

# Versuchstechnische Bestimmung von Kennwerten im Gerüstbau

Stefan Lauterbach

*KIT Stahl- und Leichtbau - Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine*

**Zusammenfassung:** Gerüste sind temporäre Bauwerke, die für einen schnellen Auf- und Abbau konzipiert sind, so dass oft Steck-, Keil- oder Hakenverbindungen verwendet werden. Deren Eigenschaften können üblicherweise nicht auf Grundlage von Technischen Baubestimmungen ermittelt werden, so dass Versuche notwendig sind. Zeitliche und wirtschaftliche Aspekte führen folglich zu der Frage nach der relevanten Anzahl an Versuchen und wie mit deren Unschärfe umzugehen ist.

## 1 Einleitung

Gerüste sind temporäre Bauwerke aus vorgefertigten Bauteilen, welche im Bauwesen, im Anlagen- oder aber auch im Fahrzeugbau eingesetzt werden. Sie dienen oftmals als Arbeits- oder Schutzgerüste, wie sie in [5, 3] geregelt sind. Aber auch als Traggerüste nach [8], wie bspw. bei Brückenbauwerken, können diese eingesetzt werden. Unabhängig von der Art des Einsatzes zeichnen sich diese Konstruktionen dadurch aus, dass sie einen Bausatz bilden, aus welchen beliebige Bauwerke errichtet werden können. Weiterhin sind Gerüste für einen schnellen Auf- und Abbau konzipiert, so dass oftmals Steck-, Keil- oder Hakenverbindungen verwendet werden. Diesen Verbindungen ist gemein, dass sie i.d.R. nicht auf Grundlage der Technischen Baubestimmungen, wie bspw. [9, 10], bewertet werden können, da keine adäquaten Berechnungsmodelle existieren. Folglich können Kennwerte dieser Verbindungen nur versuchstechnisch ermittelt werden. Jedoch sei erwähnt, dass Versuche nicht verwendet werden dürfen, um konservative Annahmen in den Normen zu umgehen.

In Abb. 1 sind zwei Beispiele dargestellt - ein Riegelanschluss eines Modulgerüsts und die Einhängung einer horizontalen Ebene. Ein Modulknoten ist eine Keilverbindung zwischen einem Riegel und der Lochscheibe eines Stiels. Die horizontale Ebene, welche alle Belagerelemente in einem Gerüstfeld bezeichnet, wird im Weiteren detailliert betrachtet, da hierbei einige Aspekte der Unschärfe und deren Umgang eingehen.



**Abbildung 1:** Verbindungen im Gerüstbau: Modulknotten (links), horizontale Ebene (rechts)

Anmerkung: Aufgrund der Wahrung von Betriebsgeheimnissen sind die in diesem Beitrag verwendeten Versuchsdaten in anonymisierter und leicht abgewandelter Form enthalten, ohne die grundsätzliche Aussage zu verändern. Ein direkter Bezug zu tatsächlichen Versuchen liegt damit nicht vor. Auch stehen die Fotos in Abb. 1 bewusst in keinem Zusammenhang mit den Versuchsdaten.

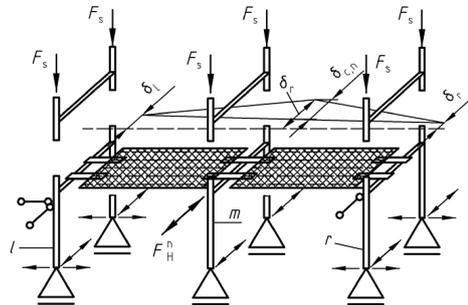
## 2 Versuche zum Tragverhalten einer horizontalen Ebene

### 2.1 Planung, Aufbau und Durchführung

Wie in Abschnitt 1 beschrieben, steht die Ermittlung der Kennwerte, also der Tragfähigkeit und Steifigkeit, im Fokus der Versuche. Um diese aus Versuchen ableiten zu können, muss der Versuchsaufbau inklusive der Randbedingungen einem repräsentativen Gerüstausschnitt entsprechen. Es ist zwingend erforderlich, dass bereits bei der Planung eine Idee besteht, wie die Versuche ausgewertet werden sollen, da bspw. ungünstig gewählte Positionen der Messtechnik zu einem enormen Berechnungsaufwand führen können, um die zu erzielenden Kennwerte ableiten zu können.

Für standardisierte Versuche, wie bspw. die der horizontalen Ebene, sind in [4, Anhang A] Aufbauten beschrieben. Abb. 2 zeigt den repräsentativen Gerüstausschnitt, welcher aus zwei Gerüstfeldern besteht - drei Rahmen und den Belagelementen. Letztere stellen eine Art Schubfeld dar, die die Rahmen untereinander koppeln. Die gedachte Fassade befindet sich auf der Rückseite. Weiterhin sind die Randbedingungen sowie die Positionen der Lasteinleitung und der Sensoren angegeben. In [1, Abs. 4.3.2.1] wird die ergänzende Festlegung getroffen, dass der Festpunkt parallel zur Fassade am mittleren Rahmen vorzusehen ist. Die Belagelemente werden zu Versuchsbeginn üblicherweise mittig auf die Belagriegel gelegt, so dass die Last  $F_H^n$  und damit auch die Verschiebung  $\delta_m$  des mittleren Rahmens in zwei Richtungen aus der Nulllage heraus erfolgen kann. Eine ausgezeichnete Richtung gibt es hierbei nicht.

In [7, Abs. 7.2] wird das grundlegende Vorgehen beschrieben, wie Versuche durchzuführen sind. Bei Verbindungen, welche bestimmungsgemäß Belastungswechsel mit Vorzeichenum-



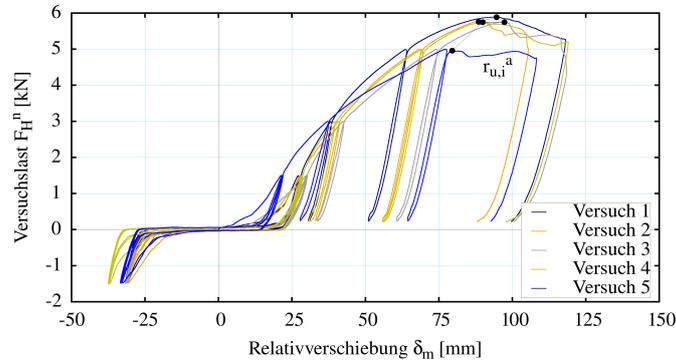
**Abbildung 2:** Versuchsaufbau: horizontale Ebene mit Belastung normal zur Fassade (aus [4, Bild A.1] entnommen)

kehr der Last erhalten können, sind nach [2, G05-3] zunächst drei vollständige Zyklen auf dem Niveau von  $1,50 \text{ kN}$  zu durchfahren, bevor die Last bis zum Versagen, also dem Erreichen einer Höchstlast oder dem Auftreten von großen Verformungen, gesteigert wird. Auf diesem Weg sind einige vollständige Entlastungen vorzusehen. Die zyklischen Belastungen dienen dazu, einen gewissen Gebrauchszustand zu simulieren, aber auch das anfängliche Spiel, also das nahezu kraftlose Verschieben der beteiligten Komponenten gegenseitig, zu bestimmen. Letzteres tritt typischerweise bei Versuchen mit horizontalen Ebenen auf, bei welchen die Belagelemente über Haken lose auf den Belagriegeln aufliegen, siehe Abb. 1 im rechten Bild. Nach Überwinden des Spiels treten typischerweise nicht-starre Anschlusscharakteristiken an den Verbindungen auf.

Bei der Festlegung der Anzahl an relevanten Versuchen spielen neben den statischen auch wirtschaftliche Aspekte eine Rolle. In Bezug auf letztere ist eine möglichst geringe Anzahl an Versuchen anzustreben. Jedoch muss die Grundgesamtheit auch die jeweiligen Untersuchungen adäquat abbilden und das Ergebnis muss reproduzierbar sein. Nach [7, Abs. 7.2.2] sind für jeden untersuchten Kennwert mindestens fünf Versuche durchzuführen. Dies wird durch [1, Abs. 4.2] für Zulassungsversuche relativiert, da eine verringerte Versuchsanzahl nur dann ausreichend ist, wenn für alle die gleiche Versagensursache vorliegt. Ansonsten sind bis zu zehn Versuche notwendig. Für Verbindungen, deren Tragmechanismus maßgeblich durch Reibung dominiert wird, wie es bspw. bei Kupplungen im Gerüstbau der Fall ist, sind mindestens zehn Versuche erforderlich.

## 2.2 Versuchsergebnisse

Insgesamt wurden fünf Versuche durchgeführt, welche alle die gleiche Versagensursache zeigten. Somit ist diese Anzahl ausreichend als Grundgesamtheit für eine statistische Auswertung. In Abb. 3 sind die aufgezeichneten Last-Verformungskurven dargestellt - die Versuchslast  $F_H^n$  über der Relativverschiebung  $\delta_m$  des mittleren Rahmens in Bezug auf die beiden äußeren Rahmen ( $\delta_l, \delta_r$ ).



**Abbildung 3:** Horizontale Ebene: aufgezeichnete Last-Verformungskurven

Der Vergleich der Versuchskurven zeigt, dass sich unter jeweils gleicher Belastung von einander abweichende Relativverschiebungen  $\delta_m$  einstellen und auch in Bezug auf die erreichten Höchstlasten  $r_{u,i}^a$  Unterschiede vorliegen. Diese Unschärfe entsteht durch die natürliche Streuung der Werkstoffeigenschaften und der Geometrien, welche auch als alligatorische Unschärfe bezeichnet wird.

## 2.3 Werkstoff und Geometrie

Die in den Versuchen verwendeten Bauteile bzw. deren Komponenten weisen i.d.R. keine nominellen Querschnittsabmessungen und Werkstoffeigenschaften auf, welche über Werkstoffproben und Maßkontrollen bestimmt werden. Sofern Abweichungen sich günstig auf Versuchsergebnisse auswirken, sind die Abminderungsbeiwerte  $\xi_Q = t_{act}/t_{nom}$  (Geometrie) und die  $\xi_a = f_{y,act}/f_{y,nom}$  (Werkstoff) zu berücksichtigen. Diese sind das Verhältnis des tatsächlichen (act) zum nominellen (nom) Kennwert. Im Allgemeinen kann der Einfluss der Abweichungen einzelner Komponenten nicht quantifiziert bzw. untereinander gewichtet werden, so dass der jeweils maximale Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen ist, was i.d.R. zu einer konservativen Bewertung führt. Abminderungsfaktor von einzelnen Komponenten dürfen nur aus der Auswertung ausgenommen werden, sofern dies begründet werden kann.

## 2.4 Auswertung von Versuchsergebnissen

### 2.4.1 Bestimmung der Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit der horizontalen Ebene wird ausgehend von den in den einzelnen Versuchen erreichten Höchstlasten ( $r_{u,i}^a$ ) ermittelt. Bevor eine statistischen Aussage erfolgen kann, sind diese zunächst auf ein einheitliches Niveau  $r_{u,i}^c$  zu bringen, siehe Gl. (1), um dann die tatsächliche Unschärfe in den Versuchsergebnissen statistisch bewerten zu können. Ohne die Bereinigung der alligatorischen Unschärfe liegt keine Aussage über die tatsächliche Streuung vor, da vermeintlich einheitliche Versuchskurven nach der Bereinigung eine deutliche

Streuung aufweisen könnten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, für eine Versuchsreihe nur Versuchsmaterial zu verwenden, deren Komponenten jeweils einer Herstellungscharge entstammen.

$$r_{u,i}^c = r_{u,i}^a / \xi_Q / \xi_a \quad (1)$$

Im Allgemeinen darf davon ausgegangen werden, dass die Grenzwerte  $r_{u,i}^c$  logarithmisch normalverteilt sind. Folglich sind diese in den logarithmischen Raum zu transformieren ( $y_i$ ) und deren arithmetischer Mittelwert ( $\bar{y}$ ) zu bilden. Anschließend wird die Standardabweichung  $s_y$  bestimmt.

$$y_i = \ln(r_{u,i}^c) \quad (2)$$

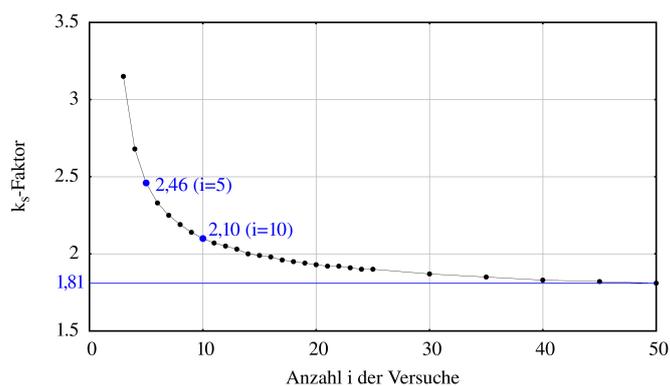
$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

Wie in Abs. 2.1 bereits erwähnt, wird aus wirtschaftlichen Gründen i.d.R. nur die notwendige Anzahl an Versuchen durchgeführt. Um dennoch eine statistisch belastbare Aussage zu ermöglichen, wird der Faktor  $k_{s,k}$  eingeführt, wie er in [7, Tab. 4] angegeben ist. Mit diesem wird die Standardabweichung beaufschlagt, um die epistemische Unschärfe bei einer geringen Anzahl an Versuchen zu berücksichtigen, siehe Gl. (5) zur Bestimmung des 5%-Fraktilwerts  $y_5$ .

$$y_5 = \bar{y} - k_{s,k} \cdot s_y \quad (5)$$

In Abb. 4 ist der Faktor  $k_{s,k}$  in Abhängigkeit der Anzahl  $i$  an Versuchen dargestellt, wie er in [7, Tab. 4] gegeben ist. Dieser Verlauf zeigt, dass bis  $i=5$  Versuchen der Wert sich stark verringert, um dann für  $i \rightarrow \infty$  asymptotisch gegen den Wert 1,81 zu streben. Dieser Verlauf



**Abbildung 4:** Faktor  $k_{s,k}$  zur Berücksichtigung der epistemische Unschärfe

verdeutlicht die geforderte Mindestanzahl von fünf Versuchen, sofern die gleiche Versagensursache vorliegt. Auch ist ab einer Versuchsanzahl  $> 10$  der Aufwand enorm, um den  $k_s$ -Faktor spürbar zu reduzieren, was aus ersichtlichen Gründen üblicherweise nicht praktiziert wird. Um den Bemessungswert der Tragfähigkeit  $R_{k,b}$  zu bestimmen, erfolgen die Rücktransformation aus der logarithmischen Normalverteilung sowie die anschließende Abminderung mit Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M=1,1$  nach [5, Abs. 10.3.2.2], wie Gl. (6) sie angibt.

$$R_d = R_{k,nom}/\gamma_M = e^{y_5}/\gamma_M \quad (6)$$

## 2.4.2 Last-Verformungsbeziehung

Nach [2, G05-3] ist abweichend von [7, Abs. 10.10] bei der Auswertung von horizontalen Ebenen ausschließlich die Belastungskurve zu verwenden. Da diese Versuche mit einer zyklischen Belastung erfolgen, werden die einzelnen Versuchskurven im positiven wie auch negativem Bereich, nach Überwinden des Spiels, jeweils durch eine lineare Funktion approximiert. Hierfür sind die Stützstellen entsprechend dem Verlauf zu wählen. Der Abstand der beiden Schnittpunkte der approximierten Steifigkeitsfunktionen  $c_1$  und  $c_2$  mit der Abszisse werden als doppeltes Spiel  $2 \cdot f_0$  interpretiert.

Die ermittelten Steifigkeitsfunktionen können direkt statistisch ausgewertet werden, da geometrische oder werkstoffliche Abweichungen nicht zu berücksichtigen sind, wie es bspw. in [6] für Palettenregale beschrieben ist. Die statistische Auswertung der Steifigkeiten erfolgt nicht über die Steifigkeiten, sondern über die zugehörigen Nachgiebigkeiten, aus denen dann der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}_j$  gebildet wird. Da die Verschiebungsgrößen, und damit auch die Steifigkeiten, als logarithmisch normalverteilt angenommen werden, wird über die Transformation der Steifigkeiten in den logarithmischen Raum letztendlich der Variationskoeffizient  $V_{x,j}$  bestimmt, siehe Gl. (7)-(11).

$$\bar{x}_j = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{i,j}}} \quad (7)$$

$$y_{i,j} = \ln x_{i,j} \quad (8)$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{i,j} \quad (9)$$

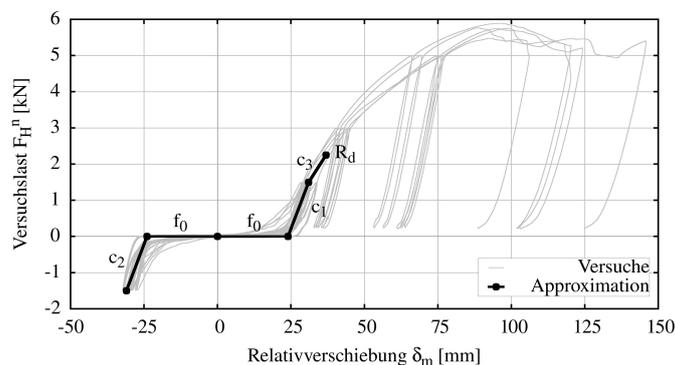
$$S_{y,j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_{i,j}^2 - \bar{y}_j^2} \quad (10)$$

$$V_{x,j} = \sqrt{e^{S_{y,j}^2} - 1} \quad (11)$$

Um die Last-Verformungsbeziehung auf Bemessungsniveau zu bringen, wird die mittlere Steifigkeit  $\bar{y}_j$  durch den Abminderungsbeiwert  $a$  dividiert, siehe Gl. (12), welcher vom Variationskoeffizient  $V_{x,j}$  abhängig ist.

$$c_j = \bar{y}_j/a_j \quad \text{mit} \quad a_j = 1,1 - V_{x,j} \leq 1,0 \quad (12)$$

Die Steifigkeitsfunktion ist bis zur Tragfähigkeit  $R_d$ , siehe Abs. 2.4.1, zu führen. Sofern der Variationskoeffizient  $V_{x,j} \leq 0,1$  ist, ist keine Abminderung vorzunehmen, wohingegen bei  $V_{x,j} \geq 0,4$  eine statistische Auswertung nicht sinnvoll erscheint und die Konfiguration konstruktiv anzupassen ist. Diese Steifigkeitsfunktion ist als Bemessungswert anzusehen, so dass der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  nicht mehr zu berücksichtigen ist. In Abb. 5 sind die Versuchskurven der ausgewerteten Last-Verformungsbeziehung gegenübergestellt. Hierfür wurden die Versuchskurven in die Nulllage verschoben, so dass die Spiel  $f_0$  im Ursprung beginnt und symmetrisch zu diesem ist.



**Abbildung 5:** Horizontale Ebene: Vergleich der Steifigkeitsfunktion mit den Versuchskurven

Üblicherweise wird bei den horizontalen Ebenen die Belastungsrichtung nicht unterschieden und eine vereinheitlichte Kennlinie für beiden Richtungen angegeben. Sofern die Abweichung zwischen den zugehörigen Steifigkeiten (hier  $c_1$  und  $c_2$ ) nicht größer als 10% ist, wird der arithmetische Mittelwert verwendet, anderenfalls ist der ungünstigere der beiden Werte zu verwenden, siehe hierzu [7, Abs. 10.10].

### 3 Schlussbemerkung

In diesem Beitrag wurde die Auswertung von versuchstechnisch ermittelten Kennwerten von Verbindungen im Gerüstbau nach [7] vorgestellt. Da die hergestellten Bauteile bzw. deren Komponenten i.d.R. keine nominellen geometrischen und werkstofflichen Eigenschaften aufweisen, entsteht folglich eine natürliche, alliiatorische Unschärfe in den Versuchsergebnissen. Aufgrund der Abminderung mit den maximalen Faktoren der beteiligten Komponenten, entstehen oftmals konservative Bewertungen der Ergebnisse. Auch die epistemische Unschärfe, welche durch die üblicherweise geringe Anzahl an Versuchen bedingt ist, wird in der statistischen Auswertung berücksichtigt.

## Literatur

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik: *Zulassungsgrundsätze für Arbeits- und Schutzgerüste - Anforderungen, Berechnungsannahmen, Versuche, Übereinstimmungsnachweise*. April 2008
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik: *Aus der Arbeit des Sachverständigenausschuss "Gerüste"*. Januar 2019
- [3] Norm DIN 4420-1 März 2004. *Arbeits- und Schutzgerüste - Teil 1: Schutzgerüste - Leistungsanforderungen, Entwurf, Konstruktion und Bemessung*
- [4] Norm DIN EN 12810-2 März 2004. *Fassadengerüste aus vorgefertigten Bauteilen - Teil 2: Besondere Bemessungsverfahren und Nachweis*
- [5] Norm DIN EN 12811-1 Februar 2003. *Temporäre Konstruktionen für Bauwerke, Teil 1: Arbeitsgerüste - Leistungsanforderungen, Entwurf, Konstruktion und Bemessung*
- [6] Norm DIN EN 15512 Juni 2022. *Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl - Verstellbare Palettenregale - Grundlagen der statischen Bemessung*
- [7] Norm DIN EN 12811-3 Februar 2003. *Temporäre Konstruktionen für Bauwerke, Teil 3: Versuche zum Tragverhalten*
- [8] Norm DIN EN 12812 Dezember 2008. *Traggerüste - Anforderungen, Bemessung und Entwurf*
- [9] Norm DIN EN 1993-1-1 - Entwurf August 2020. *EUROCODE 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [10] Norm DIN EN 1993-1-8 - Entwurf März 2021. *EUROCODE 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*