

# Modellierung von Holzfachwerken mit Stabdübelverbindungen und eingeschlitzten Stahlblechen für Zuverlässigkeitsanalysen

**Conference Paper****Author(s):**

[Schilling, Stephan](#) ; [Frangi, Andrea](#) 

**Publication date:**

2020-03-06

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000404166>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

# Modellierung von Holzfachwerken mit Stabdübelverbindungen und eingeschlitzten Stahlblechen für Zuverlässigkeitsanalysen

Vortragender:

## SCHILLING, STEPHAN

MSc Bauingenieurwissenschaften ETH  
Institut für Baustatik und Konstruktion  
ETH Zürich, Schweiz  
schilling@ibk.baug.ethz.ch



- 2011 – 2014 Bachelorstudium Bauingenieur ETH Zürich
- 2014 – 2015 Gruner Ingenieure AG; suisseplan Ingenieure AG
- 2015 – 2017 Masterstudium Bauingenieur ETH Zürich
- 2017 Diggelmann+Partner AG
- Seit 2018 Institut für Baustatik und Konstruktion, Bereich Holzbau bei Prof. Dr. A. Frangi, ETH Zürich

Autoren: Stephan Schilling, Andrea Frangi

## Zusammenfassung

Holzfachwerke verschiedener Geometrien werden oft mit Stabdübelverbindungen und eingeschlitzten Blechen gebaut. Die Bemessung erfolgt in der Regel mittels Stabstatikmodellen, wobei die Knoten in verschiedenen Detaillierungsgraden betrachtet werden können. Eine detaillierte Betrachtung der Knoten mit allen Dübelgruppen und den Blechen wird aufgezeigt. Um den Modellierungsaufwand klein zu halten, wurde eine Anslusstypologie entwickelt, welche eine Automatisierung der Modellbildung der Anschlussbereiche ermöglicht. Verschiedene Modellierungsansätze einzelner Stabdübel sowie ganzer Dübelgruppen werden aufgezeigt, welche den Charakteristiken der Federn im Stabmodell zu Grunde liegen. Das entwickelte Stabstatikprogramm wird in den Kontext von Zuverlässigkeitsanalysen und einer systembasierten Bemessung gestellt.

## 1. Einleitung

Holzfachwerke werden heute typischerweise mit Stäben aus Brett- oder Furnierschichtholz ausgeführt. Bei parallelgurtigen oder dreiecksförmigen Fachwerken werden die Gurte meist durchlaufend, falls notwendig mit Montagestössen, ausgebildet. Die Füllstäbe werden mittels Verbindungen an die Gurte angeschlossen. Gewisse Raumbachwerke weisen keine Gurte auf und stellen eine reine Assemblierung von Füllstäben mit räumlich anschließbaren Knoten dar.

Als Verbindungsmittel werden oft Stabdübel gewählt, welche die Kräfte zwischen den Holzstäben über eingeschlitzte Stahlbleche weiterleiten. Typischerweise werden Fachwerke mittels Stabstatikprogrammen berechnet. Dübelgruppen und Stahlbleche können mit konventionellen Programmen aber nur bedingt modelliert werden. Verschiedene bekannte Ansätze zur Anschlussmodellierung [1] sowie ein neuer Ansatz werden vorgestellt. Die Traglast von Stabdübeln oder ganzen Verbindungen kann für einfache Beanspruchungen über Modelle, welche auch in den Holzbau-Normen [2,3] zugänglich sind, berechnet werden. Zum Last-Verformungsverhalten von einzelnen Dübeln und einfachen Beanspruchungen gibt es verschiedenste Untersuchungen. Das Verhalten von Dübelgruppen unter kombinierter Beanspruchung ist hingegen wenig untersucht. In Schweigler et. al [4] wurde ein Modell vorgestellt, wie die Verschiebungen und Rotationen aus kombinierten Beanspruchungen addiert und wie daraus die gekoppelten Steifigkeiten und Schnittkräfte berechnet werden können. Ein an der ETH entwickeltes Stabstatikprogramm verwendet dieses Verbindungsmodell zusammen mit dem neuen Ansatz der Anschlussmodellierung.

Tragwerke sollen gewisse Anforderungen an Zuverlässigkeit einhalten. In den aktuellen Normen [5,6] wird mittels Teilsicherheitskonzept dafür gesorgt, dass einzelne Elemente eine gewisse Zuverlässigkeit einhalten, bzw. eine gewisse Fehlerwahrscheinlichkeit nicht überschreiten. Verbindungen wurden bisher aber nicht kalibriert und für ganze Tragwerke fehlen Konzepte gänzlich. Es gibt verschiedenste Methoden um Zuverlässigkeitsanalysen durchzuführen. Allen gemeinsam ist, dass sie das zu untersuchende Modell als Blackbox behandeln und somit nicht in das Modell eingreifen. Die Rechenzeit ist dabei direkt vom Modell abhängig. Deshalb sollten zweckdienliche Modelle verwendet werden, welche möglichst exakt sind, aber einen vertretbaren Rechenaufwand generieren. Daher sollten solche Analysen für Fachwerke mittels geeigneten Stabstatikmodellen erfolgen.

## 2. Modellierungsansätze von Fachwerken mit Stabstatik

### 2.1 Detaillierungsgrad der Anschlussbereiche

Fachwerke stellen eine Assemblierung von einzelnen Stäben dar, welche an ihren Schnittpunkten aneinander angeschlossen werden. Die Stäbe können dabei in einer Ebene liegen oder auch räumlich verteilt sein. Sie werden als linear-elastische Stäbe modelliert, da das Last-Verformungsverhalten von Holzstäben in Fachwerken effektiv ein entsprechendes Verhalten aufweisen.

Die Anschlussbereiche sind im Gegensatz zum Gesamttragwerk klein, haben aber einen starken Einfluss auf dessen Last-Verformungsverhalten. Der Modellierung von diesen Bereichen sollte folglich die entsprechende Aufmerksamkeit gewidmet und ein ausreichender Detaillierungsgrad angestrebt werden.

Abb. 1 a) stellt schematisch den Anschlussbereich eines Ständerfachwerkes dar. Abb. 1 b) – e) repräsentieren aufbauend bekannte Modellierungsansätze [1] dieses Anschlussbereichs, welche anschließend Schritt für Schritt erläutert werden. Abb. 1 f) zeigt abschließend einen neu entwickelten und empfohlenen Ansatz.

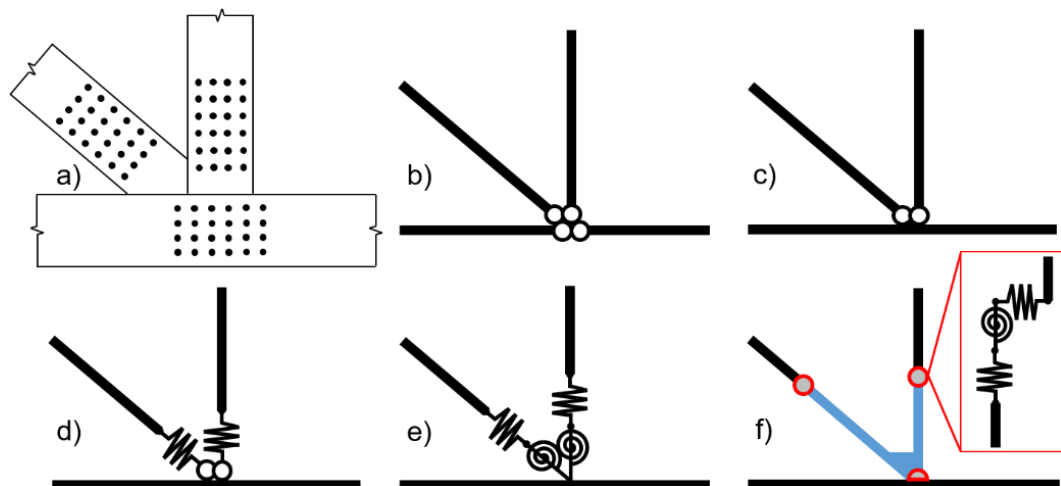


Abb. 1: Modellierungsansätze der Anschlussbereiche von Stabmodellen

### 2.2 Gelenkige Anschlüsse

Bei diesem ersten, auf Culmann [7] zurückgehenden Modell nach Abb. 1 b) werden sogenannte ideale Fachwerkstäbe verwendet. Das heißt, dass die Stabenden Momentengelenke aufweisen. In einem Fachwerk resultieren daraus ausschließlich Normalkräfte in allen Stäben und falls keine überzähligen Stäbe vorliegen, sind die Fachwerke damit auch statisch bestimmt.

## **2.3 Durchlaufende Gurte**

Holzfachwerke werden produktionsbedingt meistens mit durchlaufenden Gurten ausgebildet. In Abb. 1 c) wird gezeigt, wie man diesem Umstand in einem Stabmodell auf einfache Weise Rechnung tragen kann. Die Füllstäbe sind weiterhin ideale Fachwerkstäbe.

## **2.4 Normalkraftsteifigkeit der Anschlüsse**

Im Modell nach Abb. 1 d) wird die Nachgiebigkeit der Stabdübelgruppen in den Füllstäben durch einfache Normalkraftfedern repräsentiert. Auf Biegung sind die Anschlüsse weiterhin gelenkig.

## **2.5 Biegesteifigkeit der Anschlüsse**

Zusätzlich zur Normalkraftsteifigkeit kann auch die Biegesteifigkeit der Stabdübelgruppen in den Füllstäben berücksichtigt werden. In Abb. 1 e) ist dies durch die Drehfedern repräsentiert. Analog könnten auch Querkraftfedern berücksichtigt werden.

## **2.6 Stahlbleche und Verbindungskarakteristiken**

Abb. 1 f) zeigt einen neuen Ansatz, welcher mit einfachen Stabmodellen nicht anwendbar ist. Die Verbindungen werden im Bild durch die Kreise repräsentiert. Sie befinden sich im Schwerpunkt der Dübelgruppen. Zwischen ihnen sind die Stäbe ergänzt, welche die Stahlbleche repräsentieren. Die in der Abbildung dargestellte Vergrößerung zeigt, dass die ausgefüllten Kreise alle möglichen Federn symbolisieren.

# **3. Modellierungsansätze von Stabdübelverbindungen**

## **3.1 Last-Verformungsverhalten von Stabdübeln**

### **3.1.1 Linear elastisches Modell**

Stabdübel sind in der Regel ohne oder mit geringem Schlupf in die Holzmatrix eingelassen. Für unterschiedliche Beanspruchungen resultieren unterschiedliche Bettungsrichtungen der Dübel. In der Literatur können verschiedenste Ansätze gefunden werden, welche die Steifigkeit pro Scherfuge wiedergeben [8].

In der SIA 265 [3] befinden sich Angaben zur elastischen Steifigkeit von Scherfugen von Stabdübelverbindungen mit eingeschlitzten Blechen. Die Werte sind für  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Last-zu-Faser-Winkel angegeben. Dazwischen kann interpoliert werden. Damit kann für jeden beliebigen Winkel die Steifigkeit pro Dübel anhand seiner Anzahl Scherfugen berechnet werden.

Gemäß europäischer Prüfnorm [9] werden die Steifigkeitswerte nach einer Vorbelastung, um Schlupf auszuschließen, zwischen 10% und 40% der geschätzten Maximallast bestimmt. Dies entspricht einem ersten, annähernd linear elastischen Bereich des Last-Verformungsverhaltens.

### **3.1.2 Nichtlineare Modelle**

Das Last-Verformungsverhalten von Stabdübeln entspricht im Allgemeinen einem nichtlinearen Last-Verformungsverhalten. Die oben genannten elastischen Steifigkeiten gelten normalerweise nur im Bereich von Gebrauchslasten. Typischerweise wird die Last-Verformungsbeziehung mit mehr Last zunehmend nichtlinear.

Ein ursprünglich an Nägeln unter Abscheren hergeleitetes Modell bietet die sogenannte Foschi-Kurve [10]. Diese wird auch oft für Stabdübel verwendet. Die nötigen Parameter sind die initiale und die finale Steifigkeit sowie die Schnittpunkt-Tragfähigkeit.

Später wurde ein abfallender Ast ergänzt, woraus die sogenannte Foschi-Dolan-Kurve [11] entstand. Diese Kurve bedingt zusätzliche Kenntnis der abfallenden Steifigkeit.

## **3.2 Last-Verformungsverhalten von Stabdübelverbindungen**

### **3.2.1 Unabhängige Schnittkräfte**

Für die Normal- und Querkraftrichtung können die Verbindungssteifigkeiten aufgrund eines gewählten Modells pro Dübel direkt berechnet werden. Dafür wird die Anzahl Dübel mit der Steifigkeit pro Dübel multipliziert, wobei die Steifigkeit entweder unter 0° oder 90° Last-zu-Faser-Winkel betrachtet wird.

Das Moment löst eine Rotation um den Verbindungsschwerpunkt aus. Der Last-zu-Faser-Winkel ist hierbei für jeden Dübel anders. Damit kann die Steifigkeit pro Dübel bestimmt werden. Um schlussendlich eine Drehsteifigkeit zu erhalten, können die einzelnen Steifigkeiten nach dem Prinzip des polaren Trägheitsmomentes aufsummiert werden.

### **3.2.2 Koppelung von Schnittkräften**

Die Bettungsrichtung pro Stabdübel ist von der Schnittkraftkombination abhängig. Schweigler et al. [4] haben ein ingenieurmäßiges Modell entwickelt, welches auf der vektoriellen Addition der Verformungsanteile von Normal- und Querkraft sowie Moment (N-V-M) beruht. Der resultierende Vektor entspricht der Verformung und die Richtung bestimmt den Last-zu-Faser-Winkel. Aus der Last-Verformungs-Oberfläche, welche die Anisotropie berücksichtigt, resultiert für jeden Berechnungsschritt die entsprechende Dübelkraft. Schließlich können anhand der Dübelkräfte mittels Kräftegleichgewicht die gekoppelten Schnittkräfte (N-V-M) bestimmt werden.

Die Steifigkeitsmatrix der Verbindung wird durch Ableiten der Kräfte und Momente nach allen Verschiebungen und Verdrehungen gebildet. Im Gegensatz zum Vorgehen welches in [4] angewandt wird, wird empfohlen mittels dem Zentralen Differenzenquotienten abzuleiten:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (1)$$

## **3.3 Kontakt**

Bei genauerem Betrachten von Abb. 1 a) wird ersichtlich, dass neben der Kraftübertragung zwischen Dübelgruppen und Blechen auch ein Teil der Druckkräfte über Kontakt abgetragen werden kann. In [4] wird vorgeschlagen, entlang der Kontaktfläche Kontaktelemente einzufügen, welche über die entsprechende Kontaktcharakteristik verfügen.

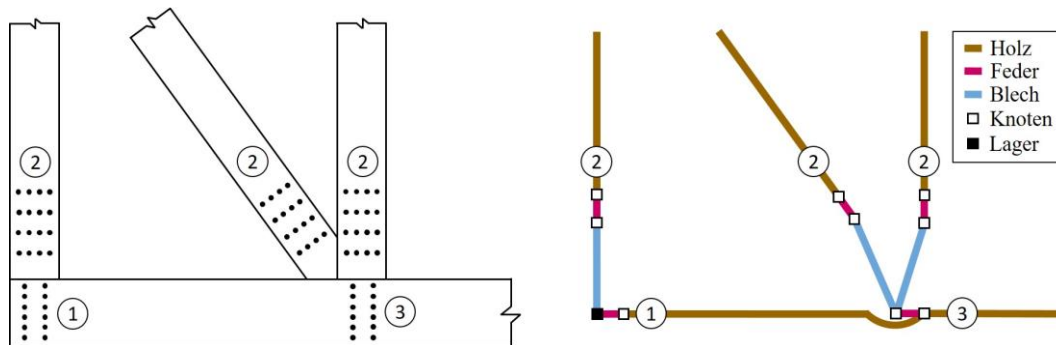
Da mit Stabstatik analog zu Abb. 1 f) zwischen den Holzstäben ausschließlich Blechstäbe vorhanden sind, müssen die Kontaktkräfte über diese Blechstäbe abgetragen werden. Die Verformungen sowie die Schnittkräfte in den Blechen werden dadurch verfälscht. Der Fehler der Verformung dürfte aber klein sein und die Schnittkräfte am Blech könnten grundsätzlich korrigiert werden.

## **4. Entwickeltes Stabstatikprogramm**

### **4.1 Anslusstypologie**

Wie oben gezeigt, bedingt das Vorhandensein von Blechen und Dübelgruppen in den Gurten eine Modellierung, welcher mit einfachen Stabendgelenken nur ungenügend Rechnung getragen werden kann. Allerdings stellt das Erfassen von zusätzlichen Knoten und Stäben einen Mehraufwand dar.

Deshalb wurde eine Typologie entwickelt, welche eine automatische Generierung dieser neuen Elemente erlaubt und den Eingabeaufwand klein hält. Es wurden vier Anschlusstypen entwickelt, mit welchen die meisten Holzfachwerke mit Stabdübelverbindungen und Schlitzblechen in zwei- und dreidimensionaler Anordnung modelliert werden können. Es ist zu erwähnen, dass die implementierten Stabendfedern aufgrund der einfacheren Handhabung Elemente mit zwei Knoten sind und eine sehr kleine Länge aufweisen. In Abb. 2 werden die Anschlusstypen 1 bis 3 anhand eines Ausschnittes eines Ständerfachwerkes erklärt.



**Abb. 2:** Anschlusstypen 1-3 an einem Ständerfachwerk

Typ 1 entspricht der klassischen Stabdübelverbindung. Sie wird am Anfang und am Ende von durchlaufenden Gurten verwendet, wo die Gurte an die Lager anschließen.

Typ 2 wird bei Füllstäben eingesetzt. Dafür müssen vorab die Längen zwischen den Hauptknoten und den Schwerpunkten der Dübelgruppen erfasst werden. Dadurch können die neuen Knoten beim Übergang vom Holz- zum Blechstab generiert werden. Anschließend werden die Blechstäbe erzeugt. Schlussendlich wird die Stabdübelverbindung am neuen Ende des Holzstabes gesetzt, welche den Holz- mit dem Blechstab verbindet.

Typ 3 ist für die Generierung der Dübelgruppen in den Gurten nötig. Sie werden als Stabdübelverbindungen an einem der angrenzenden Gurtstäben erfasst. Danach können die Bleche der Füllstäbe vom einen Federknoten an den anderen umgehängt werden, was Federn mit zwei Knoten oder Doppelknoten bedingt. Der Gurtstab wird gegenteilig umgehängt. Damit sind die Gurtstäbe durchlaufend modelliert und die Bleche sind via Dübelgruppen angeschlossen.

Typ 4 entspräche Typ 2, wobei am Blechende eine weitere Feder eingeführt werden müsste. Benötigt wird dieser Typ bei Raumfachwerken, welche eine gelenkig angeschlossene Assemblierung von räumlich angeordneten Stäben darstellen. Eine vereinfachte Eingabe dieses Typs reduziert das Trägheitsmoment. Damit sind keine Momente von den Stäben auf die Knoten übertragbar. Diese Vereinfachung bringt den Vorteil mit sich, dass dank des Verzichts auf weitere Elemente, die Rechenzeit kleiner ist, was für Zuverlässigkeitsanalysen relevant ist.

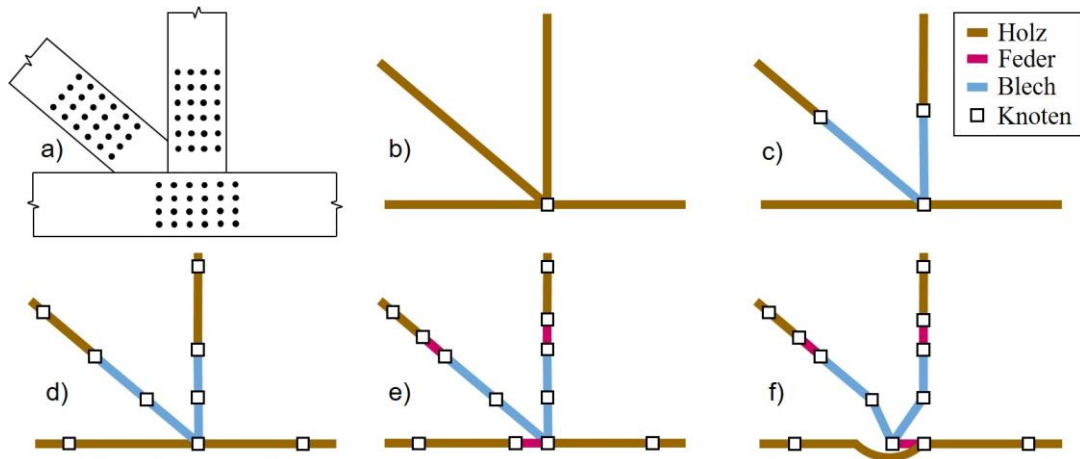
## 4.2 Automatisierung des Modellaufbaus

Um eine einfache Eingabe der Fachwerke zu ermöglichen stellen die oben beschriebenen Anschlusstypen lediglich eine Zusatzinformation zu den klassischen Stabdübelverbindungen dar. Dies bedingt eine spezifische Reihenfolge, wie die automatisierte Erweiterung des Modells erfolgt.

In Abb. 3 a) ist derselbe Fachwerkknoten wie in Abb. 1 a) dargestellt. Die Abb. 3 b) – f) zeigen nun die Reihenfolge der automatisierten Modellerstellung, um mit den oben erklärten Anschlusstypen das Modell nach Abb. 1 f) zu erlangen.

Zuerst wird das Stabmodell mit den Holzstäben und den originalen Knoten erstellt, welches in Abb. 1 b) dargestellt ist. Danach werden anhand des zuvor erfassten Abstandes der Dübelgruppen-Schwerpunkte die Knoten im Schwerpunkt der Füllstab-Dübelgruppen erstellt.

Die Holzstäbe werden vom originalen Knoten an diese neuen Knoten umgehängt. Anschließend werden die Blechstäbe zwischen den neuen und dem ursprünglichen Knoten erstellt (Abb. 1 c)). Der Schritt in Abb. 1 d) zeigt die optionale Stabunterteilung in kleinere Abschnitte. Wie in Abb. 1 e) zu sehen ist, werden die Stabendfedern am Ende der Holzstäbe eingeführt. Dafür müssen zuerst neue Knoten generiert werden, welche in Stabrichtung hin zum Schnittpunkt der jeweiligen Fachwerkstäbe zu liegen kommen. Die neuen Federelemente haben somit zwei Knoten und können geometrisch analog zu einem Stabelement behandelt werden. Die Anschlussstypen 1, 2 und 4 sind nach diesem Schritt fertig erstellt. Für Anschlussstyp 3 müssen wie in Abb. 1 f) gezeigt nun noch die Blechstäbe an den neuen Federknoten und der Gurtstab vom neu generierten Knoten zum ursprünglichen umgehängt werden.



**Abb. 3:** Automation des Modellaufbaus

### 4.3 Stabelemente

Alle Stäbe, seien dies Holzstäbe oder Blechstäbe, werden als linear elastische Elemente mit zwei Knoten modelliert. Da Holz ein großes Verhältnis zwischen Elastizitäts- und Schubmodul aufweist, wird die Schubsteifigkeit in der Steifigkeitsmatrix berücksichtigt.

### 4.4 Federelemente

Für einfache Modellierungsansätze und nicht gekoppeltes Verhalten der Schnittkräfte kann ein Last-Verformungs-Pfad pro Freiheitsgrad und Feder mittels Polylinie gewählt werden.

Der Ansatz nach Schweigler et al. [4] ist ebenfalls implementiert. Auf die Implementierung des Kontaktes zwischen den Stäben wurde bis anhin verzichtet. Der Aufwand dafür ist unter beliebigen Geometrien erheblich und die Wichtigkeit des Effektes ist zurzeit ungeklärt.

Gewisse Dübelgruppen-Layouts können nach den von den Holzbau-Normen [2,3] geforderten Abständen und der Anzahl Reihen und Zeilen automatisiert erstellt werden. Um die Verbindungscharakteristik berechnen zu können, müssen weitere Angaben, welche den Widerstandsmodellen nach [2,3] zu Grunde liegen, erfasst werden.

Die Steifigkeit der einzelnen Dübel kann wie oben beschrieben oder nach weiteren Ansätzen gewählt werden – je nach Detaillierungsgrad der Fragestellung.

### 4.5 Lösungsverfahren

Das zu Grunde liegende Lösungsverfahren ist ein kraftgesteuerter Newton-Raphson Algorithmus. Dabei werden die aufgebracht Lasten unterteilt und die Berechnung wird in mehreren Schritten durchgeführt. Pro Schritt läuft der Algorithmus in mehreren Iterationen, bis ein Konvergenzkriterium bezüglich dem Rest des Kräftegleichgewichts erreicht wird.



## 4.6 Automatisierte Nachweise

Um Zuverlässigkeitsanalysen durchführen zu können, müssen sämtliche Nachweise automatisiert erfolgen. Schlussendlich ist lediglich relevant, ob alle Nachweise erfüllt sind oder nicht. Es kann aber auch ein Ausnutzungsgrad pro Element berechnet werden.

Die Nachweise werden analog zu den Holzbau-Normen [2,3] geführt. Für die Verbindungen gibt es Widerstandsmodelle unter uniaxialen Beanspruchungen. Für den allgemeinen Fall mit N-V-M fehlen Widerstandsmodelle. Kurven welche durch eine maximale Deformation bzw. Last begrenzt sind (z.B. Foschi-Dolan-Kurve) zu verwenden, stellt einen möglichen Ansatz dar. Der Lösungsalgorithmus konvergiert nicht mehr, wenn für die Kräfte am System kein Gleichgewicht mehr gefunden werden kann, wovon auf ein Versagen geschlossen werden kann.

Die Nachweise umfassen Modelle auf verschiedenen Skalen: Stabilitätsprobleme werden durch das System beeinflusst, auf der Elementebene erfolgen Nachweise an den Stäben und die Verbindungen werden auf der Verbindungsmittlebene überprüft. Spröde Versagensmechanismen in der Holzmatrix um die Dübel können bisher nicht überprüft werden.

## 5. Systembasierte Bemessung

Zur ganzheitlichen Betrachtung von Tragwerken hilft das Beziehen von Skalen. Zur vorliegenden Betrachtung von Holzfachwerken werden fünf Skalen verwendet: Material – Verbindungsmittel – Elemente – Bauteil – System.

Diese Skalen sind in der Abb. 4 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die oben vorgestellten Modelle erste deterministische Anwendungen zur systembasierten Bemessung ermöglichen. Wie oben erwähnt, fehlen aber noch Modelle, um das Versagen in der Holzmatrix in Verbindungen zu beschreiben. Voraussichtlich werden solche Modelle die Last-Verformungs-Beziehung der einzelnen Dübel entsprechend beeinflussen.

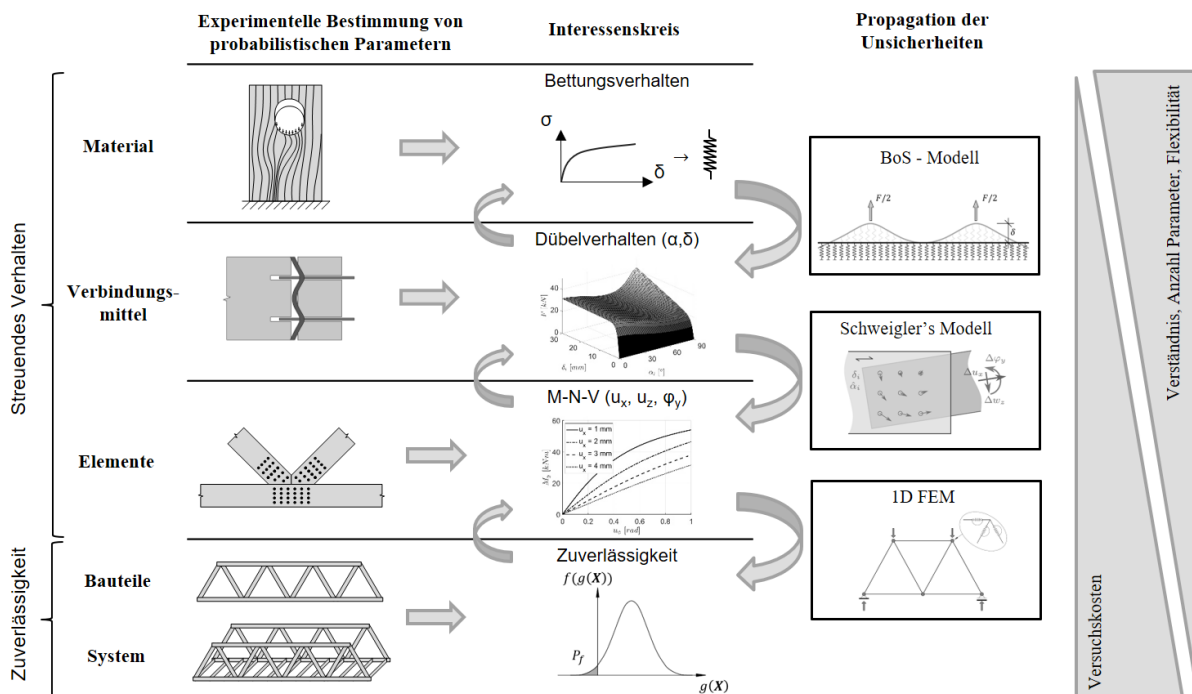


Abb. 4: Multi-Skalen Ansatz

Das volle Potential dieses Ansatzes kann erst ausgeschöpft werden, wenn die Unsicherheiten und Korrelationen aller relevanter Parameter erfasst sind. Dann können diese über die verschiedenen Skalen hinweg propagiert und mittels Versuchen auf nachfolgenden Skalen



aktualisiert werden. Schließlich kann auf die Zuverlässigkeit des Bauteils oder des ganzen Systems geschlossen werden.

## 6. Schlussfolgerungen und Ausblick

- Ein Vorgehen, um mittels Stabstatik Holzfachwerke mit Stabdübelverbindungen und eingeschlitzten Blechen genauer und effizienter zu modellieren wurde erfolgreich entwickelt und implementiert.
- Verschiedene Modellierungsansätze für Stabdübelverbindungen wurden aufgezeigt.
- Widerstandsmodelle für Dübelgruppen unter allgemeiner Beanspruchung N-V-M stellen Forschungsbedarf dar und sollten in der Nachweisführung künftig berücksichtigt werden.
- Mit dem vorgestellten Modell sollen Zuverlässigkeitsanalysen mit verschiedensten Fachwerktypen, Verbindungslayouts, Last-Verformungs-Modellen, etc. getätigt werden. Damit wird die Grundlage für eine systembasierte Bemessung gelegt.

## Danksagung

Dieses Projekt wird freundlicherweise vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) unterstützt.

## Literatur

- [1] DUBAS, P. et al.: *Einführung in die Norm SIA 164 (1981) Holzbau - Autographie zum Fortbildungskurs für Bauingenieure*. Institut für Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich, 1981.
- [2] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010-12.
- [3] SIA 265: *Holzbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2012.
- [4] SCHWEIGLER, M. et al.: *Engineering modeling of semi-rigid joints with dowel-type fasteners for nonlinear analysis of timber structures*. In: *Engineering Structures*, Nr. 171, S. 123-139, 2018.
- [5] DIN EN 1990: *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010.
- [6] SIA 260: *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2013.
- [7] CULMANN, C.: *Die graphische Statik*. Meyer & Zeller, Zürich, 1866.
- [8] JOCKWER, R. und JORISSEN, A.: *Load-deformation behaviour and stiffness of lateral connections with multiple dowel type fasteners*. *INTER Meeting 51, Tallinn, 2018*.
- [9] DIN EN 26 891: *Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln – allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 1991.
- [10] FOSCHI, R. O.: *Load-Slip Characteristics of Nails*. In: *Wood Science*, Band 7, Heft 1, Seiten 69-76, 1974.
- [11] DOLAN, J. D. und FOSCHI, R. O.: *Structural Analysis Model for Static Loads on Timber Shear Walls*. In: *Journal of Structural Engineering*, Band 117, Heft 3, Seiten 851-861, 1991.