

Hochhäuser nach dem 11. September

Werner Sobek, Norbert Rehle

Wenn man die Geburt des Hochhausbaus auf das Jahr des "Great Chicago Fire", also 1871 datiert, sind die ersten 80 Jahre des Hochhausbaus durch die Entwicklung und Weiterentwicklung der Rahmenbauweise gekennzeichnet. Erst 1953 wurden von Myron Goldsmith in einer grundlegenden Master-Thesis unter der Betreuung von Mies van der Rohe neue Konzepte mit außenliegenden Tragwerken in der *megaframe*- und in der *diagonalized-tube*-Bauweise vorgestellt, die wesentlich größere Gebäudehöhen möglich machten. In der Nachfolge legten die Architekten Bruce Graham, Myron Goldsmith und der Ingenieur Fazlur Khan (alle: Skidmore, Owings & Merrill, Chicago) sowie William LeMessurier, Boston, und Leslie Robertson, New York, jene bahnbrechenden Arbeiten vor, die zur Entwicklung der *outrigger*-Tragwerke, der *tube*, *punched-tube*, *framed-tube* und der *diagonalized-tube*-Lösungen sowie deren Derivaten und Untergruppen führten.

Beispiel für die *tube*-Bauweise waren die 1970-72 fertiggestellten Türme des World Trade Center, zu dieser Zeit höchstes Gebäude der Welt. Sie erreichten mit 110 Geschossen eine Höhe von ca. 417 m. In den drei Jahrzehnten ihrer Existenz überstanden die Türme ein großes Feuer im Jahre 1975 und einen Bombenanschlag im Jahre 1993. Die Türme waren statisch dafür ausgelegt, dem Anprall einer Boeing 707 standzuhalten, die möglicherweise bei Nebel vom Kurs abkommen könnte. Beide Türme hielten dann im September 2001 tatsächlich dem Anprall der wesentlich größeren Boeings 767-200 stand. Doch die Energie, die bei der Verbrennung des freigesetzten Treibstoffes (Kerosin) dieser Flugzeuge entstand, führte letztlich zum sukzessiven Einsturz der Türme.

Das Tragwerk der beiden Türme des World Trade Center überstand zwar den Aufprall zweier Flugzeuge, nicht jedoch die Brandlast und bot auch nicht genügend Reststandsicherheit, um eine sichere Evakuierung der oberen Stockwerke zu gewährleisten. Im folgenden soll deshalb untersucht werden, wie die tragende Struktur künftiger Hochhäuser besser ausgelegt werden kann. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, daß auch optimierte Tragwerke keine vollständige Sicherheit gegen gezielt durchgeführte Terrorakte bieten können. Sie erlauben jedoch eine sicherere Evakuierung und erhöhen die Reststandsicherheit der Struktur im Falle einer Schädigung.

Primärtragwerke

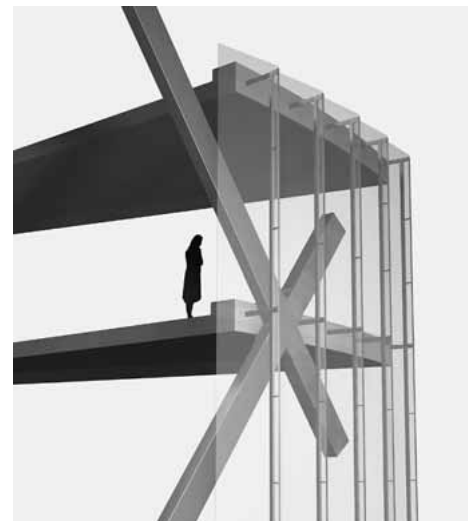
Die Definition einer strukturellen Hierarchie mittels der Einführung primärer, sekundärer und weiterer lastabtragender Systeme¹ kann zu einem effizienten und robusten Tragwerk führen. Primäre Tragwerkselemente sind für die Standsicherheit des Gebäudes erforderlich. Allgemein zählen Gründungen, Aussteifungssysteme, Stützen und Geschoßdecken zu primären Tragwerkselementen. Während des Planungsprozesses werden weitere gebäudespezifische Primärsysteme unter Berücksichtigung möglicher Schadensereignisse gezielt erkannt und definiert. Die Gebäudedesigner haben primäre Tragwerksteile entweder sehr robust zu dimensionieren oder notwendige Redundanzen für alternative Lastpfade zu schaffen.

Wenn ein Teil eines Tragwerkes die Bedingung unbedingter Ausfallsicherheit erfüllt, dann spricht man von einer *safe-life*-Dimensionierung. Wenn ein Teil eines Tragwerkes aufgrund vorhandener Redundanzen ausfallen darf (bei dann reduziertem Sicherheitsniveau), dann spricht man von einer *fail-safe*-Dimensionierung. Da unbedingte Ausfallsicherheit nur sehr schwer zu erzielen ist, bieten redundante Primärsysteme mit der Möglichkeit einer *fail-safe*-Dimensionierung der einzelnen Bauteile für eine hohe Ausfallsicherheit des Gesamtsystems jedoch große Vorteile.

Eine intensive Zusammenarbeit der beteiligten Planer aus den Bereichen Architektur, Tragwerk, Gebäudetechnik und Brandschutz ermöglicht sehr frühzeitig eine klare Definition der transparenten und geschlossenen Gebäudebereiche. Die optimale Dimensionierung und Auslegung primärer Tragwerkselemente erfolgt heute bereits in sehr frühen Planungsphasen mittels computergenerierter Visualisierungen. Räumliche Rechenmodelle von Hochhäusern, die Fundamente, aussteifende Kerne, Stützen und Decken beinhalten, zeigen verborgene Tragwerksreserven deutlich auf. Es ist jedoch wesentlich, daß der Tragwerksplaner die Eigenheiten der jeweils verwendeten finiten Elemente sehr genau beherrscht. Nachdem sämtliche Tragwerksreserven offenbart sind, können anhand von Fallstudien Sicherheitskonzepte erarbeitet und darauf basierende Tragwerkshierarchien entwickelt werden.

Nicht alle aussteifenden Bauteile eines Hochhauses dienen unmittelbar der Standsicherheit. Das wesentliche Bemessungskriterium für Hochhäuser ergibt sich in der Regel aus der Gebrauchstauglichkeit unter Windbeanspruchung.² In niedrigen Gebäuden sind die unter Windlast entstehenden Schwingungen für den Menschen im allgemeinen nicht wahrnehmbar. In Hochhäusern sind die Schwingungen wahrnehmbar, falls keine geeigneten Gegenmaßnahmen getroffen werden. Zu diesen zählen zusätzliche Aussteifungselemente, Outrigger oder Dämpfer, welche die Schwingungen eines Hochhauses auf ein akzeptables Maß reduzieren. Diese – für die Standsicherheit eines Hochhauses nicht erforderlichen – Elemente dienen aber nicht nur dem Nutzerkomfort, sondern schaffen auch Tragwerksredundanzen.

Im folgenden sollen beispielhaft zwei neuartige Tragwerkssysteme vorgestellt werden, die in den letzten Jahren entwickelt wurden und bereits wesentliche Elemente der nach dem 11. September 2001 verstärkten Sicherheitsanforderungen enthielten. Das Hochhaus der Deutschen Post in Bonn weist mit 41 Geschossen eine Höhe von 160 m auf. Das Aussteifungssystem des Hochhauses besteht im wesentlichen aus vier Kernen aus hochfestem Beton mit Wandstärken von bis zu 80 cm. Zur Erhöhung der Steifigkeiten gegen Windlasten werden jeweils zwei benachbarte Kerne mittels Stahlverbundkreuzen aneinander gekoppelt. Trotz der Koppellemente erscheinen die Skygärten sehr transparent. Aufgrund der geometrischen Lage der Treppenhäuser sind Redundanzen für den Fall einer Räumung des Gebäudes gegeben.



Stuttgarter Hochhausprojekt, Fassadenschnitt.

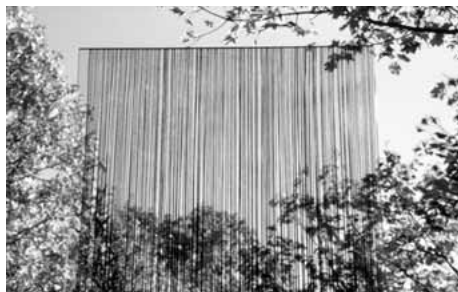
Eine zweite Neuentwicklung erfolgte im Rahmen eines Wettbewerbs für ein Hochhausprojekt in Stuttgart mit einer geplanten Höhe von ca. 228 m. Das Planungsteam um Helmut Jahn, Werner Sobek und Matthias Schuler entwickelte ein außenliegendes zusätzliches Stahlskelett, das Exo-Skeleton, das aufgrund seiner Form und des großen inneren Hebelsarms wesentlich zur Aussteifung des Hochhauses beiträgt, gleichzeitig aber ein äußerst filigranes Gebäude entstehen läßt.

Sekundärtragwerke

Tragwerksysteme, die neben den Primärtragwerken wirken, jedoch nicht zum Lastabtrag der Primärtragwerke beitragen, werden als Sekundärtragwerke eingestuft. Sie erstrecken sich lediglich über begrenzte Bereiche. Typische Sekundärtragwerke sind mehrgeschossige Fassadenträger, Dachkonstruktionen, Zwischengeschosse oder Aufzugschächte.

Beispiele für Sekundärtragwerke sind die zwischen den Gebäudeflügeln eingehängten Glasböden der Deutschen Post. Die Konstruktion dieser Elemente besteht aus Trägerrosten aus Edelstahl-schwertern. Die Stahlschwerter sind mit betretbaren Verbundsicherheitsgläsern eingedeckt und benötigen aufgrund der geringeren Sicherheitsanforderungen an Sekundärtragwerke keine Brandschutzbeschichtung.

Der lokale Ausfall eines sekundären Stahlträgers, zum Beispiel im Brandfall, ist aus tragwerksplanerischer Sicht grundsätzlich akzeptabel; eine Verletzung von Personen muß hierbei jedoch ausgeschlossen sein. Darüber hinaus hat der Tragwerksplaner sicherzustellen, daß der Ausfall eines Elements kein Versagen weiterer Sekundärtragwerke nach sich zieht. Eine Lösungsmöglichkeit stellt das Bereitstellen von Redundanzen dar, die im Falle des Versagens eines Elementes alternative Lastpfade ermöglichen. Geschweißte Trägerroste beispielsweise beinhalten aufgrund ihrer inneren statischen Unbestimmtheit eine Vielzahl alternativer Lastpfade.



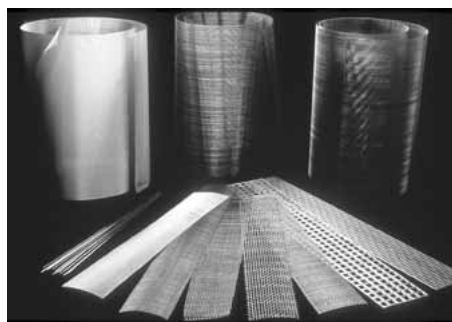
Bewehrtes Glas

Tertiär- und Quartärtragwerke

Die hierarchische Definition der Tragwerkelemente läßt beliebig feinere Unterteilungen zu. Je lokaler der Lastabtrag eines Bauteils und je geringer die abzutragenden Massen sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß im Falle eines Versagens dieses Bauteils eine Gefahr für die Benutzer des Gebäudes gegeben ist. Deshalb können die Sicherheiten gegen ein Versagen der Bauteile geringerer Ordnung abgemindert werden. Die Planer haben jedoch dafür Sorge zu tragen, daß im Falle eines Versagens des betreffenden Bauteils keine Gefährdung für die Benutzer des Gebäudes besteht.

Verglasungen von Fassaden können im allgemeinen als Tertiärtragwerke definiert werden. Damit jedoch im Falle eines Glasbruchs weder Nutzer des Gebäudes noch Passanten vor dem Gebäude verletzt werden, muß sichergestellt sein, daß die Glasscheiben auch nach einem Bruch sicher in ihrer Lage verbleiben. Verbundsicherheitsgläser, die aus zwei mittels PVB-Folie verbundenen Glasscheiben bestehen, weisen aufgrund der gegebenen Redundanz hohe Sicherheiten auf.

Überkopfverglasungen, die trotz Versagens einer Glasscheibe Lasten wie z.B. Schnee sicher abzutragen haben, müssen im allgemeinen größere Sicherheiten beinhalten. Sie sind – je nach Projekt – gegebenenfalls sogar in eine übergeordnete Hierarchiestufe einzuordnen. Eine Alternative für einen wirtschaftlichen Einsatz von Überkopfverglasungen kann durch bewehrte Scheiben geschaffen werden. Das Verhalten einer solchen Scheibe nach Bruch ähnelt dem des Stahlbetons, d.h. eine gewisse Resttragfähigkeit bleibt trotz Zerstörung vorhanden. Die Glasbewehrung kann aus unterschiedlichen Materialien und Körpern bestehen und wird zwischen zwei Lagen aus PVB-Folie eingelegt.



Materialien für Glasbewehrung

Gebäudeevakuierung

Mehrere Fachausschüsse unterschiedlicher Fachrichtungen publizierten Ergebnisse aus Untersuchungen zum Einsturz des World Trade Center.³ Die Verfasser fordern insbesondere beständige, großzügige und klar gekennzeichnete Fluchtwege, die redundant zur Verfügung stehen sollen. Zur Beschleunigung einer Gebäuderäumung sind Aufzüge wünschenswert, die auch im Brandfall benutzt werden können. Ein schneller und effektiver Zugriff durch die Feuerwehr und das Rettungspersonal ist ebenso erforderlich wie klar definierte Verhaltensregeln des Gebäudepersonals, das entsprechend geschult werden muß.

Die Möglichkeit, kurzfristig auf notwendige Informationen aus den Bereichen Gebäudetechnik und Tragwerk zurückzugreifen, würde den Rettungskräften bei der Beurteilung kritischer Situationen helfen und so ihr Aktionspotential erhöhen.

Für eine Umsetzung dieser Sicherheitsanforderungen ist es erforderlich, daß sich alle beteiligten Planer frühzeitig über die Auslegung des Gebäudes verständigen. Der Tragwerksplanung kommt hierbei vor allem für die Planung sicherer Fluchtwege eine besondere Bedeutung zu. Die Planung der Fluchtwege muß bei der Entwicklung des Tragwerkes entsprechend berücksichtigt werden. Durch Anwendung des hier dargelegten Systems primärer und sekundärer Systeme wird es möglich, höhere Sicherheitsstandards zu gewährleisten, ohne daß dies zwangsläufig zu Lasten der Transparenz des Gebäudes geht.

Anmerkungen

1 W. Sobek, W. Sundermann, N. Rehle, H.-G. Reinke, Tragwerke für transparente Hochhäuser, in: Bauingenieur 76, 2001.

C. Schittich, G. Staib, D. Balkow, M. Schuler, W. Sobek, Glasbauatlas, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, München 1998.

2 vgl.1; G. König, S. Liphardt, Hochhäuser aus Stahlbeton, Ernst & Sohn, Berlin 2003 (Betonkalendar 2003 Teil I).

3 vgl.1; The Institution of Structural Engineers (Hrsg.), Safety in tall buildings and other buildings with large occupancy, London 2002.

Weitere Literatur

Council on Tall Buildings and Urban Habitat (Hrsg.), Structural Systems for Tall Buildings, McGraw-Hill 1995.

Federal Emergency Management Agency, World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations and Recommendations, FEMA 403, Washington D.C. 2002.

H.C. Schulitz, W. Sobek, K.J. Habermann, Stahlbauatlas, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, München 1999.

L.H. Lin, W. Sobek, Structural Hierarchy in Spider Webs and Spiderweb-Type Systems, in: The Structural Engineer, 76/1998, Nr. 4, S. 59–64.

Werner Sobek leitet das Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren an der Universität Stuttgart.

Norbert Rehle ist Prokurist bei Werner Sobek Ingenieure.