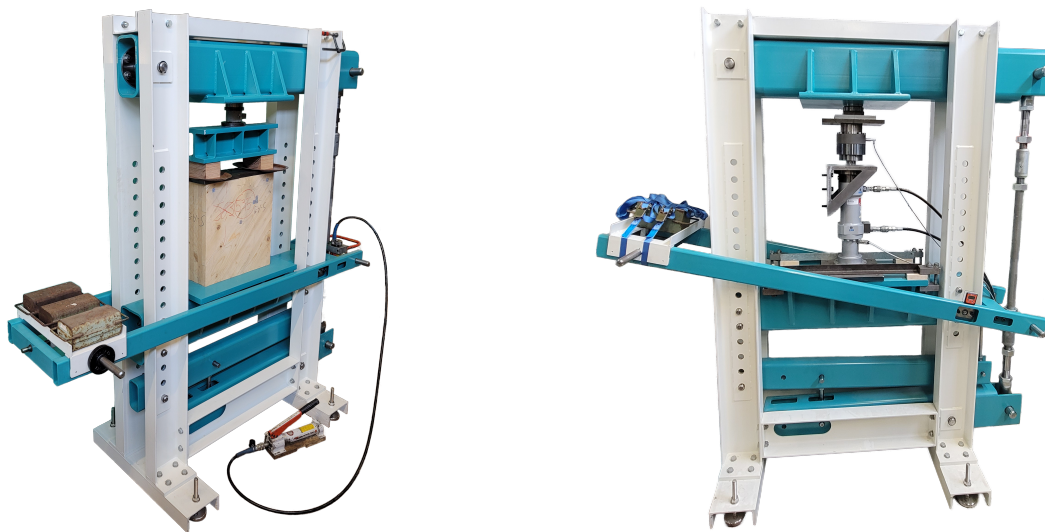
Zu Beginn der Entwicklung wurde ein stark vereinfachter Prototyp gebaut. Damit konnte gezeigt werden, dass das Prinzip der in Serie geschalteten Hebelarme gut umsetzbar ist. Anschließend wurde mit der Planung einer realen Prüfmaschine begonnen. Neben dem Ziel eines hohen Lastniveaus von bis zu 350 kN wurden ein großer und frei zugänglicher Prüfraum, eine variable Anpassung an unterschiedliche Prüfkörperhöhen sowie eine möglichst geringe Gelenkreibung angestrebt. Aufgrund der komplexen Geometrie erfolgte die Planung von Beginn an mithilfe eines 3D-CAD-Modells. Zur Analyse der Kinematik der Hebelarme und zur Vermeidung von Kontakt zwischen den Hebelarmen oder mit dem Rahmen wurde ergänzend eine Bewegungsstudie mit der Software *Fusion 360* [6] durchgeführt. **Abb. 1** (links) zeigt das Ergebnis eines umfangreichen, iterativen Planungsprozesses.



**Abb. 1:** Ergebnis des Designprozesses mit zugehörigem mechanischen System der Hebelarme

Das System besteht aus vier Hebelarmen, die durch insgesamt drei Zugstäbe miteinander verbunden sind. Ein Rahmen dient zur Lagerung der Hebelarme und eines Auflagerbalkens. Die mechanische Wirkungsweise der einzelnen Hebelarme ist in **Abb. 1** (rechts) dargestellt. Durch

die vier Hebelarme wird eine Lastpotenzierung um den Faktor 350 erreicht. Eine Totlast von 100 kg führt folglich zu einer Zunahme der Prüflast von etwa 350 kN. Aus dem Eigengewicht der Konstruktion ergibt sich eine Last von rund 80 kN. Für kleinere Lastniveaus wurde eine zweite Laststufe integriert, die die Lastpotenzierung auf den Faktor 136 reduziert. Die Anpassung erfolgt über eine horizontale Verschiebung der Zugstange zwischen den Hebelarmen zwei und drei. Infolge dessen reduziert sich die Absenkung der Totlast bei einer Verkürzung der Prüfkörper im gleichen Verhältnis. Alle Zugstäbe des Systems sind zur Justierung der Hebelarme in ihrer Länge verstellbar. Die rückwärtige große Zugstange ist hierzu mit zwei Spannhülsen ausgestattet, während die beiden anderen Zugstangen an ihren Enden über Rechts- und Linksgewinde verfügen. Dies erleichtert die Einstellung der Prüfraumhöhe vor Versuchsbeginn. Die erste realisierte Prüfmaschine ist in **Abb. 2** dargestellt.



**Abb. 2:** Prüfmaschine während eines ersten Funktionstests (links) und während der Analyse der Lastkonstanz mithilfe eines gesteuerten hydraulischen Prüfcylinders (rechts)

## 2.2. Nachstellen der Hebelarme

Die hohe Kraftübersetzung gilt ebenso für das Absenken der Totlast infolge einer Verkürzung der Prüfkörper. Um ein übermäßiges Absinken zu vermeiden, kann im Bereich der Spannhülsen an der letzten Zugstange ein Vorspanngerät installiert werden. Das ermöglicht eine Verkürzung der Zugstange auch unter Last und damit das Ausrichten des ersten Hebelarmes mit der Totlast. Das wird immer dann erforderlich, wenn sich die Totlast infolge einer Verkürzung der Prüfkörper deutlich absenkt. Mithilfe der beiden Spannhülsen kann die Zugstange um bis zu 84 mm verkürzt werden. Das entspräche einer Verkürzung der Prüfkörper um etwa 32 mm. Zudem dient das Vorspanngerät zur zügigen Lastaufbringung. Hierzu wird der erste Hebelarm im Bereich der Totlast vor Versuchsbeginn gestützt und anschließend die letzte Zugstange soweit verkürzt, bis sich die Totlast von der Stützung abhebt. Auf diese Weise lässt sich die volle Last innerhalb von weniger als zwei Minuten aufbringen.

Da am Markt verfügbare Vorspannsysteme nur leihweise erhältlich waren, wurde ein vereinfachtes System selbst entwickelt (vgl. **Abb. 3**). Es besteht im Wesentlichen aus zwei teilbaren Biegebalken, die über zwei Gewindestangen miteinander verbunden sind. An den Enden der Gewindestangen sind hydraulische Hohlkolbenzylinder angeordnet, die mittels einer Handpumpe ausgefahren werden. Dadurch wird die Last aus der Zugstange über zwei an ihr befestigte Muttern

auf die Biegebalken übertragen und über die Gewindestangen kurzgeschlossen. Auf diese Weise wird die Last im Bereich der Spannhülse auf das Vorspannsystem umgeleitet. Das Gewinde der Spannhülsen besitzt ein entsprechend großes Spiel, sodass die Hülse von Hand gedreht werden kann, bis sie leicht unter Druck steht. Durch abwechselnde Hübe an der Handpumpe und manuelles Drehen der Hülse wird die Länge der Zugstange schrittweise angepasst.



**Abb. 3:** Planung (links) und Ausführung (rechts) des Vorspannsystems

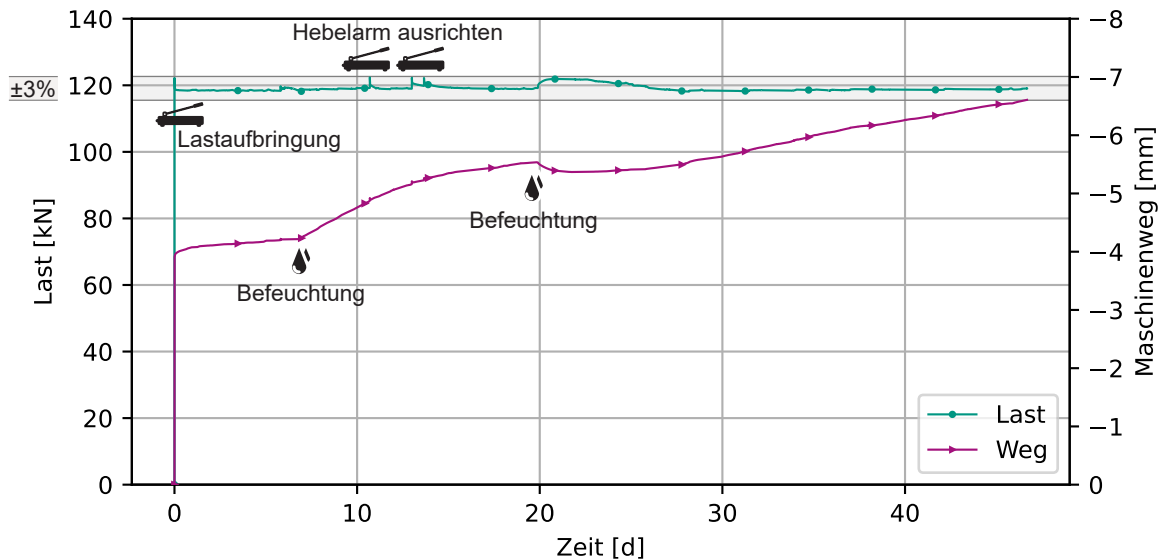
### 3. Analyse der Lastkonstanz

Bereits vor der Herstellung der ersten Prüfmaschine wurden potenzielle Einflüsse auf die Lastkonstanz untersucht. Die zugehörigen Ergebnisse wurden auf der WCTE 2025 in Brisbane [7] vorgestellt. Dabei wurde eine potenzielle Lastabweichung infolge von Reibung in den Gelenken mit  $\pm 6\%$  abgeschätzt. Einflüsse aus Theorie dritter Ordnung, also aufgrund einer Schiefstellung der Hebelarme, wurden ebenfalls analysiert und mit  $\pm 1\%$  abgeschätzt. Im Folgenden werden Analysen an der realisierten Prüfmaschine sowie weiterführende Untersuchungen zur Schiefstellung eines Hebelarmes vorgestellt.

#### 3.1. Erster Funktionstest

Um einen ersten Eindruck von der Funktionsweise und insbesondere der Lastkonstanz der realen Prüfmaschine zu gewinnen, wurde im Prüfraum ein Platzhalter aus Brettspertholz angeordnet, auf dem zwei Proben aus Buchenfurnierschichtholz positioniert wurden. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in **Abb. 2** gezeigt. Die Lasteinleitung in die Prüfkörper erfolgte mithilfe eines darüber angeordneten Stahlprofils. Zwischen dem Stahlprofil und dem obersten Hebelarm der Prüfmaschine wurde ein Axial-Gelenklager und ein Kraftaufnehmer angeordnet. Zudem wurde die vertikale Bewegung im Bereich der Lasteinleitung gemessen. Die Prüfdauer betrug 47 Tage. Die Ergebnisse des Test sind im Diagramm in **Abb. 4** visualisiert.

Neben der Beurteilung des Handlings der Prüfmaschine diente der Test auch als erste Überprüfung der Lastkonstanz. Dabei zeigte sich eine leicht erhöhte Last unmittelbar nachdem die Last mithilfe des Vorspannsystems aufgebracht wurde. Dieser Peak war jedoch bereits nach etwa drei Minuten abgeklungen, und die Last verhielt sich in der Folgezeit weitgehend konstant.



**Abb. 4:** Ergebnisse des ersten Funktionstests der Prüfmaschine

Um den Einfluss quellender Proben auf die Last zu untersuchen, wurden die Prüfkörper zweimal intensiv mit Wasser besprüht. Das an den Seiten der Prüfkörper ablaufende Wasser wurde von den unter den Proben befindlichen Tellern aufgefangen. Dadurch standen die Prüfkörper für etwa 24 Stunden im Wasser, bis dieses vollständig aufgenommen oder verdunstet war. Nach der ersten Befeuchtung war keine Laststeigerung erkennbar. Allerdings beschleunigte sich die Absenkung des vierten Hebelarms deutlich, was auf ein erhöhtes Kriechen infolge von Mechanosorption hindeutet. Ein Quellen der Proben konnte zu diesem Zeitpunkt nicht beobachtet werden. Möglicherweise haben die Verformungen infolge der reduzierten Steifigkeit in Verbindung mit mechanosorptiven Kriechen die Verformungen infolge Quellen überlagert. Erst die zweite Befeuchtung ging mit einer deutlichen Steigerung der Last einher. Gleichzeitig kam es zum Quellen der Prüfkörper, was sich durch ein Anheben des vierten Hebelarms zeigte.

Nach der ersten Befeuchtung kam es infolge des beschleunigten Kriechens zu einem leichten Absinken des ersten Hebelarms. Daher wurde das Vorspannsystem zu zwei Zeitpunkten eingesetzt, um den ersten Hebelarm horizontal auszurichten. Dabei traten – ähnlich wie beim initialen Aufbringen der Last – kurzzeitige Lasterhöhungen auf, die nach wenigen Minuten wieder abgeklungen waren.

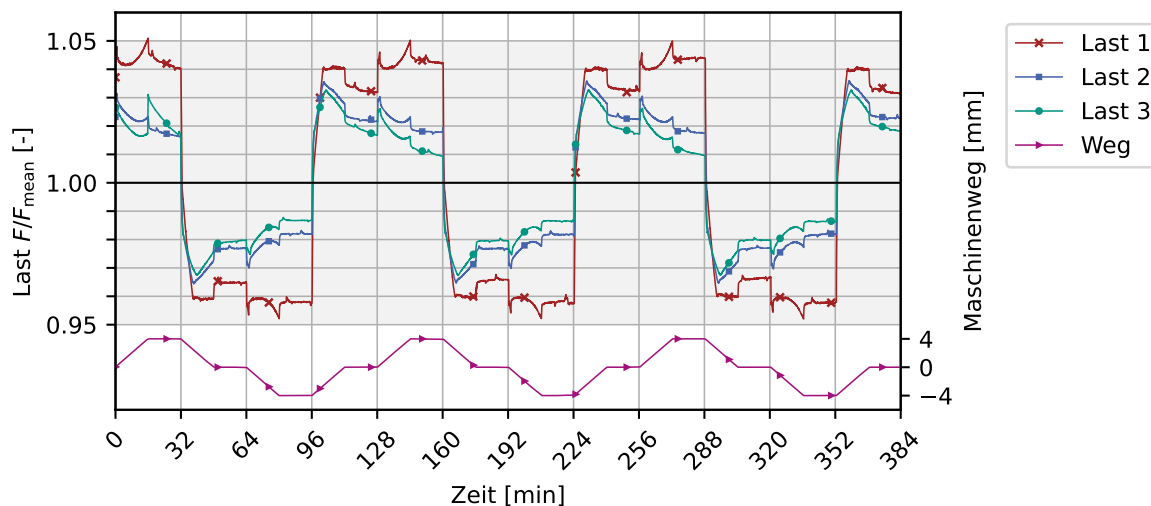
Der Test hat gezeigt, dass sowohl die Lastaufbringung als auch das Nachstellen des ersten Hebelarms mit wenig Aufwand verbunden ist. Die Beeinflussung der Last durch die Lastaufbringung, das Nachstellen der Hebelarme sowie das Quellen der Prüfkörper lag innerhalb von  $\pm 3\%$ . Damit wurde die Eignung der Prüfmaschine zur Durchführung der geplanten Langzeitversuche nachgewiesen.

### 3.2. Einfluss infolge Reibung in den Gelenken

Die Ergebnisse des ersten Funktionstests haben die Beeinflussung der Last infolge von Reibung in den Gelenken der Hebelarme und Zugstangen gezeigt. Zur genaueren Quantifizierung dieser Effekte wurden weitere Tests durchgeführt. Statt Prüfkörpern aus Holz wurde ein hydraulischer Prüfzylinder im Prüfraum eingesetzt. Damit ist es möglich, definierte Bewegungszyklen unter Last auszuführen. Damit können Quell- und Schwindvorgänge simuliert werden. Pro Test wurden jeweils drei Zyklen durchlaufen. Jeder Zyklus bestand aus acht Blöcken mit konstanter

Verschiebungsgeschwindigkeit und einer Dauer von 16 Minuten. Insgesamt wurden drei Tests mit variierenden Lasten von 34 (Last 1), 68 (Last 2) und 95 kN (Last 3) durchgeführt.

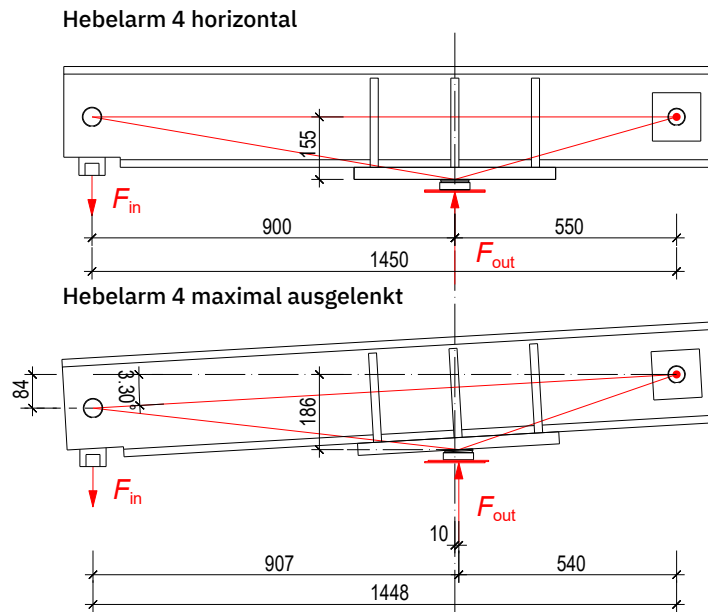
Im Diagramm in **Abb. 5** ist die normierte Last aller drei Tests über die Zeit des Versuchs dargestellt. Zur Normierung wurde die Last durch den Mittelwert der Last über die gesamte Versuchsdauer dividiert. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Last von den Bewegungen des Prüfzylinders. Insbesondere Richtungswechsel gehen mit einer wesentlichen Änderung der Last einher. Anhand der drei unterschiedlichen Lastniveaus zeigt sich der Trend, dass die relative Beeinflussung der Last mit zunehmendem Lastniveau abnimmt. Dies steht im Einklang mit Herstellerangaben, wonach die Reibungszahl bei den verwendeten wartungsfreien Stahl/PFTE-Gewebe-Gleitpaarungen mit zunehmender spezifischer Belastung sinkt [8]. Aufgrund der Höchstlast des Prüfzylinder von 100 kN konnten die Tests nicht mit höheren Lasten durchgeführt werden. Anhand der Testergebnisse ist jedoch zu erwarten, dass die Lastbeeinflussung bei höheren Lasten weiter abnimmt. Für das niedrigste Lastniveau ergibt sich eine Lastabweichung von maximal  $\pm 5\%$ . Da die Last in realen Bauwerken über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ebenso Schwankungen unterliegt, ist davon auszugehen, dass eine Abweichung in dieser Größenordnung die Ergebnisse der geplanten Kriechversuche nicht wesentlich beeinflusst.



**Abb. 5:** Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen zur Lastkonstanz der Prüfmaschine

### 3.3. Einfluss einer Auslenkung des lasteinleitenden Hebelarms

Bei vollständiger Verkürzung der letzten Zugstange kommt es zu einer erheblichen Verdrehung des vierten Hebelarms. Die geometrischen Verhältnisse sowohl in horizontaler als auch in maximal ausgelenkter Lage ist in **Abb. 6** dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen wird die Anordnung eines axialen Gelenklagers mit einer darunter angeordneten horizontalen Gleitlage angenommen. Dann führt die Verdrehung zu einer horizontalen Verschiebung des Ortes der Lasteinleitung um 10 mm. Daraus resultiert einerseits eine leichte Erhöhung der Last, da der horizontale Abstand zwischen der Zugstange und dem Ort der Lasteinleitung sich im Verhältnis geringer reduziert als der Abstand zwischen dem Ort der Lasteinleitung und dem Lager des Hebelarms. Diese Erhöhung beträgt 1,7 %. Andererseits führt die Verschiebung des Lastangriffspunkts zu einer exzentrischen Belastung der Prüfkörper. Da die genannten Abweichungen erst bei maximaler Schiefstellung – also bei einer Probenverkürzung um 32 mm – auftreten, können die beschriebenen Effekte in vielen Fällen vernachlässigt werden. Zur Vermeidung exzentrischer Lasteinleitung in die Prüfkörper könnte die Gleitebene unter die Prüfkörper verlagert werden, beispielsweise durch Einsatz eines Rollenlagers.



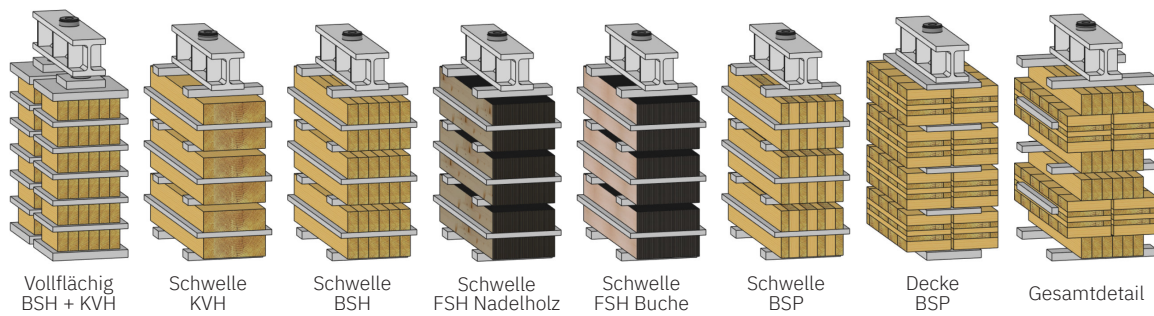
**Abb. 6:** Geometrische Beziehungen von Hebelarm 4 in horizontaler und ausgelenkter Lage, Maße in mm

#### 4. Diskussion und Ausblick

Mit der entwickelten Prüfmaschine ist es möglich, mithilfe von Totlasten und Hebelarmen hohe Kräfte zu erzeugen. Durch den Einsatz des Vorspannsystems können Verformungen der Prüfkörper bis zu 30 mm ausgeglichen werden. Die Lastanalysen zeigen, dass die Last auch bei Kriech-, Schwind- und Quellverformungen der Prüfkörper weitgehend konstant bleibt. Die Auswirkungen infolge einer Schiefstellung des letzten Hebelarmes bleiben ebenfalls gering. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden acht weitere Prüfmaschinen bestellt. Zusätzlich wurde als Referenz eine hydraulische Prüfmaschine angeschafft. Damit stehen in Kürze zehn Prüfmaschinen für die geplanten Langzeitversuche zur Verfügung.

Ein Überblick über die geplanten Versuchsreihen ist in **Abb. 7** dargestellt. Neben vollflächig belasteten Grundlagenversuchen an Konstruktionsvollholz (KVH) und Brettschichtholz (BSH) werden in fünf Serien Schwellen aus verschiedenen Materialien geprüft. Dabei werden die Rippen vereinfacht mit Stahlplatten simuliert. Zusätzlich zu Schwellen aus KVH und BSH werden Schwellen aus Furnierschichtholz (FSH) und Brettsperrholz (BSP) untersucht. Bei diesen Varianten wird ein deutlich verringertes Setzungsverhalten erwartet. Ergänzend werden Deckenabschnitte aus BSP sowie ein Gesamtdetail bestehend aus Schwelle, Decke und Rähm geprüft. Für die meisten Versuchsreihen wird ein natürliches Umgebungsklima der Nutzungsklasse 1 angestrebt. Zur Vergleichbarkeit wird eine Serie mit Grundlagenversuchen in einem kontrollierten Klima bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte durchgeführt. Eine weitere Serie von Grundlagenversuchen wird einer einmaligen Befeuchtung ausgesetzt, um die Auswirkungen eines einmaligen Regenereignisses im Bauzustand auf die Kriechverformungen zu untersuchen.

Zur Bestimmung der für die Kriechversuche erforderlichen Kräfte, werden aktuell Kurzzeitversuche durchgeführt. Für die Kriechversuche wird ein Lastniveau von 30% der Kurzzeitfestigkeit angestrebt.



**Abb. 7:** Material und Prüfkörpergeometrie der geplanten Kriechversuche

## 5. Förderhinweis

Die Arbeiten an der Prüfmaschine wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *Minimierte Querdruckverformungen in mehrgeschossigen Holzgebäuden* durchgeführt. Das Vorhaben wird durch die Holzbau-Offensive Baden-Württemberg gefördert.



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



## Literatur

- [1] *DIN EN 1995-1-1:2010; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.*
- [2] P. Gressel. *Erfassung, systematische Auswertung und Ergänzung bisheriger Untersuchungen über das rheologische Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen. Ein Beitrag zur Verbesserung des Formänderungsnachweises nach DIN 1052 "Holzbauwerke". Band 1: Bericht.* 1983. 236 S. DOI: 10.5445/IR/1000173241.
- [3] F. Wanninger, A. Frangi und M. Fragiaco. „Long-Term Behavior of Posttensioned Timber Connections“. In: *Journal of Structural Engineering* 141.6 (Juni 2015), S. 04014155. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001121.
- [4] F. M. Massaro und K. A. Malo. „Long-term behaviour of Norway spruce glulam loaded perpendicular to grain“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 77.5 (Juli 2019), S. 821–832. ISSN: 1436-736X. DOI: 10.1007/s00107-019-01437-4.
- [5] X. Zheng, Z. Li, M. He und F. Lam. „Experimental investigation on the rheological behavior of timber in longitudinal and transverse compression“. In: *Construction and Building Materials* 304 (2021), S. 124633. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124633. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821023886>.
- [6] Autodesk, Inc. *Fusion 360*. Version 2024, CAD/CAM/CAE-Software. 2024.
- [7] C. Bertram, H. J. Blaß und P. Dietsch. „Innovative testing machine for creep tests on a structural scale under high constant load“. In: *Proceedings from the 14th World Conference on Timber Engineering: Advancing Timber for the Future Built Environment (WCTE 2025)*. (Brisbane, Australien). Curran Associates, 2025. DOI: 10.52202/080513-0623.
- [8] *SKF Lager und Gelenkköpfe, Produktkatalog*. 2012.