

Überrollversuche zum Tragverhalten

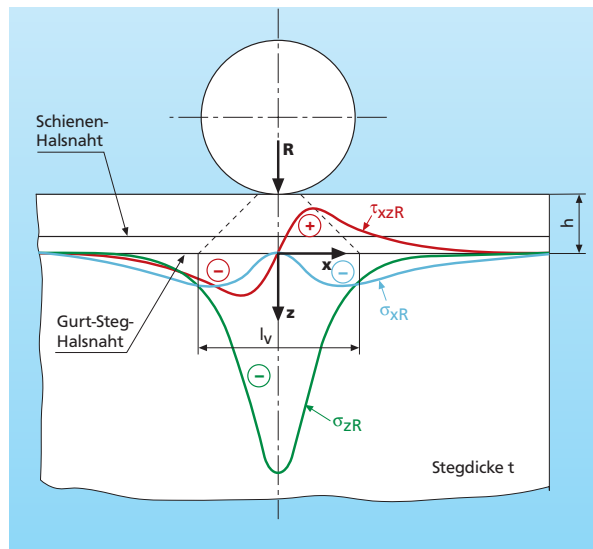
# Schadensbilder von Brückenkran-

Ermüdungsversuche mit ortsfesten pulsierenden Lasten ergeben als zufällige Einzelwerte die Ermüdungsfestigkeit an den geprüften Lasteinleitungsstellen. Bemessungsbestimmende Werte der Ermüdungsfestigkeit von Halsnähten können nur mit Überrollversuchen bestimmt werden, bei denen die Prüflasten auf dem Träger hin und her fahren, weil dabei auch die schwächste Stelle der Halsnaht von den Radlasten mit erfasst wird.

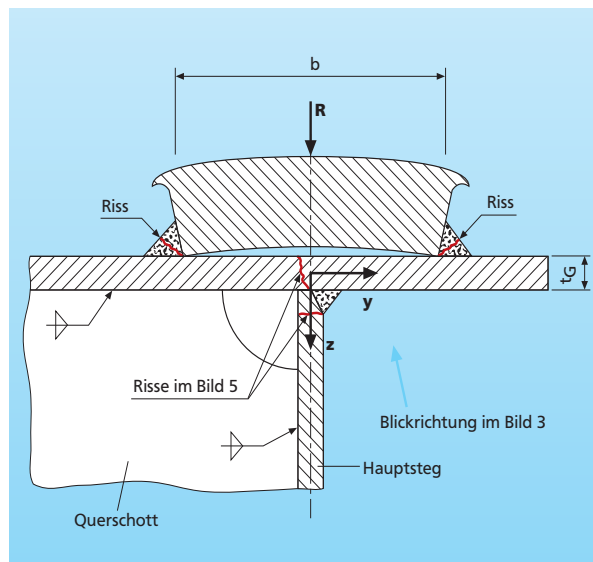
■ Dr.-Ing. habil. Werner Warkenthin

## Ursachenforschung für früher entstandene Halsnahtrisse

In den 1970er-Jahren waren in geschweißten Hauptträgern von Brücken- und Portalkranen unter den Katzschiene vereinzelt Halsnahtrisse aufgetreten, für die es damals noch keine Erklärung über die Entstehungsursache gab. Als dann auch in Rollbahnträgern von Abraumförderbrücken vergleichbare Risse festgestellt worden waren, wurden in der damaligen DDR umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zur Klärung der Ursachen dieser Schäden durchgeführt. Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Halsnähten wurde damals – wie auch heute – mit den aus der Trägerbiegung entstehenden Längsspannungen  $\sigma_x$ , mit den aus der Katzradlasteinleitung herrührenden Querspannungen  $\sigma_z$  und mit den von der Querkraft und vom Torsionsmoment stammenden summarischen Schubspannungen  $\tau_{xz}$  geführt. Weil die aufgetretenen Halsnahtrisse immer in Nahtlängsrichtung, d. h. rechtwinklig zur Katzradlast, aufgetreten waren und weil Träger ohne  $\sigma_x$  mit den in den damaligen Berechnungsnormen angegebenen zulässigen Ermüdungsfestigkeitsspannungen zu  $\sigma_x$  und zu  $\tau_{xz}$  ohne jegliche Beanstandung gehalten hatten, lag der Schluss nahe, Ursache für die Rissbildung in den Halsnähten könnte eine zu hoch angesetzte zulässige Querspannung zu  $\sigma_z$  gewesen sein. Deshalb wurden damals in mehreren Bauteilprüflabors – u. a. auch im damaligen IFF in Leipzig – zunächst Ermüdungsfestigkeitsversuche an Trägern mit ortsfesten pulsierenden Katzradlasten gefahren. In keinem dieser Versuche waren Halsnahtrisse aufgetreten. Einige voreilige Bearbeiter zogen daraus den Schluss, dass die den statischen Berechnungen des Kranbaus und der Tagebaugroßgeräte zugrunde gelegten zulässigen Querspannungen zu  $\sigma_z$  der Halsnähte eher zu niedrig als zu hoch an-



1 Örtliche Halsnahtspannungen unter der Radlast



2 Radlasteinleitung bei gerissener Schienen-Halsnaht und nach intensiver Überrollung gegen die Radlast aufgewölbter Flachschiene

Solche aufgewölbten Flachschiene brechen durch „Gewölbe“-Bruch. Schiene aus Quadratstahl wölben sich nicht auf, reißen nach intensiver Überrollung aber auch auf, und zwar von innen, unterhalb der Rollfläche beginnend, nach unten ([3], S. 238, Bild 6-11,d). Die Rissbildung im Obergurtblech war bei Schiene aus Quadratstahl dieselbe wie bei aufgewölbten Flachschiene.

gesetzt seien. Kurze Zeit danach in der Praxis erneut aufgetretene weitere Halsnahtrisse bewiesen jedoch sehr bald die Haltlosigkeit dieses Fehlschlusses. Man erkannte schließlich, dass das dem Ermüdungsfestigkeitsnachweis der Halsnähte zugrunde gelegte Berechnungsmodell unvollständig war, indem man bei diesem die bei Radlasteinleitung auftretenden Schubspannungen  $\tau_{xzR}$  (Bild 1) bisher stets außer Acht gelassen hatte. Diese Schubspannungen  $\tau_{xzR}$  laufen bei Radüberrollung mit wechselndem Vorzeichen durch jeden Punkt der Halsnaht mit der großen Spannungsschwingbreite

$$\Delta\tau_{xzR} \approx 0,4 \max\sigma_z \quad (1)$$

durch und schädigen den Werkstoff sehr beträchtlich, nicht nur wegen ihrer Größe, sondern weil auch die Anzahl der örtlichen Radüberrollungen stets größer ist als die Anzahl der Spannungszyklen der Träger-Biegespannungen  $\sigma_x$ . Sie sind für das

Entstehen der in der Praxis aufgetretenen Halsnahtrisse verantwortlich. Denn schon beim ersten Überrollversuch, bei dem die Kastenträger rollend belastet worden waren – und zwar mit denselben Radlasten wie zuvor bei den Versuchen mit ortsfester pulsierender Radlast –, traten relativ frühzeitig Halsnahtrisse auf, die in Form und Verlauf mit den in der Praxis aufgetretenen Halsnahtissen identisch waren. Alle danach durchgeführten Überrollversuche bestätigten dieses Ergebnis, lediglich mit einer gewissen Streuung der bis zur Anrissbildung ertragenen Überrollungszahl.

## Berechnungsansätze

Beim Festlegen von zulässigen Spannungen steht man vor einer schwerwiegenden Entscheidung: Entweder man verfeinert das Spannungsmodell und gibt zulässige Ermüdungsfestigkeitsspan-

# Kastenträgern



**3 Rissverlauf auf der Gurtunterseite bei unterbrochen geschweißter Schienen-Halsnaht und breitem abstehenden freien Gurtrand**

Im Bereich des „Langloches“ war der Obergurt auf 3/4 der Länge des kurzen Schienen-Halsnahtstückes, wie links zu sehen ist, zum Ende des Überrollversuches ebenfalls stark zerbröckelt. Beim Abheben der Schiene fielen die dort verklemmt gewesenen Gurtblech- und Kehlnahtteilchen nach unten heraus. Am oberen Bildrand ist der Hauptsteg des Kastenträgers erkennbar. Anders als bei den beiden langen Rissen, die sich frühzeitig unterhalb der Schienen-Halsnahtenden quer zur Trägerlängsrichtung gebildet hatten, begann die dem Zerbröckeln des Gurtblechs vorausgegangene Anrissbildung erst relativ spät, schritt aber, sobald begonnen, mit starker Rissverzweigung schnell voran – sowohl in Trägerlängsrichtung als auch nach oben in die Schienen-Halsnaht hinein. Auf der Oberfläche der Schienen-Halsnaht war die Zerstörung jedoch erst dann sichtbar, als der Zerfall des Gurtblechs und der Schweißnaht bereits ein gefährliches Ausmaß angenommen hatte.

nungen für die dabei höher berechneten Spannungswerte an – dieser Weg wurde ab 1984 in der ehemaligen DDR-Kranbaunorm TGL 13470 [1] besprochen – oder man bleibt bei den bisher angewendeten vereinfachten Spannungsberechnungsansätzen und passt die zulässigen Spannungen den Ergebnissen dieser vereinfachten Berechnungsansätze an. Dem unter ewigem Zeitdruck stehenden Berechnungsingenieur in der Praxis ist dieser zweite Weg der willkommener. Er will beim Ermüdungsfestigkeitsnachweis einer von Radlasten überrollten Halsnaht weiterhin rechnen

- a) mit der Biegespannung  $\sigma_x$  ohne den im Bild 1 dargestellten Anteil  $\sigma_{xR}$ ,
- b) mit der über die Lastverteilung  $l_v \approx 2 h + 5 \text{ cm}$  (Bild 1) näherungsweise ermittelten Querspannung  $\sigma_z = \max \sigma_{zR} = R / (l_v \cdot \Sigma a)$ , wobei  $\Sigma a$  die Summe der Nahtdicken der auf dem Schnittniveau h tragenden Halsnähte ist, und

c) mit der sich aus Querkraft und Torsion ergebenden summarischen Schubspannung  $\tau_{xz}$  ohne  $\tau_{xZR}$ .

Damit steht er vor einem Grundsatzproblem: Einerseits verfügt er über nach der Stabtheorie berechnete Schnittgrößen. Diese Theorie setzt voraus, dass nachzuweisende Schnittstellen, dem Prinzip von St. Venant entsprechend, weit genug entfernt von Lasteinleitungsstellen liegen. Andererseits muss der Statiker bei einer von Radlasten überrollten Halsnaht aber gerade die unmittelbare Umgebung einer Lasteinleitungsstelle nachweisen. Die dem Statiker in die Hand gegebene Berechnungsnorm muss deswegen einen Kompromiss eingehen, indem sie die Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  und  $\tau_{xz}$  in bekannter Weise vereinfachend berechnen lässt und die Komponente  $\sigma_z$  einer den Ergebnissen von Überrollversuchen angepassten zulässigen Spannung  $zul\sigma_z$  gegenüberstellt, die den nicht erfassten Schubspannungsanteil  $\tau_{xZR}$  entsprechend mit berücksichtigt.

Die Einstufung der durch eine Radlast auf Druck querbeanspruchten Gurt-Steg-Halsnaht gemäß DIN 15018 [2] in den Kerbfall K4 mit  $zul\sigma_z (\kappa = 0) = 54 \text{ N/mm}^2$  in der Beanspruchungsgruppe B6 wurde offensichtlich in Auswertung von Schadensfällen gewählt, die es früher auch bei Kranen und Kranbahnen in der alten BRD gegeben hatte. Für Stegdicken  $t > 12 \text{ mm}$  ist – den in der DDR durchgeführten Überrollversuchen zufolge – mit höheren zulässigen Spannungen tatsächlich nicht zu rechnen. Für dünnere Stege, z. B.  $t = 8 \text{ mm}$ , könnte beim Nachweis der Gurt-Steg-Halsnaht jedoch mit dem geometrischen Mittelwert der zulässigen Spannungen der Kerbfälle K3 und K4 gerechnet werden, nämlich mit  $zul\sigma_z \approx (90 \cdot 54)^{1/2} \text{ N/mm}^2 \approx 70 \text{ N/mm}^2$ , wenn es sich um sauber geschweißte, nicht überhöhte Kehlnähte ohne nennenswerte Randkerben handelt. Für als K-Naht mit vorgesetzten Kehlnähten geschweißte Gurt-Steg-Halsnaht-Verbindungen ergeben sich Werte  $zul\sigma_z$  ähnlich der Einordnung nach DIN 15018 in den Kerbfall K3. Hingegen sind Längskehlnähte, die zum Anschluss von Kran- oder Katzschiene an den Trägerobergurt dienen, nur dann in den Kerbfall K4 richtig eingestuft, wenn es sich um Schienen aus Quadratstahl handelt. Anschlussnähte von Schienen aus flachliegendem Rechteckstahl mit einem Verhältnis von Höhe zu Breite  $< 2/3$  sollten nur mit  $\approx 70 \%$  der zulässigen Spannung des Kerbfalles K4 bemessen werden, besonders dann, wenn es sich um unterbrochen geschweißte Kehlnähte handelt.

Nachfolgend werden bei Überrollversuchen entstandene Rissbilder vorgestellt, die aufschlussreich für das wirkliche Tragverhalten von Brücken-Kastenträgern sind.

Zu sehen ist der Zustand nach  $N_R = 2 \cdot 10^6$  Einzel-Radüberrollungen mit konstanter Rad-Volllast. Die für die Versuche genutzten Träger hatten die originalen Abmessungen des Kranbaus.

## Rissbildung in und neben der Schienenbefestigung

Unterbrochen geschweißte Kehlnähte zum Anschluss von Kran- oder Katzschiene aus Quadrat- oder Rechteck-Stabstahl an den Trägerobergurt führen zu zwei Rissbildungsmöglichkeiten.

**Erstens:** Die Naht reißt, ausgehend vom Anfangs- und/oder Endkrater der kurzen Kehlnahtstücke, auf der Nahtlänge dieser Kehlnahtstücke unter  $45^\circ$  zur Senkrechten von der Nahtwurzel aus durch. Das ist der bekannte Normalfall – zutreffend, wenn der Abstand zwischen Schiene und Gurtrand klein ist. Die Schiene liegt dann in einer Mulde, gebildet von den am Gurt anliegenden Schweißnahthälften. Die Schiene wird von der Radlast in diese Mulde fest hinein gedrückt, so dass über Druckkontakt bis zu einem gewissen Maß auch Radseitenkräfte in den Träger weitergeleitet werden können. Diese Nottragwirkung bleibt auch bestehen, wenn die Schiene eine Flachschiene ist, die sich beim Verhältnis von Höhe zu Breite  $< 2/3$  nach längerer intensiver Überrollung gegen die Radlast aufwölbt (Bild 2). Die am Trägergurt anliegenden Schweißnahthälften wirken dann wie Kämpfergelenke. Treten in außergewöhnlichen Betriebszuständen jedoch ausnahmsweise große Radseitenkräfte auf, drücken diese Seitenkräfte die Schiene aus der Nottragmulde heraus. Auf diese Weise sind mehrfach schon folgenschwere Unfälle aufgetreten, so dass dieser Nottragzustand, sobald er sich durch Reißen der Kehlnähte gebildet hat, umgehend beseitigt werden muss.

**Zweitens:** Die kurzen Kehlnahtstücke sind noch nicht gerissen; dafür reißt aber der Trägergurt infolge Plattenbiegung unterhalb der Einzelnahtenden von unten her ein, wenn der Abstand zwischen Schiene und Gurtrand gleich oder breiter als die Schiene ist. Der Anriss breitet sich dabei zunächst nur auf der Gurtunterseite aus, bleibt deshalb meist unbemerkt, wandert ab einer gewissen Länge jedoch durch die Gurtplattendicke hindurch – vorzugsweise bei dünneren Gurtblechen – und zeigt sich auf der Gurtoberseite erst dann, wenn die Zerstörung des Gurtes bereits erhebliche Ausmaße angenommen hat (Bild 3). Deswegen sollten Schienen besser mit durchgehenden dünnen als mit unterbrochenen dicken Kehlnähten angeschweißt werden. Breite Abstände zwischen Schiene und äußerem freien Gurtrand sind möglichst zu vermeiden.

**Rissbildung in der Gurt-Steg-Halsnaht und im Trägerobergurt**

In durchgehend geschweißten Gurt-Steg-Halsnähten treten Längsrisse rechtwinklig zur Radlast auf. Weil diese als Ermüdungsrisse hauptsächlich durch hohe örtliche Schubspannungen entstehen, sind sie leicht gezackt und treten mitunter parallel übereinander liegend auf (Bild 4). Beides, leicht gezackter und mehrfach übereinander liegender Längsrissverlauf, sind typische Merkmale für quer zur Nahtlängsrichtung gedrückte, maßgeblich durch zyklisch veränderliche Schubspannungen beanspruchte Schweißnähte. Solche Halsnaht-Längsrisse können Meterlänge erreichen, wenn sie bei wiederkehrenden Prüfungen nicht rechtzeitig entdeckt und umgehend ausgefugt und nachgeschweißt werden. Wegen der Rissverzahnung, die voll zur Geltung kommt, wenn der Riss durch die Radlast zusammengedrückt wird, zeigt sich am Träger keine Vergrößerung der Durchbiegung und auch keine Veränderung des Messsignals von am Trägeruntergurt angebrachten Dehnmessstreifen. Es liegt folglich eine gute Notlaufeigenschaft vor.

Trotzdem ist das Auftreten solcher Halsnaht-Längsrisse ein ernstes Warnsignal, weil die Rissbildung im Halsnahtbereich komplizierter ist, als man – gedanklich dem rechnerisch üblichen Ermüdungsfestigkeitsnachweis der Halsnaht folgend – annimmt. Denn es ist nicht ungewöhnlich, dass der von der Halsnahtwurzel ausgehende Anriss nicht, wie allgemein angenommen, unter 45° nach unten durch die Halsnaht wandert, sondern mehr oder weniger senkrecht durch das Gurtblech nach oben aufsteigt, aber unerkant bleibt, weil er dort von der Schiene verdeckt ist. Deshalb können derartige Risse, begünstigt durch Querbiegung des Obergurtblechs, bei Radlasteinleitung über die Schienenlängsränder – besonders bei gegen die Radlast aufgewölbten Flachschiene –, mitunter meterlang werden (Bild 5). Der Kastenträger wird dabei über dem Hauptsteg regelrecht aufgetrennt, kann aber nicht auseinanderfallen, weil er von den Querschottblechen zusammengehalten wird. Die Tragwirkung als Kastenträger bleibt so lange erhalten, wie der Schubfluss in dem vom Hauptsteg und Obergurt gebildeten Eckbereich durch Rissverzahnung übertragen werden kann. Dieser vermeintlich sichere Zustand ist deshalb so sehr gefährlich, weil das alsbaldige Auseinanderfallen des Eckbereichs äußerlich nicht zu erkennen ist, aber auch nur selten vermutet wird. Man kann diesem unerwünschten Zustand bei Gurtblechen, die nicht nennenswert dicker als das Blech des Hauptsteges sind, nur wie folgt entgegen wirken:



4 Längsrisse in der Gurt-Steg-Halsnaht; am oberen Bildrand ist der Schienenbart der verschlissenen Schiene zu sehen.



5 Von der Schiene verdeckt gewesene Längsrisse im Gurtblech über der Gurt-Steg-Halsnaht (großer Pfeil). Der in der oberen Bildhälfte erkennbare Teil des Obergurtes ist der zum freien Gurtrand hin gerichtete Teil des Obergurtes. Im Bildvordergrund nach unten gerichtet sieht man die Innenseite des Hauptsteges mit einem unterhalb der Steg-Halsnaht entstandenen, wenig klaffenden, gezackten Steg-Längsriss (kleiner Pfeil). Die zwischen den beiden Pfeilen verlaufende waagerechte Linie ist die obere Innenkante des Hauptsteges.

**Erstens** durch entsprechend niedrig angesetzte zulässige Halsnaht-Querspannungen,

**Zweitens** durch einen zusätzlichen Ermüdungsfestigkeitsnachweis des Obergurtblechs mit der an dessen Oberrand auftretenden Platten-Querbiegespannung

$$\text{rechn}\sigma_y^+ \approx 0,8 R \cdot b / (l_v \cdot t_G^2).$$

In dieser vereinfachenden Gleichung ist  $l_v$  die Verteillänge gemäß Bild 1,  $R$  die vertikale Radlast,  $b$  die Breite der Quadrat- oder Flachstahlschiene,  $t_G$  die Dicke des Obergurtblechs (Bild 2). Ein Überlagern mit senkrechten Querspannungen  $\sigma_z$  ist nicht zutreffend, weil die Schiene nicht garantiert überall auf dem Obergurt satt aufliegt und deswegen an ungünstigen Stellen die Radlast  $R$  allein von den Schienen-Halsnähten in den Trägerobergurt

übertragen werden muss, verbunden mit dementsprechend hohen Platten-Biegespannungen  $\sigma_y$  im Gurtblech. □

**Literatur**

- [1] TGL 13470: Stahlbau; Stahltragwerke der Hebezeuge; Berechnung; Bauliche Durchbildung. DDR-Berechnungsstandard, 1. Änderung. Juli 1984.
- [2] DIN 15018: Krane; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnung. Nov. 1984.
- [3] Warkenthin, W.: Tragwerke der Fördertechnik 1. Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1999.

**Dr.-Ing. habil. Werner Warkenthin**  
ist freier wissenschaftlicher Mitarbeiter der IFF E&C GmbH in Leipzig

