

**Die Leipziger Bundwand**  
**Berechnung und Bemessung**  
**einer**  
**historischen Verbundkonstruktion**

von

**Ronald Schrank**

Bericht Nr. 6 (2003)

Universität Leipzig  
Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. R. Thiele  
Prof. Dr.-Ing. M. Kaliske

Von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität  
Leipzig genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademi-  
schen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Thiele  
Prof. Dr.-Ing. P. Osterrieder  
Dr.-Ing. N. V. Tue

Tag der Verleihung: 07. 07. 2003

Berichte aus dem Institut für Statik und Dynamik der  
Tragstrukturen

Band 6

**Ronald Schrank**

**Die Leipziger Bundwand**

Berechnung und Bemessung einer  
historischen Verbundkonstruktion

Shaker Verlag  
Aachen 2003

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1877-7

ISSN 1615-8423

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## KURZFASSUNG

Ausfachungen aus Mauerwerk werden rechnerisch bisher nicht am Lastabtrag vertikal beanspruchter Rahmenstrukturen beteiligt. Diese Annahme widerspricht den in der Praxis angetroffenen Tragfähigkeiten am Beispiel tragender Innenwände in historischen Wohnbauten aus der Gründerzeit („Leipziger Bundwand“).

Diese Arbeit verdeutlicht die Tragwirkung derartiger Verbundkonstruktionen, welche in ein statisches Modell auf Basis der Finite-Elemente-Methode umgesetzt wird. Schwerpunkte der numerischen Formulierung sind die Abbildung des Verbundes zwischen Mauerwerk und Holz sowie die Realisierung des anisotropen Festigkeitsverhaltens des Mauerwerks. Die für eine Tragfähigkeitsbewertung erforderlichen Aussagen zu den Materialeigenschaften des historischen Mauerwerks und zur Verbundwirkung werden durch umfangreiche eigene Materialprüfungen gewonnen. Auf Basis dieser Grundlagen entsteht unter Nutzung moderner Berechnungsmethoden ein für die Ingenieurpraxis einfach anwendbares und wirtschaftliches Bemessungskonzept, welches zum Erhalt wertvoller historischer Bausubstanz beiträgt.

## ABSTRACT

Infill masonry isn't assumed to be a bearing element of vertically loaded frame structures. This fact is contrary to the load-bearing capacity being noticed concerning load-bearing interior walls as a main part of historical residential buildings erected around 1900.

This thesis clarifies the load-bearing behavior being performed into a static model on the basis of the finite-element-method. Main aspects of the numerical implementation are the reproduction of the compound mechanism between masonry and wood as well as the realization of the anisotropic strength state of masonry. Informations about the compound effect and the material properties of the historical masonry are essential to evaluate the load-bearing capacity. They are gained by extensive material tests. A simply applicable and economic design concept arises from this basis - using modern numerical technologies and contributing to the protection of historical constructions.

## VORWORT

Nach gut dreijähriger Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig konnte ich die Ergebnisse meiner Forschungstätigkeit in der vorliegenden Arbeit zusammenfassen.

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. R. Thiele bedanken. Als Projektleiter stand er mit fachlichem Rat stets zur Verfügung und regte gewinnbringende Diskussionen und Fragestellungen an. Die ebenfalls dankenswerte finanzielle Förderung des Vorhabens durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geht größtenteils auf sein Engagement zurück.

Für die Übernahme der weiteren Gutachten danke ich Herrn Dr.-Ing. habil. N. V. Tue, designierter Leiter des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Leipzig sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Osterrieder, Leiter des Lehrstuhls für Statik und Dynamik der BTU Cottbus.

Die Untersuchungen von Herrn Dr.-Ing. H.-A. Biegholdt lieferten einen grundlegenden Ansatzpunkt für diese Arbeit. Seiner Diskussionsbereitschaft gilt besonderer Dank. Ohne ihn wäre eine derartige Vertiefung in die Problematik nicht möglich gewesen.

Weiterhin möchte ich allen (auch mir bekannten ehemaligen) Mitarbeitern des Instituts für Statik und Dynamik der Tragstrukturen der Universität Leipzig für das freundliche „Betriebsklima“ danken, insbesondere Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. J. Schmidt für die fachlichen Diskussionen und die Durchsicht der Arbeit sowie Herrn P. Winkler für die handwerkliche Unterstützung bei der Versuchsvorbereitung.

Die wertvollen Ergebnisse der umfangreichen experimentellen Untersuchungen sind nicht zuletzt der guten Zusammenarbeit mit der MFPA Leipzig (Herrn Dipl.-Ing. M. Becker, Herrn Dipl.-Ing. B. Wolf) und der HTWK Leipzig (Herrn Dr.-Ing. T. Klink, Herrn Dr.-Ing. L. Fiedler, Herrn Dr.-Ing. G. Kapphahn) zu verdanken. Durch die Kooperation mit dem Hochbauamt Leipzig, dem Bauordnungsamt Leipzig, dem Amt für Stadtsanierung Leipzig und der LESG wurde der Zugang zu geeigneten Versuchsobjekten ermöglicht.

Schließlich gilt großer Dank meiner Familie und Verwandten sowie Freunden und Bekannten. Das angenehme private Umfeld, Entspannung und Ablenkung haben großen Anteil an der konsequenten Durchführung dieser Arbeit, meiner persönlichen Motivation und dem Blick in die Zukunft.

Ronald Schrank

Jüterbog, Juli 2003

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Symbole, Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problem und Zielstellung	1
1.2 Stand der Forschung, Literaturübersicht	2
1.2.1 Materialeigenschaften von Mauerwerk und Holz	2
1.2.2 Berechnung von Mauerwerkswänden	3
1.2.3 Ausfachungen aus Mauerwerk	4
<b>2 Die Leipziger Bundwand</b>	<b>5</b>
2.1 Konstruktion und Bauausführung	5
2.2 Tragverhalten	6
<b>3 Materialeigenschaften</b>	<b>9</b>
3.1 Mauerwerk	9
3.1.1 Allgemeines	9
3.1.2 Mauerziegel	9
3.1.2.1 Biegezug- und Druckfestigkeit	9
3.1.2.2 Elastizitätsmodul	11
3.1.3 Mauermörtel	14
3.1.4 Mauerwerk	14
3.1.4.1 Druckfestigkeit	14
3.1.4.2 Elastizitätsmodul	19
3.1.4.3 Querdehnzahl	22
3.1.4.4 Biegezugfestigkeit	23
3.1.5 Zerstörungsfreie Prüfung der Steindruckfestigkeit	26
3.2 Holz	28
3.3 Langzeitverhalten	29
3.3.1 Mauerwerk	30
3.3.2 Holz	32
3.4 Verbund Mauerwerk-Holzstiel	33
3.4.1 Allgemeines	33
3.4.2 Versuchsaufbau	33
3.4.3 Versuchsmaterial	34
3.4.4 Versuchsdurchführung	35
3.4.5 Auswertung	36
<b>4 Modellbildung mit Hilfe der FEM</b>	<b>41</b>
4.1 Allgemeines	41
4.2 Aufbau der FE-Struktur	41
4.3 Versagenskriterien	43
4.3.1 Allgemeines	43
4.3.2 Mauerwerk	43
4.3.2.1 Aufnahme des Biegemomentes $m_y$	43
4.3.2.2 Aufnahme des Biegemomentes $m_x$	44
4.3.2.3 Aufnahme des Drillmomentes $m_{xy}$	44
4.3.2.4 Aufnahme der Plattenquerkräfte	45

4.3.2.5	Interaktionsbedingung	46
4.3.3	Holz	48
4.4	Materialgesetze für Mauerwerk	48
4.4.1	Allgemeines	48
4.4.2	Materialgesetz für (Stahl-)Beton	49
4.4.3	Drucker-Prager-Fließbedingung	49
4.4.4	Mohr-Coulomb-Fließbedingung mit Restfestigkeiten	50
4.4.5	Vergleich der Fließflächen nach Drucker-Prager und Mohr-Coulomb	51
<b>5</b>	<b>Verifikation des FE-Modells</b>	<b>53</b>
5.1	Allgemeines	53
5.2	Vergleich der FE-Lösungen mit analytischen Lösungen und Ergebnissen geltender Normen für reine Mauerwerkswände	53
5.2.1	Vergleich in Anlehnung an DIN 1053-1	53
5.2.2	Vergleich in Anlehnung an EC 6	57
5.3	Vergleich der FE-Lösungen mit den Ergebnissen durchgeführter Traglastversuche	61
5.3.1	Allgemeines, Versuchskonzept	61
5.3.2	Versuchsdurchführung	62
5.3.3	Versuchsergebnis	63
5.3.4	Auswertung und Vergleich mit Ergebnissen der FE-Analyse	64
5.3.4.1	Allgemeines	64
5.3.4.2	Versuch 1: Einstielige Bundwand ohne angrenzende Türöffnung	64
5.3.4.3	Versuch 2: Einstielige Bundwand mit angrenzender Türöffnung	67
<b>6</b>	<b>Bemessung</b>	<b>71</b>
6.1	Allgemeines	71
6.2	Vorbetrachtungen	72
6.2.1	Lastannahmen bezüglich relevanter Gebäude	72
6.2.2	Vergleich der Sicherheitsniveaus: DIN 1053-1 u. EC 6	73
6.2.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	73
6.2.4	Nachweis der Mindestauflast	75
6.2.5	Ansatz der Restfestigkeit	76
6.3	Parameterstudien am FE-Modell	83
6.3.1	Allgemeines	83
6.3.2	Zweistielige Bundwand	84
6.3.2.1	Keine angrenzenden Türöffnungen - Typ I	84
6.3.2.2	Eine angrenzende Türöffnung - Typ II	87
6.3.2.3	Zwei angrenzende Türöffnungen - Typ III	90
6.3.3	Einstielige Bundwand	91
6.3.3.1	Keine angrenzende Türöffnung - Typ IV	91
6.3.3.2	Eine angrenzende Türöffnung - Typ V	94
<b>7</b>	<b>Analytische Berechnungsmodelle</b>	<b>97</b>
7.1	Allgemeines	97
7.2	Plattenmodell nach [Biegholdt 2001]	97
7.3	Knickstabmodell	98
<b>8</b>	<b>Stochastische FE-Simulation von Mauerwerk</b>	<b>103</b>
8.1	Motivation	103
8.2	Vorgehensweise	103

---

8.3	Generierung der stochastischen Materialeigenschaften	104
8.3.1	Allgemeines	104
8.3.2	Druckfestigkeit des Einzelsteins i	105
8.3.3	Biegezugfestigkeit des Einzelsteins i	105
8.3.4	Druckfestigkeit des repräsentativen Mauerwerkselementes i	106
8.3.5	Biegezugfestigkeit des repräsentativen Mauerwerkselementes i	107
8.3.6	Steifigkeit eines repräsentativen Mauerwerkselementes i	107
8.4	FE-Simulation und Auswertung	108
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>113</b>
<b>10</b>	<b>Literatur</b>	<b>115</b>
<b>Anhang</b>		<b>A1</b>
A.1	Weitere Traglastversuche an bestehenden Konstruktionen	A1
A.1.1	Versuch 3: Einstielige Bundwand mit angrenzender Türöffnung	A1
A.1.2	Versuch 4: Einstielige Bundwand ohne angrenzende Türöffnung	A4
A.1.3	Versuch 5: Einstielige Bundwand ohne angrenzende Türöffnung	A7
A.1.4	Versuch 6: Einstielige Bundwand ohne angrenzende Türöffnung	A10
A.2	Bemessungsvorschlag und Bemessungsdiagramme	A12
A.2.1	Allgemeine Hinweise und Anwendungsgrenzen	A12
A.2.2	Bemessungsgleichungen	A13
A.2.3	Bemessungsdiagramme	A14
A.2.4	Zerstörungsfreie Prüfung der Steindruckfestigkeit	A35
A.2.5	Bemessungsbeispiele	A36

## SYMBOLE, ABKÜRZUNGEN

Hier nicht aufgeführte Symbole und Abkürzungen sind direkt im Text erläutert.

### Geometrie

$h$	Wandhöhe (Mauerwerksausfachung)
$h_{TÖ}$	Höhe an die Bundwand anschließender Türöffnungen
$b$	Wandbreite (Mauerwerksausfachung)
$b_{HS}$	Breite der Holzstiele
$b_{TÖ}$	Breite an die Bundwand anschließender Türöffnungen
$d$	Wanddicke (Mauerwerk und Holzstiele)
$h_K$	Knicklänge der Wand
$\bar{\lambda}$	Schlanckheit, $\lambda = h_K / d$
$h_{St}$	Steinhöhe
$d_F$	Fugendicke
$\ddot{u}$	Überbindemaß (Überlappung der Steine im Verband)

### Lastannahmen

$g$	ständige Last (charakteristischer Wert)
$p$	veränderliche Last (charakteristischer Wert)

### Beanspruchungen

#### Mauerziegel

$\sigma_{x,z,St}$	zweiachsale (horizontale) Zugspannungen infolge Vertikaldruck im Mauerwerk
$\sigma_{BZ,St}$	einachsale (horizontale) Biegezugbeanspruchung
$\sigma_{y,St} = \sigma_y$	Vertikaldruckspannungen

#### Mauerwerk

$\sigma_D = \sigma_y$	Vertikaldruckspannungen im Mauerwerkskontinuum
$\sigma_{y,m}$	über die Wanddicke gemittelte Vertikaldruckspannung
$\sigma_{BZ} = \sigma_x$	Horizontalbiegezugspannungen im Mauerwerkskontinuum
$\tau_{xy}$	Schubspannungen infolge des Drillmomentes
$m_x$	auf die Wandhöhe bezogenes Biegemoment in der Mauerwerksplatte, erzeugt Spannungen $\sigma_x$
$m_y$	auf die Wandbreite bezogenes Biegemoment in der Mauerwerksplatte, erzeugt Spannungen $\sigma_y$
$m_{xy}$	Drillmoment in der Mauerwerksplatte
$M_x$	auf einen Stein entfallendes Biegemoment, erzeugt Spannungen $\sigma_x$
$M_y$	auf einen Stein entfallendes Biegemoment, erzeugt Spannungen $\sigma_y$
$T$	auf ein Stein entfallendes Schubkraftpaar in der Lagerfuge
$S$	auf die Mauerwerkswand wirkende Vertikalkraft bzw. auf den Ersatzstab wirkende Stabkraft
$S_B$	entsprechend $S$ , im Sinne der Bruchkraft

## Holz

$\sigma_{B, Ho}$	Biegespannungen im Holzstiel, parallel zur Faserrichtung
$\sigma_{D90, Ho}$	Druckspannungen im Holzstiel, senkrecht zur Faserrichtung

## Festigkeiten, zulässige Spannungen

### Mauerziegel

$f_{D, St}$	Steindruckfestigkeit (Einzelwert)
$f_{D, St, m}$	mittlere Steindruckfestigkeit
$f_{D, St, k}$	charakteristische Steindruckfestigkeit
$f_{BZ, St}$	Steinbiegezugfestigkeit (Einzelwert)
$f_{BZ, St, m}$	mittlere Steinbiegezugfestigkeit
$f_{BZ, St, k}$	charakteristische Steinbiegezugfestigkeit
$f_{Z, St}$	zentrische Steinzugfestigkeit (Einzelwert)
$f_{Z, St, m}$	mittlere zentrische Steinzugfestigkeit
$f_{Z, St, k}$	charakteristische zentrische Steinzugfestigkeit
$f_{x/z, St}$	zweiachsale Steinzugfestigkeit

### Mauermörtel

$f_{D, M0}$	(mittlere) Mörteldruckfestigkeit
-------------	----------------------------------

### Mauerwerk

$f_{D, MW}$	Mauerwerksdruckfestigkeit (Einzelwert)
$f_{D, MW, m}$	mittlere Mauerwerksdruckfestigkeit
$f_{D, MW, k}$	charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit
$\beta_M$	Nennfestigkeit [DIN 1053-1]
$\beta_R$	Rechenwert der Mauerwerksdruckfestigkeit [DIN 1053-1]
$\sigma_0$	zulässige Mauerwerksdruckspannung [DIN 1053-1]
$f_{BZ, MW}$	Mauerwerksbiegezugfestigkeit, allgemein
$f_{BZ, MW, m}$	mittlere Mauerwerksbiegezugfestigkeit
$f_{BZ, MW, k}$	charakteristische Mauerwerksbiegezugfestigkeit
$f_{BZ, R}$	Restbiegezugfestigkeit
$\mu_F$	Reibungsbeiwert (Lagerfugen)
$f_{R, HS}$	Rechenwert der Haftscherfestigkeit in der Lagerfuge

## Holz

$f_{B, Ho, k}$	charakteristische Biegefestigkeit in Faserrichtung
$f_{D90, Ho, k}$	charakteristische Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung

## Mauerwerk / Holz

$\mu_H$	Haftreibungszahl in der Verbundfuge
$\mu_G$	Gleitreibungszahl in der Verbundfuge

## Steifigkeitswerte

### Mauerziegel

$E_{St} = E_{St,stat}$	Elastizitätsmodul, allgemein
$E_{St,stat}$	statisch gemessener Elastizitätsmodul
$E_{St,dyn}$	dynamisch gemessener Elastizitätsmodul
$\mu_{St}$	Querdehnzahl

### Mauermörtel

$E_{m\ddot{o}}$	Elastizitätsmodul
$\mu_{M\ddot{o}}$	Querdehnzahl

### Mauerwerk

$E_{MW}$	Elastizitätsmodul (Druck, senkrecht zur Lagerfuge)
$E_{MW,\infty}$	Langzeitelastizitätsmodul
$\varphi_{\infty,MW}$	Endkriechzahl
$\varphi_{\infty,MW,eff}$	effektive Endkriechzahl
$\mu_{MW}$	Querdehnzahl

### Holz

$E_{0,Ho}$	Elastizitätsmodul des Holzes in Faserrichtung
$E_{90,Ho}$	Elastizitätsmodul des Holzes senkrecht zur Faser
$E_{\dots,Ho,\infty}$	Langzeitelastizitätsmodul
$G_{Ho}$	Schubmodul des Holzes
$k_{def,eff}$	effektiver Verformungsbeiwert (Endkriechzahl)

## Verformungen

$f_0$	ungewollte Ausmitte des Mauerwerks in halber Wandhöhe
$w_0$	Verformung des Mauerwerks infolge Theorie II. Ordnung in halber Wandhöhe

## Sicherheitsbeiwerte

### Mauerwerk

$\gamma$	globaler Sicherheitsfaktor [DIN 1053-1]
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaften [EC 6]

### Holz

$\gamma_{M,Ho}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaft [E DIN 1052]
-----------------	---