

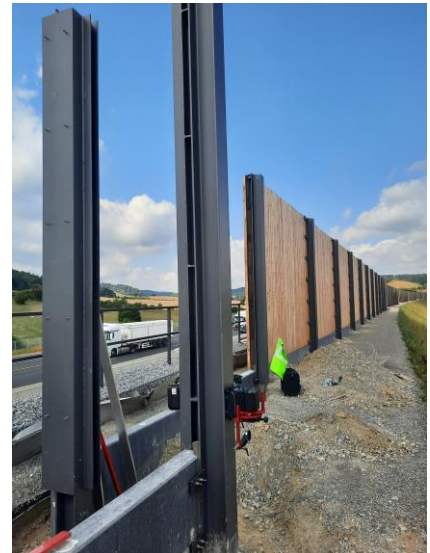
# "Alles richtig gemacht und trotzdem verloren" - die Toleranzangaben der DIN EN 1090-2 Anhang B gelten für das fertige Bauteil!

Dipl.-Ing, Thomas Vauderwange MBA SFI, Offenburg

## 1 Einleitung

Mal angenommen, es gilt, Eckträger für eine Lärmschutzwand herzustellen. Nicht die Träger auf der freien Fläche der Wand, denn das sind einfach nur Profile HEB 200, 6 m lang, feuerverzinkt und dauerhaft korrosionsbeständig beschichtet. Nein, zwischen den längeren, geraden Abschnitten werden Transparent- oder auch Türelemente verbaut und diese müssen seitlich an den HEB 200 eine 80 mm breite Nut bekommen, in die sie ganz ähnlich wie die großen Lärmschutzelemente eingeschoben werden können.

Anlass für die Zusammenstellung dieses Vortrags ist, dass ohne eine außerordentliche Koordination innerhalb der herstellenden Abteilungen aufgrund von nicht eingehaltenen, geometrischen Dimensionen ein nicht gebrauchsfähiges Produkt entsteht und möglicherweise sogar an den Endkunden ausgeliefert wird, wenn jeder nur innerhalb seiner Fachdisziplin "alles richtig macht", wie sich leider mehrfach in der Realität gezeigt hat. Mit potenziell ruinösen Folgen für den Hersteller und vor allem vermeidbaren Zeitverzögerungen für den Auftraggeber.

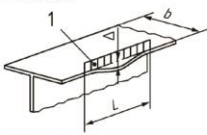
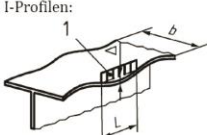
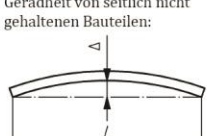


## 2 Aufgabenstellung

Fast schon trivial erscheinend: Es geht darum, die Eckträger so zu produzieren, dass sie auf der Baustelle eintreffend die geforderten Maßtoleranzen einhalten. Da nirgends etwas Besonderes angegeben wurde, gelten die Vorgaben der DIN EN 1090-2 Anhang B.

Die folgende Abbildung stammt aus der Tabelle B.3 in dieser Norm:

Tabelle B.3 — Herstelltoleranzen – Flansche geschweißter Profile

Nr.	Merkmal	Parameter	Grundlegende Toleranzen Zulässige Abweichung $\Delta$	Ergänzende Toleranzen Zulässige Abweichung $\Delta$	
			Klasse 1 und 2	Klasse 1	Klasse 2
1	Lokale Beule der Flansche von I-Profilen: 	Abweichung $\Delta$ innerhalb der Messlänge $L$ , wobei $L =$ Flanschbreite $b$ :	$\Delta = \pm b/150$ falls $b/t \leq 20$  $\Delta = \pm b^2/(3\ 000\ t)$ falls $b/t > 20$	$\Delta = \pm b/100$	$\Delta = \pm b/150$
2	Welligkeit der Flansche von I-Profilen: 	Abweichung $\Delta$ innerhalb der Messlänge $L$ , wobei $L =$ Flanschbreite $b$ :	$\Delta = \pm b/150$ falls $b/t \leq 20$  $\Delta = \pm b^2/(3\ 000\ t)$ falls $b/t > 20$	$\Delta = \pm b/100$	$\Delta = \pm b/150$
3	Geradheit von seitlich nicht gehaltenen Bauteilen: 	Abweichung $\Delta$ von der Geradheit:	$\Delta = \pm L/1\ 000$	$\Delta = \pm L/1\ 000$	$\Delta = \pm L/1\ 000$

Für den Träger mit einer Gesamtlänge  $L = 6000\text{ mm}$  wäre also ein Verzug in Längsrichtung von  $6\text{ mm}$  erlaubt.

Um es vorweg zu nehmen: An dieser Stelle war der entsprechende Verzug am Ende der Fertigungskette beim Endprodukt auf der Baustelle jenseits  $50\text{ mm}$  !

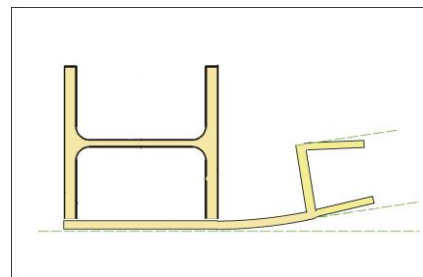
Mit der Folge, dass sich die Lärmschutzelemente bei Einbau der Träger (einbetonieren) nicht einschieben ließen.

Ähnliches Thema mit dem Öffnungsmaß des geschweißten U zur Seite hin. Das Öffnungsmaß von  $80\text{ mm}$  wird durch den Winkelverzug beim Schweißen tendenziell kleiner.  $1 - 2$  Millimeter Toleranz müssen drin sein, das wird aber ebenfalls schnell mehr sein.

Das folgende Bild zeigt die entstehenden Probleme in Querrichtung

durch das Trägerprofil betrachtet:

Es geht also in dieser Dimension nicht nur um die Winkelverzüge, die das Öffnungsmaß des kleinen U beeinflussen, sondern zusätzlich sorgt ein Winkelverzug dafür, dass das U an der falschen Stelle und in die falsche Richtung zeigend platziert ist.



### 3 Durchführung

#### 3.1 Abfolge der Tätigkeiten

Natürlich ist zuerst anhand der Anforderungen an das Produkt die Konstruktion am Werk, um einerseits die Ausführung zu beschreiben / darzustellen und andererseits sicher zu stellen, dass den Anforderungen seitens der Statik durch die ausreichende Dimensionierung / Werkstoffauswahl nach gekommen wird und andererseits alle nötigen Schritte für einen lang vorhaltenden Korrosionsschutz (in diesem Fall gefordert 30 Jahre!) unternommen werden. In den entsprechenden Zeichnungen wird ebenfalls eine Eingruppierung nach der DIN EN 1090 in die Ausführungsklasse 2 (EXC 2) vorgenommen.

Bei externer Vergabe der Fertigung sind die Zeichnungen mit ihren Angaben entscheidende Grundlage für Ausschreibung und Vergabe. Das Bild rechts ist ein Beispiel für ein Beschriftungsfeld auf einer solchen Zeichnung.

I - Abteilung	II - Ausführungsklasse	III - Werkstoff	
X STAHLBAU	EXC - 1	X S235JR - DIN EN 10025-2	AMgS05 - 6060 EN573
X METALLBAU	EXC - 2	X S355J2+N - DIN EN 10025-2	AMg3 - 3754 EN573
ANLAGENBAU	EXC - 3	1.4301 - DIN EN 10088	
ALUBAU	keine	1.4571 - DIN EN 10088	

IV - Schweißnähte	Bewertungsgruppe: ISO 5817	C	Formblatt - FB3.8-01	09
WFS-Nr.:				Schweißtechnisch geprüft
Schweißverfahren	Schweißzusatz	Schutzgas		
X 135 (MAG) S40 4021 G351-ISO 14181	A02 (Argon) 18 (Argon) C2	ISO 14175		
135 (MAG) G 19 12 3 Nb - ISO 14344	M12 (Argon) C2	ISO 14175		
141 (MIG) W 19 12 3 Nb - ISO 14344	(100-4-6) - ISO 14175			
141 (MIG) W ArAg5 - ISO 18273	(100-4-6) - ISO 14175			
111 (H) Handl. F 34 2 68 12 (Strom)				

Soweit nicht angegeben: Kehlnähte a=4 mm umf. / Stumpfnähte: 2,5mm -> V-Naht; 2,5mm -> HT-Naht s=5 mm

V - Korrosionsschutz / Oberfläche		Formblatt - FB3.4.10-01	CE
Vorbereitung - EN 1090	Schleuderstrahlen SA 2,5		
X Feuerverzinkung - ISO 1461	DAST 022 - Vertrauenszone: 1		
X Grundbeschichtung - ISO 12944	80my		
X Zwischenbeschichtung	80my		
X Deckbeschichtung	80my RAL7016 sm		
Pulverbeschichtung / Eloxal			
VA geschliffen Korn 240			
VA glasperlengestrahlt			

In der Ausführung ist natürlich neben der Beschaffung des Materials und dem Zuschnitt die Arbeitvorbereitung und die Schweissaufsicht involviert.

Die wichtigsten Fertigungsschritte, die wir hier betrachten wollen, wären also:

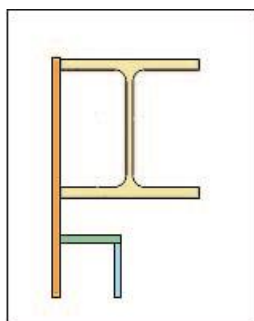


Diese drei Fertigungsaufgaben wollen wir nun einzeln betreffend ihres Einflusses auf das Thema "geometrische Toleranzen" betrachten.

#### 3.2 Schweißen und richten

Vorweg: Wir gehen davon aus, dass der Zuschnitt einwandfrei ist und die verwendeten Halbzeuge die entsprechenden Anforderungen ihrer Norm entsprechen. Denn "Toleranz Null" oder "absolut gerade" gibt es nicht.

Das zu fertigende Bauteil entsteht im betrachteten Fall, indem an einen HEB 200 (gelb) auf einer Seite ein Blechstreifen (orange) angeschweißt wird. An diesen wiederum werden mittels zweier schmaler Blechstreifen (grün, blau) eine U-förmige Geometrie hinzugefügt.

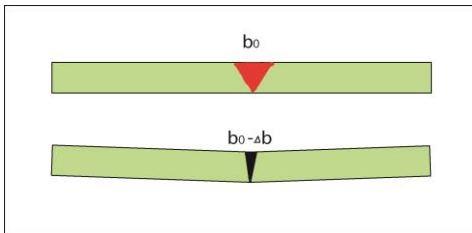


Das kleine Bild links illustriert den Aufbau im Querschnitt des oberirdisch liegenden Anteils. Wo, in welcher Form und mit welchem Verfahren die Schweißnähte genau angebracht werden, bleibt an dieser Stelle zunächst außen vor.

Ergänzend ist zu sagen, dass der HEB 200 (gelb) eine Länge von 6000 mm hat, während die zusätzlich angebrachten Bleche nur 4000 mm lang sind - der Bereich des Gesamtträgers, der im eingebauten Zustand oberirdisch zu sehen ist.

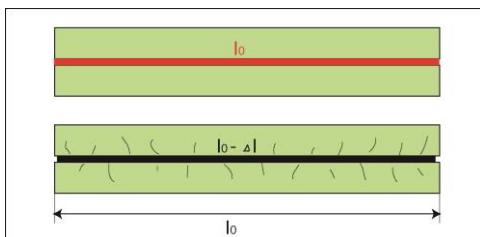
Nach dem Schweißen, soviel ist zu erwarten, wird ein erheblicher Schweißverzug in mehreren Richtungen zu erwarten sein.

Ursächlich dafür, auch das ist nichts Neues, ist die Tatsache, dass das flüssige Schweißgut bzw. der aufgeschmolzene Grundwerkstoff irgendwo im Bereich 1500°C erstarnt - und zwar eigentlich in der falschen Form und Ausdehnung, im Bild rot dargestellt. Denn was bei der Erstarrungstemperatur noch genau passt, muss dann abkühlen. Und die thermische Schrumpfung über der Temperatur ist etwas prozentuales!



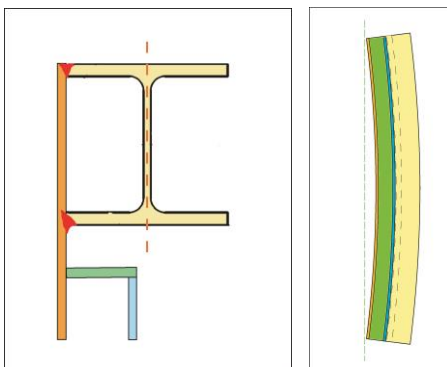
Im links gezeigten Beispiel einer einfachen V-Naht würde also der Fußpunkt mangels Breite überhaupt nicht kleiner, die Mitte schrumpft um die Hälfte von  $\Delta b$ , das obere Ende aber sogar um  $\Delta b$ . Das erstarrte Schweißgut, was bei etwa 1500°C noch die rot dargestellten Ausmaße hatte, ist auf den - zur Verdeutlichung etwas übertrieben dargestellten - schwarzen Umfang geschrumpft. Das Bauteil reagiert mit deutlichem Winkerverzug.

In dieser Dimension so weit so überschaubar - das Verständnis für Winkerverzug und dessen Entstehung ist jemandem schnell beigebracht.



Damit ist das Thema aber noch nicht abgehandelt! Genauso gilt es zu erkennen, dass in Längsrichtung genau das selbe Problem entsteht. Das noch flüssige Schweißgut erstarnt überall in zu kurzer Dimension für die Zieltemperatur. Der Grund dafür, dass eine Schweißnaht in einem dünnen Blech zu übelsten Verwerfungen führt.

Übertragen auf den zu fertigenden Eckträger bedeutet das im Querschnitt betrachtet, dass auf der Länge von 4m zwei Schweißnähte (in rot dargestellt im linken Bild) auf einer Seite der Symmetrielinie des HEB 200 aufgebracht werden - und keine auf der anderen.



Das Resultat ist im zweiten Bild in einer Seitenansicht gezeigt: Der Träger ist auf der Seite mit den Schweißnähten kürzer geworden und verformt sich entsprechend "bananenförmig"!

Spitzfindig könnte man nun bemerken, dass dadurch ja mehr Spielraum für das von rechts her einzuschiebende Haupt-Lärmschutzelement besteht. Richtig. Aber wenn man sich die nun bestehende Öffnung für das Türelement anschaut (grün), wird man erkennen, dass ein in sich gerades Türelement sicher nicht in einer bananenförmigen Nut gut aufgehoben ist! Man dürfte davon ausgehen, dass sich die betreffende Tür nicht wirklich öffnen und schließen lassen würde.

Jetzt gibt es wahrscheinlich fast schon einen Chor, der ruft "Wo ist nun das Problem, alles nichts neues, jetzt wird gerichtet!". Davon gehen wir aus. Und selbstverständlich ist nach dem Ende der Richtbemühungen mit Hilfe einer Presse, der Flamme oder (hoffentlich!) mit Tiefeninduktion alles gerade genug - also innerhalb der Toleranzen. Das wird sogar noch professionell dokumentiert.

Und man fragt sich vielleicht: "Wo war da jetzt das Problem?"

### 3.3 Feuerverzinken

Der Feuerverzinker freut sich über Werkstücke, bei denen keinerlei Hohlräume vorliegen und bei denen nach etwas Oberflächenvorbereitung das Bad im flüssigen Zink erfolgt. Gegebenenfalls wären danach irgendwelche "Zinknasen" zu entfernen, also Anhäufungen von Zink über die gewünschte Schichtdicke hinaus. Entweder werden diese durch fleißige Hände mit Winkelschleifern in Luftverschmutzung verwandelt oder aber schon mittels Tiefeninduktion in großen Plättchen vom Fußboden zwecks Wiederverwertung aufgefegt - aber ich schweife ab!

Schichtdickenmessung und entsprechende Dokumentation schließen einen professionellen Job ab. Der Feuerverzinker fragt übrigens ungeduldig, warum wir ihn mit dem Thema Verzug belästigen.

### 3.4 Beschichten

Möglicherweise handelt es sich um eine Pulverbeschichtung, die nun vorzunehmen ist. Dazu wird die verzinkte Oberfläche nochmals gereinigt und definiert entfettet, dann getrocknet. Danach geht es in die Pulverbeschichtungsanlage, in der bei moderat erhöhter Temperatur das Pulver aufgesprüht und letztendlich bei Temperaturen im Bereich 140...200°C eingebrannt wird.

Sichtkontrolle, Schichtdickenmessung und entsprechende Dokumentation, mehr können wir von unserem Beschichter doch kaum fordern. Also abliefern!

### 3.5 Überraschung

Das Telefon klingelt und ein deutlich genervter Bauleiter ruft an und fragt, ob man die Träger in China auf dem Fußboden geschweißt habe, so krumm wie die seien.

In Längsrichtung fände man fast 10 cm Verzug, die Anschlüsse zur Seite seien vollkommen aus der Flucht und in die geschweißten U-Anschlüsse bekäme man die einzuschiebenden Elemente nicht mal hinein, wenn der Gesamtträger gerade wäre, so sehr sind die Seitenteile des U verzogen.

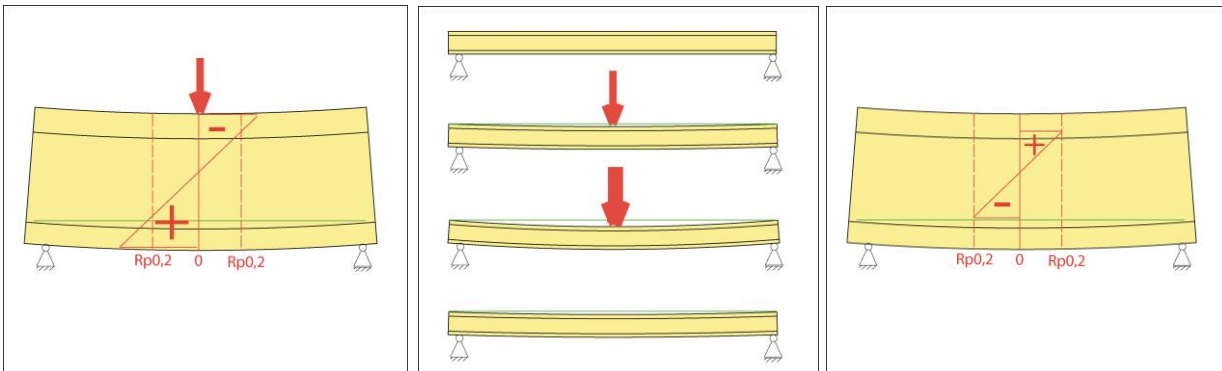
"Das kann ja gar nicht sein!"

## 4 Ursachenforschung

### 4.1 So funktioniert eine Formänderung

Verdeutlicht an einer einfachen Blechgeometrie soll dargestellt werden, was passieren muss, damit sich die Form ändert. Hier am Beispiel der Formänderung durch Biegung. Grundidee ist es, so viel Biegespannung einzubringen, dass die Belastbarkeit des Bauteils (=die Streckgrenze!) überschritten wird und die Spannungen ausplastifizieren - und damit eine neue Form entsteht.

Hört sich einfach an, aber ganz so einfach ist es nicht! Zunächst einmal wirkt eine "Biegespannung" in Form ihrer Komponenten als Druck- und Zugspannung. Im linken Bild oben die Druckspannung (-), unten die Zugspannung (+).



Im mittleren Bild ist dargestellt, wie die immer stärkere Kraft schliesslich zu einer permanenten Verformung führt. Die spannende Frage dabei: Wo im Profilquerschnitt wurde denn dabei die Streckgrenze (oder die 0,2%-Dehngrenze...) überschritten? Überall? Oder gerade so an der Stelle der größten Spannung (also aussen)?

Die erste Antwort "überall" ist schnell zu verwerfen. Der Spannungsverlauf ist wie im linken Bild erkennbar von maximaler Druckspannung aussen, nach innen abnehmend, in der Mitte gar eine "Neutrale Faser" und nach unten hin mit zunehmender Zugspannung. Es wäre mit Biegung also überhaupt nicht möglich, den gesamten Querschnitt über die Streckgrenze zu bringen!

Die zweite Antwort, dass es zu einer plastischen Gesamtverformung schon käme, wenn der maximale Spannungswert irgendwo außen auf dem Querschnitt erstmals die Streckgrenze überschreitet, ist ebenso unplausibel. Die Wahrheit liegt irgendwo dazwischen. Es kommt zu einer Art "Mehrheitsbildung" - sobald genügend Material über der Streckgrenze ist, wird die neue Form eingenommen.



Und das Resultat ist im rechten Bild der Reihe zu erkennen! Eine signifikante Menge des Materials steht nun unter Eigenspannung mit umgekehrten Vorzeichen (man könnte auch sagen "möchte wieder in die Ursprungsform zurück!"). Die spannende Frage: Wie groß sind diese Eigenspannungen? Das ruft nicht nach einem Difraktometer, sondern nur nach gesundem Menschenverstand. Diese Eigenspannungen können bis zur Streckgrenze reichen. Warum? Wären sie größer gewesen, wären sie ausplastifiziert.

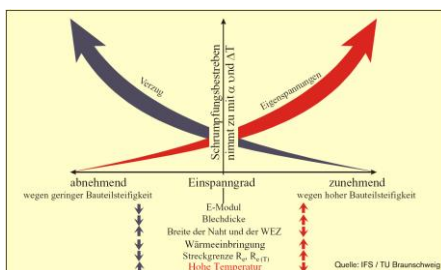
(Hinweis: Die Darstellung ist etwas vereinfacht, da in Wirklichkeit die Spannungen nach dem Überstrecken wieder etwas zurückgehen, aber zum Verständnis des Effekts sollte das genügen)

An dieser Stelle noch die wichtige Ergänzung: Es handelt sich um die Streckgrenze bei der Umformtemperatur! Also bei einer Kaltverformung mittels Presse oder Richtautomat um den Wert, nach dem ein Baustahl sogar benannt ist. Bei einem S355 also ein Wert von mindestens 355MPa.

Warum ist das wichtig? Weil die Streckgrenze bekanntlich mit der Temperatur abnimmt. Findet die Umformung beispielsweise bei 600°C statt, so sind die verbleibenden Eigenspannung als Richtwert nur noch halb so hoch.

Diesem Problem beim Kaltrichten beizukommen, dürfte übrigens erheblich schwierig sein. Die vollmundigen Versprechen, ein Richtautomat würde ganz spannungsarme Konstruktionen hinterlassen, sollte man kritisch hinterfragen.

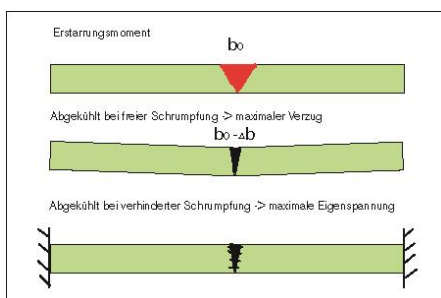
## 4.2 Eigenspannung statt Verzug



Dass Eigenspannung und Verzug bei einer Schweißung in Wirklichkeit nur zwei Seiten der selben Medaille sind, sollte eigentlich kein Geheimnis sein.

Beides sind mögliche (und unvermeidliche) Konsequenzen der entstehenden SCHRUMPFUNG, wie sie in Abschnitt 3.2 beschrieben wurde.

Das Bild links ist in Lehre und Forschung altbekannt und stellt alles richtig dar - nur etwas abstrakt!



Darunter in einem Bild wird gezeigt, wie das bei über 1500°C erstarrte Schweißgut (rot dargestellt) beim Abkühlen in einem freiliegenden Blech schrumpft und so zu Verzug führt - und direkt darunter die Situation, wenn eine Schrumpfung verhindert ist. Das abgekühlte Schweißgut steht nun unter Eigenspannungen, die wie hoch sind? Ganz klar: Bis zur kalten Streckgrenze! Alles, was darüber hinaus ging, wäre ausplastifiziert.

Spannend übrigens noch die Betrachtung, was wohl passieren würde, wenn man das eingespannt geschweißte Bauteil nach dem Abkühlen

aus der Einspannung nimmt. Keine große Überraschung: In vielen Fällen zeigt sich ein Maximum an Verzug!

Insofern die Warnung: Wenn man geschweißt hat und sieht keinen Verzug, ist das noch lange kein Grund, sich auf die Schulter zu klopfen. Falls ein hohes Maß an Schrumpfungen erzeugt wurde, haben sich diese in dem Fall eben komplett als Eigenspannungen manifestiert.

Damit kommen wir noch zu einer anderen Problematik: Ein Schweißlichtbogen kann bei schlechten energetischen Verhältnissen genau dazu führen, dass kein Verzug sichtbar wird (was ein Qualitätsmerkmal zu sein vorgibt!). In Wirklichkeit sind die erheblichen Schrumpfungen aber nur jeweils lokal so eingezwängt, dass sie nicht zu Verzug führen können. Die Eigenspannungen sind aber vorhanden. Kein Problem, solange sie nicht freigesetzt werden.

## 4.3 Eigenspannungen freigesetzt

Eigentlich schon fast eine Binsenweisheit: Wenn ein Bauteil vom Feuerverzinken wiederkommt, kann man erhebliche Überraschungen erleben. Der alte Aberglaube, dass der - vorher nicht vorhandene - Verzug vom groben Umgang der Feuerverzinker mit dem Bauteil kommt, kann schnell abgehakt werden. Das Thema ist einfach nur, dass bei einer Temperatur von um die 450°C die Streckgrenze des Materials abgesenkt wird - und ein erheblicher Teil der Eigenspannungen freigesetzt wird! Im Fall unseres krumm gemachten, vorher geraden Trägerchens aus Abschnitt 4.1 ist leicht vorhersehbar, was passieren wird: Die beabsichtigte, kalt hergestellte

Krümmung (beispielsweise als Überhöhung gefordert) wird nach dem Feuerverzinken weniger oder verschwindet gar ganz.

Ob die Eigenspannungen in diesem Fertigungsschritt dann aus der Halbzeuherstellung (kaltgewalzt versus warmgewalzt) stammen, aus einem scheinbar verzugsarmen Schweißprozess oder einem Kaltrichtvorgang, ist dann erst einmal belanglos.

Während das mit der eingebrachten Wärme und der daraus resultierenden Herabsetzung der Streckgrenze recht einfach zu verstehen und nachzuvollziehen ist, kommt ein anderer Effekt möglicherweise unerwartet. Auch mechanische Energie in Form eines Stoßes, Falls oder von länger andauernder Vibration kann dazu führen, dass Eigenspannungen freigesetzt werden und beispielsweise Verzug zurückkommt.

Sofern wir also mit einem Bauteil voller Eigenspannungen konfrontiert sind, kann das vollkommen problemlos sein - sofern das Bauteil nie mit eingebrachter Energie konfrontiert wird. Also nie nennenswert erwärmt (z.B. kalt lackiert) und nie dynamischer Last (Achtung, da gehört selbst die Vibration eines Transports auf dem LKW dazu!) ausgesetzt wird. In jedem anderen Fall ist dahingehend aber Vorsicht angesagt.

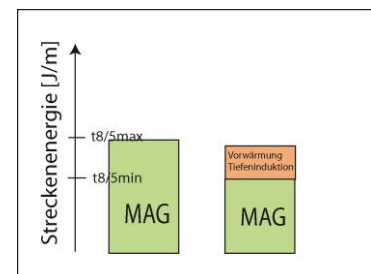
#### 4.4 Damit es nicht so weit kommt

Besonders wichtig ist, zuerst einen Regelkreis dahingehend einrichten, dass die Maße des fertigen Bauteils nach dem Feuerverzinken/Beschichten und vor dem Versand an den Kunden nochmals kontrolliert werden und man nötigenfalls nacharbeitet. Damit ist noch lange nicht klar, wo ein eventuelles Problem herkommt, aber man hat zumindest einen Mechanismus, der verhindert, dass das Problem zum Kunden verschleppt wird.

Da die Erkenntnis der Temperaturabhängigkeit der Eigenspannungen grundlegend ist, wäre als erste Abhilfe dafür zu sorgen, dass im eigentlichen Fertigungsprozess nicht kalt gerichtet, sondern fachgerecht thermisch gerichtet wird. Damit ist man entweder beim Flammrichten oder beim Richten mit Tiefeninduktion - bitte nicht mit Resonanzinduktion oder dergleichen, denn unkontrollierbar über 1000°C davonlaufende Oberflächentemperaturen sind dem Material nicht zuträglich!

Überlagert mit den Themen Energieverbrauch und Zeitbedarf wird man schnell beim Richten mit Tiefeninduktion landen.

Sofern sich das Problem auf den eigentlichen Schweißprozess zurückführen lässt, sei der Gedanke der "Energieumlagerung im Schweißprozess" erwähnt. Der Gedanke: Mehr Wärme als eigentlich notwendig vorher einbringen und danach Energie aus dem Lichtbogen nehmen. Beispielsweise beim MAG-Lichtbogen durch Erhöhen des Stickouts (Kontaktrohrabstand) bei verlängerter Gasdüsenlänge und einer Lichtbogenspannung, die mittels der Spannungskorrektur des Schweißgeräts gegebenenfalls auf den Wert vor der Energieumlagerung korrigiert wird. Dadurch wird das Maß an Schrumpfungen - und damit die Ursache für Verzug oder Eigenspannungen - quasi organisch reduziert. Übrigens resultiert daraus in Summe auch der kälteste Schweißprozess, so paradox sich das auch anhört.



Wer an dieser Stelle nur den Kopf schüttelt und darauf hinweist, dass man doch allerorts versuche, das Vorwärmen entfallen zu lassen oder zumindest zu minimieren, dem sei gesagt:

- Mit Tiefeninduktion "tut vorwärmen nicht mehr weh", siehe dazu beispielsweise den Literaturverweis [4], da es schnell geht - bei Mechanisierung eventuell sogar direkt vorlaufend - und der Energieaufwand begrenzt ist
- Im Endeffekt gilt es objektiv abzuwägen, was in Summe der am wenigsten aufwändige Prozess ist.

Entscheidend ist, dass es mit einer gekapselten Betrachtung von Schweißen und Richten nicht getan ist, sondern eine gesamtheitliche Betrachtung des Herstellprozesses unter Einbezug zumindest der Schweißaufsicht erforderlich ist.

## 5 Das Kind liegt im Brunnen - Abhilfe

Was nun also tun, wenn man nach dem Verzinken, nach dem Beschichten oder tatsächlich nach dem Transport auf die Baustelle nicht tolerabler Verzug auftaucht?

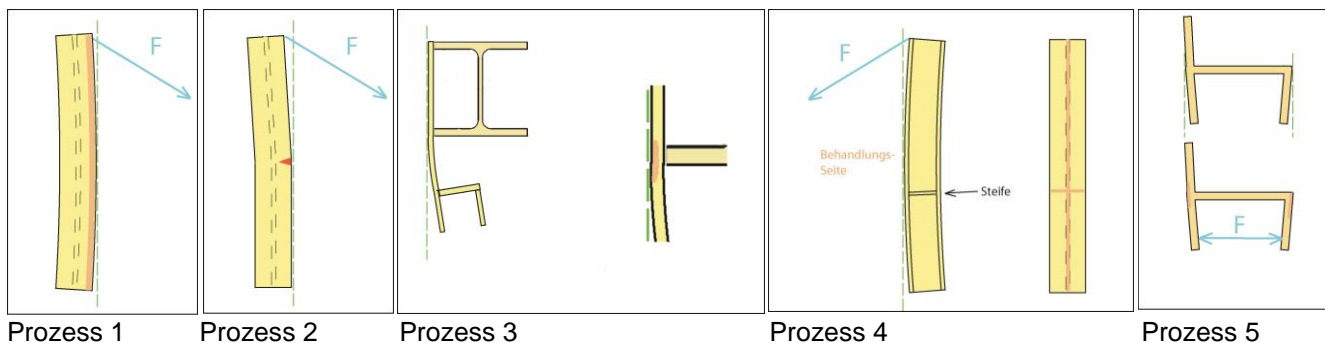
Am Fall von sogar bereits einbetonierten Trägern sei hier beschrieben, was mit Tiefeninduktion machbar ist.

Die wichtigsten Forderungen waren:

- Die Träger müssen nicht demontiert werden, denn das wäre schadensfrei gar nicht möglich
- Während man mit Schaden an der Deckbeschichtung leben kann, muss die Verzinkung in nachgewiesenen einwandfreiem Zustand bleiben.

### 5.1 Festlegen der Richtfiguren

Es wurden in Summe folgende fünf Verzugsformen festgestellt und die Richtfiguren (rot) dazu festgelegt:



Hierbei ist besonders zur Kenntnis zu nehmen, dass im zweiten Fall jeweils eine Durchwärmung der beiden Gurtseiten erforderlich ist, während bei den anderen Fällen jeweils nur zu ca. einem Drittel ins Bauteil gewärmt werden muss.

Nun ist das thermische Richten ein Vorgang, bei dem die eigentliche Formänderung durch eine verhinderte Ausdehnung im Erwärmungsmoment - und die daraus resultierenden Druckspannungen, die die (thermisch verminderte) Streckgrenze überschreiten - resultiert.

Wie in [3] dargelegt, ist der entscheidende Gegenspieler der Streckgrenze der Elastizitätsmodul  $E$ . Da anders als beim Biegen die Biegespannung nicht von extern aufgebracht wird sondern durch die Federwirkung des erhitzten Bereichs kommt, der größer werden müsste aber das nicht kann, verdient der Elastizitätsmodul einen genaueren Blick - besseresagt dessen Verlauf über der Temperatur.

Bedingt durch den Unterschied im Temperaturverlauf von Elastizitätsmodul und Streckgrenze ergibt sich ein Richteffektmaximum für Stahl im Bereich  $550^{\circ}\text{C}$ . Das wiederum führt bei nicht tiefenwirksamen Wärmemethoden (wie der Flamme oder aber gar Resonanzinduktion) zur Notwendigkeit teils erheblicher Übertemperaturen an der Oberfläche - womit es schwierig wird, damit ohne Zerstörung der Zinkschicht - selbst bei Nutzung von Flussmittel - zu richten.

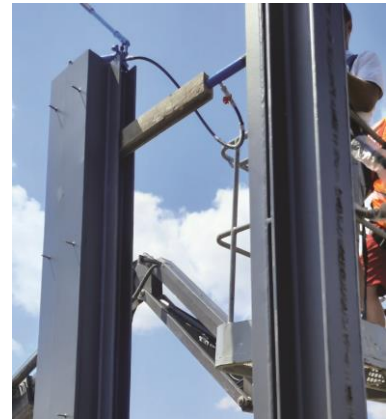
### 5.2 Externe Dehnungsbehinderung

Das Gegenteil einer "verhinderten Ausdehnung" wäre, wenn sich die erwärmte Zone weitgehend unbehindert ausdehnen kann, was sich in einer Formänderung genau entgegen der gewünschten Richtung äußert. Das kann bei Bauteilen der Fall sein, die für das gewählte Richtverfahren nicht über genügend Eigendehnbehinderung verfügen. Deswegen der Geheimtipp, für jede Bauteilart einmal nachzumessen, wenn die Wärme komplett eingebracht ist. "Geht das Bauteil mit", dann ist es Zeit, über externe Maßnahmen der Dehnungsbehinderung nachzudenken.

Im Fall eines HEB-Trägers muss in jedem Fall mit einem Mitgehen und damit mit verhinderter oder gar ausbleibender Richtwirkung gerechnet werden. Die leider immer wieder beobachtete Abhilfe im Rohbau in der Praxis, der sogenannte "Autogen-Notausgang" besteht schlichtweg in höherer Temperatur, solange niemand zusieht... Das wäre schon im Rohbau nicht fach- und materialgerecht - und für ein Richten, bei dem die Zinkschicht ganzbleiben muss ganz sicher nicht tolerabel.

In den Fällen also, in denen ein Mitgehen zu erwarten ist, muss dafür gesorgt werden, dass diese nicht geschehen kann. Der Schlüssel beim Thema Dehnungsbehinderung heisst PRAKTIKABILITÄT. Es muss möglich sein, die Dehnungsbehinderung schnell und mit minimalem Aufwand anzubringen und am Ende des Richtvorgangs wieder abzunehmen.

Das wiederum steht und fällt mit der Vorbereitung. Im Bild rechts sieht man beispielsweise eine Hand-Hydraulikpresse, welche bei dem Richtvorgang gemäß dem vierten Bild (Prozess 4) in der Reihe der Richtaufgaben bearbeitet wird. Die Dehnungsbehinderung, die in dem Bild als blauer Pfeil "F" eingezeichnet ist, wird hier nicht als Abspannung, sondern als Abstützung zum Nachbarträger realisiert. Die Vorbereitung bestand darin, ein geeignetes Verlängerungsstück für die Handpresse zu besorgen.



Die selbe Presse wird auch benutzt, um in Prozess 5 die kleine, geschweißte U-Profilform wieder auf ihr Sollmaß 80 mm zu richten.

Für Prozess 1,2 und 4 wird eine Abspannung mit einer Spannkette (Tragfähigkeit 5 Tonnen) beispielsweise auf den Fuß eines benachbarten Trägers vorgenommen. Die Vorbereitung besteht darin, die Spannkette an sich zu besorgen und passende Verlängerungsstücke herzustellen.

Prozess 3 funktioniert dahingehend "minimalinvasiv", keine externe Dehnungsbehinderung erforderlich.

### 5.3 Festlegen des Gesamtprozesses und Qualifizieren der HPS

Die sogenannte "Master-Verfahrensanweisung" von VauQuadrat führt die Schweißaufsicht Schritt für Schritt durch die Erarbeitung der Richtanweisung (HPS). Darin wird sowohl beschrieben, welche Induktorform, welche Leistungseinstellung, welcher Abstand und welche Geschwindigkeit zu verwenden ist. In diesem Fall ebenfalls dass die Prozesse 1, 3, 4 und 5 mit Hilfe eines Traktors auszuführen sind, um die geforderte Gleichmäßigkeit zu gewährleisten. Dafür wird dann eine am Traktor einzustellende Geschwindigkeit (in cm/min) angegeben.

Bei der lokalen, keilförmigen Durchwärmung nach Prozess 2 kann man sich tatsächlich an der Temperatur auf der Gegenseite (ca. 200°C) orientieren.

Zur Qualifizierung geht man wie immer in zwei Stufen vor:

- 1) Nachweis des Ergebnisses. Ist der nötige Richteffekt erreicht? Passen die Elemente in die Nute? Und vor allem: Mittels Zinkschicht-Dickenmessung nachvollziehen, dass noch genügend Zink vorhanden ist - und einmal untersuchen lassen, dass die Qualität der Zinkschicht noch passt.
- 2) Nachweis der Reproduzierbarkeit: Kommt aus dem selben Prozess immer das selbe Ergebnis heraus und ist neben dem hinreichenden Richteffekt ausnahmslos die Zink-Schichtdicke gewährleistet.



## 6 Schrifttum

1. DIN EN 1090-2 Anhang D
2. DVS-Berichte Band 327 S. 6-13
3. DVS-Berichte Band 337 S. 468-475
4. DER PRAKTIKER Ausgabe 1-2/2023
5. GSI: Schweissfachingenieurlehrgang Teil 3 Hauptgebiet 4 Kap. 4.03
6. [www.vauquadrat.com](http://www.vauquadrat.com)

Kontakt zum Autor:

E-Mail [tv@vauquadrat.com](mailto:tv@vauquadrat.com)

Kommentare willkommen!