

# Ersatz von Auflagerkonsolen für schwere Kranbahnträger im Bauwerksbestand

Dipl.-Ing.(FH) Alexander Dreiling, Dipl.-Ing. Marco Rieche, Dipl.-Ing. Peter Kretzschmar  
HOCHTIEF Engineering GmbH, Consult IKS, Frankfurt am Main

## KURZFASSUNG

*Mit Ende des 2. Weltkrieges waren weite Teile Deutschlands und der Industriegebiete zerstört. Nach einer Phase von Reparaturen und Erweiterungen wurden viele Betriebe auf dem Gebiet der Bundesrepublik und der DDR in den 1960er und 1970er Jahren neu errichtet oder umfassend modernisiert. Die in dieser Zeit entstandenen Industriebauten sind mittlerweile mehr als 50 Jahre in Betrieb und die rechnerisch ermittelten Lebensdauern sind oftmals überschritten. Neben einer verlängerten Nutzung der Anlagen wurden diese vielfach erweitert, neugestaltet und müssen oft höhere Produktionsbelastungen ertragen, als während der Errichtungsphase ermessen wurde. Demzufolge ergeben sich für die Erneuerung von alten Bestandsbauten und deren Kranbahnen hier im Besonderen völlig andere Randbedingungen als beim Neubau „auf der grünen Wiese“.*

*Am Beispiel einer sehr komplexen Umbaumaßnahme zur Erneuerung einer Kranbahn im industriellen Bestand eines Hüttenbetriebes soll die Herangehensweise bei der Umsetzung einer solchen Aufgabenstellung, beginnend bei der Verfassung der Aufgabenstellung über mögliche Variantenstudien, materialtechnische Untersuchungen der Altbestandskonstruktion bis hin zur Fertigung und Montage dargestellt werden.*

### 1 Baumaßnahme in aller Kürze

In dem vorliegenden Beispiel handelt es sich um eine Krananlage mit „schwerem Kranbetrieb“ (Beanspruchungsklasse S7 nach DIN EN 1991-3 [1]) in einer Kupferhütte, welche in Stahlbauweise errichtet und aufgrund der rechnerisch erschöpften Lebensdauer (aus Sicht der Materialermüdung) sowie der gewünschten Kapazitätssteigerung in jüngster Vergangenheit ausgetauscht und erweitert wurde. Neben den Kranbahnträgern selbst mussten alle vorhandenen Auflagerkonsolen nach umfangreichen statischen und werkstofftechnischen Untersuchungen neu konzipiert und ersetzt werden, um den Beanspruchungen für die Dauer des geplanten Kranbetriebes gerecht zu werden.

Seit der Errichtung Anfang der 1970er Jahre wurden auf der Kranbahn zwei Brückenlaufkrane mit jeweils einer Hubkapazität von 85 t im schweren Kranbetrieb betrieben. Im Zuge

der umgesetzten Ersatzmaßnahme wurde auf Wunsch des Betreibers die Kapazität der neuen Krananlage auf drei Krane mit jeweils 125 t Hubkapazität bei selber Nutzung und gleichzeitig Verdopplung der planmäßigen Regelnutzungsdauer von 25 auf 50 Betriebsjahre gesteigert.

Die neue Kranbahn besteht aus Kranbahnträgern mit geschweißten Drei-Blech-Querschnitten und einer Bauhöhe von 1,9 bis 2,5 m, welche als statische Ein-, Zwei- bzw. Vierfeldträgersysteme mit einer Spannweite von 14 bis 25 m ausgebildet und über Konsolen auf Stahlstützen des Gebäudes gelagert sind (Bild 1). Die Auflagerkonsolen wurden entweder in die Stützen integriert oder mit einer Auskragung an die Stützen angebracht. Die Notwendigkeit der Differenzierung liegt in der Bestandskonstruktion der Stützen und den vorhandenen Platzverhältnissen begründet.

Die Erneuerung der Krananlage erforderte aufgrund der völlig neuen Randbedingungen



Bild 1: Übersicht Kranbahn

eine detaillierte statische Bewertung des in Stahlbauweise errichteten Hallentragwerks. Bei üblichen Hallen mit schweren Krananlagen sind die Beanspruchungen der Stützen und Aussteifungssysteme der Halle infolge der Lasten aus Kranbetrieb i. d. R. deutlich höher als infolge von Wind, Schnee etc., sodass – wie auch im vorliegenden Fall – das bestehende Hallentragwerk an den maßgebenden Stellen vor dem Austausch der Kranbahnträger sehr aufwändig verstärkt werden musste, worauf später jedoch nicht näher eingegangen wird.

## 2 Planungsgrundsatz

Viele Industrieanlagen werden quasi im Dauerbetrieb betrieben. Unterbrechungen der Produktion für die Durchführung von Instandhaltungs- oder Umbaumaßnahmen sind unerwünscht, da sie aus technologischen Gründen mit hohem Aufwand oder hohen Produktionsausfallkosten verbunden sind. In solchen Fällen ist es daher aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll, Verstärkungs- und Ersatzkonstruktionen im Hinblick auf Materialeinsparungen zu optimieren. Vielmehr sollte einer Minimierung der Produktionsstillstandszeiten durch Planung entsprechender Konstruktionsdetails der Vor-

zug gewährt werden, indem z. B. möglichst viele Maßnahmen vor dem Stillstand des laufenden Betriebes vorbereitet und umgesetzt werden und die Konstruktion montagefreundlich gestaltet wird. Es wurden unter Einbezug der Montagefirma, des Betreibers und eines Materialprüflabors verschiedene Ausführungsvarianten der Ertüchtigungsmaßnahmen an den Konsolen diskutiert und statisch untersucht, welche nachfolgend vorgestellt werden.

## 3 Konstruktive Gestaltung und Risiken

### 3.1 Variante 1 – geschweißte Querschnittsergänzung

Zunächst bietet sich die naheliegende Variante an, nämlich bestehende Konsolen durch Anschweißen zusätzlicher Blechlamellen ohne Veränderungen der Bestandskonstruktion zu verstärken. Diese Variante hat gegenüber anderen den entscheidenden Vorteil, dass sie i. d. R. quasi im laufenden Betrieb ohne längere bzw. zusammenhängende Produktionsunterbrechungen ausgeführt werden kann.

Für die Kranbahnträgerkonsolen stellen die zyklisch auftretenden, vertikalen Kranlasten die

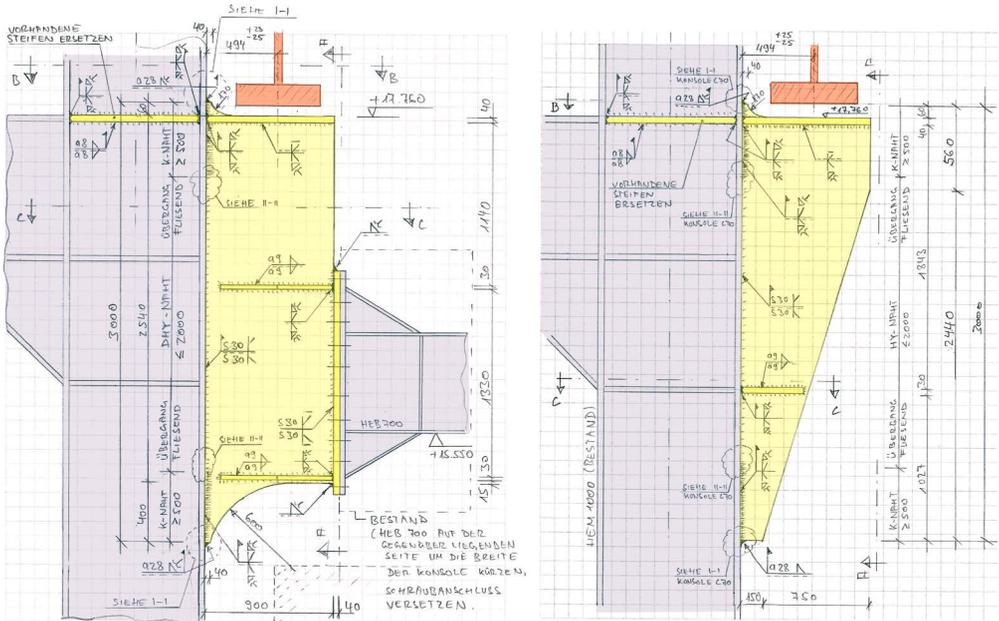


Bild 2: Geschweißte Varianten der Sonderkonsolen (links mit Kragarm)

Hauptbeanspruchung dar. Aus diesem Grund sind für Auflagerkonsolen und ggf. auch für die Stützen der Kranbahnträger i. d. R. Ermüdungsnachweise zu führen. Beim Austausch von Kranbahnen im Bestand ist zu beachten, dass die Konsolen aus dem bisherigen Kranbetrieb bereits eine ermüdungsbedingte Materialschädigung erfahren haben, welche bei den Ermüdungsnachweisen der Konsolen für die weitere Nutzung in der Gesamtschädigungsberechnung berücksichtigt werden muss, sofern das vorgeschädigte Material/Bauteil nicht ausgetauscht bzw. auch zukünftig durch Kranlasten beansprucht werden soll. Des Weiteren muss ggf. durch zusätzliche Untersuchungen sichergestellt werden, dass die mechanischen Eigenschaften des Bestandsmaterials und die Ausführungsqualität der Schweißnähte den in den aktuellen Bemessungsvorschriften unterstellten Anforderungen genügen.

Im vorliegenden Fall konnte an den maßgebenden Schweißnahtkerbdetails der Bestandskonsolen bereits für die bisherige Nutzung keine ausreichende Ermüdungssicherheit nachgewie-

sen werden. Zudem wurden im Rahmen einer visuellen Prüfung an den relevanten Schweißnähten Oberflächenunregelmäßigkeiten in Form von unzulässigen Einbrandkerben, Poren und Rissen festgestellt. Das vorgeschädigte Material barg daher ein potenzielles Risiko für die Entstehung und Ausbreitung von Rissen während der weiteren Krannutzungsperiode, sodass eine vom Betreiber priorisierte Verstärkungsvariante der Bestandskonsolen ohne Eingriffe in die Bestandskonstruktion und Produktionsstillstände nicht möglich gewesen ist. In der Konsequenz waren eine Beseitigung des ermüdungsgeschädigten Materials in den Schweißnahtbereichen der Bestandskonsolen zu den Stützen und damit ein vollständiges Abtrennen einiger Kranbahnträgerkonsolen (vier Sonderkonsolen) unumgänglich.

### 3.2 Variante 2 – Altstahl, ein Risiko?

Für die vier an den Stützen auskragend angeschweißten Sonderkonsolen wurde eine Lösung erarbeitet, welche einen Kompletttausch der Bestandskonsolen, inklusive der in den Stützen

angeordneten Steifen, vorsah. Die alten Konsolen sollten am Anschnitt zum Stützenflansch abgetrennt und an der gleichen Stelle neue, in der Werkstatt vorgefertigte Konsolen angeschweißt werden. Nach dem Abtrennen der alten Bauteile sollten die Schweißnahtbereiche am Stützenflansch blechen beschliffen und vor der Montage neuer Konsolen einer Oberflächenriss- und Volumenprüfung unterzogen werden, um Fehler im Grundmaterial auszuschließen.

Die neuen Konsolen wurden für die vorhandenen Beanspruchungen aus Kranbetrieb bemessen und bestanden im Wesentlichen aus einem 90 mm dicken, vertikalen Blech mit einer Bauhöhe von ca. 3 m, mit daran am oberen Ende seitlich angeschweißten, 40 mm dicken horizontalen Auflagerblechen (Bild 2). Aufgrund hoher Ermüdungsbeanspruchungen war i. d. R. eine Durchschweißung der Bleche erforderlich.

Die Baustellenschweißnaht zwischen dem Stützenflansch und dem vertikalen Blech konnte derart optimiert werden, dass eine vollständige Durchschweißung nur lokal in den hochbeanspruchten Bereichen (am oberen und unteren Blechende) aufgrund der notwendigen Kerbfalleinstufung bei dem Ermüdungsnachweis gewährleistet werden musste, wodurch das Schweißnahtvolumen und somit die erforderlichen Schweißarbeiten auf der Baustelle erheblich minimiert würden.

Für die zehn in die Stützen integrierten Regelkonsolen bestand der Lösungsansatz darin, das horizontale Konsolblech, die Steifen in den Stützen sowie die vertikale Konsolsteife nach vollständiger Beseitigung ihrer ermüdungsgeschädigten Schweißnähte und Bearbeitung der

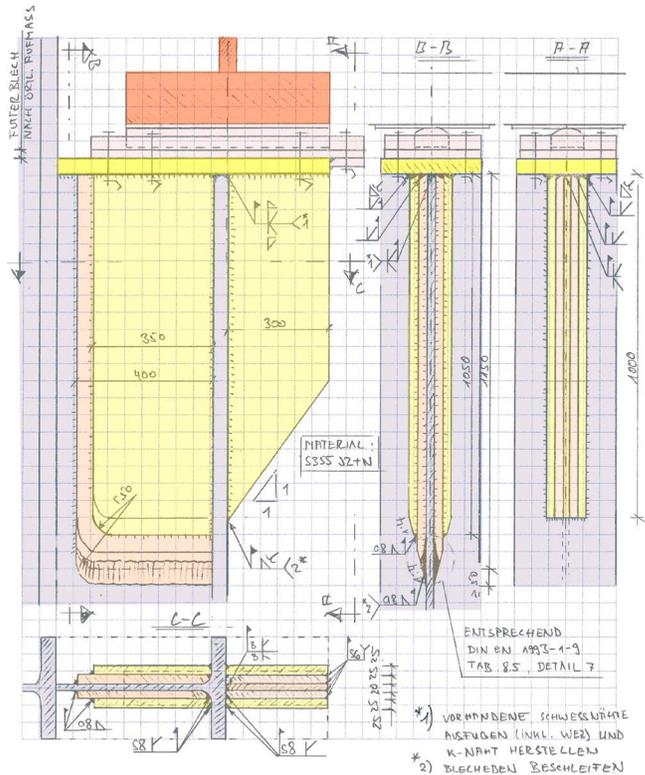


Bild 3: Lamellenverstärkte Variante der Regelkonsole

Stützenoberfläche zu ersetzen und den Stützensteg durch mehrere angeschweißte Blechlamellen zu verstärken (Bild 3). Aufgrund der notwendigen hohen Kerbfalleinstufung bei den Ermüdungsnachweisen mussten die vertikalen Bleche am Anschluss zum horizontalen Auflagerblech vollständig durchgeschweißt werden. Die Stegverstärkungen wurden aus mehreren dünneren Blechen anstelle von wenigen dicken Blechen geplant. Durch diese konstruktive Maßnahme konnte an durchgeschweißten Nähten das Schweißnahtvolumen und damit kostbare Montagezeit deutlich reduziert werden.

Bei den Bestands- und den neuen Detaillösungen der Konsolen werden die Lasten aus den Konsolen planmäßig über den Stützenflansch in den Stützensteg bzw. Steifen durchgeleitet, wodurch dieser lokal durch hohe Zugspannungen in Dickenrichtung des Blechs beansprucht wird.

Es muss daher sichergestellt sein, dass das Stützenmaterial in statisch wichtigen Bereichen frei von herstellungsbedingten Inhomogenitäten ist. Diese können z. B. als parallel zur Walzoberfläche flächig ausgedehnte Materialtrennungen innerhalb des Halbzeugs vorliegen. Solche „Dopplungen“ entstehen durch das Plattwalzen von Hohlräumen (Lunker), welche sich aufgrund der Wärmeschrumpfung bei der Erstarrung der Stahlschmelze innerhalb des Werkstoffes bilden können.

Des Weiteren weisen gewalzte Stahlerzeugnisse richtungsbezogen unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf (Anisotropie). Dabei ist ihr Formänderungsvermögen bei Beanspruchung in Dicken-, also z-Richtung des Walzerzeugnisses gegenüber Längs- und Querrichtung meist vermindert. Ursache dafür ist die beim Walzen entstehende schichtweise Anordnung von nichtmetallischen Einschlüssen (Sulfide, Oxide, Silikate) parallel zur Walzoberfläche, welche plättchen- oder zeilenförmig im Werkstoff vorliegen können. Nach Beanspruchung der Walzerzeugnisse in Dickenrichtung können beim Vorliegen der genannten Gefügefehler Brüche in Form von flächigen bzw. terrassen- oder lamellenförmigen Materialtrennungen auftreten. Diese treten häufig bereits nach dem Schweißen infolge Schrumpfspannungen der Schweißverbindung auf und stellen überwiegend ein Fertigungsrisiko dar.

Während Dopplungen mittels praxisüblicher Ultraschallprüfung nachgewiesen werden können, sind Aussagen zur Terrassenbruchneigung des Materials mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren nicht möglich.

Ein Kennwert für das Formänderungsvermögen ist die Brucheinschnürung  $Z$ , welche im Zugversuch nach DIN EN 10164 [22] durch Beanspruchen der Proben senkrecht zur Erzeugnisoberfläche zu ermitteln ist. Die entsprechenden Regelungen zur Bewertung der Terrassenbruchneigung in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl wurden erstmals mit der Veröffentlichung von DASt-Richtlinie 014 im Jahr 1981 [3] geschaffen und in gleicher Form in die derzeit

gültige Vorschrift DIN EN 1993-1-10 [4] übernommen.

Zur Durchführung von Schweißarbeiten an historischen Stählen sind darüber hinaus Kenntnisse über den vorliegenden Werkstoffzustand von Nöten, welche oft aus der fehlenden Bestandsdokumentation nicht hervorgehen. Für moderne unlegierte Baustähle ist ihre Eignung zum Schmelzschweißen mit der Einführung der europäischen Norm DIN EN 10025 [5] vorgeschrieben. Bei der schweißtechnischen Verarbeitung der Altstähle muss ihre Schweißeignung nachträglich z. B. in Anlehnung an das Merkblatt WTA E-7-3-05/D [6] bewertet werden. Insbesondere Stähle, die vor 1980 hergestellt wurden, können neben der erwähnten Anisotropie aufgrund ihrer Legierungszusammensetzung Seigerungszone aufweisen oder zu alterungsbedingter Versprödung neigen, die neben den mechanischen Eigenschaften die Schweißeignung des Werkstoffes negativ beeinflussen und in der Konsequenz völlig neue konstruktive Detaillösungen erfordern können. Des Weiteren ist die Gefahr durch Mehrfachschweißungen zu hinterfragen.

Für das inzwischen mehr als 50 Jahre alte Material der Gebäudestützen lagen keine ausreichenden Informationen zur zuverlässigen Bewertung der materialbezogenen Risiken vor. Die bisher vorgestellten geschweißten Detaillösungen der Konsolen bargen vor allem die Gefahr, dass sie nicht wie geplant umgesetzt werden können, sofern im Materialgefüge der Stützen unzulässige Ungenzen durch zerstörungsfreie Prüfungen im Rahmen der Bauausführung festgestellt werden. Das wiederum würde eine Ersatzplanung erfordern und damit verbunden zu Verzögerungen und Produktionsausfällen führen.

Es wurden von einem Materialprüflabor an ausgewählten Stellen der Bestandsstützen Materialproben entnommen und das Material hinsichtlich der chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften untersucht, worauf im Abschnitt 5 näher eingegangen wird. Parallel dazu wurden neue Konstruktionsva-

rianten der Auflagerkonsolen gesucht, welche durch entsprechende konstruktive Gestaltung unabhängig von den genannten Materialrisiken sind und eine Zeitersparnis bei der Montage ermöglichen könnten.

### 3.3 Variante 3 – Schrauben oder Schweißen?

Für die Sonder- und die Regelkonsole wurde auf Vorschlag der ausführenden Stahlbaufirma eine geschraubte Ausführungsvariante mit hochfest vorgespannten Passschrauben untersucht. Im Rahmen der Bearbeitung hat sich jedoch herausgestellt, dass die Beanspruchungen der Kranbahnträgerkonsolen im vorliegenden Fall derart hoch sind, dass keine ausreichende Ermüdungssicherheit der Konstruktion für die geforderte Regelnutzungsdauer der Kranbahn von 50 Jahren aufgrund einer vergleichsweise geringen Ermüdungsfestigkeit der Schrauben für Zugbeanspruchungen nachgewiesen werden kann und der Lösungsansatz daher verworfen werden musste.

Schraubenverbindungen können bei Umbaumaßnahmen an historischen Bestandsbauwerken, wo oftmals keine genügenden Informationen zum Gefügestand des Altstahls vorliegen, gegenüber Schweißkonstruktionen Vorteile bringen oder sogar die einzige Möglichkeit zur Verbindung von Bauteilen sein, wenn der Stahl z. B. nicht schweißgeeignet ist. I. d. R. bringen Schraubenverbindungen auch Zeiteinsparungen bei der Montage.

Grundsätzlich sollten nach Auffassung der Verfasser planmäßig wechselbeanspruchte Schraubenverbindungen an Kranbahnen mit schwerem Kranbetrieb vermieden werden. Diese erfordern einen verhältnismäßig hohen Aufwand und spezielle Kenntnisse bei ihrer Auslegung sowie einen höheren Fertigungsaufwand der Verbindungsstöße. Auf Zug wechselbeanspruchte Schrauben müssen i. d. R. aus Gründen der Tragsicherheit vorgespannt werden. Bei Verlust der Vorspannkraft, z. B. infolge von Setzungseffekten der Trennfugen, Relaxation der Schraube oder Losrütteln infolge dynamischer Beanspruchungen in Kombination mit Loch-

schlupf, können bereits wenige Lastwechsel zu Ermüdungsbrüchen der Schrauben und zum Versagen der Verbindung führen. Erfahrungsgemäß kommt es in der Praxis regelmäßig vor, dass sich Schraubenverbindungen an hochbeanspruchten Kranbahnen selbsttätig lösen und daher einen höheren Inspektionsaufwand erfordern, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

### 3.4 Variante 4 – geschweißt mit Aussparung der Stütze

Bei den zuvor erwähnten geschweißten Varianten der Konsolen stellte das Versagen der geschweißten Kreuzstoßverbindungen der neuen Konsolenbleche und dem bestehenden Stützenflansch aufgrund nicht auszuschließender unzureichender Materialeigenschaften des Flansches das größte Gefährdungspotenzial für die Bauausführung und den weiteren Kranbetrieb dar. Insbesondere bei auskragend an die Stütze angeschweißten Sonderkonsolen ist das Risiko, dass im Falle des Versagens der Verbindung der Kranbahnträger seine Lagesicherheit verliert, da Risse möglicherweise nicht rechtzeitig entdeckt werden und sich schnell ausbreiten könnten, als hoch zu bewerten. Für die Sonderkonsolen wurde eine neue Lösung entwickelt und letztendlich umgesetzt, welche u. a. einen lokalen Austausch des Stützenflansches im Bereich der Kranbahnträgerauflagerkonsolen vorsah (Bild 4).

Im Bereich der Auflagerkonsolen wurden der Flansch inkl. ca. 200 mm Steg der Bestandsstützen mittels thermischen Schneidens herausgetrennt (Bild 5, links und Bild 6) und die Schnittkanten für das Anschweißen neuer Bauteile vorbereitet. Anschließend wurden die komplett in der Werkstatt vorgefertigten neuen Konsolenelemente in die hergestellten Stützensparungen eingesetzt, ausgerichtet und mit den Stützen mittels Stumpfnähten verschweißt. Bild 5, rechts und Bild 7 zeigen das Einbauteil für die Sonderkonsolen.

Der neue Ersatzflansch wurde zur Durchführung des 90 mm dicken vertikalen Konsolblechs





**Bild 6:** Sonderkonsolen – Stützenverstärkung und Aussparung für neues Einbauteil

Insgesamt konnten die Konsolen im Hinblick auf die Lasteinleitung in die Stützen und hinsichtlich der Kerbwirkung in ihren Details optimiert, die kritischen Kreuzstöße am Bestandsmaterial eliminiert und damit optimal die Bestandskonstruktion integriert werden. Für die Dauer des Montagezustandes der Sonderkonsolen musste der durch Aussparung geschwächte Stützenquerschnitt mittels seitlich angeschweißten Stahlprofilen temporär verstärkt werden.

### 3.5 Umsetzung

An Kranbahnträgerauflagern mit in die Stützen integrierten Konsolen (Regeldetail) werden die Auflagerlasten durch eine stirnseitige Beanspruchung des vorgelagerten cupierten HEM-Stützenprofils und an dessen Flansch auskragend angeschweißte Streife eingeleitet. Im oberen Bereich ergeben sich dadurch hohe Lastkonzentrationen überwiegend im Flansch und Stegblech des cupierten HEM-Profils, welche nach unten über die Stützenhöhe abnehmen. Als kritisch wurde bei der bisher geplanten



**Bild 7:** Vorgefertigte Einbauteile der Sonderkonsolen

Verstärkungsvariante der Regelkonsolen das Anschweißen neuer Steifen an den Flansch des cupierten HEM-Profils angesehen. Aus diesem Grund hat man sich bei der umgesetzten Variante dafür entschieden, die alten Bauteile der Konsolen samt Steg und Flansch der cupierten HEM-Profile unterhalb der alten Konsolen abzutrennen und diese durch neue, in der Werkstatt vorgefertigte Einbauteile der Regelkonsolen aus weniger dicken Blechen zu ersetzen (Bild 8).

Der Flansch des cupierten HEM-Profils musste unterhalb des Einbauteils durch Anschweißen einer Blechlamelle auf einer gewissen Länge verstärkt werden (Bilder 9 und 10). Das neue Konsolendetail wurde hinsichtlich des Lastflusses optimiert, indem das Stegblech durch Schlitzten des senkrecht dazu angeordneten Flansches herausgeführt wurde. Analog zum Detail der Sonderkonsolen wurde das 90 mm dicke Stegblech – dessen Dicke sich durch hohe Spannungen unterhalb der Auflagerknagge des Kranbahnträgers ergab – am unteren Schweißanschluss auf die Stegdicke des cupierten HEM-Profils verjüngt.

Ein planmäßiger Austausch des Stützenflansches für das Regeldetail der Konsolen war nicht vorgesehen. Zum einem ist die Belastungssituation des Stützenflansches infolge Kranbeanspruchungen und Versagensfolgen bei der Regelkonsole im Vergleich zur Sonder-

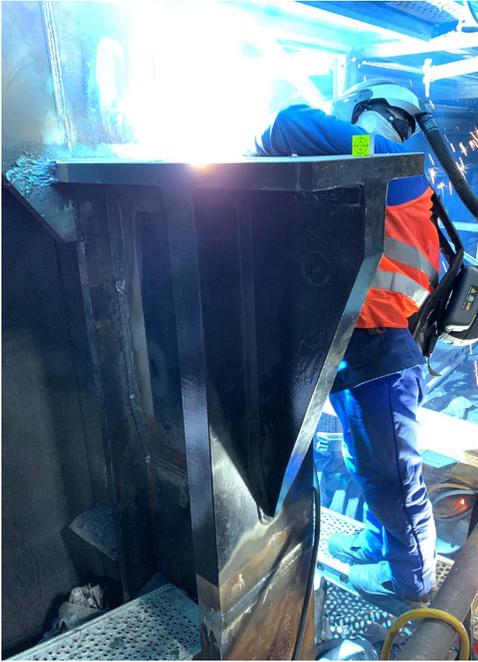


Bild 8: Montage Regelkonsole

konsole als weniger kritisch zu bewerten und zum anderen wurde durch vorher durchgeführte Probeschweißungen der Konsole und Materialuntersuchungen (siehe Abschnitt 5) die Schweißbarkeit des Bauteils bestätigt.

Nach dem Abbrengen der alten Konsolen wurden die Schnittkanten der Bleche für das Anschweißen der Einbauteile vorbereitet. Die Stützenflansche wurden im Bereich der Schweißverbindungen blecheben beschliffen und vor dem Anschweißen der Einbauteile einer zerstörungsfreien Magnetpulverprüfung (MT) zur Feststellung von Oberflächen- und oberflächennahen Rissen sowie einer Ultraschallprüfung (UT) zum Nachweis von inneren Materialfehlern (z. B. Dopplungen, Überwalzungen, Lunker etc.) unterzogen.

Um einem unplanmäßigen Materialzustand der Stützen zu begegnen, wurden als Reserve zwei Regelkonsolen analog der Ausführungsvariante der Sonderkonsolen gefertigt. Bei der Umsetzung der Maßnahme wurden dann an zwei von

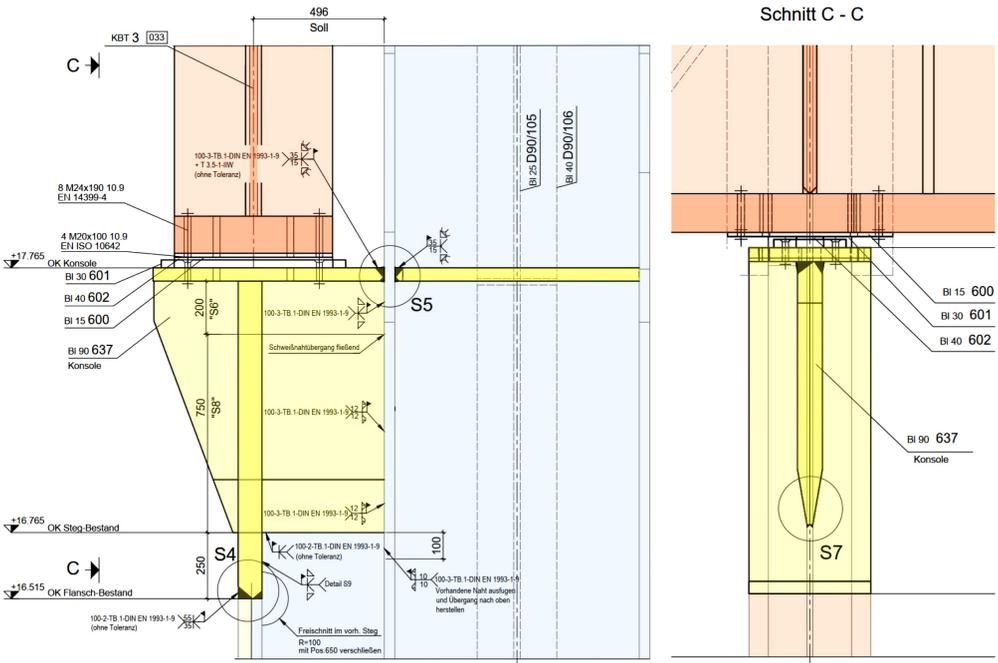


Bild 9: Ausgeführtes Detail Regelkonsolen



**Bild 10:** Regelkonsolen – Aussparung im Stützenkopf für neues Einbauteil



**Bild 11:** Regelkonsole nach Fertigstellung von Schweißarbeiten und ZFP

zehn Stützen durch Ultraschallprüfung unzulässige Anzeigen im Flansch festgestellt, welche als Materialtrennungen interpretiert wurden, sodass an diesen Stützen ein Teil des Stützenflansches und Steges abgetrennt und durch angepasste Reservekonsolen ersetzt werden mussten.

Aufgrund der erforderlichen Kerbfalleinstufung bei den Ermüdungsnachweisen war bei allen Konsolen eine Ausführung der Verbindungen mit durchgeschweißten Schweißnähten notwendig. Lediglich beim Regeldetail konnte am Anschluss des 90 mm dicken Stegblechs an den Stützenflansch die Schweißnahtdicke optimiert werden.

Zur Erzielung der geforderten Ermüdungsfestigkeiten mussten außerdem einige Schweißnähte nach Vorgaben des Tragwerkplaners bzw. wegen der Kerbfalleinstufung gemäß DIN EN 1993-1-9 [7] lokal beschliffen werden (Bild 11). Es ergab sich also ein enormer Schweiß- und Nachbearbeitungsaufwand für insgesamt 14 Auflagerkonsolen. Der hohe Vorfertigungsgrad

der Einbauteile erlaubte jedoch Einsparungen während der Montage.

Alle in der Werkstatt und auf der Baustelle hergestellten Schweißnähte wurden nach einem zuvor zwischen Tragwerksplaner und Fertigungsbetrieb abgestimmten Prüfplan zerstörungsfreien Prüfungen unterzogen ([20], [21], [28]). Zur Sicherstellung der geforderten Ausführungsqualität wurde ergänzend zu Qualitätskontrollen durch den Stahlbaubetrieb die Fertigung im Werk und auf der Baustelle durch ein externes Institut überwacht.

#### 4 Bemessung

Bei schwerem Kranbetrieb sind die Ermüdungsnachweise gegenüber den Trag- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen für die Dimensionierung der Kranbahnträger und der unmittelbaren Kranbahnträgerstützkonstruktion führend. Gleichzeitig sind die heutigen Anforderungen hinsichtlich der Ermüdung wesentlich höher als in der Vergangenheit.

Bei den Ermüdungsnachweisen ergibt sich die Gesamtschädigung aus der Summe der Einzelschädigungen jedes Kranes und eines Anteils aus dem Zusammenwirken aller Krane. Dabei fließen die Spannungsschwingbreiten aus Normalspannungen in der 3. Potenz und aus Schubspannungen in der 5. Potenz in die Schädigungsberechnung ein [7]. Während gegenüber der Bestandskrananlage die Beanspruchungen der neuen Kranbahnträger und des Hallentragwerks aus höheren Kranhublasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit um einen Faktor von ca. 1,5 angestiegen sind, beträgt der Anstieg der bemessungsrelevanten Ermüdungsbeanspruchungen der Kranbahnträger und Auflagerkonstruktionen aufgrund eines zusätzlichen Kranes, der Erhöhung der Kranhublast und der Verdopplung der Regelnutzungsdauer ca. um den Faktor 10. Folglich waren im vorliegenden Fall die Auswirkungen aus der gewünschten Traglaststeigerung der Krananlage aufgrund von Ermüdungsnachweisen besonders spürbar, wodurch die Konstruktion der Kranbahnträger, der Umfang der Verstärkungsmaßnahmen an den Kranbahnträgerstützkonstruktionen sowie der damit verbundene Logistik-, Kosten- und Zeitaufwand während der Bauausführung maßgeblich beeinflusst wurden.

Da zur Errichtungszeit die Größe des Bestandsgebäudes auf den Platzbedarf der Prozessanlagen und der Bestandskranbahn abgestimmt wurde, stand für die Konzeptionierung der neuen Krananlage kein größeres Lichtraumprofil zur Verfügung. Erschwerend kam hinzu, dass die Kranhalle aufgrund der Änderungen von Produktionsabläufen, Umbauten und Erweiterungen während des Betriebs in den vergangenen Jahrzehnten so verbaut und verändert worden war, dass eine einfache Zugänglichkeit zu den Kranbahnträgern und deren Auflagerkonstruktionen nicht mehr gewährleistet war. Diese Randbedingungen stellten die Planer vor enorme Herausforderungen.

Für die unterschiedlichen Varianten der neuen Konsolen wurden für alle maßgebenden Kerbdetails der Konsolen Ermüdungsnachweise mit dem Nennspannungskonzept nach DIN EN

1993-1-9 [7] geführt. Aufgrund sehr hoher Beanspruchungen waren die Konsolen von ihren Abmessungen her derart groß, dass eine Ermittlung der Beanspruchungen nach Balkentheorie zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit nicht zutreffend gewesen wäre. Die Spannungen wurden daher an einem räumlichen FE-Modell (Bild 12) mit Flächenelementen und bei sehr dicken und gedungenen Querschnitten mit Volumenelementen – ohne Berücksichtigung der Schweißnahtgeometrie – berechnet und den Nennspannungen der Ermüdungsfestigkeit nach DIN EN 1993-1-9, Tabellen 8.1–8.5 gegenübergestellt. Dazu ist anzumerken, dass die mit FE-Berechnung ermittelten Spannungsverläufe oft sehr komplex sind und die genannte Vorgehensweise der Nachweisführung meist konservative Ergebnisse liefert. Aus diesem Grund wurden für ausgewählte Details ergänzend Ermüdungsnachweise mit dem Strukturspannungskonzept geführt, welches bei bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlichere Ergebnisse liefert, jedoch einen wesentlich größeren Rechenaufwand erfordert.

## 5 Materialuntersuchungen

Bei der früheren Umsetzung von Verstärkungsmaßnahmen an Hallenstützen wurden Rissanzeigen an mehreren Stützen festgestellt. Zur Evaluierung wurden Bohrkern aus dem Grundmaterial entnommen und metallurgisch untersucht. Die Anzeigen wurden als Schmiedefalten in der Oberfläche identifiziert, die durch Rutschvorgänge beim Walzen entstanden sein können und unter Belastung nicht gewachsen sind. Hinweise auf Rissentstehung durch (von Mangansulfidzeilen verursachte) schlechte Z-Güte wurden nicht gefunden, was eine Belastung des Stahls in Dickenrichtung ausgeschlossen hätte.

Zur Evaluierung der mechanischen Materialeigenschaften und der Schweißbeignung des Altstahls wurden an mehreren Stützen Materialproben entnommen, an welchen Zugversuche in Dickenrichtung, Funkenemissionsspektroskopie, Kerbschlagbiegeversuche, Metallographie und Schwefelabdrucke nach Baumann durchgeführt wurden, [22]–[27].

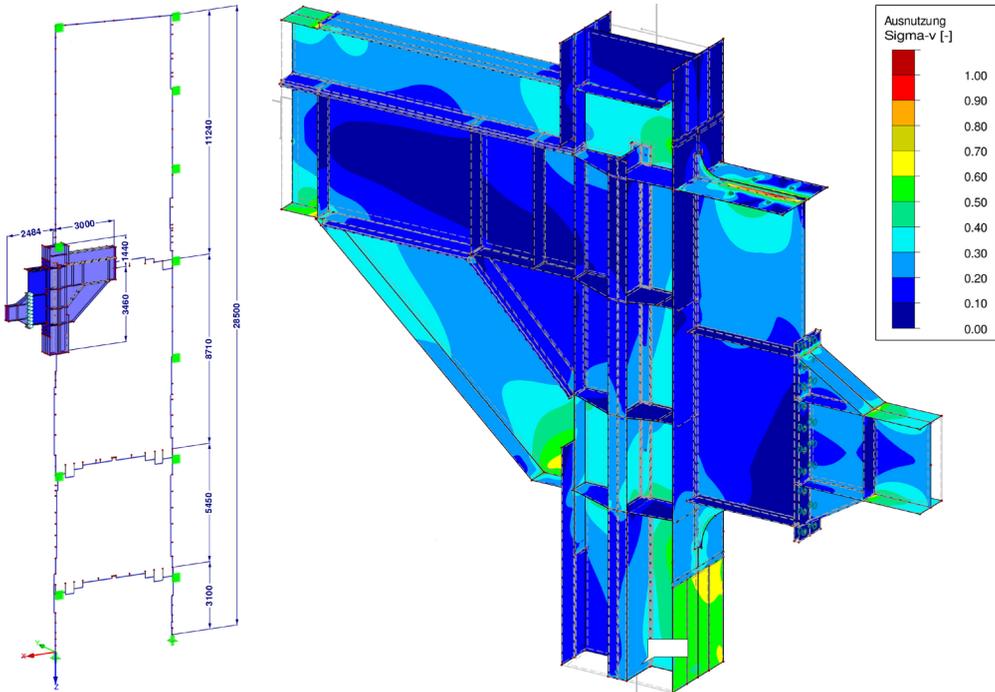
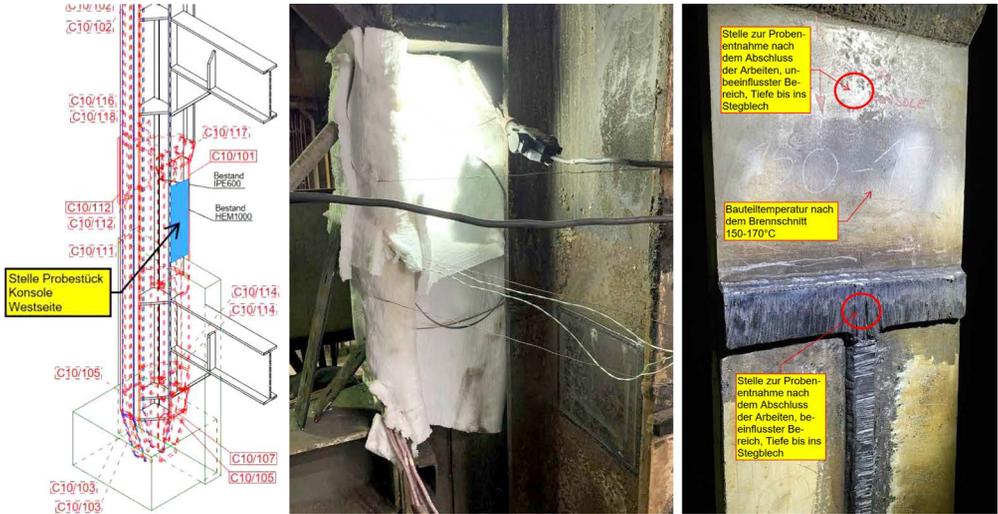


Bild 12: Statisches Gesamtmodell (links) und FE-Teilmodell der Konsole (rechts)

Es wurde bestätigt, dass das Material der Bestandsstützen die gestellten Anforderungen der damaligen Liefernorm DIN 17100:1966-09 [8] für einen St 37-2 erfüllt, normalberuhigt und schweißgeeignet ist. In Zugversuchen an Proben in Dickenrichtung der Bleche wurde eine ausreichende Z-Güte (Beanspruchbarkeit des Materials in Blechdickenrichtung) bestätigt. Die Funkenemissionsspektroskopie ergab jedoch, dass nicht genügend stickstoffbindendes Aluminium im Stahl vorhanden ist, um den Stahl als alterungsbeständig einstufen zu können. Folglich besitzt der Stahl eine Neigung, über die Zeit zu verspröden. Wann die Zähigkeit des Grundmaterials in Folge der Alterung einen kritischen Wert erreicht, lässt sich nicht vorhersagen.

Ein Austausch des Stützenflansches analog der Ausführung der Sonderkonsolen wäre mit erheblichen zusätzlichen Aufwendungen verbunden, sodass das neue Einbauteil der Regalkonsolen nach dem Abtrennen der alten

Konsolbleche an derselben Stelle an den Stützenflansch angeschweißt werden sollte. Um zu beurteilen, welche Auswirkung die Alterung auf den Stahl unter Berücksichtigung von mehrfach zusätzlichem Wärmeeintrag durch Schweißnähte hat, wurde eine Probekonsolle an eine Bestandsstütze geschweißt (Bild 13, links). Konkret wurde an einer bisher nicht mit Schweißnähten belegten Stelle des Stützenflansches eine Konsolle angeschweißt und wieder abgetrennt. Des Weiteren wurde eine Alterung des Stahls um weitere 50 Betriebsjahre künstlich simuliert, indem durch Wärmebehandlung des Stahls mit 350 °C Kerntemperatur und einer Haltezeit von 8 h eine dazu äquivalente Schädigung des Materialgefüges erzeugt wurde (Bild 13, Mitte). Nachfolgend wurde an der gleichen Stelle wieder eine Konsolle angeschweißt und anschließend abgetrennt. Aus dem Bereich der Schweißnaht und aus einem nicht durch die Schweißnaht beeinflussten Bereich wurde je eine Probe entnommen und untersucht (Bild 13, rechts). Die



**Bild 13:** Materialuntersuchungen; von links nach rechts: Probeschweißung an Stütze, Wärmebehandlung zur Simulation einer künstlichen Alterung, Probenentnahmestellen nach Wärmebehandlung

Ergebnisse wurden mit den Ausgangsergebnissen vor der künstlichen Alterung und den Normwerten verglichen.

Ein wesentliches Hilfsmittel zur Bewertung der Ergebnisse in Bezug auf den Altstahl stellte ein Fachaufsatz der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Halle (Saale) dar [9]. Die Ergebnisse der durchgeführten Materialuntersuchungen, dieser Artikel und ein sich darauf beziehendes Fachgespräch mit den Projektbeteiligten haben die von uns zusammengetragenen Erkenntnisse bestätigt, sodass der geplanten Ausführung nichts im Wege stand.

## 6 Schlusswort

Der Austausch von Kranbahnträgern für schweren Kranbetrieb muss professionell unter Einbringung sachkundigen Personals und aller Projektbeteiligten geplant werden, um zu verhindern, dass in dem üblicherweise vorgegebenen kurzen Zeitfenster des möglichen Austauschs böse Überraschungen zu Tage treten, die zu Umplanungen, Zeitverschiebungen und damit zu spürbaren Stillstands- und Ausfallkosten führen können. Beim vorgestellten Projekt konnte der Austausch erfolgreich realisiert werden. Bild 14 vermittelt einen Eindruck vom Endzustand.



**Bild 14:** Konsolen nach der Montage; links: Regelkonsolen, Mitte Sonderkonsole mit und rechts ohne Kragarm

## Literatur

- [1] DIN EN 1991-3:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Deutsche Fassung EN 1991-3:2006.
- [2] DIN EN 1993-1-1: 2010-12; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009.
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DAST, Hrsg.): DAST-Richtlinie 014: Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl. Ausgabe 01/1981.
- [4] DIN EN 1993-1-10:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009.
- [5] DIN EN 10025-1:2005-02: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10025-1:2004.
- [6] Merkblatt WTA E-7-3-05/D: Sanierung historischer Stahl- und Gusskonstruktionen nach WTA I: Schweißen von Altstahl. Ausgabe 04/2005.
- [7] DIN EN 1993-1-9:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.
- [8] DIN 17100:1966-09: Allgemeine Baustähle – Gütevorschriften.
- [9] Schuster, J.; Gajda, Ch.: Sichere und reproduzierbare Bewertung; Schweißbeignung von Stählen für den Stahlbau, Teil 4: Bewertung der Schweißbeignung unlegierter Baustähle. Der Praktiker (2020) 10, S. 504–514.
- [10] Dürr, A.; Dreiling, A.; Bartenbach, J.: Kranbahnen und Kranhallen im Bestand – Bewertung, Schadensbilder, Weiterbetrieb. Stahlbau 88 (2019) S1, Sonderheft Kranbahnen, S. 39–56 – DOI: 10.1002/stab.201900091
- [11] Dürr, A.; Bartenbach, J.; Kretschmar, P.; Rieche, N.; Sdorra, A.; Wunderlich, M.: Besonderheiten beim Austausch von Kranbahnträgern für schweren Kranbetrieb. Stahlbau 90 (2021) S1, Sonderheft Kranbahnen, S. 75–91 – DOI: 10.1002/stab.202100065
- [12] Hobbacher, A. F.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Cham: Springer, 2019.
- [13] prENDIN EN 1993-1-9:2020(E): Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung.
- [14] prENDIN EN 1993-1-14:2020(E): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis.
- [15] DIN EN 1090-2:2018-09: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2018.
- [16] DIN 4132:1981-02: Kranbahnen; Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung.
- [17] DIN EN 1993-6:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN 1993-6:2007+AC:2009.
- [18] DIN EN 1993-1-8:2010-10: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005+AC:2009.
- [19] bauforumstahl e. V. (Hrsg.): Richtlinie BFS-RL 07-103: Entwurf und Berechnung von Kranbahnen. Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2018.
- [20] DIN EN ISO 17637:2017-04: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen (ISO 17637:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17637:2016.
- [21] DIN EN ISO 17638:2017-03: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Magnetspulverprüfung (ISO 17638:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17638:2016.
- [22] DIN EN 10164; 2018-12: Stahlerzeugnisse mit verbesserten Verformungseigenschaften senkrecht zur Erzeugnisoberfläche – Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10164:2018.
- [23] DIN EN ISO 148-1:2017-05: Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 148-1:2016.
- [24] ISO 4968:1979-11: Stahl; makrographische Untersuchung mit Schwefelabdruck (Baumann-Methode).
- [25] DIN 50125:2016-12: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben.
- [26] DIN EN ISO 6892-1:2017-02: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2019.
- [27] DIN EN ISO 14284:2003-02: Stahl und Eisen – Entnahme und Vorbereitung von Proben für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung (ISO 14284:1996); Deutsche Fassung EN ISO 14284:2002.
- [28] DIN EN ISO 17640:2019-02 Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung – Techniken, Prüfklassen und Bewertung.

## Bildquellen

Alle Bilder: HOCHTIEF Engineering GmbH, Consult IKS, Frankfurt am Main