

Zwischenbericht

zu dem mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und
Raumforschung geförderten Forschungsprojekt:



HOLZKEILDOLLE ALS REPARATURVERBINDUNG
„Einsatz der Holz(keil)dolle als Möglichkeit neuer
Reparaturverbindungen für die
Denkmalschutzanforderungen des schonenden
Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit.“

SWD-10.08.18.7-18.16
02. Februar 2019

Förderer:

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Referat II 3, Deichmanns Aue 31-37, 53179 Bonn (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Antragssteller und Zuwendungsempfänger:

TU Braunschweig
Institut für Baukonstruktion und Holzbau

Aktenzeichen:

SWD-10.08.18.7-18.16

Forschungsthema:

HOLZKEILDOLLE ALS REPARATURVERBINDUNG „Einsatz der Holz(keil)dolle als Möglichkeit neuer Reparaturverbindungen für die Denkmalschutzanforderungen des schonenden Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit.“

Bewilligungszeitraum:

01.01.2019 – 31.12.2020

Berichtszeitraum:

01.01.2019 – 02.02.2020

Durchführende Institutionen:

Forschende Stelle:

TU Braunschweig - Institut für Baukonstruktion und Holzbau
Schleinitzstraße 21 A, 38106 Braunschweig

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege
Scharnhorststraße 1, 30175 Hannover
Präsidentin Dr.-Ing. Christina Krafczyk

Projektpartner:

IGP Gockel PartGmbH - Ingenieure und Architektin
Kieler Straße 1, 34225 Baunatal

Werkstätten für Denkmalpflege GmbH Quedlinburg
Am Langenberg 3, 06502 Thale OT Westerhausen

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder (Institut für Baukonstruktion und Holzbau – TU Braunschweig)

Autorenvermerk:

Der vorliegende Forschungsbericht wurde durch die folgenden Autoren verfasst:

Elena Perria Dr.-Ing.

Xinyi Li M. Sc.

Mike Sieder Prof. Dr.-Ing.

Svenja Siegert Dipl.-Ing.

Tanja Gockel Dipl.-Ing. M. Sc. Architektin

Cordula Reulecke Dipl.-Ing.

Michael Knop Zimmermeister und Restaurator im Zimmerhandwerk

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Projektpartner

TU Braunschweig – Institut für Baukonstruktion und Holzbau

Dr.-Ing. Elena Perria

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, Regionalreferat Braunschweig, Husarenstraße 75, 38102 Braunschweig

Dipl.-Ing. Cordula Reulecke

IGP Gockel PartGmbH - Ingenieure und Architektin

Dipl.-Ing. Svenja Siegert

Dipl.-Ing. M. Sc. Architektin Tanja Gockel

Werkstätten für Denkmalpflege GmbH Quedlinburg

Zimmermeister und Restaurator im Zimmerhandwerk Michael Knop

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-18.16)

Das Forschungsprojekt wurde finanziell unterstützt von:

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

IGP Gockel PartGmbH - Ingenieure und Architektin

Werkstätten für Denkmalpflege GmbH Quedlinburg

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum | 10 |
| 1.1 | Grundlagenermittlung: Stand der Technik und Voranalyse | 10 |
| 1.2 | Anforderungen an die Holzkeildolle: Festgelegte Parameter | 12 |
| 1.3 | Ergebnisstand der experimentellen Voruntersuchungen TV1 | 13 |
| 1.3.1 | Ziele | 13 |
| 1.3.2 | Materialien..... | 13 |
| 1.3.3 | Methoden | 15 |
| 1.3.4 | Schlussfolgerungen TV1 | 16 |
| 1.4 | Ergebnisstand der experimentellen Voruntersuchungen TV2 | 19 |
| 1.4.1 | Ziele | 19 |
| 1.4.2 | Materialien..... | 19 |
| 1.4.3 | Geometrie der Prüfkörper..... | 19 |
| 1.4.4 | Methoden | 20 |
| 1.4.5 | Schlussfolgerungen TV2 | 21 |
| 1.5 | Simulationsergebnisse | 22 |
| 1.5.1 | Ziele | 22 |
| 1.5.2 | Materialien..... | 22 |
| 1.5.3 | Geometrie der Prüfkörper (Modell) | 23 |
| 1.5.4 | Methoden | 23 |
| 1.5.5 | Ergebnisse | 24 |
| 1.5.6 | Fazit | 24 |
| 2 | Projektstand | 28 |
| 2.1 | Arbeitspaket 1 | 29 |
| 2.2 | Arbeitspaket 2 | 29 |
| 2.3 | Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen der Zielsetzung bzw. des Arbeits- und Zeitplans des Vorhabens gegenüber dem ursprünglichen Antrag | 29 |
| 3 | Mittelverwendung | 30 |
| 3.1 | Bisherige und zukünftig geplante Verwendung der Zuwendung | 30 |
| 3.2 | Zukünftige Verwendung der Zuwendung | 30 |
| 4 | Ergebnisverwertung..... | 31 |
| 5 | Literaturangabe | 32 |
| A. | Anhang A..... | 33 |

1 Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1 Grundlagenermittlung: Stand der Technik und Voranalyse

Für die Ermittlung der Grundlagen der mechanischen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten der Reparaturverbindung mit der Holzkeildolle wurden existierende passende mechanische Modellansätze für klassische Holzdollen/ Holzdübel analysiert sowie existierende Einsatzbeispiele der Holzkeildolle ausgesucht. Für die Analyse und Bewertung der Holzkeildollen, die in gebauten Beispielen vorzufinden sind, wurden erfahrene Fachleute, die seit Jahrzehnten diese Reparaturtechnik anwenden, nach Eigenschaften und Parametern für die Fertigung und den Aufbau (*Erfahrungswerte*) befragt. Anhand der entstandenen Zusammenstellung wurde festgestellt, welche Parameter für die Bewertung und den Aufbau eines Modells für die Holzkeildolle bezüglich seiner Tragfähigkeit benötigt werden könnten, welche einen wesentlichen Beitrag zu einer konstruktiven Bewertung liefern könnten und welche anhand der Literatur und konstruktiven Hinweise festgelegt sein müssten. Der Einbau einer Anforderungsmatrix wurde nach den vorgefundenen Parametern ansatzweise ermittelt. Weitere Randbedingungen werden am Ende der Durchführung von den Tastversuchen (TV) analysiert und ermittelt.

Die beispielhaften Objekte, bei denen die Holzkeildolle eingebaut worden ist, wurden nach Gebäudetypologie und Anwendung der Holzkeildolle als Reparatur mit geometrischen Angaben in Katalogzettel zusammengefasst. In dem Anhang A sind einige beispielhafte Katalogzettel von dem Ingenieurbüro IGP Gockel entwickelt zu finden.

Der Großteil der existierenden mechanischen Modellansätze basiert auf der Analyse von historischen stiftförmigen Verbindungsmitteln. Solche Verbindungsmittel wurden zur Lagesicherung der Verbindung und zu Aufnahme von Zugkräften senkrecht zur Achse der Verbindungsmittel. Die Entwicklung von stiftförmigen Verbindungsmitteln nach [6] fängt ab dem 10. J.h. mit Keilen, Fügennägeln, Kopfnägeln, Holznägeln an und entwickelt sich bis zum 9. J.h. zu Dollen und Dübeln. Solche hölzerne stiftförmige Verbindungsmittel unterscheiden sich in Form im Sinne von der longitudinalen Entwicklung (angespitzt oder zylindrisch) und in der geometrischen Anpassung des Querschnittes in dem Bohrlochdurchmesser (vier- oder achteckig bzw. rund mit oder ohne Nagelkopf). Grob unterschieden wird heutzutage zwischen den zwei Kategorien „Holznägel“ für Verbindungsmittel mit achteckigen Querschnitten und „Dübel“ für zylinderförmige Querschnitte. Zu dem Thema „Holznägel“ liegt eine Vielzahl an Veröffentlichungen vor ([1][2][5][7][8][9][10]) die sich auf historisch-verwendete Holznägel beziehen, um die Tragfähigkeit in der Verbindung, in der sie eingebaut sind, einschätzen zu können. Müller [13] fasste in dem Forschungsbericht die Ergebnisse von Ehlbeck, Hättich, Kessel, Augustin, Görlacher, Blaas, Ernst, Werner zusammen. Die europäischen Normen [4] und [15] geben Bemessungsregeln vor. Ergebnisse der existierenden Literatur über „Holznägel“ und „Dübel“ sind in der Tabelle 1-1 zusammengefasst. Hier sind die vorgefundenen Parameter und Bemessungsvorschläge für scherbeanspruchte Holznägel in ein- und zweischnittigen Verbindungen nach Autoren sortiert aufgelistet. Wichtig ist hervorzuheben, dass manche vereinfachte Modelle und Bemessungsvorschläge für stiftförmige Verbindungen für festgelegte Rahmenbedingungen (Mindestabstände, Mindestdicke, feste Durchmesser, feste Holzarten/ Holzfestigkeiten) in der ein- oder zweischnittigen Verbindung gelten.

Um die bereits existierenden Modellansätze für „Holznägel“ und „Dübel“ für die Holzkeildolle anzupassen, wurden weitere Parameter analysiert bzw. implementiert. Für die Entwicklung einer Anforderungsmatrix zu den maßgebenden Bewertungs- und Untersuchungsparametern aus konstruktiver und statischer Sicht wurden weitere Kenntnisse dank der Tastversuchen TV1 und TV2 erzeugt. Ziel der Tastversuche 1 (TV1) war die Festlegung einiger signifikanter Parameter, die für die Reduzierung der Rissbildung in der Dolle und auf der Bauteiloberfläche eine große Rolle spielen. Die initialen Parameter für den Aufbau der Prüfkörper für die TV1 wurden von den *Erfahrungswerten* genommen; solche Parameter wurden in den TV1 mit dem Ziel variiert, die Ursache der Rissbildung in der Kernzone der HKD und in dem zu verbindenden Bauteil zu identifizieren.

Tabelle 1-1 Zusammenfassung der Parameter für die Bemessung von ein- und zweischnittigen Verbindungen mit scherbeanspruchten Holznägeln

| Rohdichte | |
|--|-------------------------------|
| ¹⁾ $\rho_K \geq 350 \text{ Kg/m}^3$ | DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 |
| Eichenholz | Holzer, 2015 |
| Mindestens C24 und rissfrei | SIA 269/5:2011 |
| Buche oder Eiche | SIA 269/5:2011 |
| Durchmesser | |
| ²⁾ $20\text{mm} \leq d_D \leq 30\text{mm}$ konstanter Querschnitt, rund oder achteckig | DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 |
| 1–1,25 Zoll - 2,4 bis etwa 3 cm | Holzer, 2015 |
| ³⁾ $12\text{mm} \leq d_D \leq 30\text{mm}$ konstanter Querschnitt, rund oder achteckig | SIA 269/5:2011 |
| $24\text{mm} \leq d_D \leq 30\text{mm}$ meist achteckig, selten auch 4- und n-eckig, rund | Müller, 2016 |
| Hirnholzabstand | |
| ⁴⁾ $t \geq 2d$ | DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 |
| ⁵⁾ $t_{i,erf,act} \geq 3d$ | SIA 269/5:2011 |
| $t \geq 3d + 5d$ | Müller, 2016 |
| Abstand zwischen HKD und Randabstand | |
| ⁴⁾ $t \geq 2d$ | DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 |
| ⁵⁾ $t_{i,erf,act} \geq 2d$ | SIA 269/5:2011 |
| $t \geq 2d$ | Müller, 2016 |
| Abstand Verbindungsmittel in der Verbindung | |
| ⁴⁾ $t \geq 2d$ | DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 |
| Bemessungsmodell für Einschätzung der Tragfähigkeit | |
| $N_{zul} = 4 \cdot n \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_N}{0.57}$ [N], pro Scherfuge | Görlacher, 1988 |
| parallel: $F_{s,p} = 8 \cdot d_s^{1.7}$ parallel: $F_{s,s} = 9 \cdot d_s^{1.5}$ | LIGNUM, Holzbautabellen, 1990 |
| $R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{(1 + \beta)}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{u,k} \cdot \delta \cdot f_{h,1,k} \cdot d}$ [N], pro Scherfuge | Blaas, 1999 |
| $R_k = 9.5 \cdot n \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_N}{0.57}$ [N], pro Scherfuge | Blaas et alii, 2005 |
| $F_{Rk} = 9.5 \cdot d^2$ [N], pro Scherfuge Holzart Eiche mit Querschnitt ²⁾ , unabhängig von Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung und Mindestabstände ⁴⁾ mit geringere Holzdicke t : $F_{Rk,red} = F_{Rk} \cdot t_1/t_{req}$ bzw. t_2/t_{req} [N], pro Scherfuge. | DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 |
| $R_{d,act} = \sqrt{\frac{\beta_{f,act}}{1 + \beta_{f,act}}} \cdot \sqrt{M_{u,k,act} \cdot f_{h,1,k,act} \cdot d}$ [N], pro Scherfuge. Mit Berücksichtigung der Lochleibungsfestigkeit der Seitenhölzer, Biege- und Schubfestigkeit, effektive Abstände Hirn- und Seitenholz, Winkel zur Faserrichtung, Dicke und Schubfestigkeit der Seitenhölzer. vereinfachter Nachweis: $R_{d,act} = 9 \cdot d^{1.8}$ [N], pro Scherfuge. Sofern geforderte Bedingungen erfüllt sind: Vollholz C24 mit einem auf Abscheren beanspruchten Holzstift aus Buche oder Eiche D30 mit Durchmesser ³⁾ und ⁵⁾ | SIA 269/5:2011 |
| Empfehlung für $d = 25\text{mm}$ (unabhängig von den Einzelumstände): $F_{bruch} \geq 5\text{kN}$ | Holzer, 2013 |

Die gesammelten Daten aus den TV1 wurden auch als Basis für die Entwicklung eines FE-Modells der Reparaturverbindung genutzt. Das Ziel der Entwicklung dieses virtuellen Modells ist eine zahlreiche Nummer von virtuellen Testergebnisse zu bekommen, die die Komplexität der Parameter-Variation realitätsnah darstellt, damit von der Gesamtheit der Labor- und FE-Ergebnisse eine statistische Auswertung der Parameter möglich ist.

Die finale Ergänzung der Anforderungsmatrix für die Holzkeildolle wurde in einem zweiten Schritt umgesetzt. Ziel der Tastversuche 2 (TV2) war die Bestimmung der axialen Zugtragfähigkeit der Holzkeildolle, die Analyse der Versagensmechanismen und die Festlegung einiger Fertigungsregeln für die Holzkeildolle.

1.2 Anforderungen an die Holzkeildolle: Festgelegte Parameter

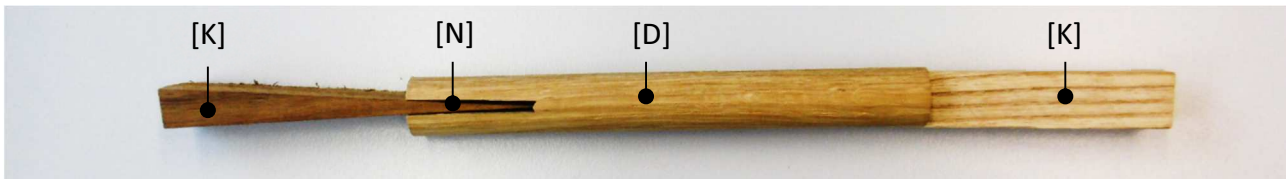


Abbildung 1-1 Abkürzungen der Parameter in der Holzkeildolle

Aus der Analyse existierender Ausführungen und mechanischer Modellansätze wurden die folgenden Parameter in der Holzkeildolle allgemein festgelegt. Die Darstellung der folgenden schriftlich beschriebenen Parameter ist in der Abbildung 1-1 und in der Abbildung 1-2 zu finden.

Dolle [D]

- Holzarten Dolle: Esche (technisch getrocknet), Eiche (technisch getrocknet)
- Richtung der Fasern der Dolle (Längsrichtung). Holzrollen langfaserig gewachsen, natürlich entsprechend dem Faserverlauf gespalten.
- Länge der Dolle $[l_D]$: Variabel, gleich Bauteil-Querschnittshöhe $[l_D = h_B]$.
- Durchmesser der Dolle $[d_D]$: $d_D = 16 - 20 - 24 - 30 \text{ mm}$

Nut [N]

- Mittig in der Dolle, als Diameter ausgewählt
- Länge der Nut 1 $[l_{N,1}]$ und Nut 2 $[l_{N,2}]$: je max. $l_N \leq 1/4 l_D$ und $l_{N,1} = l_{N,2}$
- Dicke der Nut $[t_N]$: $t_N = 1 - 3 \text{ mm}$ (nach Fertigungsregel: $t_N = 1/10 \cdot d_D$)
- Länge des Kerns $[l_{D,kern}]$: $l_{D,kern} = l_D - l_{N,1} - l_{N,2}$
- Abstand des Nutbodens zur Scherfuge = $l_{kern,D}/2$
- Winkel θ zwischen Nutlängsachse und Jahrrings-Ausrichtung in dem Dollenquerschnitt. Festgelegte Kombination: $\theta = T1 = 0$. Nach [3],[11],[14] die radiale Richtung weist die maximale Festigkeit auf: d.h. durch Festlegung $\theta = T1 = 0$ ist das Risiko des Rissbildung auf dem Nutboden in der Dolle minimiert.
- Winkel φ zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und Faserrichtung des Bauteils. Variabel Anordnung nach Holzartkombination zwischen Bauteil und Holzkeildolle. (Variabel in TV1! Siehe Parameter T2 in der Tabelle 1-2).
- Winkel β zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und Nut auf der Seite 2 [N,2]. Festgelegte Kombination: G1. (Variabel in TV1! siehe Parameter G in der Tabelle 1-2). Die Nuten in der Dolle wurden in den vorhandenen Praxisbeispielen auf den gegenüberliegenden Seiten um 90° versetzt, um das befürchtete Risiko Spaltung der HKD zu vermeiden. In dem aktuellen Forschungsvorhaben wurde in den TV1 sowohl die versetzte, als auch die parallele Anordnung der Nuten untersucht.

Keil [K]

- Holzart Keile: Eiche (technisch getrocknet)
- Länge des Keils in Längsrichtung $[l_K]$: $l_K = l_N + 10 \text{ mm}$
- Breite des Keils $[b_K] =$ Durchmesser der Dolle $[d_D]$: $b_K = d_D$

- Dicke des Keils (oben): $[t_{K,2}]$
- Dicke des Keils (Spitze) $[t_{K,1}]$: $t_{K,1} \cong 0\text{mm}$
- Dicke des Keils auf der Oberkante der Nut: $[t_{K,D}]$. Dieser Parameter ist abhängig von der Eindringtiefe und Materialverhalten aller Bauteile.
- Winkel des Keils $[\alpha_{K,a}; \alpha_{K,b}; \alpha_{K,s}]$ mit $\alpha_{K,s} = 8^\circ\text{-}10^\circ$ (Praktische Fertigungsregel für den Winkel des Keils: „Pro cm Länge des (spitzen) Keils, die Breite ist bis 2 mm“)

Bauteil

- Holzarten Bauteil im Bestand:
Eiche 5 Jahre luftgetrocknet (lokale Rohdichte = zu ermitteln)
Fichte technisch getrocknet (lokale Rohdichte = zu ermitteln)
- Holzfeuchte (idealerweise konstant) $[u = \text{ca. } 12\% \text{ Holzfeuchte festgelegt}]$
- Min. Bauteilbreite $[b_{B,min}]$: $b_{B,min} = 120\text{mm}$ äquivalent zu $d_{D,min} = 20\text{mm}$ mit $a_{4,min} = 2,5 \cdot d_D$
- Schnittigkeit der Verbindung: einschnittig
- Min. Bauteilhöhe $[h_B]$: $h_{B,min} = h_{B,1} + h_{B,2} \geq 120\text{mm}$ (d.h. eine einschnittige Verbindung mit jeweils $h_{B,1} \geq 60\text{mm}$ und $h_{B,2} \geq 60\text{mm}$) äquivalent zu min. Länge des Kerns $[l_{D,kern,min}]$: $l_{D,kern,min} = 60\text{mm}$.

Min-Abstände in der Verbindung

- Minimum Abstand zum Bauteil-Rand $[a_4]$: $[a_{4,min} \geq 2,5 \cdot d_D]$
- Minimum Abstand zum Hirnholz $[a_3]$: $a_{3,min} \geq 4 \cdot d_D$
- Minimum Abstand des Verbindungsmittels in der Verbindung $[a_1 = a_2]$: $[a_1 = a_2 \geq 2 \cdot d_D]$
- Minimum Abstand des Verbindungsmittels zu einem Riss $[a_r]$: $[a_r \geq 2,5 \cdot d_D]$

1.3 Ergebnisstand der experimentellen Voruntersuchungen TV1

1.3.1 Ziele

Die Ziele der Tastversuche TV1 sind:

- Analyse der Verteilung der Dehnungen beim Einbringen des Keils.
- Analyse der Bruchgefahr und Rissbildung in den Materialien.
- Bestimmung einiger Parameter.
- Bestimmung einiger Fertigungsregeln.
- Sammlung von Daten für den Aufbau eines FE-Modells.

1.3.2 Materialien

- Die Probekörper wurden vor der Prüfung in der Klimakammer $T = 20^\circ$ und $LF = 65\%$ klimatisiert.
- Die mechanischen Holzeigenschaften (lokale Rohdichte, Holzfeuchte und E-Moduli) der Prüfkörper wurden sowohl für die Bauteile als auch für die Dollen für beide Holzarten ermittelt. Prüfkörper, die aus dem selben ursprünglichen Ausgangsquerschnitt kamen, wurden in Probekörpergruppen aufgeteilt. Die Bestimmung der Eigenschaften erfolgte pro Probekörpergruppe durch Referenz-Kleinproben. Die Ergebnisse der Analyse der mechanischen Holzeigenschaften befinden sich in der Tabelle 1-8 Geometrie der Prüfkörper

Die Geometrie der Prüfkörper für die TV1 wurde nach den Parametern in 1.2 vorbereitet. Einige besondere Parameter und Variablen, die für die TV1 ausgewählt wurden, sind folgend aufgelistet:

Festgelegte geometrische Parameter:

Bauteil:

- Bauteilabmessungen: $(b \times h \times l)$ $120 \times (60 + 60) \times 220 \text{ mm}^3$
- Holzarten Bauteil: Fichte, Eiche
- Holzart Dolle: Eiche
- Holzart Keil: Eiche

- $d_D = 20\text{mm}$
- $l_D = 120\text{mm}$
- $t_N = 2\text{mm}$
- $l_{N,1} = l_{N,2} = 30\text{mm}$
- Die Parameter der Keile wurden auf Basis der Erfahrungswerte der Zimmerer festgesetzt und dann abgefertigt. D.h. die Keile entsprechen nicht den theoretischen Standards in Abbildung 1-2, sondern die Parameter l_K , $t_{K,2}$ und $t_{K,1}$ unterliegen leichten Schwankungen.

Variable geometrische Parameter:

Die analysierten Variablen sind folgend aufgelistet und in der Tabelle 1-2 detailliert beschrieben.

- H: Holzartkombinationen: Holzkombination H1 → Dolle: Eiche / Bauteil: Fichte;
Holzkombination H2 → Dolle: Eiche / Bauteil: Eiche
- T2: Anordnung Nutlängsachse zur Jahrrings-Ausrichtung des Bauteils auf der S1.
- G: Anordnung zwischen Nutlängsachse auf Seite 1 und auf der Seite 2.

Die Kombinationen der oben genannten geometrischen Parameter wurden wie in der Tabelle 1-3 kombiniert und getestet.

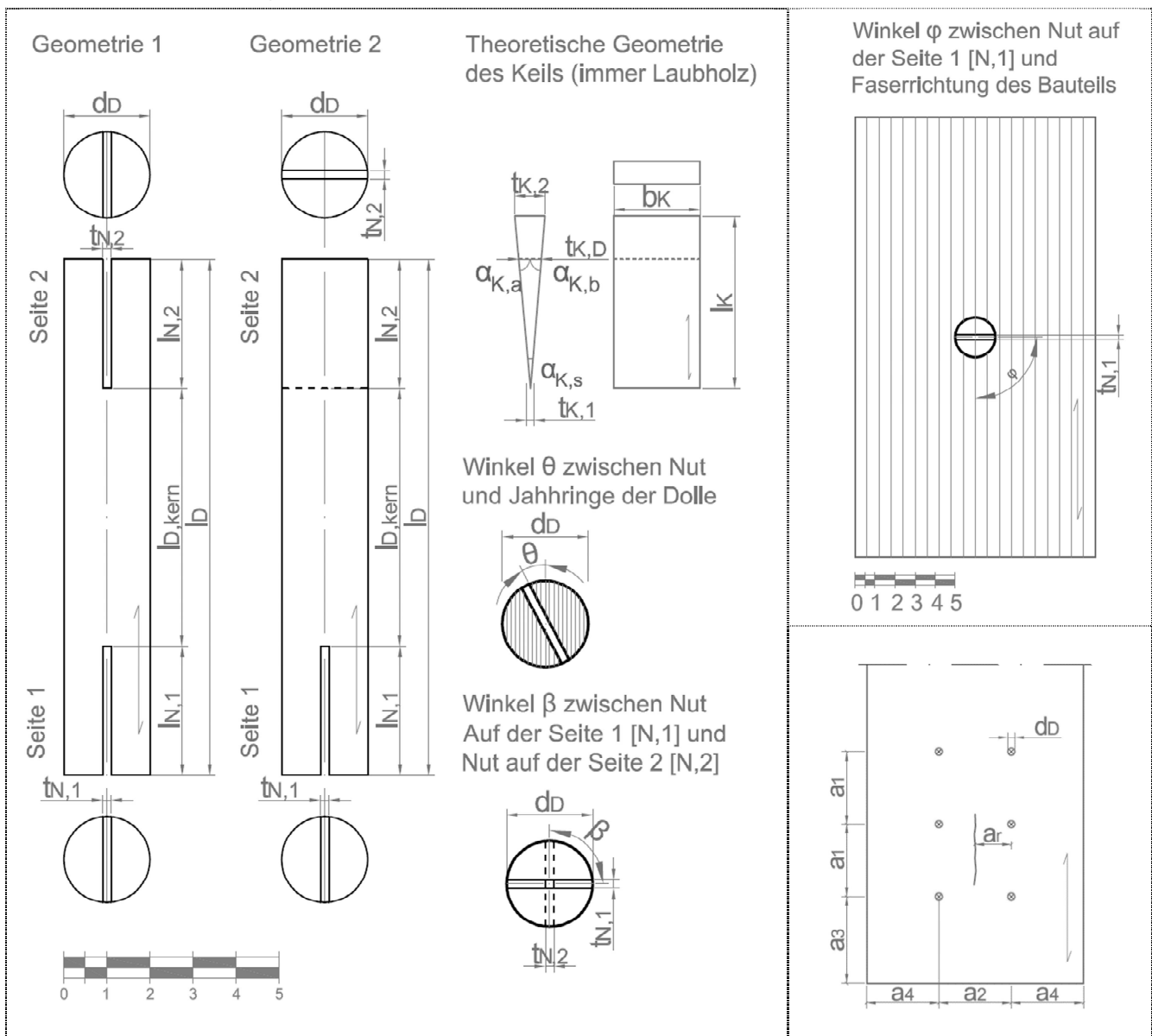


Abbildung 1-2 Darstellung der Parameter in der Reparaturverbindung durch Holzkeildolle

Tabelle 1-2 Abkürzungen für die Variabel-parameter in der Holzkeildolle

| H | T1- | T2- | G |
|---------------------------------|---|--|---|
| Holzkombination | Winkel θ zwischen Nutlängsachse und Jahrrings-Ausrichtung der Dolle | Winkel φ zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und Faserrichtung des Bauteils | Winkel β zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und auf der Seite 2 [N,2] |
| H1 = Nadelholz H2 = Laubholz | T1-0 $\rightarrow \theta = 0^\circ$ T1-45 $\rightarrow \theta = 45^\circ$ T1-90 $\rightarrow \theta = 90^\circ$ | T2-0 $\rightarrow \varphi = 0^\circ$ T2-45 $\rightarrow \varphi = 45^\circ$ T2-90 $\rightarrow \varphi = 90^\circ$ | G1 \rightarrow Anordnung der Nut auf der Seite 2 der Dolle parallel ($\beta = 0^\circ$) zur Anordnung auf der Seite 1 G2 \rightarrow Anordnung der Nut auf der Seite 2 der Dolle senkrecht ($\beta = 90^\circ$) zur Anordnung auf der Seite 1. |

Tabelle 1-3 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1

| Geometrische Kombination | Wiederholungen für Holzkombination | |
|--------------------------|------------------------------------|----|
| | H1 | H2 |
| T1-0 T2-0 G1 | 1 | 0 |
| T1-0 T2-0 G1 | 0 | 4 |
| T1-0 T2-45 G1 | 4 | 0 |
| T1-0 T2-45 G2 | 5 | 5 |
| T1-0 T2-90 G1 | 5 | 5 |
| T1-0 T2-90 G2 | 5 | 5 |

1.3.3 Methoden

Ziel der Tests ist die Einführung des Keils (Seite 1 und Seite 2) mit Hilfe einer universalen Prüfmaschine mit einer weggesteuerte Prüfung (Geschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/s}$) (Abbildung 1-3). Der Keil wurde nicht - wie unter realen Bedingungen - mit einem Hammer eingeführt. Der Grund dafür ist der Versuch, für jede Probe die gleichen Randbedingungen zu wiederholen: Geschwindigkeit, Lastbetrag, Belastungsrichtung (ohne natürliche Richtungskorrekturen eines menschlichen Operators) und zentrierte Last auf den (asymmetrischen) Keil.

Die oberflächlich sichtbaren und unsichtbaren Verformungen, die während der Tests entstanden sind, wurden optisch aufgenommen.

Test -schritte:

- (S0) Vor der Testanfang erfolgt den Einbau der Dolle in das Bauteil.
- Die Einführung des Keils erfolgt in den Schritten:
- (S1) Einführung bis zu einer Eindringtiefe in die Nut von $E. T_{S1,max} \leq 30\text{mm}$ ($E. T_{S1,max} = l_N$);
- (S2) Weitere Einführung des Keils bis zu einem definierten Abbruchkriterium (Stabilitätsverlust des Keils).

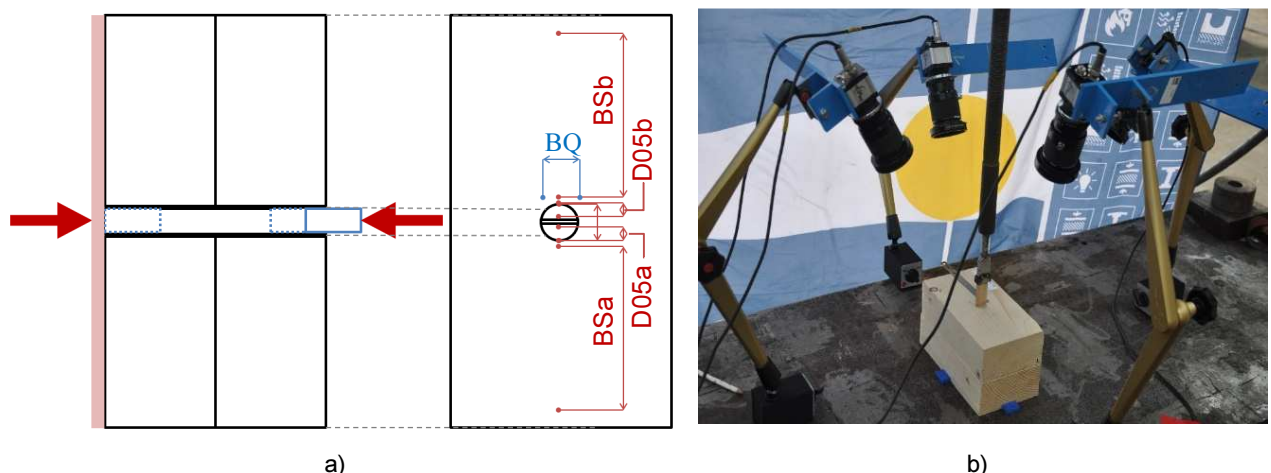


Abbildung 1-3 Test-setup u. optische Konfigurationen für die Messung der Dehnung: a) Schema b) Bild

1.3.4 Schlussfolgerungen TV1

Die Statistiken für die folgenden Ergebnisse der TV1 sind in den Abbildungen für die Mittelwerte des Restkerns geometrieabhängig, Mittelwerte der Eindringtiefe des Keils geometrie- und holzartabhängig und Mittelwerte des Abrisses (Eindringung + Riss) der Dolle geometrie- und holzartabhängig in der Abbildung 1-4. Die Ergebnisse wurden separat für die drei Fälle: „Allgemeine Schlussfolgerungen“, „Schlussfolgerungen für die H1“ und „Schlussfolgerungen für die H2“ geführt.

Allgemeine Schlussfolgerungen:

- Die Kernzone bleibt unabhängig vom β ausreichend frei von Rissen.
- Nachteile Konfiguration G2: größerer Aufwand bei der Herstellung.
- Vorteile Konfiguration G1: geringerer Aufwand bei der Herstellung.
- Dazu (über Simulationen bestätigt): Verdacht auf Torsionsbelastung in G2 vs. keine Torsionsbelastung in G1 in der Dolle bei/ nach Einschlag der Keile.
- T2-90 größerer Widerstand Bauteil, d.h. niedrigere Eindringtiefe.
- T2-0 geringerer Widerstand Bauteil, d.h. größere Eindringtiefe.
- **Die Geometrie G1 wird für die Herstellung der HKD favorisiert.**
- Beobachtung: Wegen der Einführung der Dolle im Bauteil ist eine Verdrehung der vorgesehenen Winkel möglich. Die Bauteile aus Eiche leisten mehr Widerstand wie die Bauteile aus Fichte. Das Verdrehen der Dollen bei einem Bauteil aus Eiche ist sehr wahrscheinlich. Die Abweichung zu dem vorgesehenen Winkel ist $\varphi = \mp 45^\circ$

Schlussfolgerungen für die H1:

T2-0_G1:

- Mittelwerte Restkern bei T2-0_G1 $l_{D,kern,mean} = 30mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 100%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils zu 50%.

T2-90_G2 :

- Mittelwerte Restkern bei T2-90_G2 $l_{D,kern,mean} = 33.25mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 75%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils zu 38%. Wichtig hervorzuheben ist, dass sich die Versagenshäufigkeit auf der Bauteiloberfläche auf 60% und in der Dolle auf 92% erhöht, wenn nur die S2 ($\varphi = 0^\circ$) betrachtet wird.
- Die Konfiguration T2-90_G2 wird wegen der Rissbildung im Bauteil (Querzug) auf S2 ($\varphi = 0^\circ$) u. geringer Restkernlänge (tiefe Rissbildung über den Nutboden hinaus auf S2 ($\varphi = 0^\circ$) in der Dolle) nicht weiter verfolgt.
- **Alle Konfigurationen mit $\varphi = 0^\circ$ werden für H1 ausgeschlossen (T2-0_G1; T2-0_G2; T2-90_G2).**

T2-45_G2:

- Mittelwerte Restkern bei T2-45_G2 $l_{D,kern,mean} = 46.30mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 17%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 50%.
- In der Konfiguration T2-45 begünstigt das Verdrehen der HKD beim Einschlag der Dolle im Bauteil die Stellung der Nut $\varphi = 0^\circ$ (eventuelles Ausschlusskriterium).

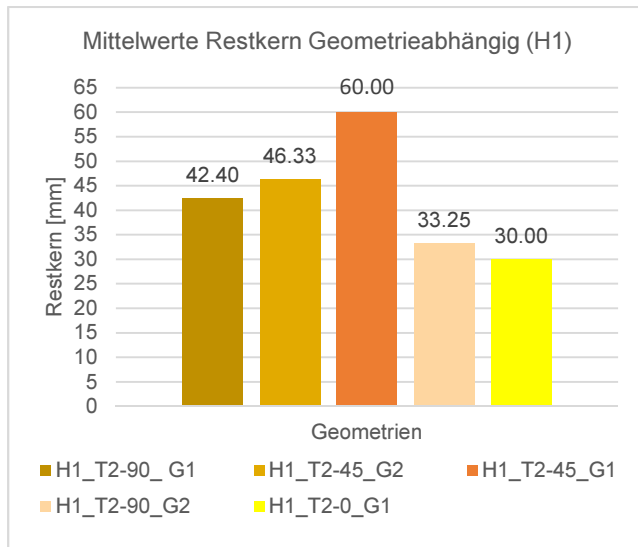
T2-45_G1

- Mittelwerte Restkern bei T2-45_G1 $l_{D,kern,mean} = 60.00mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 0%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 13%.
- Beobachtung: Je höher die Rohdichte der Dolle desto geringer die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in der Dolle im Nutboden (T2-45_G2: $\rho_{DOLLE,mean} = 0.560 g/cm^3$: Versagen des K: 6/12; T2-45_G1: $\rho_{DOLLE,mean} = 0.715 g/cm^3$: Versagen des K: 0/16)
- **Die Restkernlänge der Konfig. T2-45_G1 ist länger als bei T2-45_G2.**

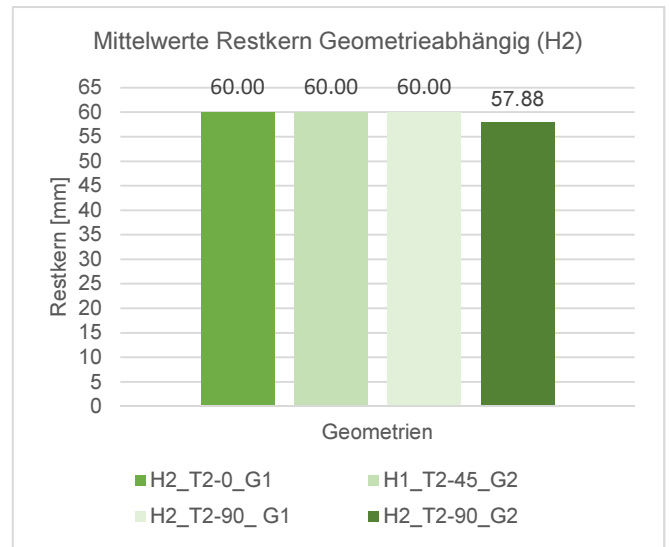
- Die Konfiguration T2-45_G2 wird nicht weiterverfolgt, Ersatz durch Konfiguration T2-45_G1.

T2-90_G1

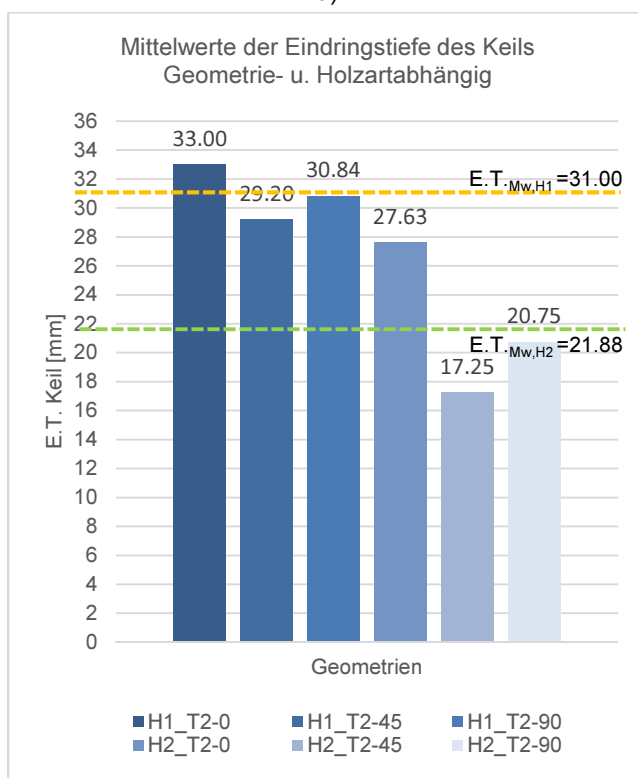
- Mittelwerte Restkern bei T2-90_G1 $l_{D,kern,mean} = 60.00\text{mm}$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 70%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 0%.
- Erklärung: die Rissbildungswahrscheinlichkeit ist abhängig von Elastizitätsmoduli. Dies gilt für Dolle und Bauteil gleichermaßen. Es wurde vermutet eine höhere Elastizität und höhere Fähigkeit des Holzartes Fichte, Verformungen aufzunehmen, in Vergleich zur wenigen Fähigkeit des Holzartes Eiche, Verformungen aufzunehmen.
- Vorteile: Geringer Aufwand bei der Herstellung; beim Verdrehen der HKD beim Einschlag des Keils wird angenommen, dass höchstens $\phi=45^\circ$ erreicht wird.
- Die Konfiguration T2-90_G1 wird weiterverfolgt.



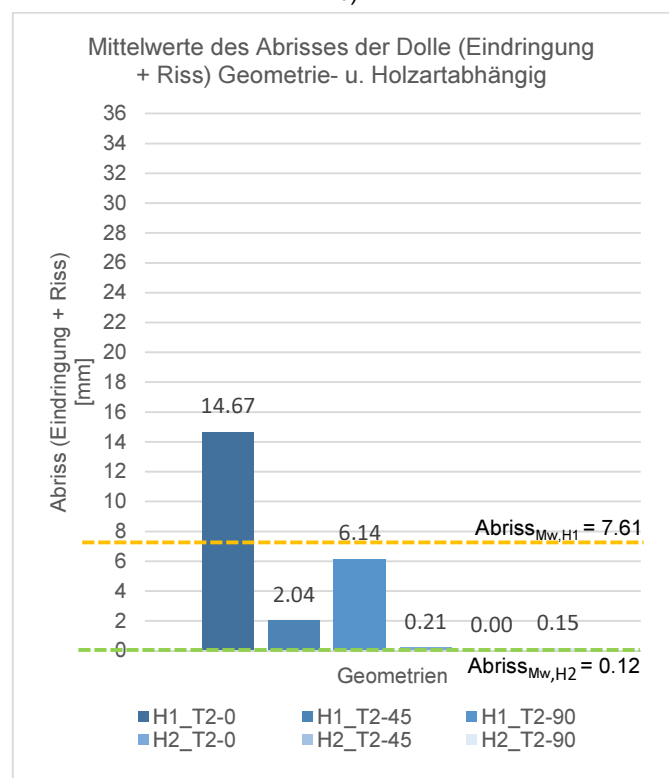
a)



b)



c)



d)

Abbildung 1-4 Statistiken über die Ergebnisse TV1: Restkern der geometrischen Kombinationen für a) H1 und b) H2; c) Mittelwerte der Eindringtiefe des Keils; d) Mittelwerte des Abrisses der Dolle (Eindringung + Riss)

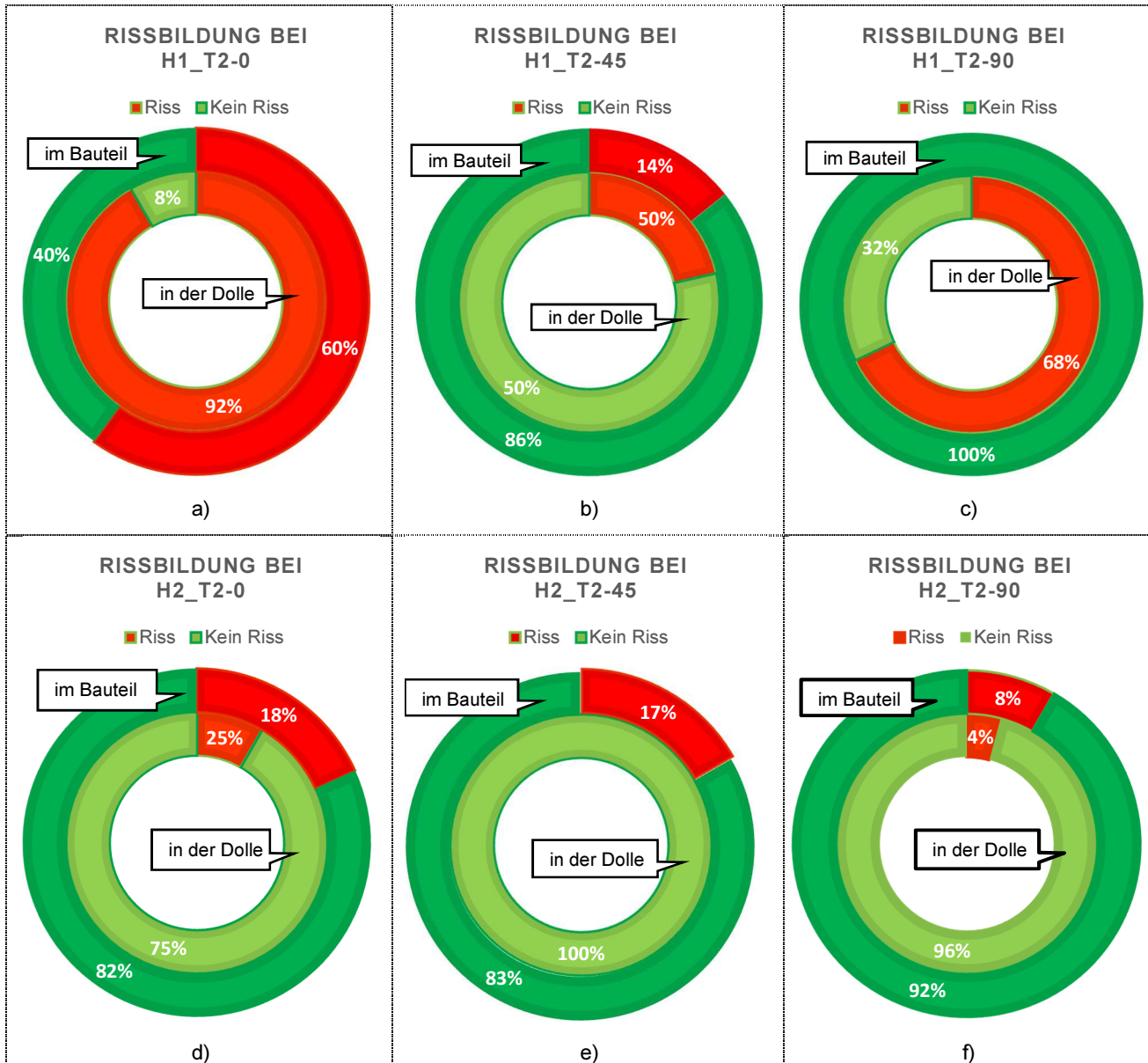


Abbildung 1-5 Statistiken über die Rissbildung in TV1: a) b) c) geometriehabhängige Rissbildung für H1; d) e) f) geometriehabhängige Rissbildung für H2.

Schlussfolgerungen für die H2:

T2-0_G1:

- Mittelwerte Restkern bei T2-0_G1 $l_{D,kern,mean} = 60.00mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 0%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 0%.

T2-90_G2:

- Mittelwerte Restkern bei T2-0_G1 $l_{D,kern,mean} = 60.00mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 19%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 33%. Wichtig hervorzuheben ist, dass sich die Versagenshäufigkeit auf der Bauteiloberfläche auf 60% und in der Dolle auf 25% erhöht, wenn nur die S2 ($\varphi = 0^\circ$) betrachtet wird.
- Beobachtung: Je höher die Rohdichte der Dolle desto geringer die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in der Dolle im Nutboden (T2-90_G2: $\rho_{DOLLE,mean} = 0.569 g/cm^3$: Versagen des K auf der S2: 2/8; T2-0_G1: $\rho_{DOLLE,mean} = 0.721 g/cm^3$: Versagen des K: 0/16)

- **Die Konfiguration T2-90_G2 wird aufgrund von G2 nicht mehr weiter verfolgt.**
- **Die Konfiguration T2-0_G1 wird weiterverfolgt.**

T2-45_G2

- Mittelwerte Restkern bei T2-45_G2 $l_{D,kern,mean} = 46.30mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 0%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 17%.

T2-45_G1

- Mittelwerte Restkern bei T2-45_G1 $l_{D,kern,mean} = 60.00mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 0%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 13%.
- Bei T2-45 $E.T.K,mean = 17.25mm$ d.h. $t_N = b_D > 2 mm$. Möglicher Nachteil: Keine Spreizung der Dolle!
- **Die Konfiguration T2-45_G2 wird aufgrund von G2 nicht mehr weiter verfolgt.**
- **Die Konfiguration T2-45_G1 wird weiter verfolgt.**

T2-90_G1

- Mittelwerte Restkern bei T2-90_G1 $l_{D,kern,mean} = 42.40mm$
- Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich 70%; Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils 0%.
Bei T2-90 $E.T.K,mean = 20.75mm$ d.h. $t_N = b_D = 2 mm$. Möglicher Nachteil: Geringe bis keine Spreizung der Dolle.
- Möglicher Vorteil: beim Einschlag der Dolle in das Bauteil wird angenommen, dass aufgrund des Verdrehens der Dolle im Bauteil höchstens $\varphi = 45^\circ$ erreicht wird.
- **Konfiguration T2-90_G1 wird beibehalten.**

1.4 Ergebnisstand der experimentellen Voruntersuchungen TV2

1.4.1 Ziele

- Analyse der Zugtragfähigkeit der Holzkeildolle.
- Bestimmung der Versagensmechanismen der HKD .
- Festlegung einiger Fertigungsregeln .

1.4.2 Materialien

- Die Probekörper wurden vor der Prüfung in der Klimakammer $T = 20^\circ$ und $LF = 65\%$ klimatisiert.
- Die mechanischen Holzeigenschaften (lokale Rohdichte, Holzfeuchte) der Prüfkörper wurden sowohl für die Bauteile als auch für die Dolle für beide Holzarten ermittelt. Prüfkörper, die aus dem selben ursprünglichen Ausgangsquerschnitt kamen, wurden in Probekörpergruppen aufgeteilt. Die Bestimmung der Eigenschaften erfolgte pro Probekörpergruppe durch Referenz-Kleinproben.

1.4.3 Geometrie der Prüfkörper

- Die Geometrie der Prüfkörper wurde speziell für den Einsatz in der Zugprüfung, in der Bauteil und Dolle auseinander gezogen werden, festgelegt.

Bauteil:

- Bauteilabmessungen: $(b \times h \times l)$ $120 \times 60 \times 230 mm^3$
- Holzkombinationen: Holzkombination H1 → Dolle: Eiche / Bauteil: Fichte;
Holzkombination H2 → Dolle: Eiche / Bauteil: Eiche

Dolle:

- Holzart Dolle: Eiche (luftgetrocknet)
- $d_D = 20mm$
- $l_D = 500mm$
- $t_N = 2 mm$
- $l_{N,1} = l_{N,2} = 30mm$

- $l_K = 30 + 10\text{mm} = 40\text{mm}$
- Die Parameter der Keile wurden auf Basis der Erfahrungswerte der Zimmerer festgesetzt und dann abgefertigt. D.h. die Keile entsprechen nicht den theoretischen Standards in Abbildung 1-2, sondern die Parameter l_K , $t_{K,2}$ und $t_{K,1}$ unterliegen leichten Schwankungen.

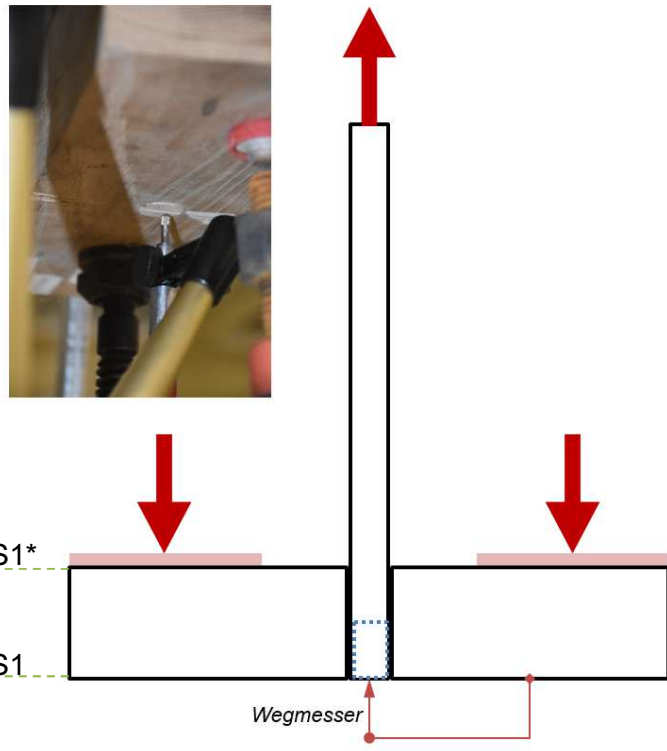
Die obengenannten Holzkombinationen mit der bekannten geometrischen Parameter wurden wie in der Tabelle 1-4 kombiniert und getestet.

Tabelle 1-4 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1

| Geometrische Kombination | Wiederholungen für Holzkombination | |
|--------------------------|------------------------------------|----|
| | H1 | H2 |
| T1-0 T2-0 | 0 | 7 |
| T1-0 T2-45 | 5 | 5 |
| T1-0 T2-90 | 5 | 7 |

1.4.4 Methoden

- Ziel der TV2 ist es die axiale Tragfähigkeit der Holzkeildolle zu bestimmen. Die Zugprüfung wurde mit Hilfe einer universalen Prüfmaschine mit einer weggesteuerten Prüfung (Geschwindigkeit $v = 0.05\text{ mm/s}$) durchgeführt.
- Der Einbau der Dolle in dem Bauteil (S0) erfolgte vor dem Test.
- Die Prüfung erfolgte in zwei Schritten:
 (S1) Schritt 1: Einführung des Keils in die Nut mit einem Hammerschlag. Die Einführung erfolgte manuell bis zu einer Eindringtiefe in die Nut $E.T_{S1,max} \leq 30\text{mm}$ ($E.T_{S1,max} = l_N$);
 (S2) Schritt 2: Applikation der Zugkraft für das Ausziehen der Holzkeildolle bis zu einem definierten Abbruchkriterium (siehe Abbruchkriterien in 1.4.5).
- Für den Aufbau der Prüfung wurde der Prüfkörper mit einer Hilfskonstruktion in einer festen Position gesichert. Für die Applikation der Zugkraft wurde die Dolle mit Klemmbacken gesichert (Tabelle 1-4).
- Für die Messung der Verschiebung der Holzkeildolle in dem Bohrloch des Bauteils wurde ein Wegmesser zwischen der unteren Bauteil-Oberfläche und der unteren Seite der Dolle installiert.



a) **Abbildung 1-6 Test-setup der Zugprüfung TV2** a) Bild b) Wegmesser zwischen Bauteiloberfläche und Dolle für die Messung der lokalen Verschiebung der HKD c) Schema.

1.4.5 Schlussfolgerungen TV2

Versagensarten:

Während der Tests wurden vier Haupt- Versagensarten festgestellt (siehe Abbildung 1-7):

- 1) Rissbildung: Querzugversagen im Bauteil auf S1* Seite
- 2) Verschiebung Δ_t der Dolle im Bohrloch auf S1
- 3) Zugversagen parallel zur Faser der Dolle
- 4) Rissbildung: Querzugversagen im Bauteil auf S1 o. S1* Seite

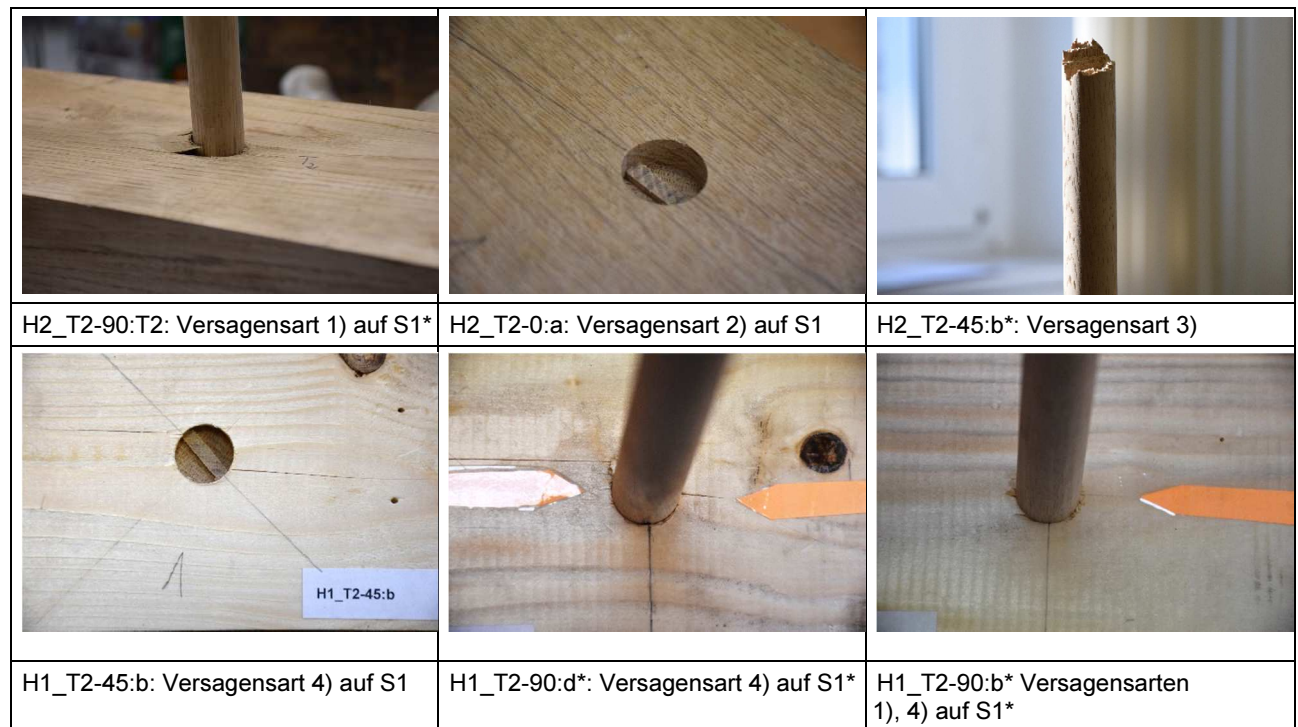


Abbildung 1-7 Versagensarten in TV2

Allgemeine Schlussfolgerungen:

- Bei der Auswertung der Tests wurde festgestellt, dass die Reibung eine Grenze der minimalen Tragfähigkeit (Sicherheitsminderwert) bei einer Kraft $F_{\max, \text{Reibung}} = 2.3 \sim 3.0 \text{ kN}$ vorgibt.
- Die händische Einführung des Keils in TV2 hat gezeigt, dass die Orientierung der Nut (φ) kein relevanter Parameter für die Eindringtiefe ist. Die TV2 haben ein Gegenergebnis zu den TV1 (maschinelle Einführung des Keils) geliefert, d.h. die Eindringtiefe $E.T. = l_N = 30 \text{ mm}$ kann durch händische Einführung des Keils auch von H2_T2-90 erreicht werden.

Schlussfolgerungen für die H1:

- Alle Konfigurationen liefern ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Eindringtiefe.
- Bei Konfiguration H1_T2-45 reißt die Oberfläche bereits bei Eindringen des Keils zu 100% auf S1 und zu 20% auf S1*. Nach dem Zugversuch liegt die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung gesamt auf den Oberflächen bei 80%. Die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in dem Nutboden liegt bei 12.5%.
- Bei Konfiguration H1_T2-90 reißt die Oberfläche bereits bei Eindringen des Keils zu 0% auf S1 und zu 100% auf S1*. Nach dem Zugversuch liegt die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung gesamt auf den Oberflächen bei 50%. Die gesamte Rissbildung findet auf dem nicht sichtbaren Seite S1* statt. Die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in dem Nutboden liegt bei 0%.
- Die größte aufnehmbare Zugkraft liefert die Konfiguration H1_T2-45.
- **Die Konfiguration H1_T2-45 wird auf Grund der nicht gewünschten Rissbildung auf der Oberfläche S1 ausgeschlossen.**
- **Für die finalen Versuche wird die Konfiguration H1_T2-90 festgelegt.**

Schlussfolgerungen für die H2:

- Alle Konfigurationen liefern ähnliche Ergebnisse hinsichtlich Eindringtiefe und Rissbildung auf den Oberflächen und in dem Nutboden.
- Alle Konfigurationen liefern ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der aufnehmbaren Zugkräfte. Auffällig ist, dass die Dolle 12, Versuchskörper T2-0:c, ein geringeres Gewicht/ eine geringere Dichte auswies wie die übrigen gewogenen Dollen. Sie liefert eine aufnehmbare Zugkraft, die vom Mittelwert dieser Konfiguration stark abweicht.
- Die größte aufnehmbare Zugkraft (ohne Ausschluss von T2-0:c) liefert die Konfiguration H2_T2-90.
- **Für die finalen Versuche wird die Konfiguration H2_T2-90 festgelegt.**

Tabelle 1-5 Ergebnisse der TV2

| Geometrie der Versuchskörper | Versagen Mechanismus | E. T. [mm] | $b_{N,mean}$ [mm] | F_{max} [kN] | $F_{max,mean}$ [kN] |
|------------------------------|----------------------|------------|-------------------|----------------|---------------------|
| H1_T2-45:a | 1+2+4+4* | 29.0 | | 7.27 | 7.15 |
| H1_T2-45:b | 1+2+4 | 30.0 | 4.5 | 6.97 | |
| H1_T2-45:c | 2+4+4* | 30.0 | 4.5 | 8.76 | |
| H1_T2-45:d | 1+2+4+4* | 30.0 | 4.5 | 6.44 | |
| H1_T2-45:e | 2+4 | 29.0 | 4.5 | 6.29 | |
| H1_T2-90:a | 1+2+4* | 28.0 | 4.0 | 6.32 | 5.90 |
| H1_T2-90:b | 1+2+4* | 29.5 | 4.0 | 6.58 | |
| H1_T2-90:c | 1+2+4* | 29.5 | 4.0 | 5.89 | |
| H1_T2-90:d | 1+2+4* | 29.5 | 4.5 | 4.81 | |
| H1_T2-90:e | 1+2+4* | 28.5 | 4.0 | | |
| H2_T2-0:a | 1+2 | 29.5 | 4.0 | 10.92 | 8.96 |
| H2_T2-0:b | 2 | 24.5 | 3.5 | 8.33 | |
| H2_T2-0:c | 1+2 | 30.0 | 3.5 | 6.24 | |
| H2_T2-0:d | 2 | 28.0 | 3.0 | 9.17 | |
| H2_T2-0:e | 1+2 | 29.5 | 3.5 | 9.37 | |
| H1_T2-0_T3 | 2 | 30.0 | 3.0 | 7.88 | |
| H1_T2-0_T4 | 2 | 28.0 | 3.1 | 10.87 | |
| H2_T2-45:a | 1+2 | 28.5 | 3.5 | 8.68 | 8.17 |
| H2_T2-45:b | 1+2+3 | 29.0 | 3.5 | 8.99 | |
| H2_T2-45:c | 2 | 28.5 | 3.5 | 8.61 | |
| H2_T2-45:d | 2 | 29.0 | 2.5 | 7.27 | |
| H2_T2-45:e | 1+2 | 28.5 | 3.0 | 7.32 | |
| H2_T2-90:a | 1+2 | 23.0 | 2.5 | 8.74 | 9.23 |
| H2_T2-90:b | 1+2 | 19.0 | 3.0 | 9.63 | |
| H2_T2-90:c | 1+2 | 28.0 | 3.5 | 8.47 | |
| H2_T2-90:d | 2 | 28.0 | 4.0 | 11.5 | |
| H2_T2-90:e | 1+2 | 27.5 | 3.5 | 10.28 | |
| H1_T2-90_T1 | 1+2 | 30.0 | 2.9 | 9.47 | |
| H2_T2-90_T2 | 1+2 | 22.0 | 3.6 | 6.5 | |

1.5 Simulationsergebnisse

1.5.1 Ziele

Ziel der Simulationen ist die Bestätigung der Ergebnisse der Tastversuche TV1 mit Hilfe theoretischer und numerischer Ansätze basierend auf der Finite-Element-Methode.

1.5.2 Materialien

- Die Materialeigenschaften für Bauteil und Dolle im Modell wurden durch einen iterativen Prozess auf Basis *Material-Bekanntes* und der optischen Messergebnisse kalibriert.
- Tabelle 1-7 enthält die tatsächlichen Materialeigenschaften $E_{m,0}$ und ρ der Prüfkörper.
- *Material-Unbekanntes* wurden in dieser ersten Simulationsreihe auf Basis von Literaturquellen ausgewählt. Basierend auf den experimentell-ermittelten biege E-Moduli ($E_{m,0}$) und Rohdichte (ρ) für Bauteil und Dolle wurden sie entsprechenden Holzklassen nach DIN EN 338 assigniert.
- In der Tabelle 1-8 sind die adoptierten Eigenschaften für die Materialien des FE-Modells zu finden. Für das Verhalten des Materials wurde ein lineares elasto-plastisches Verhalten angenommen nach [14].

Die weiteren Unbekannten im Materialmodell ($E_{c,0}$; $E_{c,90}$; *Poisson ratio*) könnten durch Iterationsverfahren *FEM-Updating* ermittelt werden.

Das Materialverhalten im FE-Modell wurde nach den optischen Messergebnissen für den Probekörper H2_T1-0_T2-90_G1d kalibriert (Abbildung 1-8):

- Verformung / Einwirkung im Bauteil quer zur Faser (BQ).
- Verformung / Einwirkung im Bauteil senkrecht zur Faser (BS).
- Verformung / Einwirkung in der Dolle (D05).

1.5.3 Geometrie der Prüfkörper (Modell)

Die Geometrie des Modells wurde nach den geometrischen Eigenschaften der realen Prüfkörper TV1 modelliert (siehe 1.3.2). Der Keil wurde als Festkörper vereinfacht und sein Eintreiben durch eine Volumenänderung in der Nut simuliert.

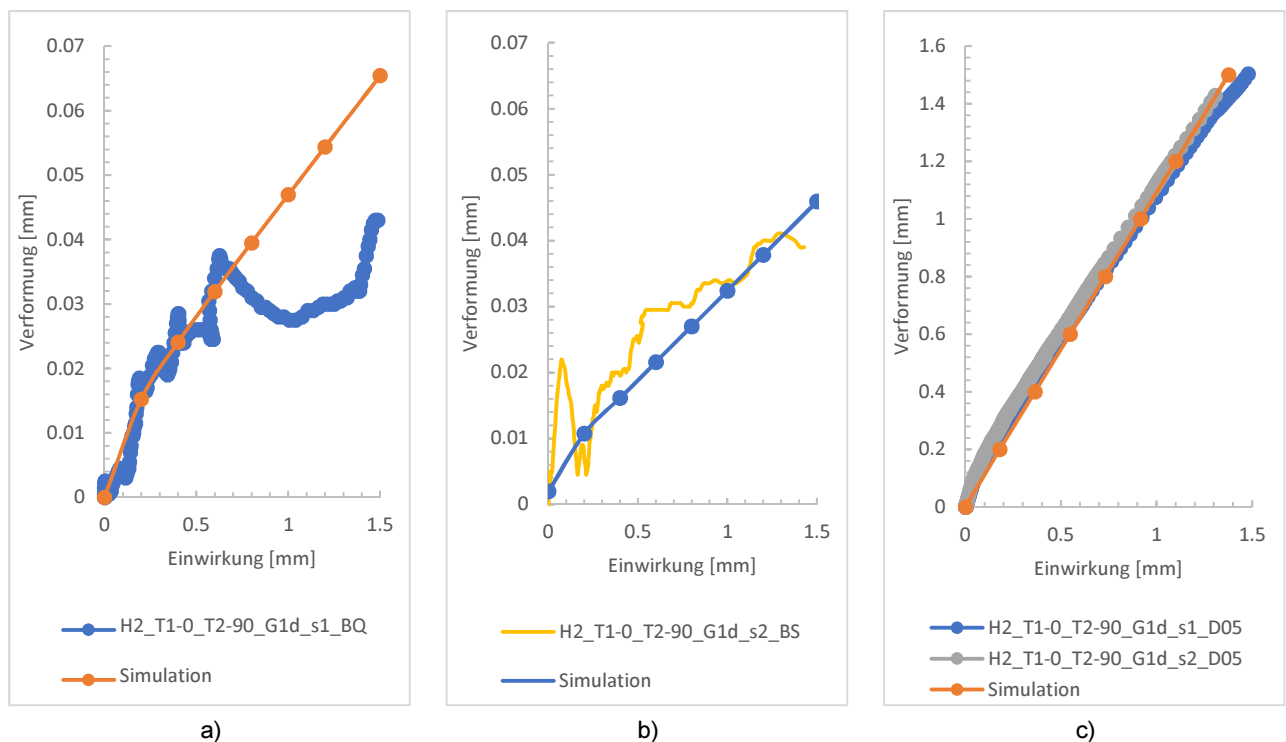


Abbildung 1-8 Optischen Messergebnissen für den Probekörper H2_T1-0_T2-90_G1d. a)BQ; b)BS; c)D05

1.5.4 Methoden

Die FE-Simulationen wurden mit dem Software COMSOL durchgeführt.

Die Simulationen wurden mit der Annahme einiger Hypothesen durchgeführt:

- Hypothese 1: Die „Einwirkung“ in dem Test ist im Modell eine Interpretation der Einwirkung des Keileinschlags durch Volumenverschiebung/ Änderung. Die maximale Volumenänderung entspricht der maximalen Verschiebung des Keils in den durchgeführten Tests.
- Hypothese 2: Die „Einwirkung“ vernachlässigt die Präsenz der Reibung und der Imperfektionen auf der Kontaktfläche Keil/ Dolle.
- Hypothese 3: Die radialen und tangentialen Materialeigenschaften des Holzes sind gleich.

1.5.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1-6 exemplarisch für die Geometrie H2_T1-0_T2-90_G1 dargestellt:

- Spannungsverlauf (Überschreitung der Querkzug-Festigkeit $f_{t,90}$) für Dolle und Bauteil.
- Verformung für Dolle und Bauteil.

Aufgrund von Annahmen in der Berechnungsphase und ingenieurmäßigen Vereinfachungen, die für das Materialmodell für Holz verwendet wurden, weichen die Testergebnisse und die Simulation in einigen Aspekten ab. Die Übereinstimmung zwischen Tests und Simulationen ist bestmöglich.

1.5.6 Fazit

- In dem dargestellten Beispiel gibt es eine Abweichung der tatsächlichen Rohdichte zwischen Bauteil und Dolle: nach den theoretischen Eigenschaften im Modell ist der Rohdichte-Unterschied zwischen Bauteil und Dolle circa $\Delta\rho = 40 \text{ Kg/m}^3$; nach Bestimmung der Eigenschaften von Bauteil und Dolle in den TV1 ist der Rohdichte-Unterschied circa $\Delta\rho = 100 \text{ Kg/m}^3$.
- Sobald ein Riss in dem Bauteil entsteht, weichen die Ergebnisse ab, da das idealisierte elastisch-plastisch Verhältnis des Modells (Navier-Theorie) nicht den Verlust von Energie nach einem Versagen berücksichtigt.
- Auf der einen Seite stellen die Verformung/ Einwirkung Diagramme der optischen Aufnahmen die Einwirkung als Maschinenweg (Einführung des Keils durch Stempel, als den Stempel-Weg) dar; auf der anderen Seite wird die Einwirkung im Modell als Volumenvergrößerung in der Nut interpretiert.
- Die Daten der *bekannt* $E_{m,0}$, ρ und der *unbekannt* $E_{c,0}$; $E_{c,90}$, das Materialverhalten auf der Oberfläche und das reale elasto-plastische Verhalten wurden für die zweite Simulationsreihe schon bestimmt und stehen für das zweite Update des FE-Modells bereit.
- In der zweiten Update des FE-Modells werden die Eigenschaften ρ , $E_{m,0}$, $E_{c,0}$, $E_{c,90}$ für Bauteil und Dolle und für die verschiedenen Holzarten nach DIN EN 408 im Labor bestimmt. Diese Bekannte-Materialeigenschaften zusammen mit dem realen elasto-plastischen Verhalten des Holzes auf der Oberfläche des Bauteils werden für die zweite Simulationsreihe benutzt und weitere Ergebnisse generiert.

Tabelle 1-6 Ergebnisse der FE-Simulationen für H2_T1-0_T2-90_G1 – Fallbeispiel TV1

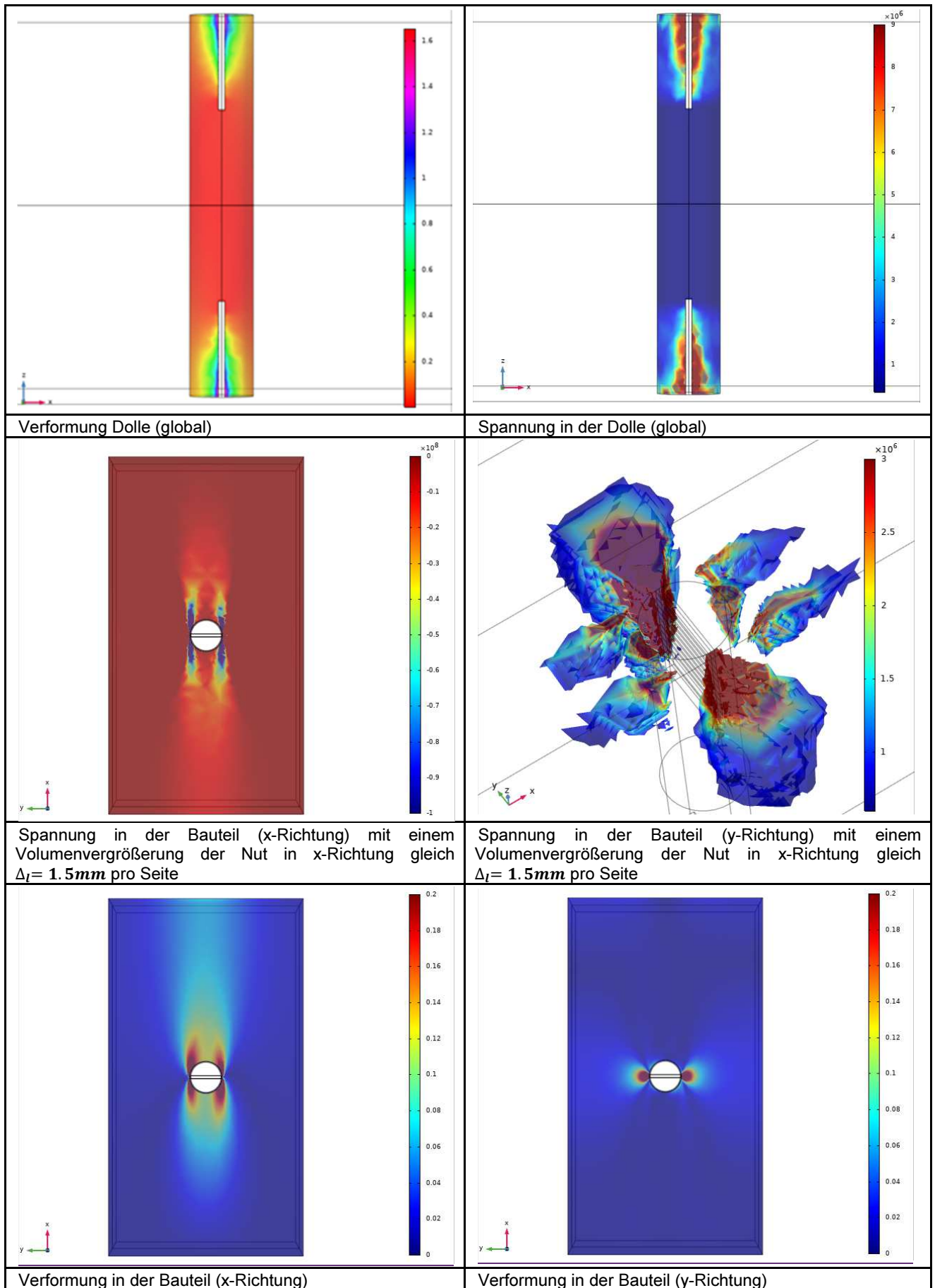


Tabelle 1-7 Ergebnisse Bestimmung Eigenschaften für Prüfkörper TV1

| | | | |
|--|-----------------|------|------|
| Mittelwert des Elastizitätsmoduls bei Biegung in Faserrichtung | $E_{m,0,mean}$ | 12 | 10.5 |
| 5%-Quantil des Elastizitätsmoduls bei Biegung in Faserrichtung | $E_{m,0,k}$ | 10.1 | 8.8 |
| Mittelwert des Elastizitätsmoduls bei Biegung rechtwinklig zur Faserrichtung | $E_{m,90,mean}$ | 0.8 | 0.70 |
| Mittelwert des Schubmoduls | G_{mean} | 0.75 | 0.66 |
| Rohdichte, in kg/m^3 | | | |
| 5%-Quantil der Rohdichte | ρ_k | 540 | 510 |
| Mittelwert der Rohdichte | ρ_{mean} | 650 | 610 |

Abbildung 2-1

Detaillierter Arbeits-/Zeitplan

Beantragter Arbeits-/ Zeitplan

| Arbeitsschritt | 01.19 | 02.19 | 03.19 | 04.19 | 05.19 | 06.19 | 07.19 | 08.19 | 09.19 | 10.19 | 11.19 | 12.19 | 01.20 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AP 1 – Grundlagenermittlung: | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 Eruiierung der spezifischen Einsatzmöglichkeiten der gekeilten Holzrolle mittels Analyse von Planungsunterlagen und Objektbeispielen | Yellow | Yellow | Yellow | | | | | | | | | | |
| 1.2 Analyse existierender mechanischer Modellansätze und der Übertragungsmöglichkeiten | Yellow | Yellow | | | | | | | | | | | |
| 1.3 Erstellung Anforderungsmatrix zu maßgebenden Bewertungs-/Untersuchungs-Parametern in konstruktiver und statischer Hinsicht | | | Yellow | Yellow | Yellow | | | | | | | | |
| 1.4 Ausarbeitung Versuchsplanung für die experimentellen Untersuchungen | | | | | Yellow | Yellow | | | | | | | |
| AP 2 – Experimentelle Untersuchungen: | | | | | | | | | | | | | |
| 2.1 Herstellung der Versuchskörper | | | | | | Yellow | Yellow | | | | | | |
| 2.2 Durchführung der experimentellen Untersuchungen inklusive begleitender Revision (Scher-/Zugversuche mit Klimatisierung) | | | | | | | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| AP 3 – Versuchsauswertung, Erarbeitung Regelnachweise: | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 Auswertung der experimentellen Untersuchungen | | | | | | | | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| 3.2 Validierung der erarbeiteten Modellansätze, Ergänzung der systematisierten Vorkenntnisse sowie Zusammenführung der Erkenntnisse | | | | | | | | | | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |

2.1 Arbeitspaket 1

Die Arbeiten am Arbeitspaket 1 sind weitestgehend abgeschlossen. Die Analyse der Einsatzmöglichkeiten auf Basis von Planungsunterlagen und Objektbeispielen wurde durchgeführt. Die Bestandsdatenblätter, welche als Zusammenfassung der analysierten Beispielobjekte und Einsatzmöglichkeiten zu sehen sind, werden für die finale Darstellung in dem Bericht weiter bearbeitet. Die basische Literatur über mechanische Modellansätze wurde zusammengestellt, jedoch sind weitere Überlegungen über die Ergebnisse der Tastversuche nötig, um die Übertragungsmöglichkeiten endgültig zu definieren. Die Anforderungsmatrix ist in gleicher Weise zusammengestellt, jedoch ist ihre endgültige Erstellung für Ende Februar 2020 geplant, da ebenfalls zusätzliche Überlegungen über die Ergebnisse der Tastversuche notwendig sind.

2.2 Arbeitspaket 2

Die Voruntersuchungs-Kampagnen TV1 und TV2 wurden aufgrund der Komplexität und der Kombinationsmöglichkeiten von einer kontinuierlichen Revision und Interpretation der Ergebnisse seit Anfang der AP2 begleitet. Die Auswertung der experimentellen Voruntersuchungen, die für die endgültigen Versuche im Arbeitspaket AP3 vorgesehen war, wurde also für die TV1 und TV2 im AP2 schon vorgearbeitet. Die Voruntersuchungen wurden im Januar 2020 erfolgreich beendet.

Verschoben hat sich die Planung, Vorbereitung und Durchführung der finalen experimentellen Untersuchungen, die für Ende 2019 geplant waren. Die finalen Untersuchungen sind für Anfang April angesetzt.

2.3 Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen der Zielsetzung bzw. des Arbeits- und Zeitplans des Vorhabens gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Vorarbeiten zum AP3 wurden geleistet. Wie schon im Absatz 2.2 erläutert, wurden die Auswertungen der experimentellen Voruntersuchungen TV1 und TV2 seit der AP2 vorgezogen. Gleichzeitig wurden die initialen Modellansätze kontinuierlich validiert und die Vorkenntnisse systematisch zusammengeführt.

Die Voruntersuchungen TV1 und TV2 sind nicht nur für die Bestimmung der Anforderungsmatrix von Bedeutung, sondern auch ein wichtiges Erprobungsfeldes zum Austesten der handwerklichen Methoden und Verfahren für die Erarbeitung der Konstruktionsregeln unter handwerklichen Aspekten (in dem AP4 vorgesehen, wurde in dem AP2 vorgezogen).

3 Mittelverwendung

Tabelle 3-1 Allgemeine Angaben zur Projektfinanzierung

| | | |
|---|----|--------|
| Zuwendungsfähige Gesamtausgaben lt. Ausgaben- und Finanzierungsplan | | Euro |
| Höhe der Bundeszuwendung insgesamt | | Euro |
| Davon bisher verwendete Zuwendung: | | Euro |
| Restbetrag gem. Ziffer 2 des Zuwendungsbescheides | | Euro |
| Laufzeit des Projektes | 24 | Monate |

3.1 Bisherige und zukünftig geplante Verwendung der Zuwendung

Bis zum jetzigen Projektstand (02.01.2020) wurden Zuwendungen des Bundes für die Deckung von Personal- und Reisekosten sowie für Ausgaben für Leistungen Dritter verwendet.

Tabelle 3-2 Bisherige Ausgaben (Stand: 31.12.2019)

| | | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| Personalkosten | TU Braunschweig | 64240.46 | Euro |
| | IGP | 8616.23 | Euro |
| | NLD | 6775.03 | Euro |
| | QLB-WD | 4775.60 | Euro |
| Sachkosten (Material + Reisekosten) | | 3954.01 | Euro |
| Ausgaben für Leistungen Dritter | | 0.00 | Euro |
| Summe | | 88361.33 | Euro |

In Tabelle 3-2 sind die Personalkosten aufgeführt, die bis 31.12.2019 aus der Zuwendung des Bundes bezahlt wurden. Die Insgesamt-Personalkosten ergeben sich aus den Personalkosten der TU Braunschweig, der IGP Gockel PartGmbH (IGP), des Niedersächsischen Landesamts für Denkmalpflege (NLD) und der Quedlinburger Werkstätten für Denkmalpflege GmbH (QLB-WD).

Die Personalkosten der TU Braunschweig ergeben sich aus der allgemeinen Projektleitung von Prof. Dr.-Ing. Sieder (Eigenanteil) und der Eigenanteil von wissenschaftlichen Mitarbeitenden des iBHolzes, die dabei über den Verlauf des Projektes Personalstunden wie im Antrag entsprechend. Ein Teil der Personalkosten beinhaltet eine WiMi-100%-Stelle (begonnen mit dem 01.01.2019) und eine Hiwi-Stelle an der TU Braunschweig (Ausgabe).

IGP beteiligt sich mit den angegebenen Personalstunden, die als Beitrag Dritter zu sehen sind. Das NLD beteiligt sich mit den angegebenen Personalstunden, die als Beitrag Dritter zu sehen sind. Die QLB-WD beteiligen sich mit den angegebenen Personalstunden und Materialien, die als Beitrag Dritter zu sehen sind.

Tabelle 3-3 Bisher verwendete Gesamtmittel für das Forschungsvorhaben (Stand: 31.12.2019)

| | | |
|--|-----------------|-------------|
| Eigenmittel | 8903.02 | Euro |
| Beiträge Dritter | 21666.86 | Euro |
| Bundeszuwendung (68.24v.H. von Bisherige Ausgaben) | 60297.77 | Euro |
| Summe | 90867.65 | Euro |

3.2 Zukünftige Verwendung der Zuwendung

Zukünftig ist geplant die Zuwendung auf die im Arbeitsplan angegebenen Stellen zu verwenden:

TU Braunschweig:

- Wissenschaftliche Mitarbeiterin (100%-Stelle, Entgeltgruppe 13, Stufe 3)
- Studentische Hilfskraft / Wissenschaftliche Hilfskraft

Hinzu kommen Personalstunden und Bargeld der Projektpartner, als Drittmittel zur Verfügung gestellt, sowie Personalstunden der TU Braunschweig, als Eigenmittel zur Verfügung gestellt. Diese Personalstunden aus Dritt- und Eigenmitteln beziehen sich auf Zuarbeiten zum Projektinhalt sowie die Koordination und Unterstützung in einigen Fragestellungen.

4 Ergebnisverwertung

Während der Projektlaufzeit sind folgende Maßnahmen geplant:

- Beiträge und Veröffentlichungen in Tagungsbänden, internationalen Kongressen, Zeitschriften des Holzbaus.
- Vorträge im Rahmen der vom BBSR veranstalteten Projekttag der Bauforschung.

Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Projektende:

- Herstellung von einem Leitfaden im Forschungsbericht. Zu unterscheiden ist hierbei, dass zum Forschungsvorhaben nicht nur ein Abschlussbericht, sondern auch ein eigentlicher Leitfaden in seinen Grundzügen - für die Verbreitung der Grundkenntnisse der Holzkeildolle für die praktische Anwendung - entstehen soll. Zum Projektende soll die Grundstruktur des Forschungsberichtes in Teil 1: *Forschungsbericht* (mit der wissenschaftlichen Beschreibung des Ablaufs des Projektes und resultierendem Fazit) und Teil 2: *Leitfaden* (mit zusammengefassten schrittweisen Hinweisen für die Projektplanung einer Reparatur mit Holzkeildollen für jeden Akteur des Erhaltungsprozesses) entstehen.
- Vorträge / Seminare für Handwerker in Zusammenarbeit mit der Handwerkskammer Braunschweig-Lüneburg-Stade.
- Workshops für Planer und Handwerker in Zusammenarbeit mit der Handwerkskammer Braunschweig-Lüneburg-Stade.

5 Literaturangabe

- [1] Blaas H.J., Ehlbeck J., Kreuzinger H., Steck G. (2005). *Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*. 2. Aufl. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung. München und Karlsruhe: DGfH Innovations- und Service GmbH, Bruder.
- [2] Blaas H.J., Ernst H., Werner H. Verbindungen mit Holzstiften - Untersuchungen über die Tragfähigkeit. In: *Bauen mit Holz* 101 (1999), Heft 10, S. 45–52.
- [3] Clorius, C. O., Damkilde, L., Hoffmeyer, P. (2001). *Fatigue in Wood: An investigation in tension perpendicular to the grain*. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). (BYG-Rapport; No. R-038).
- [4] DIN EN 1995-1-1/NA 2013-08 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Teil 1-1 Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Änderung A1, August 2013
- [5] Ehlbeck J., Hättich R. (1989). Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von ein- und zweischnittig beanspruchten Holznägeln. In: *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Jahrbuch 1988*, SFB 315 (1989), Universität Karlsruhe, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften, Berlin.
- [6] Gerner M. (2000). *Entwicklung von Holzverbindungen, Forschungs- und Untersuchungsergebnisse*, Fraunhofer IRB Verlag, 2000.
- [7] Görlacher R. (1999). Empfehlungen für die Praxis In: *Historische Holztragwerke (Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen)*, SFB 315, Universität Karlsruhe.
- [8] Holzer S. M. (2015) *Statische Beurteilung historischer Tragwerke - Band 2 | Holzkonstruktionen*. Ernst & Sohn.
- [9] Kessel M., Augustin R. (1992). *Untersuchung der Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit Holznägeln für Sanierung und Rekonstruktion von alter Bausubstanz*. Forschungsbericht, FH Hildesheim/Holzminden, Fachbereich Bauingenieurwesen, Labor für Holztechnik.
- [10] Kessel M., Augustin R. (1994). Untersuchung der Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit Holznägeln. In: *Bauen mit Holz* 96 (1994), S. 484–487.
- [11] Kollmann F. (1951). *Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe*. Erster Band. Springer Verlag. Pp. 667-669.
- [12] Gehri E. *Holzbau- Tabellen Band 2*. Lignum, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz, Zürich, 1990.
- [13] Müller A., Vogel M, Lang S., Sauser F. (2016) *Historische Holzverbindungen. Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Historischen Holzverbindungen und Erstellung eines Leitfadens für die Baupraxis*. Forschungsbericht der Fachhochschule Biel, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur.
- [14] Niemz P., Sonderegger W. (2017). *Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. P. 275.
- [15] SIA 269/5:2011 Erhaltung von Tragwerken – Holzbau.

A. Anhang A

Die Holzkeildolle wurde in den vergangenen zwei Jahrzehnten bei einer Vielzahl von Objekten eingebaut. Ihr Anwendungsbereich lag zumeist in der Fassadensanierung von Fachwerkgebäuden. In späteren Jahren wurden auch defekte Sparrenfußpunkte und vereinzelt Deckenbalkenköpfe unter Verwendung der Holzkeildolle als Verbindungsmittel saniert.

Anlass zur Entwicklung der Holzkeildolle gab ca. im Jahr 2000 die örtliche Begutachtung von Schäden an Fachwerkfassaden, die ihre Ursache in der Verwendung von diversen kunststoffhaltigen Spritz- und Spachtelmassen, feuchtesperrenden Mörteln und metallischen Verbindungsmitteln hatten.

Die folgende Objektliste soll dokumentieren, dass Reparaturen mit der Holzkeildolle material- und denkmalgerecht und gleichzeitig dauerhaft und nachhaltig funktionieren ohne Folgeschäden zu verursachen. Des Weiteren soll sie die früheren Ausführungen hinsichtlich der jetzt definierten Randbedingungen dokumentieren.

Die Archivrecherche hat ergeben, dass in Leistungsverzeichnissen zu Zimmerarbeiten in dem Kapitel „Holzoberflächen instand setzen“ die Positionen zur Holzkeildolle seit dem Jahr 2000 enthalten waren. Digitales Bildmaterial von der Holzkeildolle wurde bei der Archivrecherche ab dem Jahr 2005 gefunden.

Der bisherige Einbau der Holzkeildolle geschah vorwiegend konstruktiv und ohne das Ziel einer wissenschaftlichen Dokumentation zu genügen. Daher liegt nicht bei allen Objekten der vergangenen 20 Jahre, bei denen die Holzkeildolle eingebaut wurde, ausreichend Dokumentationsmaterial vor. Viele Einbauorte sind zudem nicht mehr einseh- und/ oder erreichbar.

Kurzzeichen der Materialien der Bauteile:

Da die Holzart der Bauteile nicht explizit getestet wird/ wurde, werden folgende Begriffe verwendet:

NH = Nadelholz

LH = Laubholz In der Regel handelt es sich bei LH um Eiche.

Kurzzeichen der Materialien der Dollen und Keile:

EI = Eiche Die Dollen und Keile sind immer in Eiche bestellt worden.

Objektliste: Exemplarische Ausführungsbeispiele von Gebäuden mit der HKD

- Objekt 1 – Rathaus Duderstadt
- Objekt 2 – Bauernhausmuseum Bortfeld
- Objekt 3 – Brusttuch Goslar
- Objekt 4 – Städtisches Museum Göttingen, ehem. Posthaltere
- Objekt 5 – Café Winuwuk Bad Harzburg
- Objekt 6 – Rathaus Goslar
- Objekt 7 – Mönchehaus Museum Goslar
- Objekt 8 – Haus Kreyenberg Wittingen
- Objekt 9 – Forsthaus Rittergut Wedesbüttel
- Objekt 10 – Holbornsches Haus Göttingen
- Objekt 11 – Höfersches Haus Gifhorn
- Objekt 12 – Karl-Söhle-Schule Hankensbüttel
- Objekt 13 – Frankenberger Kirche Goslar

| OBJEKT 1 – RATHAUS DUDERSTADT | |
|-------------------------------------|--|
| OBJEKTBILDER | |
| | |
| OBJEKTBE SCHREIBUNG | |
| Name | Rathaus Duderstadt |
| Kurzbeschreibung | Öffentliches Gebäude – Rathaus |
| Bauzeit | Massiver Kernbau 1302 / 1303, Fachwerkgeschosse 16. Jahrhundert |
| Bauweise | Zweischiffiger Saalbau – Erd- und 1. Obergeschoss Massivbauweise, 2. Obergeschoss und Dachgeschosse Fachwerkbauweise |
| Einbauzeit der HKD | 2005 bis ca. 2008 |
| HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT | |
| Holzkeildolle in der Anwendung: | Am Objekt ausgeführt? X = ja |
| Ständer- oder Streben-Teilaustausch | X |
| Ständer- oder Streben-Passstück | |
| Schwellen-Teilaustausch | |
| Schwellen-Passstück | |
| Rähm-Teilaustausch | |
| Rähm-Passstück | |
| Riegel-Teilaustausch | X |
| Riegel-Passstück | X |
| Sparren-Teilaustausch | |
| Sparren-Passstück | X |
| Ergänzungsbauteil | |
| Lagesicherung | |