

2002

SSK-Berichte

10



Das Glück und der Jin Mao Tower...

von H.G. Schäfer

Ich hatte meinem Fahrer frei gegeben. Er sollte sich an diesem Samstag, einen Tag vor meinem geplanten Rückflug, endlich seiner jungen Familie widmen können, nachdem er mich in Shanghai eine Woche lang rund um die Uhr betreut hatte.

Ich freue mich auf diesen freien Tag, um nach dem Pflichtprogramm, angefüllt mit Vorträgen und Diskussionen, ein paar Fotos von dieser faszinierenden 17-Millionen-Metropole machen zu können.

Wir mieten uns ein Taxi – in Shanghai preiswert und immer verfügbar – ,um vom Hotel aus an den Bund zu fahren, einer beliebten Flaniermeile am Ufer des Huang Pu, wo sich der quirlige Binnenhafen von Shanghai befindet. Von dort aus hat man einen atemberaubenden Ausblick auf Pu Dong, das neue Hochhausviertel von Shanghai. Dort steht neben dem markanten und unverwechselbaren Fernsehturm der Jin Mao Tower - zur Zeit mit einer Höhe von 421 Metern das dritthöchste Hochhaus der Welt.

Der Bund präsentiert sich an diesem Morgen im Scheine der aufgehenden Sonne: Pu Dong heißt schließlich „östliches Ufer“. Begeistert von diesem Anblick stürzen wir aus dem Taxi; der Taxifahrer drängt mir gerade noch die vom Taxameter ausgedruckte Quittung auf – die Chinesen sind in dieser Hinsicht sehr korrekt! Dann reißen wir die Kameras heraus, um zu fotografieren.

Während das Taxi langsam davon schleicht und bereits im Begriff ist, um die Ecke zu biegen, schreit meine Frau plötzlich auf: unser Rucksack (mit Pässen und Rückflugtickets) liegt noch im Taxi!

Eine Katastrophe – in einem Land mit strengen Ein- und Ausreisebestimmungen! Das deutsche Konsulat: natürlich am Samstag geschlossen. Zwei Betablocker (normalerweise nur eine Tablette täglich), gegen hohen Blutdruck ärztlich verschrieben, dämpfen aufkommenden Ärger und Resignation.

Die Rettung: die Taxiquittung ist voll mit schönen, aber für uns unverständlichen chinesischen Schriftzeichen. Es sind aber auch ein paar arabische Zahlen darunter; eine davon ist eine Telefonnummer. Ping Ping Shi – unsere Dolmetscherin – telefoniert mit meinem Handy. Der Rest in Kürze: der Taxifahrer ist eine ehrliche Haut – jedoch ohne Funkkontakt; die Zentrale liegt am anderen Ende der Stadt (Entfernung etwa Dortmund – Duisburg) ...Wir treffen uns (mit Hilfe eines anderen Taxis) nach zwei Stunden Fahrzeit in der zuständigen Taxi-Zentrale. Lauter glückliche Menschen! Der Fahrer war nach der Entdeckung des Fundstücks von sich aus zurück in seine Zentrale gefahren und er weigert sich – trotz des erlittenen Zeitverlustes – eine Belohnung in Form einer 100 US-Dollar-Note anzunehmen – ich fasse es nicht! Schließlich ist er bereit, 50 Dollar zu akzeptieren!!! Ich bin überglücklich und lade alle Umstehenden ein, im Restaurant des 90. Stockwerks des Jin Mao Towers zu Mittag zu speisen: bislang hatte ich wegen der hohen Kosten einen großen Bogen um ihn gemacht.

Ich bin am Abend dieses Tages um einige hundert US-Dollar ärmer –
und trotzdem der glücklichste Mensch in Ostasien!

Glück kann auch darin bestehen, dass ein Unglück nicht stattgefunden hat. Möge sich ein jeder bewusst werden, welches Glück es bedeuten kann, wenn er einen Tag, ein Jahr, ein langes Leben ohne größere „Blessuren“ überstanden hat!

**Wir bedanken uns für die bisherige Zusammenarbeit
und freuen uns darauf, mit Ihnen im Team
auch künftig neue Aufgaben zu lösen.**

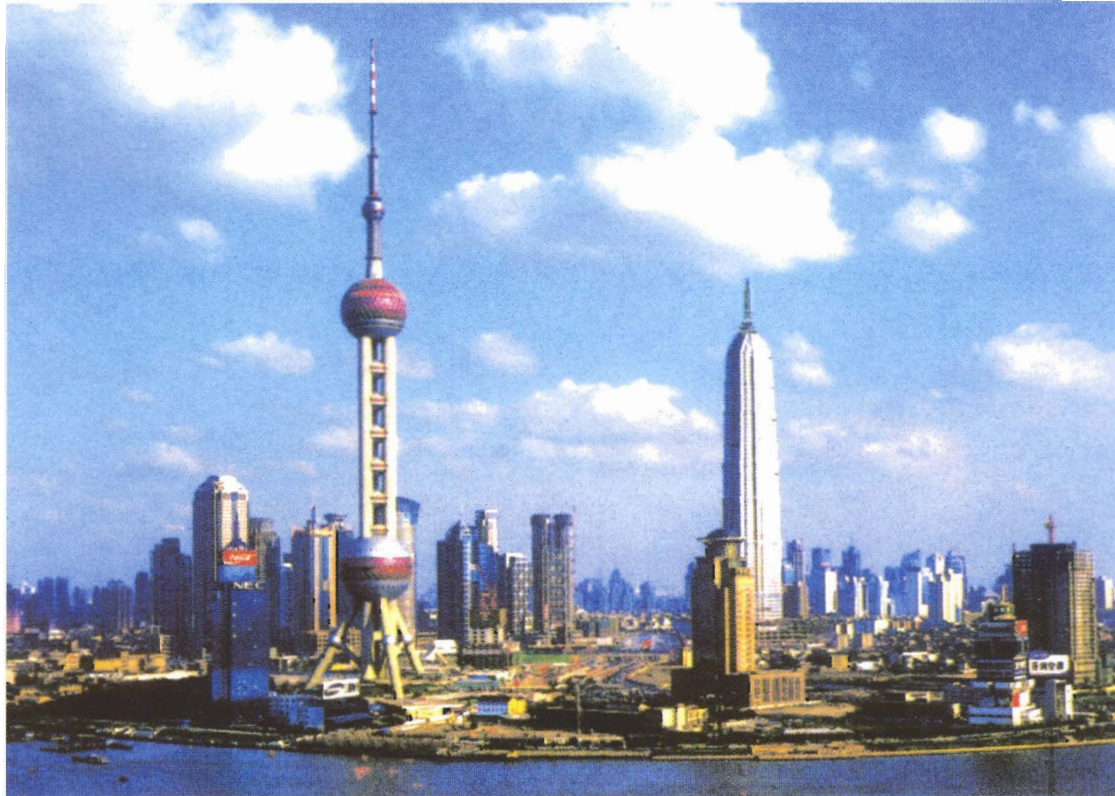
**Wir wünschen Ihnen erholsame Festtage
sowie Glück und Erfolg im neuen Jahr,**

Ihr

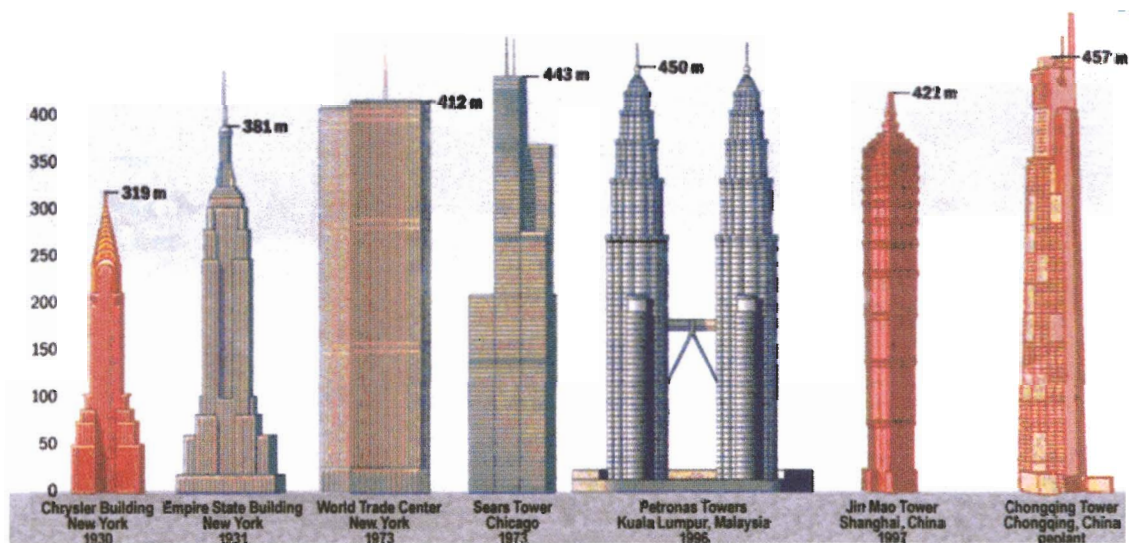
Gerd v. Spiess
Prüfingenieur für Baustatik, VPI

Horst G. Schäfer
Universitäts-Professor, VBI

Walter Keck
Staatl. anerk. Sachverständiger, IKNW



Shanghai – Pu Dong: Skyline einer boomenden Metropole in China



Die höchsten Hochhäuser der Welt – in memoriam „World Trade Center“ (Der Spiegel)

Zum Einsturz der Zwillingstürme des World Trade Centers

Vortrag gehalten bei der Tagung der Ingenieurakademie West e.V.:
„Brandschutz in NRW- Bestandsaufnahme, Entwicklung und Perspektiven“
am 21. November 2002, Rheinterrasse Düsseldorf

Horst G. Schäfer
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Universität Dortmund

Gerd v. Spiess
Dipl.-Ing.
StaSV für die Prüfung
der Standsicherheit und
des Brandschutzes

Andrea Simanski
cand.-ing.
Universität Dortmund



**Büro für Tragwerksplanung,
Brandschutz und Bauphysik**

v. Spiess · Schäfer · Keck

Kaiserstr. 61

44135 Dortmund

Vorwort

Über den Einsturz der Zwillingstürme des World Trade Centers nach den Attentaten des 11. September 2001 sind bereits zahlreiche Berichte veröffentlicht worden; alle international bedeutsamen sind über das Internet allgemein zugänglich, allerdings vorwiegend in englischer Sprache. Die wichtigste Quelle für Ingenieure, Architekten und Brandschützer ist der Abschlussbericht der Voruntersuchung der FEMA (Federal Emergency Management Agency, Bundesbehörde für Katastrophen-Management). Die Verfasser des nachfolgenden Aufsatzes haben keine eigenen Untersuchungen durchgeführt, sondern alle relevanten Informationen dem FEMA-Bericht entnommen. Wir hoffen trotzdem, mit unserem Beitrag all jenen einen Dienst zu erweisen, die den sehr umfangreichen Bericht in der Originalsprache nicht lesen können oder wollen. Wo es um die kritische Würdigung der Fakten ging oder um die zu ziehenden Konsequenzen, haben wir auch eigene Überlegungen einfließen lassen.



Inhaltsverzeichnis

1	Der World-Trade-Center-Komplex.....	3
2	Das Tragwerk der Zwillingstürme	4
2.1	Hochhäuser – Wolkenkratzer	4
2.2	Aussteifungssystem der Zwillingstürme	5
2.3	Deckenkonstruktion.....	10
2.4	Gründung	14
3	Das brandschutztechnische Konzept der Zwillingstürme	14
3.1	US-amerikanische „Brandschutz-Philosophie“	14
3.2	Passiver Brandschutz.....	14
3.3	Aktive Feuerbekämpfungssysteme	16
3.4	Entrauchung.....	18
3.5	Feuerwehr	18
3.6	Fluchtwege.....	19
3.7	Energie-Versorgung im Katastrophenfall.....	20
3.8	Katastrophen-Management.....	20
4	Das Tragwerksverhalten nach dem Flugzeugeinschlag	21
4.1	Technische Daten der Unglücksmaschinen	21
4.2	Überlebende und Todesopfer.....	21
4.3	Überblick über die Gebäudeschäden in Lower Manhattan.....	22
4.4	Zum Einsturz des Nordturms.....	23
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	32
5.1	Allgemeine Feststellungen	32
5.2	Tragwerk	34
5.3	Baulicher Brandschutz	37
6	Schlusswort	39
7	Zusammenfassung.....	40
8	Literatur	40



1 Der World-Trade-Center-Komplex

Das World Trade Center (WTC) befand sich auf der westlichen Seite der Südspitze Mannhattans; das Grundstück des WTC umfasst ca. 6,5 Hektar, Bild 1. Eine Gruppe von sechs unterschiedlichen Gebäuden (WTC 1 bis WTC 6) gruppierte sich um die WTC-Plaza, einen ca. 2 Hektar großen Platz. Ein weiteres Gebäude, WTC 7, befand sich außerhalb dieses Areals.

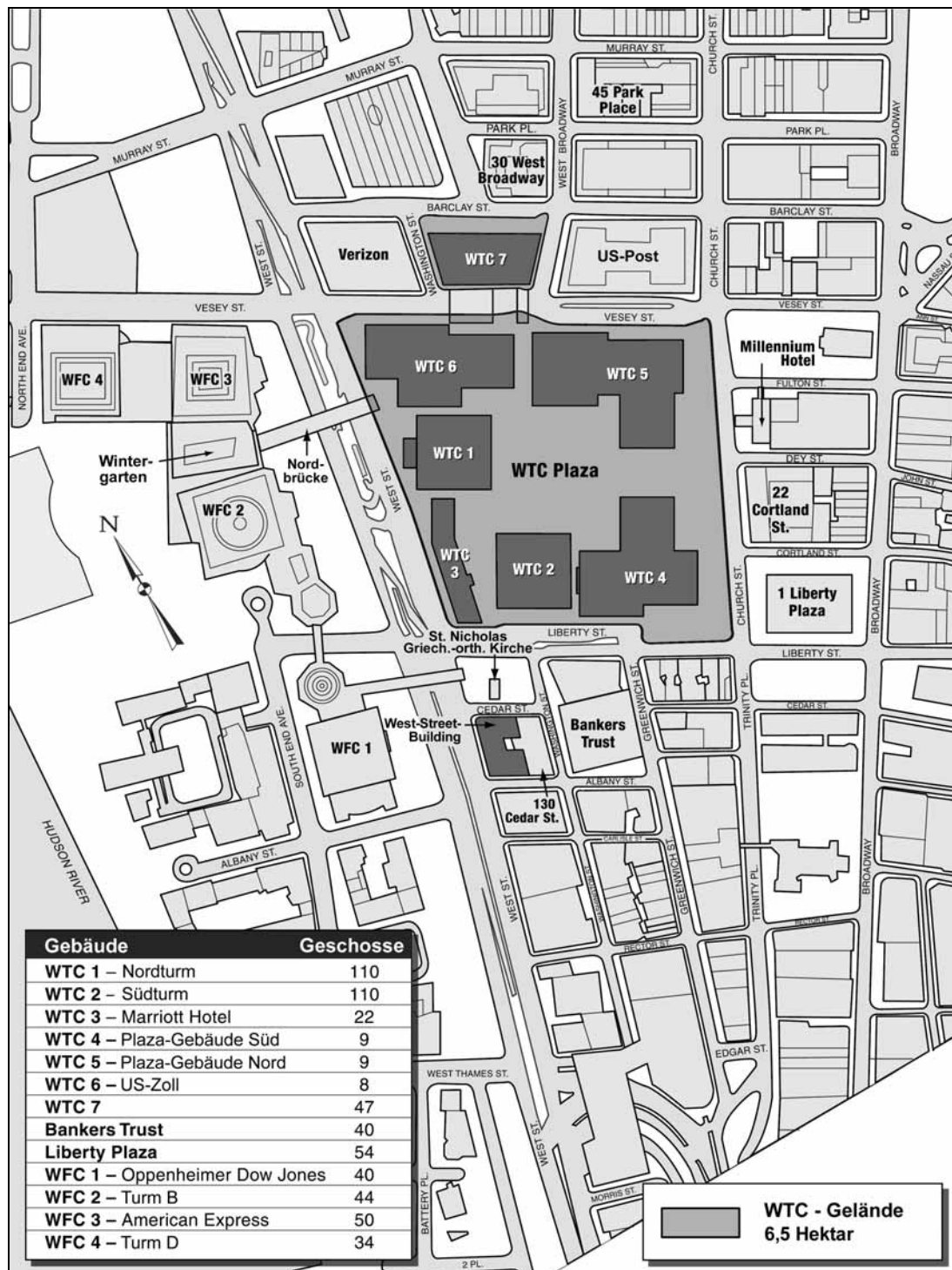


Bild 1: Lageplan World Trade Center (WTC) und World Financial Center (WFC) [1]



Als Projektentwickler für den Gesamtkomplex fungierte der Grundstückseigner, die „Port Authority of New York and New Jersey“ (Hafenbehörde von New York und New Jersey). Der erste Spatenstich erfolgte am 5. August 1966; Baubeginn für die Zwillingtürme war im August 1968. Die ersten Mieter zogen bereits im Dezember 1970 in den Nordturm (WTC 1) ein, während der Südturm (WTC 2) im Januar 1972 bezogen wurde. Die anderen zum Komplex gehörenden Gebäude wurden in den darauf folgenden Jahren nach und nach errichtet; als letztes Gebäude wurde WTC 7 im Jahre 1985 fertig gestellt. Die vermietbare Fläche der sieben Gebäude umfasste insgesamt etwa 1,1 Millionen m²; Mieter waren sowohl Behörden als auch kommerzielle private Nutzer, die meisten aus dem Versicherungs- und Bankenwesen. Zum Zeitpunkt des Anschlags am 11. September 2001 befand sich der gesamte Komplex auf der Grundlage eines 99-Jahres-Pacht-Vertrages in privater Hand.

2 Das Tragwerk der Zwillingtürme

2.1 Hochhäuser – Wolkenkratzer

Die ersten „richtigen“ Hochhäuser wurden in den 70er und 80er Jahren des 19. Jahrhunderts in Chicago und New York errichtet. Für sie erfand man den populären Begriff „Skyscraper“, was – etwas bescheidener – mit „Wolkenkratzer“ ins Deutsche übersetzt wurde. Viele technische Erfindungen waren erforderlich, um den Bau von Hochhäusern sowohl statisch-konstruktiv als auch betriebstechnisch überhaupt zu ermöglichen. Die wichtigsten Stichworte sind hier feuersichere Decken und Treppen aus Stahlbeton (Joseph Monier, 1867), absturzsichere Aufzüge (Elisha G. Otis, 1854) sowie heute selbstverständliche Einrichtungen wie Telefon, elektrisches Licht, Zentralheizung, fließend Wasser und Brandbekämpfungseinrichtungen [5]. In deutschen Bauordnungen orientiert sich die Definition des „Hochhauses“ nach wie vor an der längsten, seinerzeit verfügbaren Feuerwehroleiter in Berlin, die bis in 22 m Höhe reichte. Die höchsten Hochhäuser der Welt sind in einer Grafik aus dem Magazin „Der Spiegel“ eindrucksvoll gruppiert, Bild 2. Die zehn höchsten Hochhäuser in Frankfurt am Main, Bild 3, wurden von www.skyscrapers.com zusammengestellt.

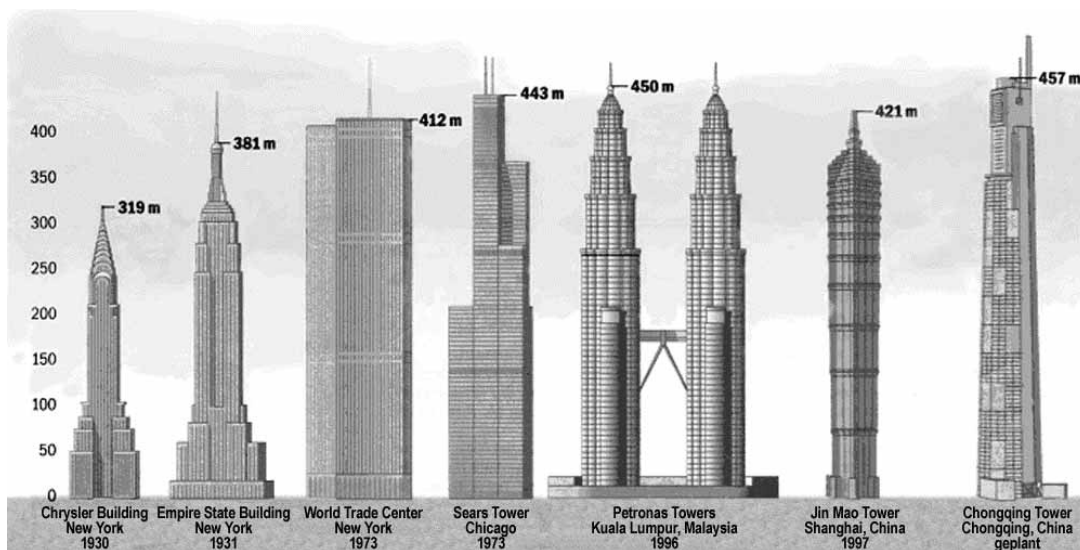


Bild 2: Die höchsten Hochhäuser der Welt – Gebäudeskizzen im Höhenvergleich [Der Spiegel]

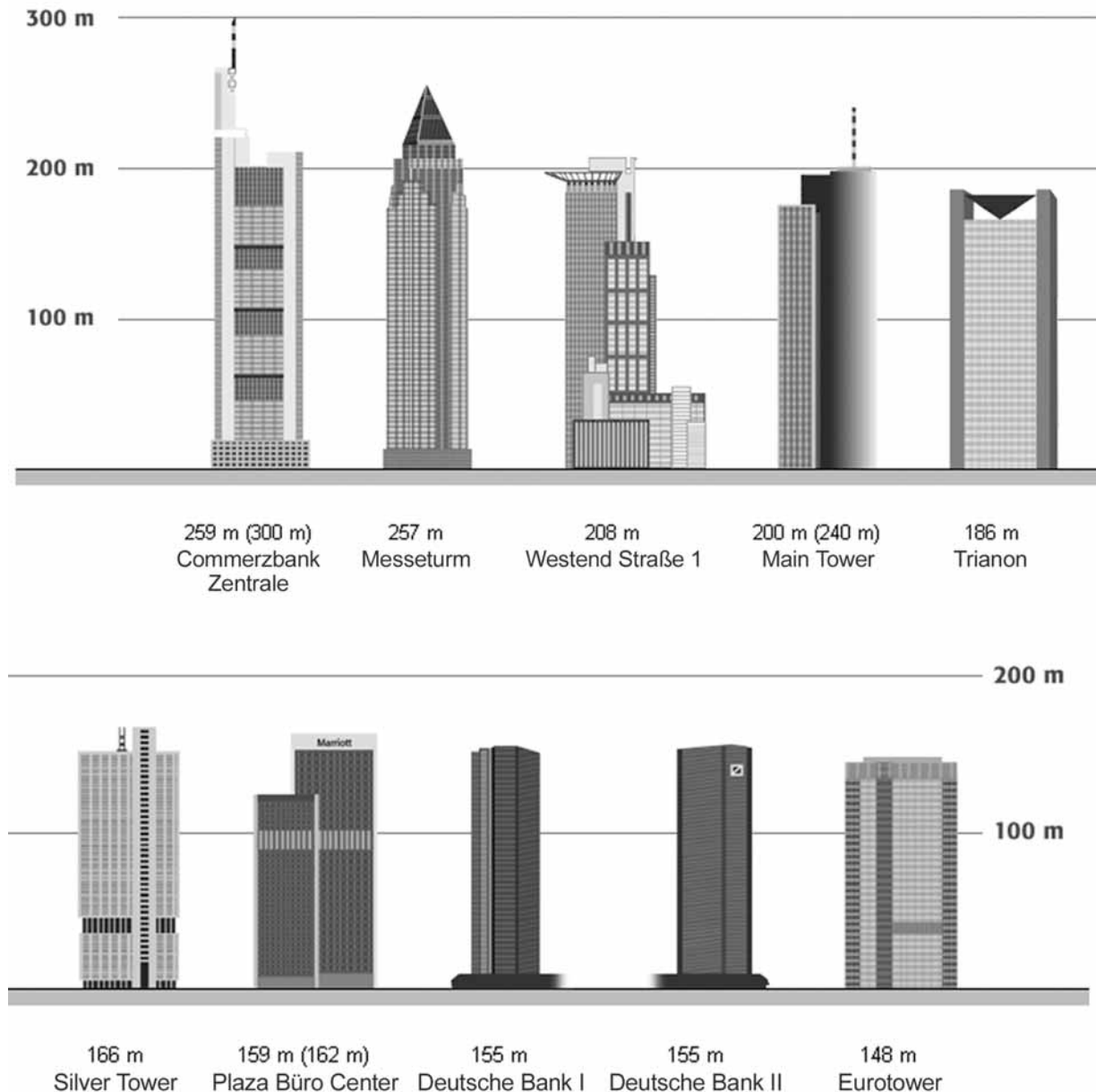


Bild 3: Hochhäuser in Frankfurt am Main – Gebäudeskizzen im Höhenvergleich [www.skyscrapers.com]

2.2 Aussteifungssystem der Zwillingstürme

Die Horizontalaussteifungen der Zwillingstürme des World Trade Centers waren sich ähnlich, aber sie waren nicht identisch. Die Unterschiede sind für die folgenden Betrachtungen ohne Belang, weshalb sich Einzelheiten der Beschreibung nur auf *einen* der beiden Türme, nämlich auf den ca. 4 Meter höheren Nordturm (WTC 1) beziehen, der überdies einen ca. 110 Meter hohen Antennenmast trug.

Die WTC-Türme waren typische *Tubekonstruktionen* (Rahmenröhren), bei denen der Kern *nicht* für den Windlastabtrag vorgesehen war: alle Horizontallasten wurden dem Rahmentragwerk der Fassaden zugewiesen, wie dies in Bild 4 skizzenhaft dargestellt ist.

Die Steifigkeit der Rahmenröhre wurde jedoch durch ein *Outrigger-System* („Hut-Konstruktion“) vergrößert, Bild 5. Die Hauptaufgabe der *Outrigger* bestand darin, die Last aus der 110 Meter hohen Antenne abzufangen. Die Vergrößerung der Steifigkeit der Rahmenröhre war aber ein erwünschter Nebeneffekt, der die Schwingungsempfindlichkeit der Türme verringerte und die Standsicherheit erhöhte. Der Südturm (WTC 2) trug keine Antenne, er war jedoch für eine mögliche Nachrüstung durch einen Antennenmast ausgelegt.

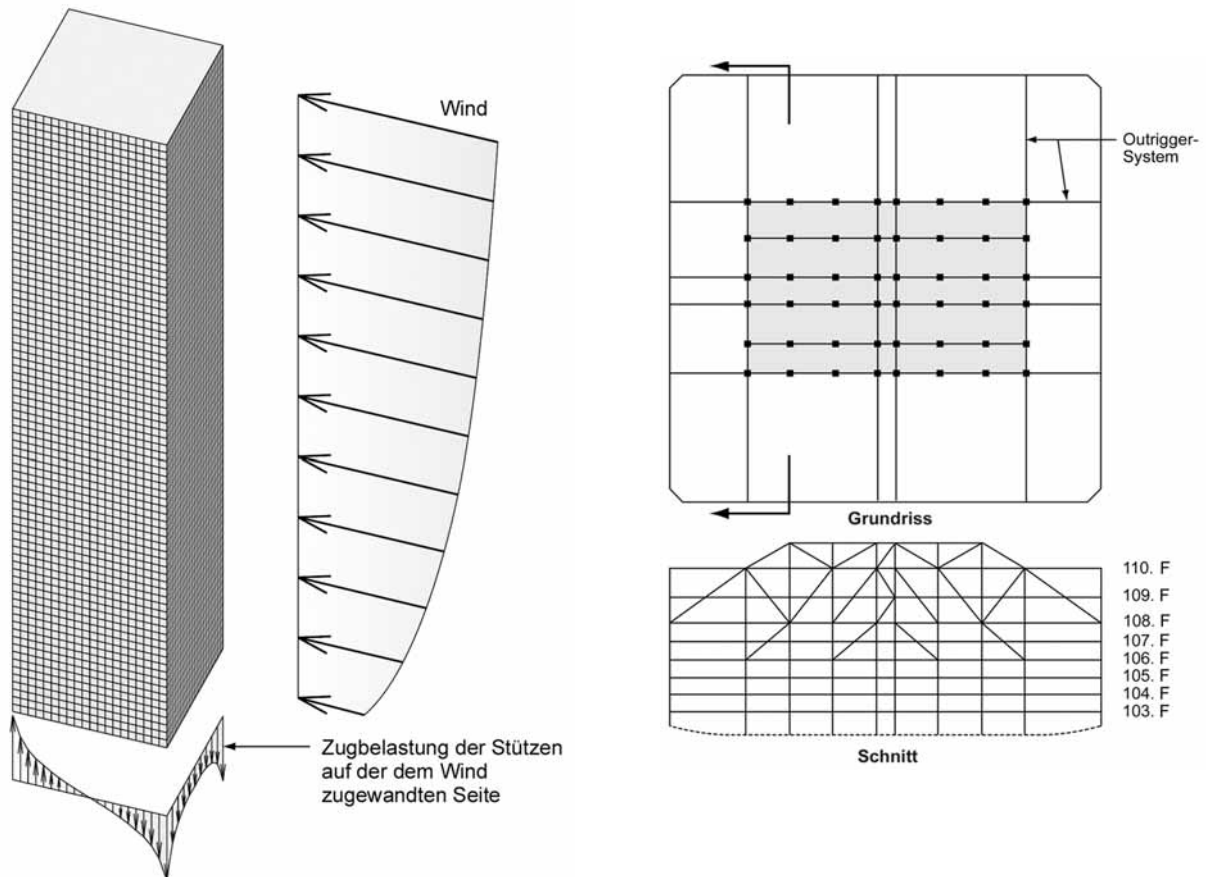


Bild 4: Tragverhalten einer Tubekonstruktion [1]

Bild 5: Outrigger-System¹ [1]

In den unteren sieben Stockwerken, über eine Höhe von ca. 25 Metern, wurden je drei Fassadenstützen zu einer einzigen Großstütze zusammengeführt, Bild 6, um im Eingangsbereich je ca. zwei Meter breite Durchgänge zu ermöglichen. Diese „Sammelstützen“ mussten selbstverständlich gegen Ausknicken bemessen werden; sie waren in der Lage, die vertikalen Kräfte aus Eigen- und Verkehrslast sowie die aus dem Windmoment resultierenden Normalkräfte zu übertragen.

Bild 4 zeigt skizzenhaft, wie sich die Vertikalkräfte aus dem Windmoment in den Ecken konzentrierten. Für den Fachmann: dies ist eine Folge des so genannten „shear lag“, also der Schubweichheit der Rahmenröhre im Vergleich zum Verhalten

¹ Im US-amerikanischen Sprachgebrauch wird das Erdgeschoss als das „1. Geschoss“ (*1st floor*) bezeichnet. Um Verwechslungen zu vermeiden und um die Bezeichnungen aus [1] beizubehalten, wird nachfolgend die Bezeichnung „F“ (*floor*) für „Geschoss“ verwendet; beim Lesen des Fließtextes mag man „F“ mit „Flur“ übersetzen.

eines Kastenträgers, der dem Gesetz von Navier-Bernoulli gehorcht. Da die Stützen im Fassadenbereich für gravitationsbedingte Lasten sowie für Vertikalkräfte aus Wind bemessen worden waren, besaßen die Fassadenstützen im Normalfall – wenn nur geringe Windkräfte wirkten – deutliche Tragreserven, während die Kernstützen durch die Vertikallasten wesentlich höher ausgelastet waren. Eine gewisse Reserve war natürlich auch in den Kernstützen vorhanden, da die tatsächlich wirkenden Kräfte aus den Verkehrslasten zur Zeit der Katastrophe nicht die rechnerischen Höchstlasten erreichten, für welche die Kernstützen ausgelegt worden waren.

Um die hohe Eingangshalle, die so genannte Lobby, repräsentativ zu gestalten, waren nur zwei horizontale Querriegel in der unteren Hälfte der Sammelstützen vorgesehen. Da diese hohen, schlanken Stützen keine nennenswerten Querkräfte übertragen können, war im Bereich der Lobby der *Kernbereich* mit Diagonalstreben ausgekreuzt. Über die untersten Deckenscheiben musste deshalb die Gesamtquerkraft von der Fassadenröhre auf die „ausgekreuzten Stützenscheiben“ des Kernbereichs übertragen werden.



Bild 6: Sockelbereich der Rahmenröhre [1]

Ein Montagemodul für die Fassade bestand aus je drei dreigeschosshohen Stahlstützen, die durch je drei Querriegel zu einem Element werksmäßig miteinander verschweißt waren, Bild 7. Die Stützen- und Riegelstöße lagen jeweils in Feldmitte, also dort, wo im Endzustand Momenten-Minima zu erwarten waren. Stützen und Riegel wurden jeweils über angeschweißte Kopfplatten auf der Baustelle mittels hochfester Schraubbolzen miteinander verbunden. Die Blechdicke der Stützenquerschnitte nahm von unten nach oben von ca. 100 mm Dicke auf ca. 6 mm ab. Die Stahlgüte variierte zwischen 12 verschiedenen Güteklassen, deren Streckgrenzen zwischen ca. 290 N/mm² und ca. 690 N/mm² lagen. Bei der Wahl der Stahlgüten und der Stahlquerschnitte wurde darauf geachtet, dass sich unter dem Lastfall „Ständige Lasten“ möglichst keine unterschiedlichen Stützenstauchungen innerhalb eines



Geschosses einstellen, um auf diese Weise die „Verwindung“ einer Geschossdecke zu minimieren.

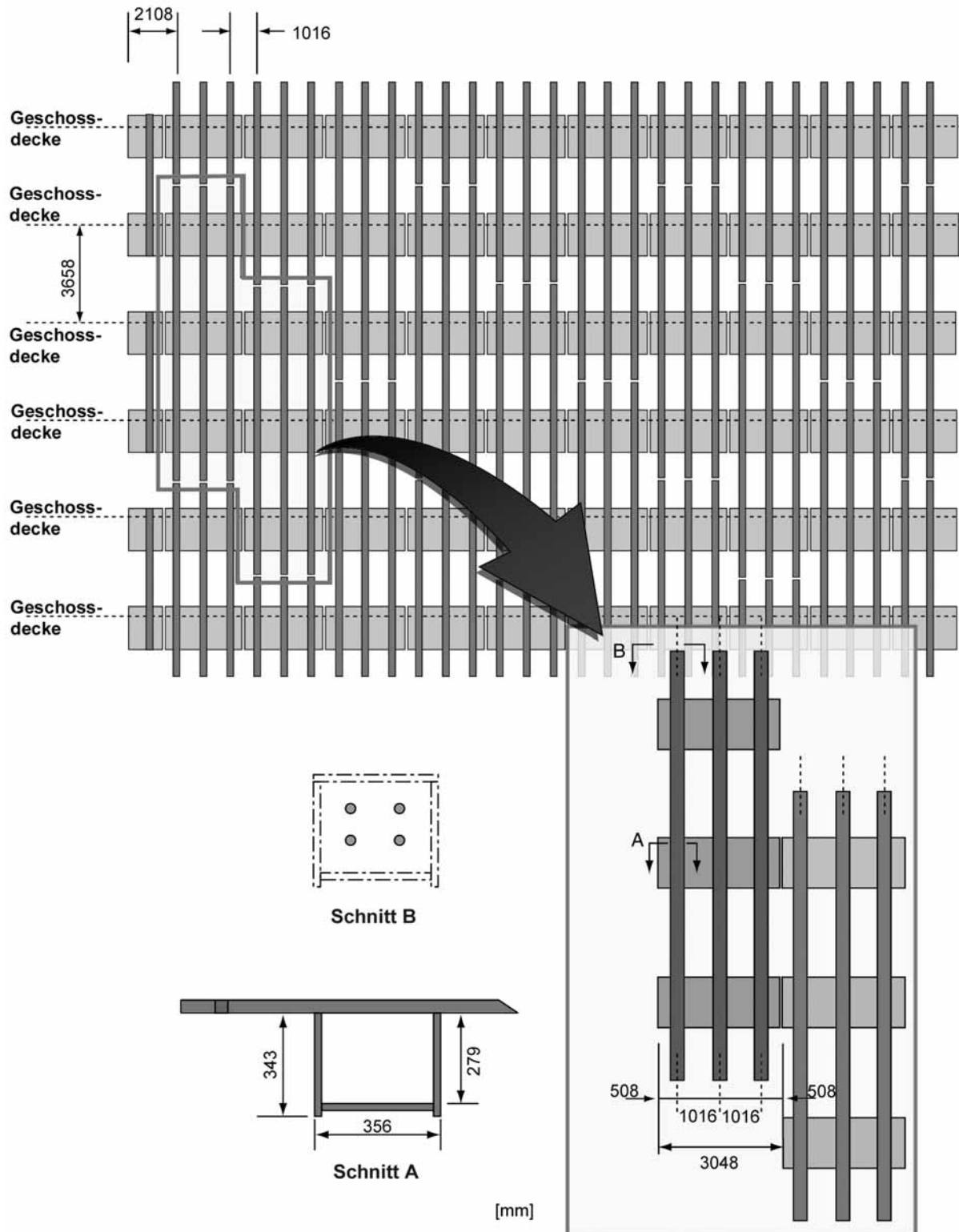


Bild 7: Teilansicht der tragenden Außenwand, Darstellung der Montage-Module [1]



Zum wirtschaftlichen Erfolg der über 400 m hohen Türme hat, neben dem beschriebenen, ausgeklügelten und bis ins Detail durchdachten Montagesystem, wesentlich das innovative Aufzugsystem beigetragen. Ingenieure und Architekten hatten für die Türme des WTC ein Aufzugskonzept entwickelt, bei dem eine Lobby im Erdgeschoss und zwei *Skylobbies* im 44. und 78. F den Turm in drei übereinanderliegende Verkehrszonen unterteilten, Bild 8. Elf Expressaufzüge verbanden das Erdgeschoss mit den beiden oberen *Lobbies*. Jeweils 24 Lokalaufzüge führten von den drei *Lobbies* zu den darüber liegenden Geschossen. Weitere fünf Expressaufzüge – überwiegend von Touristen genutzt – führten vom Erdgeschoss direkt zum 107. und 110. F. Zusätzlich gab es einige Lastenaufzüge, welche verschiedene Gruppen von Geschossebenen bedienten. Da in einem Schacht drei übereinanderliegende Lokalaufzüge fahren konnten, waren für die 99 Aufzüge nur 56 Schächte, bzw. 13 % der Geschossfläche erforderlich. Wären die Türme des WTC mit einem „normalen“ Aufzugssystem ausgerüstet worden, hätte man fast die gesamte Geschossfläche für Aufzüge benötigt – eine wirtschaftlich nicht tragbare Alternative.

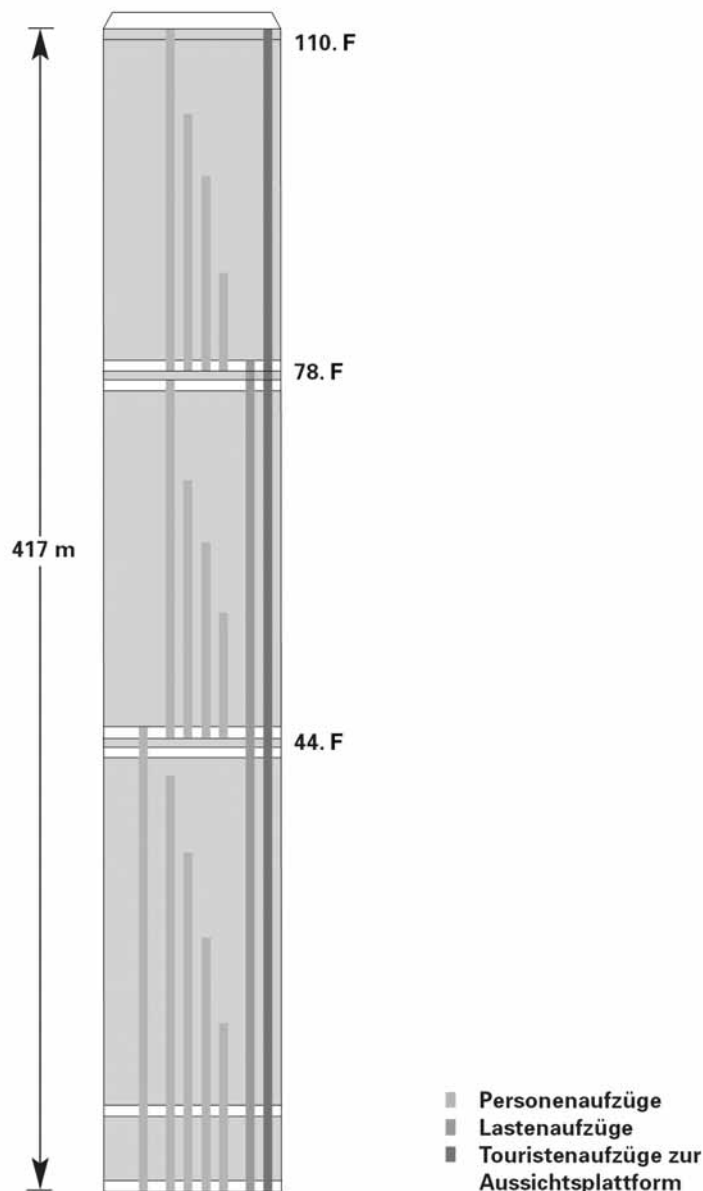


Bild 8: Aufzugssystem der WTC-Türme [dpa]

2.3 Deckenkonstruktion

Für den Nutzer eines Hochhauses besteht die Hauptaufgabe eines Deckenfeldes natürlich darin,

- als *Platten* die Nutzlasten in die tragenden Stützen und Wände abzuleiten.

Große, stützenfreie Räume sind aus der Sicht eines Mieters im Hinblick auf größtmögliche Flexibilität in der Grundrissgestaltung sehr erwünscht. Für den „Statiker“ haben die Deckenfelder darüber hinaus noch zwei weitere, wichtige Aufgaben zu erfüllen, nämlich die,

- die *Knicklängen* der hochbelasteten Stützen auf (weniger als) die Stockwerkhöhe zu reduzieren,
- als *Deckenscheiben* – wie die Querschotte in einem gegliederten Träger aus Stahlprofilen – dafür zu sorgen, dass die quadratische Rahmenröhre unter Horizontallasten auch im ausgelenkten Zustand ihre quadratische Querschnittsgestalt beibehält und somit als *Gesamtquerschnitt* wirken kann.

Das lastabtragende System des Deckentragwerks war auf Gewichtsminimierung ausgelegt, Bild 9 und Bild 10. Die Spannweiten von 10,70 m bzw. 18,30 m wurden von extrem leichten Stahl-Fachwerkträgern in „Zwillingsanordnung“, Achsabstand 2,03 m, überspannt. Im Abstand von 4,06 m waren Stahl-Fachwerk-Querträger angeordnet, die mit den Hauptträgern zusammen einen biegesteifen Trägerrost bildeten. Parallel zu den Hauptträgern verlaufende Trapezblechprofile dienten als „verlorene Schalung“ für die abschließende ca. 10 cm dicke Stahl-Leichtbetondecke, die über die in die Betonplatte einbindenden Fachwerkknoten (Bild 12) mit dem Haupt-Fachwerk-Träger als Verbundtragwerk wirkten.

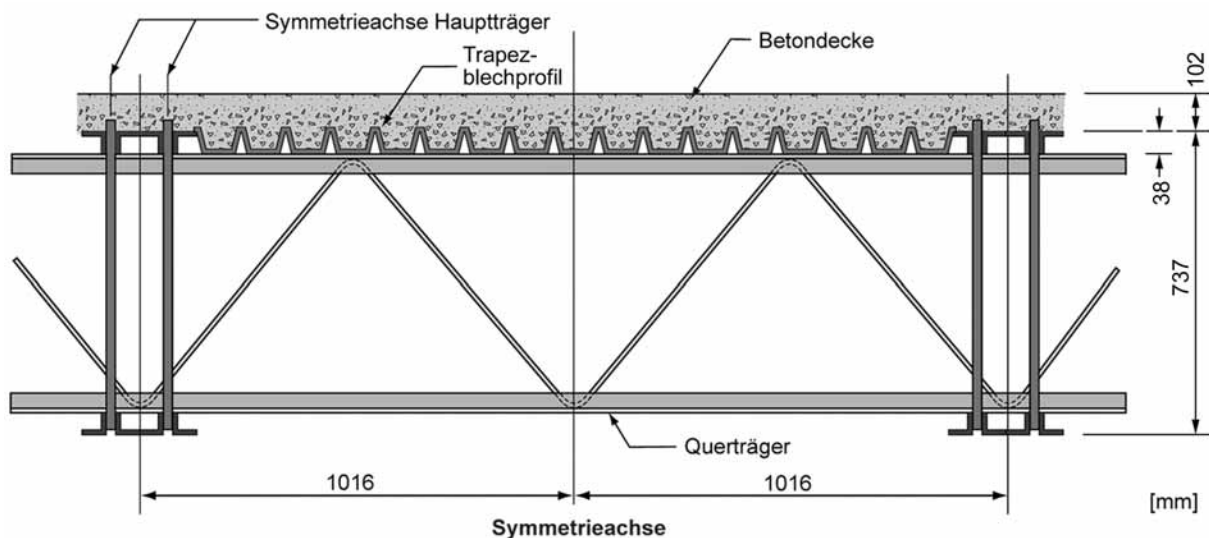


Bild 9: Schnitt durch die Deckenkonstruktion [1]

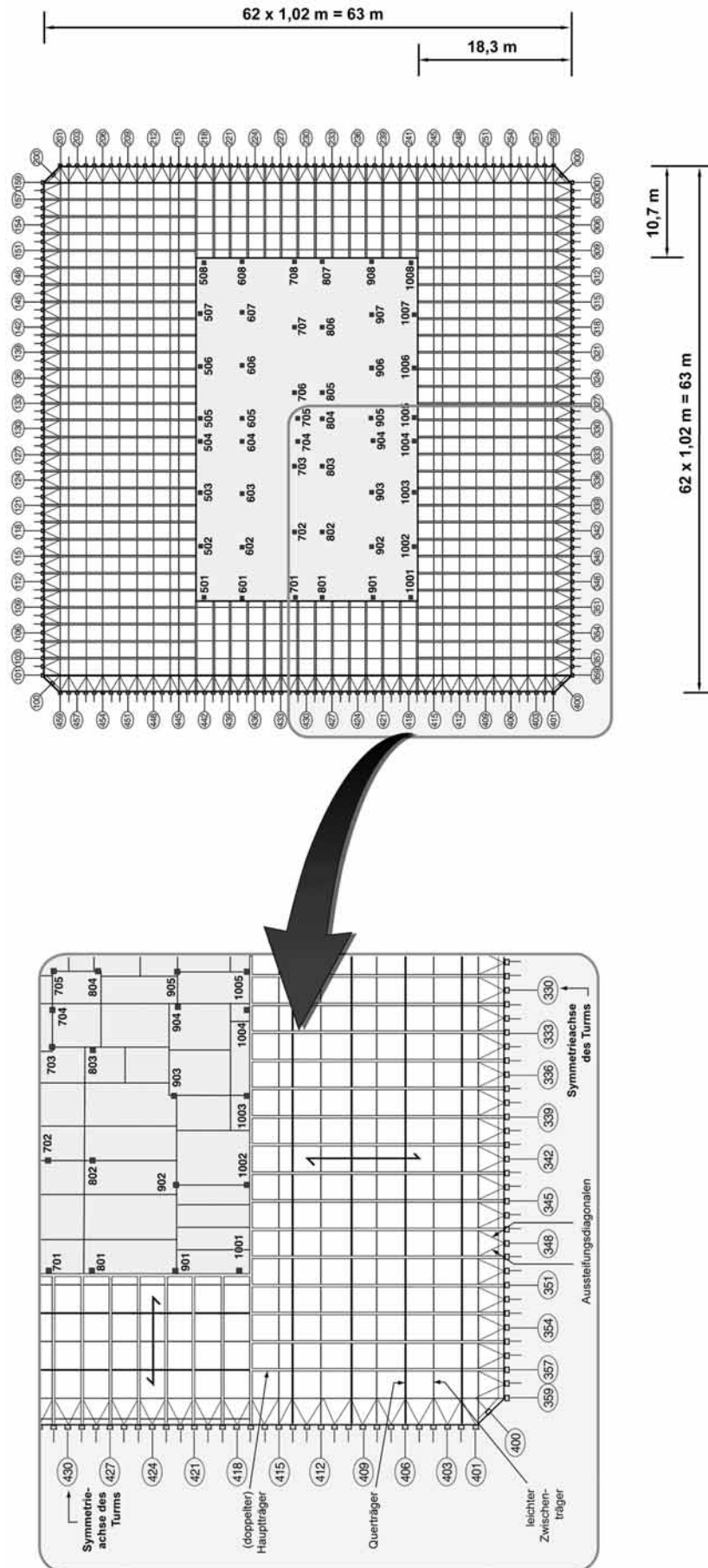


Bild 10: Grundriss eines Normalgeschosses – Tragssystem [1]

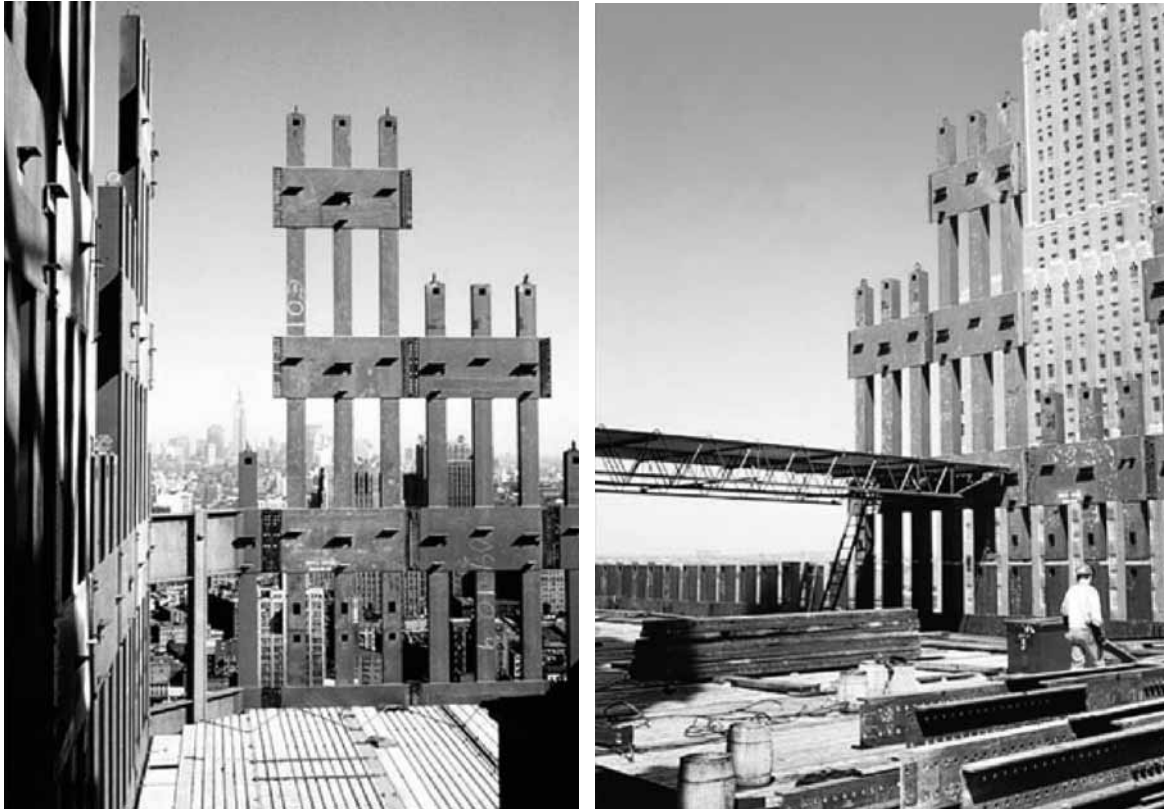


Bild 11: Montage der Deckenträger bei der Errichtung des WTC [1]

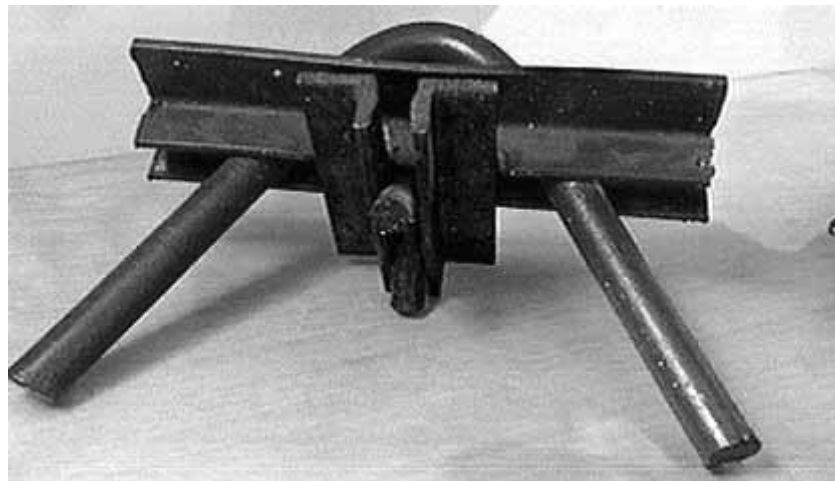
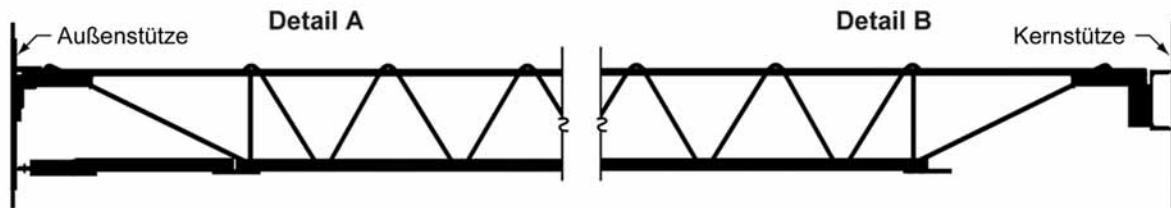
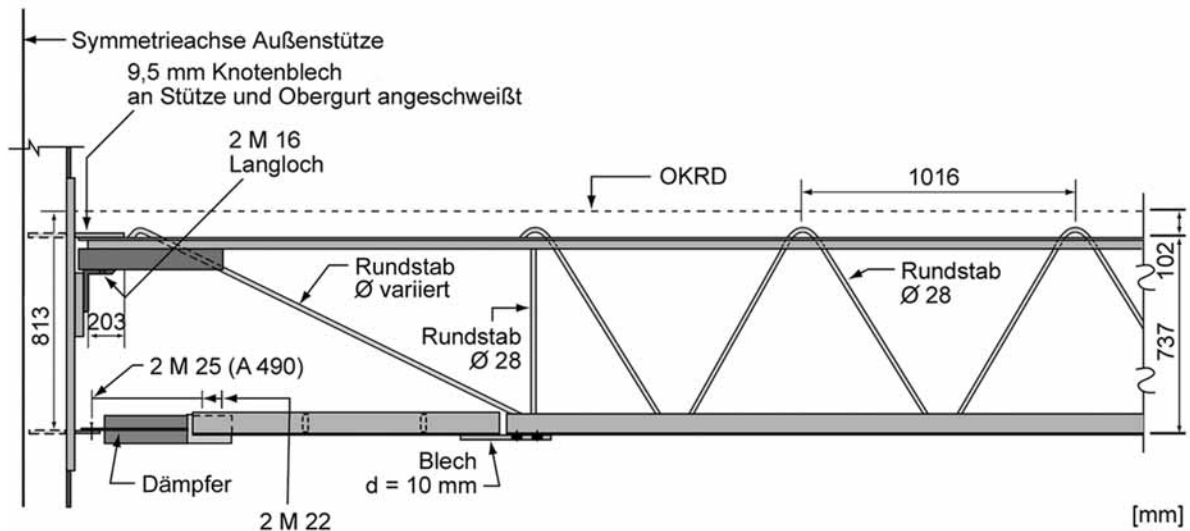


Bild 12: Obergurt-Detail eines Deckenträgers [Spiegel TV]

Im Hinblick auf die spätere Diskussion der Einsturzursachen soll die Auflagerung der Haupt-Fachwerkträger genauer betrachtet werden, Bild 13. Bei der Trägermontage wurden zunächst an beiden Enden je zwei angeschweißte Bolzen $\varnothing 16$ in Langlöcher eines Auflagerwinkels gesteckt, was eine hohe Verlegegeschwindigkeit ermöglichte. Auf der Kernseite (Detail B) blieb die Langloch-Steckverbindung verschieblich, jedenfalls so lange wie die Aufbetonplatte nicht betoniert war. Auf der Fassadenseite wurde ein 9,5 mm dickes Knotenblech, das werkseitig bereits mit dem Obergurt verbunden war, an die Fassadenstütze geschweißt, so dass hier eine unverschiebliche Verbindung zur Rahmenröhre gegeben war (Detail A).



Detail A - Auflager Außenstütze



Detail B - Auflager Kernstütze

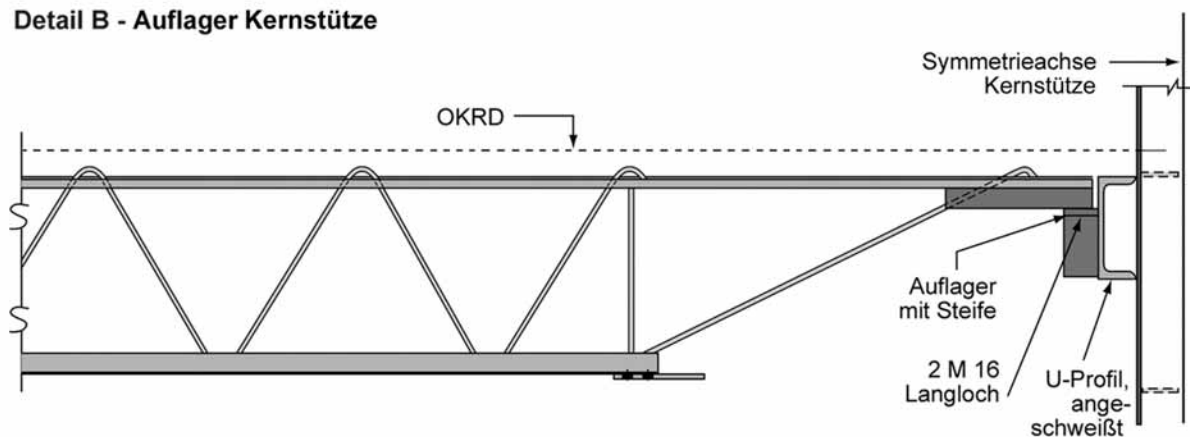


Bild 13: Deckenträger mit Auflagerdetails [1]

Erstmals im Hochhausbau wurden *viskoelastische Schwingungsdämpfer* – pro Turm ca. 10.000 Stück – eingesetzt, die den Untergurt mit den Fassadenstützen verbanden, um winderregte Schwingungen rascher abklingen zu lassen.



2.4 Gründung

Unterhalb der Türme und der Plaza befand sich auf der westlichen Hälfte des Grundstücks ein sechsgeschossiger, unterirdischer Baukörper mit Technikräumen, Tiefgaragen, U-Bahn-Stationen und Einkaufszentrum.

Für den Bau dieser Tiefgeschosse musste eine 22,50 m tiefe Baugrube ausgehoben werden, die angesichts der benachbarten Bebauung und der Nähe des Hudson River eine große Herausforderung darstellte. Man löste dieses Problem, indem man die gesamte Baugrube mit einer rückverankerten Umfassungswand umschloss, die später Bestandteil des unterirdischen Baukörpers wurde. Diese Umfassungswand wurde als Schlitzwand hergestellt und bildete mit dem Felsgrund eine wasserdichte „weiße Wanne“. Erst danach erfolgte der eigentliche Aushub der Baugrube. Mit Fortschreiten des Aushubs wurden stählerne Zuganker schräg nach außen bis in den Fels getrieben, welche die Baugrubenwand gegen seitlichen Erd- und Wasserdruck stabilisierten. Bevor man die Untergeschosse errichtete, wurden die Fundamente für die hier beginnenden Fassaden- und Kernstützen der beiden Türme direkt auf dem Felsgrund hergestellt. Mit zunehmendem Baufortschritt der inneren Konstruktion übernahmen die Geschossdecken der Untergeschosse die seitliche Stützung der Baugrubenwände und die Anker wurden wieder durchtrennt, vermutlich, um keine Lasten dauerhaft in die Nachbargrundstücke einzuleiten.

Eine weitere Herausforderung an die Konstrukteure der Tiefgeschosse waren die bestehenden U-Bahn-Linien, die das Grundstück schon damals unterquerten. Während der Aushubarbeiten musste eine dieser Tunnelröhren temporär unterstützt werden, später wurden alle U-Bahn-Linien mit Haltestellen in die Unterkonstruktion eingebunden.

3 Das brandschutztechnische Konzept der Zwillingtürme

3.1 US-amerikanische „Brandschutz-Philosophie“

Entsprechend US-amerikanischen Vorschriften ist der Brandschutz eines Gebäudes durch ein System von korrelierenden brandschutztechnischen Einrichtungen zu gewährleisten, wie beispielsweise

- *passive Systeme* wie die Einteilung in Brandabschnitte und sonstige bauliche Feuerschutzmaßnahmen,
- *aktive Systeme* wie Sprinkleranlagen, Brandmeldevorrichtungen und Rauchmelder.

3.2 Passiver Brandschutz

Das Deckentragwerk besaß zur Erzielung eines hinreichenden Feuerwiderstandes einen profilfolgenden Spritzbewurf entsprechend der deutschen Spezifikation F 180. Im WTC 1 wurde das stählerne Deckentragwerk bis hinauf zum 39. F ursprünglich mit einem Asbest enthaltenden Spritzputz versehen, Bild 14. Danach – vermutlich weil zwischenzeitlich weltweit die Gefährlichkeit der Asbestfasern bekannt wurde – setzte man asbestfreie Spritzschutz-Materialien ein. Oberhalb des 39. F und

durchweg im WTC 2 kam ausschließlich asbestfreies Spritz-Material zur Anwendung. Die mittlere Dicke der Schutzschicht betrug etwa 2 cm. Seit Mitte der 90er Jahre wurde die Spritzschuttschicht auf den doppelten Wert (also etwa 4 cm) vergrößert, sobald sich durch Mieterwechsel Leerstände ergaben. Bis zum 11. September 2001 war diese Nachrüstungsmaßnahme in insgesamt 31 Geschossen durchgeführt worden. Sie umfasste in WTC 1 die gesamte Einschlagzone (94. bis 98. F), in WTC 2 im Bereich der Einschlagzone allerdings nur den 78. F; die Einschlagzone aber umfasste hier die Geschosse 78 bis 84!

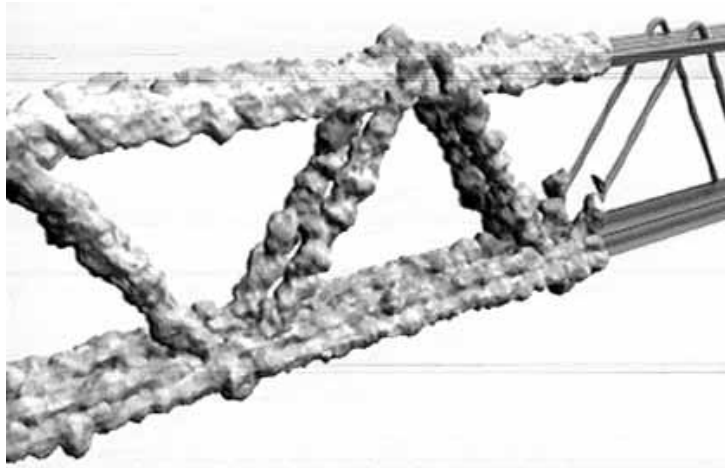


Bild 14: Spritzschutz der Deckenträger [Spiegel TV]

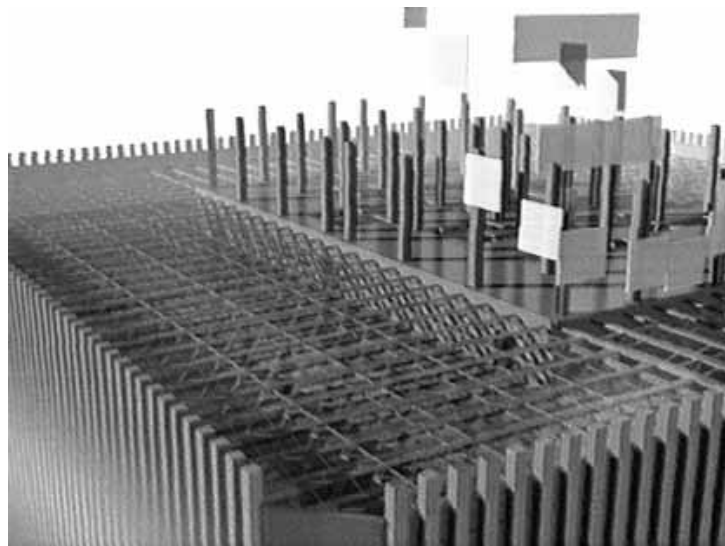


Bild 15: Computer-Simulation: Gipskarton-Verkleidung des Kerns [Spiegel TV]

Die Brandabschnitte in vertikaler Richtung wurden primär durch die Geschosdecken gewährleistet, die bündig gegen die Querriegel der Fassadenröhre betoniert worden waren. Nach einem Brand im Jahre 1975 waren die vertikalen Durchdringungen für Kabel und Rohrleitungen mit einem feuerfesten Material versiegelt worden. Die Treppenhaus- und Aufzugschächte wurden durch vorgesetzte Wände aus Gipskartonplatten geschützt, die auf vertikalen Stahlschienen befestigt waren. Die Dicke der Gipskartonplatten betrug innen 1,5 cm und außen $2 \times 1,5 \text{ cm} = 3,0 \text{ cm}$, was nach US-amerikanischen Vorschriften eine Feuerwiderstandsdauer von zwei Stunden gewährleistete.

Fassadenstützen und -riegel waren für eine Feuerwiderstandsdauer von drei Stunden (F 180) ausgelegt worden. Die Außenseiten der Fassadenstützen waren mit einem isolierenden Vermiculite-Putz bekleidet, die Innenseiten mit einem feuerbeständigen Spezialputz, Bild 16. Die Dicke der Schutzschichten variierte: wenn die Stahlplatten dick genug waren, wurde die Schutzschichtdicke reduziert, so dass – rein rechnerisch – eine gleichmäßige Bemessungs-Widerstandsdauer von drei Stunden erreicht wurde.

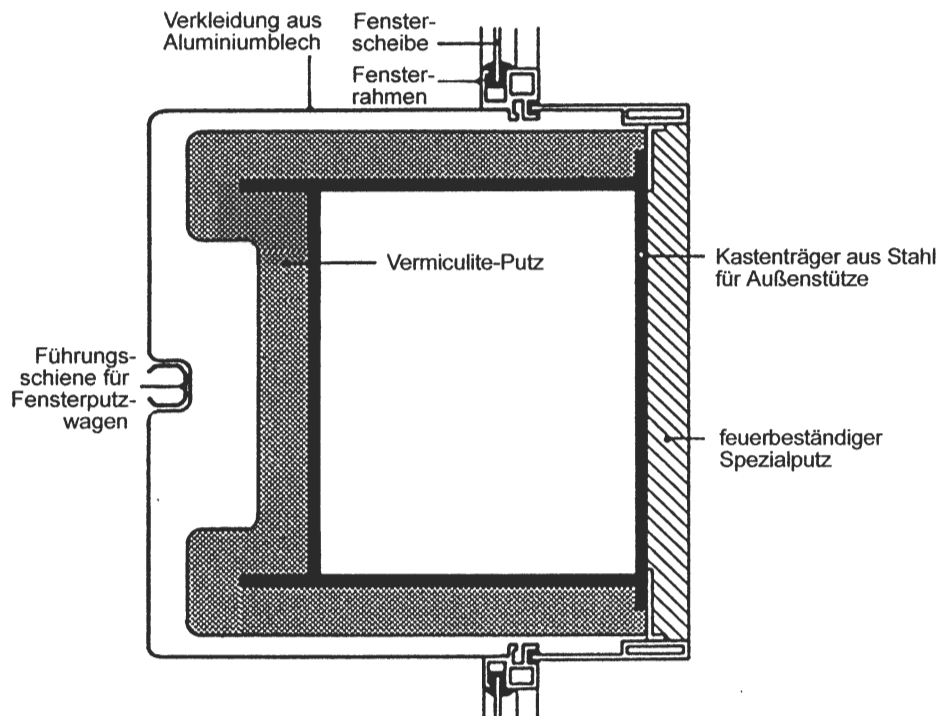


Bild 16: Querschnitt Außenstütze [6]

Die Höhe der Brandabschnitte in vertikaler Richtung variierte innerhalb des Gebäudekomplexes: einige liefen von Betonplatte zu Betonplatte, andere erstreckten sich lediglich bis hin zur abgehängten Decke.

3.3 Aktive Feuerbekämpfungssysteme

Ursprünglich waren die beiden Türme *nicht* mit einer automatischen Sprinkleranlage ausgerüstet. Allerdings waren ab 1990 im Zuge einer brandschutztechnischen Nachrüstungsmaßnahme beide Türme zu nahezu 100 % mit automatischen Sprinkleranlagen versehen worden. In allen Treppenhäusern der beiden Türme wurden Steigleitungen hinaufgeführt. Zusätzlich waren in jedem Geschoss und in jedem Treppenhaus ein 1½ Zoll-Schlauch („C-Schlauch“, ~ Ø 40 mm) sowie eine Feuerlöschanlage mit je zwei druckluftbetriebenen Wasserlöschern installiert.

Die primäre Löschwasserversorgung wurde gewährleistet durch eine Haupttringleitung, die nahezu um den gesamten Komplex herum lief. Diese Hauptleitung wurde direkt über die städtische Wasserversorgung gespeist. Zwei elektrisch betriebene Hochdruckpumpen mit einer Leistung von ca. 3.000 l/min entnahmen das Wasser aus dem städtischen New Yorker Wassernetz und erzeugten den erforderlichen Druck für die Hauptlöschwasserleitung.

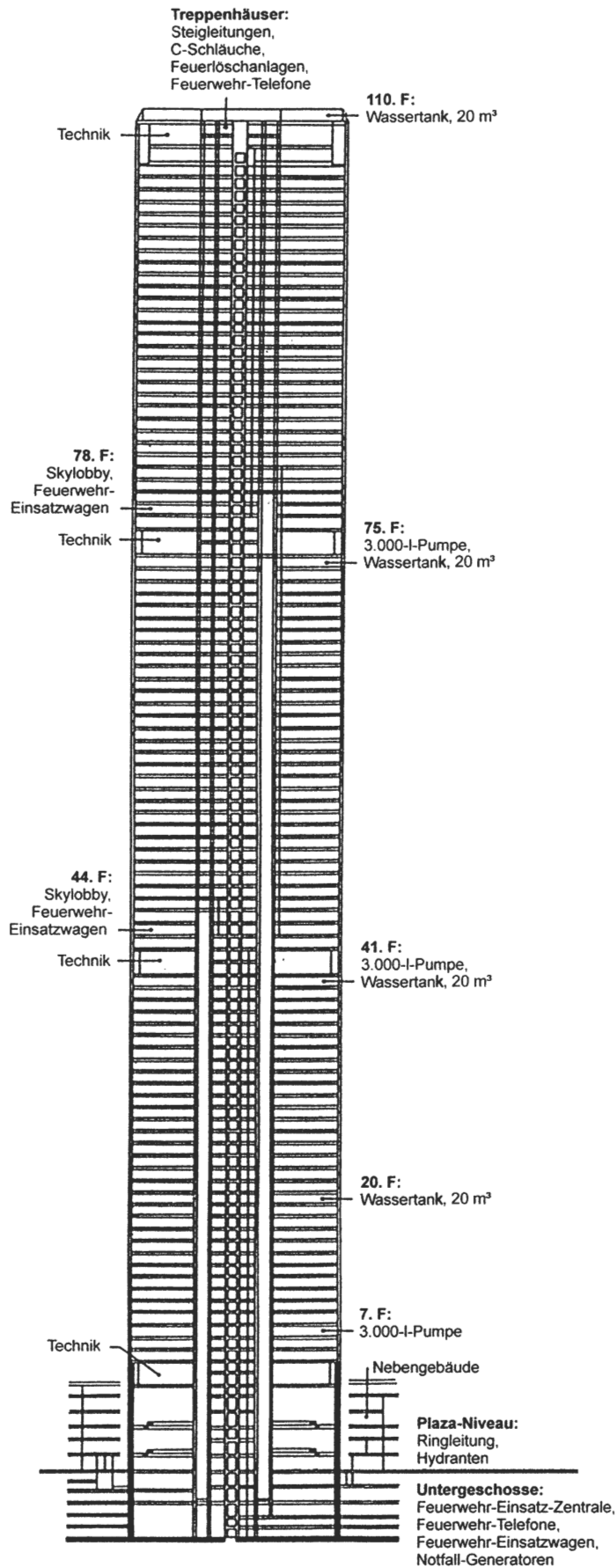


Bild 17: Anordnung der Feuerbekämpfungs-Einrichtungen [Skizze in Anlehnung an [6]]



Jeder Turm besaß drei elektrisch betriebene Pumpen, welche die Steigleitungen mit dem erforderlichen Zusatzdruck versorgten. Eine dieser Pumpen befand sich im 7. F, wo sie ihr Wasser von den Haupttringleitungspumpen empfing. Sie beförderte das Wasser in den 41. F, wo sich die zweite 3.000-l-Pumpe befand, die ihrerseits den Weitertransport zu Pumpe 3 im 75. F besorgte. Die Höhendifferenz zwischen den Pumpen betrug jeweils ca. 125 m. Für den Fall, dass eine dieser Pumpen ausfallen sollte, war die Leistung jeder Pumpe so ausgelegt, dass sie die jeweils übernächste noch erreichen konnte. Mehrere 20-m³-Reservetanks, die vom hauseigenen Leitungssystem gespeist wurden, gewährleisteten eine zusätzliche Löschwasserversorgung. Im 41. F, 75. F und 110. F waren Wassertanks angeordnet, welche ihr Wasser direkt in das Leitungssystem einspeisen konnten. Ein Tank im 20. F war direkt mit der erdgeschossigen Haupttringleitung verbunden. Zahlreiche Hydranten des *Fire Department of New York* (FDNY) waren rund um den gesamten Gebäudekomplex angeordnet und ermöglichten es der Feuerwehr, den Wasserdruck im Gebäude zu vergrößern.

3.4 Entrauchung

Ein „zoniertes“ Rauch-Kontroll-System war in die Belüftungssysteme beider Gebäude eingebaut. Es konnte auf Anweisung des wachhabenden FDNY-Einsatzleiters aktiviert werden. Die Systeme hatten die Aufgabe, eine Rauchausbreitung aus dem Bereich der Büros in den Kernbereich zu verhindern. Diese Maßnahme sollte einerseits den Nutzern die Flucht ermöglichen und andererseits den Brandbekämpfern den Zugang zum Brandherd erleichtern.

3.5 Feuerwehr

Zur Zeit des Bombenanschlags im Jahre 1993 war eine Feuerwehr-Einsatz-Zentrale (Fire Command Center, FCC) für die beiden Türme im Untergeschoss B1 eingerichtet. Nach dem Bombenanschlag wurden zusätzliche FCC in den Eingangshallen beider WTC-Türme geschaffen. In den Zwillingtürmen wurden danach ein Radiakabel und eine Spezial-Antenne installiert, um innerhalb der Türme die Benutzung der FDNY-Funksprechgeräte zu erleichtern. Feuerwehr-Telefone wurden in beiden Türmen eingerichtet, sowohl im Fluchttreppenhaus 3 als auch in den Untergeschossen B1, B4 und B6.

Das WTC hatte selbstverständlich seine eigene „Werksfeuerwehr“, die aus Polizeibeamten der *Port Authority* (Hafenbehörde, Eigner der Immobilie) bestand, für Brandschutzaufgaben speziell ausgebildet war und eng mit dem FDNY zusammenarbeitete. Diese Hausfeuerwehr hatte Sonder-Einsatzwagen zur Verfügung, welche in der Ebene B1, im 44. F und im 78. F stationiert waren, d.h. in den so genannten Skylobbies, wo sich auch die Umsteigestationen für die Aufzüge befanden. Diese Wagen waren ausgerüstet mit Schläuchen, Strahlrohren, umluftunabhängigen Atemschutzgeräten, Feuerwehr-Einsatzjacken, Aufbruchwerkzeugen, Wiederbelebungsgeräten, Verbandskästen und weiterer Notfallausrüstung. Planmäßig war vorgesehen, dass die Feuerwehr im Einsatzfall den nächststehenden Wagen ergreift und sich in das Geschoss unterhalb des Brandgeschehens begibt.

Der gesamte WTC-Komplex verfügte über 24 Doppel-Hydranten auf Straßenniveau für die Nutzung durch das FDNY. Jeder dieser Hydranten war jeweils für die

Bedienung definierter Teile des Komplexes vorgesehen und war entsprechend gekennzeichnet.

3.6 Fluchtwege

Jeder Turm besaß drei unabhängige, feuersichere Fluchttreppenhäuser, die alle im Kernbereich des Gebäudes angeordnet waren, wie Bild 18 zeigt. Die Treppen 1 und 2 waren ca. 1,10 m breit und liefen durch bis zum 110. F. Treppe 3 war ca. 1,40 m breit und lief bis in den 108. F. Die Treppenhäuser liefen allerdings nicht kontinuierlich vom Erdgeschoss bis zur Spitze in einem Schacht durch, sondern versprangen auf einigen Ebenen, und Nutzer der Treppenhäuser mussten über einen „Transfer-Korridor“ von einem Schacht zum anderen wechseln. Treppenhaus 2 hatte solche Transfer-Korridore auf vier Ebenen, nämlich im 42. F, 48. F, 76. F und im 82. F; Treppenhaus 1 hatte einen zusätzlichen Versatz im 26. F. Treppenhaus 3 wies nur einen einzigen Versatz im 76. F auf. Erst nach dem 93er Bombenanschlag wurde eine batteriebetriebene Beleuchtung in den Treppenhäusern eingerichtet und ein fluoreszierender Anstrich auf den Rändern der Trittstufen angebracht.

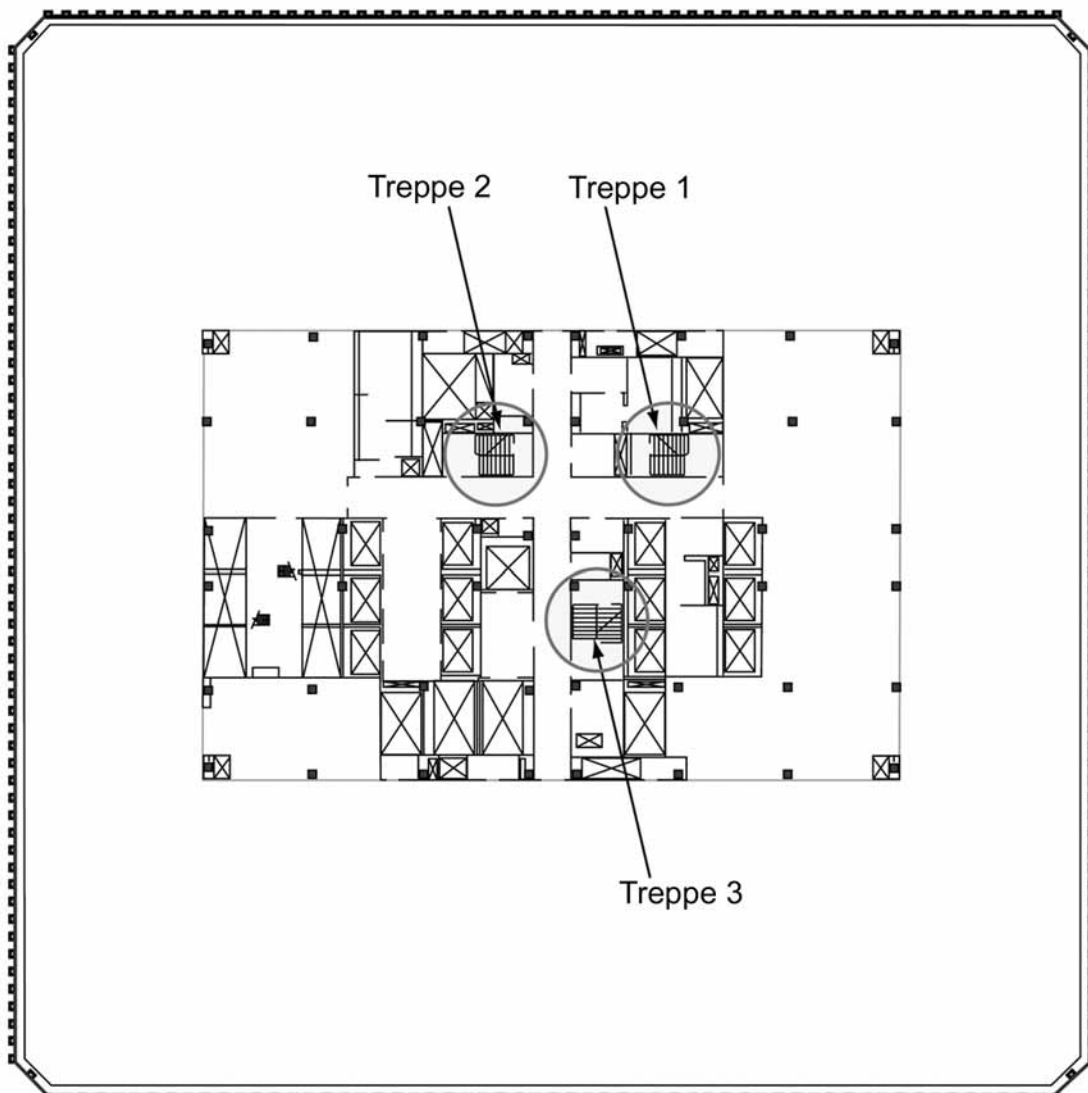


Bild 18: Grundriss des 94. und 95. Stockwerks des Nordturms mit Lage der Treppenhäuser [1]



In jedem der beiden Türme waren, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, 99 Aufzüge untergebracht. Alle Aufzüge, die ein Geschoss bedienten, waren in zwei Gruppen mit jeweils separater Energieversorgung eingeteilt.

Im Falle eines Feualarms schaltete sich ein automatisches Regelungssystem ein, das sämtliche bestehenden Bedienungseingaben aufhob und alle Aufzüge, die einen brennenden Bereich bedienten oder berührten, veranlasste, ins Erdgeschoss oder in ihre „zuständige“ Skylobby im 44. F bzw. im 78. F zurückzukehren. Von dort aus konnten die Aufzüge durch das FDNY manuell bedient werden. Die insgesamt 23 Expressaufzüge in den Türmen waren nicht für die Benutzung im Notfall vorgesehen – weder als Fluchtweg für die Nutzer noch für die Feuerwehrleute.

Obwohl viele Feuerwehren routinemäßig Aufzüge benutzen, um schneller und bequemer in höher gelegene Hochhauszonen zu gelangen, macht dies das FDNY grundsätzlich nicht, weil es bei derartigen Aktionen in der Vergangenheit zu tödlichen Unfällen gekommen war.

3.7 Energie-Versorgung im Katastrophenfall

Die Primärenergieversorgung erfolgte durch eine 13,8 kV-Leitung über eine erdgeschossige Schaltstation im WTC 7. Die Primärenergie wurde auf zwei getrennten Wegen zu den einzelnen WTC-Gebäuden geführt: eine Leitung diente der „Normalversorgung“, die zweite der Notfallversorgung, falls das Primärsystem ausfallen sollte.

Sechs 1.200 kW-Notfall-Generatoren, die im Untergeschoss B6 untergebracht waren, garantierten eine weitere Energieversorgungsquelle. Sie wurden regelmäßig gewartet und überprüft, um sicherzustellen, dass sie in jedem Notfall zuverlässig funktionierten. Die Generatoren stellten die Notstromversorgung für alle Kommunikationssysteme und Aufzüge, die Notbeleuchtung in Korridoren und Treppenschächten und – natürlich – die Löschwasserpumpen zur Verfügung. Das Funktionieren des Telefonsystems wurde über ein batteriegespeistes Notstromsystem gewährleistet. In den Fluchttreppenhäusern, in den Skylobbies und in den Aufzugskabinen waren individuelle Notfall-Batterien untergebracht.

3.8 Katastrophen-Management

Die Hafenbehörde hatte für ihre diversen Immobilien eine eigene Katastrophen-Management-Abteilung eingerichtet. Deren Aufgabe bestand darin, die WTC-Feuerwehr, die Sicherheitsdirektoren und die Brandschutzbeauftragten der Mieter zu schulen und zu trainieren. Das WTC hatte 25 Feuersicherheitsdirektoren, die alle brandschutztechnischen Belange des Gebäudekomplexes betreuten. Sechs satellitengestützte Kommunikationsstationen waren über die beiden Türme verteilt. Zusätzlich war jeder Mieter verpflichtet, mindestens *einen* Brandschutzbeauftragten zu stellen. Mieter, die größere Flächen nutzten, waren verpflichtet, für jeweils ca. 700 m² einen Brandschutzbeauftragten zu stellen. Schulungs- und Trainingskurse wurden zweimal jährlich durchgeführt.



4 Das Tragwerksverhalten nach dem Flugzeugeinschlag

4.1 Technische Daten der Unglücksmaschinen

Der Nord- und der Südturm durchliefen ähnliche Belastungs-Stadien. Beide Türme wurden von Passagiermaschinen des Typs Boeing 767-200ER getroffen. Maschinen dieses Typs haben ein maximales Startgewicht von 180 t, eine Reisegeschwindigkeit von 850 km/h und eine maximale Treibstoffkapazität von 90.000 l. Nach Angaben der US-Regierung betrug die Menge des noch nicht verbrauchten Kerosins zum Zeitpunkt des Einschlags ca. 40.000 l, so dass die Flugzeuge eine Einschlagmasse von je etwa 140 t besaßen. Die Geschwindigkeiten beim Einschlag wurden anhand der Videoaufzeichnungen mit ca. 760 km/h beim Nordturm und ca. 950 km/h beim Südturm abgeschätzt.

4.2 Überlebende und Todesopfer

An einem normalen Arbeitstag hielten sich in den beiden Türmen des WTC jeweils etwa 55.000 Menschen auf. Zum Zeitpunkt des Anschlags am Morgen des 11. September 2001 befanden sich im gesamten WTC-Komplex nach Schätzungen der Port Authority „nur“ ca. 58.000 Menschen, da gegen 9.00 Uhr noch nicht alle Personen an ihren Arbeitsplätzen waren und auch die meisten Touristen erst später kamen. Die offizielle traurige Bilanz der Opfer lautet (Stand: September 2002):

<i>Nutzer der Bauwerke</i>	<i>2.241 Menschen</i>
<i>Feuerwehrleute</i>	<i>343 Menschen</i>
<i>Andere Rettungskräfte</i>	<i>60 Menschen</i>
<u><i>Flugzeuginsassen</i></u>	<u><i>157 Menschen</i></u>
<i>Gesamtzahl der Opfer</i>	<i>2.801 Menschen</i>

Fast alle Personen, die sich zum Zeitpunkt des Anschlags *unterhalb* der Einschlagstelle befanden, konnten sich retten; es gibt Augenzeugenberichte, nach denen gehbehinderte oder schwer verletzte Personen von anderen Hausbenutzern bis ins Erdgeschoss hinunter getragen wurden. Nutzer der höheren Geschosse berichten, dass sie weiter unten total überfüllte Treppen vorgefunden haben, auf denen sich die Menschen dicht gedrängt in einer einzigen Schlange langsam hinunter bewegten, an denen vorbei sich in entgegengesetzter Richtung die Feuerwehrleute ihren Weg hinauf bahnen mussten. Einige der Überlebenden aus WTC 2 berichteten, dass nach dem Einschlag in WTC 1 in einer Lautsprecherdurchsage an die Nutzer des WTC 2 die Anweisung ergangen sei, in ihre Büros zurückzukehren. Die meisten Betroffenen haben – glücklicherweise – dieser Anweisung *keine* Folge geleistet sondern ihren Weg nach unten fortgesetzt. In Anbetracht der katastrophalen Auswirkungen dieses Anschlags, muss die gelungene Evakuierung der Türme als Erfolg bezeichnet werden – so makaber diese Aussage klingen mag. Insofern muss auch die "Überlebensdauer" der Türme von 56 Minuten bei WTC 2 und von 102 Minuten bei WTC 1 nach der Zerstörung wichtiger Tragglieder als Zeichen großer "Robustheit"



der Konstruktion gewertet werden. Dies sollte Ingenieure aber nicht daran hindern, künftig nach noch „robusteren“ Lösungen zu suchen.

Wenn man die Rauchfahnen der brennenden Türme betrachtet, dann wird klar, dass es eine fatale Fehlentscheidung einiger Nutzer war, in der Hoffnung auf eine Hubschrauberrettung die Flucht nach oben anzutreten.

4.3 Überblick über die Gebäudeschäden in Lower Manhattan

Der Einsturz der Türme erzeugte Druckwellen, die Staubwolken aus Gipsfetzen mehrere Blocks weit vor sich her trieben. Der Luftdruck war groß genug, um Fahrzeuge anzuheben und auch in einer Entfernung von mehreren Häuserblocks noch Fensterscheiben einzudrücken. In vielen umliegenden Gebäuden brachen – zunächst unkontrollierte – Feuer aus. Die unterschiedlichen Beschädigungsgrade der Gebäude in der Umgebung des WTC-Areals sind in Bild 19 dargestellt, Bild 20 zeigt das Ausmaß der Schäden als Satellitenbild.

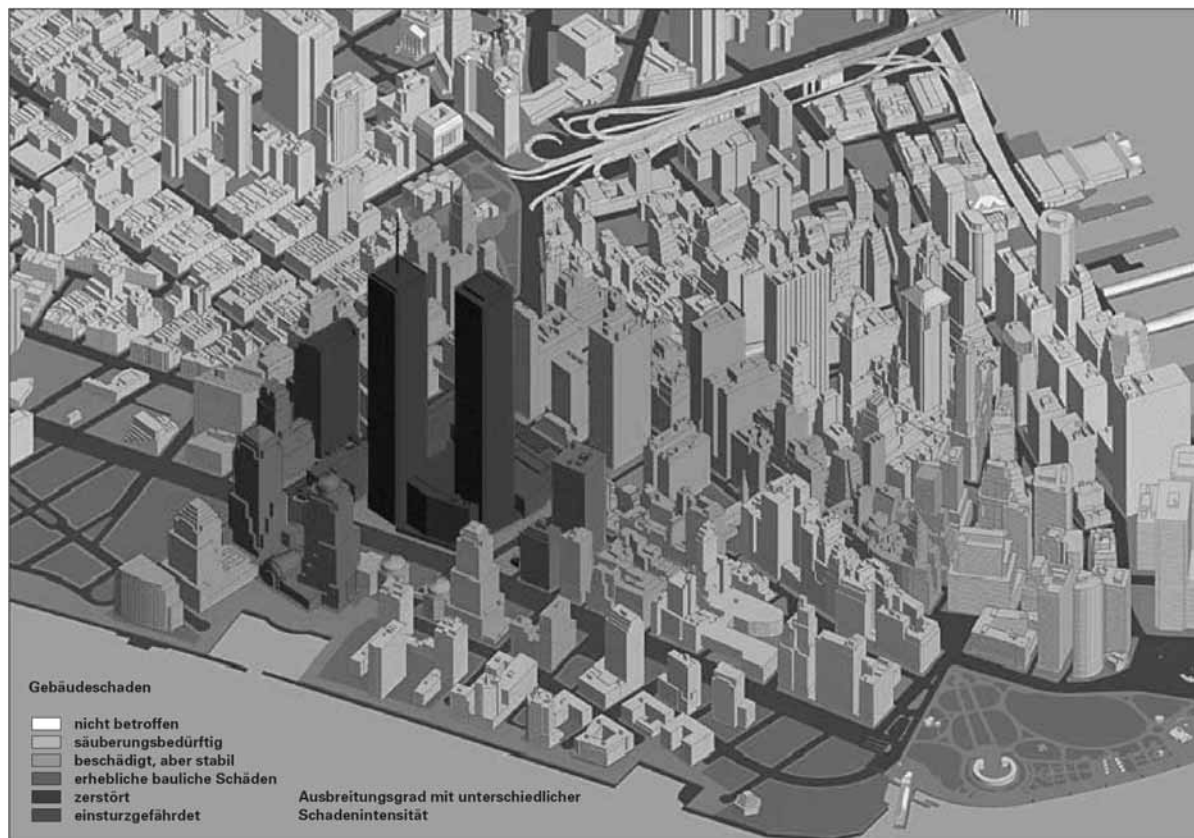


Bild 19: Gebäudeschäden in Lower Manhattan nach dem 11. September 2001 [dpa]

WTC 3 – das Marriott-Hotel – brannte aus und stürzte weitgehend ein. Die Gebäude WTC 4, 5 und 6 brannten völlig aus, niederstürzende Trümmer verursachten Teileinstürze. WTC 7 brannte sieben Stunden lang unkontrolliert bis es um 17.20 Uhr Ortszeit ebenfalls einstürzte. Die herabfallenden Trümmer zerstörten acht Hauptwasserleitungen mit Durchmessern bis zu 24 Zoll (62 cm) in einem Umkreis bis zu 250 Metern. Im FEMA-Bericht [1] ist das Versagen aller genannten Gebäude detailliert beschrieben. Im Folgenden beschränken wir uns auf den Einsturz der beiden Türme und schenken dabei dem höheren der beiden, WTC 1, besondere Beachtung.

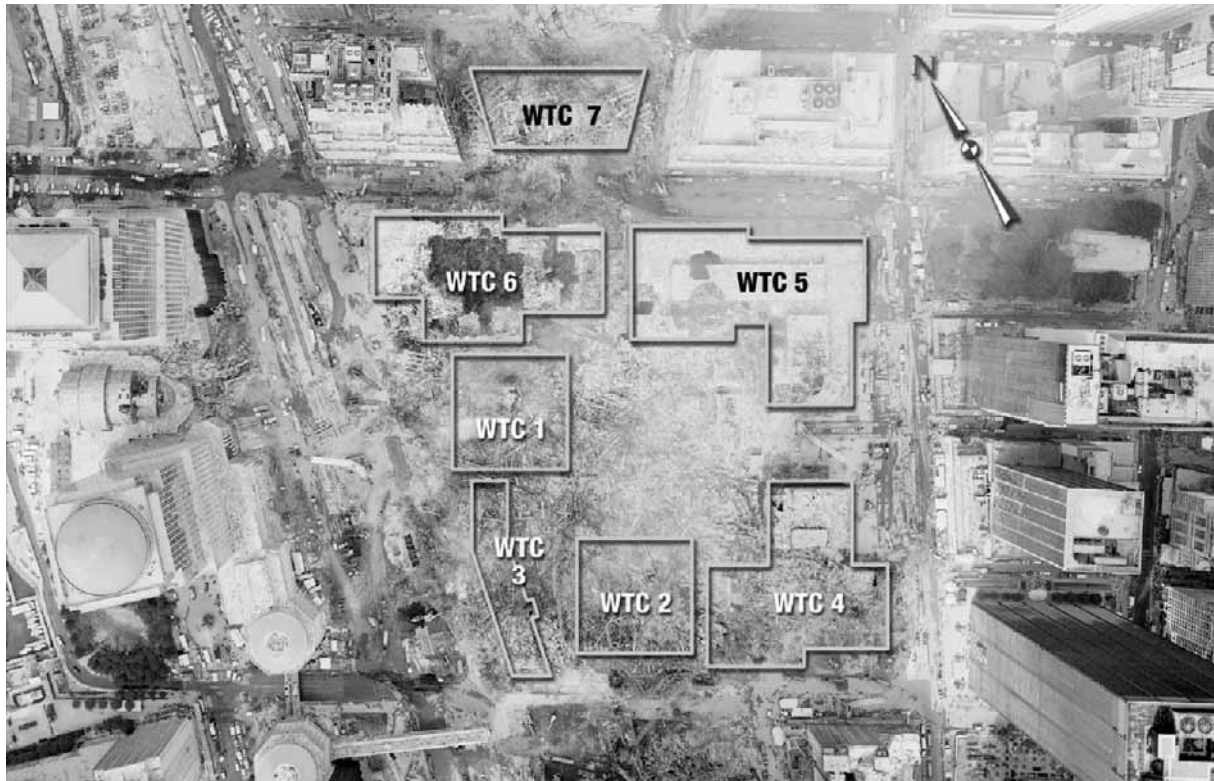


Bild 20: Satellitenbild des WTC-Areals nach dem 11. September 2001 [1]

4.4 Zum Einsturz des Nordturms

4.4.1 Schaden durch den Flugzeugeinschlag

Die Nordfassade des Nordturms wurde zwischen dem 94. und 98. F getroffen. Die Auswertung der Foto- und Videoaufnahmen ergab, dass an der Einschlagstelle 31 bis 36 von 59 Stützen über eine Höhe von bis zu vier Geschossen zerstört worden waren, Bild 21 und Tabelle 1, Seite 34. Die fehlende periphere Unterstützung verursachte vermutlich auf einer Breite von ca. 20 m den Einsturz des Deckentragwerks – ohne jedoch zunächst eine Kettenreaktion auszulösen.

Die Schäden am Kernttragwerk sind kaum bis gar nicht dokumentiert, da es oberhalb des 94. F keine Überlebenden des Einsturzes gab. Die Annahmen stützen sich auf Zeugenaussagen von Menschen, die sich aus dem 91. F retten konnten und auf wenige gesicherte Fakten. Große Trümmerteile, die im östlichen Kernbereich den Zugang zu Fluchttreppenhäusern verhinderten, deuten auf die Möglichkeit eines unmittelbaren Teileinsturzes des Kerns hin. Trümmer von nichttragenden Trennwänden im westlichen Treppenhaus lassen einen Teileinsturz des Kerns auch im Nordwesten vermuten. Man weiß mit Sicherheit, dass einige Teile des Flugzeugs durch das Gebäude hindurch gerast sind. Auf ihrem Weg durch das Gebäude haben diese Trümmer zweifellos Schäden an den nichttragenden, inneren Strukturen und an Außenstützen der West-, Süd- und Ostfassade verursacht, höchstwahrscheinlich auch an den Geschossdecken und den tragenden Teilen des Kernttragwerks.

Das statische System des Gebäudes, bestehend aus der äußeren Röhre, dem Kernttragwerk sowie dem Outrigger-System, war ein hochgradig statisch unbestimmtes Tragwerk. Dies ermöglichte es dem Gebäude, den unmittelbaren Einsturz auf

den Bereich zu beschränken, wo der Einschlag des Flugzeugs die Außenstützen über mehrere Stockwerke hinweg zerstört hatte.

Nach dem Einschlag wurden Deckenlasten, die ursprünglich über die Außenstützen abgeleitet wurden, über andere Lastwege geführt, Bild 22. Ein Großteil der Lasten,



Bild 21: Einschlag-Schaden an den Außenstützen der Nordfassade von WTC 1 [1]

die vor der Zerstörung von den Außenstützen getragen wurden, konnte aufgrund des „Vierendeel-Tragverhaltens“ der Außenwände an benachbarte Außenstützen abgegeben werden. Die Außenstützen besaßen offensichtlich beträchtliche Lastreserven für den vertikalen Lastabtrag. Erste Schnittgrößenermittlungen am beschädigten Gebäude lassen vermuten, dass die Druckbeanspruchung der Stützen, die direkt neben den zerstörten standen, etwa auf das Sechsfache stieg. Selbst wenn man vernachlässigt, dass die äußeren Stützen ihre horizontale Halterung verloren, als die Deckenträger einstürzten, gerieten die am stärksten belasteten Stützen in die Nähe ihres rechnerischen Bruchzustandes. Die Belastung der etwas weiter entfernten Stützen blieb wahrscheinlich noch deutlich *unter* ihrer Grenztragfähigkeit.

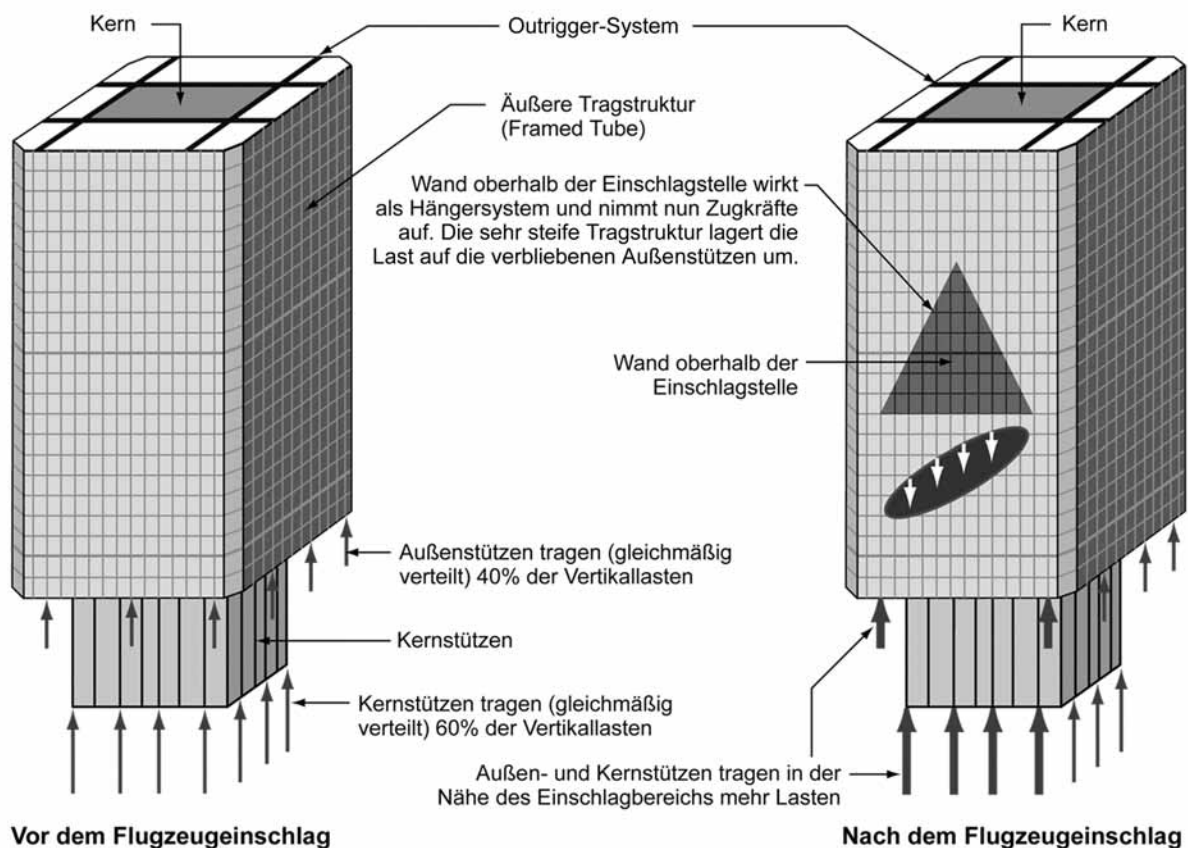


Bild 22: Umlagerung der Lasten nach dem Flugzeugeinschlag [1]

Erste Untersuchungen ergaben, dass der Ausfall der Stützen im Einschlagbereich dazu führte, dass sich das Tragwerk sofort leicht in Richtung des Einschlags neigte. Diese Systemverformung führte zu zusätzlichen Beanspruchungen nach Theorie II. Ordnung: Am verformten System griff nun ein *zusätzliches Knickmoment* an.

Außerdem wurde ein Teil der Außenstützen oberhalb der Einschlagstellen von *Druck-* zu *Zuggliedern*. So wurde ein Teil der Lasten über die Outrigger-Konstruktion auf die Innenstützen des Kerns abgeleitet. Der Outrigger ermöglichte es aber auch, Lasten von zerstörten Kernstützen auf benachbarte, unbeschädigte Kernstützen umzuleiten. Das Tragwerk war also nach dem Einschlag des Flugzeugs in der Lage, das Eigengewicht des Turms auf die verbliebenen Elemente umzulagern, und das Gebäude – trotz der stark verminderten Gesamtfestigkeit – vorerst in einer stabilen Lage zu halten. Ohne zusätzliche Lasten – wie z.B. stärkerer Wind, Erdbeben oder

größere Brände – hätte das Gebäude in diesem Zustand noch eine unbestimmte Zeit stehen bleiben können. Es brachen aber, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, Brände aus. Die Kraft des Einschlags, die daraus resultierende Trümmerlast und die Feuerbälle rissen im direkten Einschlagbereich wahrscheinlich den aufgespritzten Brandschutz von den tragenden Stahlbauteilen. Das exakte Ausmaß dieser Beschädigungen wird man wohl nie ermitteln können, aber eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber feuerbedingtem Versagen der Konstruktion ist sicher. Ein Indiz für diese Vermutung liefert auch die deutlich längere Feuerwiderstandsdauer von 102 Minuten im WTC 1, wo – im Gegensatz zu WTC 2 – die Spritzschicht auf den Deckenträgern in allen Geschossen konsequent von 2 auf 4 cm vergrößert worden war.

4.4.2 Brandverlauf

Die Auswertung des vorhandenen Foto- und Videomaterials zeigt, dass die Flugzeuge erst vollständig in die Türme eindrangen, bevor es auf der Außenseite sichtbare Hinweise auf eine Flammenentwicklung gab. Als die Flugzeuge in die Gebäude einschlugen und sich dort ihren Weg bahnten, verteilten sie im gesamten Einschlagbereich Kerosin und erzeugten dabei eine entzündbare Aerosol-Wolke aus Kerosin und Luft. Die Entzündung dieser Wolke bewirkte einen schnellen Druckanstieg im Innern des Turms und drückte einen Teil des Treibstoff-Luft-Gemisches aus dem Einschlagsbereich in die Schächte und durch die bei dem Einschlag entstandenen Öffnungen. Dabei entstanden riesige Feuerbälle, als sich das Aerosol entzündete. Die ersten eintreffenden Feuerwehrleute sahen, dass auch auf dem Eingangsniveau die Fensterscheiben zerborsten waren, wahrscheinlich wegen des Überdrucks in den Fahrstuhlschächten. Dieser Überdruck entstand, als in den vom Flugzeug getroffenen Stockwerken die Kerosinwolken verbrannten; er beschädigte auch die Wände der Fahrstuhlschächte bis hinunter in den 23. F.



Bild 23: Feuerbälle nach dem Einschlag in den Südturm [1]



Es gibt nur wenig Videomaterial, das den Einschlag in den Nordturm und die sich daraus ergebenden Feuerbälle zeigt. Zahlreiche Aufnahmen des Einschlags in den Südturm zeigen drei Feuerbälle, die im Süden, Osten und Westen aus dem Südturm herausschlagen. Diese Feuerbälle wuchsen relativ langsam, sie erreichten ihre maximale Größe erst nach etwa zwei Sekunden. Ihr Durchmesser betrug mehr als 60 Meter. Trotz des dramatischen Aussehens der Feuerbälle ist es sicher, dass diese Feuerbälle *nicht explodierten* und *keine Druckwelle* auslösten. Hätte es eine *Explosion* oder eine *Detonation* gegeben, dann hätte die Expansion der Gaswolke nämlich innerhalb von *Sekundenbruchteilen* stattgefunden. Obwohl durchaus ein gewisser Überdruck entstand, ist es unwahrscheinlich, dass die Feuerbälle, die sich ja außerhalb des Gebäudes befanden, im Gebäudeinnern große Schäden am Tragwerk angerichtet haben. Vergleicht man die Feuerbälle mit ähnlichen, experimentell erzeugten, so lässt sich daraus ableiten, dass etwa 4.000 bis 11.000 l Kerosin, also etwa 10 bis 30 % des Tankinhalts, in den Feuerbällen verbrannten. In Ermangelung anderer Informationen geht man davon aus, dass in den Feuerbällen, die nach dem Einschlag in den Nordturm entstanden, eine ähnlich große Menge Treibstoffs verbrannte. Nimmt man an, dass etwa 11.000 l Kerosin in den Feuerbällen verbrannt wurden, dann bleibt ein Rest, der entweder direkt in den Stockwerken des Einschlags verbrannte oder durch die Schächte nach unten floss. Nimmt man weiterhin an, dass etwa die Hälfte des Kerosins in untere Stockwerke abfloss, so sind etwa 15.000 l in den getroffenen Geschossen verblieben. Davon wiederum verteilte sich ein Teil in der Luft, und ein Teil floss auf den Boden. Das Gemisch verbrannte so schnell, wie es die Sauerstoffzufuhr ermöglichte und entzündete dabei alles brennbare Material.

Die Zeit, in der alles Kerosin verbrannte, kann plausibel berechnet werden. Die längste Branddauer hätte vorgelegen, wenn sich alle 40.000 l Treibstoff gleichmäßig in *einem* Geschoss verteilt hätten. Die entstehende Kerosinpfütze wäre – genügend Sauerstoff vorrausgesetzt – in weniger als fünf Minuten verbrannt. Tatsächlich aber hat sich das Kerosin wohl über mehrere Stockwerke verteilt. Ein Teil wurde wohl von Teppichböden und Möbeln aufgesaugt, ein Teil wird stichflammenartig im Kerosin-Luft-Gemisch verbrannt sein, ein Teil wurde, wie oben beschrieben, nach außen gedrückt und verbrannte in den Feuerbällen, und der Rest floss aus den brennenden Stockwerken hinaus. Bezieht man all diese Möglichkeiten ein, ist davon auszugehen, dass nahezu das gesamte Kerosin, das in den Einschlaggeschossen verblieben war, innerhalb der ersten Minuten verbrannte. Das brennende Kerosin verursachte eine Hitze, die in den getroffenen Geschossen großflächig alle brennbaren Büroinhalte sowie die brennbaren Flugzeugteile entzündete, so dass das Kerosin als Brandbeschleuniger wirkte.

Eine kleine Anzahl von Foto- und Videoaufnahmen zeigt das Gebäude und die aufsteigende Rauchwolke in den ersten Augenblicken nach dem Flugzeugaufprall. Das Aufsteigen der Rauchwolke wird in vertikaler Richtung durch den Auftrieb bestimmt und horizontal durch den Wind. Wertet man diese Beobachtungen aus, so lässt sich die Auftriebsenergie in der Rauchwolke abschätzen. Wissenschaftler des US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) haben mit Simulationsprogrammen die Größe des Feuers ermittelt, die erforderlich ist, um eine Rauchwolke wie die des WTC zu erzeugen. Folgende Randbedingungen beeinflussen einen Brand:

- Die Größe der Öffnungen, durch die dem Feuer der benötigte Sauerstoff zuströmen kann.



- Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur im betreffenden Zeitraum. Die Windgeschwindigkeit im Bereich der oberen Stockwerke des WTC betrug 16 bis 32 km/h, die Außentemperatur 20 bis 21 °C.

Die Simulation ermittelte pro Turm einen Energieausstoß von 1,0 bis 1,5 Gigawatt, was der *Leistung eines mittleren Kernkraftwerks* entspricht. Ein Drittel bis die Hälfte dieser Energie wurde freigesetzt. Die Kraft dieser abfließenden Energie trieb die Rauchfahnen an. Die abziehende Energie und der begleitende Rauch beider Türme vereinigten sich zu einer einzigen Rauchfahne. In der Simulation wurde eine Höchsttemperatur von 900 bis 1100 °C ermittelt. Exakte Angaben sind aufgrund der fehlenden Daten hinsichtlich der ursprünglichen Verhältnisse im Gebäude, der durch die Flugzeugeinschläge veränderten Gebäudegeometrie und der Kerosinmenge nicht möglich. Die Höchsttemperatur muss nicht überall erreicht worden sein, es ist durchaus denkbar, dass die Temperatur in Teilen des Gebäudes nur 400 bis 800 °C betrug. Dafür spricht, dass es sich nicht um *ein* großes Feuer sondern um *viele* kleinere, verstreute Feuer handelte, deren Temperatur stark von der Art und der Anordnung des brennbaren Materials und der jeweils verfügbaren Luftmenge abhing.

Die Lebensfähigkeit eines Feuers hängt von der Versorgung mit Sauerstoff und vom Brennmaterial ab. Um ein 1,0 bis 1,5 Gigawatt-Feuer zu ermöglichen, benötigt man 17.000 bis 28.000 m³ Luft pro Sekunde und, abhängig von der Zusammensetzung und Anordnung der Brandlast, eine brennende Bürofläche von 3.000 bis 4.500 m². Ein bis zwei gleichzeitig brennende Geschosse des WTC stellten diese Fläche mühelos zur Verfügung. Die für die Verbrennung benötigte Zuluft gelangte hauptsächlich durch die von den Flugzeugen und den Feuerbällen in die Fassade gerissenen Öffnungen an die Brandorte. Auch die hitzebedingt geplatzen Fensterscheiben ließen immer mehr Frischluft in das Gebäude hinein.

Manchmal ermöglichen Schächte einem Feuer im Inneren von Hochhäusern einen zusätzlichen Zustrom an Frischluft. Dieser so genannte *Kamineffekt* tritt auf, wenn die Temperatur im Inneren eines Gebäudes höher ist als außerhalb. Die Temperaturdifferenz bewirkt einen Unterdruck im Gebäude, der die frische Luft durch den Schacht zum Feuer strömen lässt. Je wärmer es im Gebäudeinneren und je kälter es im Freien ist, desto ausgeprägter ist dieser Sogeffekt. Da die Außen- und Innentemperaturen im WTC am 11. September 2001 aber praktisch gleich waren, fiel der Kamineffekt in diesem Fall nur gering aus.

Es wird vermutet, dass das einschlagende Flugzeug die Systeme der Sprinkleranlage und der Steigleitungen unterbrochen hat und damit sowohl das automatische als auch das manuelle Löschesystem außer Betrieb setzte. Selbst wenn dies nicht der Fall gewesen wäre, hätten die großflächigen Feuer so viele Sprinklerköpfe angefordert, dass innerhalb kurzer Zeit der Druckabfall im Leitungsnetz die Anlage stillgelegt hätte. Auch der relativ geringe Wasserstrom aus den internen Löschwasserschläuchen hätte nicht gegen diese Feuer ankommen können.

4.4.3 Reaktion des Gebäudes auf die Brandbelastung

Als sich die Feuer ausbreiteten und die Temperatur stieg, wurde das Tragwerk immer weiter geschwächt und gleichzeitig stärker beansprucht, bis es die immensen Belastungen nicht mehr tragen konnte. Die nachstehend aufgeführten Auswirkungen des Brandes auf das Tragwerk haben zum Versagen der Konstruktion beigetragen:

- Als sich das Deckentragwerk und die Deckenplatten erhitzen, dehnten sie sich aus. Diese Dehnung führte zu zusätzlichen Spannungen in Bauteilen und Verbindungen.
- Die Temperaturerhöhung reduzierte die Steifigkeit der Betonplatten, die Decken erlitten ungewöhnlich große Durchbiegungen. Besonders anfällig für dieses Verhalten waren die Decken in den Geschossen, die durch große Trümmermengen vorbelastet waren.
- Als die Temperatur stieg, verminderten sich Streckgrenze und E-Modul und somit auch die Knickfestigkeit der Stahlstützen.

4.4.4 Ablauf des Einsturzes

Die fortschreitende Hitzeentwicklung aufgrund der Brände führte letztendlich dazu, den Nordturm nach 102 Minuten und den Südturm nach 56 Minuten zum Einstürzen zu bringen. Eine Analyse der Videoaufnahmen zeigt, dass sich der Sendemast auf WTC 1 zunächst leicht nach unten bewegte und dann zur Seite neigte; danach erst erkennt man eine Abwärtsbewegung in der Außenwand. Dieser Ablauf lässt vermuten, dass der Einsturz mit einem Versagen der Kernstützen begann. Diese waren aus den bereits genannten Gründen ohnehin nahe an ihrer Grenztragfähigkeit.

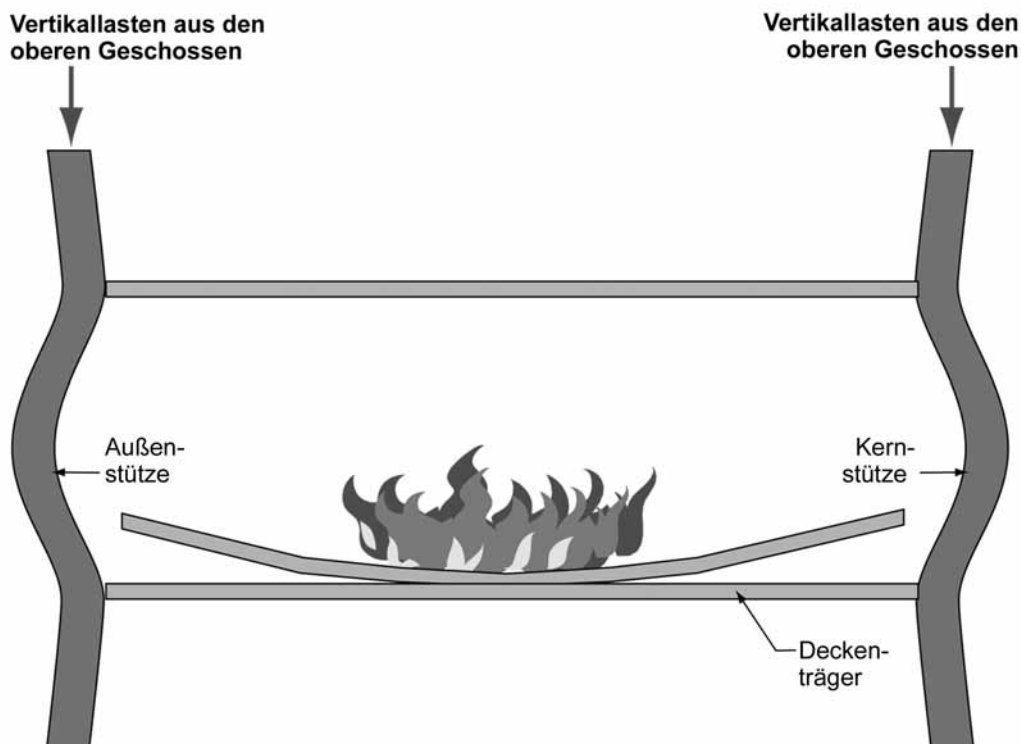


Bild 24: Das Versagen der Decken und Auflagerhalterungen führt zum Knickversagen der Stützen [1]

Durch die Brandbelastung haben sich die Deckenträger sehr stark verbogen, Bild 24. Wegen der „wenig robusten“ Auflagerhalterung rutschten infolge der sehr großen Auflagerdrehwinkel die Bolzen aus ihrer Lochhalterung, so dass die betroffenen Decken abstürzten, Bild 25. Durch den Verlust der Knickhalterung verdoppelte sich die Knicklänge der Stützen: der „progressive Kollaps“ war nun unvermeidlich. Nachdem der Einsturz einmal begonnen hatte, stürzte der gesamte obere Teil des



Gebäude in einem Stück herab und schob ein Luftkissen vor sich her. Als dieses Luftkissen den Einschlagbereich erreichte, wurde dadurch den Feuern neuer Sauerstoff zugeführt; die Flammen wurden nach außen gedrückt, was den Eindruck einer zweiten Explosion erweckte.



Bild 25: Computersimulation: Absturz der Deckenträger [Spiegel TV]

Während des Einsturzes wurde die gespeicherte, potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Als die Masse der oberen Geschosse auf die unteren Deckenplatten aufschlug, verursachte sie deren schlagartigen Einsturz: Je weiter diese Kettenreaktion fortschritt, desto stärker beschleunigte sie sich. Die einstürzenden Decken hinterließen hohe, freistehende Außenwandabschnitte, wahrscheinlich traf dasselbe auch auf die Kernstützen zu. Mit zunehmend fehlender seitlicher Halterung, also mit immer größer werdender Knicklänge, war bald ein Zustand erreicht, bei dem die Stützenstöße versagten, die Stützen ausknickten und einstürzten.

Eine einfache Berechnung auf der Grundlage von Formeln aus der Schulphysik macht deutlich, dass der „progressive Kollaps“ nahezu ungebremst erfolgte. Die Einsturzdauer t_E des Turms wird mit $t_E \approx 9$ Sekunden angegeben. Die Einsturzhöhe h der „Turmspitze“ betrug überschläglich $h \approx 360$ m. Nach der Formel für den *freien* Fall folgt daraus mit der Fallbeschleunigung $g = 9,81$ [m / s²] eine Freifalldauer t_F von

$$t_F = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 360}{9,81}} = 8,6 \text{ s.}$$

Man sieht, dass die Bremswirkung aus Energiedissipation infolge Querschnittsverformung und Luftwiderstand kaum eine Rolle spielte. Nachdem der Einsturz einmal eingesetzt hatte, erfolgte er quasi im freien Fall. Die Aufprallgeschwindigkeit betrug nach dieser Überlegung

$$v_E = g \cdot t_F \approx 9,81 \cdot 8,6 = 84 \text{ [m/s]} \cong 300 \text{ [km/h]}.$$

Damit wird klar, dass – nach menschlichem Ermessen – kein Bewohner eine Überlebenschance hatte, der sich während des Einsturzes im einstürzenden Gebäudebereich befand: die Aufprallgeschwindigkeit im einstürzenden Gebäude war absolut tödlich.

Es hatte den Anschein, als ob das Gebäude nahezu innerhalb seines eigenen Grundrisses einstürzte; Luftaufnahmen und der an den Nachbargebäuden entstandene Schaden aber zeigen, dass Trümmer das Marriott Hotel (WTC 3), das Zollgebäude (WTC 6), das Morgan Stanley Building (WTC 5), WTC 7, das American Express Building und den Wintergarten auf der gegenüberliegenden Seite der West Street trafen. Die Außenwände scheinen sich regelrecht vom Gebäude abgeschält zu haben und fast schon „geordnet“ neben dem ursprünglichen Grundriss niedergegangen zu sein, während die Innenstützen regellos durcheinander fielen. Die Außenwände brachen vor allem an den geschraubten Stößen auseinander. An den Stoßstellen befinden sich „rechnerische Momenten-Nullpunkte“, eine aus Momenten II. Ordnung resultierende Zusatzbeanspruchung machte deshalb die Kopfplattenstöße zu „Sollbruchstellen“. Die Elemente fielen einzeln oder zu mehreren zusammenhängend neben das Gebäude, in die angrenzenden Straßen und auf niedrigere Nachbargebäude. Das Trümmerfeld hatte einen Radius von 120 bis 150 m.



Bild 26: Kopfplattenstöße der Außenstützen [1]



5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Allgemeine Feststellungen

Wer technisches Neuland betritt, begeht normalerweise auch Fehler. Wer nie etwas Neues wagt, macht natürlich auch nichts falsch; hier gilt die alte Weisheit: selbst eine Uhr, die steht, geht zweimal am Tage richtig. Aber: man darf einen Fehler nicht zum zweiten Mal begehen.

Jedes Unglück muss analysiert werden, damit man daraus etwas für die Zukunft lernt. Die Idee, die Horizontalaussteifung eines Hochhauses in Form einer *Tubekonstruktion* zu entwerfen, war Mitte der 1960er Jahre, als die WTC-Türme konzipiert wurden, nicht völlig neu. Es gab damals schon einige Prototypen, aber: die WTC-Türme erschlossen eine völlig neue Höhendimension! Es spricht für die Umsicht und Sorgfalt der verantwortlichen Ingenieure, dass sie beim Entwurf der WTC-Türme sogar den Lastfall Flugzeuganprall untersucht haben – selbstverständlich als „außergewöhnlichen Belastungszustand“. Am 28. Juli 1945 war nämlich im Nebel ein B25-Mitchell-Bomber, der zudem offenbar manövrierunfähig war, gegen das Empire State Building geprallt; da sich das Flugzeug seinerzeit nach längerer Flugdauer mit wenig Resttreibstoff und relativ geringer Geschwindigkeit auf der Suche nach dem Flugplatz Newark befand, hat man im Hinblick auf ein ähnliches Szenario für die WTC-Türme wohl keine nennenswerten Mengen Treibstoff in Rechnung gestellt, sondern lediglich die dynamischen und statischen Konsequenzen eines Aufpralls erfasst. Immerhin hatte man einem solchen denkbaren Unfall das größte, damals verfügbare Passagierflugzeug, nämlich eine Boeing 707 zu Grunde gelegt, Bild 27.

Niemand wird von künftigen Hochhausbauern verlangen, dass ein Lastfall „Flugzeuganprall“ in die Liste der regelmäßig zu untersuchenden Beanspruchungszustände aufgenommen wird. Es muss allerdings alles getan werden, was die *Robustheit* und *Redundanz* der Bauwerke vergrößert; diese Forderung betrifft Tragwerk und brandschutztechnische Maßnahmen gleichermaßen.

Die Perversität religiös motivierter Verbrecher – mit der die Menschheit allerdings schon immer leben musste – erschien offenbar Mitte der 1960er Jahre, in Friedenszeiten – wenn auch auf dem Höhepunkt des kalten Krieges – als unvorstellbar, trotz der Erfahrungen des Zweiten Weltkrieges und des Holocaust.

Es gibt auch sehr kritische amerikanische Veröffentlichungen, die wir zitieren wollen, ohne sie zu kommentieren, da uns die entsprechenden Hintergrundinformationen fehlen [10]. Hier wird ein New York City Fire Commissioner, John O'Hagen, zitiert, der Hochhäuser mit Spritzschutz auf Stahlträgern als „semi-combustible“ (halb-brennbar) bezeichnet hat. Die unvermeidlichen Schwingungen der Tragkabel in den Aufzugschächten sollen beispielsweise in einem Gebäude dazu geführt haben, dass der aufgespritzte Feuerschutz auf den angrenzenden Stahlstützen dadurch abgeschlagen wurde! Ein Indiz für die Berechtigung dieser Kritik könnte auch sein, dass das „uralte“ 23-geschossige West-Street-Building am Rande des WTC-Komplexes – im Jahre 1907 nach Plänen von Cass Gilbert erbaut – dessen Stahlbauteile mit Beton und Mauerwerk ummantelt waren, etwa die gleiche Brand- und Trümmerlast erleiden musste wie WTC 7. Nur: WTC 7 brannte sieben Stunden lang und stürzte dann ein; das West-Street-Building steht nach der gleichen Brandeinwirkung noch – und kann restauriert werden!



Im gleichen Aufsatz finden sich auch die Sätze: „die Hafenbehörde hatte in allen Diskussionen über Sicherheitsaspekte das letzte Wort“ und „die Hafenbehörde war außergewöhnlich profit-orientiert“.

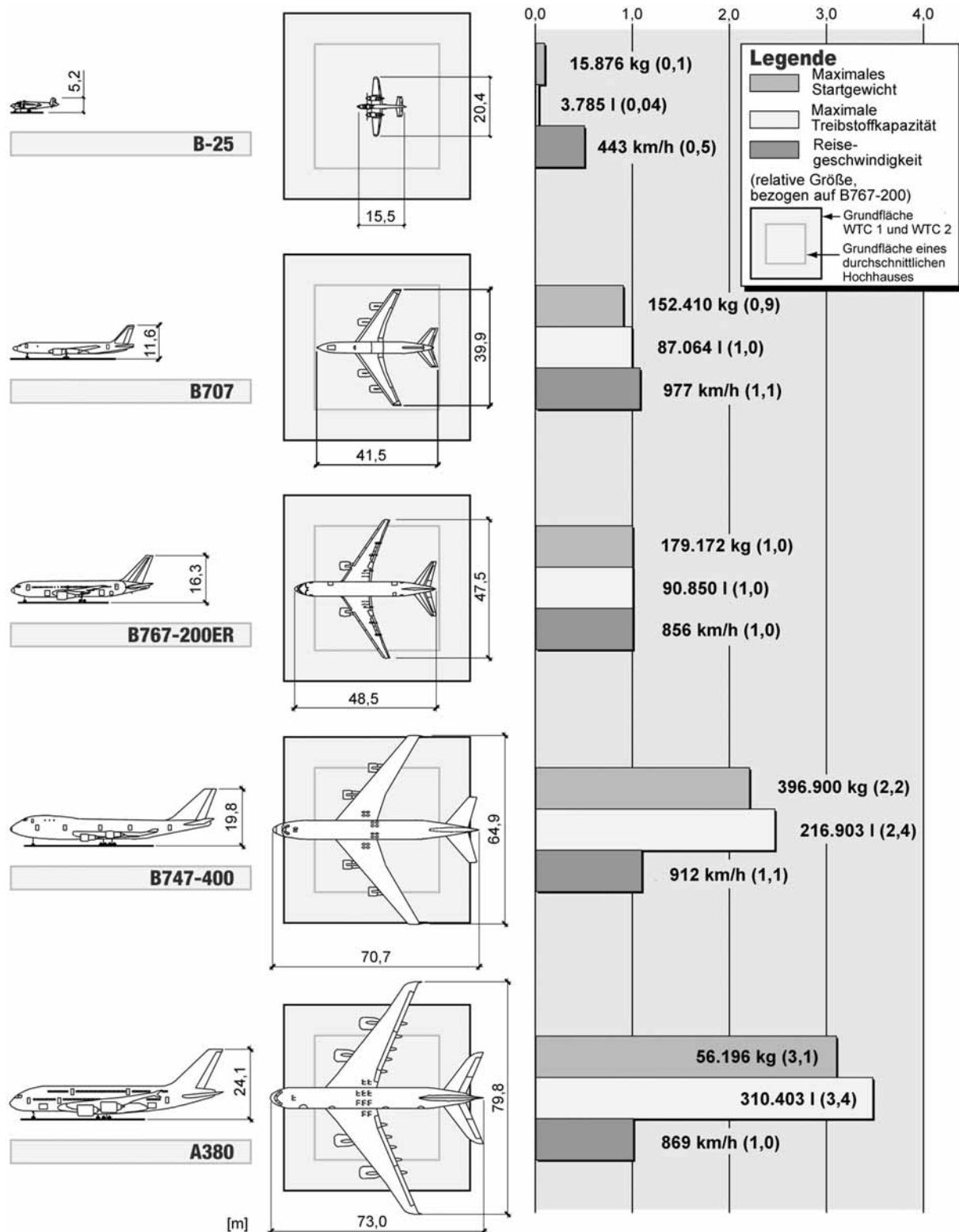


Bild 27: Grundrissabmessungen des WTC im Vergleich zu verschiedenen Flugzeugtypen [1]



5.2 Tragwerk

Ein wichtiges Stichwort im Hinblick auf *Robustheit* eines Tragwerks ist die *Redundanz*. Redundanz in einem Tragwerk liegt vor, wenn mehrere Lastwege möglich sind – insbesondere dann, wenn durch einen Unfall der ursprünglich geplante Lastpfad ausfällt. Alle „statisch unbestimmten“ Systeme sind insoweit „redundant“. Ein vornehm klingender Fachausdruck – aus dem Englischen bzw. ursprünglich aus dem Lateinischen übernommen – für die „statisch Überzählige“ lautet auch „Redundante“.

Die Tubekonstruktion der WTC-Türme war in dieser Hinsicht eine vorbildliche Konstruktion! Nachdem im Bereich des Einschlags bis zu 54 % der Außenstützen eines Geschosses zerstört worden waren, Bild 22, Tabelle 1, fand eine geradezu faszinierende Umlagerung statt, in deren Gefolge planmäßige *Druckglieder* plötzlich zu *Zuggliedern* mutierten. Dies ist ein Paradebeispiel für die Robustheit einer Konstruktion! Kritisch ist allerdings die Auflagerung der Deckenträger zu bewerten; aber: hinterher ist man immer schlauer! Die Steckverbindung der Hauptfachwerkträger war genial einfach und montagefreundlich, aber: bei der immensen Brandbelastung erlitten die Deckenträger eine unplanmäßig große Durchbiegung und – vermutlich – rutschten die Steckbolzen einfach aus ihrer Langlochhalterung und stürzten ab, Bild 25. Dies leitete letztendlich den „progressiven Kollaps“ der Deckenplatten ein (was die Amerikaner mit dem anschaulichen Ausdruck *pancaking* belegten); als Folge davon verloren die Stützen ihre Knickhalterung und versagten infolge Stabilitätsverlustes. Vermutlich hätte eine „robustere“ zugfeste Verankerung der Deckenträger dem Feuer wesentlich länger standgehalten. Hier lag also im Auflagerbereich eine *fehlende Redundanz* vor. Als Empfehlung für künftige Konstruktionen folgt daraus, dass man grundsätzlich alle Auflager von Deckenträgern – zumindest für den Grenzzustand der Tragfähigkeit – *zug- und druckfest* ausführen sollte.

Tabelle 1: Öffnungen in der Fassade von WTC 1 nach dem Flugzeugeinschlag [1]

F (floor)	Nordfassade		Südfassade		Ostfassade		Westfassade		Gesamtfläche	
	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²
92	30%	69m ²	0%	0m ²	63%	146m ²	0%	0m ²	23%	215m ²
93	39%	89m ²	0%	0m ²	55%	126m ²	0%	0m ²	23%	215m ²
94	24%	55m ²	2%	5m ²	47%	108m ²	0%	0m ²	18%	168m ²
95	42%	98m ²	2%	5m ²	0%	0m ²	17%	39m ²	15%	142m ²
96	32%	74m ²	6%	14m ²	0%	0m ²	61%	141m ²	25%	229m ²
97	37%	86m ²	6%	14m ²	0%	0m ²	72%	167m ²	29%	267m ²
98	54%	124m ²	0%	0m ²	0%	0m ²	0%	0m ²	13%	124m ²
Σ	37%	595m ²	2%	38m ²	24%	380m ²	21%	347m ²	21%	1360m ²



In [8] wird vorgeschlagen, in gewissen Abständen so genannte *Trümmer-* bzw. *Fluchtgeschosse* anzuordnen, die in der Lage sein sollten, die Trümmerlast der darüber befindlichen Decken aufzufangen. Da in jedem Hochhaus *Technikgeschosse* notwendig sind, bestünde im Bereich dieser Geschosse ohne ständige Nutzer immer die Möglichkeit, geschosshohe Träger anzuordnen, die in der Lage wären, diese Aufgabe zu übernehmen. Bei modernen Strukturen, die mit dem Prinzip der „Megastützen“ arbeiten (z.B. Commerzbank, Frankfurt am Main) böte sich eine solche Lösung an, ohne dass nennenswerte Zusatzkosten entstünden.

Eine sicherlich kontrovers zu diskutierende Problematik betrifft die *Wahl des Baustoffs*. Vor etwa 20 Jahren erschien diese Frage einigermaßen eindeutig beantwortbar: bis zu Höhen von etwa 200 m waren Betonstrukturen eindeutig wirtschaftlicher als Stahlbauten, weshalb beispielsweise in „Frankfurt-Mainhattan“ alle „führenden“ Hochhäuser aus Beton errichtet worden waren. Die international bedeutsamen Hochhäuser jenseits der 250-Meter-Grenze waren durchweg Stahlbauten. Im Jahre 1989 erregte ein Hochhaus in Chicago unweit des damals höchsten Hochhauses der Welt, des Sears Tower, Aufsehen: das South-Wacker-Drive-Building, aus hochfestem Beton errichtet, machte dem Stahlbau plötzlich Konkurrenz im Höhenbereich von 300 m! Im Jahre 1998 wurde dann die Sensation perfekt, als in Südost-Asien, in Kuala Lumpur, die Petronas Towers mit einer Höhe von 452 m in Beton errichtet wurden. Damit war bewiesen, dass mit Hilfe der modernen Betontechnologie der Beton im Hochhausbereich die Schallmauer von 400 Höhenmetern durchstoßen kann. Damit nicht genug: die Petronas Towers sind seitdem das höchste Hochhaus der Welt! Mit Hochleistungsbeton (bis C130) ist man inzwischen in der Lage, Stützenabmessungen in Beton auszuführen, die sich nicht mehr von feuergeschützten Stahlstützen unterscheiden.

Zweifellos hat der Stahlbau nach wie vor seine besonderen Vorteile und Reize: Tragwerke aus Stahl verströmen eine exklusive Eleganz und Leichtigkeit; sie sind im Hinblick auf Montagegeschwindigkeit, Umbau- und Verstärkungsmaßnahmen günstiger. Dies verschafft ihnen insbesondere im Anlagen- und Brückenbau Vorteile, obwohl der Betonbau in dieser Hinsicht inzwischen auch aufgeholt hat. Sollte man aber im Hochhausbau künftig den Aspekten *Feuersicherheit* und *Robustheit* hinsichtlich terroristischer Anschläge oder Explosionsunglücken stärkere Beachtung schenken, dann dürften – nach Einschätzung der Autoren – Betontragwerke die größeren Reserven aufweisen. Eine monolithisch gefertigte Stahlbetonkonstruktion besitzt zweifellos eine robustere und zuverlässigere Feuersicherheit als ein Stahltragwerk, das einen feuerschützenden Spritzschutz trägt, und ein Treppenhaus aus Beton ist unbestreitbar robuster als ein Treppenhaus aus Stahlstützen mit aufgeschraubten Gipskartonplatten.

Bild 28 ist dem Programm *CS-FIRE* entnommen und stellt den Verlauf der Einheitstemperaturkurve (ETK) und im Vergleich dazu den Temperaturverlauf in Bauteilen mit einem profilfolgenden Spritzbewurf verschiedener Spritzschichtdicken dar. Die Grafik zeigt links den Bereich der ansteigenden Temperatur und rechts den qualitativen Verlauf in der Realität bei der Abkühlung. Die Frage, die sich aufdrängt ist: „Wären die Türme des WTC stehen geblieben, wenn sie statt aus Stahl aus Stahlbeton hergestellt worden wären?“ Man wird diese Frage nie beantworten können, weil zu viele Parameter unbekannt sind und die technischen Mittel für eine vollständige Simulation nicht ausreichen und wohl nie ausreichen werden. Folgendes kann aber gesagt werden:

- Durch die Brandeinwirkung erwärmt sich die Umgebungsluft eines Bauteils im so genannten „Naturbrand“ ähnlich der ETK.
- Das durch den profilfolgenden Spritzbewurf mehr oder weniger gut geschützte Bauteil erwärmt sich phasenverschoben wesentlich weniger in Abhängigkeit von dem zeitlichem Verlauf und der Höhe der Umgebungstemperatur, der Qualität und Dicke der Schutzschicht und der Belüftung.
- Man kann davon ausgehen, dass in den Zwillingstürmen nach 56 bzw. 102 Minuten wahrscheinlich der größte Teil der Brandlasten „aufgebraucht“ war und die Umgebungstemperaturen schon wieder geringer wurden. Das den Einsturz verursachende Bauteil hatte aber offensichtlich den Kulminationspunkt noch nicht erreicht (schwarze Markierung), so dass die Katastrophe eintrat. Wo genau sich der schwarze Pfeil befand, und wie die numerischen Verhältnisse waren, wird man nie sagen können.

Leslie E. Robertson (vergleiche sein Zitat auf Seite 39) vermutet selbst, dass bei einer etwas größeren Widerstandsdauer ein Einsturz möglicherweise nicht eingetreten wäre. Eine Stahlbetonkonstruktion mit „robusten“ Trägeranschlüssen hätte diese kritische Phase vermutlich überdauert.

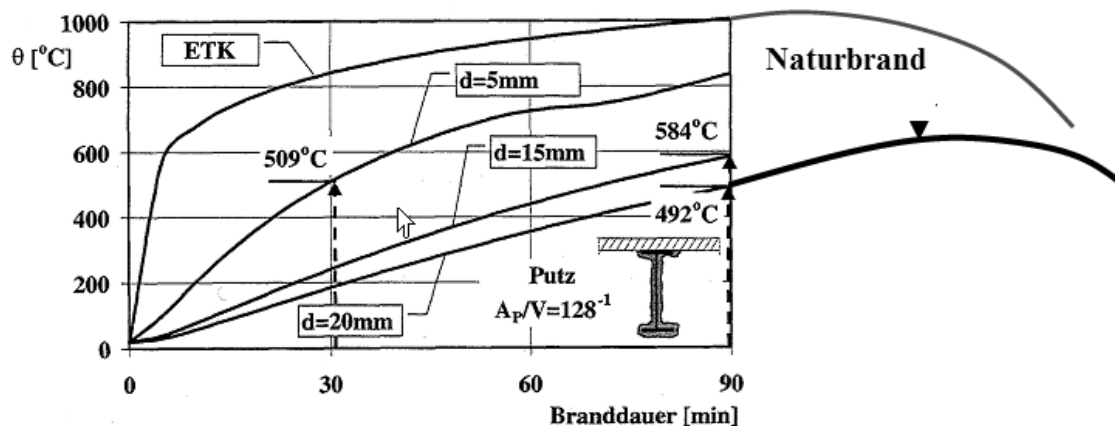


Bild 28: ETK und Temperaturverlauf in Bauteilen mit profilfolgendem Spritzbewurf [nach CS-FIRE]

In [7] wird ausgeführt, ein Tragwerk aus Stahl sei aufgrund seiner größeren „Flexibilität“ besser geeignet, einen Flugzeuganprall zu überstehen. Uns ist nicht ganz klar, was mit diesem Begriff gemeint sein soll; im Zusammenhang mit der vorliegenden Problematik handelt es sich nämlich um keinen definierten Fachausdruck. Der Autor könnte möglicherweise folgende Phänomene gemeint haben:

- Eine Stahlkonstruktion als Ganzes ist „nachgiebiger“, d.h. die Biegesteifigkeit der stählernen Röhre und die träge Masse sind geringer als die eines vergleichbaren Betontragwerks.
- Die Stahlstützen im Einschlagbereich sind aufgrund ihrer geringeren Normalkraftbeanspruchung aus Eigenlast und ihres plastischen Verformungsvermögens „duktiler“ und können deshalb bei einer Belastung bis zum Bruch eine größere Energie aufnehmen als Betonstützen der gleichen Tragfähigkeit.

Beide Aussagen sind grundsätzlich richtig – aber: wir bezweifeln (können es aber im Augenblick quantitativ nicht belegen), dass sich ein Betontragwerk statisch und



dynamisch signifikant anders verhalten hätte als das Stahltragwerk der Zwillingtürme. Hier sind eingehende Simulationsberechnungen erwünscht – und wir vermuten, dass man in den USA bereits dabei ist, entsprechende Studien durchzuführen.

Vermutlich wären Betonstützen auch *durchtrennt* worden; möglicherweise hätte dies eine etwas größere Stoßkraft auf die Röhre zur Folge gehabt als es bei den Zwillingtürmen der Fall war. Nur: wir vermuten, dass bei einem Betontragwerk das Flugzeug selbst von der Außenhülle aus Beton wie ein Ei in einem Eierschneider „zerlegt“ worden wäre und deshalb weniger Schäden an den Innenstützen angerichtet hätte. Die unterschiedliche Energiedissipation in Stahl- und Betonstützen erscheint im Hinblick auf die resultierende Stoßkraft vernachlässigbar. Aus unserer Sicht ist es nicht gerechtfertigt, zu behaupten, ein Betonturm wäre „schlicht und einfach“ umgefallen und hätte eine Schneise der Verwüstung in das Stadtgebiet von Lower Manhattan geschlagen. Gebe Gott, dass uns der experimentelle Beweis für unsere Vermutung erspart bleibt. Wir gehen davon aus, dass Computersimulationen diese Streitfrage entscheiden werden!

Eines dürfte allerdings auch klar sein: die WTC-Türme hätten in Beton natürlich nicht so schnell montiert werden können wie die geniale Stahlstruktur von Leslie E. Robertson. Nur: was bedeuten diese vordergründigen Vorteile angesichts der auch wirtschaftlich katastrophalen Auswirkungen des Attentats vom 11. September 2001?

5.3 Baulicher Brandschutz

5.3.1 Grundrissgestaltung

Die Rettungswege eines Gebäudes sollen den Nutzern/Bewohnern eines Gebäudes in einem Notfall die sichere Flucht ermöglichen. Deshalb gelten die folgenden Grundsätze:

- Rettungswege sollten möglichst im Außenbereich eines Gebäudes angeordnet werden, und zwar so, dass im Idealfall eine natürliche Belüftung gegeben ist. Dieser Grundsatz führte bei einigen Frankfurter Hochhäusern – oft gegen den Willen der beteiligten Architekten – auf Anordnung des damals zuständigen Oberbranddirektors, Professor Achilles, zur Anordnung so genannter „Achilles-Türme“ (Olivetti-Gebäude; Hochhaus Hessische Landesbank; Hochhaus Deutsche Bank). Eine Druckluftversorgung im Kern liegender Treppenhäuser ist zwar grundsätzlich genehmigungsfähig, aber – wie wir heute berücksichtigen müssen – jederzeit durch terroristische Anschläge sabotierbar, etwa durch die Zerstörung der technischen Anlagen oder das Sprengen von großen Öffnungen in die Treppenhauswände.
- Befinden sich die Fluchttreppenhäuser dennoch – wie bei den Türmen des WTC – im Gebäude-Inneren, sollte nach unserer Empfehlung der Treppenschacht grundsätzlich aus Stahlbeton bestehen, weil dieser im Gegensatz zu einer Leichtbauwand aus Stahlprofilen und Gipskartonplatten nicht nur den erforderlichen Brandschutz sondern auch eine größere Robustheit z.B. gegenüber Explosionen (und Flugzeugeinschlägen) besitzt.
- Fluchttreppenhäuser sollten möglichst weit voneinander entfernt angeordnet werden, weil damit die Gefahr minimiert wird, dass – wie im Nordturm – durch



eine Beschädigung des Gebäudes *alle Treppenhäuser* gleichzeitig blockiert werden.

- Ein Fluchttreppenhaus sollte – wenn es nicht tragwerksbedingt erforderlich ist – *keine Versprünge* aufweisen, auch wenn diese aufgrund von hinreichend nachgewiesenem Brandschutz und Eindeutigkeit des Fluchtweges grundsätzlich genehmigungsfähig wären. Der Nutzer erwartet, dass nur der erste Abschnitt des Fluchtweges horizontal verläuft und es nach dem Erreichen des Treppenhauses ohne Unterbrechung durch „Transfer-Korridore“ nur noch „nach unten geht“. Treten in ohnehin schon unerwarteten Notfallsituationen weitere verunsichernde Ereignisse auf, kommt es schnell zu einer Panik.
- Treppenträume müssen in erforderlicher Anzahl vorhanden sein und eine ausreichende Breite besitzen. In Deutschland sind laut Hochhausverordnung in Hochhäusern ab 60 m Höhe *zwei* Sicherheitstreppenträume erforderlich; die Türme des WTC waren über 400 m hoch und besaßen jeweils *drei* Treppenhäuser. Zwei der drei Treppen eines Turms waren nur ca. 1,10 m breit; in Deutschland ist für Hochhäuser eine Rettungswegbreite von mindestens 1,25 m vorgeschrieben. Im WTC wurde die Fluchtsituation zusätzlich dadurch erschwert, dass die Fluchttreppenhäuser auch von der Feuerwehr *zum Aufstieg* genutzt wurden, wodurch die effektive Fluchtwegbreite noch weiter reduziert wurde.

5.3.2 Passiver Brandschutz

Entwurf und konstruktive Ausführung sollten so ausgelegt werden, dass ein Gebäude im Falle eines schweren, auch eines unkontrollierbaren Brandes, „nur“ ausbrennt und nicht einstürzt. Daraus folgt:

- Brandschutz-Materialien sollten möglichst robust sein und eine höhere Haftfestigkeit besitzen, damit sie bei einer Explosion nicht so leicht abplatzen, wie es in den Türmen des WTC geschehen ist.
- Die vertikalen Begrenzungen der Brandabschnitte – die Wände – müssen von *einer* horizontalen Begrenzung *zur nächsten* reichen, also von Betondecke zu Betondecke und nicht nur bis zur abgehängten Decke.
- Bauliche Änderungen dürfen nicht – wie offenbar im WTC geschehen – eigenmächtig durch die Nutzer vorgenommen werden. Dort hatten Mieter, die mehrere Geschosse nutzten, gelegentlich Deckendurchbrüche für interne Treppen geschaffen und somit die Brandabschnitte unzulässig vergrößert.
- Bei der Durchführung von Rohrleitungen oder elektrischen Leitungen durch raumabschließende Bauteile mit Feuerwiderstand sind die Leitungswege so abzuschotten, dass sie einen eigenen Brandabschnitt bilden.

Die drei letztgenannten Forderungen sind bereits Bestandteil einschlägiger deutscher Regelungen.

5.3.3 Aktiver Brandschutz

Ein Feuerwehrmann benötigt mit Ausrüstung – und womöglich mit Atemschutzgerät – etwa sechs Minuten, um über eine Treppe 30 m hoch hinaufzusteigen. Der Einschlagbereich lag beim WTC 1 im 94. F, also in ca. 340 m Höhe; das entspricht



einer Aufstiegszeit von mindestens 68 Minuten! Im Südturm hatten die Männer des FDNY den Einschlagbereich demnach im Moment des Einsturzes noch gar nicht erreicht! Im Nordturm waren sie zwar eine halbe Stunde vor dem Einsturz vor Ort, aber die Feuer hatten zu diesem Zeitpunkt schon seit über einer Stunde gewütet. Diese simple Betrachtung verdeutlicht die prekäre Situation des FDNY und zeigt, wie wichtig in einem Hochhaus die Installation eines *Feuerwehraufzuges* ist, der von einer unabhängigen Stromquelle versorgt wird und *nur im Notfall und ausschließlich von der Feuerwehr genutzt* werden darf, um jederzeit schnell zum Brandherd vordringen zu können. Auch dies ist hierzulande eine Vorschrift der Muster-Hochhaus-Verordnung. Wir treffen diese Feststellung in aller Bescheidenheit – auch wir wissen – spätestens nach dem Brand auf dem Flughafen Düsseldorf – dass Vorschriften nicht nur vorhanden sein müssen: sie müssen natürlich auch eingehalten und überwacht werden!

Darüber hinaus erscheint es als unabdingbar, dass in Ballungszentren ein „Bereitschaftsdienst für Konstruktiven Ingenieurbau“ eingerichtet wird. Dieser müsste für „katastrophenrelevante Bauwerke“ (Hochhäuser, Stadien, Großbrücken, Chemiewerke ...) rund um die Uhr *umfassend informierte Sachverständige* „vorhalten“, die für ihren Zuständigkeitsbereich jederzeit einsatzbereit sind. Hätte es in New York einen zuständigen, kompetenten „Structural Engineer“ gegeben, hätte dieser – zumindest nach heutigen Erkenntnissen – den Kollegen *des FDNY untersagen müssen*, in die „angeschlagenen“ Türme aufzusteigen. Natürlich wirft dies eine Reihe von rechtlichen Problemen auf – nur: wir sind davon überzeugt, dass wir als Konstruktive Ingenieure dieser verantwortungsvollen Aufgabe in einem höheren Maße an Verantwortung und Zuverlässigkeit gerecht werden könnten, als unsere Kollegen von der „forensischen Zunft“ in ihrem Zuständigkeitsbereich.

6 Schlusswort

Es erscheint wirtschaftlich kaum vertretbar, künftig alle Bauwerke mit großen Menschenansammlungen auf den Lastfall „Flugzeugabsturz“ hin zu dimensionieren. Ingenieure, Architekten und Brandschützer können unter Beachtung aller Erfahrungen die Risiken lediglich „minimieren“, d.h. die „Versagenswahrscheinlichkeit“ auf ein von der Gesellschaft akzeptiertes Minimalmaß (Restrisiko) reduzieren. Den verantwortlichen Ingenieuren und Feuerwehrleuten, die aus damaliger Sicht heraus das Menschenmögliche getan haben, ihren Entwurf „sicher“ zu gestalten, gehört unsere Sympathie (dieses Wort hat im Englischen auch die Bedeutung „Mitgefühl“). Für den verantwortlichen Ingenieur der Zwillingtürme, Leslie E. Robertson, war der Einsturz der Türme eine persönliche Tragödie. Er bedankte sich für eine E-Mail, in der ein Freund die geniale Konstruktion seiner Türme pries – da ja immerhin ca. 55.000 Menschen dem Inferno entkommen waren – indem er in einer Weise um Worte ringt, die ein amerikanischer Kollege als „Shakespearian“ bezeichnete:

*„Your words do much to abate the fire that writhes inside.
It is hard.
But that I had done a bit more...
Had the towers stood up for just one minute longer...
It is hard.“*



„Deine Worte leisten viel, das Feuer, das im Innern schmerzt, zu lindern.
Es ist hart.
Aber, hätte ich nur ein wenig mehr getan...
Wären die Türme nur eine Minute länger stehen geblieben...
Es ist hart.“

7 Zusammenfassung

Anhand allgemein zugänglicher Quellen im Internet wird die Konstruktion der Zwillingstürme des World Trade Centers vorgestellt sowie das brandschutztechnische Konzept, das den Entwürfen zugrunde lag und mit den Jahren weiterentwickelt worden war. Auf der Grundlage von Simulationsberechnungen, die von Expertengruppen in den USA durchgeführt worden sind, wird das Tragverhalten und das Brandgeschehen nach dem Einschlag der Flugzeuge in das WTC beschrieben. Unter Verwendung einschlägiger Veröffentlichungen und eigener Überlegungen werden Empfehlungen formuliert, die darauf abheben, künftige Hochhäuser sicherer zu gestalten, indem die *Redundanz* und die *Robustheit* möglichst hoch geschraubt wird. Es wird konzidiert, dass beim Entwurf und Bau von Hochhäusern grundsätzlich keine „absolute“ Sicherheit garantiert werden kann. Ingenieure, Architekten und Brandschützer können – unter Beachtung aller Erfahrungen – die Risiken lediglich „minimieren“, d.h. die „Versagenswahrscheinlichkeit“ auf ein von der Gesellschaft akzeptiertes Minimalmaß („Restrisiko“) reduzieren.

8 Literatur

- [1] FEMA (Hrsg.): *World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations*. New York, USA : Mai 2002.
- [2] Clifton, G. Ch.: *Collapse of the World Trade Center Towers*, Third Revision. Manukau City, Neuseeland: HERA, Dezember 2001.
- [3] Clifton, G. Ch.: *Elaboration on Aspects of the Postulated Collapse of the World Trade Center Twin Towers*, third Revision. Manukau City, Neuseeland : HERA, Dezember 2001.
- [4] Clifton, G. Ch.: *The Collapse of the World Trade Center Towers : Causes and Lessons Learned*. Manukau City, Neuseeland : HERA, 2002.
- [5] Flierl, B.: *100 Jahre Hochhäuser : Hochhaus und Stadt im 20. Jahrhundert*. Berlin: Verlag Bauwesen, 2000. – ISBN 3-345-00677-4.
- [6] Hart, F. , Henn, W. , Sonntag, H.: *Stahlbauatlas : Geschossbauten*. 2. neubearb. Aufl., München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 1982.
- [7] Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Hrsg.): *11. September 2001*. München: 2001.
- [8] Peter, B.: Sicherheit von Hochhäusern. In: *deutsche bauzeitung* (2002), Heft 4, S. 89-96.
- [9] Schleich, J.-B.: Auswirkungen des WTC-Schocks auf den europäischen Stahlgeschossbau. In: *Stahlbau* (2002), Heft 4.
- [10] Seabrook, J.: *Why Did the World Trade Center Towers Fall Down When They Did?* In: *The New Yorker*, Dezember 2001.