



*Dr. Karsten Tichelmann  
Prof. Ing. ITL Institut für  
Trocken- und Leichtbau  
VHT Institut und Versuchsanstalt  
für Holz- und Trockenbau  
Darmstadt, Deutschland*

## **Verwendung leichter Tragsysteme zur Ertüchtigung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude**

**The use of light-weight supporting structures to enhance the seismic safety of existing buildings**

**Uso di sistemi portanti leggeri per aumentare la sicurezza sismica di edifici esistenti**

**Dokument in Deutsch**



# Verwendung leichter Tragsysteme zur Ertüchtigung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude

Nichttragende und tragende Systeme in Leichtbauweise wie z. B. in Holzständerbauweise finden zunehmend Einsatz in Bauwerken in Mischbauweise. Leichte Ständerwandsysteme mit Plattenbekleidung wie wir diese aus dem Holzbau und dem Trockenbau kennen, sind sehr geeignete Bauelemente für das Bauen in Erdbebengebieten. Sie sind leicht, besitzen gute elastische Formungseigenschaften und signalisieren ihr Versagen durch ein sich frühzeitig ankündigendes Versagensbild. Die Zwänge einer nachhaltigen Nutzung führen zu einer Flexibilisierung der Gebäude und damit einhergehend zu dem Rückbau nichttragender massiver Ausbauelemente und Fassaden bzw. Außenwänden. Dabei werden Ständerwandssysteme überwiegend als Substitut für nichttragende, massive und monolithische Konstruktionen in diesen Gebäuden eingesetzt. Dabei handelt es sich vorrangig um Tragstrukturen in Stahlbetonskelettbauweise oder Stahlbeton bzw. Mauerwerks-Schottenbauweise.

Nichttragende Wände und das Schließen von Gefachen mit Mauerwerk sind in diesem Zusammenhang für die Abtragung von Erdbebenkräften ungeeignet – auch wenn dies weltweit verbreitet ist. Eine Aussteifung von Rahmen durch Mauerwerkswände ist aus folgenden Gründen nicht zu empfehlen:

- Mauerwerkswände können durch eine Beanspruchung quer zur Ebene vorzeitig versagen, vor allem dann, wenn sie nicht oben und seitlich gehalten werden. Die Vertikalbelastung der Wände kann sich diesbezüglich günstig auswirken.
- Mauerwerkswände sind im Vergleich zu Skelett-Tragwerken steif und spröde. Zu Beginn der Erdbebenbeanspruchung übernehmen diese die volle Erdbebenlast, sie können Horizontalkräfte jedoch praktisch nur durch die Bildung von Druckdiagonalen abtragen. Deren Neigung zur Senkrechten der Lagerfuge ist meist so groß, dass Gleiten der Lagerfuge erfolgt. Demzufolge werden sie durch Erdbebenbeanspruchung rasch überfordert und versagen.
- Die aus der Ausfachungswirkung resultierende Schubbelastung der Rahmenstützen kann zu einem Versagen der Wände führen. Die Stützen werden durch die Füllwände derart geschädigt, dass sie nach Ausfall der Mauerwerksausfachung nicht mehr in der Lage sind, die vertikalen Nutzlasten und die Erdbebenkräfte abzutragen.

Besonders ungünstig ist auch die Teilausfachung von Rahmen wie z. B. im Fall von Aufmauern von Fensterbrüstungen. Dadurch ergeben sich kurze Stützen, die von sprödem Schubversagen gefährdet sind.

Der Einsatz neuer leichter raumabschließender Bauteile wird in verschiedensten Formen eingebracht. Im Wesentlichen handelt es sich um nichttragende Ausbauelemente z. B. in Form von Ständerwänden mit Unterkonstruktionen aus Holz oder Metall und hochgedämmten Außenwandssystemen.

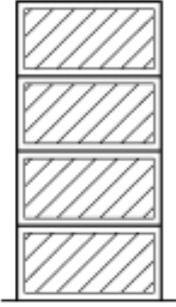
Als reine nichttragende Strukturen liegt der Beitrag von Systemen in Leichtbauweise in der Ertüchtigung der Erdbebensicherheit in der Reduktion der Masse des Gesamtgebäudes. Durch die induzierten Beschleunigungen der Bodenbewegungen in das Bauwerk werden die Reaktionskräfte infolge der Massenträgheit durch die geringere Masse reduziert. Neben der Reduktion der inneren Beanspruchung wird auch die Eigenfrequenz des Gebäudes durch die leichte Ausbaustruktur verändert.

Beiträge leisten vor allem leichte Ausbauelemente:

- Ständerwandsysteme
- Trockenunterbodensysteme
- leichte Decken- und Unterdeckensysteme
- Leichte Außenwände in Holztafelbauweise.

Wie bereits dargestellt, haben sich Ausfachungen mit Mauerwerk unter dynamischer Belastung als negativ herausgestellt, da es spröde ist und somit schlagartig versagt. Füllungen mit Betonscheiben haben den Nachteil des hohen Flächengewichtes. Dies erhöht die Masse und somit die Erdbebenlasten. Daher werden Ausfachungen mit Leichtbauwänden empfohlen.

Tabelle 1: Verhaltensbeiwerte für ausgefachte biegesteife Rahmen

| Tragwerkstyp   | Skizze und Schätzwert $\frac{\alpha_u}{\alpha_1}$                                  | Verhaltensbeiwert q   |
|--|--|---|
| Mischtragwerke<br><br>Dabei wird unterschieden in:<br>a) Ausfüllung ohne Verbundwirkung, aber mit Kontakt<br>b) Ausfüllung mit Verbundwirkung<br>c) Ausfüllung mit konstruktiver Trennung von der Rahmenkonstruktion |  | a) $q = 2$<br>b) in Abhängigkeit der Ausfüllung<br>c) wie Rahmentragwerke |

Werden die leichten Ausbau- und Fassadenstrukturen nicht allseitig gleitend und verformbar in das Tragsystem eingebaut, werden die Verformungen der Tragkonstruktion unter Erdbebenbeanspruchung auch den "nichttragenden Bauteilen" aufgezwungen.

Diese Tragwerksverformung und insbesondere die relativen Geschoßverschiebungen haben speziell bei elastischen Bauwerken wie Skelett- und Rahmenkonstruktionen ( $t > 0,5$  s) erhebliche Auswirkung auf nichttragende Elemente und können von diesen negativ, aber auch positiv beeinflusst werden. Diese Einflüsse sind:

- Reduzierung der Masse und Veränderung der Massenverteilung
- Veränderung der lokalen und globalen Steifigkeit
- Reduzierung der Einwirkungen auf die angrenzenden Stützen und Platten.

Solche Elemente mit einer "wesentlichen Steifigkeit", wie nichttragende Innenwände, hochgedämmte Fassadenbauteile und Außenwandkonstruktion in Holzständerbauweise können mit dem Tragwerk fest verbunden, oder durch flexible Fugen vom Tragwerk abgetrennt werden. Diese "nichttragende Bauteile" haben einen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften des Tragwerks und die resultierende Antwort vor allem dann, wenn sie steif mit dem Tragwerk verbunden sind. In solchen Fällen kann ein Großteil der induzierten Bewegungsenergie von den nichttragenden Ausbauteilen, wie z. B. Holzständerwänden und von ihren Verbindungsgliedern aufgenommen werden.

Steife Verbindungen bewirken eine Zunahme der Systemsteifigkeit und der gesamten Dämpfungskapazität, eine Änderung der relativen Lastverteilung auf die Tragelemente und beträchtliche Torsionsmomente, besonders dann, wenn die nichttragenden Bauteile die Symmetrie und die Regelmäßigkeit eines Tragwerks stören. Diese negative Beeinflussung wird umso größer je höher die Masse dieser nichttragenden Ausbauelemente ist und wenn diese bei der Tragwerksauslegung nicht berücksichtigt werden. Die Massenverteilung und die Veränderung der Steifigkeit bei massiven nichttragenden Ausbausystemen führen dazu, dass die in der dynamischen Berechnung angenommenen Charakteristika des Tragwerks nicht mehr realistisch sind und die Steifigkeitsverhältnisse nicht mehr kontrollierbar sind.

Je nachgiebiger ein Tragwerk ist, z. B. bei Skelettkonstruktion, desto ungünstiger wirken sich diese Effekte auf dessen Reaktion aus. Die Sicherheit von nichttragenden Ausbauelementen in Leichtbauweise, die in der Regel nur auf ihr Eigengewicht ausgelegt sind, darf im Rahmen der Sicherheitsanalyse von Bauwerken nicht vernachlässigt werden. Besonders steife Elemente erfahren über ihre Anschlüsse unterschiedliche Beschleunigung und entwickeln eigene dynamische Systeme. Die Größe der übertragenen Beschleunigung hängt von der Steifigkeit der Anschlüsse der Ständerwandkonstruktionen an die Rohbaukonstruktion ab.

Eine latente Gefahr einer Beschleunigungsverstärkung besteht bei flexiblen Anschlüssen von sehr steifen Elementen, wobei sich das System mit der Masse des Elementes und der Steifigkeit seiner Anschlüsse wie ein Ein-Massen-Schwinger verhält.

Eine negative Interaktion bzw. ungewollte Wechselwirkung zwischen Tragwerk und sekundären Ausbauelementen kann vermieden werden, wenn diese durch Fugen getrennt und über biegeweiche Verbindung angeschlossen werden. Dabei muss die Breite der Fugen mindestens die Größe der relativen Geschoßverschiebung betragen. Im Hinblick auf eigene Schäden an diesen nichttragenden Ausbauelementen, die fest mit dem Tragwerk verbunden sind, gilt für die Breite von gleitenden Anschlüssen von Fassadenbauteilen ein Richtwert von ca. 60% der relativen Geschoßverschiebung und für nichttragende Innenwände in Form von Metall oder Holzständerwänden ein Richtwert von mind. 25%.

Die Gestaltung und Auslegung der Befestigungsmechanismen von "nichttragenden" Elementen mit dem Tragwerk in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Elemente und dem gewünschten Maß an Interaktion in der Erdbebenantwort mit dem Tragwerk muss bewusst erfolgen. Die hierfür nötigen Parameter sind die Steifigkeit und die Duktilität sowie das Grenzmaß der zugewiesenen Lasten an diese unter normalen Bedingungen nichttragenden Systeme im Erdbebenfall jedoch zur Aussteifung wirksamen Systeme. Vorteilhaft werden diese Ständerwandkonstruktionen nichttragender Ausbauelemente teilweise durch Bewegungsfugen getrennt oder punktweise duktil befestigt.

Die Verwendung leichter Ausbausysteme und leichter Fassadenelemente zur Ertüchtigung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude bietet die wesentlich sinnhaftere Möglichkeit, diese Elemente in das tragende System einzubeziehen.

## 1 Nichttragende, aussteifende Fassadenelemente

In seismisch aktiven Regionen kommt zu den Außenwandbauteilen und Fassadenelementen zusätzlich die erdbebensichere Ausführung hinzu. Dabei müssen die Bauteile selbst und die Anschlüsse sicher gegen Erdbeben gestaltet werden.



Abbildung 1: Fassadenelemente

Außenwände werden traditionell nach wie vor oftmals in Mauerwerk erstellt. Dazu werden Rahmen mit Mauerwerkswänden ausgefacht. Wie auch schon bei den Trennwänden erläutert, sind Mauerwerkswände aus erdbebentechnischer Sicht ungünstig. Besonders schlecht sind so genannte Teilausfachungen, die bei der Aufmauerung von Fensterbrüstungen oder Oberlichter eingesetzt werden. Hier tritt das Problem der „kurzen Stütze“ auf, das Tragwerk ist akut einsturzgefährdet.



Abbildung 2: Gefährdung durch herabgefallene massive Fassaden (Loma Prieta 1989)

Nichttragende Außenwände in Holztafelbauweise wie diese zunehmend für Mischkonstruktionen eingesetzt werden, können einen wesentlichen Beitrag zur Erdbebensicherung leisten. Dies liegt vor allem in ihrem sehr duktilen Verhalten bei gleichzeitig hoher Steifigkeit. Außenwand-Fassadenelemente wiegen je nach dem Material der Fassadenbekleidung zwischen 40 und 100 kg/m<sup>2</sup>.

Weiterhin besteht ihr Beitrag darin, wenn sie mit flexiblen Befestigungen versehen werden, keine zusätzlichen Lasten auf die vertikalen Tragglieder auszuüben. Eine "weiche" Versteifung von vertikalen lastabtragenden Bauteilen reduziert deren Knicklänge, die bei ursprünglich gelenkig gelagerten Anschlüssen als Teileinspannung durch die in der Verformungsebene liegenden Fassadenelemente in ihrem Ausweichen behindert wird.

Entsprechend müssen die Auflagerverbindungen (vertikale und horizontale Verbindung zum Tragwerk) so dimensioniert werden, dass die Geschoßverschiebung ausschließlich die gewollten Widerstandskräfte aktiviert.

Ausfachungen in Holztafelbauweise weisen weiterhin den Vorteil gegenüber spröden und starren Mauerwerkswänden auf, dass sie durch ihre erst bei großen Verformungen aktivierte Steifigkeit nicht die gesamte Erdbebenlast aufnehmen, sondern sich entsprechend der Steifigkeitsverhältnissen an der Lastabtragung unter dynamischer Beanspruchung beteiligen. Eine Entfaltung der duktilen Rahmenwirkung ist bei diesen Tragsystemen gegenüber Mauerwerkswänden möglich. Ziel der Entwicklung dabei ist die aussteifende Wirkung von diesem leichten Ausbau und Fassadensystemen im elastischen-plastischen Beanspruchungsbereich dieser Wandscheiben zu beanspruchen.

Grundsätzlich wird bei Fassaden zwischen „ausfachender Fassade“ und „vorgehängter Fassade“ unterschieden.

Flexible Anschlüsse werden hauptsächlich zur Befestigung von leichten oder mittelschweren Wandtafeln an flexiblen Tragwerken verwendet, wobei Fugen mit einer Mindestbreite von ca. 20 mm vorzusehen sind. Die Befestigung erfolgt ähnlich wie bei den nichttragenden Ständerwänden. Als nachgiebige Verbindungsmittel können beispielsweise Stahlbolzen, Gummieinlagen usw. verwendet werden.

#### Nichttragende Ausfachungswände

Bei den nichttragenden Ausfachungswänden sind die Konstruktionen ähnlich denen der nichttragenden Ständerwände. Die Fassadenbauteile müssen bei einem Erdbeben sicher verankert sein. Sind lediglich geringe Bauteilbewegungen zu erwarten, kann der Anschluss starr erfolgen. Bei starken Erdbeben und einer wirtschaftlichen Tragwerksauslegung sind allerdings größere Bewegungen zu erwarten. Daher wird für nichttragende ausfachende Fassadenbauteile grundsätzlich ein gleitender Anschluss empfohlen.

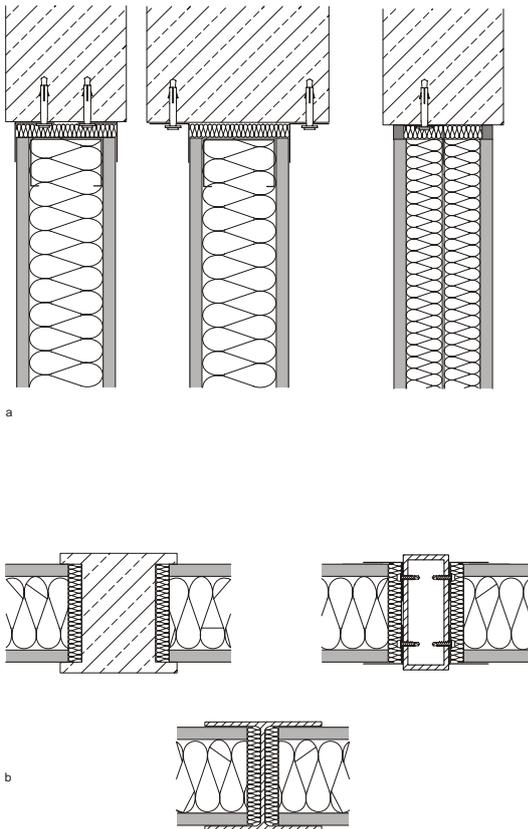


Abbildung 3: Anschlusskonstruktionen von nichttragenden Ausfachungswänden

Folgende Aspekte sind bei der Ausbildung von erdbebengerechten Befestigungsmechanismen zu beachten:

- **Dimensionierung der Verbindungen:** Die Verbindungsmittel müssen ausreichend stark dimensioniert sein, um selbst bei sehr starken Beben ein Herabfallen des Fassadenelementes zu verhindern. Dabei wirken auf die Verbindungsmittel teilweise horizontale und vertikale Lasten. Dies gilt es bei der Planung zu beachten.
- **Bewegungsfugen:** Die Bewegungsfugen müssen ausreichend groß dimensioniert werden, damit es auch bei einem starken Beben nicht zu einer ungewollten Interaktion zwischen dem tragenden und dem nichttragenden Bauteil kommt. Um die bauphysikalischen Anforderungen zu erfüllen, muss im Besonderen den Fugen große Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Energiedissipative Bereiche bilden sich immer an den Anschlussstellen, die aus mechanischen Verbindungsmitteln bestehen. Dies ist auch auf die Beplankung mit Gipswerkstoffplatten übertragbar.

Gipsplatten werden im Gegensatz zu Holzwerkstoffplatten nach DIN 4149 different bewertet. Dies liegt an dem, den Gipsplatten unterstellten spröden Verhalten als scheibenbeanspruchter Plattenwerkstoff. Experimentell konnte diese normativ deutlich unterschiedliche Bewertung nicht nachgewiesen werden. Das elasto-plastische Verhalten von Wandscheiben aus Holzständerwänden, die mit Gipsplattenwerkstoff beplankt sind, ähnelt dem von Holzwerkstoffplatten.

Trotz spröder Plattenwerkstoffe wird ein hohes Maß an Duktilität im Bereich der mechanischen Verbindungsmittel vor allem bei der Verwendung von dünnen Nagelschäften sowie Klammern erzeugt.

Die lokale Zerstörung des Gipskerns führt zwar zu einer Abnahme der Steifigkeit, hat jedoch auf die Resttragfähigkeit des Gesamtsystems nur einen geringeren Einfluss.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Wahl der Verbindungsmittel zu. Nach ersten Untersuchungen kann in Abhängigkeit des Verbindungsmittels und des Plattenwerkstoffes ein vergleichbares Tragverhalten in Relation zu Wandtafeln und Holzwerkstoffplatten in der Größenordnung von 35 – 70% erzielt werden. Die einzelnen Einflussgrößen und Wirkmechanismen werden derzeit singularisiert, um vereinfachte Konstruktions- und Bemessungsregeln für aussteifende Tragsysteme in Holzständer- sowie auch in Metallständerbauweise zu entwickeln.

Der ermittelte Einfluss der volumenbezogenen Plattenmasse bei Gipsplatten auf die Lochleibungsfestigkeit ist aus der nachfolgenden Abbildung zu ersehen. Da es sich bei Platten des Typs GKS (-R) um modifizierte Platten des Typs GKB (-A) handelt, wurden diese in Bezug zueinander gesetzt. Die Plattenkollektive weisen einen vergleichbar progressiven Verlauf auf. Eine Korrelation zwischen Lochleibungsfestigkeit und der volumenbezogenen Masse ist gegeben. Dass die Lochleibungsfestigkeit aber nicht ausschließlich von der Rohdichte des Gipskerns als maßgebender Parameter der volumenbezogenen Masse abhängt, zeigt die vergleichbare Lochleibungsfestigkeit der Platten des Typs GKS (-A) gegenüber Gipsfaserplatten bei deutlich geringerer volumenbezogener Masse.

Bei diesen Untersuchungen ist auch die Abnahme der Steifigkeit unter Gebrauchstauglichkeitsbedingung zu berücksichtigen. Durch zyklische Beanspruchung auch kleiner induzierter Lasten findet eine Abnahme der Steifigkeit von Holzständerwänden mit Beplankung aus Gipswerkstoffen statt. Diese haben jedoch einen positiven Einfluss, wenn die von außen aufgezwungenen Bewegungen der Tragkonstruktion erst "allmählich" in die Wandtafeln eingeleitet und deren Steifigkeit "behutsam" aktiviert werden.

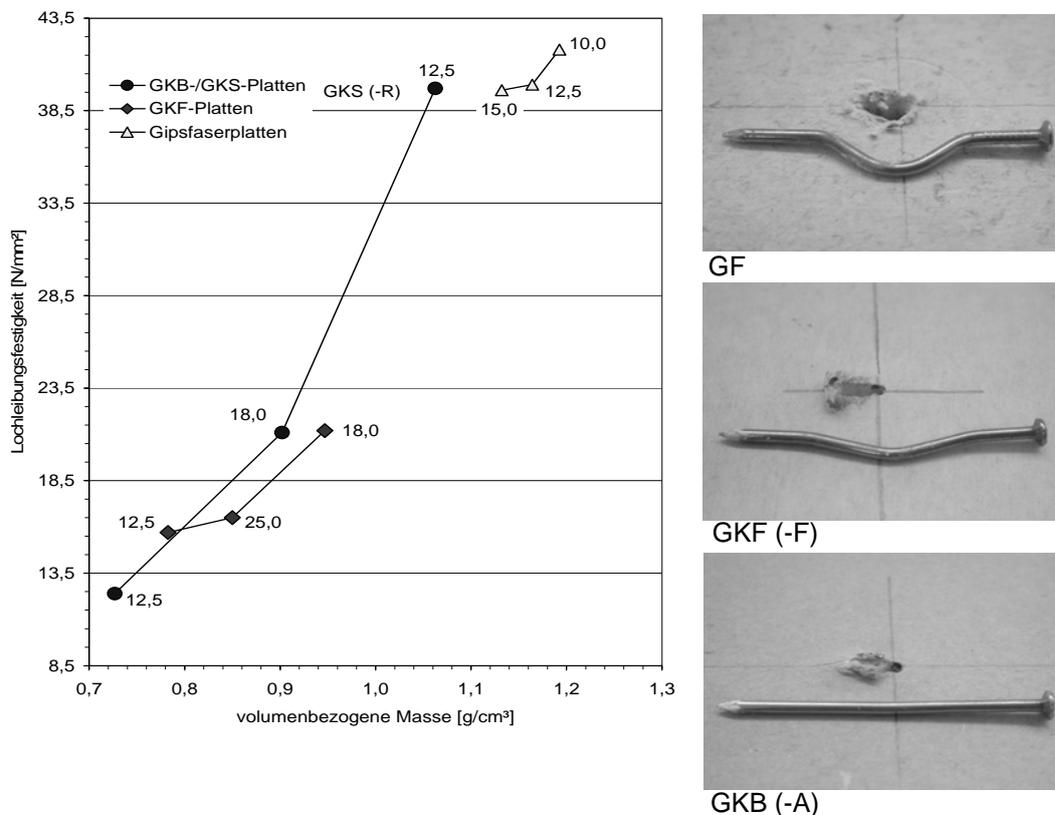


Abbildung 4: Charakteristische Lochleibungsfestigkeit  $f_{l,k}$  in Abhängigkeit von der volumenbezogenen Masse, Beschriftung der Nennstärken in mm (links). Exemplarische Versagensbilder und des plastischen Verhaltens von 12,5 mm dicken Platten der Typen GF, GKF (-F) und GKB (-A) und dem Verbindungsmittel Na 22.