

STAHL
VERSTEHEN

STAHL
VERSTEHEN

**ENTWERFEN UND
KONSTRUIEREN MIT STAHL**

Terri Meyer Boake

**Mit Technischen Illustrationen
von Vincent Hui**

**Birkhäuser
Basel**

Autorin und Verlag danken den Regionalverbänden des Canadian Institute of Steel Construction und der Walters Group für ihre Beteiligung an diesem Buch.

ÜBERSETZUNG AUS DEM ENGLISCHEN
Steffen Walter

LEKTORAT
Andreas Müller

GRAFIKDESIGN & BUCHPRODUKTION
ActarBirkhäuserPro
www.actarbirkhauserpro.com
Barcelona - Basel

BIBLIOGRAFISCHE INFORMATION DER
DEUTSCHEN NATIONALBIBLIOTHEK
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese
Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere
die der Übersetzung, des Nachdrucks,
des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und
Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung
oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen,
bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung,
vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes
oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall
nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen
des Urheberrechtsgesetzes in der jeweils
geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich
vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen
den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Dieses Buch ist auch in englischer Sprache
erschienen (ISBN 978-3-0346-0269-3).

© 2012 Birkhäuser GmbH, Basel
Postfach, 4002 Basel, Schweiz
Ein Unternehmen von ActarBirkhäuser

VERTRIEB
ActarBirkhäuserD
www.actarbirkhauser-d.com
Barcelona - Basel - New York

Roca i Batlle 2
E-08023 Barcelona
T +34 93 417 49 43
F +34 93 418 67 07
salesbarcelona@actarbirkhauser.com

Viaduktstrasse 42
CH-4051 Basel
T +41 61 5689 800
F +41 61 5689 899
salesbasel@actarbirkhauser.com

151 Grand Street, 5th floor
New York, NY 10013, USA
T +1 212 966 2207
F +1 212 966 2214
salesnewyork@actarbirkhauser.com

Gedruckt auf säurefreiem Papier, hergestellt aus
chlorfrei gebleichtem Zellstoff. TCF ∞

Printed in Spain

ISBN 978-3-0346-0271-6

9 8 7 6 5 4 3 2 1
www.birkhauser.com

KAPITEL 1

12 *TRANSFORMATIONEN IM STAHLBAU*

14 *DIE ENTWICKLUNGSLOGIK VON STAHL UND MODERNER ARCHITEKTUR*

14 *ZUGBEANSPRUCHUNG*

15 *INDUSTRIALISIERUNG UND MASSENFERTIGUNG*

15 *NORMALER BAUSTAHL ODER FREILIEGENDE STAHLKONSTRUKTION*

15 *VOM VERFAHREN ZUR TECHNOLOGIE*

KAPITEL 2

18 *DAS MATERIAL STAHL*

20 *KONSTRUKTIVE EIGENSCHAFTEN*

21 *WARMGEWALZTE STAHLPROFILE*

22 *STAHLHOHLPROFILE*

24 *EINSPARPOTENZIALE BEI PLANUNG UND AUSSCHREIBUNG VON STAHL*

25 *ENTWURFS- UND MODELLIERUNGSSOFTWARE*

KAPITEL 3

26 *VERBINDUNGEN VON STAHLBAUTEILEN UND VERFAHREN DES STAHLSCHELETTBAUS*

28 *DAS PRINZIP DES SCHELETTBAUS*

28 *GRUNDLAGEN DER VERBINDUNG VON BAUTEILEN*

31 *RAHMENVERBINDUNGEN*

31 *TRÄGER-BALKEN-VERBINDUNGEN*

32 *BALKEN- ODER TRÄGER-STÜTZEN-VERBINDUNGEN*

33 *STÜTZENVERBINDUNGEN*

34 *STECKBOLZENVERBINDUNGEN*

35 *DECKENSYSTEME*

37 *AUSGESTEIFTE SYSTEME*

38 *FACHWERKTRÄGERSYSTEME*

38 *EBENE FACHWERKTRÄGER*

39 *RAUMFACHWERKTRÄGER*

42 *FERTIGUNG, MONTAGE UND IHRE BEDEUTUNG FÜR DEN ENTWURF*

44 *VOM ENTWURF ZU DEN VORGEFERTIGTEN BAUTEILEN*

45 *PROZESSPROFIL: ERWEITERUNG DES ROYAL ONTARIO MUSEUM (ROM)*

46 *PHYSISCHE UND DIGITALE MODELLE*

49 *PROPORTIONEN*

49 *TRANSPORT UND BAUSTELLENABLÄUFE*

51 *ENDMONTAGE DER STAHLBAUTEILE*

52 *AUSWIRKUNGEN VON WITTERUNG UND KLIMA AUF DIE MONTAGE*

53 *SCHAFFUNG DAUERHAFTER STABILITÄT*

54 *KOORDINATION MIT ANDEREN GEWERKEN*

55 *PROZESSPROFIL: LESLIE DAN FACULTY OF PHARMACY*

56 *VORFERTIGUNG IN DER WERKSTATT*

57 *MONTAGE DER PODS*

58 *MONTAGE EINES TRÄGERS*

58 *MONTAGE DER STÜTZEN*

59 *ANHEBEN DES 50-T-TRÄGERS*

60 *ANHEBEN DER PODS*

KAPITEL 5

62 *FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN: GESCHICHTE UND ENTWICKLUNG*

64 *DIE ENTWICKLUNG VON STAHLHOHLPROFILEN*

64 *DIE WEITERENTWICKLUNG VON BAUSTAHL FÜR FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN DURCH DIE HIGH-TECH-BEWEGUNG*

65 *TYPLOGIE DER FRÜHEN HIGH-TECH-ARCHITEKTUR*

66 *TYP „ERWEITERTER GRUNDRISS“*

70 *TYP „RASTER / FELD“*

74 *TYP „MAST MIT ABSPANNUNG“*

78 *VON HIGH-TECH ZU BAUSTAHL FÜR FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN*

79 *BAUPHYSIKALISCHE PROBLEME*

- 80 **FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN: ENTWURF UND DETAILPLANUNG**
- 82 *NORMALER BAUSTAHL UND BAUSTAHL FÜR FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN*
- 83 *WAS WIRD UNTER BAUSTAHL FÜR FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN VERSTANDEN?*
- 83 *HAUPTFAKTOREN FÜR DIE GESTALTUNG*
- 85 *KLASSEN VON BAUSTAHL FÜR FREILIEGENDE KONSTRUKTIONEN*
- 85 *KLASSE AESS 1 - GRUNDELEMENTE*
- 86 *KLASSE AESS 2 - SCHAUELEMENTE*
- 88 *KLASSE AESS 3 - SCHAUELEMENTE*
- 89 *KLASSE AESS 4 - EXPONIERTE ELEMENTE*
- 91 *SONDERBAUTEILE*
- 92 *EDELSTAHL FÜR KONSTRUKTIVE ANWENDUNGEN*
- 92 *MISCHBAUWEISEN*
- 93 *ANFORDERUNGEN AN DIE AUSBILDUNG VON ANSCHLÜSSEN*
- 93 *VERBINDUNGSMUSTER*
- 94 *ZUSCHNITT DES STAHL*
- 95 *WAHL DES VERBINDUNGSTYP*
- 95 *SCHRAUBVERBINDUNGEN*
- 96 *SCHWEISSVERBINDUNGEN*
- 97 *GUSSVERBINDUNGEN*
- 98 *WAHL DER BAUTEILTYPEN*
- 98 *HOHLPROFILE*
- 99 *STANDARD-BAUPROFILE*
- 99 *BEST PRACTICE BEIM BAU VON FREILIEGENDEN STAHLKONSTRUKTIONEN*
- 99 *SORGFÄLTIGER UMGANG MIT BAUTEILEN*
- 99 *TRANSPORT*
- 100 *FESTLEGUNG VON HEBESEQUENZEN*
- 100 *BESCHRÄNKUNGEN AUF DER BAUSTELLE*
- 101 *MONTAGE*

- 102 **BESCHICHTUNG, OBERFLÄCHEN-BEHANDLUNG UND BRANDSCHUTZ**
- 104 *KORROSIONSSCHUTZ*
- 105 *BRANDSCHUTZ*
- 105 *VORBEREITUNG DES STAHL FÜR DIE BESCHICHTUNG*
- 106 *WAHL DES BESCHICHTUNGS- UND ANSTRICHSYSTEMS*
- 106 *GRUNDIERUNGEN*
- 106 *ANSTRICHSYSTEME FÜR FREILIEGENDE STAHLKONSTRUKTIONEN*
- 107 *DEFIZITE VON FARBANSTRICHEN*
- 107 *AUFBRINGEN VON ANSTRICHEN: IN DER WERKSTATT ODER AUF DER BAUSTELLE?*
- 108 *KORROSIONSSCHUTZ-SYSTEME*
- 108 *VERZINKUNG*
- 109 *METALLBESCHICHTUNG*
- 110 *WETTERFESTER STAHL*
- 111 *EDELSTAHL*
- 112 *BRANDSCHUTZSYSTEME*
- 112 *BRANDBEKÄMPFUNGSANLAGEN*
- 113 *BRANDSCHUTZ-SPRITZPUTZE*
- 113 *BETON*
- 113 *DÄMMSCHICHTBILDENDE ANSTRICHE*
- KAPITEL 8
- 116 **GEBOGENE STAHLBAUTEILE**
- 118 *HERSTELLUNG GEBOGENER VERLÄUFE*
- 118 *BESCHRÄNKUNGEN FÜR DIE FERTIGUNG GEBOGENER STAHLBAUTEILE*
- 119 *DER BIEGEVORGANG*
- 120 *ANWENDUNGEN FÜR GEBOGENE STAHLBAUTEILE*
- 122 *FACETTIERUNG ALS ALTERNATIVE ZUM BIEGEN*
- 123 *HERSTELLUNG VON KRÜMMUNGEN AUS STAHLBLECHEN*

- 124 **KOMPLEXE STAHLKONSTRUKTIONEN: DIAGONALE FACHWERKGITTER (DIAGRIDS)**
- 126 *HOCHHÄUSER*
- 127 *GEBÄUDE MIT DIAGONAL AUSGESTEIFTER RÖHRE*
- 128 *FACHWERKBAND-SYSTEM*
- 129 *GEBÄUDE MIT TRAGWERKEN AUS RÖHRENBÜNDELN*
- 129 *VERBUNDBAUWEISE*
- 130 *WINDLASTPRÜFUNGEN*
- 131 *DIAGONALE FACHWERKGITTER (DIAGRIDS)*
- 131 *VORTEILE DES DIAGONALGITTERS GEGENÜBER DEM BIEGESTEIFEN RAHMEN*
- 132 *HOCHHÄUSER MIT DIAGONALGITTERN*
- 136 *PROZESSPROFIL: BOWENCANA TOWER*
- 139 *GEKRÜMMTE DIAGONALGITTERKONSTRUKTIONEN FÜR NIEDRIGE UND MITTELHOHE GEBÄUDE*
- 140 *DIAGONALGITTERKONSTRUKTIONEN FÜR KRISTALLINE BAUFORMEN*
- 141 *HYBRIDE BAUFORMEN*

- 144 **GUSSTEILE**
- 146 *GESCHICHTE UND GEGENWART*
- 147 *GRUNDTYPEN VON GUSSVERBINDERN*
- 148 *ZUGBEANSPRUCHE VERBINDUNGSELEMENTE*
- 150 *BASISVERBINDUNGEN*
- 151 *VERZWEIGTE VERBINDUNGEN*
- 153 *PROZESSPROFIL: SCIENCE BUILDING DER UNIVERSITY OF GUELPH*

- 158 *ZUGBEANSPRUCHE KONSTRUKTIONEN UND RAUMFACHWERKE*
- 160 *ZUGBEANSPRUCHE KONSTRUKTIONEN*
- 161 *ZUGVERBINDER*
- 161 *KREUZVERSTREBUNGEN*
- 164 *DIFFERENZIERUNG DER EINWIRKENDEN LASTEN IN FACHWERKEN*
- 167 *EINFACHE VORDACHKONSTRUKTIONEN*
- 168 *KONSTRUKTIONEN MIT SEILVERSANNUNGEN*
- 170 *TENSEGRITY-KONSTRUKTIONEN*
- 172 *RAUMFACHWERKE*
- 173 *NICHTEBENE RAUMFACHWERKE*
- 176 *UNREGELMÄSSIGE MODULE*

- 178 *STAHL- UND GLASKONSTRUKTIONEN*
- 180 *FRÜHE BAUTEN AUS STAHL UND GLAS*
- 181 *TECHNISCHE ASPEKTE DER KOMBINATION VON STAHL UND GLAS*
- 183 *UNTERKONSTRUKTIONEN FÜR VERGLASUNGEN*
- 184 *WAHL DES GEEIGNETEN SYSTEMS*
- 186 *EINFACHE TRAGSYSTEME FÜR VORHANGFASSADEN*
- 186 *EINFACHE TRAGSYSTEME MIT WINDVERBÄNDEN*
- 187 *SEILVERSPANNTE GEBÄUDEHÜLLEN MIT TRAGENDER VOLLVERGLASUNG*
- 188 *SEILNETZFASSADEN*
- 189 *PUNKTHALTERUNGEN AUS EDELSTAHL*
- 190 *SEILBINDERKONSTRUKTIONEN*
- 192 *KOMPLEXE SEILKONSTRUKTIONEN*
- 195 *ZU ÖFFNENDE STAHL- UND GLASKONSTRUKTIONEN*
- 196 *GEBOGENE FORMEN*
- 197 *GITTERSCHALENBAUWEISE*

- 202 *KOMPLEXE RAHMENKONSTRUKTIONEN: STAHL UND HOLZ*
- 204 *EIGENSCHAFTEN*
- 205 *DETAILPLANUNG*
- 206 *FERTIGUNG UND MONTAGE*
- 206 *OBERFLÄCHENBEHANDLUNG*
- 207 *VERDECKTE STAHLBAUTEILE*
- 208 *PROZESSPROFIL: ERWEITERUNGSBAU DER ART GALLERY OF ONTARIO (AGO)*
- 212 *PROZESSPROFIL: EISSCHNELLLAUFHALLE RICHMOND*

- 216 *STAHL UND NACHHALTIGKEIT*
- 218 *STAHL ALS NACHHALTIGER BAUSTOFF*
- 219 *DAS ZERTIFIZIERUNGSSYSTEM LEADERSHIP IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL DESIGN (LEED™)*
- 220 *RECYCLING UND WIEDERVERWENDUNG*
- 220 *RECYCLINGANTEIL*
- 220 *WIEDERVERWENDUNG VON BAUTEILEN*
- 221 *ANGEPASSTE NACHNUTZUNG*
- 223 *NACHHALTIGKEIT FREILIEGENDER STAHLKONSTRUKTIONEN*
- 223 *EMISSIONSARME ENTWURFSSTRATEGIEN*
- 225 *REDUZIERUNG DES MATERIALEINSATZES*
- 225 *REDUZIERUNG VON ANSTRICHEN UND BESCHICHTUNGEN*
- 225 *REDUZIERUNG VON ARBEITSKOSTEN*
- 226 *REDUZIERUNG DES TRANSPORTAUFWANDES*
- 227 *DAUERHAFTIGKEIT*

- 228 *STAHL IN TEMPORÄREN AUSSTELLUNGSBAUTEN*

- 236 *LITERATURHINWEISE*
- 237 *ABBILDUNGSNACHWEIS*
- 238 *REGISTER TECHNISCHER BEGRIFFE*
- 240 *REGISTER DER BAUAUFGABEN*
- 241 *BAUTENREGISTER*
- 242 *REGISTER DER ARCHITEKTEN UND STAHLBAUFIRMEN*
- 243 *ORTSREGISTER*
- 244 *ÜBER DIE AUTORIN UND DEN TECHNISCHEN ILLUSTRATOR*
- 245 *SPONSOREN*

Vorwort

Der Hochbau wird zu einem immer komplexeren Fachgebiet und Arbeitsfeld. Architekten und Ingenieure können beim Entwurf der Tragkonstruktion von Gebäuden aus zahlreichen Baustoffen und Bausystemen wählen. Die Grundidee dieses Buches beruht auf der festen Überzeugung von den Vorzügen, die im Verständnis des inhärenten Zusammenhangs zwischen den Materialeigenschaften und dem architektonischen Entwurf liegen. Qualitativ hochwertige Entwürfe orientieren sich am Potenzial der verwendeten Baustoffe und machen es sich als Grundlage der Planung zu eigen. Dabei muss die Auswahl des Materials für die Haupttragkonstruktion am Beginn der Konzeptplanung stehen, die in den Entwurf zu überführen und mit Hilfe der einzelnen Entwurfsziele weiter auszuarbeiten ist.

Obwohl Stahl aufgrund seiner Eigenschaften ein hochtechnisches Material ist – von der Planung bis zur Ausführung –, bieten seine Merkmale ein enormes Potenzial für eine dynamische Architektur. Die Verfasserin dieses Buches hält es für wichtiger, dass Architekten ein gutes Verständnis der Art und Ausführung von Stahlkonstruktionen entwickeln, als dass sie Berechnungen durchführen. Gewinn verspricht hierbei die vertiefte Betrachtung von realisierten Beispielen. Darüber hinaus müssen sich Architekten der wichtigen Rolle bewusst sein, die das Stahlbau- und -montageunternehmen bei der Unterstützung des Entwurfs komplexerer Konstruktionen und Details einnimmt.

Seit 1983 bin ich als Dozentin für Hochbau an der Architekturfakultät der University of Waterloo in Ontario, Kanada, tätig. Mein Lehransatz beruht wesentlich auf der Untersuchung realisierter Projekte, mit dem Ziel des Verständnisses der ihnen innewohnenden Intentionen, Erfolge und Fehlschläge sowie der Ableitung entsprechender Schlussfolgerungen. Bei der Dokumentation beispielhafter Stahlbauprojekte – so weit möglich auch ihrer Bauphasen – habe ich mit dem Canadian Institute of Steel Construction und der Steel Structures Education Foundation of Canada zusammengearbeitet.

Nach Ablauf der Bauphase sind bestimmte Aspekte des Bauprozesses nicht mehr erkennbar, was die Darlegung der Konstruktion eines Gebäudes erschwert. Ein Großteil der Publikationen im Architekturbereich bezieht sich auf Gebäude während ihrer Nutzung und enthält nur in seltenen Fällen umfassende Informationen über den Bauprozess. Auch Architekturfotografie zeigt meist die fertiggestellten Gebäude. Die Dokumentation von Bauprozessen kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen. In den meisten Fällen stammen Fotos aus der Bauphase von den vor Ort beteiligten Mitarbeitern und sind nicht für eine Veröffentlichung bestimmt. Solche Dokumentationen zu erstellen ist zu meinem persönlichen Anliegen, zu meiner Leidenschaft geworden, um selbst ein Verständnis des Bauprozesses zu entwickeln und es mit jenen zu teilen, die ihn studieren wollen.

Während der vergangenen zehn Jahre dokumentierte ich Projekte bekannter Architekten wie Foster + Partners, Frank Gehry, Studio Libeskind, Antoine Predock oder Will Alsop über den größten Teil der Bauphase, von der Grundsteinlegung bis zur Eröffnung des Gebäudes. Diese in meinem Land realisierten Projekte legen in einigen Kapiteln den Schwerpunkt der Beispiele auf Kanada. Sie dienen als Bezugspunkt für die umfassenderen Beschreibungen der Fertigungs- und Montageabläufe.

Mein Dank gilt den Stahlbauunternehmen Walters Inc., Benson Steel und Mariani Metal für die Möglichkeit des Besuches ihrer Fertigungsbetriebe sowie den bauausführenden Unternehmen PCL Constructors, EllisDon Corporation, Vanbots und Ledcor für den mir gewährten Zugang zu den Baustellen. Darüber hinaus danke ich Kubes Steel für die Möglichkeit der Besichtigung des Biegebetriebs.

Die groß bemessenen, spezialgefertigten Verbindungen am von Richard Rogers geplanten Terminal 5 des Flughafens Heathrow in London sind Ergebnis einer intensiven Zusammenarbeit zwischen Architekt, Tragwerksplaner, Stahlbauunternehmen und bauausführender Firma.



ZIEL UND ZWECK DIESES BUCHES

Das vorliegende Werk soll Architekten eine neue Art der Information über den Baustoff Stahl bieten, die ihnen einen Wissensvorsprung bei der Erfassung und Realisierung des Entwurfspotenzials dieses Materials verschafft.

Zwischen den historischen Entwicklungen der Eisen- und Stahltechnologien in den vergangenen 250 Jahren und der Entwicklung der modernen Architektur bis heute besteht eine starke Verbindung: Es fanden Transformationen statt, deren kurzer Abriss die Darstellung in den folgenden Kapiteln durchzieht. Die Verbindung zwischen bahnbrechenden Innovationen im Bereich Eisen und Stahl und der Vervollkommnung dieser Methoden, wie sie heute die Entwurfs-, Fertigungs- und Montageverfahren prägen, stellt die Grundlage für das Verständnis aller Aspekte des Entwerfens mit Stahl für die Bauaufgaben unserer Zeit dar.

Dies ist keine Sammlung von Fallstudien. Viele der beispielhaft herangezogenen Projekte werden verteilt auf die einzelnen Kapitel in ihren jeweiligen Aspekten behandelt. Darüber hinaus enthält das Buch einige detaillierter ausgearbeitete „Prozessprofile“, die im Projektzusammenhang einen umfassenderen Einblick in die Planungs- und Bauabläufe bieten. Ein Schwerpunkt neben der Betrachtung herkömmlicher Rahmenkonstruktionen mit nicht sichtbaren Stahlbauteilen liegt auf freiliegenden Konstruktionen, die wesentlich erhöhte Anforderungen an den Architekten stellen, der sich nun am Entwurf und der Ausführungsplanung der Systeme und Anschlüsse beteiligen muss.

Fotoaufnahmen

Die Fotoaufnahmen stammen in ihrer Mehrzahl von der Verfasserin (sofern kein anderer Bildnachweis angegeben ist). Architektur ist nur über die konkrete Erfahrung erfassbar – einzelne Aufnahmen aus „klassischer“ Perspektive führen zu keinem umfassenden Verständnis eines Gebäudes. Die gewählten Ansichten und die Darstellung einer breiten Palette bekannter und weniger bekannter Projekte sollen neue, andersartige Einblicke in die Stahlbauweise ermöglichen. Dabei kommt es vor allem auf die Details an. Daher führen die Aufnahmen den Leser möglichst nahe an den Gegenstand heran und damit hoffentlich an ein besseres Verständnis des Prozesses und der Abläufe beim Planen und Entwerfen mit Stahl.

Das Buch beruht auf meiner unmittelbaren Erfahrung mit Gebäuden in Stahlbauweise. Von Orten und Projekten, die ich besucht habe, spreche ich lieber, als von den Erfahrungen Anderer. Meine Fotoaufnahmen legen den Schwerpunkt auf Aspekte, die sich in anderen Bildern häufig nicht wiederfinden. Viele der Fotos stammen aus meiner bestehenden, zu Lehrzwecken angelegten Sammlung. In ihrem internationalen Bestand wurde sie noch einmal bedeutend erweitert, um den weltweiten Stand der Technik im Stahlbau besser abbilden zu können.

Zeichnungen und andere Abbildungen

Für die Stahlbauweise sind Zeichnungen mit relativ hohem Detaillierungsgrad zu erstellen, um die am Projekt Beteiligten mit den erforderlichen Informationen zum Entwurf der Konstruktion und der Verbindungen zu versorgen. Zahlreiche im vorliegenden Werk enthaltene Abbildungen wurden von Herstellern zur Verfügung gestellt, die an der Ausführung vieler der dargestellten Projekte beteiligt waren. Diese Abbildungen veranschaulichen die verschiedenartigen Vorgehensweisen, die bei der Weitergabe von Daten zur Detaillierung von Stahlkonstruktionen und zur Integration anderer Bausysteme angewandt werden. Sofern keine entsprechenden Zeichnungen oder Fotos zur Verfügung standen, erstellte Vincent Hui Abbildungen mit ausführlicheren Darstellungen und gegebenenfalls technischen Daten zu einem bestimmten Gebäude bzw. einer Bauweise.

Auf die Angabe von Maßen und Größen konnte in den im vorliegenden Werk enthaltenen Abbildungen zu den einzelnen Projekten verzichtet werden, weil sie in erster Linie dem konzeptionellen Verständnis der für die Gebäude genutzten Bausysteme und Anschlussdetails dienen sollen.

DANK

Die Publikation des vorliegenden Werks wurde durch die großzügige Unterstützung der Walters Inc. Steel Fabricators und der im Canadian Institute of Steel Construction vertretenen Regionen ermöglicht. Besonderer Dank gilt Vincent Hui und Sam Ghantous von der Ryerson University in Toronto für die Erstellung der technischen Abbildungen dieses Buches.

Das Schreiben dieses Buches war Kulminationspunkt der 30 Jahre Wissen und Erfahrungen, die ich beim Entwurf und bei der Realisierung von Stahlbauten erwerben konnte. Diese Entwicklung begann mit dem Architekturstudium Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre, als ich nach Paris reiste und dort das gerade errichtete Centre Pompidou aus nächster Nähe betrachten konnte. Mein Interesse an der High-Tech-Bewegung, historischen Bauten aus Gusstahl und dem gerade aufkommenden Bauen mit freiliegendem Stahl führte mich auf einen Weg, auf dem ich mir Wissen über architektonisch herausragende Stahlbauten aneignen und ein umfangreiches Bildarchiv aufbauen konnte. Im Laufe der Jahre versuchte ich, jedes dieser Gebäude selbst zu besichtigen und es aus meiner persönlichen Perspektive zu dokumentieren. Natürlich konnten meine Studenten nicht all diese Orte besuchen. Ich versuchte jedoch, ihnen einen individuelleren Blick auf die Architektur zu vermitteln, wie er sich in den üblichen Publikationen zum Stahlbau und zu Bautechniken nicht findet.

Ende der 1990er Jahre begann ich mit einer Forschungstätigkeit, die vom Canadian Institute of Steel Construction (CISC) und der Steel Structures Education Foundation unterstützt wurde. Die von diesen Einrichtungen finanzierte, von mir betriebene Forschung bot weitere Möglichkeiten, zu einem umfassenderen Verständnis der Auswirkungen der Fertigung und Montage auf den Entwurf und die Detailplanung zu gelangen und mich dabei intensiver mit konkreten Bauvorhaben vertraut zu machen. Mein Dank gilt Mike Gilmor, Dave MacKinnon und Hugh Krentz für diese mir übertragenen interaktiven Bildungsprojekte.

Die Beteiligung am Ausschuss für freiliegende Stahlkonstruktionen und die Erarbeitung eines Leitfadens „CISC Guide for Specifying Architecturally Exposed Structural Steel“ für deren Ausschreibung schufen die Grundlage für die im vorliegenden Buch enthaltenen weiterführenden technischen Betrachtungen. Ohne die Unterstützung durch Sylvie Boulanger, Walter Koppelaar und Tim Verhey wäre es mir nicht annähernd möglich gewesen, ein solch tiefes Verständnis des Stahlbaus zu entwickeln und die damit verbundenen praktischen Erfahrungen zu sammeln. Als Ingenieurin ergänzt Sylvie Boulanger meine Tätigkeit auf hervorragende Weise und hat mir bereitwillig ihr umfangreiches Wissen vermittelt. Walter Koppelaar hat mir stets Mut zugesprochen, mir Zugang zu seinem Fertigungsbetrieb gewährt und die – nicht immer einfach zu organisierende – Besichtigung zahlreicher Baustellen ermöglicht (OCAD, ROM, Leslie Dan, Guelph Science Building, Bow Encana Tower, Canadian Museum for Human Rights). Ohne diese Eindrücke, die ich aus erster Hand während der Bauphase gewinnen konnte, hätte ich meinen Wissens- und Erfahrungsschatz nicht über den eines gewöhnlichen Dozenten hinaus erweitern können, und mein Bildarchiv wäre wesentlich kleiner. Tim Verhey versorgte mich immer wieder mit äußerst detaillierten technischen Erläuterungen, die sich vielfach in diesem Buch wiederfinden.

Zu Dank verpflichtet bin ich ebenfalls Rob Third und Ziggy Welsch von der Firma George Third and Son Fabricators, Steve Benson von Benson Steel, Vince Mariani von Mariani Metal und John Rogers von der Firma Kubes Steel. Die von ihnen gelieferten Informationen und Bilder sind ebenso wie die Betriebsbesichtigungen und die dabei gewonnenen Einblicke im vorliegenden Werk umfassend dargestellt. Mein Dank gilt den Studierenden und Mitarbeitern an der Architekturfakultät der University of Waterloo. Dort bin ich seit 1986 in Vollzeit als Dozentin tätig. Sie haben mich in meiner Arbeit stets bestärkt. Vielen Dank auch an Reinhold Schuster, meinen ehemaligen Professor für Konstruktionslehre, der mein Interesse am Stahlbau und an der Lehrtätigkeit förderte, sowie an Ed Allen für die Anregung, dass Lehrmaterialien „mehr“ sein können.

Des Weiteren gilt mein Dank meinem Lektor Andreas Müller. Er hat dieses Buch „in mir gesehen“ und die Arbeit daran zu einem großen Vergnügen gemacht. Vielen Dank an Andreas und seine Frau Barbara, die mich während der Dokumentation und des Lektorats in Berlin bei sich aufnahmen. Darüber hinaus hat Rein Steger hervorragende Arbeit beim Layout geleistet. Vielen Dank an Steffen Walter für die Übertragung ins Deutsche.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie dafür, dass sie mich während des vergangenen Jahres „ertragen“ hat, als ich gewissermaßen „im Buch lebte“ – ein Jahr voller Freude, ein Jahr des Schreibens und des Reisens. Mein Dank gilt meinen Töchtern Alex und Sierra für die Begleitung auf meinen Europa- und China-Reisen, auf denen ich mein Bildarchiv erweitern konnte, sowie meinem Mann Brian, mit dem ich in die Vereinigten Arabischen Emirate reiste, um dort einige spektakuläre Bauwerke zu besichtigen. Meiner Tochter Elanne danke ich dafür, dass sie meine vielfache lange Abwesenheit so großzügig in Kauf nahm.

KAPITEL 1

TRANSFORMATIONEN IM STAHLBAU

*DIE ENTWICKLUNGSLOGIK
VON STAHL UND
MODERNER ARCHITEKTUR*

ZUGBEANSPRUCHUNG

INDUSTRIALISIERUNG UND MASSENFERTIGUNG

NORMALER BAUSTAHL ODER FREILIEGENDE STAHLKONSTRUKTION

*VOM VERFAHREN
ZUR TECHNOLOGIE*

Oriental Pearl Tower und die Skyline von Shanghai, gesehen vom Huangpu-Fluss. Der Wandel der Architektur beruht auf der Nutzung der Potenziale von Stahl als Baustoff und tritt in der futuristisch anmutenden Skyline zutage. Ob Stahlskelettkonstruktion oder mit Stahl bewehrter Beton: Die Potenziale der Materialität und der konstruktiven Eigenschaften von Stahl bilden die Grundlage der architektonischen Lösungen.



Die Entwicklung der konzeptionellen Ansätze, die dem architektonischen Entwerfen in den vergangenen 300 Jahren zugrunde lagen, offenbart einen inhärenten Zusammenhang von Form und Theorie der Architektur mit dem Auftreten neuer Baustoffe, mit der technologischen Weiterentwicklung verfügbarer Materialien und mit dem Fortschritt bei der Begrenzung von Umweltauswirkungen. Gering ist der Anteil der Veränderungen, die nicht auf den Einfluss neuer Technologien zurückzuführen sind.

Die Transformationen aufgrund der Verwendung von Stahl als Hauptbaustoff haben den gesamten Verlauf des Architektur- und Baugeschehens erfasst. In nahezu jeder Stadtlandschaft, jedem Großprojekt findet sich dieses Material. Stahl hat die Art und Weise, in der wir Gebäude entwerfen, grundlegend verändert. Konstruktionen können entworfen werden, die zuvor nur in der Vorstellungskraft existierten und „Visionären“ vorbehalten waren.

Dennoch vermögen viele praktizierende Architekten das Potenzial des Baustoffs Stahl noch nicht in vollem Umfang auszuschöpfen. Es fehlt am Verständnis und in der Folge bei den Anwendungen in der konstruktiven Durchbildung - vom Entwurf über die Vorfertigung bis zur Montage. Dabei hat Stahl im Zuge seiner Wandlung vom herkömmlichen verdeckten Einbau zur Sichtbarmachung und Nutzung als architektonisches Gestaltungsmittel eine zusätzliche Verlagerung vom Bauingenieurwesen hin zur Architektur erfahren.

Mit der im 18. und 19. Jahrhundert in Frankreich und England aufkommenden Eisenbauweise ging eine zunehmende Aufspaltung der Fachgebiete des Architekten und des Ingenieurs einher, die zugleich zu einer Trennung, in Architekturtheorie und -lehre, im Hinblick auf die Anerkennung und Nutzung des Baustoffs führte. Die Berechnung und Ausführungsplanung von Eisenkonstruktionen gehörte nunmehr zu den Aufgaben des Ingenieurs, da Eisen im 18. Jahrhundert zunächst üblicherweise für Brücken, Fabrikhallen und überdachte Einkaufspassagen verwendet wurde, Bautypen, die nur in seltenen Fällen von Architekten entworfen wurden. Der Baustoff war kontrovers; in der Folge wurde Eisen zunächst als Industriewerkstoff eingeordnet. Selbst J. N. L. Durand von der *École Polytechnique*, die als Bildungseinrichtung für Architektur im Vergleich zur *École des Beaux-Arts* eher technisch orientiert war, lehnte Eisen als Baustoff ab. Und doch wurde sein Grundlagenwerk *Précis des Leçons* mit dem darin begründeten „*mécanisme de la composition*“ wegweisend für ein rationalisiertes Raster, das die anerkannten klassischen Symmetrielinien des *Beaux-Arts*-Ansatzes integrierte, darüber hinaus aber nachfolgend die Industrialisierung und Standardisierung von Architektur ermöglichte - Merkmale, die der Eisen- und Stahlbauweise im besonderen und der Massenproduktion bzw. modularen Fertigung im allgemeinen in hohem Maße entsprachen.

DIE ENTWICKLUNGSLOGIK VON STAHL UND MODERNER ARCHITEKTUR

Der architektonische Entwurf steht in enger Verbindung mit den für Tragwerk und Verkleidung gewählten Materialien und Systemen, und des Weiteren mit der dem Baustoff eigenen Festigkeit und seinen Leistungsmerkmalen. Es besteht ein tiefer innerer Zusammenhang zwischen den Merkmalen des gewählten Baustoffs und der Entwurfsaufgabe. Die Materialauswahl muss parallel zur Entwicklung der Idee, des Entwurfskonzeptes erfolgen. Architektonisch herausragende Projekte sind das Ergebnis solchen ganzheitlichen Denkens. Die Erfindung des Eisens und nachfolgend des Stahls führte zu einem vollständigen Wandel sowohl des Entwurfsprozesses als auch seines Ergebnisses. Die in Architektur und Ingenieurwesen in den vergangenen 250 Jahren erzielten Fortschritte trugen wesentlich zum heutigen Verständnis des Baustoffs Stahl und zu seiner Nutzung für den architektonischen Entwurf bei. Aus der historischen Entwicklung resultierende Veränderungen beeinflussen nach wie vor die Art und Weise, in der Architektur heute geplant und entworfen wird. Dies gilt insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, für das Bauen und Entwerfen mit Stahl.

ZUGBEANSPRUCHUNG

Vor dem Beginn des „Eisenzeitalters“ wurden Bauten auf Druckbeanspruchung bemessen. Dagegen zeigt Stahl aufgrund seiner Eigenschaften eine besonders hohe Leistungsfähigkeit unter Einwirkung von Zugkräften. Kein anderer häufig verwendeter Baustoff bietet auch nur annähernd diesen konstruktiven Vorteil. Vor den frühen Gebäuden aus Eisen gibt es keine nennenswerten konstruktiven oder architektonischen Beispiele für Entwürfe, die bewusst das Verhalten des Baustoffes unter Zugbelastung nutzten.



Die Bibliothèque Ste. Geneviève in Paris, entworfen von Henri Labrouste, zeigt die neue Leichtigkeit der Konstruktion, die durch die Einführung von industriell hergestelltem Gusseisen ermöglicht wurde. Labroustes Werk begründete eine neue Typologie, die heute als „konstruktiver Rationalismus“ bezeichnet wird. Hier wurde das Konzept der massenfertigten und nachfolgend zusammengefügt Architektur erstmalig angewandt.

INDUSTRIALISIERUNG UND MASSENFERTIGUNG

Eisen und Stahl sind sehr gut für industrielle Fertigungsprozesse und Massenproduktion geeignet. Diese Eigenschaften hatten schon immer wesentlichen Einfluss auf den Entwurf, die Vorfertigung und die Errichtung von Stahlbauten. Architekten müssen sich in größerem Maße als bei anderen Baustoffen mit der Feinplanung des Bauablaufs vertraut machen. Sie müssen ein Verständnis der Verfahren der Stahlfertigung und -montage entwickeln, um einen erfolgreichen und praxismgerechten Entwurf mit diesem Material zu ermöglichen.

NORMALER BAUSTAHL ODER FREILIEGENDE STAHLKONSTRUKTION

In Gebäuden kann Stahl in zwei verschiedenen Formen eingesetzt werden. Entweder erfüllt er eine rein konstruktive Aufgabe und ist nicht sichtbar, oder er dient als freiliegender Baustoff auch der architektonischen Gestaltung. Nicht sichtbarer Stahl ist mit der gebotenen Wirtschaftlichkeit so zu bemessen, dass er die angreifenden Lasten abtragen kann. Freiliegende Stahlkonstruktionen sind darüber hinaus so zu konzipieren, dass sie dem Gebäude eine dynamische, lebendige Ästhetik verleihen. Bei herkömmlichem Baustahl ist das Projektteam lediglich in begrenztem Umfang am Entwurf der Stahlkonstruktion beteiligt. Freiliegender Stahl mit gestalterischem Anspruch erfordert dagegen vom Architekten nicht nur ein Verständnis der konstruktiven Aspekte von Lastverläufen und Arten von Tragwerken, sondern auch ein hinreichendes Maß an Erfahrung im Entwurf fertigungstechnisch möglicher Anschlüsse. Der Architekt muss darüber hinaus den Gesamteinfluss der sich ergebenden Fertigungs- und Montageprozesse auf die Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Projekts berücksichtigen. Dies kann unter dem Begriff „Best Practices“ gefasst werden.

VOM VERFAHREN ZUR TECHNOLOGIE

Auf den raschen technologischen Fortschritt, zu dem es ab dem frühen 18. Jahrhundert kam, ist die wissenschaftliche Unterscheidung von konstruktiven und baustofftechnischen Neuerungen aus dem Geist der „Technologie“ gegenüber dem „Verfahren“ anwendbar. Technologie betreibt die wissenschaftliche Untersuchung eines Bereiches bzw. einer Fragestellung. Entsprechende Studien werden in größerem Maße erst seit Beginn der industriellen Revolution und dem damit verbundenen Aufkommen komplexer mathematischer, naturwissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Untersuchungen durchgeführt. Mit diesen Mitteln eröffnete die Wissenschaft ein Versuchsfeld für immer zuverlässigere Voraussagen. Technologie schafft eine größere Sicherheit beim Entwurf von Bauwerken nach präzisen Vorgaben sowie eine höhere Geschwindigkeit bei Dokumentation und Bauausführung. Auf der anderen Seite verhelfen Verfahren zu Wissen und Kenntnissen, die aus Versuch und Irrtum, also aus nichtwissenschaftlichen Experimenten gewonnen werden. Die Technologie baut jedoch auf dem Verfahren als Ausgangspunkt für Studien und Feld für Experimente auf.

An die Architekturgeschichte und ihren Zusammenhang mit der transformierenden Wirkung der Eisen- und Stahlbauweise sind vier wichtige Fragen zu stellen:

- Worin bestanden die dem Baustoff Stahl eigenen konstruktiven Vorteile, und auf welche Weise beeinflussten sie den architektonischen Entwurf?
- Wie kam es aufgrund der Stahlbauweise zu einem Wandel der physischen Formgebung und damit des Architekturstils?
- Auf welche Weise veränderte die Stahlbauweise unsere Bautätigkeit und damit auch die hinter ihr stehenden Entwurfsverfahren?
- Welche realisierten Projekte stellen gültige Referenzen dar, auf deren Grundlage die Formensprache des Stahlbaus weiterzuentwickeln ist?

Die Methodik der Stahlskelett-Elementbauweise und die Durchbildung von Anschlüssen, die in Bauwerken des konstruktiven Rationalismus des 19. Jahrhunderts und nachfolgend in der High-Tech-Architektur sichtbar ist, wird nach wie vor kontinuierlich weiterentwickelt und vervollkommen. Sie bildet einen der ästhetischen Orientierungspunkte freiliegender Stahlkonstruktionen. Das ihr zugrunde liegende, auf industriellen Verfahren beruhende Bausystem führt auch dazu, dass die Stahlbauweise im Vergleich zum Ortbeton wirtschaftlicher und kostengünstiger ist.



Stahl wurde als konstruktiver Baustoff zum Sinnbild der Technologie und der Moderne des 20. Jahrhunderts. Als neues Material für Tragkonstruktionen mit enormer Zugfestigkeit ermöglichte Stahl den Entwurf von leichter, geradezu „schwebender“ Architektur, die durch zusätzliche Massen vor dem sprichwörtlichen „Abheben“ bewahrt werden musste. Wenn es Stahl nicht gäbe, wären wir zurückgeworfen auf eine erdverbundene, auf Druckbeanspruchung abgestellte Formensprache. Es waren die hervorragenden Zugeigenschaften des Stahls, die die vorgängige Entwurfspraxis für Stahlbetonbauten dazu herausforderte, aus der reinen Bemessung auf Druck herauszutreten, und die zur Entwicklung der Zugbewehrung, der Vorspannung und einer konstruktiven Sprache voller Vorstellungskraft und Fantasie führten.

Eines der hervorstechenden Merkmale des Stahls ergibt sich unmittelbar aus seiner unvergleichlichen Zugfestigkeit: seine Eignung für die Planung auskragender Bauteile. Das von Morphosis Architects entworfene Studentenwohnheim (Graduate Residence) der University of Toronto in Ontario bedient sich dieser Eigenschaft des Stahls für die weit über die Straße ragende Namenstafel.

Bahnbrechende Innovationen in der jüngsten Geschichte des Stahlbaus haben die Schwerpunkte des Entwerfens und nachfolgend auch der Architekturtheorie verschoben. Die britische High-Tech-Bewegung konnte sich auf die Neuentwicklung von Stahlrohren stützen, deren Form die Struktur und das Erscheinungsbild dieser neuartig gestalteten, freiliegenden Stahlverbindungen veränderte. Aus dieser Bewegung entstand dann die zur architektonischen Gestaltung verwendete freiliegende Stahlkonstruktion in ihrer heutigen Ausprägung. Bei dieser Art der konstruktiven Formgebung ist der Architekt besonders gefordert, da er sich in zunehmendem Maße mit dem Entwurf, der Detaillierung und der Ausführung der Stahlkonstruktionen auseinandersetzen muss. Dies bezieht sich auf die ingenieurtechnische Seite solcher Formen, aber auch auf die aus ihrer Fertigung erwachsenden Versprechen und realen Gegebenheiten. Wenn Mies davon sprach, dass „Gott im Detail“ sei, so blickte er damit wohl schon über den strengen Formalismus der Stahlbauten der frühen Moderne hinaus auf die bunte Ausdrucksvielfalt von heute.

Bausysteme aus Eisen, Stahl und Glas sind durch ihre parallele Entwicklungsgeschichte eng miteinander verbunden. Frühe Typologien von Ausstellungsgebäuden, Einkaufspassagen und Galerien beruhten darauf, dass mit den neu entwickelten Eisen- und Stahlskelettsystemen in zunehmendem Maße Glas zur Nutzung des Tageslichts im Gebäude eingesetzt werden konnte. Die Entwicklung von punktgehaltenen Edelstahl-Anschlüssen, kabelverspannten Konstruktionen und selbsttragenden Verglasungssystemen für Projekte wie die von Peter Rice entworfenen Gewächshäuser der Cité des Sciences in La Villette oder das Willis Faber Dumas Building von Sir Norman Foster haben das Konzept und die Ausführung der „gläsernen Box“ der Moderne mit ihrer Abhängigkeit von herkömmlichen Vorhangfassadensystemen für immer verändert. Und in jüngster Zeit haben Stahlgitterkonstruktionen wie die von Massimiliano Fuksas konzipierte Messe in Mailand oder das Dach des Innenhofs des British Museum von Sir Norman Foster das Entwerfen mit Stahl aus der festgefügt Geometrie platonischer Körper befreit.



Der Führungsmonteur bei der Montage eines eng eingepassten Stahlbauteils des Diagonalgitters am vom Studio Libeskind entworfenen Erweiterungsbau des Royal Ontario Museum, Michael Lee-Chin Crystal, in Toronto, Ontario.



Entworfen von Santiago Calatrava, veranschaulicht Brookfield Place in Toronto, Ontario, das Potenzial anspruchsvoller freiliegender Stahlkonstruktionen.



Das von Helmut Jahn konzipierte Neue Kranzler-Eck in Berlin verdeutlicht die Dynamik, die durch die Verbindung von sichtbarem Stahl mit Glasfassaden entstehen kann.

Der Pritzker Pavilion in Chicago, Illinois, entworfen von Frank Gehry, verkörpert das expressive Potenzial und die baulichen Herausforderungen des Einsatzes gebogener Stahlkonstruktionen.



KAPITEL 2

DAS MATERIAL STAHL

KONSTRUKTIVE EIGENSCHAFTEN

WARMGEWALZTE STAHLPROFILE

STAHLHOHLPROFILE

WIDERSTANDSSCHWEISSEN

QUADRATPROFIL-FORMWALZEN MIT VERSCHWEISSUNG

*EINSPARPOTENZIALE BEI PLANUNG
UND AUSSCHREIBUNG VON STAHL*

*ENTWURFS- UND
MODELLIERUNGSSOFTWARE*

Stahl wird in vielen verschiedenen Formen hergestellt. Die Verfügbarkeit von Bauteilen unterscheidet sich je nach Land oder Region.



KONSTRUKTIVE EIGENSCHAFTEN

Jeder Baustoff zeigt ein für ihn typisches Verhalten. Dabei beruhte der technologische Fortschritt in der Architektur auf der Entdeckung der vorteilhaftesten Eigenschaften des jeweiligen Materials. Stahl weist aufgrund seiner Struktur eine besonders hohe Leistungsfähigkeit unter Einwirkung von Zugkräften auf. Kein anderer häufig verwendeter Baustoff bietet auch nur annähernd diesen konstruktiven Vorteil.

Vergleich der Bruchgrenzen:

Herkömmlicher Kohlenstoffstahl: 400 MPa

Hochfester Stahl: 760 MPa

Edelstahl: 860 MPa

Spannlitzen aus Stahl: 1.800 MPa

Schmiedeeisen: 234-372 MPa

Gusseisen mit 4,5 % Kohlenstoff: 200 MPa

Holz (Kiefer): 40 MPa

Marmor: 15 MPa

Für Beton wird eine nicht nennenswerte Zugfestigkeit angegeben.

Die Festigkeit von Stahl wird durch seine Bruchfestigkeit bestimmt. Diese stellt die Höchstspannung dar, die ein Baustoff unter Zug oder Dehnung aufnehmen kann, bevor es aufgrund einer erheblichen Kontraktion des Querschnitts des Probekörpers zur Einschnürung kommt. Die Zugfestigkeit hängt vom Kohlenstoffgehalt des Stahls sowie von eventuell enthaltenen Legierungen ab. Stahltragwerke werden überwiegend aus normalem Kohlenstoffstahl gefertigt. Dieser Stahl ist geeignet für Schweiß- und Schraubverbindungen und wird in vielen Fällen sowohl für nicht sichtbare Tragkonstruktionen als auch für freiliegende konstruktive Anwendungen eingesetzt. Hochfester Stahl wird meist für große Spannweiten verwendet, um das vom Tragglied aufzunehmende Eigengewicht und damit den Materialverbrauch zu reduzieren sowie die Gesamtabmessungen der konstruktiven Bauteile zu verkleinern. Edelstahl verfügt über eine höhere Festigkeit, ist aber aufgrund des Einsatzes von Legierungen teurer und erfordert während seiner Herstellung einen höheren technischen Aufwand. Daher wird er in der Regel nur dann eingesetzt, wenn der Stahl in hohem Maße Umwelteinwirkungen ausgesetzt ist.

Stahl kann entweder in einem integrierten Hüttenwerk im LD-Verfahren (Linz-Donawitz-Verfahren bzw. Sauerstoffblasverfahren) oder auf einer Kleinanlage mit Hilfe eines Lichtbogenofens hergestellt werden. Im Lichtbogenofen kann ein höherer Anteil an Stahlschrott verarbeitet werden (siehe Kapitel 14 „Stahl und Nachhaltigkeit“ mit weiteren Angaben). Bei beiden Verfahren wird im Prozess ein bestimmter Anteil Roheisen zugegeben. Auf beiden Anlagentypen können warmgewalzte Profile, Flach- und Rundstähle hergestellt werden.

Herkömmlicher Konstruktionsstahl ist als solcher nicht korrosionsbeständig. Er ist daher bei Anwendung unter hoher Feuchtigkeit oder in aggressiven Umgebungen auf geeignete Weise zu schützen. Edelstahl und wetterfester Stahl verfügen über modifizierte chemische Eigenschaften, so dass sie auf jeweils verschiedene Weise aufgrund ihrer Zusammensetzung gegen schädliche Korrosionseinwirkung beständig sind (siehe Kapitel 7 „Beschichtung, Oberflächenbehandlung und Brandschutz“ mit weiteren Angaben).

WARMGEWALZTE STAHLPROFILE

Im Warmwalzprozess werden Stahlprofile in einer Reihe von Formen hergestellt, die nach ihren Querschnittseigenschaften unterschieden werden können, beispielsweise nach Außenabmessungen, Steg- und Flanschdicken oder Gewicht je laufendem Meter. Je nach Nachfragesituation, Fertigungskapazität und Orientierung an britischen oder SI-Einheiten können sich die Abmessungen der weltweit von Stahlwerken angebotenen Erzeugnisse unter Umständen geringfügig unterscheiden. Der Transport der Stahlbauteile vom Stahlwerk zum Fertiger und nachfolgend auf die Baustelle beeinflusst wesentlich die Kosten des Produkts. Durch Importe besonders geformter Profile kann sich diese Situation noch ungünstiger gestalten; darüber hinaus kommt es im Projektablauf möglicherweise zu Verzögerungen. Der Transport wirkt sich des Weiteren auf die Einstufung des Bauwerks als mehr oder weniger nachhaltig aus, daher kommt es auch hier auf die Nähe zum Fertigungsbetrieb an.

Warmgewalzte Stahlprofile erhalten ihre Form auf Walzen. Bei der Fertigung von Stahlbauteilen ist darauf zu achten, dass die inneren „Ecken“ (Stöße von Steg und Flansch) ausgerundet sind.

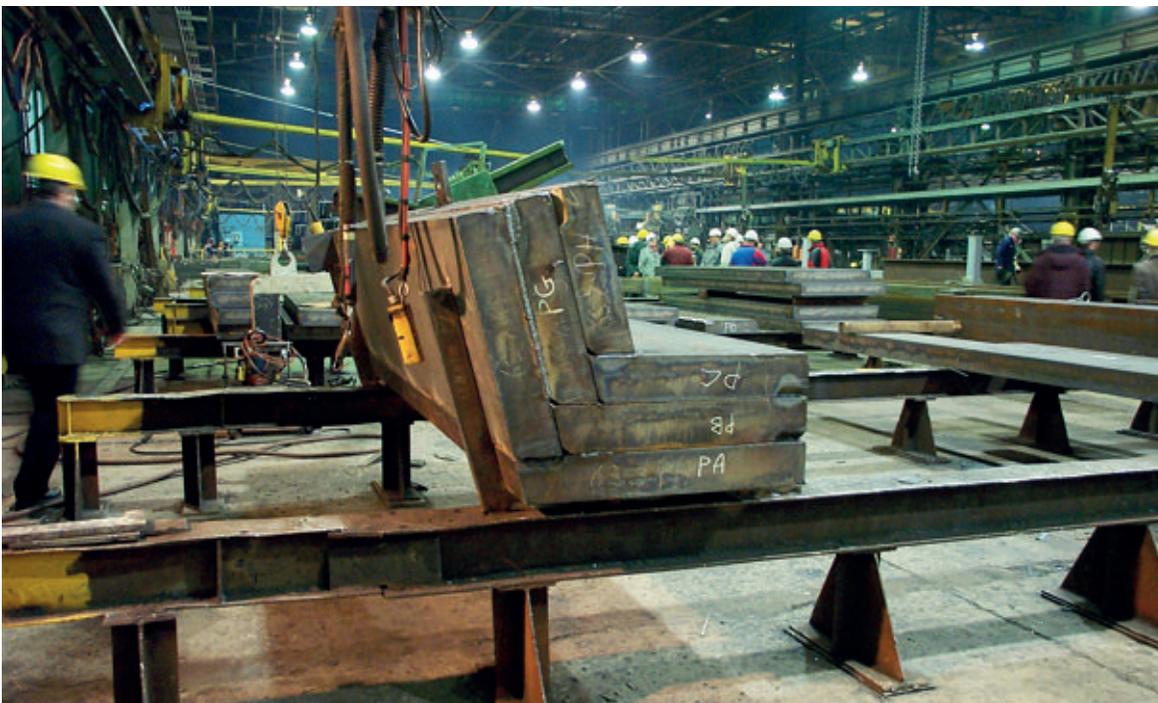
Bezeichnungen, Abmessungen und Verfügbarkeit warmgewalzter Stahlprofile unterscheiden sich weltweit. Daher wird dringend empfohlen, diese Angaben in der für das Bauvorhaben maßgeblichen Region zu prüfen.



Links: Die innenliegende Ecke und die Außenkanten der abgebildeten gleichschenkligen Winkelstähle weisen eine Ausrundung auf.

Rechts: Der Walzprozess zur Herstellung dieser Trägerprofile hat zu einer Abschrägung der Flansche geführt.

Wenn Abmessungen die Kapazitätsgrenzen des Walzwerks überschreiten, dann müssen diese Bauteile nachfolgend aus Stahlblechprofilen zusammengesetzt werden. In diesem Fall werden die größtmöglichen Profilmaße von den verfügbaren Blechdicken bestimmt. An den Anschlüssen der Bleche sind nach dem Schweißen durchlaufende Nähte sichtbar.



Dieses große Bauteil wird aus 150-mm-Stahlblechen verschiedener Dicke zusammengesetzt, um die gewünschten Abmessungen zu erreichen.

STAHLHOHLPROFILE

Seit dem Ende der 1970er Jahre haben Stahlhohlprofile das Erscheinungsbild und die Detaillierung von Stahlkonstruktionen entscheidend verändert. Dies gilt insbesondere für freiliegende Tragwerke. Die üblicherweise verwendeten Hohlprofile werden in quadratischen, rechteckigen oder kreisrunden Querschnitten hergestellt. Seit kurzem werden auch elliptische Elemente angeboten, wenngleich die Zahl der Abmessungen und der Werke mit entsprechender Fertigung begrenzt sind. Die Außenabmessungen unterscheiden sich je nach Kapazität des Stahlwerks. In der Regel müssen Profile mit einem Durchmesser von mehr als 400 mm einzeln bestellt werden. In manchen Fällen werden diese mit spiralförmig verlaufenden Schweißungen gefertigt. Dies ist vor Auftragserteilung zu prüfen, sofern solche Schweißnähte für das Projekt aus ästhetischer Sicht nicht akzeptabel sind.

Stahlhohlprofile sind von mechanischen Rohren zu unterscheiden. Hohlprofile werden üblicherweise durch Walzen/Umformen und Schweißen von Stahlblechen (mit durchlaufender Naht) hergestellt, während Rohre in einem Strangpressvorgang gefertigt werden und deshalb keine Nähte aufweisen. Mechanische Rohre bestehen aus anderen Stahlsorten, was zu veränderten konstruktiven und schweißtechnischen Eigenschaften führt. Darüber hinaus sind Rohre ausschließlich mit kreisrundem Querschnitt verfügbar und weisen eine Oberfläche auf, deren Merkmale von Kohlenstoffstahl abweichen, so dass die Kombination unterschiedlicher Materialien für freiliegende konstruktive Bauteile das Erscheinungsbild möglicherweise negativ beeinflusst, da die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit auch nach dem Aufbringen üblicher Farbanstriche sichtbar bleibt. Die Oberfläche von Rohren entspricht eher der Textur von Gusstahl. Sie werden daher häufig mit Gussteilen kombiniert (siehe Kapitel 10 „Gussteile“). Rohre können in erdbebengefährdeten Gebieten nicht eingesetzt werden.

Zur Herstellung von Hohlprofilen dienen drei Verfahren. Die beiden verbreitetsten Prozesse sind das Widerstandsschweißen und das Quadratprofil-Formwalzen mit Verschweißung.

WIDERSTANDSSCHWEISSEN

Hohlprofile werden aus Stahlblechen gefertigt, die auf großen Coils aufgerollt sind. Das Blech wird vom Coil abgewickelt und läuft über eine Reihe von Walzen, die es zu einem kreisrunden Querschnitt umformen. Diese Röhre wird dann auf einer entsprechenden Anlage mit einer durchlaufenden Schweißnaht am Stoß versehen. Die Randbereiche des Bandstahls werden durch Hochfrequenzinduktion oder Kontaktschweißung erwärmt und nachfolgend mittels Schweißrollen zusammengefügt, um so eine durchlaufende Längsschweißnaht zu erzeugen, ohne dass Füllmetall zugegeben werden muss. Nachdem sie durch Schweißung in eine kreisrunde Form gebracht wurden, werden die Röhren über weitere Rollen geleitet, die rechteckige oder quadratische Formen erzeugen. Diese Profile werden dann auf die erforderlichen Längen zugeschnitten. Die Breite des Stahlbleches bestimmt den größtmöglichen Umfang der Röhrenform. Vor der Aufnahme sehr großer Röhrendurchmesser in die Planung sollte daher das lokal verfügbare Größtmaß ermittelt werden.



Links: Zur Herstellung von Hohlprofilquerschnitten wird Stahlblech von der Rolle eingesetzt. Die Breite des Bleches bestimmt den Umfang der Röhre.

Rechts: Die runde Hauptform des Stahlhohlprofils wird vor Aufbringen der Schweißnaht durch eine Reihe von Rollen erzeugt.



Die hier abgebildeten rechteckigen Stahlhohlprofile verfügen über eine relativ dicke Wandung, so dass die Profillecken einen größeren Radius als bei der Verwendung dünnerer Bleche aufweisen. Die Schweißnaht ist auf der Profillinne-seite sichtbar, wobei ihre außermittige Lage anzumerken ist. Die Position der Schweißnaht ist veränderlich, weil das für die Herstellung der Bauteile verwendete Grundprofil kreisförmig ist, so dass eine einheitliche Ausrichtung der Naht beim Durchlaufen der Walzen nur schwer zu erreichen ist. Einige Hersteller sind jedoch in der Lage, die Schweißnaht durchgängig präziser anzuordnen.

QUADRATPROFIL-FORMWALZEN MIT VERSCHWEISSUNG

Dieses Verfahren wird ausschließlich für Bauteile mit quadratischem Querschnitt eingesetzt. Dabei geht man von einem langen Flachblech aus. In der Schweißanlage befinden sich Umformwerkzeuge, die in mehreren Schritten den Bandstahl bearbeiten und in der ersten Umformstation die oberen beiden Ecken der quadratischen bzw. rechteckigen Röhre ausbilden. An den folgenden Arbeitsstationen werden die unteren beiden Ecken des Profils hergestellt. Während der Formgebung des Bauteils bildet sich entlang der oberen Mittellinie des Profils die Naht. Sobald die Röhre annähernd ihre endgültige Form und Größe aufweist, wird diese Naht mittels Hochfrequenz-Kontaktschweißung verschlossen. Die verschweißte Röhre wird gekühlt und durchläuft nachfolgend eine Reihe von Bearbeitungsstationen, an denen sie ihre endgültigen Abmessungen erhält.

Da röhrenförmige Bauteile aus Stahlblech gefertigt werden, ist die Wandstärke auf allen Seiten identisch. Stahlhohlprofile werden in verschiedenen Gewichten mit entsprechenden Außenmaßen hergestellt, da diese durch die Einstellung der Profilierungswalzen gesteuert werden. Im Interesse eines einheitlichen Erscheinungsbildes kann die Bauteilgröße identisch gestaltet werden, wobei die Wanddicken je nach Tragfähigkeitsanforderungen variieren können.

Die Schweißnaht ist auf der Profilaußenseite teilweise nicht mehr sichtbar, findet sich jedoch weiterhin am Produkt. Beim Einbau solcher Profile in exponierter Lage kommt es darauf an, die Anordnung der Schweißnaht in den Planungsunterlagen festzulegen. Dabei ist es völlig legitim, eine einheitliche, möglichst nicht sichtbare Anordnung der Schweißnaht vorzugeben, um das Erscheinungsbild des endbehandelten Stahls zu verbessern.

Der Einsatz von Stahlhohlprofilen bietet gegenüber herkömmlichem Konstruktionsstahl zahlreiche Vorteile. Zwar sind Hohlprofile geringfügig teurer als konventionelle Stahlbauteile, jedoch ergeben sich andererseits Einsparungen aufgrund der verringerten Außenfläche, die endzubehalten ist. Trotz der Tatsache, dass Stahlhohlprofile in der Regel vorwiegend in exponierten Bereichen eingesetzt werden, lassen sich Materialkosten einsparen, wenn diese Bauteile als nicht ausgesteifte oder zweiachsig last-abtragende Stützen oder Träger ausgebildet werden.

Die Verwendung von Stahlhohlprofilen führt vor allem zu folgenden Vorteilen:

- ästhetisch ansprechendes Erscheinungsbild aufgrund der wahrgenommenen Leichtigkeit der Bauteile und der klaren, einfachen Profilierung
- im Vergleich zu herkömmlichen Stahlprofilen geringeres Gewicht des Stahls aufgrund der relativ hohen Effizienz des durch die Profile gebildeten Tragwerks
- hohe Stabilität gegenüber Torsionsbeanspruchung durch außermittig einwirkende Lasten
- aufgrund ihrer reduzierten Schlankheit in Knicksituationen effizientes Verhalten unter Druckbeanspruchung
- effizienter als herkömmliche Breitflanschträger, wenn das Bauteil auf seiner gesamten Länge frei beweglich sein muss
- bessere Tragwirkung bei kombinierter Biege- und Torsionsbeanspruchung; besonders vorteilhaft für in einer Ebene gebogene Bauteile.
- reduzierte Kosten der Beschichtung, sofern im Innenbereich keine Beschichtung aufgetragen werden muss (was bei Verzinkung der Fall wäre)

EINSPARPOTENZIALE BEI PLANUNG UND AUSSCHREIBUNG VON STAHL

Die Kosten des Stahls unterscheiden sich je nach Projekt erheblich und werden von zahlreichen Variablen beeinflusst. Da Stahl einen hohen Recyclinganteil enthalten kann und damit die Gewinnung und Aufbereitung von Roherz vermieden wird, lassen sich dadurch auch die Grundkosten senken. Wenn es aufgrund hoher Nachfrage zu einem lokalen Engpass an Stahlschrott kommt, kann dies aber wiederum die Kosten des Stahls erhöhen. Die mit der Herstellung von Profilen verbundenen Energiekosten wirken sich ebenfalls aus. In der Regel berechnen sich die Kosten von herkömmlichem Baustahl innerhalb eines Projekts in etwa nach der benötigten Tonnage, werden aber auch in gewissem Umfang von der Art des Profils beeinflusst. W-Profile, Winkel und U-Profile führen dabei üblicherweise zu geringeren Kosten als Hohlprofile, da bei letzteren die Fertigungskosten höher sind. Bei entsprechendem Entwurf ermöglichen Hohlprofile jedoch einen effizienteren Einsatz des Stahls, so dass die Gesamtkosten wegen der letztlich benötigten geringeren Tonnage dann sogar niedriger liegen können. Bei freiliegenden Stahlkonstruktionen machen die Fertigungskosten einen größeren Teil aus, da hier der Stahl als architektonisches Gestaltungselement dient. In solchen Projekten werden die Verbindungen zwischen den Bauteilen komplexer und unregelmäßiger ausgebildet, was zu einer Kostensteigerung zwischen 20 und 250 % im Vergleich zu Standardlösungen führt (siehe ausführlich Kapitel 6 „Freiliegende Konstruktionen“). Ein modularer Aufbau und die Serienfertigung wirken sich selbst bei komplexesten Entwürfen vorteilhaft aus, da für die Ausrichtung und Verschweißung in der Werkstatt Einspannvorrichtungen konstruiert werden können, die zu einem hohen Maß an Konsistenz führen.

Die Fertigung in der Werkstatt ist in der Regel kostengünstiger als entsprechende Tätigkeiten auf der Baustelle. In der Werkstatt herrschen kontrollierte Umgebungsbedingungen. Die Verfügbarkeit von Hallenkränen zum Anheben der Bauteile führt zur Effizienzsteigerung. Wichtig ist, zu Beginn die maximale Elementgröße zu definieren, die noch in der Werkstatt vorgefertigt werden kann. Diese richtet sich nach der Größe der Werkstatt, den Abmessungen der Türen bzw. Tore, der zulässigen Traglast des Krans, der Ladekapazität des LKWs sowie der lichten Durchfahrts Höhe unter Brücken auf der Strecke zwischen der Werkstatt und der Baustelle. Die Entfernung, über welche die Elemente transportiert werden müssen, wirkt sich unmittelbar auf die Lieferkosten aus.

Die Montagekosten werden von der Komplexität des Gebäudes und seiner Tragkonstruktion beeinflusst. Eine hohe Komplexität bedeutet in der Regel eine längere Montagedauer. Bei großen Baustellen mit mehreren Kranen zur Abstimmung der Hebevorgänge entstehen ebenfalls zusätzliche Kosten. In manchen Fällen kann der Kran zentral auf der Baustelle aufgestellt werden, und die Bauteile können so bemessen werden, dass sie von einem einzigen Kran angehoben werden können. Bauteile mit regelmäßigen Geometrien lassen sich schneller montieren, da die Hebepunkte auf einfachere Weise festgelegt werden können und sich die Bauteile problemlos zusammenfügen lassen. Gebäude mit diagonalen Fachwerkgerüsten oder außermittigen Geometrien erfordern zusätzliche Montagezeit. Dabei ist nicht ungewöhnlich, dass die Stahlbaumonteur mehrere Versuche unternehmen müssen, um unregelmäßig geformte oder nicht ausbalancierte Bauteile in ihre Einbaulage zu bringen.

Bei komplexeren oder spezialgefertigten Konstruktionen wie freiliegenden Tragsystemen, zugbeanspruchten Konstruktionen, diagonalen Fachwerkgerüsten, gebogenen Elementen sowie Verbundkonstruktionen mit Holz und Glas sollten zusätzliche Kosten für den besonderen Planungsaufwand, Werkstattzeichnungen, Modelle und mögliche Verzögerungen berücksichtigt werden.

Bei Standardprojekten machen die Materialkosten heute ca. 25 % der Kosten des montierten und beschichteten Stahls aus. Bei Projekten mit freiliegenden Stahlkonstruktionen kann der Anteil der Personal- und Planungskosten wesentlich höher liegen.

ENTWURFS- UND MODELLIERUNGS SOFTWARE

Durch die Umstellung auf Systeme des Building Information Modeling (BIM; Gebäudedatenmodellierung) ergeben sich Kosteneinsparungen bei der Ausführungsplanung einer breiten Palette von konstruktiven Stahlbauteilen. In Stahlbauprojekten jeden Komplexitätsgrades wird heute zumeist auf spezielle BIM-Software zur Detaillierung zurückgegriffen.

Im Modellierungsmodus umfasst diese Software folgende Funktionen:

- Ansicht der Tragwerksmodelle
- Erzeugung und Änderung von Rastern
- Modellierung von Bauteilen und Schraubverbindungen
- Erzeugung von Schweißnähten
- Hinzufügung von Lasten zu einem Modell
- Erzeugung von Baugruppen aus Stahlbauteilen
- Erzeugung von Ebenen der Montagehierarchie
- Erzeugung von detaillierten Stahlverbindungen
- Erzeugung von automatisch voreingestellten Anschlüssen an verschiedene Bauteile
- Erzeugung von Montagesequenzen
- Ansicht der Modelldaten in 4D (Ablaufsimulation)
- automatische Markierung und Nummerierung von Bauteilen

Im Ausgabemodus bietet die BIM-Software folgende Funktionen:

- Erzeugung allgemeiner Lagepläne (Grundriss, Schnitt, Montage usw.)
- Erzeugung von Zeichnungen für einzelne Bauteile und Baugruppen
- Drucken und Plotten von Zeichnungen und Berichten
- Erzeugung von Berichten (Montagelisten, Stücklisten usw.)

Die Software erleichtert die Zusammenarbeit im Projektteam durch folgende Optionen:

- gleichzeitige Arbeit mehrerer Nutzer am selben Modell
- Schnittstelle zu anderen Softwaretools und Gewerken
- Datenaustausch
- Datenexport und -import
- Schnittstelle für den Datenaustausch mit der Software zur Tragwerksplanung und Statik
- Import und Export graphischer 2D- und 3D-Daten

Die Integration dieser neuartigen Modellierungssoftware hat den Planungs- und Entwurfsprozess wesentlich vereinfacht und die Anlage einer breiten Palette von Projekten mit immer komplexeren Geometrien ermöglicht.

Ein typisches digitales Modell, das mit Hilfe einer speziellen BIM-Software zur Detailplanung von Stahlbauteilen erzeugt wurde. Es zeigt die Stahlgründung des von Foster + Partners und Zeidler Partnership entworfenen Bow Encana Tower in Calgary, Alberta. Die Farbmarkierung ermöglicht eine einfache Differenzierung zwischen den einzelnen Systemen und kann auch zur Kennzeichnung der Bauabläufe herangezogen werden.

