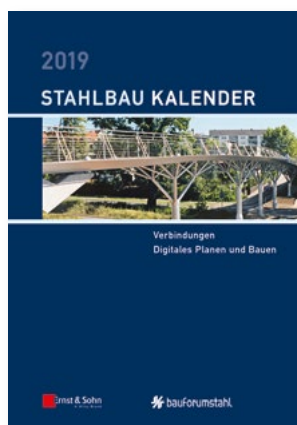


Stahlbau-Kalender 2019



Hrsg.: Ulrike Kuhlmann
Stahlbau-Kalender 2019
Verbindungen, Digitales
Planen und Bauen
April 2019. 792 Seiten
€ 149,-*
Fortsetzungspreis: € 129,-*
ISBN 978-3-433-03266-4
Auch als ebook erhältlich.



Verbindungen sind ein Innovationstreiber im Stahlbau – der Stahlbau-Kalender 2019 stellt anwendungsbereites Wissen mit Beispielen zur Verfügung. Was digitales Planen und Bauen konkret im Stahlbau und für die Werkstattfertigung bedeutet, wird in praxisbezogenen Beiträgen dargestellt.

- Stahlbaunormen – DIN EN 1993-1-8: Anschlüsse
- MVV TB, Normen und Zulassungen im Stahlbau
- Geschweißte Verbindungen aus höherfesten Stählen
- Besondere Verbindungstechniken
- Zugstäbe und ihre Anschlüsse
- Stahlgussknoten
- Setzbolzen und Metallschrauben
- Tragende Klebverbindungen
- Digital Planen und Bauen – BIM

Bestellschein

Bitte senden Sie mir:

___ St.	978-3-433-03266-4	Stahlbau-Kalender 2019 print	€ 149,-*
___ St.	978-3-433-60988-0	Stahlbau-Kalender 2019 ebook (PDF)	€ 133,99*
___ St.	978-3-433-03266-4	Stahlbau-Kalender 2019 im Fortsetzungsbezug*	€ 129,-*
___ St.	909046	Ernst & Sohn Gesamtverzeichnis	€ 0

**Senden Sie Ihren ausgefüllten
Bestellschein als E-Mail-Anhang
marketing@ernst-und-sohn.de
oder Fax +49 (0) 30 47031-240**

Liefer und Rechnungsanschrift ☐ privat ☐ geschäftlich

Firma / Name

Kundennummer

Ust.-ID Nr.

Straße / Hausnummer

Telefon

PLZ / Ort / Land

Fax

E-Mail-Adresse für Online-Registrierung

Ansprechpartner

Datum / Unterschrift

www.ernst-und-sohn.de/

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt. Die Versandkosten für Deutschland, Österreich, Schweiz, Liechtenstein und Luxemburg entfallen. Für alle anderen Länder gilt der Preis zzgl. Versandkosten.

Fortsetzungsbezug ist die Belieferung im Abonnement. Sie erhalten zukünftig erscheinende Kalender automatisch zum günstigen Fortsetzungspreis zugeschickt. Eine Kündigung des Abonnements kann bis zu drei Monate vor Erscheinen des neuen Kalenders erfolgen.

Widerruf: Dieser Auftrag kann innerhalb zwei Wochen beim Verlag Ernst & Sohn, Wiley-VCH, Boschstr. 12, D-69469 Weinheim, schriftlich widerrufen werden.

Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA
Kundenservice
Boschstraße 12
69469 Weinheim
Deutschland

Bei Fragen wenden Sie sich an:
■ +49(0)30 47031-236

Irrtum und Änderungen vorbehalten
Stand: 4/2019

Vorwort

Der diesjährige Stahlbau-Kalender hat zwei Schwerpunkte: das klassische Stahlbauthema der **Verbindungen**, das von den typischen Schraub- und Schweißverbindungen, über Verbindungstechniken in Regalstrukturen, Zugstäbe und ihre Anschlüsse bis hin zu Gussknoten, Setzbolzen und Klebverbindungen reicht, und das Thema **Digitales Planen und Bauen**, das unter dem Stichwort BIM bzw. Building Information Modeling in aller Munde ist, ohne dass eigentlich immer klar ist, wofür der Begriff steht.

Beides sind Zukunftsthemen für den Stahlbau, zu denen die Beiträge vertieftes Hintergrundwissen, Anwendungsregeln und Erklärungen geben.

Mit dem erneuten Abdruck der Grundnorm **DIN EN 1993-1-8: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Bemessung von Anschlüssen** mit Nationalem Anhang sowie ergänzenden, an den jeweiligen Stellen eingearbeiteten Kommentaren und Erläuterungen von Prof. Dr.-Ing. *Dieter Ungermann*, Technische Universität Dortmund, und Dipl.-Ing. *Stephan Schneider*, construct.ING – Büro für Bauwesen, wird dem Anwender eine verlässliche Basis für seine tägliche Arbeit gegeben. Als Konsequenz aus dem Urteil von 2014 des Europäischen Gerichtshof (EuGH) zum Verstoß der Bundesrepublik Deutschland gegen die Bauproduktenrichtlinie wurde die Musterbauordnung (MBO) durch Beschluss der Bauministerkonferenz von 2016 entsprechend novelliert. Die Regelungen der MusterListe der Technischen Baubestimmungen (MLTB), der Teile II und III der Liste der Technischen Baubestimmungen sowie der Bauregellisten wurden angepasst und umstrukturiert in die MusterVerwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) eingeordnet. Dies wird von Dr.-Ing. *Karsten Kathage* und Dipl.-Ing. *Christoph Ortman*, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, im Beitrag **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Normen und Zulassungen im Stahlbau** kurz dargestellt. In dieser Ausgabe des Stahlbau-Kalenders wird die aktuelle Version (Stand Oktober 2018) aus dem Blickwinkel des Stahlbaus erläutert. Zusätzlich werden die aktuellen Normen und Richtlinien für den Stahlbau aufgelistet und eine Zusammenstellung der für den Stahl- und Verbundbau relevanten Bescheide des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt (Stand: Oktober 2018) gegeben.

Zum Themenschwerpunkt **Verbindungen** gehen im Beitrag **Ausführung (nicht) standardisierter Verschraubungen im Stahlbau** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. *Natalie Stranghöner*, Dr.-Ing. *Dominik Jungbluth* und *Nariman Afzali*, M. Sc., Universität Duisburg-Essen, vor allem auf das Vorspannen von geschraubten Verbindungen ein. Hier ist unter maßgeblicher Mitwirkung der Hauptautorin in jüngster Zeit die DASt-Richtlinie 024 entstanden, die das Anziehen von sowohl nicht vorgespannten als auch vorgespannten geschraubten Verbindungen mit Durchmesser M12 bis M36 klärt. In der Praxis kommen aber auch immer nicht standardisierte

Verschraubungsfälle wie der Anzug über den Schraubenkopf, die Sacklochverbindung oder eine abweichende Schmierung vor. Handlungsanweisungen und Anziehparameter zum Vorspannen müssen in diesen Fällen mithilfe einer Verfahrensprüfung bestimmt werden. Schließlich werden ausführlich das Vorspannen von Schraubarnituren aus nichtrostendem Stahl bzw. gleitfeste Verbindungen aus nichtrostendem Stahl behandelt, zu denen es bisher für die Praxis keine konkreten Regeln und Hilfestellungen gibt. Hierzu werden jüngst aus Forschungsvorhaben gewonnene Erkenntnisse vorgestellt.

Im Beitrag **Geschweißte Verbindungen aus höherfesten Stählen** des Autorenteam Prof. Dr.-Ing. *Ulrike Kuhlmann*, Dr.-Ing. *Christina Schmidt-Rasche*, *Jennifer Spiegler*, M. Sc., Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. *Michael Volz*, Hochschule Offenburg, Prof. Dr.-Ing. *Hans-Peter Günther* Hochschule für Technik Stuttgart, und Dr.-Ing. *Jörg Hildebrand*, Technische Universität Ilmenau, wird für die zweite wichtige Verbindungsart im Stahlbau, das Schweißen, u. a. ein neues, speziell für Kehlnähte aus höherfestem Stahl angepasstes Bemessungsmodell erläutert, das die Berücksichtigung des Zusatzwerkstoffs erlaubt und im zukünftigen Eurocode zur Verfügung stehen wird. Nach einer kurzen Einführung zu hochfesten Stählen und dem Schweißen von hochfesten Stählen werden die gültigen und zukünftigen Bemessungsregeln von Schweißverbindungen eingeführt und anhand konkreter Beispiele dargestellt. Numerische Simulationen erlauben in die Verbindungen „hineinzuschauen“ und damit ein Verständnis für das Tragverhalten zu entwickeln. Verfahren und Ergebnisse solcher Simulationen werden ebenfalls vorgestellt. Im Regalbau werden vielfach Verbindungstechniken verwendet, die sich von den Schraubverbindungen des Stahlhochbaus unterscheiden. Die leicht zu montierenden, lösbaren und verformbaren Verbindungen der überwiegend kaltgeformten, dünnwandigen Profile können derzeit häufig nur durch eine versuchsgestützte Bemessung erfasst werden. Im Beitrag **Bemessung, Konstruktion und Verbindungstechnik von Regalstrukturen in Stahlbauweise** von apl. Prof. Dr.-Ing. habil. *Bettina Brune*, Univ. Prof. Dr.-Ing. *Dieter Ungermann*, Technische Universität Dortmund, und Dipl.-Ing. *Stephan Schneider*, construct.ING – Büro für Bauwesen, werden neben den aus der Lagertechnik herrührenden Besonderheiten von Regalen aus Stahl ihre Bemessung und Konstruktion erläutert. Es werden die relevanten Regeln der Grundnorm DIN EN 1993-1-3 für den Entwurf und die Bemessung von Stahlbauten mit kaltgeformten Bauteilen auch in Hinblick auf neue Entwicklungen im Zusammenhang mit der Entwicklung der zweiten Eurocode-Generation vorgestellt. Für die Bemessung der Paletten- und Fachbodenregalsysteme ist aber häufig ein versuchsgestütztes Vorgehen notwendig, das u. a. im Anhang A von DIN EN 15512 geregelt wird. Auch zu dieser Norm gibt es eine neue Fassung,

die angesprochen wird. In den letzten Jahren wurden national und international Forschungsprojekte mit dem Ziel geführt, die Bemessung von Regalbauteilen wie Stützen, Palettenträger etc. auf theoretischem Wege in einer Linie mit der DIN EN 1993-1-3 zu ermöglichen. Ergebnisse solcher Forschungen gerade zum Thema Schubsteifigkeit von Ständerrahmen werden vorgestellt. Zugstabsysteme werden bevorzugt in sichtbaren Stahl-Glas-Konstruktionen, wie Fassaden und Überdachungen sowie Dachtragwerken von Stadien, Hallenbauten und Fußgängerbrücken oder auch für Abhängungen, Unter und Hinterspannungen sowie Aussteifungsverbände eingesetzt. **Zugstäbe und ihre Anschlüsse**, für die im Beitrag von Dr.-Ing. *Karsten Kathage*, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, Dr.-Ing. *Daniel C. Ruff* und Prof. Dr.-Ing. *Thomas Ummenhofer*, Karlsruher Institut für Technologie, ein Überblick erarbeitet wurde, stehen zwischen Normung und Zulassungspraxis. Durch Versuche, aber auch FE-Berechnungen werden deutlich höhere Tragfähigkeiten erreicht als durch die konservativen Pauschalregeln der Normen. Europäische Technische Zulassungen bzw. heute Europäische Technische Bewertungen spiegeln diese günstigen Bedingungen wider. Die Hintergründe und Änderungen zu den bauaufsichtlichen Regelungen dieser Möglichkeiten werden erläutert.

Das Ziel des Beitrags **Stahlguss – ein unterschätzter Werkstoff** der Autoren *Sven Nagel*, M. Sc. und Prof. Dr.-Ing. *Thomas Ummenhofer*, Karlsruher Institut für Technologie, sowie Dr.-Ing. *Max Spannaus*, Ingenieurgesellschaft für Stahlbau und Schweißtechnik mbH, ist es, den Anwender in der Praxis über die Leistungsfähigkeit des Werkstoffs Guss zu informieren, Vorurteile wegen mangelnder Duktilität und Schweißeignung bzw. verdeckter Fehler abzubauen und Einblicke in die Bemessung, Ausführung, Qualitätssicherung sowie in den Ausschreibungsprozess zu geben. Die bisherigen Regeln wie im Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-8 sind auf sehr spezielle Anwendungen beschränkt und unvollständig bzw. nicht erfüllbar. Die Autoren planen, eine DAST-Richtlinie zu erarbeiten, deren Hintergründe auf aktuellen Forschungsvorhaben beruhen und in diesem Beitrag dargestellt werden.

Setzbolzen und Metallbauschrauben werden im Metallleichtbau als Verbindungsmittel seit vielen Jahren wirtschaftlich eingesetzt. Der Beitrag **Setzbolzen und Metallbauschrauben** des Autorenteams Dipl.-Ing. *Hermann Beck*, Dr.-Ing. *Michael Siemers*, Dipl.-Ing. SFI *Martin Reuter* und Dipl.-Ing. (FH) *Erwin Schöffendt*, Hilti Aktiengesellschaft, beschäftigt sich mit der Technologie, der Bemessung, verschiedenen Anwendungen des Stahl-, Fassaden- und Verbundbaus sowie den neueren Europäischen Technischen Bewertungen. Um Verständnis für die Direktbefestigung zu gewinnen, wird auf die Einflussparameter für die Versagensformen und die Anwendungsgrenzen eingegangen. Neuere Entwicklungen wie Gewindebolzen oder Erkenntnisse z. B. zum Einsatz höherfester Stähle und dem Einfluss der Beschichtung werden aufgezeigt.

Die Klebtechnik hat sich in den letzten Jahren in vielen Industriezweigen zu einem der zentralen Fügeverfahren entwickelt. In sicherheitsrelevanten, lastabtragenden Verbindungen des Stahl- und Fassadenbaus wird die Klebtechnik ohne zusätzliche mechanische Sicherung bisher nur selten eingesetzt. Vor diesem Hintergrund soll der Beitrag **Tragende Klebverbindungen im Stahl-, Glas- und Fassadenbau** von Prof. Dr.-Ing. *Christian Schuler*, Dipl.-Ing. (FH) *Martin Bues*, M. Eng., Dipl.-Ing. (FH) *Heinrich Ehard*, M. Eng., SFI, Hochschule München, sowie Dr.-Ing. *Matthias Albiez* und Prof. Dr.-Ing. *Thomas Ummenhofer*, Karlsruher Institut für Technologie, grundlegendes Wissen zum Fügeverfahren Kleben und dessen Anwendung vermitteln sowie einen Überblick über aktuelle Forschungsarbeiten und bereits realisierte Praxisprojekte geben. Dabei wird prinzipiell zwischen lastabtragenden Klebverbindungen bei Stahlbaukonstruktionen und Klebungen im Glas- und Fassadenbau unterschieden. Ergänzt werden die Ausführungen durch die Vorstellung relevanter normativer Dokumente sowie eine Einordnung bzw. Betrachtung geklebter Verbindung aus baurechtlicher Sicht.

Drei Beiträge gehören zum Themenschwerpunkt **Digitales Planen und Bauen**. In ihrem Beitrag **BIM-Überblick und die Anwendung von BIM im Stahlbau** geben Dipl.-Ing. MAS CAAD (ETH) Arch. *Jakob Przybylo*, DT Bau, Dipl.-Ing. MBA *Hinrich Münzner*, Boll und Partner, Dipl.-Ing. MAS ICT *Michael Raps*, Jade Hochschule Oldenburg, Dipl.-Ing. (FH) MAS CAAD (ETH) *Dominik Zausinger*, Imagine Computation GmbH, und Dipl.-Ing. *Milos Mikasinovic*, NUCE Consulting GmbH, zunächst eine allgemeine Einordnung von „Building Information Modeling“ als Arbeitsmethode, Software und Optimierungstool, um dann die Nutzung aus Stahlbausicht individuell zu adressieren. Neben Regeln und Normen werden auch die Begrifflichkeiten wie „Little BIM“, das fachbezogene Vorgehen, und BIG BIM, das mehrere Fachdisziplinen erfasst, beschrieben. Interessant sind die konkreten Projektbeispiele, die erläutert werden.

Die Stahlbaubranche arbeitet schon seit Jahrzehnten mit BIM-Methoden. Der Beitrag **Digitales Planen und Bauen – Stahlbaubetrieb** der Autoren Dr.-Ing. *Hans-Walter Haller*, Haller Industriebau GmbH, Dr.-Ing. *Michael Huhn*, Huhn EDV, gibt den bisherigen Stand des BIM-Einsatzes im Stahlbau wieder. So werden konkret die genutzten Datenformate und Modellierungskonzepte vorgestellt, die in einer Stahlbau-Firma anfallenden Arbeitsgänge sowie die der Planung, Fertigung und Montage zugrunde liegenden umfangreichen Informationsflüsse dargestellt und an zwei Beispielprojekten illustriert. Schließlich wird die künftige BIM-Bearbeitung im Allgemeinen skizziert und Anforderungen an die Beteiligten wie z. B. Planer, Fachplaner und Ausführende angegeben, damit die Stahlbau-Branche auch künftig in der BIM-Welt mitspielen kann.

Anhand des Beitrags **Robotik im Stahlbau 4.0, Von der digitalen Planung zu Produktion und Bau** von Univ.-Prof. Dr. techn. *Sigrid Brell-Cokcan*, Dr.-Ing. Dipl.-Inf.

Sven Stumm und Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Markus Feldmann*, RWTH Aachen, wird ein Ausblick in den Stahlbau der Zukunft gegeben. Themen wie „Haptische Programmierung“ oder „3-D-Druck im Stahlbau“ zeigen mögliche Zukunftsentwicklungen auf. In ganz neuer Weise sollen Daten aus Architektur- und Ingenieurmodellen in Arbeitsabläufe der Fertigung oder sogar der Montage auf der Baustelle integriert werden. Dabei werden die Chancen durch die Integration neuer robotergestützter Prozesse für eine individualisierte Bauproduktion hervorgehoben.

Zum Schluss möchte ich mich auch im Namen des Verlags Ernst & Sohn bei allen Autoren und den Mitarbeitern des Verlags bzw. im Institut ganz herzlich für ihre Leistung und ihren großen Einsatz bedanken. Hervor-

zuheben ist, dass durch die Umstellung des Druckverfahrens die Beiträge besonders frühzeitig fertiggestellt werden mussten bzw. auch ein besonderer Aufwand bei der Umsetzung entstanden ist. Durch diese Anstrengungen kann trotz aller Schwierigkeiten der Kalender wieder pünktlich erscheinen!

Am **Freitag, 19. Juli 2019** wird der diesjährige Stahlbau-Kalender-Tag in Stuttgart stattfinden, zu dem ich alle Interessierten herzlich einladen möchte. Dabei werden die Autoren dieser Ausgabe zu ihren Themen vortragen und für Diskussionen zur Verfügung stehen.

Stuttgart, Februar 2019

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Inhaltsübersicht

- 1 **Stahlbaunormen – DIN EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen** 1
Dieter Ungermann, Stephan Schneider
 - 2 **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB),
Normen und Bescheide im Stahlbau** 125
Karsten Kathage, Christoph Ortmann
 - 3 **Ausführung (nicht) standardisierter Verschraubungen im Stahlbau** 225
Natalie Stranghöner, Dominik Jungbluth, Nariman Afzali
 - 4 **Geschweißte Verbindungen höherfester Stähle** 265
Ulrike Kuhlmann, Jennifer Spiegler, Christina Schmidt-Rasche, Michael Volz, Hans-Peter Günther, Jörg Hildebrand
 - 5 **Bemessung, Konstruktion und Verbindungstechniken von Regalstrukturen in Stahlbauweise** 309
Bettina Brune, Stephan Schneider, Dieter Ungermann
 - 6 **Zugstäbe und ihre Anschlüsse** 401
Karsten Kathage, Daniel C. Ruff, Thomas Ummenhofer
 - 7 **Stahlguss – ein unterschätzter Werkstoff** 433
Sven Nagel, Max Spannaus, Thomas Ummenhofer
 - 8 **Setzbolzen und Metallbauschrauben** 481
Hermann Beck, Michael Siemers, Martin Reuter, Erwin Schöffendt
 - 9 **Tragende Klebverbindungen im Stahl-, Glas- und Fassadenbau** 587
Christian Schuler, Matthias Albiez, Martin Bues, Heinrich Ehard, Thomas Ummenhofer
 - 10 **BIM-Überblick und die Anwendung von BIM im Stahlbau** 643
Jakob Przybylo, Hinrich Münzner, Michael Raps, Dominik Zausinger, Milos Mikasinovic
 - 11 **Digitales Planen und Bauen – Stahlbaubetrieb** 677
Hans-Walter Haller, Michael Huhn
 - 12 **Robotik im Stahlbau 4.0 – Von der digitalen Planung zu Produktion und Bau** 733
Sven Stumm, Sigrid Brell-Cokcan, Markus Feldmann
- Stichwortverzeichnis** 779

4

Geschweißte Verbindungen höherfester Stähle

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Jennifer Spiegler, M.Sc.

Dr.-Ing. Christina Schmidt-Rasche

Prof. Dr.-Ing. Michael Volz

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Günther

Dr.-Ing. Jörg Hildebrand

Inhaltsverzeichnis

1	Schweißnahtverbindungen höherfester Stähle 267		
1.1	Allgemeines 267		
1.2	Methoden zur Steigerung der Festigkeit und Zähigkeit der niedriglegierten ferritisch-perlitischen Stähle 268		
1.3	Herstellung und Eigenschaften höherfester Stähle für den Stahlbau 271		
1.4	Schweißen höherfester Stähle im Stahlbau 271		
2	Bemessung von Schweißverbindungen nach derzeit gültiger Norm DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-12 274		
2.1	Aktuelle Regelungen 274		
2.2	Anforderungen an die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs 274		
2.3	Regelungen zur Schweißnahtlänge 275		
2.4	Anforderungen an die Schweißnahtdicke 275		
2.5	Bemessung von Kehlnahtverbindungen 275		
2.5.1	Allgemeines 275		
2.5.2	Erläuterung des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.2 276		
2.5.3	Erläuterung des vereinfachten Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.3 277		
2.6	Bemessung von Stumpfnähten 278		
2.6.1	Allgemeines 278		
2.6.2	Bemessung einer voll durchgeschweißten Stumpfnah nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.7.1 279		
2.6.3	Bemessung einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.7.2 279		
3	Angepasstes Bemessungsmodell für Kehl­nähte höherfester Stähle 280		
3.1	Problemstellung 280		
3.2	Überarbeitung der derzeit gültigen DIN EN 1993-1-8 280		
3.3	Ergebnisse der Untersuchungen an Kehl­nähten höherfester Stähle 281		
3.3.1	Allgemeines 281		
3.3.2	Ermittlung der Tragfähigkeit von Kehl­nähten gleicher Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe 281		
3.3.3	Einfluss aus Vermischung der Werkstoffe 281		
3.3.4	Anpassung der maximal ansetzbaren Schweißnahtlänge für höherfester Stähle 282		
3.4	Bemessungsmodelle für Kehl­nähte entsprechend prEN 1993-1-8 282		
3.4.1	Ermittlung angepasster Korrelationsbeiwerte β_w 282		
3.4.2	Angepasstes Bemessungsmodell für Kehl­nahtverbindungen nach <i>Rasche</i> 282		
4	Bemessungsbeispiele 284		
4.1	Kehl­nahtverbindungen 284		
4.1.1	Vorgehen 284		
4.1.2	Verbindung S690-S690-G69 285		
4.1.3	Verbindung S690-S690-G46 287		
4.1.4	Mischverbindung S355-S690-G46 288		
4.1.5	Vergleich der Bemessungsmodelle 289		
4.2	Stumpfnähte 290		
4.2.1	Vorgehen 290		
4.2.2	Bemessungsbeispiel einer durchgeschweißten Stumpfnah entsprechend DIN EN 1993-1-8 291		
4.2.3	Bemessungsbeispiel einer nicht durchgeschweißten Stumpfnah entsprechend DIN EN 1993-1-8 292		
4.2.4	Problemstellung von Stumpfnähten höherfester Stähle 294		
4.2.5	Forschungsbedarf für durchgeschweißte Stumpfnähte 294		
5	Numerische Schweißsimulation 295		
5.1	Allgemeines 295		
5.1.1	Grundsätzliche Zusammenhänge 295		
5.1.2	Thermische Analyse 296		
5.1.3	Gefügeumwandlung 298		
5.1.4	Mechanische Analyse 299		
5.2	Beispiel Kehl­nah 299		
5.3	Beispiel Stumpfnah 302		
6	Zusammenfassung und Ausblick 305		
7	Literatur 305		
7.1	Normen und Richtlinien 305		
7.2	Fachbücher und Publikationen 306		

1 Schweißnahtverbindungen höherfester Stähle

1.1 Allgemeines

Zunehmende architektonische Anforderungen nach immer schlankeren und filigraneren Konstruktionen mit größeren Spannweiten oder höheren Kräften führen konsequenterweise zum Einsatz von höherfesten Stählen. Höherfeste Stähle erlauben hohe Beanspruchungen in der Konstruktion aufzunehmen und führen zusätzlich zu einer Reduzierung der tragenden Querschnitte und damit zu einer Verringerung des Materialverbrauchs und der Herstellungskosten. Insgesamt erreicht man also eine Verbesserung der Ökobilanz, und das nicht nur wegen der hervorragenden Stoffeffizienz des Stahls, sondern auch wegen der Verringerung des Materialaufwands für die Unterbauten, vgl. [43] und [44].

In der Konkurrenzsituation gerade gegenüber dem Massivbau spielen neben ökologischen Argumenten heute immer noch ökonomische Aspekte die ausschlaggebende Rolle. Beispiele zeigen, z. B. in [45] für den Verbundbrückenbau, dass gerade bei einem Einsatz von Stahl der Güte S690 trotz höherer Materialpreise Kostenvorteile gegenüber der zurzeit üblichen Ausführung in S355 erzielt werden können. Beispielsweise führen geringe Blechdicken, wie sie bei höherfesten Stählen möglich sind, automatisch zu kleineren Schweißnahtvolumina, die bestimmend sind für die Kostenermittlung im Stahlbau. Weiterhin bestehen gerade im Hochhausbau große Vorteile der Stahlbauweise darin, durch einen hohen Grad an Vorfertigung und die besonders schnelle Bauweise ökonomischen Gewinn zu erzielen. Diese Vorteile werden allerdings durch Neuentwicklungen von hochfesten Betonfertigteilstützen, siehe am Beispiel Opernturm in Frankfurt [46], zum Teil überholt. Entsprechende effiziente Systemlösungen für Stahlkonstruktionen mit höherfesten Stählen sind also unabdingbar.

Maßgebend für den Einsatz höherfester Stähle sind neben Fragen der Stabilität und Ermüdung in erster Linie die Anschluss- und Verbindungsmöglichkeiten. Bei der Entwicklung von höherfesten Baustählen ist es in der jüngeren Vergangenheit gelungen, Baustähle mit hoher Streckgrenze und ausgezeichneter Zähigkeit bei niedrigen Temperaturen herzustellen, die auch eine außergewöhnlich gute Schweißbeignung besitzen. Dennoch beruhen die Bemessungsregeln für Verbindungen ausschließlich noch auf Konzepten, die für normalfeste Stähle entwickelt wurden. Das gilt insbesondere für Schweißverbindungen.

Im Hinblick auf die Dimensionierung von Kehlnahtverbindungen an höherfesten Stählen, die aufgrund einer kostengünstigen und schnellen Herstellung vermehrt zum Einsatz kommen, werden unter Ansatz der derzeit geltenden Bemessungsregeln oftmals Verbindungen mit großen Nahtdicken erforderlich. Um eine entsprechend dimensionierte Nahtdicke herstellen zu

können, erfordert es einen erhöhten Verbrauch des Schweißzusatzwerkstoffs und eine erhöhte Fertigungszeit. Infolgedessen entstehen für Schweißnahtverbindungen an höherfesten Stählen oftmals höhere Material- und Herstellungskosten, die somit zu einem unwirtschaftlichen Anschluss führen. Hier zeigen neue Entwicklungen Möglichkeiten auf, mit einer angepassten Wahl des Schweißzusatzwerkstoffs Vorteile zu erzielen. Ergebnisse dieser Entwicklungen finden ihren Eingang in die neuen Eurocode-Regeln und werden hier vorgestellt.

Für Anschlüsse zwischen höherfesten und normalfesten Stählen, sogenannte Mischverbindungen (Bild 1), erfordert die Weiterentwicklung ebenfalls angepasste, realitätsnahe Bemessungsregeln. Gerade im Bereich hoher Beanspruchungen werden vorzugsweise höherfeste Stähle eingesetzt, während in Bereichen mit geringeren Beanspruchungen normalfeste Stähle ausreichend sind. Zwar können die Stahlgüten entsprechend der Beanspruchung stoffeffizient gewählt werden, eine Dimensionierung des Anschlusses solcher Mischverbindungen führt jedoch unter Anwendung der derzeit geltenden Bemessungsregeln zu keiner wirtschaftlichen Lösung. Beachtet man für Mischverbindungen die nach der Normung geforderten Bedingungen an die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs, ist dieser entsprechend dem höherfesten Baustahl, wie beispielsweise einem S690, zu wählen. Die Bemessung der Tragfähigkeit des Anschlusses erfolgt jedoch für den geringeren Baustahl, beispielsweise einen S355. Somit ist die Bemessungstragfähigkeit einer geschweißten Kehlnahtverbindung zwischen zwei Baustählen der gleichen Festigkeit, wie beispielsweise S355 geschweißt mit einem passenden Schweißzusatzwerkstoff G46, genau gleich hoch wie die einer Kehlnaht zwischen einem Baustahl der Güte S355 und einem Baustahl der Güte S690 geschweißt mit einem Schweißzusatzwerkstoff G69. Der Einfluss der höheren Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs und des höherfesten Stahls auf die Bemessungstragfähigkeit können somit derzeit noch nicht genutzt werden. Auch diese Schwäche wird durch neue Forschungsergebnisse, die im Beitrag vorgestellt werden, behoben.

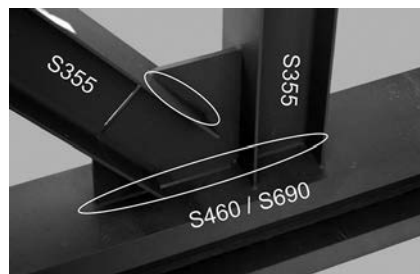


Bild 1. Beispiel eines Anschlusses aus normal- und höherfestem Stahl

Im Folgenden werden nach einer kurzen Einführung zu höherfesten Stählen und dem Schweißen von höherfesten Stählen die gültigen und zukünftigen Bemessungsregeln von Schweißverbindungen eingeführt und anhand konkreter Beispiele erläutert. Numerische Simulationen erlauben in die Verbindungen „hineinzuschauen“ und damit ein Verständnis für das Tragverhalten zu entwickeln. Verfahren und Ergebnisse solcher Simulationen werden im letzten Teil vorgestellt.

1.2 Methoden zur Steigerung der Festigkeit und Zähigkeit der niedriglegierten ferritisch-perlitischen Stähle

Reine Metalle sind in der Regel weich und verformbar, die Eisen-Kohlenstoff-Legierung Stahl hat bei einem Kohlenstoffanteil von $C = 0,15\%$ ein ferritisch-perlitisches Gefüge und ohne weitere festigkeitssteigernde Legierungselemente eine Zugfestigkeit von etwa 350 N/mm^2 und eine Streckgrenze von etwa 200 N/mm^2 . Der mit dem technischen Fortschritt in der Stahlherstellung einhergehende vermehrte Wunsch nach weitgespannten, transparenten Tragwerken erfordert Stähle mit größerer Festigkeit. Festigkeitssteigernde Maßnahmen sind meist mit einer Reduzierung der Zähigkeit verbunden, weshalb parallel zu den festigkeitssteigernden Maßnahmen auch Maßnahmen zur Steigerung der Zähigkeit getroffen werden müssen, umso mehr, da mit größerer Festigkeit aufgrund der damit steigenden Gefahr eines schlagartigen Versagens auch größere Zähigkeiten erforderlich sind. Da sowohl viele der festigkeits- als auch der zähigkeitssteigernden Maßnahmen durch eine nicht fachgerechte Wärmezufuhr während der Bearbeitung wieder reduziert oder ganz rückgängig gemacht werden können, sind für das

Schweißen der höher- (und hochfesten) Stähle neben den grundlegenden Qualitätssicherungsmaßnahmen einige zusätzliche Besonderheiten zu beachten.

Ab wann man von einem höher- oder hochfesten Stahl spricht, ist abhängig vom jeweiligen technischen Fortschritt in der Stahlherstellung. Bild 2 zeigt die Zunahme der Streckgrenzen der Stähle. Derzeit haben höherfesten Stähle eine Streckgrenze oder $0,2\%$ -Dehngrenze $R_{p0,2}$ größer als 355 N/mm^2 , z. B. S460N oder S690QL1. Die früher als hochfest bezeichneten Stahlsorten S355 sind heute zumindest im Stahlbrückenbau weitgehend zu einem Standardwerkstoff geworden. In diesem Beitrag bezieht sich die Definition „höherfest“ deshalb auf Stähle mit $R_{p0,2} > 355 \text{ N/mm}^2$.

Zur Festigkeitssteigerung der un- und niedriglegierten ferritisch-perlitischen Stähle, wie sie im Konstruktiven Ingenieurbau zur Anwendung kommen, stehen im Wesentlichen die folgenden Methoden zur Verfügung, die in [35] ausführlicher beschrieben sind:

Kohlenstoff C

Kohlenstoff scheidet sich bei Raumtemperatur in einer Mischphase (Perlit) als Fe_3C (Zementit) aus (Bild 3). Durch die große Härte des Zementits und damit auch des Perlits steigt die Festigkeit der Baustähle mit dem C-Gehalt sehr stark. $0,1\% \text{ C}$ erhöht die Festigkeit um etwa 100 N/mm^2 .

Vorsicht: Mit zunehmendem C-Gehalt und steigender Abkühlgeschwindigkeit scheidet sich der bei Temperaturen oberhalb von etwa 900°C im kubisch flächenzentrierten Gitter des Austenits noch vollständig gelöste Kohlenstoff nur noch in Teilen als Zementit aus, er bleibt dann in dem tetragonal verzerrten raumzentrierten Gitter gefangen (Martensit). Martensit ist hart und meist viel spröder als der ferritisch-perlitische

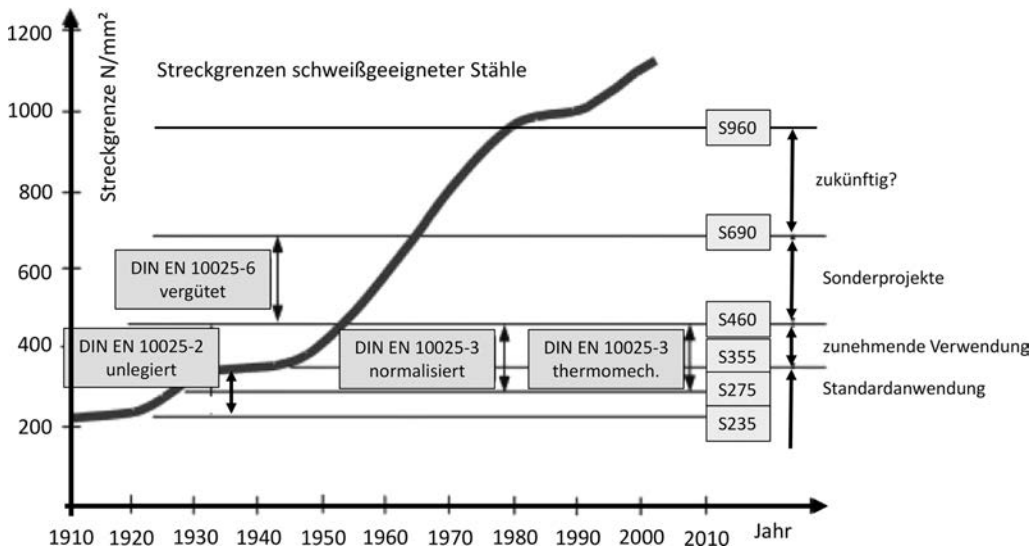


Bild 2. Entwicklung der durch Technische Lieferbedingungen gewährleisteten Streckgrenzen [35]

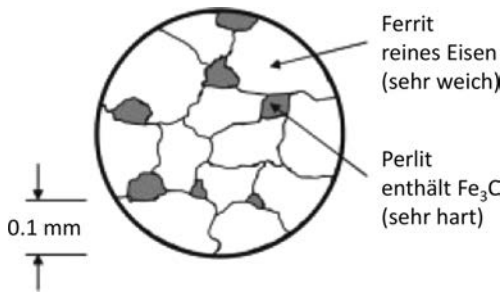


Bild 3. Ferritisch-perlitisches Stahlgefüge [35]

Grundwerkstoff. Stähle mit Kohlenstoffgehalten $C > 0,22\%$ bezeichnet man sogar oft als nicht schweißgeeignete Stähle, da ab etwa diesem C-Gehalt in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) bei normaler Abkühlung an Luft ohne besondere Vorkehrungen bereits sehr viel Martensit entsteht und damit verbunden das Gefüge zu hart und spröde werden kann. Über Kohlenstoffäquivalente, z. B. das CEV nach DIN EN 10025-3 [11], können weitere Elemente berücksichtigt werden, die die Härtenneigung eines Stahls und damit die Schweißneigung ungünstig beeinflussen.

$$\text{CEV} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} \quad (1)$$

mit

C	Kohlenstoff [%]
Mn	Mangan [%]
Cr	Chrom [%]
Mo	Molybdän [%]
V	Vanadium [%]
Ni	Nickel [%]
Cu	Kupfer [%]

Langsamere Abkühlgeschwindigkeiten führen dazu, dass sich mehr Kohlenstoff als Zementit ausscheiden kann und folglich weniger schädlicher Martensit entsteht. Langsamere Abkühlgeschwindigkeiten erreicht man durch eine möglichst große Wärmezufuhr während des Schweißens. Eine zu geringe Wärmezufuhr begünstigt folglich das Entstehen zu großer schädlicher Härtegefüge infolge Martensitbildung.

Legierungsbildung

Legierungselemente sind Fremdatome, die im kubisch raumzentrierten Basisgitter des Eisens zwischen den Eisenatomen oder anstelle der Eisenatome auf normalen Gitterplätzen gelöst sind (Bild 4). Die so entstehenden Einlagerungsmischkristalle (bei unlegiertem Stahl von untergeordneter Bedeutung) und Substitutionsmischkristalle verursachen festigkeitssteigernde Gitterverzerungen. Mangan (Mn) ist das bekannteste Element zur Festigkeitssteigerung. 1% Mn erhöht die Festigkeit um etwa 100 N/mm². Durch eine Wärmebeeinflussung, wie sie etwa beim Schweißen entsteht, verändern sich die

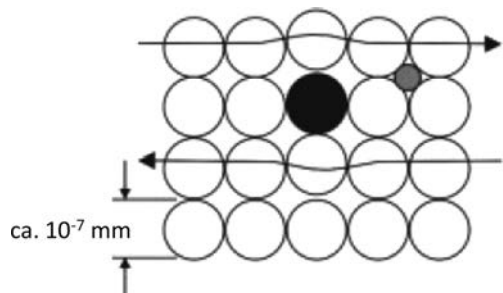


Bild 4. Gleitbehinderung durch Legierungselemente [35]

Eigenschaften der Substitutionsmischkristalle in der Regel nicht. Mangan wirkt sich auf die Schweißneigung zudem deutlich günstiger aus als Kohlenstoff.

Kornfeinung

An den Korngrenzen sind die Festigkeiten in der Regel größer als im Korn selbst, eine entsprechende Reinheit des Stahls vorausgesetzt. Dementsprechend sind Stähle mit vielen Korngrenzen höherfester als Stähle mit wenigen. Nach *Hall-Petch* ist die Steigerung der Festigkeit (Streckgrenze) etwa umgekehrt proportional zur Wurzel des Korndurchmessers. Interessanterweise steigt außer der Festigkeit auch die Zähigkeit mit feinerem Korn. Ein feines Korn verbessert somit Festigkeit und Zähigkeit und ist die einzige festigkeitssteigernde Methode mit dieser Eigenschaft. In Bild 5 sind zwei unterschiedliche Korngrößen dargestellt, im rechten ist das Korn halb so groß wie im linken.

Feinkornerzeugende Legierungs- (Aluminium (Al)) und Mikrolegierungselemente (Niob (Nb), Titan (Ti) oder Vanadium (V)) führen in Verbindung mit einem Normalisieren – Glühen im Austenitgebiet (oberhalb von etwa 900 °C = Normalglühen) mit anschließend langsamem Abkühlen an Luft (Bild 6) – zu einem feinen Korn. Das zeit- und energieaufwendige Normalglühen im Ofen kann heute oft durch ein temperaturgeführtes Walzen mit Endumformung im Bereich der Austenit-Ferrit-Umwandlungstemperatur (etwa 900 °C) ersetzt werden, das als normalisierendes Walzen bezeichnet wird (Bild 6). Das damit erzielte Gefüge ist dem normalgeglühten gleichwertig, sodass auch nach einem erneuten Normalglühen die Mindestwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften sichergestellt sind. Eine Weiterentwicklung des normalisierenden Walzens ist das thermomechanische Walzen (Bild 6). Beim thermomechanischen Walzen erfolgt die Endumformung bei tieferen Temperaturen (bis etwa 700 °C), wodurch aufgrund der durch die Ausscheidungen der Mikrolegierungselemente (insbesondere Nb) reduzierten Rekristallisationsneigung ein noch viel feinkörnigeres Gefüge entsteht. Das thermomechanisch erzeugte Gefüge lässt sich durch eine reine Wärmebehandlung nicht erzeugen und verliert durch Normalglühen sein feines Korn.

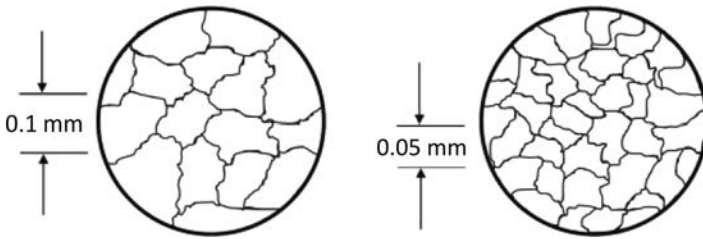


Bild 5. Darstellung unterschiedlicher Korngrößen [35]

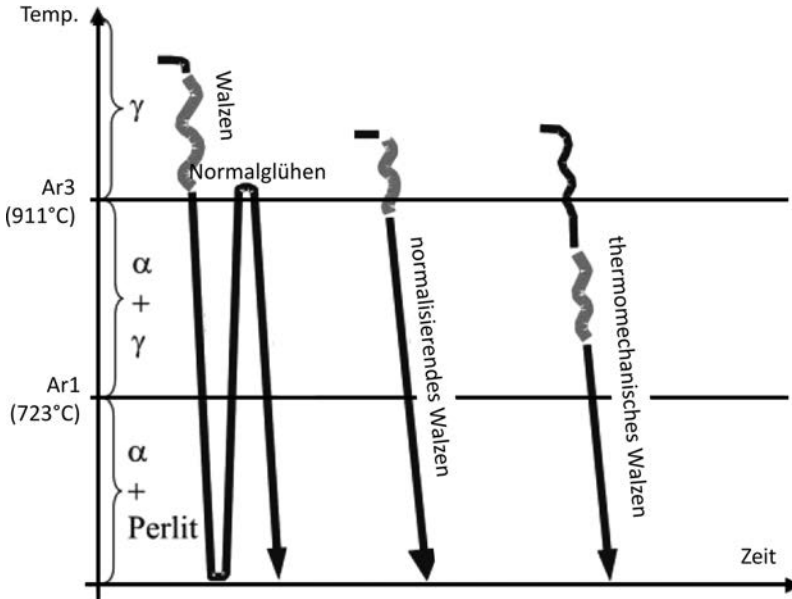


Bild 6. Schematische Darstellung temperaturgeführter Walzprozesse [35]

Bei einem zu großen Wärmeeintrag besteht die Gefahr, dass das feine Korn wieder aufgelöst wird und Grobkorn entsteht und in der Folge die Festigkeit und Zähigkeit aufgrund des feinen Korns verloren geht.

Ausscheidungen

Durch Zugabe von Mikrolegierungselementen (Nb, Ti, V) bilden sich feinst verteilte intermetallische Phasen (Carbide, (Carbo-)Nitride) im Werkstoffgefüge (Bild 7). Diese Teilchen steigern durch Behinderung der Gleitebenen die Festigkeit der Stähle, die Festigkeitssteigerung ist abhängig von Art, Größe und Verteilung der Ausscheidungen im Korn. Die Ausscheidungen behindern zudem Kornwachstum im Austenitgebiet und führen sowohl im Lieferzustand als auch nach dem Schweißen zu einem feinkörnigen Stahl.

Bei einem zu großen Wärmeeintrag besteht die Gefahr, dass die Ausscheidungen sich in Art, Größe und Verteilung verändern, was sich negativ auf die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften auswirken kann. Ebenso kann durch zu großen Wärmeeintrag das durch die

Mikrolegierungselemente erzielte feine Korn wieder aufgelöst werden. Bei zu geringem Wärmeeintrag besteht die Gefahr einer schnelleren Martensitbildung.

Vergüten (Härten + Anlassen)

Beim Vergüten wird das im Zusammenhang mit dem C-Gehalt beschriebene Aufhärten durch Zugabe von Kohlenstoff (und weiteren Härtebildnern) gezielt genutzt, um Festigkeiten zu steigern. Mit zunehmender Härte steigt die Festigkeit, die Zähigkeit fällt allerdings dramatisch ab. Mit einer nachträglichen Glühbehandlung (Anlassen) können Festigkeit und Zähigkeit dann gezielt eingestellt werden. Durch Vergüten kann in Verbindung mit den Feinkornbildnern (z. B. Al, Nb, V, Ti) ein feines Korn hergestellt werden.

Durch zu großen Wärmeeintrag kann das gezielt erzeugte Härtegefüge nachteilig verändert und auch das feine Korn aufgelöst werden. Bei zu geringem Wärmeeintrag kann weiterer Martensit entstehen, der sich negativ auf die Zähigkeit auswirken kann.

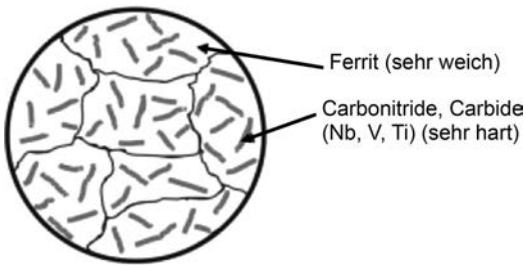


Bild 7. Ausscheidungen durch Mikrolegierungselemente [35]

1.3 Herstellung und Eigenschaften höherfester Stähle für den Stahlbau

Die für den Stahlbau verfügbaren höherfesten, schweißgeeigneten Stähle sind alles feinkörnige Stähle und unter der Rubrik der „Feinkornbaustähle“ genormt. Für Flach- und Langprodukte gelten die Normen DIN EN 10025-3 (normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle) [11], DIN EN 10025-4 (thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle) [12] und DIN EN 10025-6 (Vergütete Feinkornbaustähle) [13], für die Hohlprofile in DIN EN 10210-1/-2 (warmgefertigt) [15, 16] und DIN EN 10219-1/-2 (kaltgefertigt) [17, 18].

Normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-3 [11]

Diese Stähle werden durch Normalglühen mit anschließender Abkühlung an Luft oder normalisierendes Walzen (Walztemperaturen von etwa 900 °C) hergestellt, siehe Bild 6. Zur Erzielung der Festigkeit und Zähigkeit wird im Wesentlichen das feine Korn und der C-Gehalt genutzt. Die Stähle sind in den Stahlsorten S275 bis S460 in einer Grundgüte N (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 40 J bei –20 °C) und einer kaltzäh Güte NL (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 27 J bei –50 °C) verfügbar. Der C-Gehalt kann max. 0,20%, das Kohlenstoffäquivalent CEV max. 0,55 betragen (beim S460N).

Thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-4 [12]

Diese Stähle werden durch thermomechanisches Walzen hergestellt. Durch das extrem feine Korn verbunden mit dem Ausscheidungszustand im Ferrit, kann der C-Gehalt deutlich reduziert und die daran gekoppelte Schweißbeignung stark verbessert werden. Die Stähle sind in den Stahlsorten S275 bis S460 (nach dem Entwurf von 2018 bis S500) in einer Grundgüte M (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 40 J bei –20 °C) und einer kaltzäh Güte ML (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 27 J bei –50 °C) verfügbar. Die C-Gehalte können bis max. 0,16% für die Werkstoffe S460 (bei den Langprodukten bis 0,18%) betragen (CEV bis

max. 0,48), in der Praxis sind die Gehalte meist jedoch deutlich niedriger.

Vergütete Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-6 [13]

Diese Stähle werden durch Vergüten (Härten + Anlassen) hergestellt. Die Stähle sind in den Stahlsorten S460 bis S960 in einer Grundgüte Q (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 30 J bei –20 °C), einer kaltzäh Güte QL (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 30 J bei –40 °C) und einer besonders kaltzäh Güte QL1 (Nachweis einer Kerbschlagarbeit von 30 J bei –60 °C) verfügbar. Die C-Gehalte können bis max. 0,20% für alle Stähle betragen (CEV bis max. 0,85 bei S960).

Die höherfesten warm- und kaltgefertigten Hohlprofile nach DIN EN 10210 sind ebenfalls in den drei Lieferzuständen „normalgeglüht/normalisierend gewalzt“, „thermomechanisch gewalzt“ und „vergütet“ verfügbar.

1.4 Schweißen höherfester Stähle im Stahlbau

Schweißen ist im Sinne der DIN EN ISO 9000 [20] ein „spezieller Prozess“, „[...] bei dem die Konformität des dabei erzeugten Produktes (der Schweißverbindung) nicht ohne Weiteres oder nicht in wirtschaftlicher Weise verifiziert werden kann [...]“. Für ein fachgerechtes und qualitativ hinreichend sicheres Produkt sind deshalb Qualitätssicherungsmaßnahmen im Vorfeld erforderlich, die eine prozesssichere Herstellung garantieren. Für die schweißtechnische Ausführung im Konstruktiven Ingenieurbau gehören zu der im deutschen bauaufsichtlichen Bereich seit vielen Jahren bewährten Qualitätssicherung Anforderungen an den Hersteller, unter anderem hinsichtlich betrieblicher Einrichtungen, des Personals (Schweißaufsicht und Schweißer), der Werkstoffe, der Schweißzusätze und ggf. stichprobenartiger zerstörungsfreier Prüfungen. Bei Werkstoffen, die beim Schweißen eine definierte Wärmezufuhr benötigen, ist zusätzlich ein Nachweis der richtigen Wärmezufuhr in Form von vorherigen Probeschweißungen erforderlich. In [36] sind die grundlegenden Anforderungen an die Qualitätssicherung beim Schweißen beschrieben.

Alle Feinkornbaustähle und damit alle höherfesten und niedriglegierten Stähle des Stahlbaus haben gemeinsam, dass bei der Weiterverarbeitung die Wärmezufuhr gezielt gesteuert werden muss und weder zu groß noch zu klein sein darf. Insbesondere beim Herstellprozess „Schweißen“ muss darauf geachtet werden durch die richtigen Parameter, die vom Fachbetrieb aufgrund von Erfahrungen, Herstellerempfehlungen und Näherungsformeln (z. B. nach DIN EN 1011-2 [6]) sowie unter Beachtung der normativen Vorgaben der DIN EN 1090-2 [8] festzulegen sind. Die normativen Vorgaben der DIN EN 1090-2 [8] (für Stähle bis S700) sind nachfolgend beschrieben und im Kontext der oben genannten Eigenschaften der höherfesten Stähle zu betrachten. In Tabelle 1 sind diese Anforderungen zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 1. Anforderungen an Hersteller von geschweißten höherfesten Stahlbauten

Anforderung an den Schweißbetrieb	Umzusetzen durch
Eignungsnachweis zum Schweißen	WPK-Zertifikat nach EN 1090-1 [7] + Schweißzertifikat nach EN 1090-1/-2 [7, 8] (Baustelle)
Grundwerkstoffe	EN 10025-3/-4/-6 [11–13] (EN 10210-1 [15], EN 10219-1 [17]) mit APZ3.1 (14er-Analyse) und CE
Schweißzusätze	EN 1090-2 Tabelle 5 [8] mit WZ2.2 und CE nach EN ISO 13479 [19] und empfehlenswert DB-Zulassungszertifikat
Schweißaufsicht	Schweißfachingenieur IWE (in Sonderfällen IWT ausreichend)
Schweißer/Bediener	Prüfungsbescheinigungen nach DIN EN ISO 9606-1 [21] / DIN EN ISO 14732 [23]
Schweißanweisung WPS	DIN EN ISO 15609-1 [24]
Qualifizierung der WPS	Probeschweißungen nach DIN EN ISO 15613 [25] / DIN EN ISO 15614-1 [26]
Zerstörungsfreie Prüfungen	regelmäßig nach DIN EN 1090-2, Tab.24 [8], vorab vereinbarte projektbezogene Festlegung möglich
Routinemäßiges Aufbrechen	darf zur Reduzierung des Prüfumfanges benutzt werden

Schweißen nur von Fachbetrieben

Gemäß Hersteller- und Anwenderverordnung HAVO [27] mit Bezug auf §§ 16a Abs. 6 und 25 Abs. 1 MBO [28] müssen „für [...] die Ausführung von Schweißarbeiten zur Herstellung tragender Stahlbauteile auf der Baustelle [...] der Hersteller und der Anwender über Fachkräfte mit besonderer Sachkunde und Erfahrung sowie über besondere Vorrichtungen verfügen“. Diese besondere Sachkunde weist der Hersteller von geschweißten Bauteilen nach DIN EN 1090-2 [8] neben einer Zertifizierung seiner werkseigenen Produktionskontrolle WPK nach DIN EN 1090-1 [7] durch einen „Eignungsnachweis für die Ausführung von Schweißarbeiten in den entsprechenden Ausführungsklassen“ [29] nach. Solch ein Eignungsnachweis kann ein Schweißzertifikat nach DIN EN 1090-1 [7] durch die notifizierte Stelle sein, die das WPK-Zertifikat nach DIN EN 1090-1 [7] ausgestellt hat, oder auch ein Schweißzertifikat einer dafür bauaufsichtlich anerkannten Stelle. Für das Schweißen im Werk ist der Fachkundenachweis hinsichtlich des Schweißens mit dem WPK-Zertifikat nach DIN EN 1090-1 [7] erbracht. Bei den für die Zertifizierungen notwendigen Betriebsinspektionen vor Ort berücksichtigt der Auditor der notifizierten Stelle unter anderem auch die Bandbreite der Werkstoffe, die der Stahlbaubetrieb verarbeitet.

Personal

a) Schweißaufsicht (DIN EN ISO 14731 [22])
Zur Beaufsichtigung und Koordination von Schweißarbeiten an höherfesten Stählen benötigt der ausführende Betrieb Schweißaufsichtspersonal. Gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 14 [8] muss diese Schweißaufsicht umfassende technische Kenntnisse haben, wie sie ein Schweißfachingenieur (IWE) in seiner Ausbildung erlangt. In der Ausführungsklasse EXC2 reichen bei Dicken bis einschließlich 25 mm spezielle Kenntnisse

(entsprechend einem Schweißtechniker (IWS)) aus. Die umfassenden Kenntnisse eines Schweißfachingenieurs sind zum Beispiel notwendig, um die Zusammenhänge für die richtige Wärmeführung in den Schweißverfahren zu verstehen und in den Schweißverfahren zu berücksichtigen.

b) geprüfte Schweißer / Bediener (DIN EN ISO 9606-1 [21] / DIN EN ISO 14732 [23])
Schweißer müssen ihre Handfertigkeit in Probeschweißungen nach DIN EN ISO 9606-1 [21], Bediener von Schweißeinrichtungen ihre Fachkompetenz nach DIN EN ISO 14732 [23] nachweisen und nach der jeweiligen Norm durch Schweißerprüfungen oder Bedienerprüfungen qualifiziert werden.

Grundwerkstoffe

Für Produkte aus höherfesten Stählen sind Feinkornbaustähle nach DIN EN 10025-3,-4 oder -6 [11–13], bei Hohlprofilen nach DIN EN 10210-1 [15] oder 10219-1 [17] einzusetzen (DIN EN 1090-2, Tabelle 2 [8]). Die Produkte sind mit einem Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204 [14] mit CE-Kennzeichnung zu belegen. Das Zeugnis muss gemäß DIN EN 1090-2, Tabelle 1 [8] mindestens die Elemente für das CEV enthalten, das sind C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu, außerdem den Feinkornbildner Al und die weiteren Mikrolegierungselemente Nb und Ti. Für die Stahlgütevahl sind DIN EN 1993-1-10 [9] und DIN EN 1993-1-1/NA [10] zu beachten.

Schweißzusätze

Die richtige Produktnorm für die Schweißzusätze kann DIN EN 1090-2, Tabelle 5 [8] entnommen werden. Sie müssen auf das jeweilige Produkt abgestimmt und mit einem Werkszeugnis 2.2 nach DIN EN 10204 [14] sowie einem CE-Zeichen nach DIN EN ISO 13479 [19] belegt sein. Sinnvoll ist zudem, sofern verfügbar, eine Zertifi-

zierung des Schweißzusatzes nach Verfahrensanweisung VA918490 [30] der DB (siehe hierzu www.en15085.net). Aus diesen DB-Zertifikaten kann der zugelassene Anwendungsbereich des Zusatzes direkt abgelesen werden. In Deutschland sind derzeit nach den nationalen Anhängen zu DIN EN 1993-1-8 [2] und DIN EN 1993-1-12 [3] nur Schweißzusätze mit mindestens gleichen Festigkeitseigenschaften wie der Grundwerkstoff zulässig (s. Abschnitt 2.2).

Schweißen nach qualifizierter Schweißanweisung (DIN EN ISO 15609-1 [24]) mit Probeschweißungen (DIN EN ISO 15614-1 [26], DIN EN ISO 15613 [25])

Zur Sicherstellung reproduzierbarer Ergebnisse sind alle Schweißarbeiten nach qualifizierten Schweißanweisungen (WPS) auszuführen, in denen alle wesentlichen Schweißparameter enthalten sind. Als Qualifizierungsmethoden der Schweißanweisungen, also als Nachweis, dass die gewählten Schweißparameter auch aus metallurgischer Sicht korrekt sind und nicht zu unzulässigen Veränderungen der mechanisch-technologischen Eigenschaften führen, kommt für die hochfesten Feinkornbaustähle nur die Methode der vorherigen Probeschweißung infrage, die anschließend in aussagekräftigen zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen untersucht werden. Die Probeschweißungen können Schweißverfahrensprüfungen nach DIN EN ISO 15614-1 [26] oder projektbezogene vorgezogene Arbeitsprüfungen nach DIN EN ISO 15613 [25] sein. Beide müssen die reale Situation am Bauwerk hinreichend treffend beschreiben. DIN EN ISO 15614-1 [26] gibt zudem die Anwendungsbereiche vor, für die eine Probeschweißung zum Beispiel hinsichtlich der Werk-

stoffe, der Dicken, der eingesetzten Schweißzusätze, der Schweißpositionen usw. gilt.

Für die Schweißverfahrensprüfung werden an Stumpfnähten die zerstörenden Prüfungen nach Tabelle 2 durchgeführt. Für Kehlnähte sind in der Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614-1 [26] nur der Makroschliff und die Härteprüfung an einem T-Prüfstück gefordert, weshalb in Deutschland im bauaufsichtlichen Bereich zusätzlich die DVS-Richtlinie 1702 [31] anzuwenden war. Auch nach DIN EN 1090-2 [8] sind ergänzende Prüfungen an einem Kreuzprüfstück erforderlich, an dem man Zugversuche durchführen kann, siehe DIN EN 1090-2, Abs. 7.4.1.2 [8]. Zusätzlich zu den zerstörenden Prüfungen werden die Probestücke auch in einer Sichtprüfung und ergänzenden zerstörungsfreien Prüfung (UT/RT bzw. MT/PT) bewertet. Will man die Verfahrensprüfung auch als Schweißerprüfung verwenden, sollten zudem Bereiche der Probestücke aufgebrochen werden, um die inneren Bereiche genauer auf Handfertigkeit prüfen zu können.

Stichprobenkontrollen mit zerstörungsfreier Prüfung

Während seiner Fertigung muss der Schweißbetrieb regelmäßig über zerstörungsfreie Prüfungen nachweisen, dass die zuvor genannten Qualitätssicherungsmaßnahmen greifen und die Schweißnähte frei von inneren und äußeren Fehlern sind. Der Umfang der zerstörungsfreien Prüfungen ist in DIN EN 1090-2, Tabelle 24 [8] in Abhängigkeit der Ausführungsklasse angegeben. Da bei Kehlnähten UT- oder RT-Prüfungen verfahrensbedingt fast nie infrage kommen und MT- oder PT-Prüfungen oft nur eingeschränkt sinnvoll sind (die Wurzel der Kehlnaht ist nicht prüfbar), dürfen die routine-

Tabelle 2. Nach DIN EN ISO 15614-1 [26] durchzuführende zerstörende Prüfungen an Stumpfnähten

Prüfungen	Ziel der Prüfung	Mögliche Fehlerursachen
Makroschliff	Sicherstellen der inneren Fehlerfreiheit der Naht (Einbrand, Bindefehler, Poren usw.)	Falsche Schweißparameter, fehlende Handfertigkeit, schlechte Zugänglichkeit
Härteprüfung	Nachweis gegen zu große Aufhärtung infolge Martensitbildung	Falsche Schweißparameter mit zu geringem Wärmeeintrag
Querbiegeproben	Nachweis ausreichender Zähigkeit	Falsche Schweißparameter mit zu geringem Wärmeeintrag (Martensit) oder zu großem Wärmeeintrag (Grobkorn)
Kerbschlagbiegeproben	Nachweis ausreichender Zähigkeit	Falsche Schweißparameter mit zu geringem Wärmeeintrag (Martensit) oder zu großem Wärmeeintrag (Grobkorn)
Querzugproben	Nachweis ausreichender Festigkeit	Falsche Schweißparameter mit zu großem Wärmeeintrag (Grobkorn)
Optional Aufbrechen der Naht	Sicherstellen der inneren Fehlerfreiheit der Naht (Einbrand, Bindefehler, Poren usw.)	Falsche Schweißparameter, fehlende Handfertigkeit, schlechte Zugänglichkeit

mäßigen ergänzenden zerstörungsfreien Prüfungen von Kehlnähten durch regelmäßiges, einfaches Aufbrechen von geschweißten T-Stücken reduziert oder ganz ersetzt werden. Spätestens alle drei Monate sollte von jedem Schweißer ein T-Prüfstück gebrochen und durch die Schweißaufsicht des Betriebes beurteilt werden.

Zusätzlich zu beachten

Höherfeste Stähle sind unter anderem aufgrund ihrer großen Festigkeiten und der oft größeren Härten in der WEZ anfälliger gegen Wasserstoffversprödung. Bei der Wasserstoffversprödung reagiert atomar im Werkstoff gebundener, diffundierender Wasserstoff H zu molekularem Wasserstoff H₂. Diese Reaktion ist verbunden mit einer Volumenzunahme, die im Werkstoff wiederum zu einem so großen Druck führt, dass ein schlagartiger Bruch ausgelöst werden kann. Dieser tritt in der Regel unter der Naht in der Wärmeeinflusszone – dort in der Härtezone – auf. Da die Wasserstoffdiffusion im Werkstoff Zeit benötigt, kann auch nach einem oder zwei Tagen noch ein Riss auftreten (verzögerte Rissbildung). DIN EN 1090-2, Tabelle 23 [8] gibt deshalb Mindestzeiten vor, die nach dem Schweißen abgewartet werden müssen, bevor eine zerstörungsfreie Prüfung durchgeführt werden darf. Für die Vermeidung wasserstoffinduzierter Risse sind einige grundsätzliche Verarbeitungsregeln einzuhalten:

- Wahl geeigneter, sehr zäher und nicht hygroskopischer Schweißzusätze mit einem diffusiblen Wasserstoffgehalt von nicht mehr als 5 ml/100 g,
- basisch umhüllte Stabelektroden müssen immer rückgetrocknet werden, viele andere sind aufgrund fehlender Zähigkeiten oder zu großer Wasserstoffgehalte gar nicht zulässig,
- Vermeiden von sonstigem atomarem Wasserstoffzutritt (z. B. durch Überschweißen von verunreinigten Nahtflanken, Rostansätzen, defekten Schlauchpaketen usw.).

Bei Beachtung der Eigenschaften der höherfesten Stähle bei der schweißtechnischen Fertigung können deren hervorragenden Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften auch im geschweißten Zustand vollständig ausgenutzt werden. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Bemessung der Schweißverbindungen eingegangen, die von einer fachgerechten Fertigung ausgeht.

2 Bemessung von Schweißverbindungen nach derzeit gültiger Norm DIN EN 1993-1-8 und DIN EN 1993-1-12 [1–4]

2.1 Aktuelle Regelungen

Eine Bemessung von Schweißnahtverbindungen ist derzeit entsprechend den gültigen Regelungen nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4 [1] durchzuführen. Die hier

festgelegten Bestimmungen „*beziehen sich auf schweißbare Baustähle, die den Anforderungen nach EN 1993-1-1 [5] entsprechen und Erzeugnisdicken von 4 mm oder mehr aufweisen. Weiterhin beschränkt sich die Gültigkeit auf Anschlüsse, in denen das Schweißgut mit dem Grundwerkstoff hinsichtlich der mechanischen Kenngrößen verträglich ist*“ [1]. Für die Dimensionierung von Schweißnahtverbindungen an höherfesten Stählen, die eine Streckgrenze $f_y > 460 \text{ N/mm}^2$ aufweisen, sind die „*zusätzlichen Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700*“ nach DIN EN 1993-1-12 [3] zu berücksichtigen.

Zusätzlich sind in Deutschland die Regeln der jeweilig zugehörigen Nationalen Anhänge DIN EN 1993-1-8/NA [2] und DIN EN 1993-1-12/NA [4] zu verwenden. Im Folgenden werden die einzelnen Einflussfaktoren sowie die aktuell gültigen Bemessungskonzepte für Schweißverbindungen vorgestellt und erläutert. Die Weiterentwicklungen der Bemessungskonzepte für höherfeste Stähle werden anschließend in Abschnitt 3 erörtert.

2.2 Anforderungen an die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs

Die Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs geht in die Bemessung nicht explizit ein. Indirekt wird jedoch die vom Grundwerkstoff abweichende Nahtfestigkeit in der Bemessung mithilfe des Beiwertes β_w berücksichtigt, vgl. Abschnitt 2.5. Bei der Auswahl des Schweißzusatzwerkstoffs sind nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.2(2) [1] gewissen Anforderungen einzuhalten. Vor allem ist darauf zu achten, dass „*die für das Schweißgut spezifizierten Werte der Streckgrenze, Bruchfestigkeit, Bruchdehnung und Mindestkerbschlagarbeit [...] in der Regel mindestens den spezifizierten Werten für den verschweißten Grundwerkstoff entsprechen*“ [1]. Zusätzlich wird angemerkt, dass eine „*Wahl von Elektroden mit höherer Güte als die für die verwendeten Stahlsorten auf der sicheren Seite*“ liegt [1]. Für die Fertigung einer Schweißnahtverbindung von normalfesten Stählen ist die Einhaltung der Norm einfach zu realisieren, da nahezu jeder Schweißzusatzwerkstoff dieser Anforderung entspricht. Für höherfeste Stähle liegen die Festigkeitswerte des Schweißzusatzwerkstoffs jedoch meist gerade im Bereich der Festigkeit des zu verschweißenden Grundwerkstoffs (Matching-Verbindung) und weisen somit keine Überfestigkeit (Overmatching-Verbindung) auf.

Berücksichtigt man die für höherfeste Stähle festgelegten Regelungen nach DIN EN 1993-1-12 [3] darf „*bei Stahlsorten über S460 bis S700 [...] die Festigkeit des Schweißgutes geringer als die des verschweißten Grundwerkstoffes sein*“. Es ist jedoch hier auf die Anmerkung zu achten, dass „*der Nationale Anhang [...] Einschränkungen in Bezug auf die Verwendung von Elektroden mit geringerer Güte festlegen*“ darf [3]. Der Nationale Anhang zu DIN EN 1993-1-12 [4] gibt hierzu an, dass „*nur Schweißzusatzwerkstoffe mit einer Festigkeit, die gleich*

oder größer ist als die Festigkeit des Grundwerkstoffs, verwendet werden“ dürfen.

Zusammenfassend lässt sich zu den in Deutschland derzeit gültigen Bemessungsregeln hinsichtlich der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs sagen, dass nur geschweißte Verbindungen unter Verwendung eines Schweißzusatzwerkstoffs gleicher oder höherer Festigkeit zulässig sind.

2.3 Regelungen zur Schweißnahtlänge

Unter dem Begriff wirksame Länge l_{eff} versteht man nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.1(1) [1] die für die Bemessung anzusetzende „Gesamtlänge mit voller Nahtdicke“ einer Schweißnaht. Wird die Naht nicht bis zum Ende voll ausgeführt, ist die Nahtlänge mit dem Faktor $2 \cdot a$ abzumindern. Dabei beschreibt a die Nahtdicke der abzumindernden Naht.

Schweißnähte, die eine wirksame Länge von $l_{\text{eff}} \leq 30 \text{ mm}$ oder $l_{\text{eff}} \leq 6 \cdot a$ aufweisen, dürfen entsprechend DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.1(2) [1] nicht zum Übertragen von Kräften angesetzt werden. Dies beruht auf den bei der Schweißung entstehenden Nahtanfangs- und Nahtendbereichen, die unterhalb der angegebenen Mindestlänge einen zu geringen Abstand zueinander aufweisen und dadurch die Einleitung der Kräfte in die Naht negativ beeinflussen [48].

Betrachtet man die Spannungsverteilung von Schweißnähten, die auf Abscheren beansprucht werden, treten in der Realität an den Nahtenden Spannungsspitzen auf, was zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung führt. Für die Bemessung wird hier jedoch vereinfacht davon ausgegangen, dass eine über die gesamte Nahtlänge gleichmäßig verteilte Spannung vorliegt. Die Differenz zwischen der tatsächlichen und angenommenen Spannungsverteilung kann bis zu einer Länge von $l_{\text{eff}} = 150 \cdot a$ bei entsprechender Duktilität vernachlässigt werden. Bei längsbeanspruchten Schweißnähten normalfester Stähle mit einer Nahtlänge von $l_{\text{eff}} > 150 \cdot a$ ist deshalb die Schweißnahtlänge über einen Beiwert $\beta_{\text{Lw},1}$ abzumindern. Nach DIN EN 1993-1-12 [3] ist für längsbeanspruchte Schweißnähte an höherfesten Stählen einer Güte von S460 bis S700 bereits ab einer Nahtlänge von $l_{\text{eff}} > 50 \cdot a$ eine Abminderung durch den Beiwert $\beta_{\text{Lw},1}$ vorzunehmen. Der Beiwert ermittelt sich dabei folgendermaßen:

$$\beta_{\text{Lw},1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150 \cdot a} \leq 1,0 \quad (2)$$

mit

L_j Gesamtlänge der Überlappung in Richtung der Kraftübertragung

a Schweißnahtdicke

2.4 Anforderungen an die Schweißnahtdicke

Nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.2 [1] ist „die wirksame Nahtdicke a einer Kehlnaht [...] in der Regel als die bis zum theoretischen Wurzelpunkt gemessene

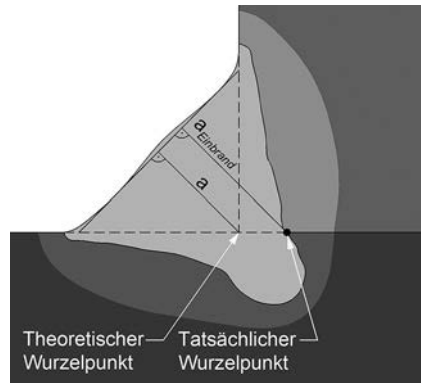


Bild 8. Bestimmung der Schweißnahtdicke

Höhe des einschreibbaren (gleichschenkligen oder nicht gleichschenkligen) Dreiecks anzunehmen“ und darf nicht kleiner als 3 mm sein (s. Bild 8). Im Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-8 [2] ist zusätzlich gefordert, dass die Mindestnahtdicke auf $a \geq \sqrt{\max t} - 0,5$ zu begrenzen ist, um hier ein Missverhältnis zwischen dem Nahtquerschnitt und dem zu verschweißenden Bauteilquerschnitt zu vermeiden [47]. Entsprechend dem Nationalen Anhang darf bei Blechdicken von $t \geq 30 \text{ mm}$ auf die Einhaltung der Bedingung verzichtet werden unter der Voraussetzung, dass die Nahtdicke $a \geq 5 \text{ mm}$ entspricht.

Kann anhand einer Verfahrensprüfung nachgewiesen werden, dass die Naht einen tiefen Einbrand aufweist, darf dieser rechnerisch berücksichtigt werden. Die Nahtdicke a ist dabei nicht mehr als einschreibbare Höhe des Dreiecks bis zum theoretischen Wurzelpunkt, sondern als Höhe bis zum tatsächlich vorhandenen Wurzelpunkt anzunehmen (s. Bild 8).

2.5 Bemessung von Kehlnahtverbindungen

2.5.1 Allgemeines

Die Bemessung einer Kehlnaht nach DIN EN 1993-1-8 [1] kann alternativ anhand zweier Verfahren durchgeführt werden:

- dem richtungsbezogenen Verfahren nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.2 [1] und
- dem vereinfachten Verfahren nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.3 [1].

Mit dem richtungsbezogenen Verfahren können zwar höhere Grenzschnitznahtspannungen ermittelt werden, jedoch erweist sich das Verfahren auch als das aufwendigere. Für beide Verfahren erfolgt der Nachweis auf Basis der Zugfestigkeit f_u des Grundmaterials, um so dem Versagensverhalten der Schweißnaht auf Bruch Rechnung zu tragen. Dies ist begründet, da die mit dem Überschreiten der Streckgrenze einhergehenden lokalen plastischen Verformungen in der Schweißnaht für das Verformungsverhalten des Gesamttrag-

werks in aller Regel unbedeutend sind [40]. Dabei ist immer die Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile zu verwenden. Dies ist vor allem bei Schweißverbindungen von Grundwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeiten zu berücksichtigen. Bei Verwendung der Zugfestigkeit ist als Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ anzusetzen [1, 47].

2.5.2 Erläuterung des richtungsbezogenen Verfahrens nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.2 [1]

Für das richtungsbezogene Verfahren werden die auf die Kehlnaht wirkenden „Kräfte, die je Längeneinheit übertragen werden können, aufgeteilt in Anteile parallel und rechtwinklig zur Längsachse der Schweißnaht und normal und rechtwinklig zur Lage der wirksamen Kehl-nahtfläche“ [1], um so die Richtung der einwirkenden Kräfte zu berücksichtigen. In Bild 9 sind die sich daraus ergebenden einzelnen Spannungskomponenten dargestellt. Es wird unterschieden in:

- Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse $\sigma_{\perp}$
- Normalspannung parallel zur Schweißnahtachse $\sigma_{\parallel}$
- Schubspannung senkrecht zur Schweißnahtachse $\tau_{\perp}$
- Schubspannung parallel zur Schweißnahtachse $\tau_{\parallel}$

Die Normalspannung parallel zur Naht $\sigma_{\parallel}$ hat auf die Naht entsprechend dem Background Document 6.05 [37] keinen signifikanten Einfluss, da diese hauptsächlich über den Querschnitt des Bauteils abgetragen wird. Sie kann daher für die Naht vernachlässigt werden.

Aus den zu berücksichtigenden Spannungskomponenten ist die Vergleichsspannung $\sigma_{v,Ed}$ nach Gl. (3) zu bestimmen. In Übereinstimmung zur Von-Mises-Vergleichsspannung werden die Schubspannungen mit dem Faktor 3 gewichtet, wodurch sich die in der Naht vorliegende Vergleichsspannung nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.2 [1] berechnet zu:

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (3)$$

mit

$\sigma_{\perp}$, $\tau_{\perp}$, $\tau_{\parallel}$ siehe Bild 9

Für den durchzuführenden Nachweis nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.2 [1, 2] ist nach Gl. (4) zum einen zu prüfen, ob die nach Gl. (3) ermittelte Ver-

gleichsspannung unterhalb der berechneten Bemessungsgrenzspannung liegt.

$$\sigma_{v,Ed} \leq \sigma_{v,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4)$$

mit

- f_u Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
- β_w Korrelationsbeiwert nach Tabelle 3 bzw. Tabelle 5
- γ_{M2} Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Zum anderen ist der zusätzliche Nachweis der Begrenzung der Normalspannung nach DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4.5.3.2 [1] zu führen (vgl. Gl. (5)):

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

mit

- f_u Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile
- γ_{M2} Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M2} = 1,25$

Nach DIN EN 1993-1-8 [1] sind nicht durchgeschweißte Stumpfnähte ebenfalls nach den Bemessungsregeln für Kehl-nähte nachzuweisen. Da jedoch eine Nachweisführung allein nach Gl. (4) für nicht durchgeschweißte Stumpfnähte an Stählen der Güte S235 zu unsicher ist [47], erfolgt ein weiterer Nachweis der Begrenzung der Normalspannung (vgl. Abschnitt 2.6.3).

Mit dem Korrelationsbeiwert β_w aus Gl. (4) wird die vom Grundwerkstoff abweichende Festigkeit der Naht indirekt berücksichtigt. Durch die Überfestigkeit sowie die Aufhärtung infolge des hohen Kohlenstoffanteils des Schweißzusatzwerkstoffs im Vergleich zum Grundwerkstoff wird die Tragfähigkeit der zu bemessenden Schweißverbindung gesteigert. Beispielsweise erfolgt für eine geschweißte Verbindung mit einer Stahlgüte S235 eine Steigerung der Bemessungsgrenzspannung mit dem Korrelationsbeiwert von $\beta_w = 0,8$ nach Tabelle 3, da jeder verwendbare Schweißzusatzwerkstoff eine erhebliche Überfestigkeit aufweist. Die jeweils anzusetzenden Korrelationsbeiwerte β_w aus DIN EN 1993-1-8 Abschnitt 4 [1] unter Berücksichtigung von DIN EN 1993-1-8/NA [2] können, abhängig von der jeweiligen Stahlgüte, Tabelle 3 entnommen werden.

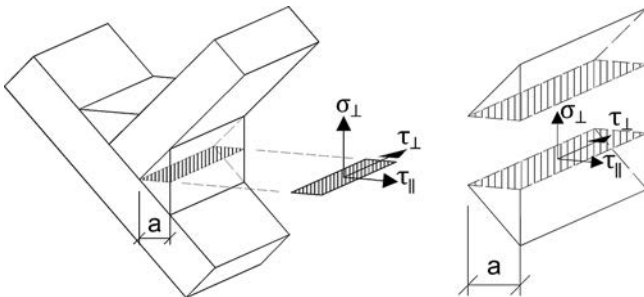


Bild 9. Spannungskomponenten einer Kehlnaht [38]

9

Tragende Klebverbindungen im Stahl-, Glas- und Fassadenbau

Prof. Dr.-Ing. Christian Schuler

Dr.-Ing. Matthias Albiez

Dipl.-Ing. (FH) Martin Bues, M. Eng.

Dipl.-Ing. (FH) Heinrich Ehard, M. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	589	3.2	Typische Werkstoffe und ihre Eigenschaften	622
1.1	Das Fügeverfahren Kleben	589	3.3	Trag- und Versagensverhalten	623
1.2	Anwendung im konstruktiven Ingenieurbau	590	3.4	Methoden zur Auslegung elastischer Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau	625
1.3	Klebstoffe für den Einsatz im Stahl- und Fassadenbau	593	3.4.1	Beanspruchungsermittlung	625
1.4	Klebgerechtes Konstruieren	598	3.4.2	Modellierung elastischer Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau aus der Sicht der Praxis	627
1.5	Herstellung einer geklebten Verbindung	601	3.5	Anwendungsbeispiele aus der Forschung der Autoren	629
1.5.1	Allgemeines	601	3.5.1	Geklebte Konstruktionen	629
1.5.2	Vorbereitung der Fügeteile	601	3.5.2	Tottenham Court Road Station	630
1.5.3	Vorbereitung und Applikation der Klebstoffe	602	3.5.3	Glas-Sandwich-Paneel (GSP)	632
1.5.4	Fixieren und Fügen der Fügeteile	603			
1.5.5	Aushärtung des Klebstoffs	603			
1.6	Einwirkungen auf Klebverbindungen	603			
2	Tragende Klebverbindungen im Stahlbau	605	4	Prozesskette Kleben nach DIN 2304	632
2.1	Einsatzmöglichkeiten	605	4.1	Sicherheitsklassen	633
2.2	Typische Werkstoffe und deren Eigenschaften	606	4.2	Klebeaufsichtspersonal (KAP)	633
2.3	Trag- und Versagensverhalten	607	4.3	Nachweisführung	634
2.4	Methoden zur Auslegung lastabtragender Klebverbindungen im Stahlbau	609	4.4	Erfahrungen bei der Einführung im Betrieb	634
2.5	Ausführungsbeispiele der Autoren aus der Forschung	610	5	Bautechnische Realisierung	636
2.5.1	Geklebte Rohrkonstruktionen	610	5.1	Aktuelle bauaufsichtliche Regeln	636
2.5.2	Fachwerkkonstruktionen mit geklebten Strebenanschlüssen	612	5.2	Vorgehensweise zur Umsetzung	636
2.5.3	Verstärkung und Sanierung bestehender Stahlkonstruktionen durch aufgeklebte CFK-Lamellen	616	5.2.1	Bauaufsichtliche Anforderungen an das Bauprodukt „Klebstoff“	636
2.5.4	Klebtechnische Sanierung eines typischen „Kategorie-4-Schadens“ einer Stahl-Hohlkastenbrücke	618	5.2.2	Bauaufsichtliche Anforderungen an die Bauart „geklebte Glaskonstruktion“	637
			5.2.3	Technische Dokumentation	638
3	Tragende Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau	621	6	Danksagung/Förderhinweise	638
3.1	Einsatzbereiche	621	7	Literatur	640

rer, konstanter Lastwirkung infolge von Kriech- und/oder Relaxationsvorgängen unterhalb der im quasi statischen Versuch ermittelbaren Maximallast liegen [41]. Darüber hinaus beeinflusst der Feuchtegehalt in einer Klebverbindung die mechanischen Eigenschaften wesentlich.

Hieraus begründet sich, dass das zeitliche Auftreten der verschiedenen klimatisch induzierten Lastgrößen entscheidend ist. Die Besonderheit ist hier, dass diese Größen während der Nutzungszeit einer Klebverbindung sich unterschiedlich überlagern. Die beschriebenen Einflüsse sowie ihre Auswirkungen müssen im Rahmen der Planung einer klebtechnischen Anwendung systematisch untersucht und entsprechend berücksichtigt werden.

2 Tragende Klebverbindungen im Stahlbau

2.1 Einsatzmöglichkeiten

Die eingesetzte Fügechnik ist bei der Erstellung von Stahlkonstruktionen von zentraler Bedeutung. Sie bestimmt die Herstellungs- und Montagekosten sowie die Anforderungen an die Ausführung und die Lebensdauer maßgeblich. Der Einsatz der Klebtechnik als Fügeverfahren weist hier den besonderen Vorteil auf, durch den flächigen Lasteintrag Spannungskonzentrationen zu reduzieren, ohne die beteiligten Werkstoffe durch Wärmeeinwirkung (Schweißen) oder Lochabzug (Schrauben) negativ zu beeinflussen. Im konstruktiven Stahlbau werden sicherheitsrelevante, tragende Klebverbindungen bisher jedoch nur selten ausgeführt. Das Kleben im Stahlbau beschränkt sich derzeit im Rahmen von Pilotprojekten auf die Sanierung, Ertüchtigung und Verstärkung von Bauteilen im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen.

Doch bereits in den 1950er- und 1960er-Jahren wurden im Bereich des Brückenbaus Projekte unter Verwendung der Klebtechnik realisiert. Bei der Errichtung von Brückenbauwerken über den Lippe-Seitenkanal wurden die sogenannten vorgespannten Klebverbindungen

(VK-Verbindungen) ausgeführt. Diese Anschlüsse stellen eine Kombination aus geklebter und vorgespannter Schraubverbindung dar (Bild 22).

Zur Herstellung der VK-Verbindungen wurde auf die Kontaktflächen der Fügeile ein Klebstoff bzw. ein Klebstoff-Korund-Gemisch appliziert. Im Anschluss wurden die Bauteile verbunden und durch HV-Schrauben verspannt. Die erforderlichen experimentellen Untersuchungen zur Beurteilung der Festigkeit wurden an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der TH Karlsruhe (heute Karlsruher Institut für Technologie) durchgeführt. Diese zeigten, dass im Vergleich zu den herkömmlichen gleitfest vorgespannten Schraubverbindungen mit der VK-Verbindung ein deutlicher Anstieg der Verbindungstragfähigkeit im Temperaturbereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ erzielt werden kann.

Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen das Potenzial hochfester, struktureller Klebverbindungen im Stahlhoch- und Stahlbrückenbau sowohl im Bereich von Neubauten für die dauerhafte Verbindung von Tragelementen als auch im Bereich der klebtechnischen Sanierung bestehender Tragwerke. Sowohl bei den Forschungsprojekten zum Einsatz geklebter Verbindungen beim Neubau von Stahltragwerken als auch bei klebtechnischen Sanierungen von Bestandstragwerken werden in der Regel strukturelle Klebstoffe eingesetzt. Der Hauptunterschied zwischen den in Abschnitt 3 beschriebenen elastischen Klebstoffen und den strukturellen Klebstoffen besteht in mechanischer Sicht in den deutlich höheren Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der strukturellen Klebstoffe sowie dem damit einhergehenden merklich geringeren Verformungsvermögen.

Im Jahr 2008 wurde eine Stahlbrücke mit aufgeklebter Fahrbahn aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Friedberg (Hessen) errichtet (Bild 23.) Dabei wurden die Fahrbahntafeln mit einer Gesamtbreite von 5,0 m unter Verwendung eines 2K-Epoxidharzklebstoffs auf den geschweißten, gevouteten Stahlträger geklebt. Hierbei wurde auch die durch die Klebung ermöglichte Verbundtragwirkung des Überbaus berücksichtigt [43]. Hinsichtlich der Sanierung geschädigter Stahlkonstruktionen existiert eine Reihe neuerer Klebkonzepte,

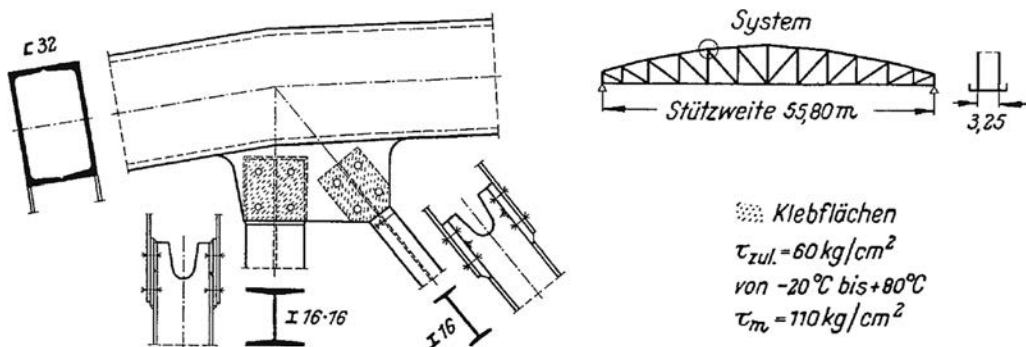


Bild 22. Anwendung der vorgespannten Klebverbindung im Brückenbau [42]



Bild 23. Stahlbrücke mit aufgeklebter Fahrbahn aus glasfaserverstärktem Kunststoff (© Fiberline Composites)

speziell im Bereich der Verstärkung von Deckblechen im Stahlbrückenbau. Das Sandwich Plate System (SPS), bei dem zusätzlich zum bestehenden Deckblech mit Abstandhaltern ein Verstärkungsblech positioniert und der Zwischenraum mit flüssigem Polyurethan (PUR) verfüllt wird, wurde in Abschnitt 1.2 detailliert beschrieben. Weitere Verstärkungsmaßnahmen durch den Einsatz der Klebtechnik (aufgeklebte CFK- oder Stahl lamellen) im Stahlbau sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

2.2 Typische Werkstoffe und deren Eigenschaften

Lastabtragende Verbindungen im Stahlbau sind in der Regel einer hohen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Infolge ständiger Lasten aus Eigengewicht bzw. infolge einer Vorspannung der zur Verstärkung aufgeklebten Bauteile aus Stahl- oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen sind zudem ständige Beanspruchungen von der Klebverbindung zu übertragen. Wegen ihrer vorteilhaften mechanischen Eigenschaften sind Epoxidharze und Polyurethane in strukturellen Anwendungen weit verbreitet. Aufgrund der bei Stahlkonstruktionen üblichen Bauteil- und Fügspaltdimensionen werden in der Regel zweikomponentige Klebstoffsysteme eingesetzt.

Epoxidharzklebstoffe zeichnen sich durch sehr gute adhäsive Eigenschaften, auch auf unterschiedlichen Substraten, sowie hohe Verbundfestigkeiten aus. In Kombination mit ihrer ebenfalls guten Alterungsbeständigkeit, sowohl gegen physikalische (z. B. UV-Licht) als auch gegen chemische Einflüsse (z. B. Feuchtigkeit), erklärt dies auch den häufigen Einsatz von Epoxidharzklebstoffen bei strukturellen Anwendungen im Automobil- und Luftfahrzeugbau. Epoxidharzklebstoffe sind den hochfesten Klebstoffen zuzuordnen. Die Zugfestigkeit dieser Klebstoffe liegt im Bereich von 10 bis 40 MPa (Bild 24). Auch in Verbundversuchen an Zugscherproben werden mit Epoxidharzklebstoffen häufig Scherfestigkeiten von über 20 MPa erreicht. Epoxid-

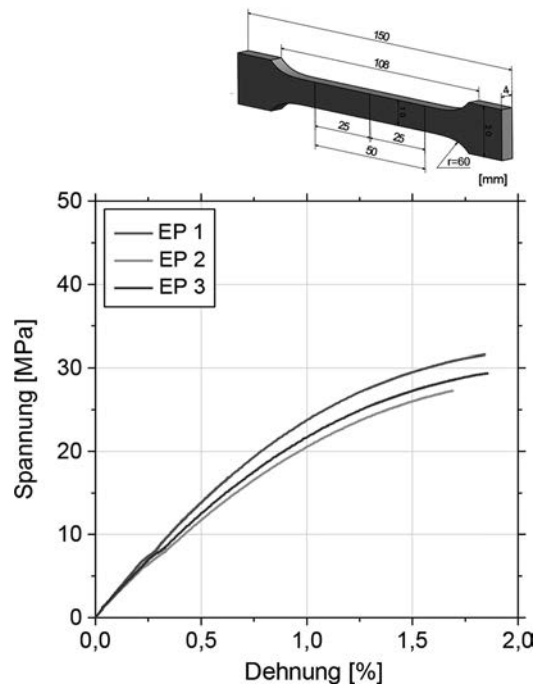


Bild 24. Spannungs-Dehnungsverhalten von Substanzproben eines exemplarischen Epoxidharzklebstoffs [1]

harze weisen neben den hohen Festigkeitseigenschaften eine hohe Steifigkeit auf. In uniaxialen Zugversuchen an Klebstoffsubstanzproben weisen Epoxidharzklebstoffe Elastizitätsmoduln von etwa 1.000 bis zu 10.000 MPa auf. Das Werkstoffverhalten der Epoxidharze ist in der Regel als spröde zu bezeichnen, d. h., das Versagen der geklebten Verbindung tritt schlagartig bei geringen Bruchdehnungen auf. Es sind jedoch auch zähelastisch modifizierte Epoxidharzklebstoffe auf dem Markt verfügbar. Diese zeigen nach einer hohen Anfangssteifigkeit plastische Verformungszunahmen. Polyurethanklebstoffe werden ebenfalls häufig für strukturelle Klebverbindungen eingesetzt. Hervorzuheben bei Polyurethanen sind die sehr guten adhäsiven Eigenschaften auf verschiedenen Substraten. Verbundfestigkeit und chemische Beständigkeit hängen vom Vernetzungsgrad der Polymere ab und erreichen auch in Hinblick auf die Anforderungen an strukturelle Klebungen sehr gute Werte. Im Vergleich zu den Epoxidharzen zeigen sich PUR-Klebstoffe in der Regel zwar weniger wärmebeständig, weisen aber eine höhere Klebschichtverformbarkeit auch bei tiefen Temperaturen auf. Substanzproben aus Polyurethanklebstoffen weisen Zugfestigkeiten auf, die in der Regel im Bereich von 5 bis 15 MPa liegen. Es sind jedoch auch hochfeste Polyurethanklebstoffe mit Zugfestigkeiten deutlich über 20 MPa auf dem Markt erhältlich. In Abhängigkeit der Steifigkeit und Festigkeit des PUR-Klebstoffs zeigt sich ein gummi- bis hartelastisches Werkstoffverhalten.

Festzuhalten ist an dieser Stelle jedoch, dass für strukturelle Anwendungen im Stahlbau hochfeste PUR-Klebstoffe, deren Werkstoffverhalten mit dem von Epoxidharzklebstoffen vergleichbar ist, erforderlich sind.

Epoxidharz- und Polyurethanklebstoffe weisen die o. g. Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte bei Raumtemperatur auf. Die Temperaturbeständigkeit der Klebstoffe ist jedoch begrenzt. Mit zunehmender Temperatur ändern sich die mechanischen Eigenschaften, es beginnt eine thermische Spaltung der Moleküle [33]. In diesem Kontext ist die sogenannte Glasübergangstemperatur T_g von wesentlicher Bedeutung. Die Glasübergangstemperatur bezeichnet einen Temperaturbereich, in dem sich ausgehend vom Glaszustand wichtige mechanische Eigenschaften von Kunststoffen signifikant ändern. So weisen viele Klebstoffe bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur höhere mechanische Kennwerte auf, die bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur in der Regel deutlich abfallen. Dies ist stark vereinfachend mit der Abnahme der intermolekularen Anziehungskräfte und damit einer höheren Beweglichkeit der Molekülketten bei zunehmenden Temperaturen zu erklären [33]. Im Gegensatz zu den vorgestellten Silikonklebstoffen liegen die Glasübergangstemperaturen von Epoxidharz- und Polyurethanklebstoffen häufig nicht außerhalb des baupraktischen Einsatzbereichs. In Deutschland ist der Temperatureinsatzbereich normativ vorgegeben und liegt im Bereich von -23°C bis mindestens $+67^\circ\text{C}$ (für helle Oberflächen) [40, 44]. Bei der Auswahl von für strukturelle Anwendungen im Stahlbau geeigneten Klebstoffen ist deshalb dringend auf die Glasübergangstemperatur, die oberhalb der Einsatztemperatur des Bauwerks liegen sollte, zu achten. Die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) an Substanzproben erlaubt die Bestimmung der Glasübergangstemperatur. Dabei wird sowohl der Speichermodul, der die elastischen Eigenschaften des

Klebstoffs beschreibt, als auch der Verlustmodul, der die viskose Komponente quantifiziert, aufgezeichnet. Der Quotient aus Verlustmodul und Speichermodul wird als Verlustfaktor bezeichnet. Das Maximum des Verlustfaktors über der Temperaturachse gilt als Anhaltspunkt für die Glasübergangstemperatur (s. Bild 25). Eine Aushärtung der Klebstoffkomponenten bei erhöhter Temperatur führt in der Regel zu einem Anstieg der Glasübergangstemperatur [1].

Klebstoffhersteller weisen in der Regel in den technischen Datenblättern experimentell bestimmte Kennwerte aus. Die angegebenen Kennwerte können jedoch nicht direkt und uneingeschränkt für die Auslegung einer Klebverbindung in der Anwendung verwendet werden. Die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte der eingesetzten Klebstoffe besitzen u. a. nur für eine definierte Klebschichtdicke, Substratoberfläche, Umgebungstemperatur und Klebgeometrie Gültigkeit. Die Übertragbarkeit auf die konkrete Anwendung ist im Einzelfall stets zu prüfen.

2.3 Trag- und Versagensverhalten

Die vorgestellten, für lastabtragende Klebverbindungen bei Stahlkonstruktionen in der Regel erforderlichen, hochsteifen strukturellen Klebstoffe zeigen im Vergleich zu den in Abschnitt 3 beschriebenen elastischen Klebverbindungen ein deutlich anderes Trag- und Versagensverhalten.

In den nachfolgenden Ausführungen soll lediglich auf nicht zähelastisch modifizierte Epoxidharzsysteme eingegangen werden. Diese hochsteifen Strukturklebstoffe zeigen ein nahezu lineares Last-Verformungsverhalten und versagen in der Regel spröde. In Forschungsarbeiten an der Versuchsanstalt des KIT [1] wurde das Trag- und Versagensverhalten von mit Strukturklebstoffen verbundenen Stahlflachproben umfangreich experimentell untersucht. Die Proben setzen sich aus je zwei

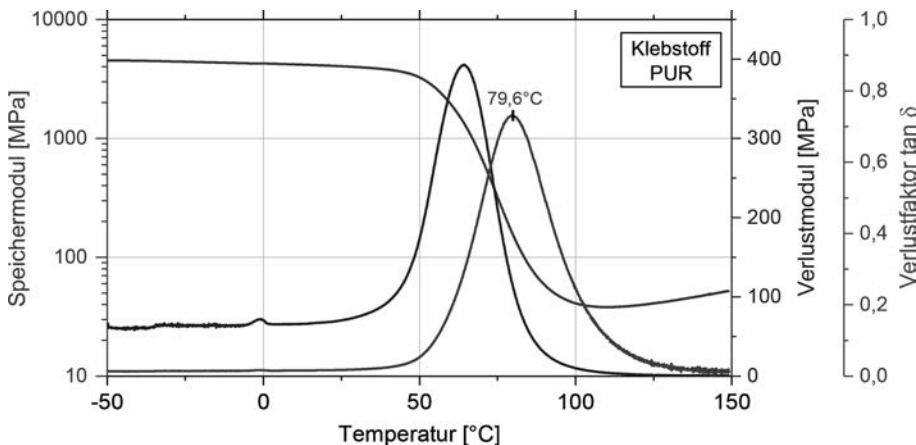


Bild 25. Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse eines exemplarischen PUR-Klebstoffs [1]

Stahlbauteilen mit rechteckigem Querschnitt zusammen. Beide Stahlbauteile weisen an jeweils einem Ende einen identisch definierten Schäftungswinkel auf und lassen sich somit mit konstanter Schichtdicke von 2,5 mm klebtechnisch verbinden (Bild 26) [1]. Die Proben unterscheiden sich durch sechs unterschiedliche Schäftungswinkel, die namensgebend für die jeweilige Probenform sind. Die Proben mit dem Schäftungswinkel 0° werden mit zwei unterschiedlichen Überlappungslängen gefertigt. Die geschäftete Klebung der Stahlfügeteile führt bei axialer Zugbeanspruchung der Probe zu einem definierten Interaktionsspannungszustand in der Klebfuge, bestehend aus Schub und Querkzug. In Bild 27 ist das Last-Verformungsverhalten der beschriebenen, geschäftet geklebten Flachstahlproben dargestellt. Unabhängig von der in der Klebfuge vorhandenen Interaktionsspannung aus Schub und Querkzug zeigt sich bei

allen Proben eine nahezu lineare Zunahme der Maschinenkraft mit zunehmender Verformung. Bei Erreichen der Bruchlast versagen die Klebverbindungen spröde [1]. Dieses Tragverhalten von strukturellen Stahlklebungen zeigt sich auch bei praxisrelevanten Versuchen an geklebten Großbauteilen. Die zugehörigen, in anwendungsnahen Forschungsprojekten durchgeführten, Untersuchungen werden im Abschnitt 2.5 exemplarisch vorgestellt. Numerische Analysen der Spannungszustände in der geklebten Verbindung tragen zum Verständnis des Versagensverhaltens bei. Es zeigt sich, dass ähnlich wie bei langen Schweißnahtanschlüssen eine ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Klebfuge vorhanden ist. Die globalen Spannungsmaxima treten dabei an den Enden der Überlappungen auf (Bilder 28 und 29). Aufgrund der Sprödigkeit der untersuchten hochsteifen

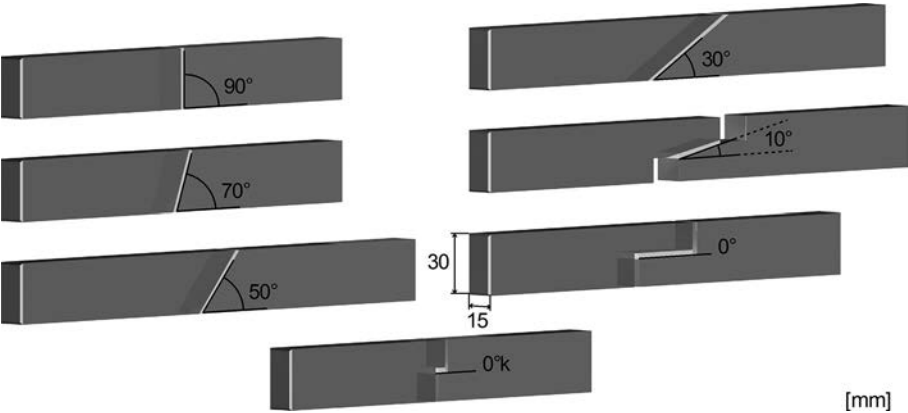


Bild 26. Schematische Darstellung der unter verschiedenen Schäftungswinkeln (0–90°) klebtechnisch verbundenen Stahlproben [1]

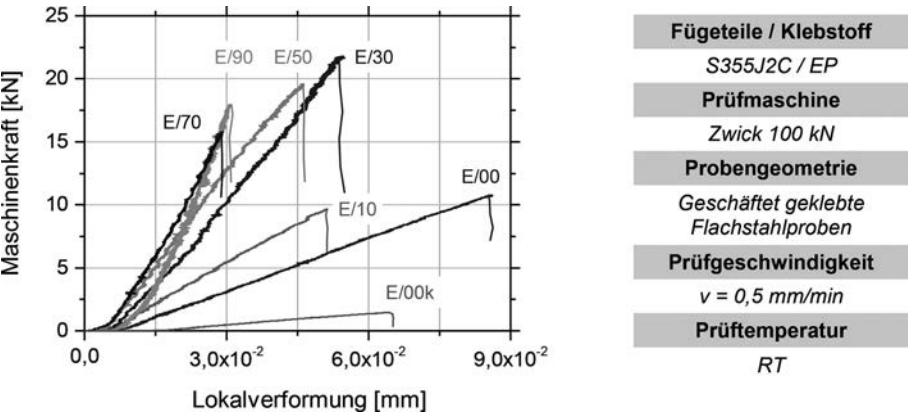


Bild 27. Kraft-Lokalverformungen der quasi statischen Prüfung geschäftet geklebter Flachstahlproben; Klebstoff EP [1]

Strukturklebstoffe versagt die Verbindung bei der erstmaligen Überschreitung der maximal ertragbaren (Interaktions-)Spannung.

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf experimentellen Untersuchungen bei Raumtemperatur. An dieser Stelle ist zu betonen, dass eine Vielzahl baupraktischer Umgebungsbedingungen einen Einfluss auf das Trag- und Versagensverhalten geklebter Verbindungen hat. Neben der Temperatur und dem Beanspruchungszustand haben die Feuchtigkeit, Fertigung und die Geometrie der Klebfuge einen maßgeblichen Einfluss auf das Tragverhalten. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Alterung der Klebverbindung von großer Wichtigkeit. Auch das Zeitstandverhalten ist zu untersuchen, da viele Klebstoffe bei lang einwirkender Beanspruchung zu Kriechverformungen neigen. Diese Randbedingungen und Einflüsse müssen bei der Planung und Konstruktion einer lastabtragenden Klebung berücksichtigt und untersucht werden.

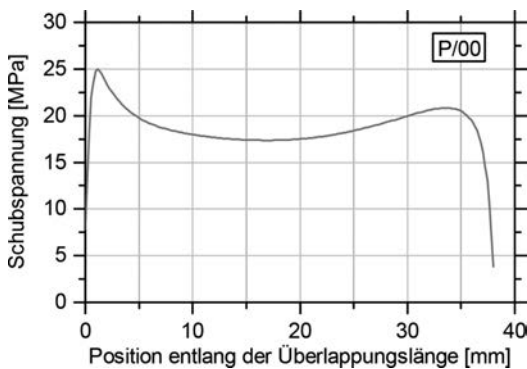


Bild 28. Numerisch bestimmte Schubspannungsverteilung in geklebter Überlappungsprobe; Klebstoff EP [1]

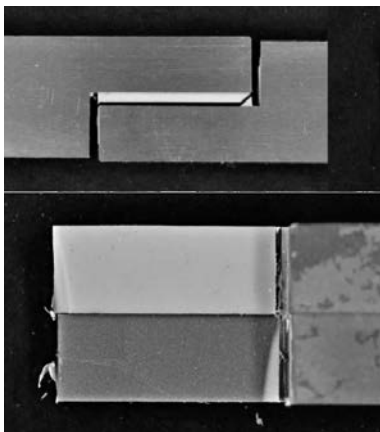


Bild 29. Bruchbild einer geklebten Überlappungsprobe mit vom Klebfugenrand ausgehendem Verbindungsversagen [1]

2.4 Methoden zur Auslegung lastabtragender Klebverbindungen im Stahlbau

Wie bereits beschrieben, befindet sich das Fügeverfahren Kleben im Stahlbau gegenwärtig noch weitgehend im Stadium der Forschung. Dabei sind insbesondere noch Fragen zur Dauerhaftigkeit der geklebten Verbindung sowie zu baupraktischen Berechnungs- und Bemessungsansätzen zu klären. Dieser Hintergrund begründet auch die Tatsache, dass noch keine allgemeinen bautechnischen Regelwerke für geklebte Stahlbauverbindungen verfügbar sind.

Im Folgenden sollen deshalb einige Methoden zur rechnerischen Auslegung lastabtragender Klebverbindungen im Stahlbau vorgestellt werden. Diese wurden entweder im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelt oder fanden bereits Anwendung in Forschungsprojekten bauferner Branchen.

Aufgrund des in Bild 28 aufgezeigten ungleichmäßigen Spannungszustands in strukturellen Klebungen eignet sich das im konstruktiven Ingenieurbau verbreitete Nennspannungskonzept in der Regel nicht für die rechnerische Auslegung. Zur Nachweisführung sind hier z. B. lokale Konzepte heranzuziehen. Die Ermittlung der Beanspruchung kann dabei analytisch oder numerisch erfolgen. Erste analytische, linear elastische Lösungen zur Bestimmung der Spannungsverteilungen stammen aus der Luftfahrt und wurden bereits ab den 1930er-Jahren entwickelt [45, 46]. Heute rücken jedoch numerische Methoden aufgrund der vorteilhaften Möglichkeiten, individuelle Geometrien abzubilden und Nichtlinearitäten zu berücksichtigen, immer mehr in den Vordergrund. Auf der Widerstandsseite sind für die zu untersuchende Verbindung geeignete Versagenskriterien zu wählen. Wie für die elastischen Klebverbindungen im Fassadenbau (Abschnitt 3) beschrieben, befindet sich die Entwicklung einer allgemeingültigen Festigkeitsaussage insbesondere vor dem Hinblick baupraktischer Randbedingungen und Dauerhaftigkeitsanforderungen noch in der wissenschaftlichen Erprobung.

Ein Ansatz zur Beschreibung der Festigkeit geklebter Stahlverbindungen auf Basis von experimentellen Ergebnissen an geschäftet geklebten Stahlproben (s. Abschnitt 2.3) war Gegenstand von Forschungsarbeiten am KIT [1]. Dabei wurden die lokalen Spannungsmaxima beim Bruch der Klebverbindung mithilfe nichtlinearer numerischer Berechnungen unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe ermittelt. Die Ergebnisse stellen die Grundlage für die Definition der, die Interaktion von Schub- und Normalspannungen berücksichtigenden, Versagenskriterien der geklebten Stahlverbindung dar. Für beide untersuchten Klebstoffe zeigt sich, dass die Verbindungsfestigkeit durch eine quadratische Interaktion (Ursprungsgleichung der Ellipse) der beiden Komponenten Schub- und Normalspannung orthogonal zur Klebfuge zutreffend beschrieben wird. Definiert ist dabei, neben dem auf allen Einzelergebnissen basierenden

Kriterium für beide Klebstoffe, weiterhin ein charakteristisches, auf den 5%-Quantilen der zugrunde liegenden Ergebnisse basierendes Versagenskriterium (Bild 30). Dieses Kriterium zeigt eine gute Eignung zur Berechnung der Tragfähigkeit komplexerer Stahlbauverbindungen (hier: geklebte Kreishohlprofilverbindungen) [1].

Neben der Möglichkeit des beschriebenen deterministischen Konzepts lokaler Spannungen, bei dem das Erreichen einer lokalen Spannungsspitze als versagsmaßgebend angesehen wird, kann die Tragfähigkeit von spröde versagenden Strukturklebungen mit probabilistischen Berechnungsmodellen bestimmt werden. Diese Methodik erlaubt die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit eines Bauteils oder einer Verbindung bei einer vorgegebenen Beanspruchung. Das in [47] beschriebene nichtlokale Verfahren berücksichtigt alle in einem Volumen bzw. in einer Fläche vorhandenen Spannungen bei der Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit. Details hierzu können der Literatur [1, 14] entnommen werden.

Als weiteres Berechnungsverfahren auf bruchmechanischer Basis unter Anwendung numerischer Methoden können Kohäsivzonenmodelle genannt werden. Diese basieren auf dem Ansatz, dass eine Trennung von Werkstoffen durch einen Riss ausschließlich in den Grenzflächen zwischen Bereichen ohne Schädigung erfolgt. Dabei werden kontinuumsmechanische FE-Modelle erstellt und den Grenzflächen Separationsgesetze zugewiesen. Diese basieren auf dem Eintreten von energiebasierten Grenzkriterien, die in Abhängigkeit möglicher Verformungsmöglichkeiten (Deformationsmoden) der Klebfuge definiert sind. Die Definition der Energie kann hier getrennt für das initiale Einreißen und auch

für das Weiterreißen definiert werden. Aufgrund der Komplexität sowohl in der erforderlichen Kennwertermittlung als auch in der Modellierung wird im Hinblick auf die Praktikabilität in der Bauanwendung nicht näher auf diese Verfahren eingegangen und auf die Literatur verwiesen [48, 49].

2.5 Ausführungsbeispiele der Autoren aus der Forschung

Das Fügeverfahren Kleben findet bei lastabtragenden, sicherheitsrelevanten Verbindungen im Bauwesen bisher kaum Anwendung. Die Entwicklung und Validierung von geklebten Verbindungen unter baurelevanten Beanspruchungen und Umgebungsbedingungen im konstruktiven Stahlbau stellt somit sowohl in Bezug auf die Bauteildimensionen als auch im Hinblick auf die Beanspruchungsgrößen Neuland dar.

Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren vielfältige Forschungsprojekte im Gebiet des Klebens von Stahlbaukonstruktionen durchgeführt. Beispielfhaft sollen im Folgenden einzelne Forschungsprojekte sowie deren Ergebnisse vorgestellt werden.

2.5.1 Geklebte Rohrkonstruktionen

Mit dem schweißtechnischen Verbund von Kreishohlprofilen aus Stahl und Stahlgussknoten werden anspruchsvolle Konstruktionen des Hoch-, Brücken-, Kran- und Windenergieanlagenbaus realisiert. Zur Entwicklung von Bemessungsrichtlinien für geschweißte Hohlprofilknoten unter ruhender und nicht ruhender Beanspruchung ist in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl an Forschungsarbeiten durchgeführt wor-

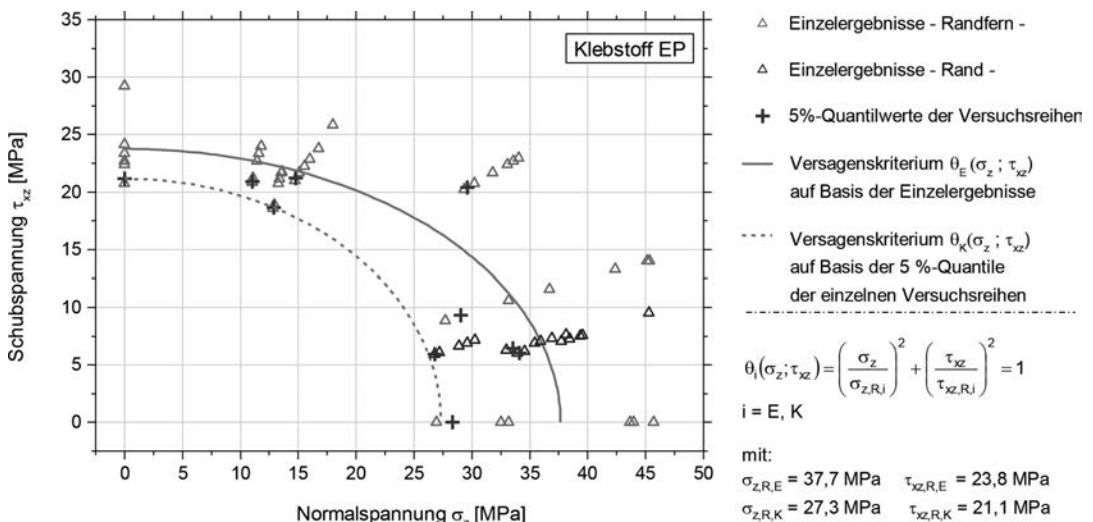


Bild 30. Versagenskriterien auf der Basis der experimentellen Einzelergebnisse sowie auf Basis der 5%-Quantile für mit einem EP-Klebstoff gefügte Stahlverbindungen [1]

den. Da bei diesen Schweißverbindungen jedoch oftmals Ermüdungsrisse von der Schweißnahtwurzel ausgehen, sind hohe Sicherheiten bei der Bemessung erforderlich.

Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts P 884 [39] der Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA) wurde von den Forschungsstellen Karlsruher Institut für Technologie, Hochschule München und Fraunhofer IFAM eine geklebte Verbindung zum Anschluss von Kreishohlprofilen an Stahlgussknoten für die oben genannten Anwendungsgebiete entwickelt und systematisch untersucht. Die geklebte Verbindung wird durch einen Überlappungsstoß hergestellt (Bild 31).

Die Möglichkeit der freien Formgebung von Gussbauteilen erlaubt die Ausbildung eines abgestuften Überlappungsbereichs. In den aufgrund der Durchmesserdivergenz entstehenden Fügespalt wird der Klebstoff injiziert. Somit kann eine entsprechend große Klebfläche ausgebildet werden, um die in den Stahlbauteilen vorliegende Beanspruchung zu übertragen.

Zur Lösung dieser Aufgabe erfolgte zunächst die Analyse von Randbedingungen sowie mechanischer und thermischer Beanspruchungen im konstruktiven Stahlbau und daraus die Ableitung von Anforderungen an die geklebte Verbindung. Zu beachten waren insbesondere die Herstellungs- und Fertigungstoleranzen der Fügepartner. Aufgrund der nach den technischen Lieferbedingungen für Kreishohlprofile zulässigen Maßabweichungen sind Klebschichtdicken von mehreren Millimetern zum Toleranzausgleich erforderlich. Folglich können die in anderen Branchen vorhandenen Erfahrungen (Klebschichtdicken unter 1 mm) nicht ohne Weiteres auf dieses Anwendungsgebiet übertragen werden. Die neu entwickelte Überlapperverbindung von Kreishohlprofil und Gussknoten mit variierendem Spaltmaß wurde durch eine präzise gefertigte Dick-schichtklebung realisiert. Aus Sicht der klebtechnischen Verbindung stellen die thermischen Ansprüche hohe Anforderungen. Gemäß DIN EN 1991 sind Bauwerke in Deutschland für einen Temperatureinsatzbereich von -23°C bis $+67^{\circ}\text{C}$ (helle Oberflächen) auszulegen. Die

Eignung der Klebstoffe war daher, vor dem Hintergrund der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte von Polymeren, für den genannten Temperatureinsatzbereich zu überprüfen.

Oberflächenanalytische Untersuchungen und Klebversuche zeigten eine ausreichende Festigkeit der Klebung auf mit Korund gestrahlten Stahlgussoberflächen. Versuche an Substanz- und Verbundproben identifizierten und charakterisierten zwei Klebstoffe, welche die zuvor definierten Anforderungen erfüllten. Zur Fertigung der Probekörper nach dem Injektionsprinzip wurde eine teilautomatisierte Fertigungsvorrichtung entwickelt und geprüft (Bild 32). Diese vereinte die Prozesse Fügen, Fixieren sowie Klebstoffinjektion. Füllversuche zeigten eine blasenfreie Füllung des Fügespalts.

Zur Untersuchung der Beständigkeit der Klebverbindung wurden quasi statische Belastungsversuche an kleinformatigen, geklebten Kreishohlprofilproben (Werkstoff S355J2H) unter verschiedenen äußeren Einwirkungen/Auslagerungen durchgeführt. Erste Ermüdungsversuchsserien an geklebten Rohrverbindungen dienten der Ermittlung der Beanspruchbarkeit der Verbindung bei Ermüdungsbelastung. Zudem erfolgte die Prüfung der Klebstoffe auf ihre Beständigkeit gegenüber Kriechbeanspruchungen.

Die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilproben in Bauteilgröße, bei Variation von KHP-Querschnitt, Klebschichtdicke, Überlappungslänge sowie bei definiert eingebrachten Imperfektionen, wurde in umfangreichen experimentellen Untersuchungen bestimmt.

Abschließend wurden Musterbauteile mit einem Außendurchmesser $D = 298,5 \text{ mm}$ und einer Wanddicke von 15 mm nach dem erarbeiteten Konzept hergestellt und geprüft (Bilder 33 und 34). Die Klebverbindung übertrug im statischen Lastfall bei einer geringen Streuung eine Maximalkraft von $F = 2.000 \text{ kN}$ bei einer Überlappungslänge von lediglich 110 mm. Diese Überlappungslänge entspricht dem 0,4-fachen Innendurchmesser des Kreishohlprofils. Bei einem Profil aus dem üblichen Baustahl S235 resultiert die experimentell bestimmte Tragfähigkeit in einer Stahlquerschnittausnutzung von 74%.

Das Forschungsprojekt zeigt, dass aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen geklebte Verbindungen zwischen Stahlgussknoten und Stahlkreishohlprofilen mit reproduzierbarer quasi statischer Tragfähigkeit prozesssicher klebtechnisch gefertigt werden können. Geklebte Stahl-Stahlgussverbindungen stellen eine Innovation dar, die neue gestalterische und konstruktive Möglichkeiten für Hohlprofilkonstruktionen des Hoch-, Brücken-, Kran- und Windenergieanlagenbaus eröffnet. Besonders vorteilhaft ist bei dieser Fügemethode, dass im Vergleich zu geschweißten Anschlüssen keine scharfe geometrische Kerbe in die Konstruktion eingebracht wird, die zu einer frühzeitigen Ermüdungsrisseinitiation führen kann. Zur Überführung in die industrielle Anwendung ist eine detailliertere Untersuchung der Dauerhaftigkeit und Ermüdungsfestigkeit der Klebverbindung im Rahmen weiterer Forschungs-

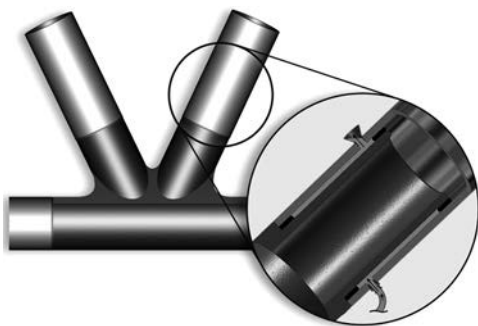
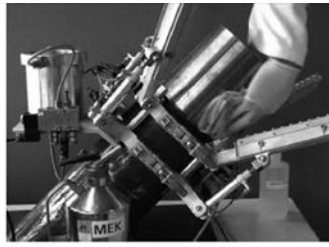


Bild 31. Konstruktionsprinzip geklebte Kreishohlprofilverbindung [50]



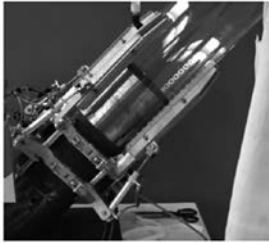
1. Montage der Fügevorrichtung



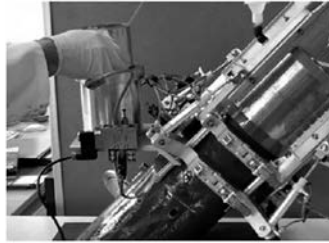
2. Reinigung der Klebflächen



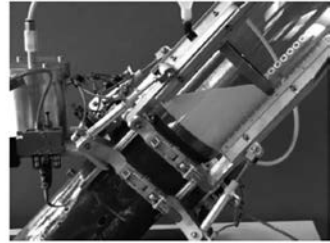
3. Applikation Fugendichtband



4. Aufsetzen und Zentrieren des Rohres



5. Klebstoffgebinde in Druckbehälter einstellen



6. Klebstoffinjektion

Bild 32. Fügekonzept unter Verwendung einer teilautomatisierten Fertigungsvorrichtung [52]

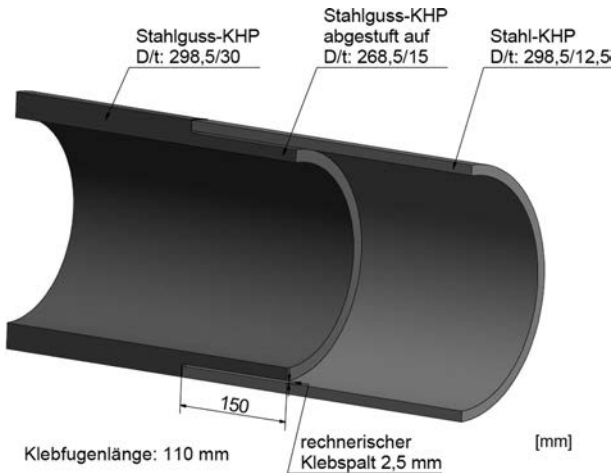


Bild 33. Geometrie der geklebten Großbauteilproben [1]

tätigkeiten erforderlich. Ebenso ist das Tragverhalten des geklebten Anschlusses in Kombination mit Korrosionsschutzsystemen zu analysieren [51, 52].

2.5.2 Fachwerkkonstruktionen mit geklebten Strebenanschlüssen

Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen werden für Wassertiefen größer als 20 m häufig als

Jacket-Fachwerkkonstruktion ausgeführt. Diese Tragkonstruktionen stehen im Fokus des nachfolgend vorgestellten Forschungsprojekts [53], das in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie, der Hochschule München und dem Fraunhofer IFAM durchgeführt wird. Dieses Projekt wurde aufgrund der positiven Ergebnisse zum klebtechnischen Fügen von Rundhohlprofilen und Gussbauteilen im vorangegangenen AiF-Forschungsprojekt P 884 von international tätigen

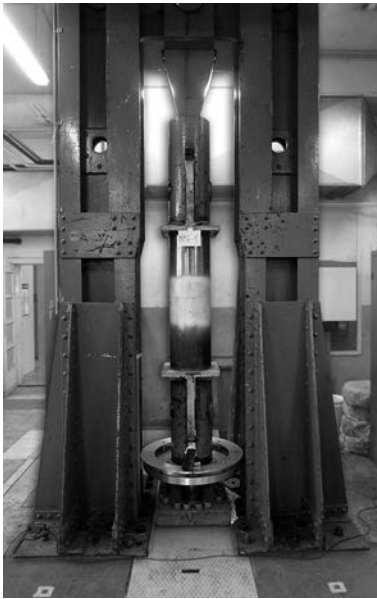


Bild 34. Experimentelle Prüfung einer geklebten Kreishohlprofilprobe im Großbauteilversuch [1]

Konzernen aus den Bereichen des Stahl- und Windenergieanlagenbaus initiiert.

Bisher werden die einzelnen Hohlprofile bei Fachwerkstrukturen schweißtechnisch gefügt. Dies führt aufgrund der räumlichen Verschneidung der Rohrprofile in den Fachwerkknoten und der resultierenden komplexen Schweißnahtgeometrien zu einem großen Fertigungsaufwand. Für die Endmontage werden zu-

dem große Freiflächen benötigt, da die einzelnen Bauteile sowohl in liegender als auch in stehender Position gefügt werden müssen. Vor diesem Hintergrund wird im Forschungsprojekt FOSTA P 1123 [53] ein neuartiges Konstruktionskonzept entwickelt, das eine erhebliche Optimierung der Fertigung und Montage von Stahlfachwerkstrukturen durch den Einsatz der Klebtechnik ermöglichen soll. Dieses Konzept ist schematisch in der folgenden Bild 35 skizziert.

Bei der innovativen Konstruktionsvariante sind an den Enden der diagonal verlaufenden Fachwerkstreben Knotenschalensegmente angeschweißt (Schritt 1). Diese einzelnen Teilschalen werden so ausgebildet, dass sie in einem Umfangsbereich von bis zu 180° den Eckstiel umfassen und während der Montage zu einer Gesamtschale ergänzt werden (Schritt 2). Somit kann der Eckstiel zunächst einfach in das offene Schalensegment gelegt werden und muss nicht aufwendig eingeschoben werden. Im nächsten Schritt werden die Schalensegmente miteinander verbunden (Schritt 3). Dies kann durch das Verschweißen der einzelnen Teilschalen mit Längsnähten oder durch eine Verschraubung der Teilschalen geschehen. In diesem Arbeitsschritt erfolgt jedoch noch keine Verbindung der Knotenschalen mit dem durchlaufenden Eckstiel, d. h., die Teilschalen bilden einen Ring um diesen mit einem verbleibenden Spalt. Dieser Spalt zwischen Knotenring und Eckstielrohrwandung wird anschließend klebtechnisch gefügt (Schritt 4.).

Hinsichtlich einer werkstoffgerechten Beanspruchung der Klebschicht hat diese Konstruktion den Vorteil, dass ständig wirkende statische Lasten, wie Eigengewicht, nahezu vollständig durch die durchlaufenden Eckstiele abgeleitet werden. Die Klebverbindungen müssen lediglich die Lastanteile der Diagonalstreben abtragen. Zudem können die Klebverbindungen gezielt

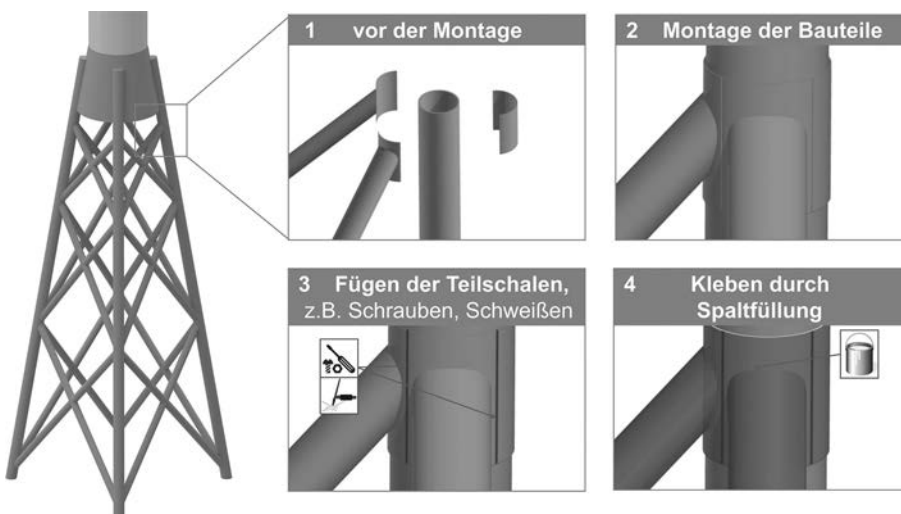


Bild 35. Konzept Stahlfachwerkkonstruktion mit geklebtem Strebenanschluss [53]

und gewinnbringend zur Dämpfung der dynamisch beanspruchten Tragsysteme aktiviert werden. Ferner ergibt sich infolge der eingesparten Schweißanschlüsse an den Eckstielen eine deutliche Verbesserung des sonst anzusetzenden Kerbfalls unter Ermüdungsbeanspruchung und damit eine Erhöhung der lokalen Betriebsfestigkeit. Durch die Umschließung mit der Knotenschale wird das lokale Tragverhalten im Knotenpunkt des Eckstiels verbessert.

Im Forschungsprojekt wurden zunächst die vorliegenden Randbedingungen sowie die mechanischen, thermischen und hygrischen Beanspruchungen der vorliegenden Offshore-Strukturen analysiert. Zur Erfassung der mechanischen Beanspruchungen von Stahlbauteilen und Klebverbindung wurden die maßgebenden Belastungen aus Wind, Wellenanprall und Anlagenbetrieb für eine repräsentative Jacket-Tragstruktur ermittelt, FE-Modelle erstellt und diese mit den maßgebenden

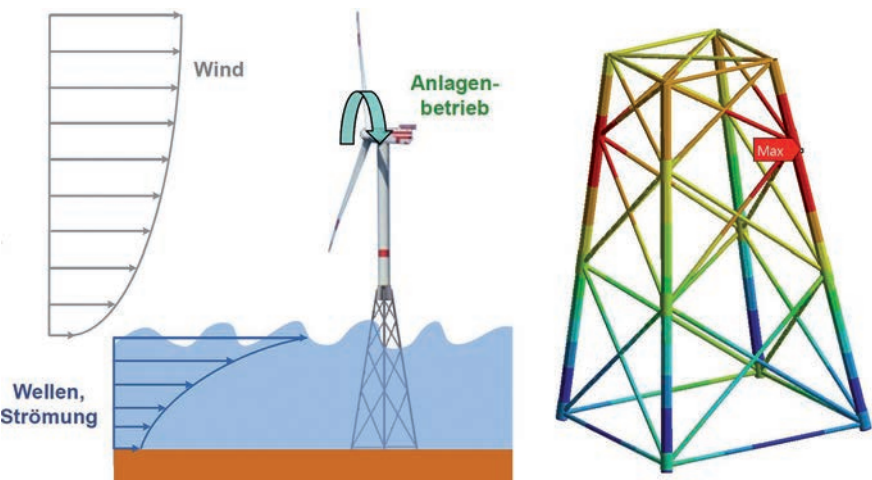


Bild 36. Prinzipdarstellung Belastungen sowie verformtes Submodell [53]

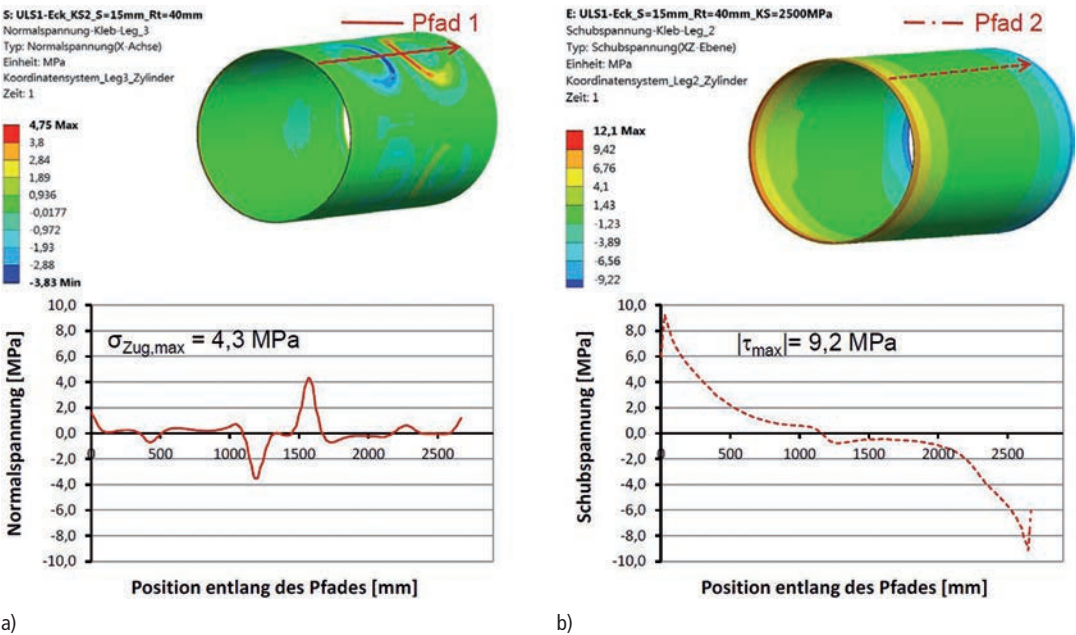


Bild 37. Spannungsplots in der Klebfuge im Rahmen der Parameterstudie; a) Normalspannung, b) Schubspannung [53]

10

BIM-Überblick und die Anwendung von BIM im Stahlbau

Dipl.-Ing. MAS CAAD ETH Jakob Przybylo

Dipl.-Ing. Hinrich Münzner, MBA

Dipl.-Ing. MAS ICT Michael Raps

Dipl.-Ing. (FH) MAS CAAD ETH Dominik Zausinger

Dipl.-Ing. Milos Mikasinovic

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	645	4	BIM-Besonderheiten der Digitalisierung im Stahlbau	663
1.1	BIM-Pflicht	647	4.1	Allgemeines	663
1.2	BIM-Vorteile	647	4.2	Herausforderung – Integration der digitalen Stahlbauplanung und Fertigung in das BIM	663
1.3	Normen und Richtlinien	648			
1.3.1	Technische Regeln	648	5	Projektbeispiele	664
1.3.2	Organisatorische Regeln	648	5.1	Allgemeines	664
1.4	Strategisches und operatives BIM	649	5.1.1	Projektspiel – Aufstockung Bestandsgebäude Diakonieklinikum Stuttgart	664
1.4.1	BIM-Ziele	650	5.1.2	Projektspiel – Neubau Bürogebäude mit angrenzender Produktion	667
1.4.2	BIM-Anwendungsfälle	650	5.1.3	BMVI-Pilotprojekt Gauchachtalbrücke	668
			5.1.4	Fazit Projektbeispiele BIM	671
2	Strategisches BIM	651	5.2	BIM und digitale Planung in der Werkplanung	671
2.1	BIM-Einführungskonzept und Stufenplan	652	5.2.1	Besonderheiten	671
2.2	Software und Formate	653	5.2.2	BIM-Prozesse im Stahlbau	672
2.2.1	Open und Closed BIM	653	5.2.3	Planungsautomatisierung von Stahlblechkonstruktionen	672
2.2.2	Common Data Environment	654	5.2.4	Projektbeispiel Opera House Dubai	673
2.2.3	Anforderungen an BIM-Software	654	5.2.5	Resümee	675
3	Operatives BIM	655	6	Digitaler Ausblick	675
3.1	Schwerpunkt Vorbereitung	656	7	Literatur	675
3.2	Schwerpunkt Koordination	658			
3.3	Der BIM-Prozess	659			
3.4	Schwerpunkt Lebenszyklus	661			
3.5	Bedeutung und Mehrwerte des digitalen Zwillings	661			

Die Entwicklungsschritte können durchaus gering sein. Bei der Umsetzung wird das Risiko stets minimal gehalten.

Weiterhin ist zu beachten:

- Organisation
 - BIM-Verantwortung ist themenübergreifend und übergeordnet anzusiedeln. Ein BIM-Verantwortlicher fungiert als der „BIM-Kompass“ für die Organisation. Er verbindet Change-, BIM- und Softwarewissen. Dabei wird die Geschäftsführung hinsichtlich der BIM-Ziele beraten und die Mitarbeiter bei der Umsetzung der BIM-Ziele unterstützt. Ein Titel wie „Head of BIM“ ist in der Praxis üblich.
 - Die endgültige Verantwortung für die BIM-Einführung liegt bei der Unternehmensführung. Zudem sind Key User für die entsprechenden Softwareprodukte vorzusehen.
 - Ein Jour fixe ist sinnvoll, etwa ein zweiwöchentlicher BIM-Circle, bei dem die Fortschritte eruiert und neue Maßnahmen gefördert werden.
- BIM/CAD-Büro-Standard
 - BIM-Standards sind von großer Bedeutung für eine erfolgreiche Projektabwicklung mit BIM. Allerdings muss das Team bereits ein gewisses Verständnis und BIM-Wissen besitzen, um diese Standards zu verstehen und erfolgreich anzuwenden. Aus diesem Grund sind die Standards auch anwendungsbezogen und in Etappen aufzubauen.
 - Solche Standards leben und werden stets weiter optimiert (BIM-Verantwortlicher). Wichtig ist, dass es im Vorfeld bereits ein BIM-Vorwissen und eine Schulung für die Standards gibt.
- Management

Das Management richtet das Unternehmen auf eine Wertschöpfung mittels BIM aus, hat eine Vorbildfunktion, unterstützt die Mitarbeiter aktiv und demonstriert Nachfrage und Interesse am BIM-Fortschritt. Leitende Mitarbeiter nehmen an Kursen selbst teil, bilden sich stetig weiter.
- Zu berücksichtigen bei Pilotprojekten
 - Da bei BIM eine Entwicklung und langfristige Optimierung angestrebt wird, ist jedes Projekt als Pilot zu sehen. Dabei werden kleine Wachstumschritte gesetzt. Moderate oder sogar geringe Erwartungen sind zu setzen. Unnötige Risiken sind zu vermeiden. Jedes Projekt hat dringend positiv zu verlaufen. Misserfolge erweisen sich in der Praxis immer als schwierig, bremsen die Motivation der Mitarbeiter für eine lange Zeit.
 - Zuerst ist eine saubere Modellierung zu erlernen. Das ist ab Stufe 3 („Laufen“) sinnvoll. Danach wird mit der Datenauswertung (z. B. Türlisten) begonnen. Im Anschluss folgt der Datenaustausch mit anderen Disziplinen. Eine gute, saubere Modellierung ist Basis für weitere Anwendungsfälle. Auch hier gilt: Datenaustausch und die Anwendungsfälle sind vor Projektbeginn zu testen. Bei

BIM-Projekten ist Vorbereitungszeit für die Projektorganisation vorzusehen.

- Ausbildung
 - BIM-Ausbildung ist von großer Bedeutung. BIM und Digitalisierung bedeuten eine immerwährende Veränderung und damit lebenslanges Lernen.
 - Schulungen unterscheiden sich nach der Zielsetzung:
 - A) Zertifikatorientierte Schulungen: Zertifikate dienen dazu, sich für ein Projekt zu qualifizieren. Dazu zählen beispielsweise zweitägige BIM-Basis-schulungen. Kammern bieten hierbei Schulungsinhalte an, die an VDI 2552, Blatt 8, angelehnt sind.
 - B) Kompetenzorientierte Schulungen: Hierbei handelt es sich um Schulungen, deren Fokus es ist, den jeweiligen Projekterfolg zu vergrößern. Diese Schulungen sind zum großen Teil individuell. Kompetenzbezogene Schulungen werden mit direktem Bezug zum nächsten Projekt durchgeführt. Das Gelernte wird direkt angewendet und eingeübt.

2.2 Software und Formate

BIM lässt sich auch bereits innerhalb nur einer Fachdisziplin gewinnbringend nutzen. Man nennt dies dann „little BIM“, also kleines BIM. Zum Beispiel in der Ausführungsplanung des Stahlbaus lassen sich durch die dreidimensionale Planung Kollisionen besser vermeiden und eine stetig aktuelle Materialliste bekommt man quasi nebenbei. Mehr Vorteile bringt BIM allerdings, wenn es nicht isoliert in einer Fachdisziplin, sondern übergreifend genutzt wird. Man spricht dann von „BIG BIM“, also großes BIM. Je mehr Beteiligte ihre Modelle austauschen, desto mehr Vorteile bringt BIM. Damit nun mehrere Fachdisziplinen ihre Modelle austauschen können, muss man sich im Vorfeld über die Datenaustauschformate Gedanken machen.

Alle vier Kombinationen gemäß Bild 8 haben ihre Berechtigung. Soll aber ein transparenter, effizienter und offener Markt für BIM-Leistungen, auch mit der Möglichkeit von Einzelvegaben, entstehen, so ist auf „open-BIG“ BIM hinzuarbeiten.

2.2.1 Open und Closed BIM

Eine Projektbearbeitung mit BIM lässt sich aus Sicht der verwendeten Software in zwei Kategorien einteilen. Wenn alle Beteiligten die gleiche Software nutzen, oder der Datenaustausch mittels proprietären Formaten stattfindet, spricht man von „closed BIM“. Ein Beispiel hierfür ist Autodesk Revit, welches vom Entwurf über die Statik und der Energiebedarfsanalyse bis zur Ausführungsplanung genutzt werden kann. Wird hingegen ein offenes Datenformat für den Austausch verwendet, so spricht man von „open BIM“. Offen ist ein Datenformat dann, wenn die Struktur öffentlich dokumentiert und frei von Lizenzgebühren nutzbar ist. Im Baubereich hat sich hier das IFC (Industry Foundation

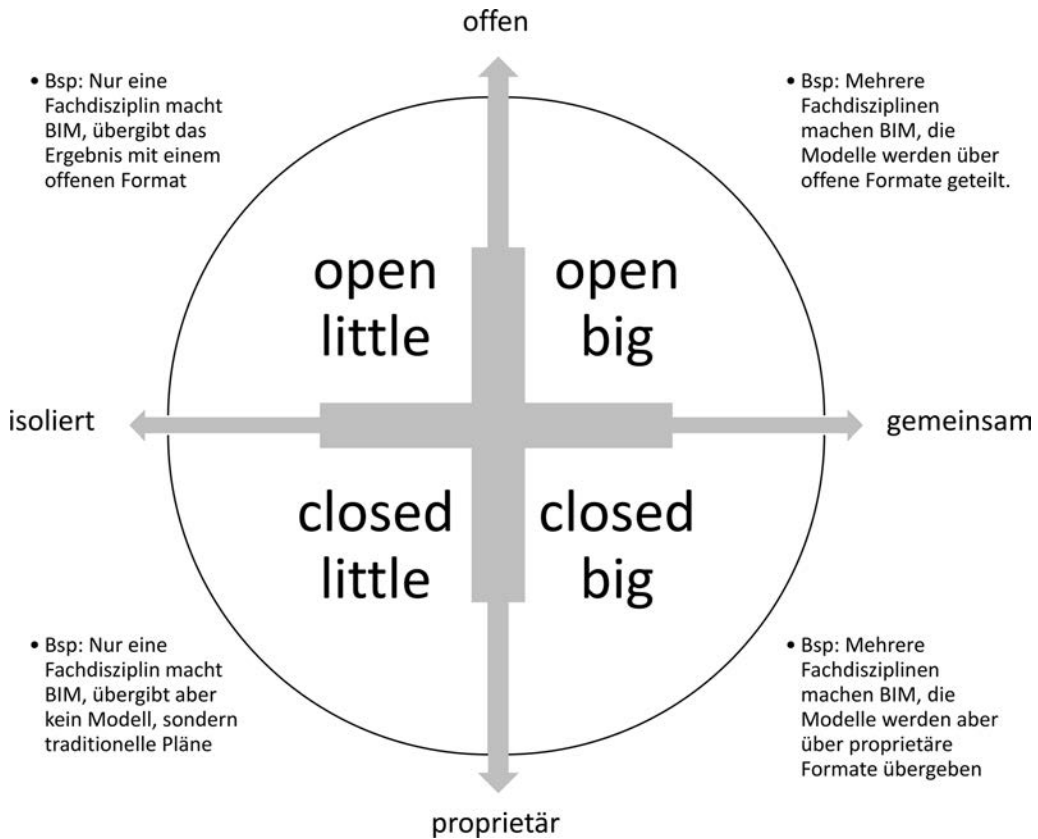


Bild 8. Zusammenhang von open – closed und little – big BIM

Classes) von buildingSMART durchgesetzt und ist als DIN EN ISO 16739 normiert.

Da BIM größere Vorteile schafft, je mehr Fachdisziplinen beteiligt sind, hier aber die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die verwendeten Softwarepakete keine direkte Schnittstelle untereinander haben, ist es wichtig, sich auf ein offenes Datenformat zu einigen. Unabhängig von der Vergabestrategie erlaubt dies die Kooperation aller Beteiligten, ohne Rücksicht auf die verwendeten Softwarepakete. Der Markt ist offen, da für die Bearbeitung keine spezifische Software vorgeschrieben werden muss. Es reicht, wenn die Software jedes Beteiligten die für ihn relevanten Informationen importieren und entsprechend exportieren kann.

2.2.2 Common Data Environment

Für eine effiziente Zusammenarbeit ist es unerlässlich, die Modelle und weitere Daten für alle Beteiligten in geordneter Weise vorzuhalten. Da nun nicht mehr Papierpläne verschickt werden, sondern elektronische Modelle, ist eine Projektplattform notwendig. Die DIN EN ISO 19650 sowie die VDI-Richtlinie 2552 sprechen hier von einem „Common Data Environment“, einer

„gemeinsamen Datenumgebung“. Diese kann, je nach Bedarf, sehr unterschiedlich ausgestattet sein. Das reicht von einer gemeinsamen Datenablage im Netzwerk bis zur Projektplattform mit Benutzer, Rollen, Rechtevergabe, Prozessunterstützung und Modellserver.

2.2.3 Anforderungen an BIM-Software

Damit eine Software BIM-fähig ist, muss sie nicht alle Fachdisziplinen unterstützen. Sie muss allerdings den von den Beteiligten definierten Datenaustausch unterstützen. Dabei muss bei der Ausschreibung der (Planungs-)Informationslieferung festgelegt werden, welche Informationen in welcher Form zu übergeben sind. Diese Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) müssen durch die gewählte Software erfüllbar sein. Da bei BIM die Elemente der Modelle üblicherweise eine 3-D-Repräsentation haben und die Elemente einzeln als Objekte ansprechbar sind, muss eine BIM-CAD-Software üblicherweise 3-D-Objekte unterstützen. Reine 2-D- oder auch 3-D-Software, welche nur Punkte, Striche oder Linien sowie Flächen und Schraffuren kennt, ist üblicherweise nicht BIM-fähig. Allerdings gibt es

auch BIM-Software, welche ohne 3-D-Geometrien auskommt, wenn die relevanten Informationen keinen Bezug zur Geometrie haben. Allerdings muss auch diese Software in der Lage sein, die nötige Information aus dem Austauschformat zu extrahieren und die neue, zu übergebende Information im geforderten Format herauszuschreiben.

Das Minimum zur Erfüllung dieser Anforderungen ist, jedem Objekt eine eindeutige Kennung, eine sogenannte UID (Unique Identifier), zuzuweisen und über den Zyklus Import-Bearbeitung-Export beizubehalten. Sofern IFC als Austauschformat definiert ist, muss die Software angeben, welche Modellansichtsdefinition (Model View Definition (MVD)) sie unterstützt (siehe Austauschformate – IFC weiter unten).

Austauschformate

Nebst den proprietären Formaten, welche nur in einer Closed-BIM-Umgebung zum Zuge kommen können, gibt es einige offene Datenformate, welche häufig in BIM-Projekten vorkommen. Diese sollen hier vorgestellt werden, die Liste ist allerdings nicht abschließend.

IFC

Dies ist das wohl wichtigste Datenformat für Bauinformationsmodelle. Es besteht meist aus einem 3-D-Modell, welches an die logische Gebäudestruktur angelehnt ist, sowie den Objekten verknüpften Eigenschaften. Dabei sind einige Attribute vorgegeben, wie zum Beispiel Dicke, Materialbeschreibung und Volumen bei Wänden. Es lassen sich aber auch frei Attribute erstellen, hier ist dann aber eine Dokumentation unter den Beteiligten (meist im BIM-Abwicklungsplan) notwendig, damit darauf zugegriffen werden kann.

IFC ist in DIN EN ISO 16739 definiert. Es legt ein konzeptionelles Datenschema und ein Dateiformat für den Austausch von Daten fest. Da dies sehr umfangreich ist, wird meist nur ein definierter Ausschnitt verwendet, dieser wird als „Model-View-Definition (MVD)“ bezeichnet. Eine bestimmte „Model-View-Definition“ wird festgelegt, um einen oder mehrere vereinbarte Abläufe zu unterstützen. Bei buildingSMART wurden MVDs für einige übliche Anwendungsfälle entwickelt, die wichtigste dabei ist die „Coordination View“ für den Anwendungsfall Koordination. Damit ein definierter Datenaustausch zwischen den Software-Anwendungen möglich ist, muss bekannt sein, welche „Model-View-Definition“ sie verarbeiten können.

CPI, cityGML, DXF, COBie

Es existieren weitere, zum Teil öffentlich dokumentierte, aber proprietäre Austauschformate, welche je nach Anwendungsfall und verwendeter Software ihre Berechtigung haben. Der Umfang der unterstützten Objekte und Attribute variiert dabei sehr.

BCF

Dieses offene, also öffentlich dokumentierte, Dateiformat wird für die Kommunikation zwischen den Beteiligten verwendet. Es werden Bauteile im IFC-Modell

referenziert und mit Kommentaren, Screenshots und einer Blickrichtung im Modell angereichert. Weiter lassen sich Bearbeiter zuweisen und ein Status nachverfolgen. Dies erlaubt eine dokumentierbare Kommunikation von Problemen zwischen den Gewerken, wobei jeder Beteiligte in seinem Modell bleibt. Einige CAD-Anwendungen unterstützen BCF direkt, für andere existieren Plug-Ins zum Nachrüsten. Dies entspricht also dem „Einwolken“ auf traditionellen Plänen.

BIM-Softwarebeispiele

Es folgt eine nicht abschließende Liste von Softwareanwendungen für verschiedene Anwendungsfälle, welche für die BIM-Arbeitsweise geeignet sind.

- Entwurf und Detaillierung
 - Autodesk Revit
 - Nemetschek Allplan
 - Graphisoft ArchiCAD
 - Trimble Tekla Structures
 - Nemetschek Vektorworks
 - Trimble SketchUp Pro
 - Dassault Solidworks
 - Digital Project (ehemals Gehry Technologies)
 - Bentley MicroStation
- Berechnung
 - Nemetschek SCIA und Frilo
 - Dlubal RFEM und RSTAB
 - SOFiStiK Structural Desktop
 - Autodesk Robot Structural Analysis
- 4D/5D
 - RIB iTWO
 - Vico Office Suite
 - G&W California.pro
 - ORCA
 - Softtech Avanti
- Koordination und CDE
 - Solibri Model Checker
 - Trimble Tekla BIMSight
 - Autodesk Navisworks
 - Vico Office Suite
 - thinkProject
 - Synchro Professional
 - Autodesk BIM 360
 - Oracle Aconex
 - Bentley ProjectWise
 - Allplan BIMplus
 - BRZ Project-Connect

3 Operatives BIM

Die Anwendung der Arbeitsmethode BIM unterscheidet sich im Vergleich zu einer traditionellen Projektentwicklung vornehmlich in drei Punkten.

Es handelt sich um die strategische Vorbereitung vor Planungsbeginn sowie eine intensivere Abstimmung zwischen den Gewerken (Bild 9) und dem lebenszyklusorientierten Ansatz.

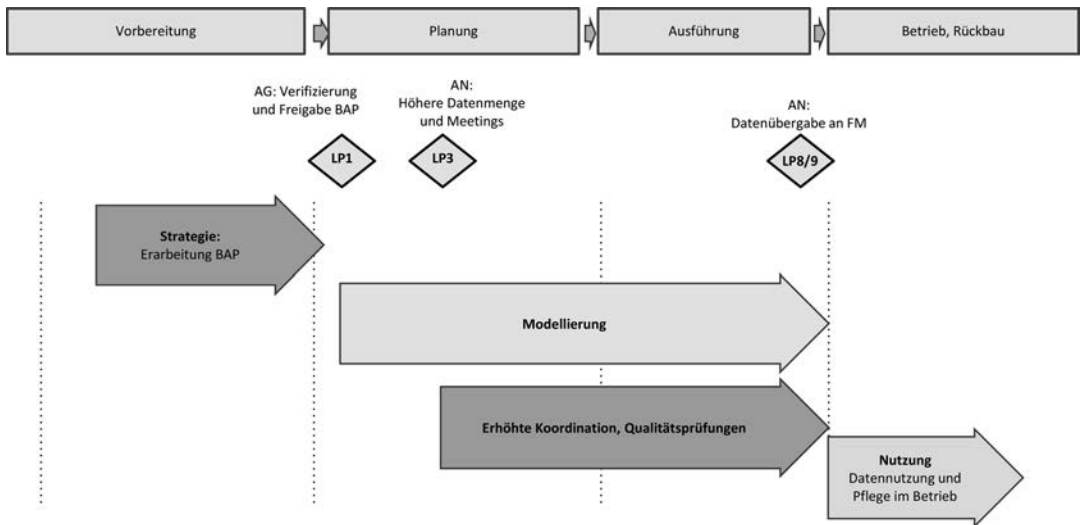


Bild 9. Die ersten zwei Schwerpunkte bei BIM-Projekten: Strategie in der Vorbereitung und erhöhte Koordination ab Ende Leistungsphase 3 / Anfang Leistungsphase 4 (Quelle: DT BAU – Jakob Przybylo)

3.1 Schwerpunkt Vorbereitung

Die Projektvorbereitung ist für den BIM-Prozess von großer Bedeutung. An dieser Stelle ist die BIM-Strategie für das jeweilige Projekt zu definieren. Sie entscheidet über die Wertschöpfung über den gesamten Bauwerkslebenszyklus und darüber, wie BIM dabei unterstützend eingesetzt wird. Ist die Arbeit im Projekt einmal aufgenommen, ist es sehr schwierig, die Beteiligten einzufangen und auf gemeinsame Konventionen der Zusammenarbeit einzuschwören.

Wie ein traditionell durchgeführtes Projekt beginnt auch ein BIM-Projekt mit einem Vertrag. Dieser dient als Grundlage für die Integration auf allen Projektebenen.

So werden durch den Bauherrn auf der einen Seite BIM-Ziele, BIM-Anwendungsfälle und Abgabeinformationen festgelegt. Auf der anderen Seite legt der Auftragnehmer die Verantwortlichkeiten, Softwareprodukte, Schnittstellen, Regelmeetings und vieles mehr zur Erbringung der Abgabeinformationen fest.

Dabei stehen vor allem zwei Dokumente im Vordergrund: die Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) und der BIM-Abwicklungsplan (BAP).

Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA)

Die AIA umfassen die BIM-Anforderungen des Auftraggebers. Dabei werden die BIM-Ziele, Dokumentationsanforderungen und weitere Punkte beschrieben:

- Auftraggeber BIM-Ziele,
- BIM-Anwendungsfälle,
- Beschreibende Festlegungen wie LODs,
- Mittel der Qualitätssicherung,
- Softwareanforderungen,

- Abgabeinformationen und Formate,
- ...

BIM-Abwicklungsplan (BAP)

Beim BAP handelt es sich um ein Formular, das der Auftraggeber an das Projektteam übergibt. Durch das Ausfüllen bestätigt das Projektteam die Durchführungskompetenz. Da die Projektbeteiligten wiederholt wechseln, dient es mindestens während der Gebäudeentstehungsphase als Nachschlagewerk für neue Teammitglieder und sollte stets aktuell gehalten werden.

Beispielhafte BAP-Inhalte sind:

- Projektbeschreibung,
- Rollen und Verantwortlichkeiten,
- Ablage gemeinschaftlicher Daten,
- BIM-Modellanwendung und Modellnutzung,
- Modell-Strukturen und Elemente,
- Lage der Modelle,
- Projektkoordinaten und Raster,
- Festlegungen zur Kollaboration,
- Prozesse und Software,
- Qualitätssicherung,
- ...

Sowohl die AIA als auch der BAP bilden eine zentrale Unterstützung für den Auftraggeber wie auch die Auftragnehmer. Sie sind hilfreich, um die Abstimmung auf zahlreichen Ebenen wie Software, Koordination, Richtlinien etc. transparent zu strukturieren und stets im Auge zu behalten.

Rollen

BIM-Rollen helfen, die Abstimmung auf den unterschiedlichen Ebenen zu steuern und zu sichern. Ähnlich wie bei traditionellen Projekten hängt bei BIM-Projek-

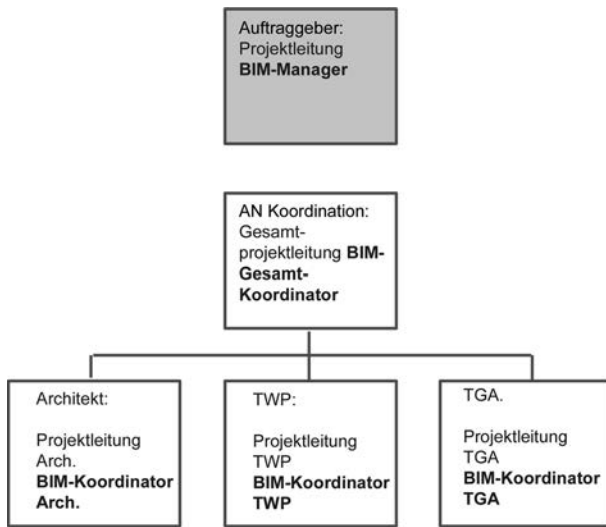


Bild 10. Mögliche Rollenaufteilung in einem BIM-Projekt. Die Aufteilung ist projektspezifisch. (Quelle: DT BAU – Jakob Przybylo)

ten die Ausgestaltung der BIM-Verantwortung von der Projektkomplexität und -größe ab. Vor allem bei größeren Projekten ist die Anzahl an Projektinformationen hoch und sollte entsprechend koordiniert werden (Bild 10). So werden in der Praxis die folgenden Rollen definiert und helfen die Zusammenarbeit zu gliedern:

- **BIM-Manager**
Er ist dem Projektleiter auf Auftraggeberseite untergeordnet. Seine Verantwortung liegt vor allem in der Definition der BIM-Anforderungen in den AIA und der Qualitätssicherung bei der Umsetzung.
- **Gesamtprojektkoordinator BIM**
Er ist dem Gesamtprojektleiter aufseiten der Ausführung untergeordnet. Seine Verantwortung liegt vor allem in der Definition der BIM-Umsetzung im BAP und der Qualitätssicherung bei der Umsetzung. Er agiert interdisziplinär.
- **BIM-Koordinator**
Er ist dem Projektleiter aufseiten der Ausführung für ein einzelnes Gewerk untergeordnet. Seine Verantwortung liegt vor allem in der BIM-Umsetzung und der Qualitätssicherung innerhalb seiner Disziplin.

Diese Aufgaben sind operativ und mit strategischen Verantwortlichkeiten für ein Unternehmen nicht zu wechseln. In kleinen Unternehmen sind Überschneidungen jedoch zu erwarten.

Tests

Mit der erhöhten Anzahl an Informationen und Systemen, die in BIM-Projekten genutzt werden, steigt das Fehlerrisiko. Systemupdates, Bugs und ähnliche Veränderungen führen dazu, dass beispielsweise der Datenaustausch fehlerhaft ablaufen kann.

Aus diesem Grund sind Tests dringend vor Projektbeginn unerlässlich, um in der dynamischen Projektphase auch das gewünschte Ergebnis sicher zu wissen. Genaue

Festlegungen wie etwa bezüglich der Softwareversion sind im BAP immer festzuhalten. Softwareaktualisierungen sind abzustimmen, zu testen und ggf. zu vermeiden.

Modellierung

Die BIM-Modelle werden basierend auf den Definitionen im BAP erstellt. BIM-Objekte, virtuelle Elemente mit der entsprechenden geometrischen und physikalischen Repräsentanz, bilden einzelne Bauteile für diese Modelle. Sie können über Objekt-Datenbanken aus einer Vielzahl von Objekten herangezogen oder je nach eigenen Bedürfnissen aufgebaut werden. So ist jedes Objekt für bestimmte Anwendungsfälle erstellt. Mithilfe definierter Parameter können beispielsweise Verknüpfungen mit Kostendatenbanken unterstützt werden. In den frühen Phasen werden Produkte oft nur als Kuben vorgehalten.

Vor diesem Hintergrund spielt der Begriff Level-of-Development (LOD) eine Rolle [5]. Mittels LOD wird die Granularität der Modellierung beschrieben. Er gleicht dem Zeichnungsmaßstab in der 2-D-Darstellung. So beschreibt der LOD 100 einfache Massenmodelle, während LOD 500 eine As-Built-Darstellung impliziert. Der LOD richtet sich nach dem jeweiligen Projekt und den dort erforderlichen Daten. Er ist im BAP zu definieren.

Dabei wird auch hier durch die Auswertung bestimmt, welche Elemente wie modelliert werden. So ist vorab zu erörtern, welche Informationen aus dem Modell zum Beispiel für eine modellbasierte Mengenermittlung zu gewinnen sind. Erst wenn der Zweck feststeht, die Anforderungen definiert sind, kann modelliert werden.

Häufig wird nur bis zum LOD 300, dem Maßstab 1:50 modelliert. Weiterführende Informationen wie Bodenleiten werden in 2-D oder als Attribut umgesetzt.

3.2 Schwerpunkt Koordination

Während auch die Zusammenarbeit vor Projektbeginn definiert wird, wird sie mit zunehmender Zahl an Informationen entscheidend. Beginnend mit dem Ende der Entwurfsphase, sind enge Koordinierungszyklen mit den Beteiligten durchzuführen. Sie werden bis zu wöchentlich aufgenommen und können beispielsweise auch am Bildschirm durchgeführt werden.

Ziel ist es, durch regelmäßige Abstimmungen die Anzahl an Koordinationsfehlern gering zu halten, die traditionell erst auf der Baustelle gelöst werden.

Fach- und Koordinationsmodelle

Entgegen dem theoretischen Ansatz, der eine Zusammenarbeit mittels eines zentralen BIM-Modells für das gesamte Projektteam beschreibt, wird die Arbeit in der Praxis häufig separiert. Hintergrund sind beispielsweise

eine heterogene Softwarelandschaft und große Datenmengen.

Dabei spielen Fach- und Koordinationsmodelle eine Rolle.

So arbeitet jede Fachdisziplin, wie etwa die Tragwerksplanung, auch an einem eigenen sogenannten Fachmodell. Die einzelnen Fachmodelle werden zu Besprechungen regelmäßig zu einem Koordinationsmodell zusammengesetzt (Bild 11). Dieses umfassende Modell hilft, Unstimmigkeiten aufzudecken. Diese werden nach Möglichkeit noch vor Ort am Computer gelöst.

Die Formate IFC und BCF (Abschnitt 2.2.3) spielen bei der Koordination eine große Rolle. IFC ermöglicht es, Modelldaten zu übertragen, die das Koordinationsmodell bilden. Bildlich betrachtet ist IFC wie ein PDF-Export aus einer Word-Datei zu sehen. So han-

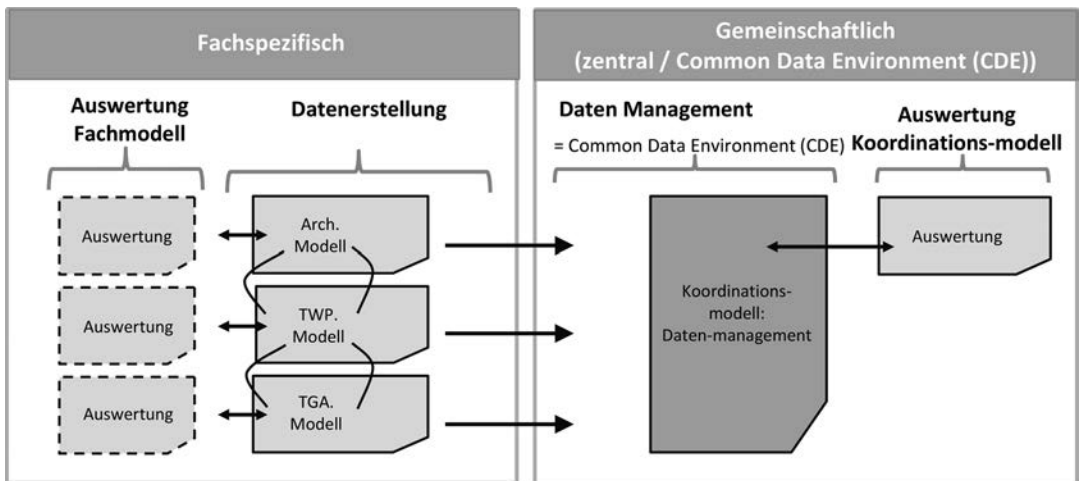


Bild 11. Aufteilung in fachspezifische Informationen links und gemeinschaftliche Informationen rechts (CDE). Links arbeitet jede Disziplin mit ihrem Fachmodell. Rechts befindet sich das Koordinationsmodell, in welches relevante Fachmodelle miteinfließen. (Quelle: DT BAU – Jakob Przybylo)



Bild 12. BCF fungiert als eine Nachricht, um Fehler zu markieren, zu beschreiben und z. B. per E-Mail weiterzuleiten. Der Empfänger sieht die gleiche Stelle auf die gleiche Art wie der Sender. Das kann auch bei der Behebung von Kollisionen verwendet werden. (Bildquelle: Obermeyer Planen + Beratern)

IFC-BCF Workflow

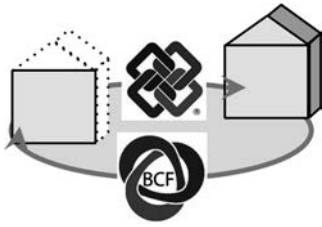


Bild 13. Allgemeine Funktionsweise von einem Workflow mit IFC und BCF. IFC wird aus einem Fachmodell in das Koordinationsmodell übertragen. Der Rücklauf erfolgt als Nachricht mit BCF. (Quelle: DT BAU – Jakob Przybylo)

delt es sich um Informationen für einen bestimmten Anwendungsfall wie Koordination oder Energieberechnung. Mit dem Export verliert die IFC-Datei, ähnlich der PDF, Informationen und kann nicht gleichermaßen importiert werden. Für den Informationsrücklauf vom Koordinationsmodell ist das BCF bestimmt. Dabei handelt es sich eine Form von Nachrichten mit den zu erledigenden Aufgaben, die auf das jeweilige Objekt im Modell fixiert werden. Aufgaben sind im Koordinationsmodell so zu sammeln und zu beschreiben. Nachfolgend werden sie den verantwortlichen Personen zugesandt. Bild 13 beschreibt das schemenhaft.

So entstehen Bereiche für disziplinspezifische und für gemeinsame Informationen (Bild 14). Während jede Disziplin ihr Fachmodell mit Modellierungswerkzeugen erstellt und pflegt, werden die gemeinsamen Informationen mittels einer Cloud-Plattform verwaltet. Sie

übernimmt Funktionen, die die Koordination unterstützen wie Aufgabenmanagement, Nutzerverwaltung oder Kollisionsprüfung. Wie in Abschnitt 2.2.2 erwähnt wird die Verwaltung der gemeinschaftlichen Informationen als Common-Data-Environment (CDE) bezeichnet.

3.3 Der BIM-Prozess

Eine Erfassung der Prozesse einer Organisation erlaubt nicht nur die Erstellung von Qualitätsmanagementhandbüchern, sondern auch die teilautomatische Unterstützung innerhalb von Datenverarbeitungssystemen, sowie den Abgleich der nötigen Kooperationsprozesse mit den Projektpartnern.

Jeder Prozess wird durch eine Reihe von Angaben beschrieben:

- Prozessname
- Prozessressourcen
 - verantwortliche Rolle
 - mitwirkende Rolle
 - benötigte Informationen
 - benötigte Werkzeuge
- Prozessergebnis
- Prozessbeschreibung
- Stellung in der Prozessabfolge
 - Vorgängerprozesse
 - Nachfolgeprozesse
 - Entscheidungspunkte
- weitere Angaben nach Bedarf.

Mit der Modellierungssprache BPMN (Business Process Modeling Notation, siehe ISO 19510) existiert eine formale und gut eingeführte Methode, Prozesse zu do-

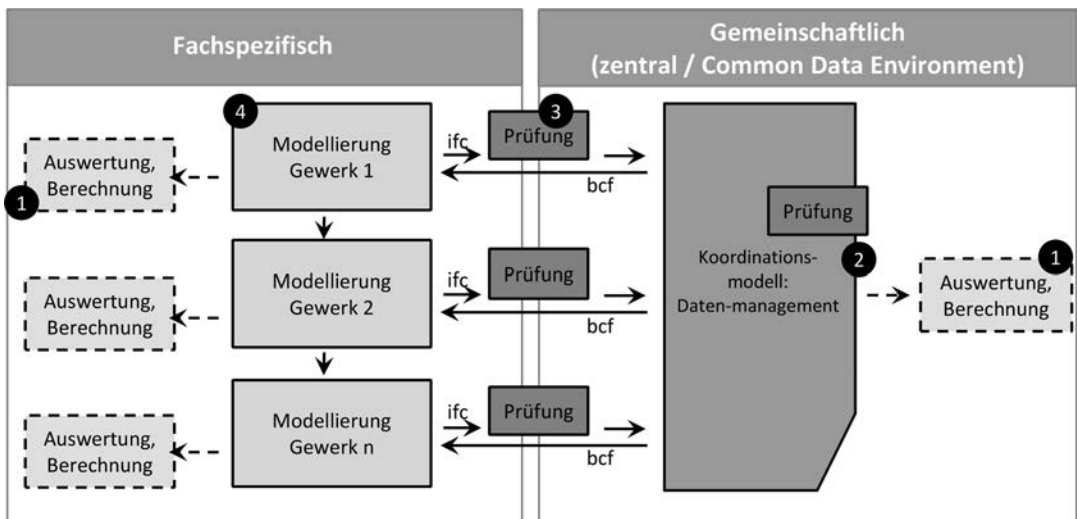


Bild 14. Eine sogenannte, schematische „BIM-Map“. Hierbei handelt es sich um die diagrammatische Zusammenstellung von Software und Datenaustausch, die z. B. bei einem BAP aufgenommen wird. Die Nummerierung besagt, in welcher Reihenfolge Festlegungen zu treffen sind. Die Auswertung kommt zuerst und gibt auch hier vor, was zu modellieren ist. Bild 16 demonstriert die weitergehende Darstellung eines dazugehörigen, modellierten Koordinationsprozesses. (Quelle: DT BAU – Jakob Przybylo)

kumentieren. Im Prozessdiagramm sind für die einzelnen Prozessschritte, welche selbst Prozesse sind, die Vorgänger, Nachfolger und Entscheidungspunkte ersichtlich. Hier bekommt jede Rolle eine eigene horizontale „Schwimmbahn“ zur Abgrenzung der Verantwortlichkeiten. Vertikal können einzelne Phasen abgetrennt werden.

Nebst den traditionellen Prozessen in einer Organisation kommen mit BIM weitere Prozesse für das Informationsmanagement hinzu. Da BIM einen erhöhten Grad an Kooperation zwischen den Projektbeteiligten

erfordert, sind die Prozesse an den Schnittstellen der Beteiligten von besonderem Interesse. Dabei lässt sich ein wiederkehrendes Muster identifizieren, dieser BIM-Referenzprozess läuft immer gleich, aber mit jeweils anderen Beteiligten und anderen Informationsanforderungen ab. Zusammen mit den bereits vorhandenen Prozessen innerhalb einer Organisation ergibt sich so ein BIM-Referenzablauf, welcher von Projekt zu Projekt angepasst werden kann.

Der Prozess besteht dabei aus zwei Teilen (Bilder 15 und 16):

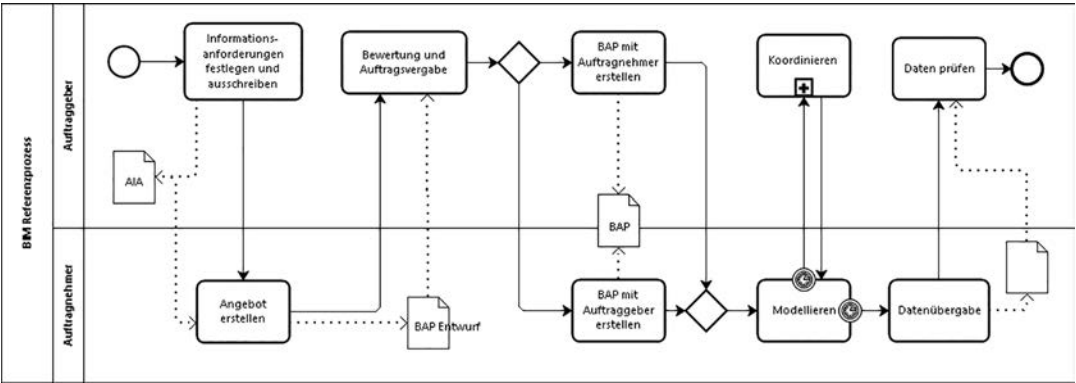


Bild 15. Referenzprozess

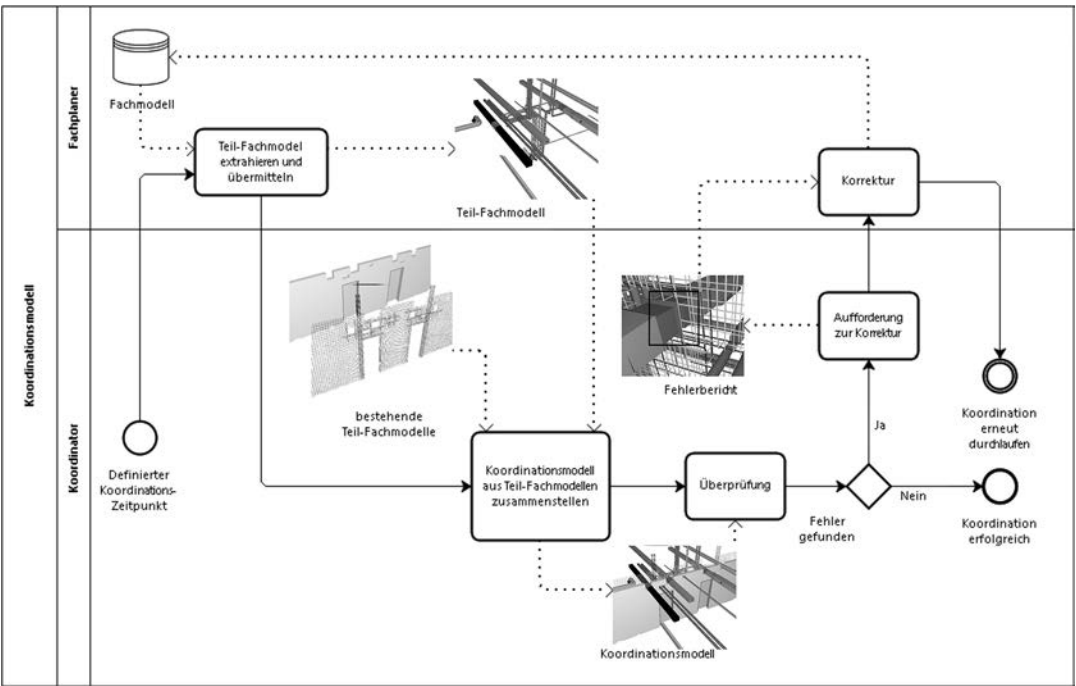


Bild 16. Darstellung der Koordination

BIM-Referenzprozess

- Der Auftraggeber definiert Informationsanforderungen und schreibt diese mittels Auftraggeberinformationsanforderungen (AIA) aus.
- Potenzielle Auftragnehmer zeigen mit einem Entwurf für einen BIM-Abwicklungsplan (BAP) auf, wie sie diese Anforderungen zu erfüllen gedenken.
- Der Auftraggeber vergibt den Auftrag, dabei werden ein oder mehrere Datenübergabepunkte im BAP definiert.
- Zu diesen Datenübergabepunkten wird die geforderte Information übergeben, geprüft und für die nächsten Bearbeitungsschritte freigegeben.
- Damit nicht erst zu diesem Zeitpunkt herauskommt, ob die Informationen mit denen der anderen Projektbeteiligten zusammenpassen, werden diese vom Auftraggeber vorher regelmäßig koordiniert.

Die Koordination selbst (Bild 16) wird wie folgt beschrieben:

Koordinationsprozess

- Alle relevanten Teilmodelle werden angefordert und zu einem Koordinationsmodell zusammengesetzt.
- Nach der Prüfung werden eventuelle Unstimmigkeiten mit den verantwortlichen Projektpartnern kommuniziert.
- Anschließend wird mit den korrigierten Modellen die Koordination erneut durchlaufen, bis alles passt.

Prüfung

Im Koordinationsprozess wird das Modell regelmäßig regelbasiert geprüft (engl. Fachbegriff „Checking“). Dabei kann es sich beispielsweise um die Verifizierung der Fluchttreppenbreite oder auch um die einheitliche Namensgebung von Parametern handeln. Auch hier ist das Ziel die Vermeidung von Fehlern, die sich vermehren, wenn Dateien weitergegeben werden.

Aufgrund der größeren Menge an Informationen sind die Modell-Qualität und ihre stetige, technische Validierung von zentraler Bedeutung. Nur wenn die Daten gepflegt sind, können sie weitergegeben und weiterverarbeitet werden.

Sowohl die Qualitätsbeschreibung in AIA und BAP als auch die Qualitätssicherung bei der Arbeit sind somit einzugliedern.

3.4 Schwerpunkt Lebenszyklus

In einem traditionellen Entstehungsprozess von Bauwerken entstehen zahlreiche Medienbrüche, die die Weitergabe von Projektinformationen unterbinden. Verträge sind traditionell darauf ausgerichtet, sich gegenseitig abzusichern. Die Darstellungen werden z. B. abstrahiert und sind für den nachfolgenden Projektbeteiligten nicht klar ersichtlich. Das widerspricht häufig den Interessen des Projekts.

Bei einem BIM-Projekt werden im Vorfeld zahlreiche Informationen erstellt, um sie auch nachwirkend zu nutzen. BIM ist nicht so sehr auf Phasen, sondern vielmehr auf Workflows über den gesamten Bauwerkslebenszyklus ausgerichtet. Leistungen können sich so verlagern.

Da sich die Bewirtschaftung von Bauwerken über 30, 40 Jahre erstreckt und die Bauphase vergleichsweise kurz ist, sind die Bewirtschaftungskosten sehr viel höher als die Baukosten. Aus diesem Grund legen Bauherren, die auch Betreiber sind, den Fokus der Optimierung vor allem auf die Betriebsphase.

Informationen wie Austauschzyklen oder SAP-Nummern werden in der Entstehungsphase des Projekts zunehmend eingeplant und mit dem BIM-Modell nachfolgend in den Betrieb übergeben. Dort besteht das Modell fort und wird mit einem System zur Gebäudeverwaltung (CAFM) verknüpft.

Es liefert wichtige Informationen darüber, wie was wo verbaut ist. Handwerker greifen auf diese Daten zu. Sie wissen beispielsweise, wie die Wartungszyklen sind. Sie können im Modell virtuell unter Abhängungen und in Wände blicken, um deren Beschaffenheit zu untersuchen, bevor Baumaßnahmen durchgeführt werden.

An der Stelle spielt der digitale Zwilling eine zunehmend wichtige Rolle. Er ist die virtuelle Kopie eines Bauwerks, steht als Informationslieferant für Experten oder Nutzer zur Verfügung.

3.5 Bedeutung und Mehrwerte des digitalen Zwillings

Die ständige Verfügbarkeit aller relevanten Informationen eines Bauwerks auf digitaler Basis ist der Kern des Mehrwerts des digitalen Zwillings. Das bildet die Grundlage für punktgenaue Aussagen zum aktuellen Gebäudezustand.

Die Möglichkeit des unmittelbaren Abrufs von zuverlässigen, einheitlich definierten und klar zugeordneten Informationen aus dem digitalen Zwilling dient allen Nutzern des Gebäudes als Arbeitsmittel. Diese Informationsform führt zu transparenten und intelligenten Entscheidungen. Entsprechende Beispiele sind:

- Der Verkauf einer Immobilie wird auf Basis einer automatisierten digitalen Due Diligence aufgebaut.
- Dem Facility Manager können direkt alle aktuellen Wartungsprotokolle inklusive einer vordefinierten Routenplanung zur Verfügung gestellt werden.
- Der Planer kann bei einem anstehenden Umbau direkt auf die Unterlagen und Modelle aus der Entstehungshistorie innerhalb des digitalen Zwillings zugreifen.

Das Ideal eines digitalen Zwillings ist die Spiegelung des realen physischen Bauwerks in die digitale Welt. Die erstellten Informationen in einem digitalen Zwilling werden vom Start des Projekts durch alle Phasen des Planens und Bauens hindurch generiert. Die Übergabe des fertiggestellten Bauwerks an den Betrieb ist der Beginn der weiteren Lebenszyklusbetrachtung. Im Betrieb des Bauwerks entwickelt der digitale Zwilling sein Potenzial, weil durchgehend die aktuellen Zustände des Gebäudes hinterlegt sind. Dadurch können Ist-Zustände mit den Soll-Zuständen verglichen und bei Bedarf die Differenz korrigiert werden. Eine vereinfachte Form des digitalen Zwillings kann aber auch ohne die

Hintergrunddaten aus den Phasen des Planens und Bauens aufgebaut werden. Hierzu werden vereinfachte BIM-fähige Modelle genutzt, welche halbautomatisch aus dem Scanning von Gebäuden generiert werden. Entscheidend ist es, zu verstehen, dass der digitale Zwilling eine intelligente Form der Digitalisierung von Immobilien darstellt. Er bietet wesentlich mehr als die Vernetzung von Informationen: Der digitale Zwilling ist die Plattform für Services von zahlreichen Effizienzsteigerungen durch Transparenz und Vereinfachung. CAD generierte BIM-Modelle und digitale Zwillinge unterscheiden sich in wesentlichen Merkmalen wie folgt:

1. Der digitale Zwilling liefert live die Auswertung des aktuellen Bauwerks. In den meisten Fällen existiert hier eine direkte Verbindung zwischen den Sensordaten und den jeweiligen Bauteilen. Die Grundlage hierzu ist das Internet of Things.
2. Der digitale Zwilling enthält im Idealfall sowohl alle relevanten Abgaben der 3-D-Modelle der Planung und der Baustelle als auch die relevanten Informationen zu den Bauteilen. Das As-Built-Modell kann entweder durch 3-D-Modelle hinterlegt oder auch durch farbgetreue Punktwolken abgebildet werden.
3. Die Datenmengen und Informationsströme sind bei einem digitalen Zwilling im Vergleich zum lokal gelagerten BIM-Modell webbasierend zu erreichen.
4. Der digitale Zwilling ist die Weiterführung der BIM-fähigen Informationen innerhalb einer single-source-of-truth (zentrale Informationsquelle) über den gesamten Lebenszyklus hinweg.
5. Die geballte Ansammlung von Informationen dient als Wissensdatenbank und nimmt die Kompetenzen der jeweiligen Fachkräfte auf. Auf diese Weise kann das „Knowledge Management“ zu dem realen Bauwerk für weitere Generationen vorgehalten werden.

Die Annahme liegt nahe, den digitalen Zwilling mit einem Common Data Environment (CDE) gleichzustellen, aber das CDE ist eines der Bestandteile der Digitalisierung. Das Anwender-Ziel geht bedeutend darüber hinaus: Es ist die Zentralisierung aller, nicht nur kooperativer Informationen, 3-D-Modelle und Daten im digitalen Zwilling.

Die Umsetzung des digitalen Zwillings im Bau- und Immobilienwesen

Um den Idealzustand eines digitalen Zwillings zu erreichen, bildet die BIM-Arbeitsweise den Startpunkt. Wie anfangs beschrieben ist das Building Information Modeling in erster Linie eine strukturierte digitale Arbeitsmethodik. Auf Grundlage von Standards werden Vorgehensweisen für einen Projektablauf definiert und die Resultate der einzelnen Schritte nach diesen Standards überprüft.

Das Werkzeug dieser Arbeitsweise ist die Verbindung von 3-D-Modellen mit Informationen zu den jeweiligen Bauteilen. Das Erzeugen dieser Informationsmodelle

ermöglicht es Kollisionen und den Bezug von Bauteilinformationen untereinander zu überprüfen. Diese Vorgehensweise erhöht die Transparenz für alle Beteiligten, beschleunigt eine qualitativ hochwertige Entscheidungsfindung und vereinfacht die Kommunikation innerhalb des Projektteams. Die BIM-Methode hat in der heutigen Anwendung den Schwerpunkt in der Planung. Der fließende Übergang der BIM-fähigen Informationen in die Bauphase, das BIM2field, ist der erste Schritt von BIM zum digitalen Zwilling. Hierbei können gescannte Punktwolken und Messwerte von Sensoren direkt mit Informationen aus den 3-D-Modellen verglichen und überprüft werden. Die daraus entstehenden Informationsströme können in statische und dynamische Daten gegliedert werden.

Statische Daten benötigen eine Aktion wie das Einpflegen von Menschenhand. Missverständnisse und mangelnde Kompetenz können zu schweren Fehlern führen. Die Fehlerquelle kann minimal sein, ist aber dennoch vorhanden und ein bestehendes Risiko. Als dynamische Daten kann die direkte Anbindung von Sensoren bezeichnet werden. Hierbei werden Informationen jeglicher Art vollautomatisch generiert, strukturiert und nach voreingestellten individuellen Bedürfnissen ausgewertet. Die Beschleunigung dieser direkten Verwurzelung vom realen Bauwerk und dem digitalen Spiegelbild anhand von Algorithmen ist die nächste Stufe des digitalen Zwillings. Diese konstanten Messungen von Veränderungen durch Sensorik schließen die Lücken im Soll-/Ist-Abgleich und bilden die Grundlage für die Steuerungen und Prognosen von Ereignissen.

Folgendes Fallbeispiel soll dies veranschaulichen: Die direkte Integration von Sensoren in den Bauteilen einer Pumpe sendet direkt Informationen an den digitalen Zwilling, ob diese Pumpe bereits an die Baustelle geliefert wurde. Diese Benachrichtigung in Echtzeit beinhaltet zusätzlich alle relevanten Dokumentationen, Varianten und technischen Spezifikationen für die autorisierten Nutzer vor Ort. Die „predictable maintenance“ – die vorhersehbare Wartung – geht einen Schritt weiter. Die einzelnen intelligenten Bauteile senden eigenständig direkt Informationen über das anstehende Versagen in den vernetzten digitalen Zwilling. Berechnet aus der Historie, dem Verschleiß und den aktuellen Sensorauswertungen. Das ist ein effizienter operativer Einsatz, bevor es zu Störungen, Verlusten und Ausfällen kommt.

Ein weiterer direkter Mehrwert solcher Vorgänge ist die Recyclingbetrachtung von Gebäuden und ihrer Bauelemente. Schwindende Ressourcen und Verschwendungen im Umgang von Materialien führen heute zu entsprechenden Gesetzen [15], die eine Recyclingfähigkeit der Abbauprodukte einfordern. Das „Knowledge Management“ des digitalen Zwillings sichert Informationen zu der tatsächlichen Materialbeschaffenheit und der Lage der Produkte im Bauwerk. Die Zugänglichkeit ist gewahrt und ein Austausch möglich. Auf Grundlage dieser Bedingungen können die tatsächlichen Kosten- und Aufwandsberechnungen über die Lebensphase er-

stellt werden. Dieses auf Zahlen, Daten und Fakten erzeugte Delta, die ermittelte Abweichung zwischen dem Soll- und Ist-Zustand, ist in erster Linie das digitale Kapital und der Gewinn der Eigentümer und Investoren. Der digitale Zwilling ist die Weiterentwicklung von BIM zur Smart City. Verstärkt durch den Einsatz künstlicher Intelligenz kann dieser Ansatz zu einem verantwortungsvolleren Umgang mit unserer Umwelt und unseren Ressourcen führen.

4 BIM-Besonderheiten der Digitalisierung im Stahlbau

4.1 Allgemeines

Die Planung, Fertigung und Montage in Stahlbauunternehmen ist von der modernen IT-Infrastruktur geprägt und bildet eine hochintegrierte Einheit. Die Digitalisierung hat in Stahlbauunternehmen längst mehrheitlich Einzug gehalten.

Auch wenn sich beim Blick in die heutigen Produktionsstätten zunächst nicht viel von denen aus den 1980er-Jahren zu unterscheiden scheint, steuert und begleitet eine moderne rechnergestützte Produktionssteuerung die Warenwirtschaft und Fertigung (Bild 17). Insbesondere für Probleme bei der systemischen Arbeitsteilung im Stahlbauunternehmen, mit den wechselnden Projektbeteiligten und der Örtlichkeit wie von der Werkstatt zur Montage, bietet die vernetzte IT-Infrastruktur den Lösungsansatz zur Steigerung der Effizienz im Unternehmen. Mit der Umstellung der Fertigungsdokumentation und Qualitätssicherung auf den Standard DIN EN 1090-1 wurde auch der Umgang mit den vielfältigen Dokumentationspflichten in den Informationsverarbeitungssystemen der Fertigung erfolgreich umgesetzt.

Die Stahlbauindustrie hat branchenintern frühzeitig mit der Entwicklung dateibasierter Schnittstellen wie z. B. den Übergabeformaten DSTV, IFC, SDNF, CIS/2 begonnen. Dies ermöglicht den heutigen quali-

tätsgesicherten Austausch ohne Datenverlust innerhalb der Branche. Diese Kompetenz ist für die erfolgreiche Integration in die zentrale Datenumgebung des BIM wieder gefragt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Stahlbauindustrie aufgrund der ausgeprägten Prozessorientierung und Kompetenz in der Informationsverarbeitung für die digitale, interdisziplinäre Zusammenarbeit am gemeinsamen digitalen Gebäudeabbild (BIM) bestens qualifiziert ist.

4.2 Herausforderung – Integration der digitalen Stahlbauplanung und Fertigung in das BIM

Die Planung nach der BIM-Methode stellt die am Stahlbau Beteiligten vor neue Herausforderungen. Während bislang eine digitale Integration der eigenen Planung, Fertigung und Montage als „Insellösung“ eine optimale Effizienz im Unternehmen sicherstellte, muss nun das System geöffnet und an das gemeinsame Gebäudedatenmodell bidirektional angebunden werden.

Für die Umstellung auf die BIM-Methode werden bestehende Arbeitsprozesse verändert und neue Rollen, wie z. B. die des BIM-Fachmodellkoordinators, erforderlich. Somit steht der Mitarbeiter bzw. der Mensch im Vordergrund, um diese Methode erfolgreich zu implementieren. Auch wenn die IT-Lastigkeit abschreckend wirken kann, überzeugt langfristig die transparente und sehr anschauliche Arbeit am Gebäudemodell. Hauptaufgabe der Unternehmensführung ist es, das erforderliche „Change Management“ konsequent voranzubringen und mit Verständnis und Motivation die Mitarbeiter zu begleiten. In Anlehnung an die bekannten Zertifizierungen, wie z. B. die DIN ISO 9001, ist es zielführend, bei der BIM-Implementierung ein „Qualitätshandbuch BIM“ als interne Basis zu verfassen und in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess fortzuschreiben. Nur so kann erfahrungsgemäß die Anforderung an die geschuldete Datenqualität aufrechterhalten werden.

Wer diese Hürde gemeistert hat und seine Insellösung zugunsten einer durchgängigen, über den Lebenszyklus des Bauwerks orientierten Arbeitsmethode verlässt, erhält im Projekt neue Chancen und Möglichkeiten, sich am Planungs- und Ausführungsprozess zu beteiligen. Bislang wurde durch eine stark sequenzielle Projektabwicklung – in der Regel durch die Unterteilung in HOAI-Phasen – eine Einflussnahme auf die Planungsprozesse in die späte Phase der Bauausführung verschoben. Wesentliche Sondervorschläge und Planungsoptimierungen sind somit nicht möglich, ohne Auswirkungen auf den Fertigstellungstermin zu haben. Durch eine gemeinsame und gleichzeitige Planung können diese Potenziale nun genutzt werden. Vor diesem Hintergrund gewinnt die als Building Information Modeling (BIM) bezeichnete Methode der vernetzten integralen Planung mit einem gemeinsamen digitalen Gebäudeabbild besondere Bedeutung.



Bild 17. Schweißarbeiten, parallele digitale Dokumentation
(© Firma Lacker)

Voraussetzung für eine erfolgreiche Integration des Stahlbaus im BIM-Prozess ist es, Informationsanforderungen des Bauherrn und gewünschte BIM-Anwendungsfälle klar zu benennen und einzufordern. Dies ist zum Beispiel ein BIM-basiertes Montagekonzept und zugehörige Baustellenlogistik oder die Hinterlegung von Informationen zu Wartungsanforderungen der Stahlbaubeschichtung im Gebäudemodell.

Erst mit dieser fokussierten Handlungsgrundlage kann im BIM-Abwicklungsplan (BAP) der Stahlbauunternehmer seine hohe Kompetenz im Bereich der Materialwirtschaft und Werkstückverfolgung zum Aufbau eines Gebäudedatenmodells einsetzen.

Ohne eine Festlegung und ungefilterte Einbindung aller Modellinformationen des Stahlbaus in das Gebäudemodell steigen Synchronisationszeiten der Modelle unverhältnismäßig an. Dies betrifft auch die Qualitätssicherung des Gebäudeinformationsmodells. Der Aufwand für die zyklischen Modellqualitätsprüfungen und das Einordnen von Kollisionspunkten kann die Modellfreigaben wesentlich verzögern und den Projekterfolg gefährden. Dieses aus der anfänglichen Euphorie und mangelnden Abstimmung entstandene Phänomen der Informationsüberfrachtung ist unbedingt abzuwenden. Es gilt daher stets das Gebot der „Datensparsamkeit“.

Ist dies gelungen, wird in Form einer integrierten Planung, mit virtuellen Gebäudemodellen und digitalen Gebäudeakten, eine stets transparente und aktuelle Planungsbasis für alle Beteiligten geschaffen. Die Kommunikation und Kooperation wird hierbei durch die Möglichkeit der gemeinsamen Begehung am Planungsmodell gefördert. Mit dem gemeinsamen Blick können so Schnittstellenthemen zielführend geklärt und eine optimale Detailplanung erreicht werden.

In aktuellen Stahlbauprojekten können folgende Hauptanwendungsfälle in der BIM-Planung festgestellt werden:

- Projektkommunikation und virtuelle Planungsbesprechungen (VDR) am Gebäudemodell,

- bauteilbezogene Aufgabenverwaltung im Planungsprozess,
- integrale Planung am gemeinsamen Modell für Berechnung, Detailausarbeitung, Mengenermittlung,
- Kollisionsprüfung am Gesamtmodell,
- Freigabenachverfolgung von Bauteilen,
- BIM-basiertes Logistikkonzept und Montagesimulation,
- Dokumentenmanagement und Qualitätssicherung in Ausführung und Montage,
- Übergabe eines Informationsmodells an den Bauherrn für Inbetriebnahme und Wartung.

In den folgenden Abschnitten werden die Anwendungsfälle und deren Umsetzung näher erläutert.

5 Projektbeispiele

5.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden Aspekte der BIM-Methode im Planen, Bauen und Betreiben dargestellt. Es werden ausgewählte „Best Praxis“ Beispiele für die Verwendung der BIM-Arbeitsmethodik im Stahlbau vorgestellt.

5.1.1 Projektspiel – Aufstockung Bestandsgebäude Diakoniekrankenhaus Stuttgart

Das Bauvorhaben „Aufstockung Diakoniekrankenhaus“ zeigt die erfolgreiche Umsetzung der BIM-Methode bei der Erweiterung der Operationsbereiche des Diakoniekrankenhauses Stuttgart.

Das Klinikum befindet sich in der Innenstadtlage mit nahezu keiner Möglichkeit für eine Baustelleneinrichtung. Die Aufstockung ist zudem in einer allseitig umbauten Innenhofsituation des Grundstücks vorgesehen, wo ebenfalls keine Lagermöglichkeiten verfügbar sind. Der Terminrahmen für die Projektumsetzung war aus der Inbetriebnahme anderer Gebäudeteile vordefiniert und stellte hohe Anforderungen an eine schnelle Realisierung. Auf Basis einer Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde die Entscheidung zugunsten einer Umsetzung der Aufstockung in Modulbauweise getroffen.

Die Ausführung musste unter uneingeschränktem Krankenhausbetrieb durchgeführt werden. Damit die bis zu 23 t schweren Module über die bestehenden Gebäude gehoben werden durften, wurden die Auswirkungen und Schäden eines möglichen Modulabsturzes bei der Montage im Vorfeld untersucht und bewertet.

Projektspezifische Herausforderungen

Die Aufstockung in Modulbauweise umfasste insgesamt zwei Vollgeschosse mit einer erhöhten Technikzentrale (Bild 18). Neben der Komplexität, die jedes Projekt im Krankenhausbau mit sich bringt, stellte zusätzlich sowohl die bereits beschriebene räumliche Situation mit der damit verbundenen Logistik als auch die statischen Rahmenbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Es handelte sich, wie in vielen Pro-



Bild 18. Modulbau Diakoniekrankenhaus (© Boll und Partner)