

Öffentlichkeit einen beachtlichen Erfolg und konnte so nicht unwesentlich zur Verbreitung der Eisenkonstruktion beitragen. Die bisher als häßlich geltenden und nur eben als unentbehrlich geduldeten Eisenkonstruktionen wurden dank dem Eiffelturm zum Gegenstand des Erstaunens, dann sogar der Bewunderung, und dieses Monument, das in der Zeit als das höchste der Erde bewundert wurde, vermochte der Eisenkonstruktion allgemein ein nobles Gepräge zu verleihen.

Heute, da zahlreiche Bauwerke den Eiffelturm an Höhe überholt haben, sind die Besucher noch ebenso zahlreich und ebenso von Bewunderung ergriffen von dem, was nicht mehr Kühnheit, sondern was Schönheit geworden ist.

Und eben daher erklärt sich die Bedeutung von Eiffels Werk. Auch wenn er zum Unternehmen des Eiffelturmes durch einen unleugbaren Hang zum Gigantischen getrieben wurde, denn Eiffel war ganz sicher Megalomane nicht durch persönliche Eitelkeit, sondern durch Patriotismus, Freude am Risiko und am Geschäft, so haben es doch die sieben Millionen Kilogramm Eisen, die in den Himmel von Paris gesetzt wurden, Millionen von Menschen erlaubt, die Eisenkonstruktion und ihre Möglichkeiten zu entdecken, und gerade dies ist vielleicht die bedeutendste Leistung im Werk von Eiffel.

Der erste Entwurf zum Eiffelturm geht auf zwei Ingenieure von Eiffels Firma, Emile Nougier und Maurice Koechlin seit 1884 zurück. Ihnen schloß sich dann der Architekt Stephen Sauvestre an. 1887 beschloß die Stadt Paris die Errichtung eines 300 m hohen Turmes anlässlich der Ausstellung von 1889 zum 100jährigen Gedenken an die Französische Revolution. Ein Wettbewerb wurde ausgeschrieben und Eiffels Projekt ausgewählt. Die Planung nahm 18 Monate in Anspruch, während derer 400 qm Pläne gefertigt wurden. Die in Hütte und Werkhalle vorbereiteten Werkstücke wurden in Levallois aufgerissen, entschichtet, gebohrt und teilweise montiert und zwar so weitgehend, daß die Montage auf der Baustelle, begonnen im Juli 1887, Ende März 1889 vollendet war. Erforderlich waren etwa 7.400.000 kg im Puddle-Verfahren hergestellten Gußeisens, um 16.000 Werkstücke anzufertigen, in welche 7.000.000 Löcher gebohrt wurden, um 2.500.000 Nieten einzusetzen (die Hälfte davon an der Baustelle). Das Gewicht des Turmes übersteigt nicht jenes eines Luftzylinders der gleichen Höhe und der Basis eines um die vier Turmfüße beschriebenen Kreises. Der Turm kostete 7.799.401,31 Francs. Das Material ist im Puddle-Verfahren hergestelltes Gußeisen mit zahlreichen Einschlüssen von Silicium, 0,3 bis 0,4 % Phosphor, 0,03 % Schwefel und 0,04 % Mangan. Dieses Material hat der Korrosion und der Materialermüdung so gut standgehalten, daß der Turm in gutem Zustand ist. Der Turm wird gegenwärtig um etwa 1.000.000 kg zusätzlicher Last erleichtert, die im Laufe der Zeit auf der ersten Plattform angebracht wurde. Der Turm muß alle sieben Jahre gestrichen werden. Dazu benötigt man 30 Tonnen Farbe und 40.000 Arbeitsstunden.

Gegenwärtig besuchen dreieinhalb Millionen Menschen jährlich den Eiffelturm.

#### DER SCHEINBARE RÜCKSCHRITT IN DER EISENSKELETTBAUWEISE NACH DEN ERFABRUNGEN MIT DEM CRYSTAL PALACE VON 1851

Tom F. Peters

Der Crystal Palace von 1851 in London scheint für den heutigen Betrachter eine in die Zukunft gerichtete Abgeklärtheit auszustrahlen. Wir haben diesen Bau so stark idealisiert und unseren Vorstellungen angepaßt, daß die wirklichen Leistungen und Probleme von diesem Mythos überspielt werden. (1) Gewiß war der geniale Bau an der Einführung von Eisen und Glas im Hochbau beteiligt; aber nicht das spröde Gußeisen, sondern zuerst das Schmiedeeisen und dann der Stahl sollten der Skelettbauweise zum Durchbruch verhelfen. Dies mag angesichts der großen Beliebtheit von Gußsäulen und -fassaden im letzten Jahrhundert etwas erstaunlich klingen. Aber das unterschiedliche Verhalten von Gußeisen und Schmiedeeisen unter Beanspruchungen wie Biegung, Schub, Torsion, Zug und Knicken bedingt verschiedene konstruktive Verhaltensweisen, von denen man in der Architekturgeschichte so gut wie nie etwas vernimmt, aber ohne deren Berücksichtigung kein tauglicher Skelettbau entstehen kann.

Die Behauptung, daß der Crystal Palace ganz aus Eisen und Glas bestand, ist falsch. Kritiklos übernahm man diese unzulässige Vereinfachung aus den überall publizierten Laienberichten. Die Außenhaut bestand aus Holzrahmen, denen ein nur dekorativer Gußbogen vorgeblendet war. Im Erdgeschoß gab es außer bei den Eingängen überhaupt kein Glas, sondern nur Ventilationsroste und Holzverschalungen. Dafür waren die zwei oberen Geschosse zu 4/5 verglast, so daß der Glasanteil an der gesamten Außenhautfläche immerhin ungefähr 40 % ausmachte. Die Zwischenwände, die Böden, die Längsträger aller einstöckigen Gebäudeteile und die Gewölbebogen des großen Transzepts waren alle aus Holz, ebenso die Fenstersprossen und Dachrinnen, für die Joseph Paxton seine viel zitierte Holzbearbeitungsmaschine erfunden hatte. Der Crystal Palace war also nicht ganz so aufgebaut, wie die viktorianischen Gewächshäuser, geschweige denn wie ein moderner Skelettbau. Was bleibt also von diesem Bauwerk übrig, was für uns relevant sein könnte. Da ist zum Beispiel die komplexe Organisation des Bauprozesses zu nennen, welche für die weitere Entwicklung des Bauens allgemein bedeutend wurde (2), sowie das konstruktiv additive Einheitsfeld von etwa 7,3 x 7,3 m. Es bestand je aus vier gußeisernen Stützen und Bindern und konnte in der Höhe gestapelt und in der Ebene beliebig erweitert werden.

Das Konzept des drei-dimensionalen, additiven Elementes ist eines der technikhistorisch wichtigsten Aspekte dieses Baus. Der Crystal Palace unterscheidet sich also grundsätzlich im konstruktiven Konzept - wenn auch nicht in der Detaillierung - von allen ihm vorausgegangenen Gewächshäusern. Er ist für die Entwicklungsgeschichte sowohl des architektonischen Entwerfens als auch des Skelettbaus von Bedeutung. Der Innovationsgrad von Paxtons Baukasten-System war beachtlich. Die hohlen Stützen zum Beispiel ermöglichten sowohl die Ableitung des Regenwassers, wie auch die Anpassung der Querschnittsfläche an die unterschiedliche statische Beanspruchung durch variierende Wandstärken. Auf diese Weise konnten die äußeren Dimensionen der Stützen beibehalten und somit die Verbindungsgeometrie gewährleistet werden.

Die frühe Entwicklung solcher Moduleinheiten geht von den vorgefertigten und normierten britischen Reihenhäusern um 1830 bis zu den demontablen Lazaretten, den Hotels und den Kaufhausbauten nach der Jahrhundertmitte. In dieser Reihe stellt die konstruktive Moduleinheit des Crystal Palace einen Meilenstein dar, und nicht das Stahlskelett oder die gläserne Vorhangsfassade, welche der Crystal Palace nicht besaß.

Die strukturelle Klarheit, die man in diesem Bauwerk zu erkennen glaubt, ist eine weitere Fiktion, provoziert durch den Blickwinkel des heutigen Standpunktes. Sie ist eigentlich nur dem Mangel an Planungszeit zuzuschreiben. Die Struktur des Crystal Palace stellt also eher ein Schema dar, als ein ausgearbeitetes System. Im Gegensatz zu einem normalen Entwurfsprozess, bei dem eine Vereinfachung des Konzepts angestrebt wird, war Paxtons erster, rascher Entwurf am einfachsten, und jeder weitere Entwurfsschritt brachte eine zunehmende Verunklärung mit sich. Die Eile, nicht die Suche nach konstruktiver Klärung, führte zum Weglassen störender Zutaten. Als dann der Bau drei Jahre später in Sydenham wiedererrichtet wurde, und der ursprüngliche Zeitdruck verschwunden war, kamen andere Kriterien ins Spiel. Weder die Einfachheit der Konstruktion noch die Planungsgeschwindigkeit waren nunmehr ein Anliegen. Der Crystal Palace war zwar international zum Symbol für den industriellen Erfolg geworden, aber bei seinem Wiederaufbau in Sydenham handelte es sich eigentlich nur um die Errichtung eines Neubaus unter Verwendung der Originalteile - die einfache Durchbildung wurde überspielt. Und trotzdem war beim ursprünglichen Crystal Palace die Idee des Skelettbaus in einer Klarheit gegeben wie nie zuvor, obwohl die entsprechenden konstruktiven Lösungen noch fehlten. In der Folge konnte es zu keinem "Rückschritt" kommen, da die vorgezeichnete Entwicklung konstruktiv noch gar nicht vollzogen worden war. Das mag zunächst absurd klingen, denn der Bau stand doch. Wir werden aber gleich sehen, wie zufällig und unsicher er stand.

Der Bauplatz im Hyde Park war leicht geneigt, und ebenso, in einem etwas flacheren Winkel, das Erdgeschoß des annähernd 560 x 140 m großen Baus. Dieses Erdgeschoß wurde zum Null-Niveau bestimmt, und alle Höhen wurden von ihm aus, im rechten Winkel zur geneigten Fläche, nach oben und nach unten abgemessen. Keine Stütze war folglich vertikal; es zeigten sich auch Probleme bei den Fundamenten. Diese ragten alle gleich viel über das gewachsene Terrain hinaus, dafür war aber jeweils deren Abstand zur Erdgeschoßfläche verschieden. Die gußeisernen Basisstücke waren deshalb alle verschieden lang. Sie mußten am Ort gemessen und einzeln fabriziert werden. (3) Das widersprach natürlich dem Prinzip der Serienvorfabrikation, bei dem die Herstellung möglichst vieler, gleich großer Teile angestrebt wird. Wir wissen, daß für die Detailplanung nur sechs Wochen zur Verfügung standen. Es war einfach nicht möglich, alle neuartigen Einzelprobleme auf Anhieb folgerichtig anzugehen.

Es entwickelte sich daraus keine Vorfabrikationsindustrie, obwohl der Crystal Palace als Bau großen Erfolg hatte und in einer Anzahl weiterer Ausstellungsbauten nachgeahmt wurde. Bereits damals läßt sich ein Verlangen nach einer Erneuerung der Architektur nachweisen. Ein Jahr vor Paxtons Skizzenprojekt 1849 plädierte der Direktor des belgischen Industriemuseums für eine neue Architektur aus Eisen und Glas. (4) Gottfried Semper und andere Architekten regten die Verwendung der neuen Baustoffe an. Ihr Anliegen erfaßte aber nur eine stilistische und nicht eine strukturelle Veränderung.

Die Bauauffassung, die sich im Crystal Palace ausdrückte, läßt sich eher mit der "balloon-frame" Ständerbauweise Nordamerikas vergleichen, als mit der modernen Skelettbauweise. Der "balloon-frame" der amerikanischen Pionierzeit bestand aus einem Baukasten von vorgeschrittenen Holzteilen mit genormten Querschnitten, die mit einfachen Nagelverbindungen zu Rahmen zusammengesetzt wurden. Die Versteifung der Konstruktion gewährleistete die diagonale Brettverschalung, die direkt auf die Rahmen genagelt wurde. (5) Die Bautechnologie war in diesem Fall einfach genug, so daß sich die "balloon-frame" Bauweise sofort ausbreiten konnte. Im Gegensatz dazu lag das Fehlen der Entwicklung einer Vorfabrikationsindustrie aus der Konstruktion des Crystal Palace in der konstruktiven Problematik begründet.

Das Verbinden von Gußeisenteilen war recht problematisch. Hatte die Ironbridge 1779 ihre Verbindungsgeometrie und -methodik noch von der Holzbauweise abgeleitet, so fand der Crystal Palace bereits größtenteils seine Vorbilder im Maschinenbau. Die Ausbildung von Verbindungs- und Versteifungsflanschen war bereits ausgeprägt. Die Moduleinheit wurde offenbar - wie wir sie vom heutigen Stahlbau kennen - als steife Rahmenkonstruktion verstanden. Darüber schreibt Cowper 1852 folgendes: "Eine der wichtigsten konstruktiven Merkmale ... ist die Form der Balken- oder Fachwerkträger, die zwei Funktionen zu erfüllen hat. Die erste und vordergründigste Funktion der Balken ist das Tragen des Daches; deren zweite und ebenso wichtige Funktion aber ist die seitliche Versteifung der ganzen Struktur." (6) Wir erkennen hier die Idee eines Konstruktionssystem, des biegesteifen Stockwerkrahmens nämlich, der damals in Gußeisen noch gar nicht herstellbar war. Die Verbindungsflanschen waren zu spröde, die Verschraubungen vermochten die Knotenkräfte nicht zu übertragen, und die Stützen eigneten sich nur zur Aufnahme geringer Querkkräfte. Alles mußte zusätzlich versteift und wesentlich überdimensioniert werden.

Die Planungskommission diskutierte ausgiebig darüber, ob die Querversteifung der verkeilten Rahmen und einiger weniger Diagonalstreben wohl genügte; denn die Stabilitätsfrage von reinen Skelettbauten konnte damals noch intuitiv angegangen werden. Professor George Airy, der "astronomer royal", war ursprünglich 1850 gegen den Bau des Crystal Palace, weil er ihn als ungenügend versteift beurteilte. Zur Illustration seiner Meinung führte er die Fabrikbauten des ausgehenden 18. Jahrhunderts an, deren Tragkonstruktion zwar aus Eisen bestanden, die aber zur Versteifung außen mit festen Mauern umgeben waren. War Professor Airy im Unrecht? Mallet informiert uns, daß viel mehr Diagonalen im Crystal Palace eingebaut wurden als ursprünglich vorgesehen waren, und weiter schreibt er: "Der Bau ist inzwischen demontiert und in Sydenham in einer Weise aufgestellt worden, die seine Stabilität wesentlich erhöht, zumindest was den größeren Teil der Struktur betrifft ... Und trotzdem wurde ein sehr großer Flügel des Crystal Palace in der Zwischenzeit umgeblasen - der Teil nämlich, der mit Wahrscheinlichkeit der Struktur des Baus von 1851 am meisten glich...". (7)

Der Bau blieb 1851 trotz der Winde und vor allem trotz der thermischen Ausdehnung des Eisens stehen. Die Fugen zwischen den Stützen und Trägern waren teils mit schmiedeeisernen und teils mit eichenen Keilen ausgeschlagen worden. Die Holzkeile sollten auch eine gewisse Dehnung ermöglichen, (8) was aber illusorisch war. In Wirklichkeit verhielt sich der Bau wie ein langer, massiver Eisenbalken. Da die großen Holzbögen des Transzepts in ihrer Fläche unversteift waren, entstand eine wirksame Querfuge in der Mitte des Baus. Die zwei größten zusammenhängenden Dachflächen waren somit ungefähr 22 m breit und 260 m lang. Wie knapp der Bau einem Einsturz entging, geht aus Mallets Beschreibung hervor: "Wir hatten selber aber Gelegenheit, an einem frühen Nachmittag, einem der heißesten Sommertage von 1851, mit einiger Genauigkeit die Auswirkungen der Ausdehnung unter Sonnenwärme auf das Skelett des Bauwerks zu untersuchen. Wir können die Tatsache bezeugen, daß am äußersten Ende im Westen, sowie in den Vorderteilen der Galerien im Schiff, dort nämlich, wo die Säulen am längsten sind und am stärksten erhitzt waren, sie allein schon in der Höhe des ersten Stockwerks um ca. zwei Zoll von der Senkrechten abwichen ... Als wir in diese westlichen Galerien hinaufblickten, die dicht mit Menschen besetzt waren, und über die ganze Breite des Schiffs, das ebenso dicht bevölkert war, und an die gewaltigen Querkkräfte dachten, die in jenem Augenblick in unsichtbarem Spiel das spröde Gestell der Gußeisenstruktur belasteten, fühlten wir deutlich, daß Unwissen ein Segen war." (9)

Die Idee der Skelettbauweise war offenbar den technischen Möglichkeiten der Zeit vorausgeeilt. Detaillösungen entwickelten sich damals vor allem aus den Aufgaben des neuen Bauingenieurwesens. Die Ingenieure versuchten das Verhalten der neuen Baustoffe und Konstruktionen von der technischen und materialtechnologischen Seite her zu begreifen.

Gußeisen war für die Aufnahme von Druckkräften gut geeignet, nicht aber von Zugkräften und Biegebeanspruchung. Die Ironbridge aus dem Jahre 1779 hatte Gußeisen als Baustoff eingeführt. Solange Bogenbrücken gebaut wurden, mußten nur Druckkräfte abgeleitet werden. Als man Balkenbrücken zu bauen versuchte, die vor allem auf Biegung beansprucht werden, brachen diese immer wieder unter verhältnismäßig geringen Belastungen ein. Die Fachwerkträger des Crystal Palace hielten nur deshalb stand, weil sie für die Herstellung der vermeintlich biegesteifen Eckverbindungen auf etwa 1/8 der Spannweite oder 90 cm überhöht wurden. Der Bau der Britannia- und Conwaybrücken in Wales 1850 brachte die entscheidende Wendung. Ein Team, bestehend aus einem Eisenbahningenieur, einem Schiffs- und Kesselfabrikanten und einem Mathematiker und Materialtechnologen, entwickelte eine schmiedeeiserne Balkenkonstruktion. Die Erfahrungen mit dem neuen Material stammten aus dem Schiffsbau.

Dann begann man auf dem europäischen Kontinent die Vollwandkonstruktion in Gitterträger aufzulösen, um teures Eisen zu sparen. Im Jahre 1857 entstand die große Weichselbrücke bei Dirschau und 1862 der erste echte Fachwerkträger bei Grandfey im schweizerischen Kanton Fribourg. Die graphischen, statischen Berechnungsweisen, die für diese Entwicklung maßgebend waren, entstanden bei Karl Culmann, der sie von 1859 an in seinen Vorlesungen am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich lehrte. Lösungen zu den verschiedenen konstruktiven Problemen, die damals den Crystal Palace plagten, hatten begonnen, sich im Ingenieurbau abzuzeichnen.

Weitere Erfahrungen brachte der Bau der Ausstellungshalle von 1855 in Paris. Mallet schrieb: "Dementsprechend erzählt uns M. Barrault, daß diese (Keile) im Palais de l'Industrie von 1855 nutzlos waren, und daß die Ausdehnung seines Baus unter der hellen Pariser Sonne derart war, daß Glas zersprang und undichte Stellen entstanden, obwohl sein Bau strukturell unvergleichlich besser entworfen worden war, und er die dehnbaren Eisenrahmen in kürzeren Abschnitten unterteilt hatte mit Ausnahme der Längsseiten der drei großen parallelen Dächer." (10)

Als man nun um 1860 sich mit dem Entwurf für die zweite Londoner Weltausstellung von 1862 zu beschäftigen begann, war man sich über die konstruktiven Probleme weitgehend im Klaren. Aber man hatte noch keine entsprechenden Lösungen entwickelt. Wie konnte man also Repräsentation, Versteifung, Wasserdichtung, große Spannweiten, kleine Stützenquerschnitte und Planungsfreiheit im Innern miteinander vereinen? Die Antwort lag auf der Hand: das erfolgreiche Modulare System in Eisen, kombiniert mit einer festen, windsteifen Steinummantelung. Mallet unterstützte auch Barraults Vorschlag, Dehnungsfugen in regelmäßigen Abständen einzuführen. Er war aber im Gegensatz zu Barrault der Meinung, daß der Bau mit einer festen selbsttragenden Mauer umgeben werden mußte, einerseits zu Gewährleistung der Steifigkeit, andererseits zum Schutz der Eisenstruktur vor übermäßiger Erwärmung.

Dieser scheinbare Rückschritt vom reinen Skelettbau mit nichttragender Außenhaut zum Skelett mit versteifender Ummantelung bedeutet, daß nur die wirkliche Innovation, nämlich das additive räumlich-konstruktive Modulare System übernommen wurde, und nicht auch die ungelösten Systemchwächen. Es stand aber mitnichten fest, daß die endgültige Form des Systems eine leichte, nichttragende Außenhaut beinhaltete. Die Entwicklung hätte genau so gut zu einer versteifenden Haut führen können. Denn, wenn man das sogenannte "reine" System mit nichttragender Außenhaut analysiert, erkennt man, wie verschwenderisch es in Wirklichkeit

ist. Die modernsten Entwicklungen im Skelettbau scheinen sich heute in Richtung der versteifenden Außenhaut zu bewegen: denken wir zum Beispiel an die außenliegende Versteifung des Hancock Tower in Chicago. Bei der Beurteilung dürfen wir uns nicht durch die Leichtigkeit oder Schwere des Fassadenbaustoffs stören lassen, sondern nur das System betrachten: versteift es oder nicht? Trägt es oder nicht?

Das System, so wie es 1851 im Crystal Palace zur Anwendung kam, war in Gußeisen untauglich, obwohl es einer steifen Rahmenkonstruktion gleich. Es war prinzipiell instabil und hielt nur dank der zufälligen Umstände. Das Bild, das sich uns präsentiert, ist darum irreführend: Es ist nicht die Moderne, die uns da begegnet, sondern eine formale Vorahnung einer von später mehreren möglichen Strukturen. Ob man dies nun als genialen, verfrühten oder vorläufig mißlungenen Versuch werten will, hängt nur vom Standpunkt ab, den man bei der Betrachtung einnimmt. Der Bau des Crystal Palace demonstriert eindeutige Charakteristika aller drei Möglichkeiten. Aber die tatsächliche Leistung bei der konstruktiven Realisierung des Stahlskelett-Systems geschah in viel kleineren, anonymen Schritten. Diese Geschichte bleibt noch zu erforschen.

#### Anmerkungen

1. Siegfried Giedion: Time, Space and Architecture, the growth of a new tradition. 1941 Cambridge MA: Harvard University Press. 5. Aufl. 1974, S. 249-255.
2. Tom F. Peters: Time is Money. Die Entwicklung des modernen Bauwesens. 1981 Stuttgart: Julius Hoffmann S. 159-183.
3. Charles Cowper: The Building Erected in Hyde Park for the Great Exhibition of the Works of Industry of All Nations 1851. 1852 London: John Weale, S. i. v. sowie:  
Charles Fowler Jr.: The Crystal Palace Building. Serie von neun Folgen in: The Illustrated Exhibitor. o. D. (1851) London: John Cassell, S. 80.
4. Peter Collins: Concrete. The Vision of a New Architecture. A Study of Auguste Perret and his precursors. 1959 London: Faber and Faber, S. 114.
5. Daniel Boorstin: The Americans. 2. Aufl. 1969 Penguin Books. Bd. I, S. 193-196.  
Diese Bauweise wurde in der Architekturgeschichte populär gemacht durch:  
Siegfried Giedion: op. cit., S. 346-354.
6. Charles Cowper: op. cit., S. 2.
7. Robert Mallet: The Record of the International Exhibition 1862. o. D. (1862) Glasgow/Edinburgh/London: William Mackenzie, S. 60.
8. Charles Cowper: op. cit., S. 6.
9. Robert Mallet: op. cit., S. 59.
10. ibid, S. 59.