

BESTANDSERFASSUNG UND REALITÄTSNAHE MODELLBILDUNG HISTORISCHER DACHSTÜHLE IN ÖSTERREICH

Andreas Meisel¹

Thomas Moosbrugger²

Gerhard Schickhofer³

^{1,2,3} Graz University of Technology, Graz, Austria

Zusammenfassung

Zeitlich und regional entstanden unterschiedliche zimmermannsmäßig errichtete Tragwerke für Dächer, welche trotz Brand- und Kriegseinwirkungen, Verfall und Abriss bis zu 600 Jahre und mehr überdauert haben. Für die statische Analyse dieser Tragwerke ist eine detaillierte Bestandserfassung erforderlich. In dieser sind insbesondere die System- und Querschnittabmessungen, Verbindungen, Holzfestigkeiten, Auflagerbedingungen und allfällige Schäden zu erfassen.

Die statische Analyse historischer Dachstühle ist mit großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Anhand des Referenzobjekts, eines so genannten "Grazer Dachstuhls" konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Abbildung der räumlichen Tragwirkung und die Bestimmung der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen aufwendig und problematisch ist. Beide Effekte haben aber aufgrund der hohen statischen Unbestimmtheit große Auswirkungen auf die ermittelten Ergebnisse. Erst durch die Berücksichtigung des mechanischen Verhaltens der Verbindungen kann das Tragverhalten dieser Hybridtragwerke realitätsnahe nachvollzogen werden.

Historische Dachstühle sind in der Regel redundante und damit robuste Tragwerke. Trotz zum Teil erheblicher Schäden, sind die Verbindungen und Stäbe lange in der Lage, durch Lastumlagerungen die Tragfähigkeit des gesamten Tragwerks zu erhalten.

EINLEITUNG

Die Dachräume historischer Dachstühle werden immer häufiger in Wohnraum umgewandelt. Parallel dazu befinden sich zahlreiche Dachstühle aufgrund mangelhafter Bauwerkserhaltung und unsachgemäßer Tragwerksveränderungen in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Der Abriss kommt aufgrund von Vorschriften und ökonomischer sowie ökologischer Aspekte häufig nicht in Frage. Neben der Umnutzung gilt es aber auch, historisch wertvolle Objekte für die Nachwelt zu erhalten.

Grundlage für die Instandsetzung historischer Dachstühle ist die qualitative und quantitative Kenntnis des mechanischen Verhaltens dieser Tragwerke. Die Herausforderung besteht darin, mit einem möglichst einfachen Modell die "Wirklichkeit" zutreffend genug abzubilden.

Derzeit werden zahlreiche Sanierungen zimmermannsmäßig, das heißt ohne vollständige statische Berechnung, durchgeführt. Das dabei erreichte Sicherheitsniveau kann in der Regel nicht quantifiziert werden. Bei ingenieurmäßigen Sanierungen wird häufig aufgrund der Vernachlässigung der Verbindungseigenschaften und der räumlichen Tragwirkung das Tragvermögen des Bestands unterschätzt. Die daraus abgeleiteten Ertüchtigungsmaßnahmen widersprechen nicht selten den Kriterien einer ökonomischen und bestandsschonenden Sanierung.

PROBLEMSTELLUNGEN

Historische Dachstühle wurden ausschließlich nach der Erfahrung, dem Traditionsbewußtsein und dem Mut der Ausführenden hergestellt. Aus diesem Grund sind bei der statischen Analyse zahlreiche Besonderheiten zu beachten:

- Häufig tragen historische Dachstühle die Lasten ausgeprägt räumlich ab. Daher ist die Zerlegung dieser Tragwerke in ebene Teilsysteme oft schwierig bis unmöglich. An den Koppelpunkten ist die Interaktion der Teilsysteme zu berücksichtigen.
- In EN 1995-1-1 (vgl. [12], [13]) wird die Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der zimmermannsmäßigen Verbindungen für die Systemberechnung gefordert. Das mechanische Verhalten der Verbindungen beeinflusst wesentlich den Verlauf und die Größenordnung der Schnittkräfte. Die diesbezüglichen Angaben der Normung und der Literatur sind nicht zufriedenstellend.
- Die Festlegung zutreffender Auflagerbedingungen ist schwierig.
- Die Bestimmung zutreffender Materialkenngrößen ist aufwendig.
- Die System- und Querschnittsabmessungen weisen - vor allem bedingt durch die handwerkliche Herstellung - große Streuungen auf.

ZIELSETZUNG

In diesem Beitrag soll beispielhaft gezeigt werden, wie das mechanische Tragverhalten eines historischen Dachstuhls möglichst realitätsnah modelliert werden kann, sodass ein statischer Nachweis zumindest auf einem niedrigen Sicherheitsniveau möglich wird.

DER „GRAZER DACHSTUHL“

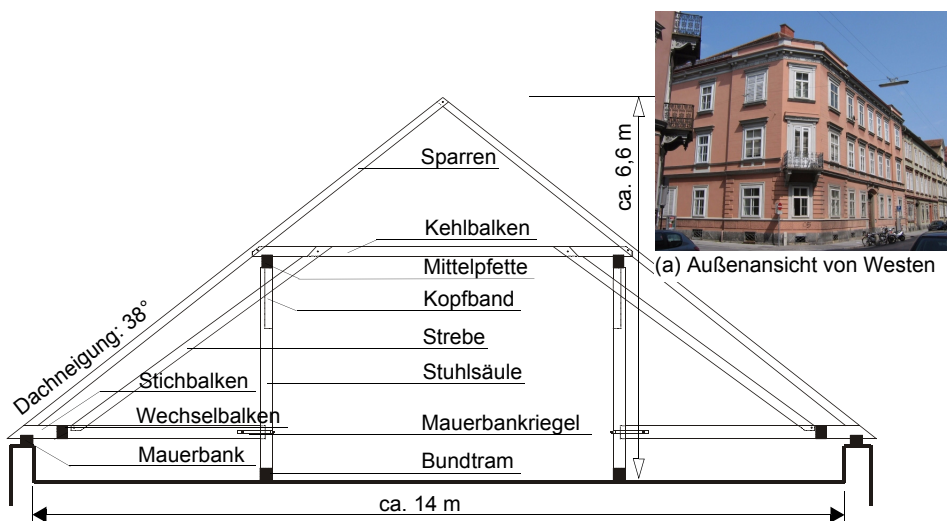
Einführung

Wie einzelne Bestandsaufnahmen (vgl. [10]) und Gespräche mit einem erfahrenen Zimmermeister (vgl. [9]) gezeigt haben, wurden im 19. Jahrhundert in Graz zahlreiche sogenannte "Grazer Dachstühle" errichtet. Für diesen Artikel wird das Dachtragwerk der "Mandellstraße 9" (Abb. 1, 2 und 3) als Referenzobjekt gewählt. Das Errichtungsdatum wird vom Stadtarchiv Graz mit 1867 angegeben (vgl. [8]).

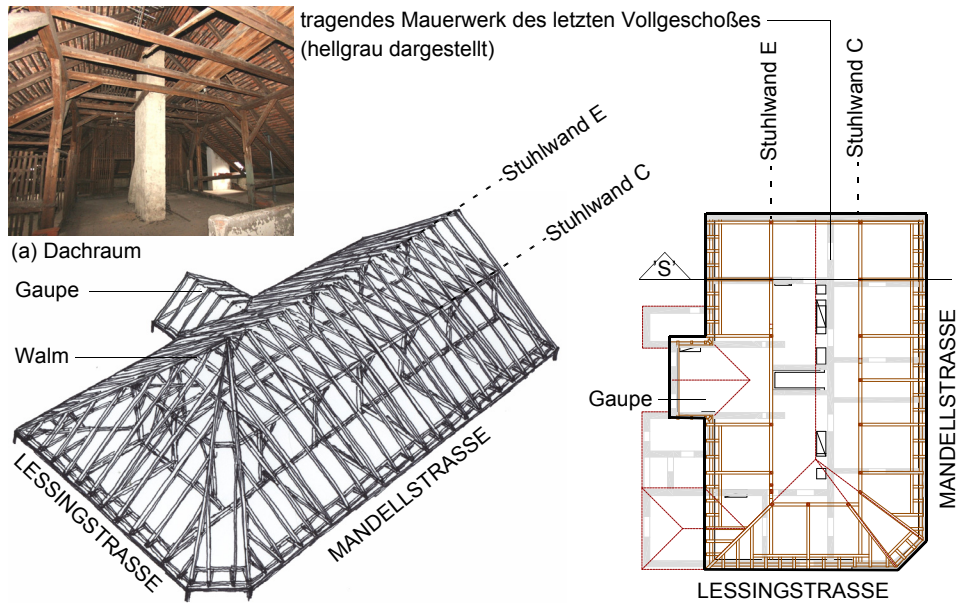
Das Tragsystem des "Grazer Dachstuhls"

Das Tragsystem des "Grazer Dachstuhls" wird als sogenanntes Kehlbalkendach mit abgestrebtem, zweifach stehenden Stuhl und Kniestock bezeichnet. Wie in ([10] Kapitel 1.2) erläutert, deutet die Benennung Kehlbalkendach darauf hin, dass die Sparren nicht unmittelbar von den Pfetten (beziehungsweise Rähmen) unterstützt werden. Das zum "echten" Sparren- beziehungsweise Kehlbalkendach gehörende Zugband fehlt jedoch beim "Grazer Dachstuhl". Es liegt eine Hybridkonstruktion aus Sparren- und Pfettendach vor, welche den Übergang vom Sparren- zum Pfettendach im 19. Jahrhundert markiert.

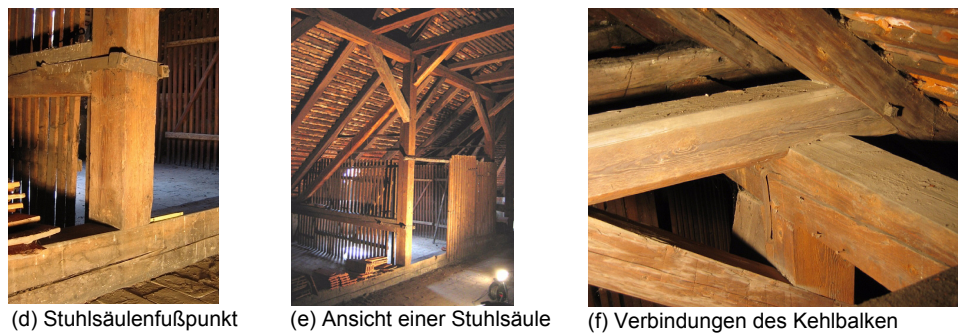
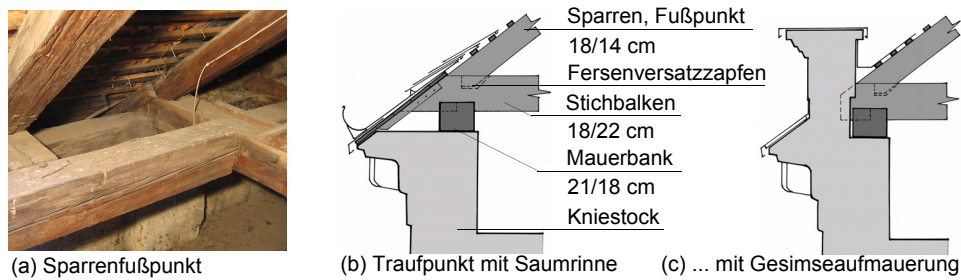
Der Stuhl dieser Tragwerke wurde abgestrebt ausgeführt, somit werden nahezu alle Windlasten direkt über den Stuhl abgetragen. Die Bezeichnung "zweifach stehend" deutet schlussendlich darauf hin, dass die Gespärre von zwei Stuhlwandebenen unterstützt werden. Beachtenswert ist weiters die Tatsache, dass die Bundträme parallel zum First (in der Stuhlwandebene) verlaufen und die Lasten aus den Stuhlsäulen in die Querwände des darunter liegenden Geschoßes weiterleiten.



1. Regelquerschnitt eines Stuhls.



2. Links: Perspektive des Tragwerks (ohne Kaminwechsel), Rechts: Grundriss.



3. Für den „Grazer Dachstuhl“ besonders charakteristische Verbindungen.

ZIMMERMANNSMÄSSIGE VERBINDUNGEN

Zimmermannsmäßige Verbindungen wurden von den Bauschaffenden je nach Einsatzzweck ausgewählt und nach tradierten Bauregeln, Erfahrungswerten und durch Probieren ausgeführt (vgl. [3], [4], [16]). Das tatsächliche mechanische Verhalten historischer Holzverbindungen entzieht sich aufgrund dieser Gegebenheiten und des komplexen anisotropen Materialverhaltens häufig einer Berechnung nach einfachen Rechenmodellen.

Problemstellungen

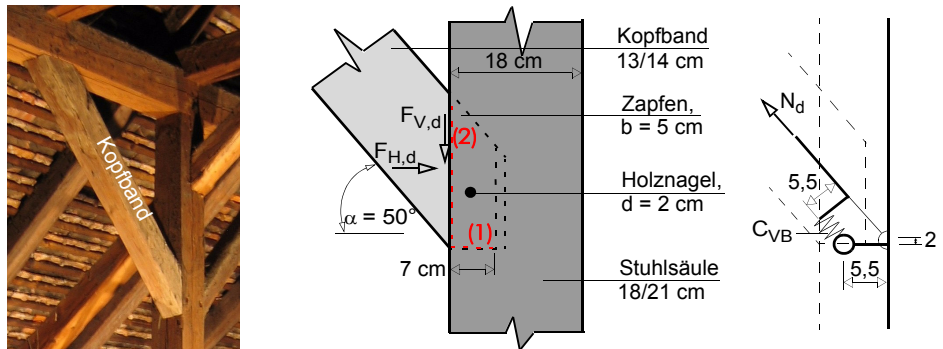
Für die Ermittlung der Systemschnittgrößen gemäß EN 1995-1-1 sind die Steifigkeiten der Bauteile und Anschlüsse sowie die Exzentrizitäten der Verbindungen zu berücksichtigen (vgl. [12] 5.1 (4) und (5), [13] B.1). Wie die Berechnungen in (vgl. [10]) gezeigt haben, ist es schwierig bis unmöglich, die Exzentrizitäten, Steifigkeiten und auch Bemessungswiderstände vieler historischer zimmermannsmäßiger Verbindungen gemäß EN 1995-1-1 (vgl. [12], [13]) zu ermitteln. Hinzu kommt die Tatsache, dass die Literatur (beispielsweise vgl. [4], [5]) zu diesem Thema meist nur eingeschränkte Verbindungsgeometrien behandelt und keine allgemein gültigen Rückschlüsse zulässt. Die wesentlichen Problemstellungen bei der Bestimmung des mechanischen Verhaltens zimmermannsmäßiger Verbindungen sind folgende:

- In zimmermannsmäßigen Verbindungen kommt es in der Regel zu einer Interaktion von Verbindungsmitteln. Zutreffende Aussagen über das Gesamttragverhalten können dann getroffen werden, wenn je nach Steifigkeitsverhältnis Kombinationsfaktoren für das Zusammenwirken verschiedener Verbindungsmittel festgelegt sind.
- In die EN 1995-1-1 (vgl. [12], [13]) sind derzeit keine Regeln angegeben, mit denen es möglich wäre, die Festigkeit unter kombinierter Beanspruchung zu ermitteln. Beanspruchungsinteraktionen (zum Beispiel Querdruck und Schub) treten in zimmermannsmäßigen Verbindungen jedoch häufig auf.
- Zimmermannsmäßige Verbindungen übertragen Druck- und Zugkräfte prinzipiell über Kontaktdruck. Häufig ergeben sich aus der Geometrie große lokale Querdruck- und - noch problematischer - Querkzugbeanspruchungen. Diese können bisher ohne numerische Simulation nicht quantitativ bestimmt werden, da die Spannungsinteraktionen, geometrischen Bezugsflächen und die Spannungsverteilungen nicht bekannt sind.
- Je nach Beanspruchung weisen zahlreiche Verbindungen unterschiedliche Exzentrizitäten, Nachgiebigkeiten und Bemessungswiderstände auf. Beispielsweise fällt ein Stirnversatzzapfen bei Zugbeanspruchung aus, es trägt nur noch der Holznagel. Das heißt, das statische System ändert sich je nach Beanspruchung der Verbindung (geometrische Nichtlinearität).

Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten zimmermannsmäßiger Verbindungen am Beispiel eines Stirnversatzzapfens

Sogenannte Stirnversatzzapfen (siehe Abb. 4) wurden bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts sehr häufig für die Anschlüsse der Kopfbänder an die Stuhlsäulen und Pfetten verwendet. Hier wird gezeigt, wie sich anhand ingenieurmäßiger Überlegungen

die Größenordnung der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten dieser Verbindung für Druckbeanspruchung abschätzen lassen.



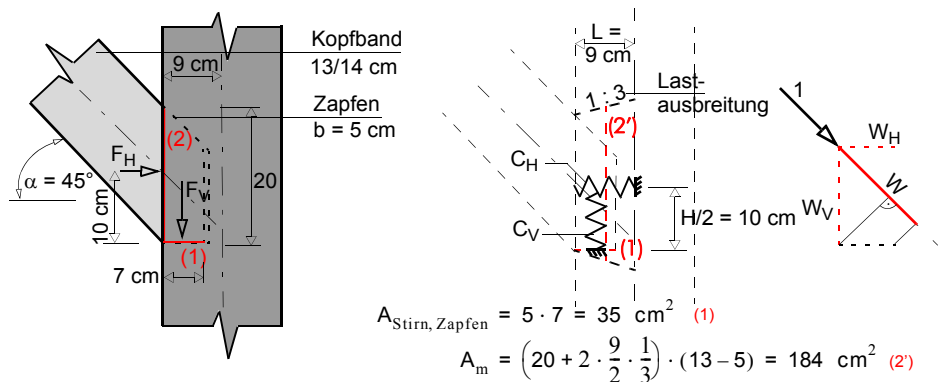
4. Links: Kopfband, Mitte: Darstellung eines Stirnversatzzapfens, Rechts: statisches Modell.

Statisches Modell

In Anlehnung an [1], [4], [10] werden alle zimmermannsmäßigen Verbindungen als gelenkige Stabverbindungen angesetzt. Da die Kraftübertragung von $F_{V,d}$ und $F_{H,d}$ an unterschiedlichen Kontaktflächen erfolgt, ist die Festlegung der Exzentrizität eine Näherung. Es wurde der ungünstigste Fall gewählt. Dieser geht davon aus, dass die Kontaktfläche (2) zwischen dem Stirnholz des Kopfbandes und der Stuhlsäule beziehungsweise der Mittelpfette klappt und die hier sonst auftretenden Kräfte über Reibung an der Zapfenstirn (1) übertragen werden.

Die exzentrische Lage des Kopfbands in der Stuhlwandebene und der Holznagel werden vernachlässigt.

Ermittlung der Federsteifigkeit C_{VB}



5. Vereinfachte Geometrie und Modell für die Steifigkeitsermittlung.

Annahmen

- Die Kraftübertragung von F_V erfolgt ausschließlich in der Kontaktfläche (1), die Kraftübertragung von F_H erfolgt ausschließlich in der Kontaktfläche (2). Es kommt zu keiner Interaktion zwischen den beiden Kräften infolge Reibung, etc.
- Die beiden Hölzer liegen an den Kontaktflächen vollflächig und gleichmäßig aufeinander und bleiben dies auch bei Verformungen des gesamten Tragwerks.
- Die Kraft F_V muss im Zapfen bis zur Schwerlinie des Kopfbandes übertragen werden. Die Kraft F_H wird auf Querdruck bis in die Schwerlinie der Stuhlsäule übertragen.
- Alle Exzentrizitäten werden vernachlässigt.
- $E_{\alpha, \text{mean}}$ wird in Anlehnung an ((6.16) [12]) ermittelt.

Federsteifigkeiten

$$E_{\alpha, \text{mean}} = 71,6 \text{ kN/cm}^2 \quad E_{90, \text{mean}} = 37 \text{ kN/cm}^2$$

$$C_V = \frac{E_{\alpha, \text{mean}} \cdot A_{\text{Stirn, Zapfen}}}{H/2} = 251 \text{ kN/cm} \quad C_H = \frac{E_{90, \text{mean}} \cdot A_m}{L} = 756 \text{ kN/cm}$$

$$C = \frac{1}{W} = \frac{\sqrt{2}}{W_V + W_H} = \frac{\sqrt{2}}{\frac{1/\sqrt{2}}{C_V} + \frac{1/\sqrt{2}}{C_H}} = 377 \text{ kN/cm}$$

Aufgrund von Klaffungen in den Kontaktflächen kann davon ausgegangen werden, dass sich eine geringere Steifigkeit der Verbindung als die eben abgeschätzte ergibt. Den weiteren Berechnungen wird daher $C_{VB} = 300 \text{ kN/cm}$ zugrundegelegt.

MODELLBILDUNG DES „GRAZER DACHSTUHLS“

Modelle

In allen Modellen wird das Tragwerk als Stabsystem mit ideal geraden Stabachsen abgebildet. Geometrische und materielle Imperfektionen werden bei der Nachweisführung im Rahmen des Ersatzstabverfahrens berücksichtigt. Folgende unterschiedliche statische Modelle des Dachstuhls der Mandellstraße 9 werden in RSTAB [2] untersucht:

Table 1: Übersicht der untersuchten statischen Modelle.

Modelle	3D		2D	
	M1	M2	M3	M4
Kennskizze				

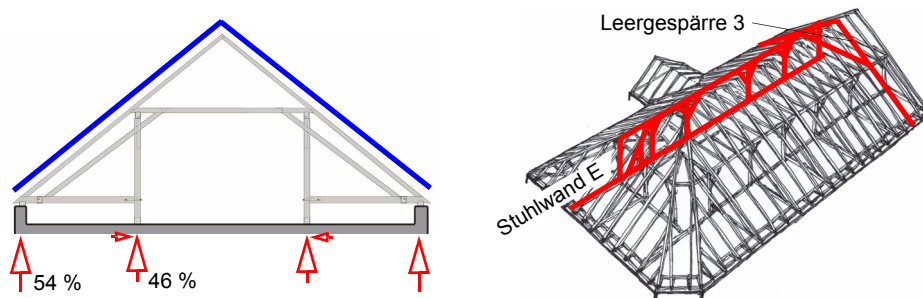
Wie die Skizzen der Tabelle 1 andeuten, wird bei den Modellen M1 und M2 das Tragwerk als räumliches System modelliert. Im Gegensatz dazu wird bei den Modellen M3 und M4 das Tragwerk in ebene Teilsysteme zerlegt.

- Das Modell M1 bildet das räumlich ausgeprägte Tragverhalten ebenso wie die Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen so realitätsnahe wie möglich ab. Nichtlineare Effekte, wie auf bestimmte Beanspruchungen ausfallende Stäbe, Auflager oder nichtlineare Federn werden berücksichtigt. Da die Superposition der Lastfälle somit nicht mehr möglich ist, müssen für die Systemberechnung nach Theorie I. Ordnung Lastgruppen definiert werden.
- Das Modell M2 unterscheidet sich von M1 dadurch, dass hier eine lineare Berechnung unter Vernachlässigung ausfallender Stäbe und Auflager sowie der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen durchgeführt wird.
- In Modell M3 wird versucht, das Tragverhalten durch die Zerlegung in ebene Teilsysteme unter Berücksichtigung der Interaktion der Teilsysteme soweit wie möglich abzubilden. Für die Ermittlung der, die Interaktion der Teilsysteme ersetzenden, Auflagerfedern werden die Ergebnisse des Modells M1 verwendet. Die Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen werden berücksichtigt.
- In Modell M4 werden alle Teilsysteminteraktionen und das mechanische Verhalten der Verbindungen vernachlässigt.

Globale Lastabtragung

Rund 46 % aller Vertikallasten des Dachstuhls werden über die Stuhlwände in die Quermauern des darunter liegenden Geschoßes übertragen, 54 % werden in die Kniestockwände eingeleitet. Wie eine Vergleichsberechnung gezeigt hat, würden die Stuhlwände eines analogen Pfettendachstuhls 56 % aller Vertikallasten abtragen. Daraus wird abgeleitet, dass beim Grazer Dachstuhl die Lasten sowohl pfetten- als auch sparrendachartig abgetragen werden. Durch die sparrendachartige Lastabtragung sind Vertikalkraftumlagerungen vom zweifach abgestrebten stehenden Stuhl auf die Kniestockwände in der Größenordnung von ca. 20 % verbunden.

Die Horizontalkräfte der Sparrendachtragwirkung werden über die Stich-, Wechselbalken und die Mauerbänke in die Mauerbankriegel übertragen. Die Mauerbankriegel leiten die Zugkräfte weiter in die Stuhlwandebene, wo sie aufgrund der hohen Vertikalkräfte aus den Stuhlsäulen über Reibung in die Quermauern des Untergeschoßes eingeleitet werden können (siehe auch Abb. 6).



6. Links: Globale Lastabtragung, Rechts: Stuhlwand E und Leergespärre 3.

Ergebnisse der Schnittkraftberechnungen (ULS–Bemessungswerte)

Table 2: Ergebnisse [kN beziehungsweise kNm] für das Leergespärre.

Modelle	M1 	M2 	M3 	M4 
vertikale Auflagerkraft Stuhlwand E	16,24 100 %	16,64 102 %	14,75 91 %	21,49 132 %
horizontale Auflagerkraft Stuhlwand E	1,36 100 %	1,12 82 %	0,87 64 %	0,89 65 %
Normalkraft im Sparrenfußpunkt	-13,34 100 %	-11,80 88 %	-11,50 86 %	-3,66 27 %
1. Feldmoment im Sparren	4,75 100 %	4,70 99 %	4,75 100 %	4,64 98 %
Stützmoment im Sparren	-5,73 100 %	-5,79 101 %	-5,72 100 %	-5,93 103 %
2. Feldmoment im Sparren	2,31 100 %	2,46 106 %	2,50 108 %	2,41 104 %

In der Tabelle 2 werden ausgewählte Auflager- und Schnittkräfte des Leergespärres 3 dargestellt. In den ebenen Modellen ergeben sich aufgrund der für die Festlegung der Auflagerbedingungen erforderlichen Vereinfachungen große Abweichungen zu den Ergebnissen der räumlichen Modelle. Da im Modell M4 nur starre oder frei verschiebbliche Auflager verwendet werden, weicht die Normalkraft im Sparrenfußpunkt deutlich von den Ergebnissen der restlichen Modelle ab. Es zeigt sich, dass die Auflagerkräfte und auflagernahen Schnittkräfte insbesondere in M4 nicht plausibel abgebildet werden können.

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Biegesteifigkeit des Sparrens stellen sich in allen untersuchten Modellen annähernd dieselben Biegemomente (und Querkkräfte) ein. Geringe Abweichungen resultieren beispielsweise daraus, dass die Exzenter der Verbindungen in Modell M1 die Spannweiten und Lagerungsbedingungen der Sparren verändern. Dies wirkt sich insbesondere auf die Schnittgrößen des 2. Sparrenfelds aus.

Die Ergebnisse der Modelle M1 und M2 gemäß Tabelle 3 können mit jenen von M3 und M4 nicht unmittelbar gegenübergestellt werden, da in den beiden letztgenannten Modellen die Lasten aus den Gespärren über die Länge der Mittelfette verschmiert angesetzt werden. Dadurch werden im Bereich der Gaupe zu große Vertikallasten auf die Mittelfette berücksichtigt.

Table 3: Ergebnisse für die Stuhlwand.

Modelle	M1 	M2 	M3 	M4 
max. Feldmoment der Mittelpfette	15,03 100 %	10,34 69 %	27,20 181 %	17,31 115 %
max. Stützmoment der Mittelpfette	-17,68 100 %	-13,84 78 %	-20,03 113 %	-19,14 108 %
min. Normalkraft der Kopfbänder	8,52 100 %	12,42 146 %	17,16 201 %	22,84 268 %
min. Normalkraft der Kopfbänder	-46,72 100 %	-78,20 167 %	-54,70 117 %	-73,24 157 %
Biegemoment der Kopfbänder	2,80 100 %	- -	3,28 117 %	- -

Ebene Teilsysteme versus räumlicher Berechnung

Für die Berechnung der Schnittgrößen zahlreicher Leergespärre ist die Entkopplung und Betrachtung als ebenes System möglich und sinnvoll. Allerdings existieren im Referenzobjekt nur elf gleichartige Leergespärre und auch diese sind aufgrund von Kaminwechseln unterschiedlich belastet. Für einzelne Gespärre (insbesondere im Bereich the Gaupe und der Walme) ist die Berechnung an einem ebenen Teilsystem nicht möglich.

Die Lastabtragung der Stuhlwand kann mit Ausnahme des Einflussbereichs der Gaupe und des Walms ausreichend genau mit ebenen Modellen abgebildet werden. Für den Ansatz der Lasteinflussfläche der Stuhlwand ist im vorliegenden Fall die qualitative Kenntnis der Sparrendachtragwirkung des gesamten Tragwerks erforderlich. Hierzu ist vorab eine räumliche Analyse erforderlich. Diese sollte zumindest die wesentlichen Nachgiebigkeiten der Verbindungen der Stuhlwand enthalten, da sonst der pfettendachartige Anteil der Lastabtragung deutlich überschätzt wird.

Ergebnisse der Nachweise (Modell M1 versus M2)

Der Vergleich der Modelle M1 und M2 ergibt, dass die Ausnutzungsgrade der Verbindungen in M1 tendenziell geringer sind. Dafür ergeben sich in M2 insgesamt geringere Ausnutzungsgrade der Stäbe. Das bedeutet, dass es infolge der Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen zu Schnittkraftumlagerungen von den Verbindungen auf die Stäbe kommt.

Sieht man von jenen Bereichen ab, in welchen die globale Lastabtragung wesentlich von der Gaupe und den Walmdachflächen beeinflusst wird, kann in Modell M1 die Tragfähigkeit des Dachstuhls des Referenzobjekts plausibel nachvollzogen werden. Das Sicherheitsniveau entspricht nicht mehr den anerkannten Regeln der Technik. Statt einem normativ indirekt geforderten globalen Sicherheitsfaktor von rund 2,5 liegt für das Referenzobjekt nur ein Sicherheitsfaktor im Bereich von 1,5 vor.

EMPFOHLENE VORGANGSWEISE BEI DER STATISCHEN ANALYSE

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit und einer vertieften Literaturrecherche werden einige Empfehlungen angegeben, wie in der Praxis bei der statischen Analyse historischer Dachstühle vorgegangen werden kann.

I. Materialkenngrößen

- Im Rahmen einer der ersten Begehungen des Dachraums wird abgeschätzt, welcher Sortierklasse (und damit Festigkeitsklasse) das verbaute, ungeschädigte Bauholz entspricht. Diese Abschätzung erfolgt nach den visuellen Sortierkriterien gemäß ÖNORM DIN 4074-1 (vgl. [15]). In den meisten Fällen kann dabei mindestens von S10 (entspricht C24 gemäß [14]) ausgegangen werden (vgl. [4]).
- Danach wird die statische Analyse durchgeführt und untersucht, ob beziehungsweise welche Verbindungen und Stäbe den Sicherheitsanforderungen der anerkannten Regeln der Technik nicht entsprechen.
- Im bestehenden Tragwerk wird geprüft, ob nicht für genau jene Verbindungen und Stäbe der Ansatz einer höheren Sortier- und damit Festigkeitsklasse gerechtfertigt ist. Da diese Untersuchungen (vgl. [4], [7]) nur noch einzelne Bereiche umfassen, ist der erforderliche Aufwand überschaubar.

II. Systemabmessungen und Verformungen

- Für die statische Modellbildung ist es ausreichend, die Geometrie des Tragwerks auf Dezimeter genau zu kennen (vgl. [9]). Nur im Bereich von exzentrischen Stabanschlüssen und/oder Krafteinleitung ist die Aufnahme mit Zentimetergenauigkeit erforderlich.
- Verformungen des Tragwerks werden im statischen Modell nicht berücksichtigt. Allerdings ist es empfehlenswert, zumindest einzelne Lotungen an Stäben, welche große Normalkräfte aufweisen, durchzuführen. Sollte das gesamte Tragwerk große Verformungen in eine Richtung aufweisen, wird empfohlen, die Abtriebskomponenten abzuschätzen und diese über einen zusätzlichen Verband in die Auflager zu leiten.

III. Auflagerbedingungen

- Historische Dachstühle sind in der Regel nicht zugfest mit dem Mauerwerk verbunden, sondern liegen „frei“ auf (vgl. [6], [9], [10]). Horizontalkräfte werden meist über Reibung eingeleitet.
- Ist die Festlegung zutreffender Auflagerbedingungen mit großen Unsicherheiten verbunden, bieten sich Grenzwertbetrachtungen an (vgl. [6]).

IV. Querschnittswerte

- Die Messwerte der Querschnittsabmessungen sind mathematisch auf Zentimeter zu runden.
- Fehl- oder Baumkantigkeiten sind je nach Sortierklasse zu berücksichtigen oder werden bei der Ermittlung der Querschnittswerte in Abzug gebracht.
- Für die Schnittkraftermittlung sind die Mittelwerte der Querschnittsabmessungen

- gen einer Querschnittsklasse (zum Beispiel Sparrenlage) anzusetzen (vgl. [11])
- Für den Nachweis sind die charakteristischen Werte der Querschnittsabmessungen einer Querschnittsklasse (zum Beispiel der Sparrenlage) anzusetzen (vgl. [11]). Nach der statischen Analyse kann untersucht werden, ob nicht für jene Stäbe welche die maximalen Ausnutzungsgrade aufweisen, tatsächlich größere Querschnitte vorliegen.
- In Stablängsrichtung konische Querschnitte können realitätsnahe mit einem feldweise konstanten (mittleren) Querschnitt abgebildet werden. Für die Nachweise über den Mittelstützungen sind die an dieser Stelle tatsächlich vorhandenen Querschnittsabmessungen anzusetzen. (vgl. [10])

V. Verbindungen

- Die Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen beeinflussen wesentlich die Schnittkräfte aller Tragwerksglieder.
- Für einfache zimmermannsmäßige Verbindungen wie beispielsweise den Stirnversatz hat sich die Modellierung durch Exzenter bis zum Mittelpunkt der Stirnholzkontaktfläche gut bewährt (vgl. [6]).
- Die Exzentrizitäten und Nachgiebigkeiten der meisten zimmermannsmäßigen Verbindungen sind derzeit weder im Eurocode 5 (vgl. [12], [13]) noch in der Literatur zufriedenstellend behandelt.

VI. Modellbildung und Schnittkraftermittlung

- Ist von einem ausgeprägt räumlichen Tragverhalten auszugehen, sollte zuerst ein vereinfachtes räumliches Modell unter Vernachlässigung der Exzentrizitäten und Nachgiebigkeiten der Verbindungen erstellt und berechnet werden. Dieses dient dazu, die wesentlichen Effekte der globalen Lastabtragung und die Größe der Lasteinflussbreiten und/oder -flächen zu ermitteln.
- Auf Basis der Erkenntnisse der vereinfachten räumlichen Berechnung erfolgt, wenn möglich, die Zerlegung in ebene Teilsysteme. Da überwiegend statisch unbestimmte Systeme vorliegen, sind die Koppelungen der Teilsysteme zu beachten. Die Randbedingungen der Auflager sowie die Exzentrizitäten und Nachgiebigkeiten der Verbindungen sind in einem zweiten Schritt zu berücksichtigen. Die Zerlegung in ebene Teilsysteme ist jedoch nicht immer möglich (vgl. [10]).
- Im Rahmen einer Sanierung besteht in der Regel die Möglichkeit, Tragwerksveränderungen vorzunehmen. Insbesondere im Bereich von Graten und Ichsen kann das bestehende Tragwerk beispielsweise durch den Einbau von Windrispen derartig verändert werden, dass die Berechnung mit ebenen Teilsystemen möglich wird.

VII. Nachweis

- Mit den Schnittkräften aus den ebenen Teilsystemen wird die Bemessung durchgeführt.
- Die Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten der meisten zimmermannsmäßigen Verbindungen sind derzeit weder normativ noch in der Literatur zufriedenstellend behandelt.

RESÜMEE

Bis ins 19. Jahrhundert wurden Dachstühle nicht nach einer statischen Berechnung, sondern fast ausschließlich anhand von Erfahrung, Überlieferungen und durch Probieren errichtet. Wie in dieser Arbeit aber auch in der Literatur (vgl. [1], [4], [6], [10]) erläutert, kann das mechanische Tragverhalten historischer Dachstühle meist nicht einfach nachvollzogen werden. Es liegen häufig Hybridkonstruktionen vor, welche sowohl pfettendachartig als auch sparrendachartig abtragen. Die rechnerischen Schnittkräfte hängen wesentlich von der Modellbildung des Tragwerks ab, wobei das tatsächliche mechanische Tragverhalten der Konstruktion unbekannt bleibt.

Soll das mechanische Tragverhalten plausibel erklärt werden, ist für zahlreiche historische Dachstühle eine räumliche Analyse unter Berücksichtigung nichtlinearer Auflagerbedingungen (beispielsweise der fehlenden Zugverankerung) sowie der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der zimmermannsmäßigen Verbindungen durchzuführen. Wie sich in dieser Arbeit und in der Literatur (vgl. [4], [6]) gezeigt hat, führt die Berechnung statisch hochgradig unbestimmter Systeme ohne Nachgiebigkeiten zu ungünstigen Auslastungsverteilungen. Erst durch die Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten der Verbindungen können sich die Lasten durch Umlagerungen im Tragwerk verteilen. Dadurch kann die Tragfähigkeit vieler historischer Dachstühle nachvollzogen werden, wenngleich das heutige Sicherheitsniveau häufig nicht erreicht wird. Historische Dachstühle sind in der Regel aus heutiger Sicht nicht überbemessen (vgl. [1], [4], [10]). Die Verbindungen sind tendenziell höher ausgenutzt, als die Stäbe. Da die Kraftübertragung zimmermannsmäßiger Verbindungen vor allem auf Kontakt beruht, zeigen diese Verbindungen meist ein duktilen Verhalten.

Wie in dieser Arbeit mehrfach betont, sind historische Dachstühle in der Regel redundante und damit robuste Tragwerke. Trotz zum Teil schwerer Schäden, sind die Verbindungen und Stäbe lange in der Lage, durch Lastumlagerungen die Tragfähigkeit des gesamten Tragwerks zu erhalten.

QUELLEN

- [1] DEINHARD Martin: *Die Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen* : Dissertation : Karlsruhe. In: bauen mit holz Bruderverlag (1963), Nr. 1–3, S. 1/ 13–1/27, 2/71–2/85, 3/113–3/129
- [2] DLUBAL Georg ; DLUBAL Ingenieur-Software GmbH (Hrsg.): *RSTAB 6.03*. Tiefenbach, 2009. - Programm-Version 6.03.3331
- [3] GERNER Manfred: *Handwerkliche Holzverbindungen der Zimmerer*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1992. - ISBN 3-421-03027-8
- [4] GÖRLACHER Rainer: *Hölzerne Tragwerke : Untersuchen und Beurteilen*. Reihe B. Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 1996. - Sonderforschungsbericht 315
- [5] HEINESHOFF Bodo ; KÖHLER N. ; Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (Hrsg.): *Untersuchung über das Tragverhalten von zimmermannsmäßigen Holzverbindungen : T 2189*. München : IRB Verlag, 1989. - Forschungsbericht
- [6] KIRCHLER Markus: *Modellierung eines historischen Dachstuhls – Vergleich von Stab- und FE-Berechnungen*. Graz, Erzherzog-Johann-Universität Graz, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Dipl.-Arb., 2009. – Institut für Holzbau und Holztechnologie
- [7] KRAFT Udo ; PRIBBERNOW Doreen: *Handbuch der Holzprüfung : Anleitungen und Beispiele*. 1. Auflage : Vbt Verlag Bau U. Technik, 2006. - ISBN-10: 3764004592
- [8] LAND STEIERMARK (Hrsg.): *Stadtarchiv*, Auskunft von Frau Hary, 26.01.2009
- [9] MAJCENOVIC Herbert (Sachverständiger für historische Bauwerke): *Informatives Fachgespräch : historische Dachstühle/Meisel Andreas*. Graz, 19.01.2009
- [10] MEISEL Andreas: *Historische Dachstühle : Tragsysteme, Bestandserfassung, statische Analyse und Sanierung mit flächenhaften Holzwerkstoffen*. Graz, Erzherzog-Johann-Universität Graz, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Dipl.-Arb., 2009. – Institut für Holzbau und Holztechnologie
- [11] NORM ÖNORM EN 1990 *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*, 01. März 2003
- [12] NORM ÖNORM EN 1995-1-1 *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten: Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, 01. Jänner 2006
- [13] NORM ÖNORM EN 1995-1-1 *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten: Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Nationale Festlegungen*, 15. Jänner 2009
- [14] NORM ÖNORM EN 338: *Bauholz für tragende Zwecke: Festigkeitsklassen*, 01. Juli 2003
- [15] NORM ÖNORM DIN 4074-1 *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit: Teil 1: Nadelschnittholz*, 01. November 2004
- [16] ZWERGER Klaus: *Das Holz und seine Verbindungen : Traditionelle Bautechniken in Europa und Japan*. Basel : Birkhäuser - Verlag für Architektur, 1997. - ISBN 3-7643-5482-8