



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelor Arbeit

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Thermisches Richten im Schienenfahrzeugbau

Tim Weidke

Abgabedatum: 01.03.2012

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

ALSTOM Transport Deutschland GmbH
PA-FT Arbeitsvorbereitung Fügetechnik
Linke-Hofmann-Busch-Str. 1
DE 38239 Salzgitter

Verfasser: Tim Weidke
Abgabedatum: 01.03.2012

1. Prüfer: Prof. Dr. Lutz Müller
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Martin Strothmann

Industrielle Betreuung: Dipl.-Ing. Martin Strothmann / Dipl.-Ing. Michael Keutel

HAW Hamburg
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

ALSTOM Transport Deutschland GmbH
Arbeitsvorbereitung Fügetechnik PA-FT
Linke-Hofmann-Busch-Straße 1
38239 Salzgitter

Bachelor Arbeit: Thermisches Richten im Schienenfahrzeugbau

Abgabedatum: 01.03.2012

Verfasser: Tim Weidke

1. Prüfer: Prof. Dr. Lutz Müller
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Martin Strothmann

Industrielle Betreuer: Dipl.-Ing. Martin Strothmann / Dipl.-Ing. Michael Keutel

Abstract

Diese Ausarbeitung beschäftigt sich mit dem thermischen Richten im Schienenfahrzeugbau. Die Rohbaukarosserien von Schienenfahrzeuge stellen sehr große und komplexe Schweißbaugruppen dar, die aus verschiedensten Werkstoffen hergestellt werden. Gepaart mit der Tendenz zur Leichtbauweise werden die Fahrzeuge als sehr steife Dünnschichtstrukturen ausgeführt. Umso schwieriger sind die - durch das Schweißen erzeugten - thermisch bedingten Verzüge zu beherrschen. Mit Schweißverfahren und Spannvorrichtungen, die dem neuesten Stand der Technik entsprechen, kann diese Verzugsbildung minimiert werden. Jedoch überwiegen in der Kleinserienfertigung des Schienenfahrzeugbaus manuelle Arbeiten, die eine gänzliche Vermeidung von Verzug nicht ermöglichen. Dementsprechend wichtig ist es, Verfahren zu beherrschen, die diesen Verzug konstruktionsgerecht beseitigen können.

In dieser Arbeit wird insbesondere das Flammrichten untersucht. Ein seit Jahrzehnten angewandtes Verfahren zur Verzugsbeseitigung, das jedoch immer noch größtenteils auf Erfahrungswerten aufgebaut ist.

Auf den folgenden Seiten werden zunächst die Anwendungsgebiete im Schienenfahrzeugbau aufgezeigt. Zudem wird das Flammrichtverfahren vorgestellt und genauer erläutert. Für das ausgeprägte Spektrum an eingesetzten Werkstoffen werden Anwendungshinweise gegeben. Eine Versuchsreihe zum Richten von Blechfeldern soll weitere Informationen liefern, um im Anschluss eine Arbeitsanweisung für den Einsatz des Flammrichtens im Schienenfahrzeugbau und artverwandten Fertigungsgebieten anfertigen zu können.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Salzgitter, den 29. Februar 2012

Tim Weidke

Für die Unterstützung während meines Studiums und der abschließenden Praxisphase möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie, meinen Betreuern und Fachkräften der Abteilung Fügetechnik der Firma *ALSTOM Transport Deutschland GmbH* und Prof. Dr. Lutz Müller bedanken.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen	Seite
Abb. 1-1 Untergestell in Spannvorrichtung	12
Abb. 1-2 Beispielhafter Verzug durch Längsnaht	13
Abb. 1-3 Beispielhafter Verzug durch Stumpfnähte	14
Abb. 1-4 Maßverkürzung durch übermäßiges Richten	14
Abb. 1-5 Maßverkürzung durch ungünstiges Wärmebild	15
Abb. 1-6 Portal eines Wagenkastens	16
Abb. 1-7 Wagenkasten aus Aluminium, Integralbauweise	16
Abb. 1-8 Richten mit Magnetplatte	17
Abb. 1-9 Richten einer bombierten Seitenwand	17
Abb. 1-10 schematischer einer Magnetspannvorrichtung	18
Abb. 1-11 ungerichtete Seitenwand	20
Abb. 1-12 qualitativer Spannungsverlauf von Blechfeldern auf einer Rahmenstruktur	21
Abb. 1-13 Arbeitsschritte des freien Richtens von bombierten Seitenwänden	22
Abb. 1-14 Maßhaltigkeit bombierter Blechfelder	23
Abb. 1-15 Baureihe Coradia Nordic	24
Abb. 1-16 Drehgestell	25
Abb. 1-17 Richtstellen an Drehgestellen	26
Abb. 2-1 axiale Längenänderung durch Erwärmung	27
Abb. 2-2 dehnungsbehinderte Erwärmung	27
Abb. 2-3 Mechanische Kennwerte von Stahl bei Erwärmung	28
Abb. 2-4 isotherme Wärmeeinflusszonen	29
Abb. 2-5 Temperaturgradient-Mechanismus	30
Abb. 2-6 Beispiele für externe Dehnungsbehinderungen	32
Abb. 2-7 Einfluss der Dehnungsbehinderung auf die plastische Stauchung	33
Abb. 2-8 Längseigenspannungsverlauf einer Stumpfnäht	34
Abb. 2-9 Quereigenspannungen einer Stumpfnäht	35
Abb. 2-10 Einfluss der Schweißparameter auf die Spannungsbildung	35
Abb. 2-11 qualitativer Eigenspannungsverlauf eines geschweißten I-Profiles	36
Abb. 2-12 qualitativer Eigenspannungsverlauf eines geschweißten Kastenprofils	36
Abb. 2-13 thermische Kennwerte von Baustahl in Abhängigkeit der Temperatur	41
Abb. 2-14 Eisen- Kohlenstoff- Diagramm	42
Abb. 2-15 kontinuierliches Z-T-U-Schaubild eines Baustahl S355	42

Abb. 2-16 kritischer Bereich für Chromcarbidausscheidungen	44
Abb. 2-17 schematischer Verlauf des Kornwachstum von austenitischem und ferritischem Stahl	45
Abb. 2-18 ZTU-Diagramm S355J2	48
Abb. 2-19 ZTA-Diagramm S355J2	49
Abb. 2-20 ZTU-Diagramm S550MC	52
Abb. 2-21 ZTA-Diagramm 1.4003	55
Abb. 2-22 Zustands- und ZTU-Diagramm 1.4003	56
Abb. 2-23 Festigkeitsverlust in Abhängigkeit der Erwärmungstemperatur	58
Abb. 3-1 Flammeinstellungen	61
Abb. 3-2 Wärmestromdichteverteilung	62
Abb. 3-3 Wärmestromdichteverlauf über den Flammkegelabstand	64
Abb. 3-4 Spannungsverteilung eines Wärmepunktes	65
Abb. 3-5 Wärmestrich	66
Abb. 3-6 Wärmekeil	67
Abb. 4-1 Steifigkeitsverlauf beim Erwärmen des Stegs a)	70
Abb. 4-2 Steifigkeitsverlauf beim Erwärmen des Stegs b)	70
Abb. 4-3 I-Profil nach DIN 1025	71
Abb. 4-4 Spannungsschema bei der Erwärmung von Profilen	73
Abb. 4-5 Spannungsschema am Wärmekeil	74
Abb. 4-6 Wärmestrom bei Erwärmung von der Keilspitze aus	75
Abb. 4-7 Wärmestrom bei der Erwärmung von der Keilöffnung aus	75
Abb. 4-8 Schema des Ausbeulens von Gurten bei Erwärmung	76
Abb. 5.1 Rohling für einzelne Wärmepunkte	79
Abb. 5-2 Spannrahmen und eingestellter Spannungszustand	80
Abb. 5-3 Schema der Änderung der Beulhöhe nach Wärmepunkt	81
Abb. 5-4 Abkühlkurven 1.4301 an Luft	82
Abb. 5-5 Schrumpfungen der Beulhöhe 1.4301 an Luft	83
Abb. 5-6 Abkühlkurve D13 Luft	84
Abb. 5-7 Abkühlkurve D25 Luft	84
Abb. 5-8 Abkühlkurve D35 Luft	85
Abb. 5-9 Abkühlkurve D40 Luft	85
Abb. 5-10 Schrumpfungen der Beulhöhen bei verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten	86

Abb. 5-11 Überhöhungen 1.4301	87
Abb. 5-12 Abkühlkurven 1.4003 Luft	88
Abb. 5-13 Abkühlkurven 1.4003 Druckluft 2 bar	88
Abb. 5-14 Abkühlkurven 1.4003 Druckluft 8 bar	89
Abb. 5- 15 Schrumpfungen der Beulhöhe 1.4003	89
Abb. 5-16 Härtmessungen von Wärmepunkten am 1.4003	90
Abb. 5-17 Überhöhungen 1.4003	92
Abb. 5-18 Verwerfungsbild Wärmepunktfeld 1	93
Abb. 5-19 schematischer Spannungsverlauf eines Wärmepunktfeldes	94
Abb. 5-20 Verwerfungsbild Wärmepunktfeld 2	95
Abb. 5-21 Verwerfungsbild zwischen Wärmepunkten	96
Abb. 5-22 schematischer Spannungsverlauf quadratisch angeordneter Wärmepunkte	96
Abb. 5-23 Wärmepunktanordnung entsprechend der dichtesten Packung	97
Abb. 6-1 Arbeitsanweisung	100ff.
Tab. 1 Werkstoffkennwerte 1.0579 nach 10025-2 und SEW 310	47
Tab. 2 Werkstoffkennwerte nach DIN EN 10028-3 und SEW 310	50
Tab. 3 Werkstoffkennwerte 1.0984 nach DIN EN 10149 SEW 310	51
Tab. 4 Werkstoffkennwerte 1.4003 nach DIN EN 10088-2	54
Tab. 5 Werkstoffkennwerte 3.3547 nach EN 573-3	56
Tab. 6 Werkstoffkennwerte 3.2315 nach EN 573-3	57
Tab. 7 Brennergrößen nach DIN 8543	62
Tab. 8 Messergebnisse 1.4301 Luft	82
Tab. 9 Messergebnisse 1.4301 Druckluft 8 bar	86
Tab. 10 Messergebnisse 1.4301 Druckluft 2 bar	86

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0 Abstract	
Abbildungsverzeichnis	
Formelzeichen	
1 Einleitung	11
2 Anwendungen des thermischen Richtens im Schienenfahrzeugbau	
2.1 Untergestelle	12
2.2 Wagenkasten	16
2.3 Beblechungen	17
2.4 Drehgestelle	25
3 theoretische Grundlagen	
3.1 Wirkprinzip des thermischen Richtens	
3.1.1 thermische Ausdehnung	27
3.1.2 interne Dehnungsbehinderung	29
3.1.3 Wirkmechanismen	30
3.1.4 externe Dehnungsbehinderungen	31
3.2 Einfluss von Eigenspannungen	
3.2.1 Eigenspannungen durch Schweißarbeiten	34
3.2.2 Umwandlungseigenspannungen	36
3.2.3 herstellungsbedingte Eigenspannungen von Halbzeugen	37
3.2.4 Fazit	37
3.3 Einfluss der Werkstoffeigenschaften	
3.3.1 allgemeine Eigenschaften	39
3.3.2 maximale Temperaturen und Haltezeiten	41
3.3.2.1 umwandlungsfähige Stähle	41
3.3.2.2 umwandlungsfreie Stähle	44
3.3.2.3 Aluminiumlegierungen	46
3.3.3 schienenfahrzeugbauspezifische Werkstoffe	47
4 Stand der Technik des Flammrichtens	
4.1 autogene Erwärmung, Flammrichten	59
4.1.1 Das Gasmisch	59
4.1.2 Brennergröße und –arten	61
4.1.3 Brennerhaltung	63
4.1.4 Wärmebilder	64
4.1.5 Bewertung	67

5	Hintergrund effektiver Wärmebilder	
5.1	Art und Ausführung des Wärmebilds	69
5.2	Effektive Wärmebilder	69
5.3	Position der Wärmebilder	70
6	Untersuchungen zum Richten von Beblechungen	
6.1	Versuchsaufbau	78
6.1.1	Messmittel	78
6.1.2	Vorbereitung	79
6.2	Versuchsdurchführung	80
6.3	Zusammenfassung	98
7	Entwurf einer Arbeitsanweisung	100
8	Zusammenfassung und Ausblick	111

1 Einleitung

Beim thermischen Richten handelt es sich um einen Fertigungsprozess der Hauptgruppe 2 nach DIN 8580, dem Umformen. Allerdings variieren die Einsatzgebiete dieses Verfahrens je nach Fertigungsgebiet. So kann das Verfahren dazu eingesetzt werden, Halbzeuge für die Weiterverarbeitung in die gewünschte Form zu bringen, durch Beschädigung verformte Bauteile wieder instand zu setzen oder fertigungsbedingte Maßabweichungen auszugleichen. So variabel die Einsatzgebiete sind, umso umfangreicher sind auch die anwendungsspezifischen Eigenheiten des thermischen Richtens.

Im Schienenfahrzeugbau wird dieses Verfahren hauptsächlich zur Beseitigung des fertigungsbedingten Verzug eingesetzt. Da das gebräuchlichste Fügeverfahren bei der Herstellung der Rohbauten und Wagenkästen das Schweißen darstellt, werden Bauteile und -gruppen stets örtlich thermisch beansprucht und durch die Schrumpfkkräfte der Schweißnähte mit Verzug und Eigenspannungen beaufschlagt. Bei den Rohbauten handelt es sich um groß dimensionierte Baugruppen mit einer starken Ausrichtung auf Leichtbauweise. So sind die Auswirkungen der thermisch bedingten Schrumpfkkräfte umso schwerwiegender in ihrer Entstehung sowie in ihrer Beseitigung. Zudem werden von den Schienenfahrzeugbetreibern hohe Anforderungen (z.B. BN 481003) an die Fertigungsqualität gestellt, die eine Beherrschung dieses Verfahrens unumgänglich machen. Der umfangreiche Einsatz von Schweißverfahren definiert den Einsatz des thermischen Richtens im Schienenfahrzeugbau. So sind die zu richtenden Bereiche meist sehr steife Dünoblechkonstruktionen, die in der Struktur unterschiedlich stark verspannt sind und durch die Schweißarbeiten hohen inhomogenen Eigenspannungen ausgesetzt sind. Dieses sind alles Zustände, die den Richtprozess stark beeinflussen und vor dem Einsatz berücksichtigt werden müssen. Ein unvorbereiteter Richtversuch kann sonst zu unzureichenden Ergebnissen oder auch zu verstärktem Verzug der Bauteile führen.

Grundsätzliche Informationen für die Ausführung von Richtarbeiten im Schienenfahrzeugbau wurden im DVS Merkblatt 1614 zusammengefasst. Jedoch stellt dieses Merkblatt keine Hinweise bezüglich einer direkten Arbeitsanweisung für den Betrieb bereit.

2 Anwendungen des thermischen Richtens im Schienenfahrzeugbau

In der Fertigung der Rohbauten lassen sich vier hauptsächliche Einsatzgebiete unterscheiden.

2.1 Untergestelle

Zum ersten müssen die Grundrahmen, die Untergestelle (Abb. 1-1), des Schienenfahrzeugs gerichtet werden. Hierbei handelt es sich um Leiterraahmenstrukturen aus S355J2 oder S500MC, die vor allem in ihren Längs- und Ebenenmaßen nach der Fertigung beeinflusst werden müssen. Dominierend ist hier ein Winkerverzug der geschweißten Profile der Quer- und Längsträger.



Abb. 1-1 Untergestell in Spannvorrichtung

[Foto: ALSTOM Transport Deutschland GmbH]

Aufgrund der Anbindungen zum Drehgestell und der Befestigung von Wagenkastenkomponenten wird ein hoher Grad an Maßgenauigkeit verlangt.

Der Zusammenbau der Untergestelle ist in Segmenten aufgebaut. Einzelne Schweißbaugruppen wie End- und Hauptquerträger und die verbindenden Rahmenstrukturen werden in Spannvorrichtungen geschweißt.

Eine Schweißfolge ist generell vorgegeben, um das Verzugsbild zu reduzieren. Auch die Spannvorrichtungen minimieren die Maßabweichungen. Durch die kompakte Bauweise der Segmente sind Maßabweichungen und damit verbundene Richtarbeiten nahezu unnötig. Erst bei dem Zusammenbau der einzelnen Segmente haben die Schweißverzüge einen relevanten Einfluss, dem jedoch auch präventiv begegnet werden kann. Mit

Erfahrungswerten und Datenbanken zu erfassten Schweißverzügen werden Vormaße für jede Schweißnaht eingeplant, welche den Längs- und Querverzug der Schweißnähte ausgleichen. Dadurch wird eine nachträgliche Richtarbeit am Untergestell meistens unnötig. Allerdings überlagern sich bei der Fertigung der Untergestelle verschiedene manuelle Arbeitsschritte. So müssen die Schweißnahtvorbereitungen oft manuell hergestellt werden. Sie beeinflussen durch leicht variierende Öffnungswinkel und Spaltmaße die Schrumpfkkräfte. Die Schweißparameter sind durch die WPS (Welding Process Specification) vorgegeben, beinhalten aber immer einen Spielraum, der es den Schweißern ermöglicht, diese auf ihre Arbeitsweise einzustellen. Auch dadurch entstehen am Untergestell keine einheitlichen Spannungszustände.

Und auch der Abarbeitungszeitraum hat einen wesentlichen Einfluss. Je nach der verbleibenden Temperatur vorangegangener Schweißnähte, wird das Spannungsbild der Folgenden beeinflusst.

Auch die Spannvorrichtungen werden teilweise von Hand verspannt und verändern die Schrumpfmaße, Da die Ausbildung von Schrumpfkkräften maßgeblich von der Dehnungsbehinderung der vorangegangenen thermischen Ausdehnung abhängig ist.

Diese Bandbreite von Einflüssen verhindert in diesem Fall eine einschlägige Planung des Verzuges. Somit kann auch keine Vorgabe von Richtparametern festgelegt werden. Eine Problematik die im Schienenfahrzeugbau und ähnlichen Fertigungsgebieten immer wieder anzutreffen ist. Jedes Untergestell muss individuell gemessen und behandelt werden. Der einzige Bezug zwischen den Untergestellen kann über die Art der Verzugsbilder hergestellt werden, welche durch die Art der Schweißverbindung hervorgerufen werden.

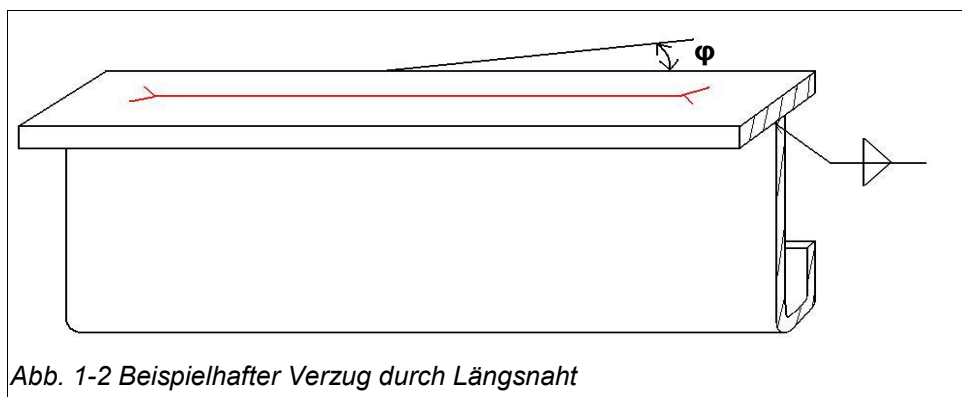
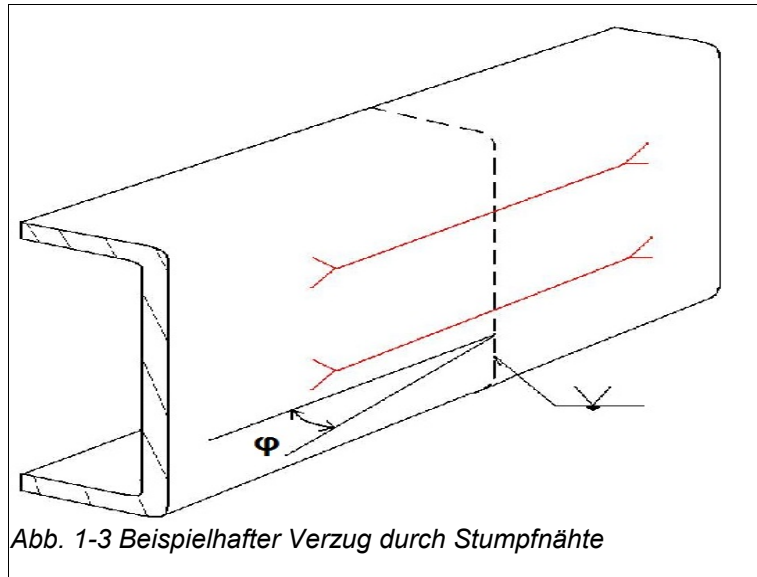


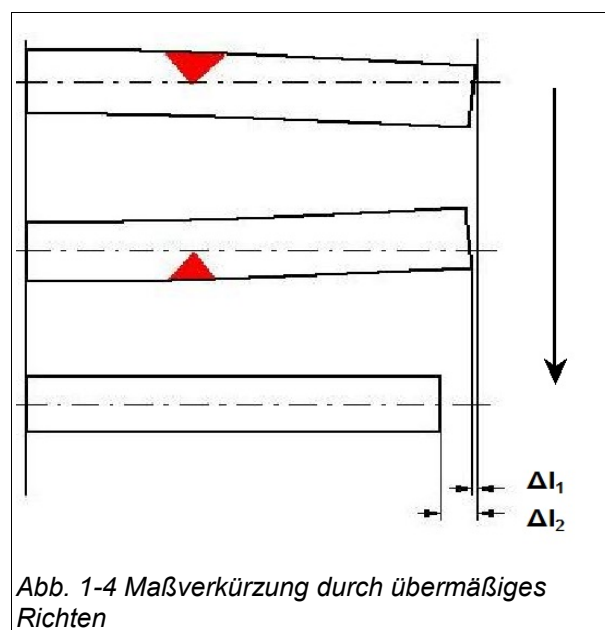
Abb. 1-2 Beispielhafter Verzug durch Längsnaht

Längsnähte verursachen hauptsächlich eine axiale Längenverkürzung sowie bei exzentrischer Lage Winkelverzüge (Abb. 1-2). Stumpfnähte zeichnen sich bei angepasster Schweißfolge vor allem durch einen ausgeprägten Querverzug aus (1-3.). Jedoch kann die

Schweißfolge nicht immer verzugsgerecht ausgeführt werden. Hoch beanspruchte Nähte müssen in erster Linie fehlerfrei geschweißt werden und so muss die Schweißfolge häufig auf eine geeignete Wärmeabfuhr des Verzugs erfolgen. Dementsprechend kann ein zusätzlicher Winkelverzug solcher Stumpfnähtverbindungen nicht immer ausgeschlossen werden.

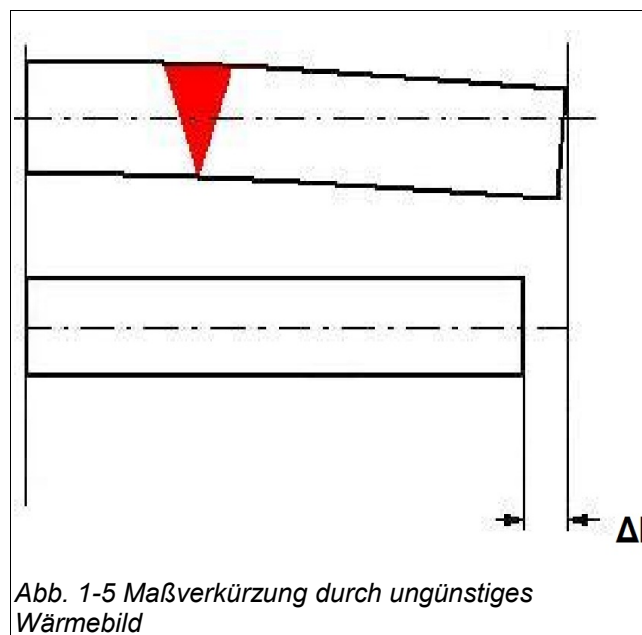


Die größten Schwierigkeiten bei Richtarbeiten bestehen also darin, die Wärmebilder und -größen dem jeweiligen Verzugsbild anzupassen. Besonders durch die schwankenden Spannungszustände kann keine Vorhersage über das effektive Schrumpfmaß der Richtstelle getätigt werden. Um Maße im Toleranzbereich zu erzeugen, muss also jede Richtstelle iterativ behandelt werden.



Die größte und schwerwiegendste Fehlerquelle bei Richtarbeiten am Untergestell besteht darin, falsche oder zu große Wärmebilder anzusetzen. Dadurch, dass das Schrumpfmaß in derartigen Schweißbaugruppen nicht sicher bestimmt werden kann, können große Wärmebilder eine übermäßige Maßverkürzung bewirken. Als Konsequenz muss ein gegenseitiges Schrumpfmaß erzeugt werden.

Nicht nur, dass sich dadurch die Arbeitszeit verlängert, auch die Tatsache, dass jede Richtstelle eine Verkürzung mit sich zieht, bewirkt eine resultierende Maßverkürzung über die gesamte Länge des Bauteils (Abb. 1-4). Eine Unterschreitung des Toleranzbereiches in der Maßhaltigkeit kann die Folge sein.



Ebenso kann ein falsch gewähltes Wärmebild eine unerwünschte gesamte Verkürzung des Bauteils hervorrufen (Abb 1-5).

Eine Voraussage, wie groß die resultierende Verkürzung bei einer derartigen Arbeitsweise ist, kann ebenfalls nicht zuverlässig gemacht werden. Jedoch können Messungen an solch übermäßig behandelten Stellen ein Schrumpfmaß in Bereichen mehreren Millimetern belegen. Um diesen stellenweise gravierenden Maßverkürzungen aus dem Weg zugehen, sollte hier ein besonderes Augenmerk auf die Ausführung der Richtarbeiten gelegt werden.

2.2 Wagenkasten

Das zweite Anwendungsgebiet des thermischen Richtens ist die Wagenkastenstruktur (Abb. 1-6). Hier ist die Differentialbauweise vorherrschend, wobei die Wagenkästen aus Baustählen und verschiedenen korrosionsbeständigen und -trägen Chrom-Nickel-Stählen bestehen. Die Kastenstruktur setzt sich also –vereinfachend beschrieben - aus Rahmen mit aufgeschweißten Beblechungen zusammen. Durch den Einsatz von Widerstandspunkt- und Laserstrahlschweißverfahren können die thermisch induzierten Spannungen und Verzüge bereits deutlich reduziert werden, rufen jedoch stets einen mehrdimensionalen Spannungszustand hervor. Durch die großen Schweißnahtlängen in Längs-, Quer- und Höhenrichtung bei dem Zusammenbau der Wagenkastenkomponenten wird die Maßhaltigkeit stark beeinflusst, muss deswegen aufwändig gemessen, anschließend in mehreren Schritten gerichtet werden und erneut gemessen werden.



Abb. 1-6 Portal eines Wagenkastens
Foto: [ALSTOM Transport Deutschland GmbH]



Abb. 1-7 Wagenkasten aus Aluminium, Integralbauweise
Foto: [ALSTOM Transport Deutschland GmbH]

Wagenkasten aus Aluminiumwerkstoffen (Abb. 1-7), meist das warm ausgelagerte AW 6082 und das naturharte AW 5083, werden in der Integralbauweise hergestellt. Durch die Bauweise aus zusammengesetzten Strangpressprofilen ist der Schweißaufwand meist reduziert. Auch die erhöhte Steifigkeit der Wagenkästen spricht für eine verzugsunempfindliche Bauweise, die jedoch durch das verstärkte Schrumpfen der Aluminiumwerkstoffe bei thermischer Beaufschlagung relativiert wird.

Auch hier wird das thermische Richten meist zur Beseitigung von Winkelverzug eingesetzt.

2.3 Beblechungen

Das dritte und wohl speziellste Anwendungsgebiet ist das Richten der Seiten- und Stirnwandbeblechungen. Durch das Schweißen der Bleche mit der Rahmenstruktur, sowie dem anschließenden Fügen der Seitenwände zur Kastenstruktur bilden die Blechfelder teils starke Verwerfungen aus, die anschließend auf geringe Maßtoleranz gerichtet werden müssen.



Abb. 1-8 Richten mit Magnetplatte
Foto: [ALSTOM Transport
Deutschland GmbH]



Abb. 1-9 bombierte Seitenwand
Foto: [ALSTOM Transport Deutschland
GmbH]

Zum Einsatz kommen hier Spannvorrichtungen in Ausführung als Magnetplatten (Abb. 1-8) mit Gegenplatten oder Vakuumspannplatten sowie freie Richtarbeiten des Richtpersonals (Abb. 1-9). Das Ziel der Richtarbeiten ist im Falle der Stirnwände (Abb. 1-6 und 1-8) ein Spannen der Blechfelder. Im Gegensatz dazu können bombierte (nach außen gewölbte) Seitenwände nicht gespannt werden, und müssen von den Richtarbeitern dem Radius der Bombierung angepasst werden.

Die Stirnwände müssen im Gegensatz zu den Seitenwänden nicht aus optischen oder ästhetischen Gründen eben sein, sondern weil ihre Ebenheit für die Abdichtung mit dem zwischen den Waggonen befindlichen Faltenbalg wichtig ist.

Da es sich um ebene Blechfelder handelt, kann hier auf den Einsatz von Magnetplatten zurückgegriffen werden. Alternativ wird der Stirwandbereich auch manuell gerichtet.

Bei dem Einsatz von Magnetspannvorrichtungen (Abb. 1-10) wird das Blech zwischen einem Elektromagneten und einer Lochplatte verspannt. Mit einem Mehrflammenbrenner werden durch die Lochplatten Wärmepunkte gesetzt. Durch die hohen Spannkraften ist die Ausdehnung der Wärmepunkte stark behindert und bildet somit hohe Schumpfkräfte aus. Gleichzeitig wird durch die Formgebung eine gute Ebenheit erreicht. Sind die Vorrichtungen ausgerichtet, ist die Arbeitsgeschwindigkeit im Vergleich zum freien Richten wesentlich schneller. Ungleich größer ist jedoch der Material- und Vorbereitungsaufwand. Die schweren Magnetplatten können nur mit Hebevorrichtungen ausgerichtet werden. Zudem müssen für verschiedene Blechfeldgrößen diverse Lochplatten mit passenden Abmaßen vorhanden sein und passend mit der Magnetplatte verspannt werden. Für diesen Arbeitsschritt sind mindestens zwei Richtarbeiter notwendig. Bei sehr starken Verwerfungen reicht die Spannkraft der Magnetplatten teilweise nicht aus, um das Blech in die Ebene zu zwingen, und muss mittels Hammerschlägen bearbeitet werden. Der Vorbereitungsaufwand ist damit in der Regel größer als beim freien Richten.

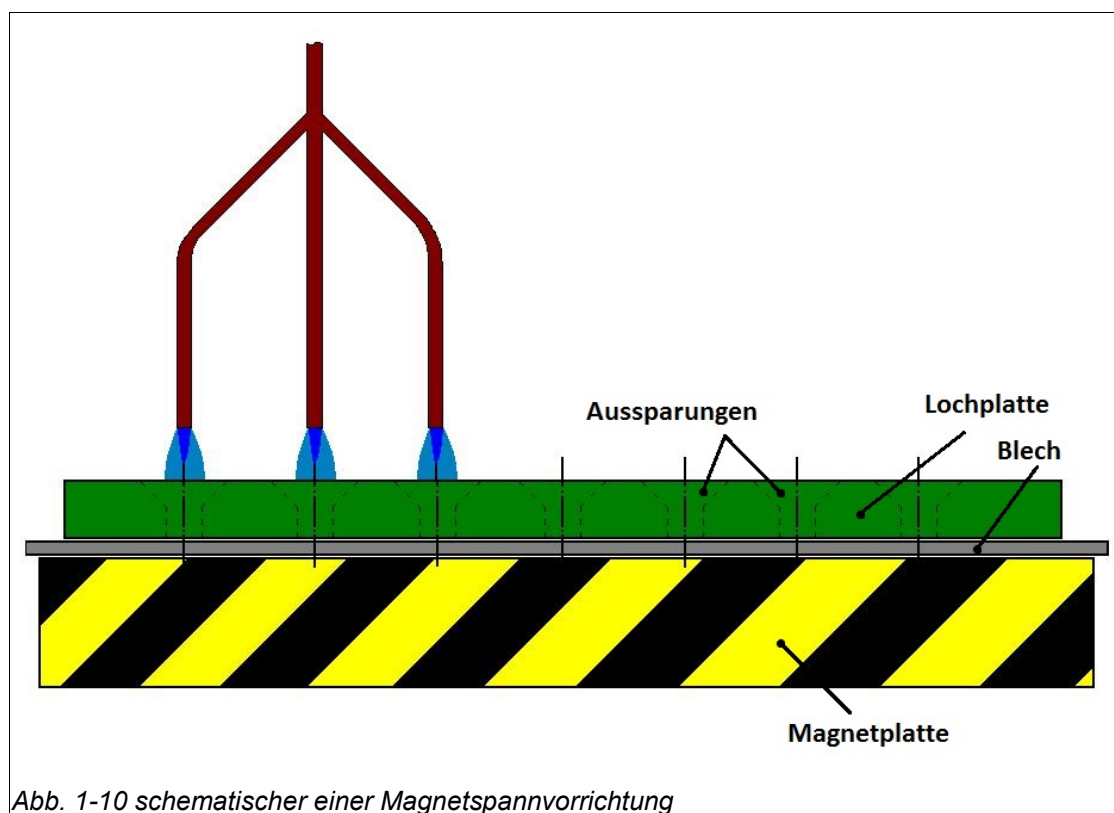


Abb. 1-10 schematischer einer Magnetspannvorrichtung

In den Bereichen der freien Blechfelder ist das Richtergebnis mit dieser Richttechnik meist sehr gut und muss je nach Grad der Verwerfungen nicht weiter nachbearbeitet werden. Auch die Ausbildung von Überhöhungen wird mit der Dehnungsbehinderung in Dickenrichtung vermieden. Gegebenenfalls reicht es bei einem nicht ausreichendem Ergebnis, die Lochplatten zu versetzen und erneut Wärmepunkte zu setzen. Daraus wird ein Nachteil dieses Verfahrens deutlich. Durch die Formgebung und die vorgegebenen Lochbilder kann der Richtarbeiter nicht direkt auf das Verwerfungsbild reagieren. Erst durch das Lösen der Spannvorrichtung kann eine Kontrolle der Richtwirkung stattfinden und gegebenenfalls nachgearbeitet werden. Wegen der fehlenden Flexibilität der Wärmepunktfelder bewegt sich das Ergebnis stets zwischen „zuwenig“, „ausreichend“ und „zuviel“ Schrumpfkraft, da im Vorfeld nach dem heutigen Stand der Technik keine zuverlässigen Aussagen über die benötigten Schrumpfkraft gemacht werden können. Wobei übermäßig gespannte ebene Blechfelder bzw. hohe Zugeigenspannungen zunächst keine gravierende Beeinflussung der Festigkeit, jedoch je nach Steifigkeit der Konstruktion übermäßige Maßänderungen mit sich ziehen können. (Von Interesse wäre möglicherweise die Auswirkung der Eigenspannung, ihr Abbau über die Betriebsjahre und die damit verbundene Entspannung des Blechs.)

Ebenfalls nachteilig ist, dass mit dieser Vorrichtung lediglich Wärmepunkte mit dem Effekt des Stauchmechanismus gesetzt werden können. Gerade bei Blechfeldern, die mit Kehlnähten an den Versteifungen geschweißt wurden und somit Winkelverzüge aufweisen, reicht diese Behandlung nicht aus, und es muss im Vorfeld von Hand mit Wärmestrichen gerichtet werden.

Für den Lochabstand der Lochplatten gibt es diverse Hinweise aus der Literatur [1, 2, 47], die jedoch nur bedingt Rückschlüsse für eine konkrete Anwendung geben. Um einen angemessenen Abstand der Wärmepunkte einzurichten, kann nur über Versuche an der zu richtenden Konstruktion und dem damit verbundenen Verwerfungsbild getestet werden. Übermäßige Wärmepunkte beeinflussen erheblich die Maßgenauigkeit der Konstruktion. So kann an den Wagenkästen nach dem Richten der Beblechungen ein Einfall der Wände um mehrere Millimeter festgestellt werden. Die Beschränkung der Wärmepunktzahl bzw. unnötig eingebrachter Wärmemengen sollte also von Interesse sein.

Die Magnetplatten werden stets von außen aufgesetzt. Durch die Erwärmung der Innenseiten des Blechs entsteht eine Fehlerquelle, die berücksichtigt werden sollte. Da kombinierte Brenner mit bis zu vier Flammen eingesetzt werden, ist die Handhabung und somit eine kontrollierte Wärmeführung wesentlich erschwert. Ebenfalls ist die Sicht auf die Wärmepunkte durch die Lochplatten behindert und die Abstandshaltung nicht konstant einzuhalten. Dadurch können Wärmepunkte ungleich erwärmt werden, was in verschiedenen Schrumpfkraften über das Blech verteilt resultiert. Besonders kritisch ist nur eine

inhomogene Durchwärmung der Wärmepunkte, die generell schon durch die hohe Wärmeableitung der massiven Magnetplatten unterstützt wird. Dadurch kann der Temperaturgradient-Mechanismus erzeugt werden, der nach dem Entspannen der Vorrichtung eine Ausbeulung des Wärmepunktes bewirkt.

Die Seitenwandkomponenten (Abb. 1-11) neigen ebenfalls zur Ausbildung von deutlich sichtbaren Verwerfungen und müssen, um den optischen Vorgaben der Kunden zu entsprechen, in Form gebracht werden.

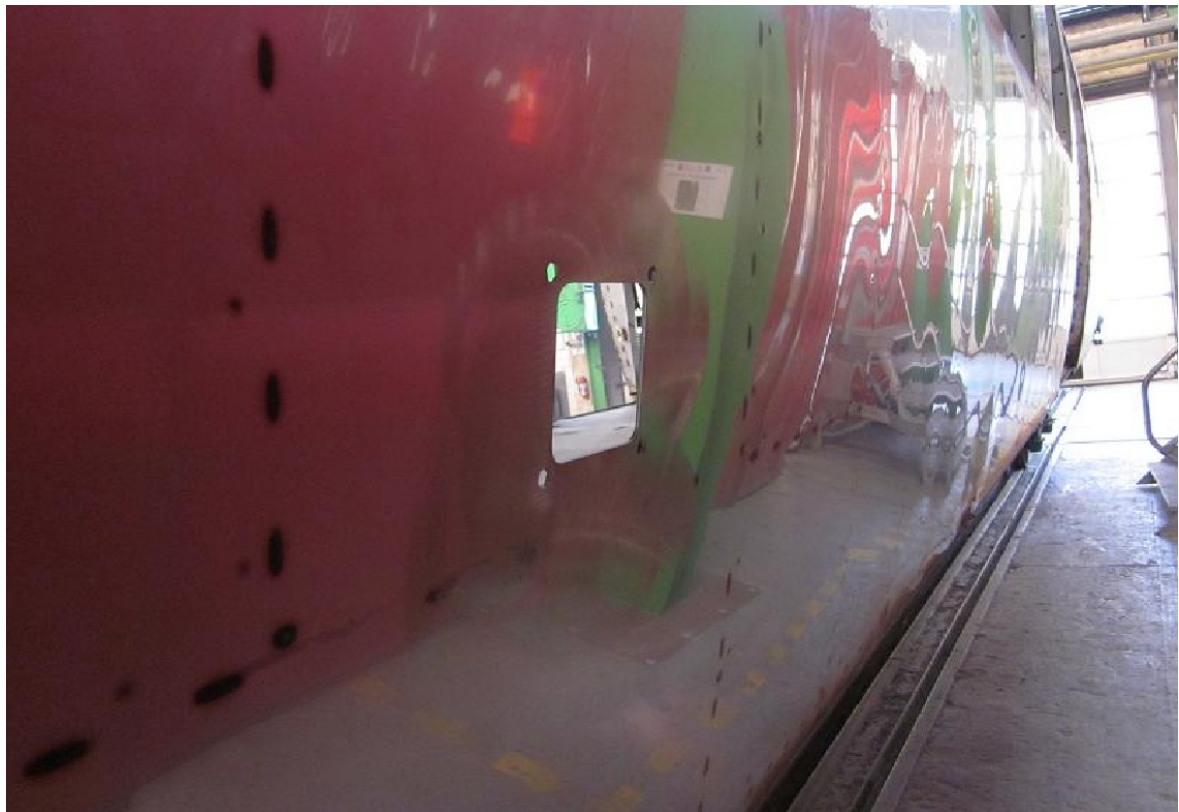


Abb. 1-11 ungerichtete Seitenwand Foto: [ALSTOM Transport Deutschland GmbH]

Die Blechdicken bewegen sich in Bereichen von 2,5 bis 4 mm. Die Verwerfungen werden durch mehrere Fertigungsschritte hervorgerufen. Beim Fügen der Rahmenstruktur mit der Seitenwandbeblechung werden erhebliche Schrumpfkkräfte erzeugt. An den Schweißnähten verkürzt sich die Konstruktion. Auf eine einzelnes Blechfeld bezogen bedeutet dies, dass es außen umlaufend verkürzt wird. Die freie Beblechung in der Mitte des Feldes erfährt keine Verkürzung. Durch das entstandene Ungleichgewicht werden von außen hohe Druckspannungen im Blechfeld erzeugt, die ein Ausbeulen bewirken. Für eine Seitenwandstruktur stellt sich somit folgendes qualitatives Spannungsbild ein (Abb. 1-12) Im Schweißnahtbereich wird die Seitenwand verkürzt. Makroskopisch resultiert daraus eine

Zugspannungsverlauf über die Versteifungen, welcher durch Druckspannungen in den Blechfeldern ausgeglichen wird.

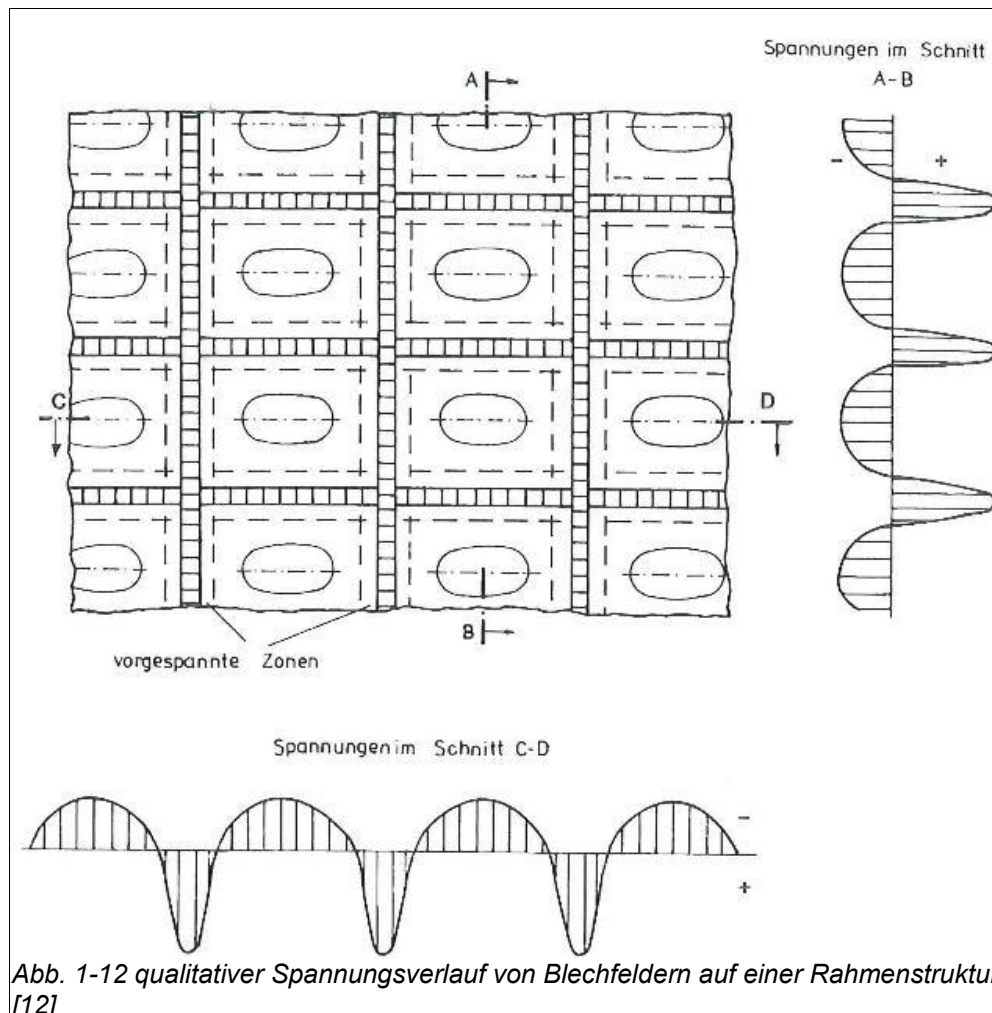


Abb. 1-12 qualitativer Spannungsverlauf von Blechfeldern auf einer Rahmenstruktur [12]

Durch Schweißverfahren wie dem Laserstrahl- oder Widerstandspunktschweißen kann der Grad der Spannungsbildung durch die geringere thermische Belastung wesentlich reduziert werden. Ebenfalls positiv zum Tragen kommt, dass mit diesen Verfahren hauptsächlich Stumpfnähte geschweißt werden. Stumpfnähte erzeugen vor allem Längs- und Querverzug und Verkürzen somit lediglich die Struktur. Im Gegensatz dazu erzeugen Kehlnähte beim Fügen von Rahmen und Beblechung zusätzlich Winkerverzug, der die Beblechung obendrein aus der Ebene zwingen würde. Das Verwerfungsbild ist dadurch deutlich ausgeprägter und umso schwerer zu beseitigen.

Die Verwerfungen werden weiter verstärkt, wenn die Wagenkastenkomponenten gefügt werden. Durch die mehrere Meter langen Verbindungsnahte zwischen Untergestell und

Seitenwand, sowie zwischen Seitenwand und Dach werden zusätzlich hohe Spannungen in der Blechebene erzeugt. Da hier auf das MAG-Schweißverfahren zurückgegriffen werden muss, ist die Schrumpfkraft umso ausgeprägter.

Um diese Verwerfungen zu beheben, müssen Wärmebilder eingesetzt werden, welche die Druckspannungen über die gesamte Blechdicke mit Zugspannungen überlagern, um das Blech zu Spannen oder zu Richten.

In Abbildung 1-11 ist das Verwerfungsbild einer bombierten Seitenwand aus einem ferritischen Chrom-Stahl zu sehen. Da hier keine Magnetspannvorrichtungen sinnvoll verwendet werden können, müssen die Beblechungen von Hand gerichtet werden.

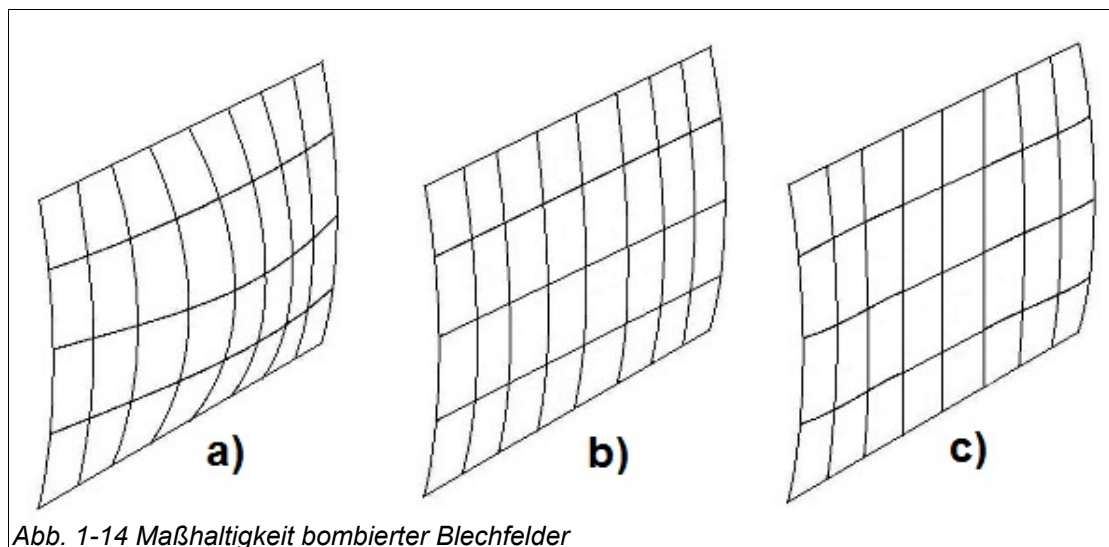
Der Aufwand beim freien Richten ist enorm (Abb. 1-13). Die Richtarbeiter setzen je nach Grad der Verwerfung diverse Wärmepunkte. Die sich ausbildende Überhöhung muss anschließend im noch erwärmten Zustand mit einem Hammer zurückgeschlagen werden. Abschließend wird die Ebenheit mit einer Schablone überprüft und gegebenenfalls nachgearbeitet.



Eine Standardisierung oder Vereinheitlichung der Arbeitsschritte ist hierbei nahezu unmöglich. Die Ausbeulung variiert um mehrere Millimeter, Wärmepunkte werden unterschiedlich gesetzt, die Toleranzbereiche vorheriger Komponenten und handgeschweißte Nähte verursachen unterschiedliche Spannungszustände.

Eine weitere Unstetigkeit wird durch die aktive Kühlung der Wärmepunkte mit Druckluft eingebracht (Abb.). Um eine übermäßiges Erwärmung des Bleches zu vermeiden, wird nach jedem Wärmepunkt großflächig mit Druckluft abgekühlt. Da nicht konstant auf die selbe Temperatur gekühlt wird, und Zeitpunkt und Abkühlgeschwindigkeiten durch variierende Abstände und Bewegungen sehr unterschiedlich ausfallen, sind auch die Schrumpfwirkungen der Wärmepunkte sehr unterschiedlich.

Im Unterschied zu ebenen Beblechungen können bombierte Seitenwände nicht direkt gespannt werden, sondern müssen auf den Radius der Bombierung gerichtet werden (Abb. 1-14 a) und b)). Besonderes Augenmerk muss also darauf gelegt werden, dass das Blech nicht übermäßig gerichtet wird und einfällt (Abb. 1-14 c)).



Die Richtprozesse, die hier beobachten konnte werden konnten, wurden am Rohbau der Baureihe *Coradia Nordic* von ALSTOM Transport durchgeführt (Abb. 1-15).

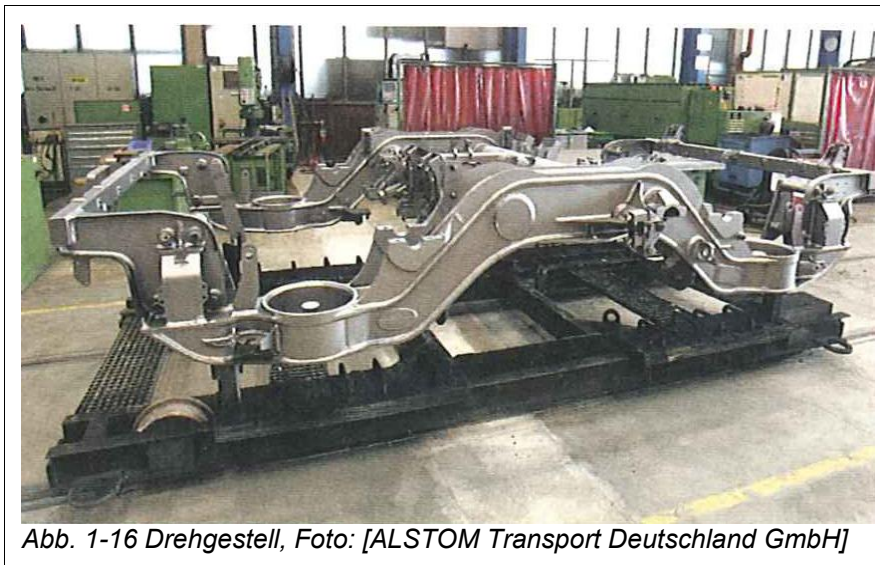


Abb. 1-15 Baureihe Coradia Nordic, Foto: [ALSTOM Transport Deutschland GmbH]

Die bombierten Seitenwände wurden aus dem korrosionsträgen Stahl X2CrNi12 (1.4003) mit einer Dicke von 2,5 und 4 mm hergestellt. Die Blechfelder zwischen den Riegeln des Rahmens variieren von ca. 150x150 bis 350x350 mm. Nach dem Zusammenbau des Wagenkastens stellen sich teilweise Verwerfungen mit maximalen Ausbeulungen von 2 bis 4 mm ein. Konstante Werte sind hier nicht zu beobachten. So haben Messungen an gleichen Positionen verschiedener Wagenkästen Spielräume von mehreren Millimetern im Grad der Ausbeulung aufgezeigt.

2.4 Drehgestelle

Das vierte und letzte Anwendungsgebiet stellt das Richten der Drehgestelle dar (Abb. 1-16). Die Rahmen der Drehgestelle werden aus Baustählen der Sorte S355J2+N oder S355J2+C, sowie den höherfesten Feinkornbaustählen P355NL1 hergestellt. Aufgrund der hohen Beanspruchungsklasse muss gerade hier die Werkstoffbeanspruchung durch thermische Verfahren überprüft werden. Vorherrschend sind hier Winkelverzüge der Lang- und Querträger.



Drehgestelle stellen kompakte Schweißbaugruppen dar. Die Lang- und Querträger bilden größtenteils geschweißte Kastenprofile, die einem hohen Eigenspannungszustand unterliegen. Zahlreiche Anschweißteile verursachen zusätzliche hohe Schweißspannungen. Da die Drehgestelle die Funktion des Bindeglieds zwischen Laufstrecke und Wagenkasten übernehmen, sind diese besonders hohen Betriebsbelastungen ausgesetzt. Überlagern sich diese Betriebsbelastungen mit den ausgeprägten Schweißspannungen in den Trägern, sind diese besonders bruchgefährdet. Um diesem Risiko gerecht zu werden, müssen die Drehgestelle teilweise spannungsarm gegläht werden.

Jede örtlich begrenzte thermische Beaufschlagung des Werkstoffs verursacht zusätzliche Eigenspannungen, und so tragen auch Richtstellen zum Spannungsverlauf bei. Dementsprechend müssen sämtliche Richtarbeiten vor einem möglichen Spannungsarmglühen erfolgen. Durch die homogene Erwärmung des Bauteils sind auch durch die Richtstellen keine weiteren Verformungen bei der Behandlung zu erwarten und konnten auch durch den Hersteller nicht beobachtet werden. Die Richtstellen an

Drehgestellen sind überschaubar und befinden sich vor allem an den Langträgern, um die Auflageflächen der Radlager passend auszurichten.

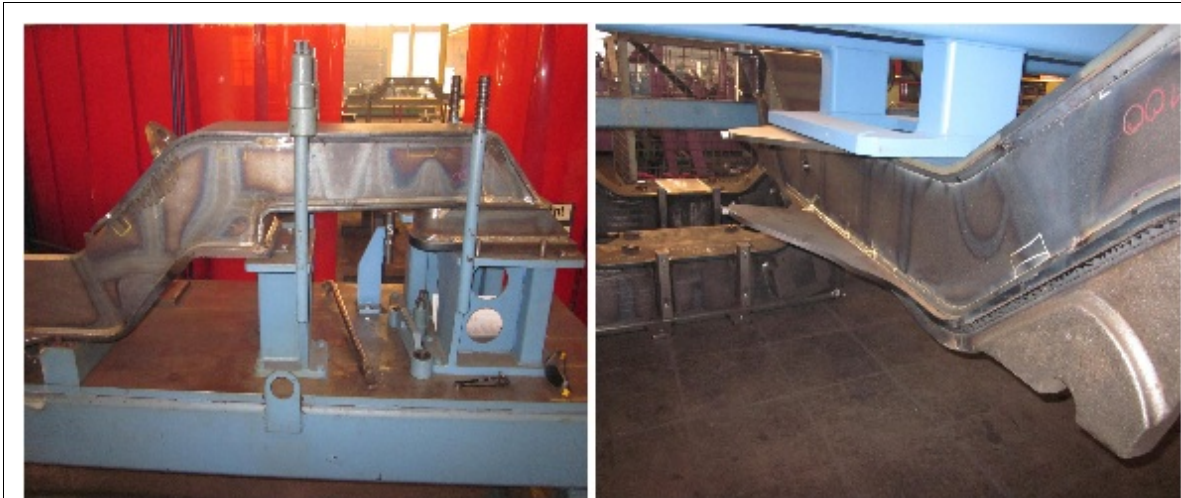


Abb. 1-17 Richtstellen an Drehgestellen, Foto: [ALSTOM Transport Deutschland GmbH]

Die Anwendungsgebiete des thermischen Richtens sind weit gestreut. Sei es in ihren Verzugsarten und Richtmechanismen sowie in den zahlreichen Werkstoffen und ihren Eigenschaften, ist eine akkurate und schadfreie Durchführung der Richtarbeiten nur durch ein geschultes Richtpersonal möglich.

3 theoretische Grundlagen

3.1 Wirkprinzip des thermisches Richten

3.1.1 thermische Ausdehnung

Ein grundlegender Effekt aus der Physik ist die Ausdehnung von Metallen bei Erwärmung. Im Gegensatz zum Schweißen, bei dem dieser Effekt negativ zum Tragen kommt, macht sich das thermische Richten diese Ausdehnung zu nutze [11] .

Wird die Ausdehnung nicht behindert (Abb. 2-1), z.B. ein statisch bestimmt gelagerter Balken, zieht sich bei der Abkühlung des Werkstücks die Ausdehnung wieder zusammen und das Werkstück befindet sich im Ursprungszustand.

In Abhängigkeit der Erwärmungstemperatur, der erwärmten Länge und des Werkstoffs, durchläuft der Balken eine axiale Längenänderung von

$$\Delta L = \alpha_k * L * \Delta T \quad (1)$$

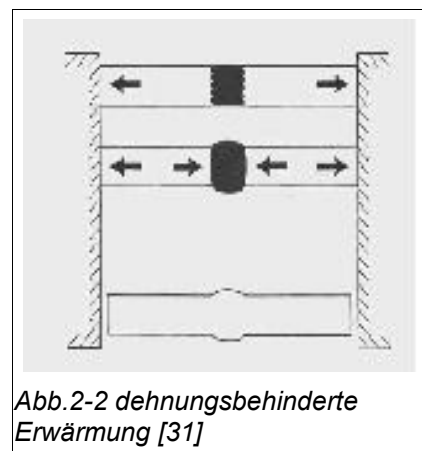
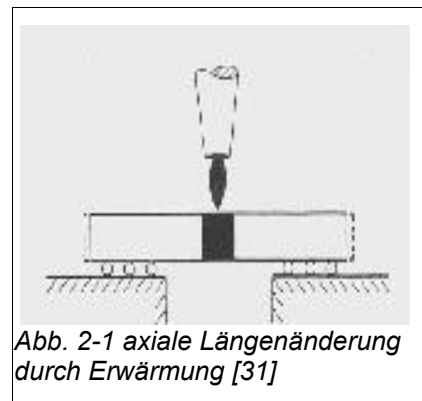
Wird diese Ausdehnung jedoch behindert (Abb. 2-2), z.B. durch eine Einspannung, wird die dadurch erzeugte Spannung im Bauteil durch elastische und plastische Verformung aufgefangen.

Bei gleicher Erwärmung stellt sich eine maximale Spannung von

$$\sigma = \Delta L * E / L = E * \epsilon \quad (2)$$

ein. Aus (1) und (2) lässt sich ein direkter Einfluss der Erwärmungstemperatur und der resultierenden Spannung erkennen.

$$\sigma = \alpha_k * \Delta T * E \quad (3)$$



Betrachtet man zu dieser Mechanik den Festigkeitsverlauf von z.B. Baustahl für verschiedene Temperaturen (Abb. 2-3), wird deutlich, was während der Erwärmung des Werkstücks abläuft.

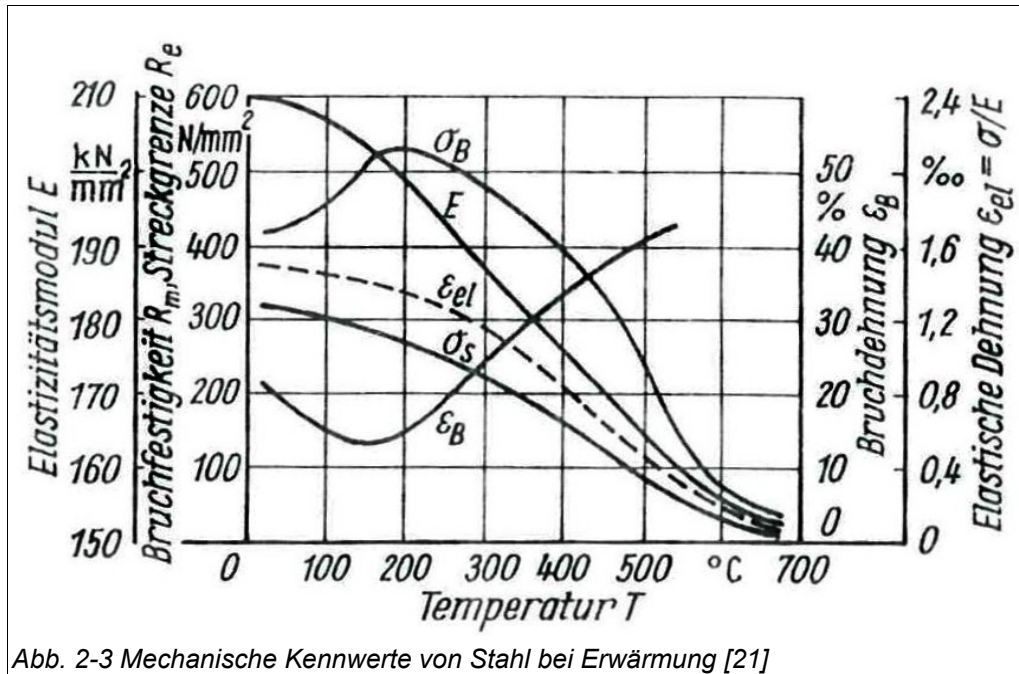


Abb. 2-3 Mechanische Kennwerte von Stahl bei Erwärmung [21]

Mit steigender Temperatur sinkt die Streckgrenze des Werkstoffs. Die durch die Ausdehnung entstehende Druckspannung wird durch plastische Verformung abgebaut, bis sie die verringerte Streckgrenze erreicht. Kühlt das Werkstück nun ab, bleibt die plastische Verformung bestehen und führt mit der Schrumpfung zu einer Verkürzung des Werkstücks. Ebenso kann sich durch das unbehinderte Schrumpfen die verbleibende elastische Verformung zurückbilden und das Werkstück ist nahezu frei von Eigenspannungen.[1, 2, 3]

Wird das Werkstück nur bei der Abkühlung eingespannt, kommt es zunächst zur Ausdehnung bzw. Längenänderung. Durch die Einspannung entstehen im Werkstück bei der Abkühlung bzw. Schrumpfung Zugspannungen, die zum Teil durch plastische Verformung der erwärmten Bereiche abgebaut werden können - durch das Fließen des Werkstücks bildet sich eine Querschnittsverringering- und zusätzlich als elastische Verformung im Werkstück verbleiben. Die Folge ist ein hoher Eigenspannungszustand, der je nach Ausdehnungsgrad die Streckgrenze des Werkstoffes erreichen kann.[1, 2, 3]

Ein gezieltes Verkürzen - und damit eine Richtwirkung am Werkstück - kann also nur erreicht werden, wenn die thermische Ausdehnung behindert wird. Eine anschließende möglichst

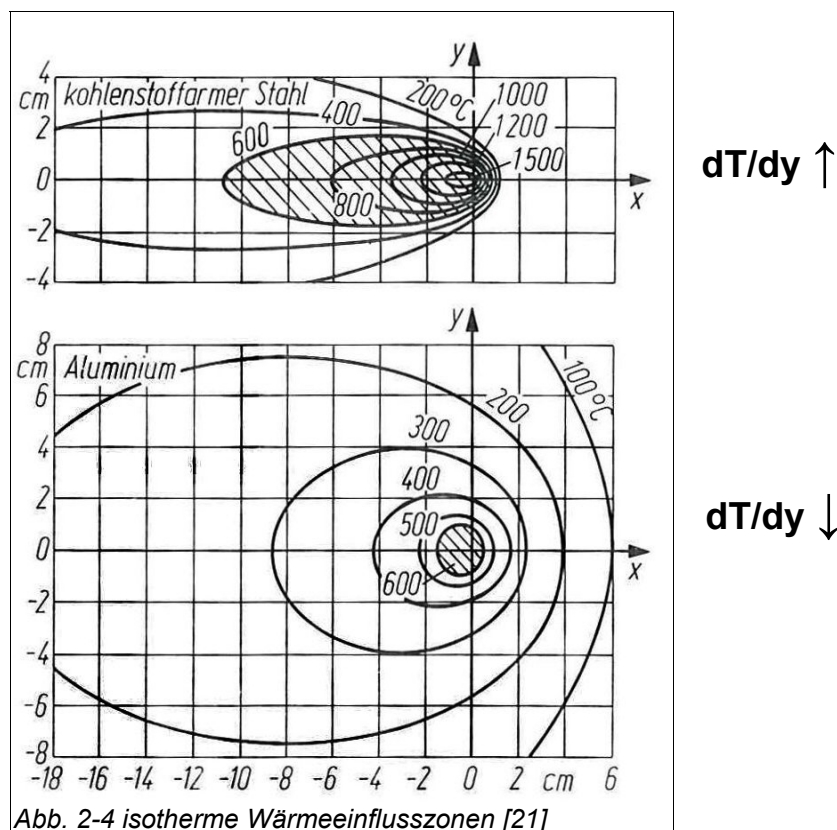
freie Schrumpfung ermöglicht niedrige Eigenspannungszustände und somit eine anschließende höhere Belastbarkeit des Werkstücks.

3.1.2 interne Dehnungsbehinderung

In der Praxis wird die Dehnungsbehinderung auf zwei Wegen realisiert.

Zum einen kann durch eine schnelle örtliche Erwärmung am Werkstück eine Dehnungsbehinderung durch den umgebenden kalten Werkstoff erreicht werden (Abb.2-4).

Je nach Werkstoff und Erwärmungsgeschwindigkeit kann eine örtlich begrenzte Ausdehnung erreicht werden, die durch die Steifigkeit des umgebenden kalten Materials behindert wird und so zu einer Stauchung bzw. einer Verkürzung führt. Ein kälterer umliegender Werkstoff stellt mit seiner höheren Steifigkeit einen größeren Widerstand gegen die thermische Ausdehnung dar. Dementsprechend ist auch der Grad der Stauchung stark abhängig von der Erwärmungsgeschwindigkeit und den physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs [1, 2, 3].



Durch die Betrachtung des Verlaufs der Isothermen um die erwärmte Stelle und der zugehörigen Festigkeitseigenschaften wird das System der natürlichen Dehnungsbehinderung deutlich. Ein hoher Temperaturgradient dT/dx bzw. dT/dy bedeutet

eine hohe Festigkeit im umliegenden Material bei gleichzeitig hoher Wärmeausdehnung der bis in den plastischen Zustand erwärmten Bereiche. Am Beispiel eines Baustahls ist der Zustand einer nahezu vollständig abgebauten Fließspannung bei Temperaturen von 600°C bis 700°C erreicht. In diesem Zustand ist der Werkstoff kaum mehr in der Lage elastische Spannungen aufzubauen. Die durch seine thermische Ausdehnung entstandenen Druckspannungen können nur durch plastische Verformungen abgebaut werden. Der Werkstoff wird in Längs- und Querrichtung an der Ausdehnung gehindert, er staucht und kann sich nur in Dickenrichtung ungehindert ausdehnen.

Temperaturen, die über den Zustand geringster elastischer Spannung hinausgehen, beeinflussen den Richteffect nur bedingt, da Schrumpfkkräfte erst übertragen werden können, wenn der Werkstoff beim Abkühlen seine Festigkeit wieder aufbaut. Die plastische Verformung durch höhere Temperaturen wird bis zum Erreichen dieser Temperatur größtenteils durch Fließen abgebaut.

3.1.3 Wirkmechanismen

Der Temperaturgradient bestimmt nicht nur mit seiner Höhe die Verformung, auch die Ausrichtung beeinflusst die Richtwirkung. Ein Gradient in Dickenrichtung bzw. über den Querschnitt bewirkt eine Stauchung außerhalb der neutralen Faser und erzeugt somit ein Biegemoment. Es bildet sich ein Winkelverzug aus. Dieser Effekt wird von [15] als Temperaturgradient-Mechanismus bezeichnet.

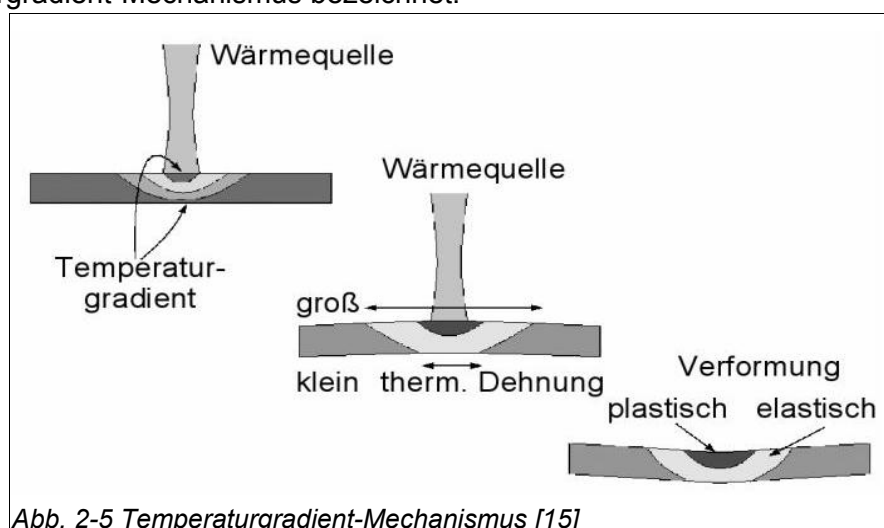


Abb. 2-5 Temperaturgradient-Mechanismus [15]

Eine homogene und symmetrische Durchwärmung, also ein Gradient in Längs-/ Querrichtung des Bauteils, bewirkt lediglich eine Stauchung des Werkstoffs in derselbigen

Richtung, was eine Verkürzung des Bauteils zur Folge hat. Dieser Mechanismus wird Stauchmechanismus genannt.

Jedoch tritt auch bei dieser Erwärmung zunächst ein Temperaturgradient in Dickenrichtung auf, bis die vollständige Durchwärmung erreicht ist, weshalb es auch hier zu einer Ausbildung von Winkelverzug kommen kann.

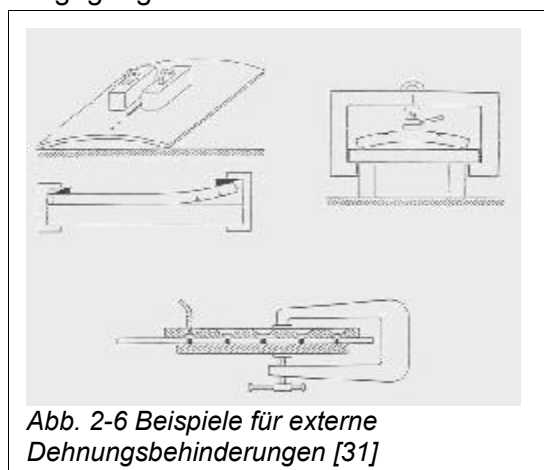
Durch eine unsymmetrische Durchwärmung über den Bauteilquerschnitt lassen sich durch die Schrumpfkkräfte Momente erzeugen, die das Bauteil gezielt knicken lassen können. Dieser Mechanismus wird als Knickmechanismus bezeichnet.[15]

Die Unterteilung dieser Mechanismen ist eindeutig und hilfreich. So beschreiben sie sämtliche Dimensionen, in die sich ein Bauteil mit Hilfe der Schrumpfkkräfte verformen lässt und lassen klare Definierungen der Wärmeeinbringung für den gewünschten Richteffekt zu.

Die Vorteile der Beherrschung dieser Systematik sind eindeutig. So können Richtarbeiten gänzlich ohne zusätzliche Hilfsmittel durchgeführt werden.

3.1.4 externe Dehnungsbehinderung

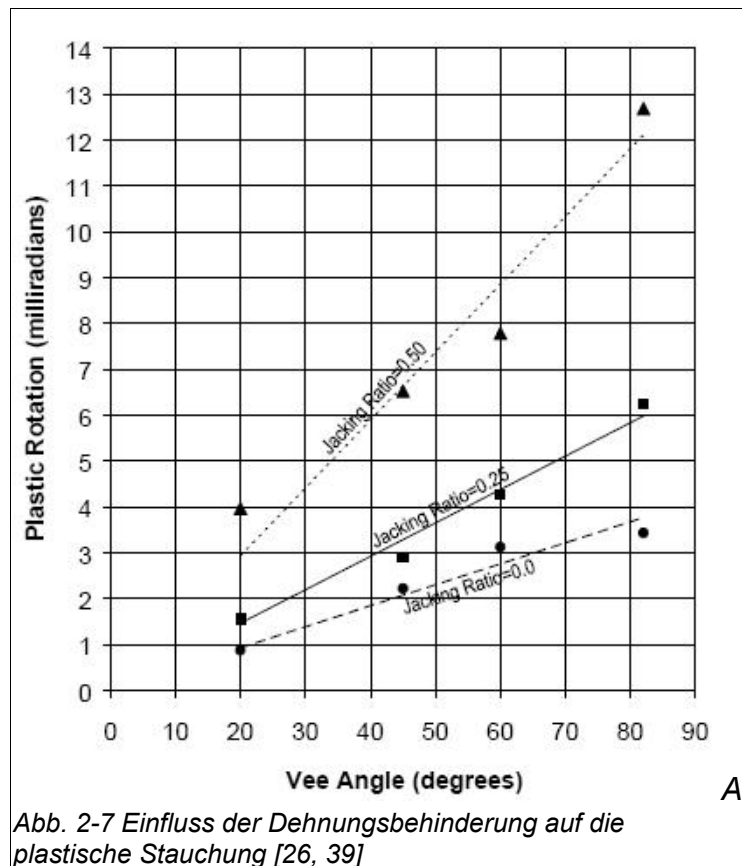
Reicht die Form der internen Dehnungsbehinderung nicht aus, können externe Dehnungsbehinderungen eingesetzt werden (Abb. 2-6). Diese werden durch Spannvorrichtungen, formgebenden Elementen oder auch dem Eigengewicht und der Steifigkeit des Bauteils realisiert. Gerade kleine Strukturen wie Beblechungen und Stäbe, an denen die Eigensteifigkeit sehr gering ist, können ohne Dehnungsbehinderung nicht genug Widerstand gegen die Ausdehnungskräfte bieten und werden bei der Erwärmung noch weiter verformt. Die Folge ist eine noch größere Verformung des Bauteils selbst nach der Abkühlung. Um das zu verhindern, kann den Ausdehnungskräften mit diesen Hilfsmitteln ausreichend Widerstand entgegengebracht werden.



Mit externen Hilfsmitteln sollen die Werkstücke jedoch nur in ihrer Ausdehnung behindert werden und nicht oder nur bedingt durch eine aktive Krafteinleitung, z.B. durch Hydraulikstempel, Winden, Kettenzügen oder ähnlichem während der Erwärmung in Form gedrückt werden. Eine Spannungsüberschreitung der verbleibenden Festigkeit im erwärmten Werkstoff würde zu Rissbildung und somit zu einer Beschädigung des Werkstoffs führen. Zudem besteht die Gefahr des Knickens durch die verringerte Steifigkeit. [1, 2]

Um eine Schädigung des Bauteils durch die Dehnungsbehinderung zu vermeiden, sollte die maximale extern eingebrachte Spannung nicht die Fließgrenze des Werkstoffs bei Richttemperatur überschreiten. Die plastische Verformung ist so auf die Ausdehnungskräfte beschränkt und die Dehnungsbehinderung ist auf die verbleibende elastische Dehnung begrenzt. Die FHWA (Federal Highway Administration), das amerikanische Straßenbauamt [26], hat sich ausgiebig mit den Einflüssen der Dehnungsbehinderung beschäftigt. Ausgelegt sind diese Untersuchungen auf Richtarbeiten an beschädigten Brückenträgern und berücksichtigen hauptsächlich die Einflüsse auf das Werkstoffverhalten stark verformter Werkstoffbereiche, ein grundsätzlich abweichendes Anwendungsgebiet. Jedoch wurden einige interessante Versuche durchgeführt, die übertragbare Ergebnisse liefern. So berichtet die FHWA aus Erfahrung und Versuchen, dass eine maximale Richtkraft von 50 % der Streckgrenze im kalten Zustand bis zum Einsatz von Richttemperaturen von 650°C zu keinen Schädigungen des Werkstoffs führt. Untersucht wurden hier hauptsächlich Baustähle, die bei höheren Spannkraften und Richttemperaturen nach dem Erkalten teils Brüche aufwiesen.

Aus einem weiteren Versuch [26] kann sehr gut veranschaulicht werden, inwiefern die Dehnungsbehinderung das Richtergebnis beeinflussen kann. Dazu wurden Wärmekeile mit 650°C unter verschiedenen Spannkraften und Öffnungswinkel gemessen (Abb. 2-7).



Das Spannkraftverhältnis („jacking ratio“) beschreibt hier die Beziehung zwischen der von außen aufgebrachtene Spannkraft und der durch die Erwärmung erzeugten Ausdehnungskräfte:

$$F_{\text{außen}} / F_{\text{Dehnung}} = \text{Spannkraftverhältnis} \quad (4)$$

Die effektive plastische Verformung nach der Abkühlung ist sichtbar abhängig von selbst kleinsten Änderungen der Spannkräfte. Ein Sachverhalt, der sich auch immer wieder in der Fertigung bemerkbar macht und Standardisierungen dieses Verfahrens unheimlich erschwert. In großen Baugruppen ist der Spannungszustand nicht zuverlässig vorherzusagen und beeinflusst erheblich die Richtergebnisse.

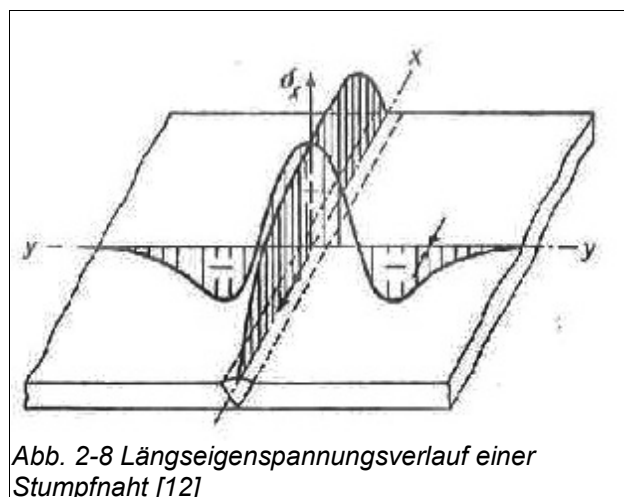
3.2 Einfluss von Eigenspannungen

3.2.1 Eigenspannungen durch Schweißarbeiten

Um ein gezieltes Verkürzen durch Schrumpfkkräfte zu erreichen, ist es notwendig, den Eigenspannungszustand vorab zu analysieren. Ein Erwärmen in Bereichen mit Zugeigenspannungen verschlechtert oder kehrt sogar den Effekt der Schrumpfung um. Durch den Festigkeitsabfall im erwärmten Bereich können sich Zugspannungen abbauen, der Werkstoff erfährt eine geringer plastische Stauchung und der Richteffekt ist somit verringert. Im Gegensatz dazu können Druckeigenspannungen den Richteffekt signifikant verstärken. [1,26]

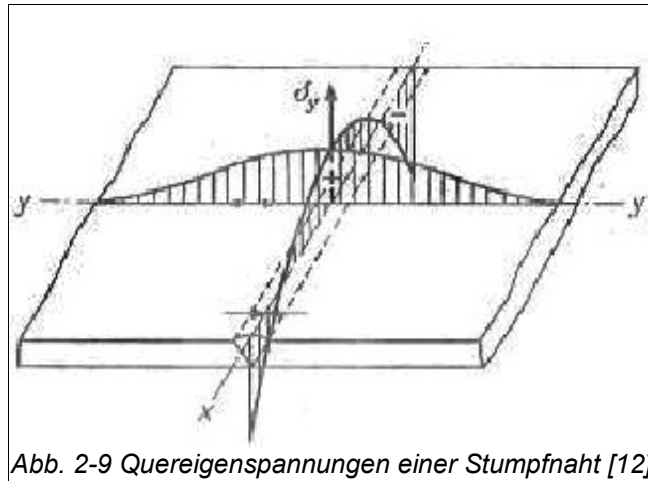
Kann der Eigenspannungszustand nicht genau bestimmt werden, wie z.B. bei der Reparatur von verformten Bauteilen oder komplexen Strukturen, müssen Richtarbeiten iterativ überprüft werden. Ist der Eigenspannungszustand vorab bekannt, kann er gezielt für eine Beeinflussung der Richtarbeiten genutzt werden. Allerdings ist im Schienenfahrzeugbau im Allgemeinen der Eigenspannungszustand nicht bekannt und lässt sich nach dem heutigen Stand der Technik nicht zuverlässig bestimmen.

Zumindest jedoch lassen Schweißarbeiten eine qualitative Aussage über den Spannungszustand zu. Durch die im Schweißnahtbereich erzeugten Schrumpfkkräfte bilden sich jeweils typische Eigenspannungszustände aus, die für eine qualitative Abschätzung herangezogen werden können.

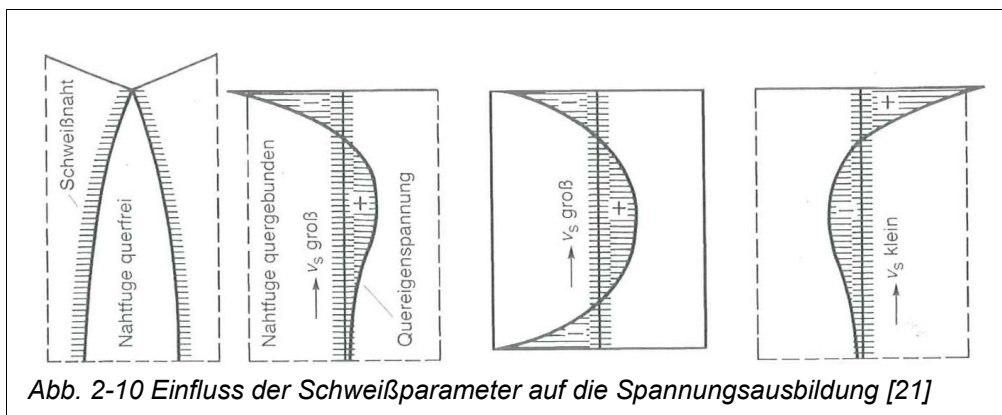


Durch das große schrumpfende Volumen in Längsrichtung der Schweißnaht bilden sich hohe Zugeigenspannungen aus (Abb. 3-1). Vor allem in steifen Konstruktionen, in denen die Schweißnaht wenig schrumpfen kann, können die Zugeigenspannungen sogar den Wert der Streckgrenze des Schweißzusatzes erreichen. Da Eigenspannungszustände immer ein

inneres Gleichgewicht, Summe der Kräfte $F=0$ bzw. Summe der Momente $M=0$, voraussetzen, müssen sich im anliegenden Bereich die Reaktionskräfte als Druckspannungen aufbauen. [12,23]



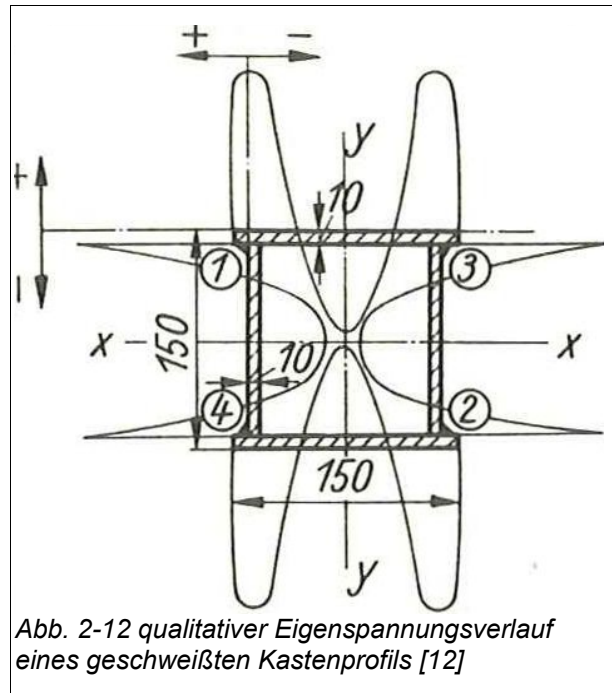
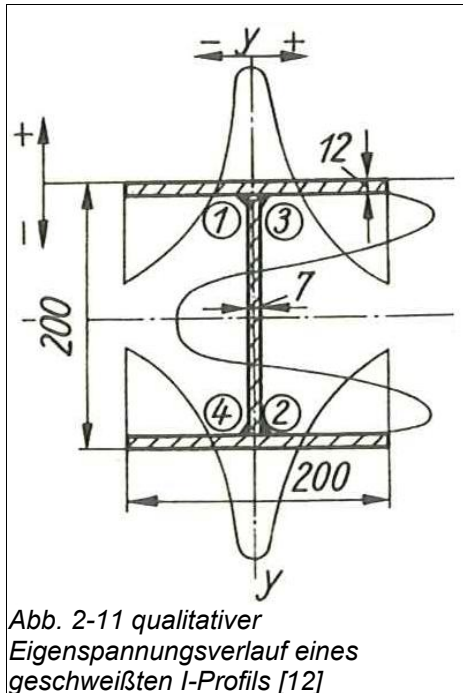
Auch in Querrichtung zur Schweißnaht bauen sich hohe Eigenspannungen aus (Abb. 2-8, 2-9). Je nach Schweißparameter und -nahtlänge bilden sich typische Quereigenspannungszustände aus, die Spannungen von bis zu 50% der Streckgrenze erwarten lassen [12, 23].



Wegen der hohen Zugeigenspannungszustände im Schweißnahtbereich muss vermieden werden, dass hier Wärmestellen zum Ausführen von Richtarbeiten gesetzt werden. Im besten Fall werden durch Richtversuche in diesem Bereich die Eigenspannungen reduziert, im schlechtesten Fall kann die Schweißnaht durch Erwärmung ihre Zugspannungen durch Fließen abbauen und so zu einer Verlängerung der Richtstelle führen. Die Folge wäre ein höherer Verzug.

Für den gezielten Richteneinsatz ist es vorteilhafter, den gesamten Fertigungsprozess des Bauteils zu untersuchen, um eine zuverlässige Aussage über den Eigenspannungszustand

machen zu können. Dafür können die qualitativen Eigenspannungsverläufe der Schweißnähte herangezogen werden (Abb. 2-11, 2-12). Ein weiteres, praxisnahes, Hilfsmittel wären die Standardverläufe der Eigenspannungen von geschweißten Profilen. Für eine qualitative Aussage können die zahlreichen Untersuchungen von [21, 22, 23] herangezogen werden.



Aus diesen gemessenen und errechneten Verläufen stellen sich immer wieder vergleichbare Spannungsverläufe ein (Abb. 3-4,3-5), die sich auf die jeweiligen Schweißprofile übertragen lassen.

3.2.2 Umwandlungseigenspannungen

Eine weitere Form der inneren Spannungen stellen Umwandlungseigenspannungen dar. Sie entstehen durch Gefügeveränderungen im Werkstoff [23, 24].

Entscheidend hierbei ist die Packungsdichte der einzelnen Gefügestrukturen. So erfahren umwandlungsfähige Stähle bei größeren Temperaturerhöhungen eine Umwandlung von der kubisch raumzentrierten α -Phase in die dichter besetzte γ -Phase. Die Folge ist eine örtliche Volumenverkleinerung und somit die Ausbildung von Spannungen. Ist diese Gefügeumwandlung örtlich begrenzt, entstehen im Bereich der Umwandlungen Zugeigenspannungen, die durch Druckspannungen des umgebenden Materials ausgeglichen werden [6].

Für die Mechanik des Erwärms von Richtstellen sind diese α - γ -Umwandlungen kaum von Belang, da diese in einem Temperaturbereich stattfinden, in dem die Fließspannung des Stahls nahezu nicht mehr vorhanden ist. Bis der Werkstoff beim Abkühlen seine Festigkeit wieder aufbaut, ist das ursprüngliche α -Phasen-Gefüge wieder hergestellt.

Entscheidenden Einfluss hat jedoch die martensitische Umwandlung von Stählen beim Abkühlen. Das martensitische Gefüge dehnt sich beim Umklappen der unterkühlten γ -Phase aus und erzeugt so hohe Zugspannung, die durch Druckspannungen des umgebenden Materials ausgeglichen werden [6]. Zu beachten ist hier, dass bei einer derartigen Wärmeführung von Richtarbeiten, abgesehen von der Verschlechterung der zähen Gütewerte des Materials, die Volumenvergrößerung auch beim Erstarren erhalten bleibt, und somit die Schrumpfung bzw. das Richtergebnis verschlechtert.

3.2.3 herstellungsbedingte Eigenspannungen von Halbzeugen

Auch das Ausgangsmaterial ist bedingt mit Eigenspannungen behaftet. Halbzeuge weisen je nach Herstellungsprozess einen typischen Eigenspannungszustand auf.

So weisen kaltgewalzte Bleche typischerweise folgendes Spannungsbild auf.

Durch den Walzprozess werden die Oberflächenbereiche gestaucht. Es entstehen Druckspannungen, die durch Zugspannungen des Kernmaterials im Gleichgewicht gehalten werden.

Warm gewalzte Bleche weisen meist ein gleiches, aber geringeres Spannungsbild auf. Da zunächst die Oberfläche des Blechs abkühlt, entstehen erst Zugspannungen im äußeren Bereich. Kühlt der Kern ab, zieht er sich zusammen, es entstehen Zugspannungen die durch Druckspannungen im Oberflächenbereich ausgeglichen werden.

Ausgeprägter ist diese Spannungsverteilung durch ungleichmäßige Abkühlung an dicken Profilen. Hier ist die Spannungsverteilung ungleich größer, aber von gleicher Orientierung [23]. Vor allem an Profilen wie I-Trägern bilden sich im Bereich der Kehlen hohe Zugspannungen durch das größere schrumpfende Volumen aus [41].

3.2.4 Fazit

Eine genaue Kenntnis des Eigenspannungszustandes ist nicht entscheidend für den Richtprozess und rechtfertigt auch nicht den Aufwand diesen festzustellen. Zumal eine Eigenspannungsbestimmung niemals zuverlässige Daten hervorbringen würde. Die im

Schienefahrzeugbau hergestellten Strukturen werden mit Maßtoleranzen gebaut, die unterschiedliche individuelle Spannungszustände erzeugen. Zudem sind Schweißparameter grundsätzlich festgelegt, werden jedoch in den Schweißanweisungen stets mit Spielräumen angegeben, um den Schweißern eine Anpassung an ihren Arbeitsstil zu ermöglichen.

Grundlegend sollte vermieden werden, in Bereichen mit hohen Zugeigenstressungen zu erwärmen. Da sich bei allen Fertigungsverfahren gleichmäßige sich wiederholende Spannungsbilder ausbilden, lassen sich qualitativ Bereiche bestimmen, die nach einer Superposition der einzelnen Spannungsbilder unter Zug- bzw. Druckspannungen stehen und sich so in die Vorbereitung der Richtarbeiten einplanen lassen.

3.3 Einfluss der Werkstoffeigenschaften

3.3.1 allgemeine Eigenschaften

Wie auch beim Schweißen bringt jeder Werkstoff seine ganz spezifischen Eigenheiten mit. Den größten Einfluss auf die Richtwirkung haben

- Festigkeitswerte (R_m , R_e , E)
- der thermische Ausdehnungskoeffizient [α_k]
- die Wärmekapazität [C_p]
- die Wärmeleitfähigkeit [λ]

Die **Festigkeitswerte** [R_m , R_e , E] (Abb. 2-3) bestimmen den Grad der Stauchung des erwärmten Bereichs. Eine erhöhte Festigkeit und Steifigkeit im kalten umgebenden Material stellen der Ausdehnung einen höheren Widerstand gegenüber. Dies führt zu einer ausgeprägteren plastischen Verformung in der WEZ und somit zu einer verstärkten Schrumpfung bei der Abkühlung. Ist die Steifigkeit des Werkstoffs geringer, wird ein Großteil der Druckkräfte in elastischer Verformung aufgenommen und bei der Abkühlung wieder abgebaut. Dies befürwortet wieder eine erhöhte Erwärmungsgeschwindigkeit um den Festigkeitsverlust der Umgebung zu verringern. [6, 33]

Die **Wärmeleitfähigkeit** [λ] bestimmt die Größe der Wärmeeinflusszone des Werkstoffs bei der Erwärmung und Abkühlung. Sie beschreibt die Wärmemenge pro Zeit, die über einen Querschnitt mit Temperaturgradient geleitet wird und stellt die Wärmeübertragung zwischen den Teilchen des Werkstoffs dar [8, 10, 11]. Aufgrund dieser Art der Wärmeübertragung ist dieser Kennwert abhängig von der Gefügestruktur bzw. der Geometrie der Teilchen im Werkstoff. Dementsprechend kann die Wärmeleitung auch anisotropisches Verhalten aufweisen [11]. Die im Schienenfahrzeugbau eingesetzten Werkstoff weisen jedoch generell einen quasiisotropen Gefügestand auf, weshalb auch die Wärmeleitung stets als isotrop angesehen werden kann.

Ein erhöhter Wärmestrom bedeutet eine schnelle Wärmeabfuhr von der Energiequelle in das umgebende Material. Dies erschwert eine schnelle Erwärmung auf die Richttemperatur und verringert den Richteffekt durch eine vergrößerte WEZ. Das umliegende Material wird in seiner Steifigkeit reduziert und die Stauchung nimmt ab.

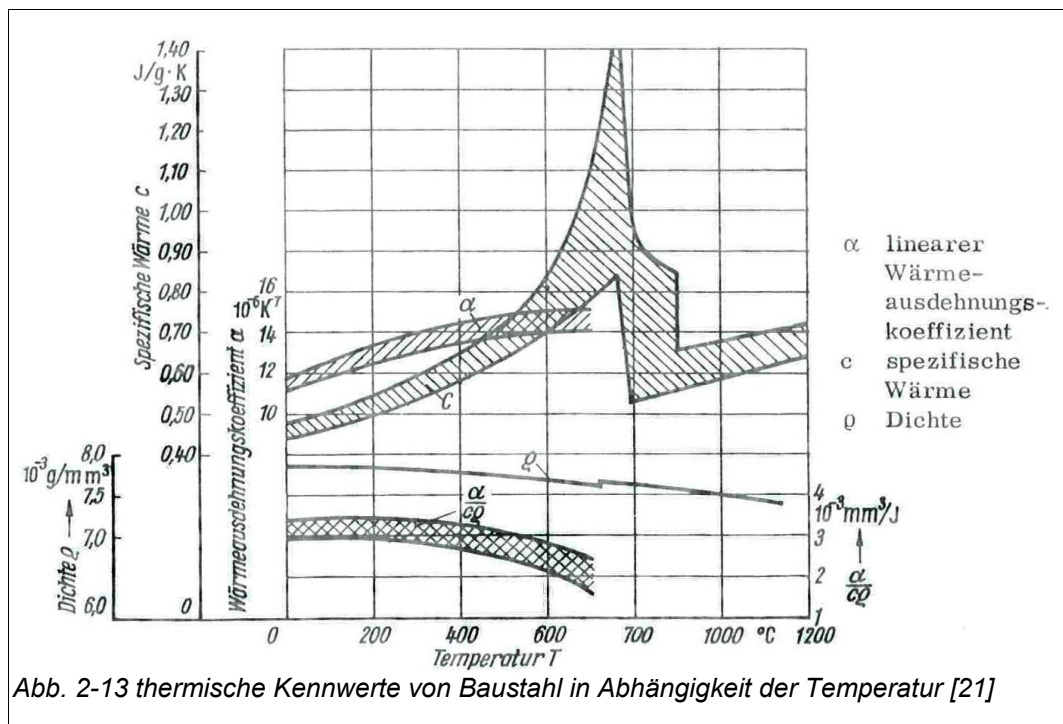
Die Wärmeleitfähigkeit ist geringfügig temperaturabhängig. Für eine Beurteilung des Richtprozesses reicht jedoch die mittlere Leitfähigkeit aus. Um einen übermäßigen

Wärmestau bzw. einer zu schnellen Wärmeableitung zu verhindern, müssen vorab geeignete Maßnahmen getroffen werden.

Gerade bei dickeren Blechen mit einer dreidimensionalen Wärmeableitung und dem geplanten Einsatz der Richtmechanismen über einen Temperaturgradienten in Dicken- bzw. Längs- und Querrichtung muss die Wärmezufuhr angepasst werden. Soll der Stauchmechanismus verwendet werden, muss die Energiedichte soweit verringert werden, dass eine genügende Durchwärmung über die Dicke ohne eine Überhitzung der Oberflächenbereiche erreicht wird. Für den Temperaturgradientenmechanismus kann die Energiedichte wesentlich erhöht werden, um den benötigten Gradienten zu erzeugen.

Der **thermische Ausdehnungskoeffizient** [α_k] (Abb. 2-13) geht ebenfalls signifikant in die Richtwirkung mit ein. Mit steigender Temperatur des Werkstoffs erhöht sich die Bewegung bzw. die Amplituden der thermisch induzierten Schwingungen der Teilchen. Dadurch erhöht sich der Abstand der Teilchen und das Volumen des Werkstoffs vergrößert sich. Eine höhere, von der Temperatur abhängige, Ausdehnung bewirkt eine stärkere Stauchung, was wiederum in einer verstärkten Schrumpfung resultiert. Dieser Kennwert ist besonders von der Gefügestruktur des Werkstoffs abhängig. Auch der thermische Ausdehnungskoeffizient ist temperaturabhängig [10].

Die **Wärmekapazität** [C_p] (Abb. 2-13) geht ebenfalls in die Größe der WEZ mit ein. Sie beschreibt die Wärmemenge, die benötigt wird, um eine Masse eines Werkstoffs um 1 K zu erhöhen. Erhöht sich die benötigte Energie zur Erwärmung des Werkstoffs, verlängert sich die Erwärmungszeit und die WEZ vergrößert sich, in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmekapazität ist ebenfalls temperaturabhängig. Um die Eigenschaften des Werkstoffs einzuschätzen, reicht jedoch die mittlere Kennzahl. [10]



3.3.2 maximale Temperaturen und Haltezeiten

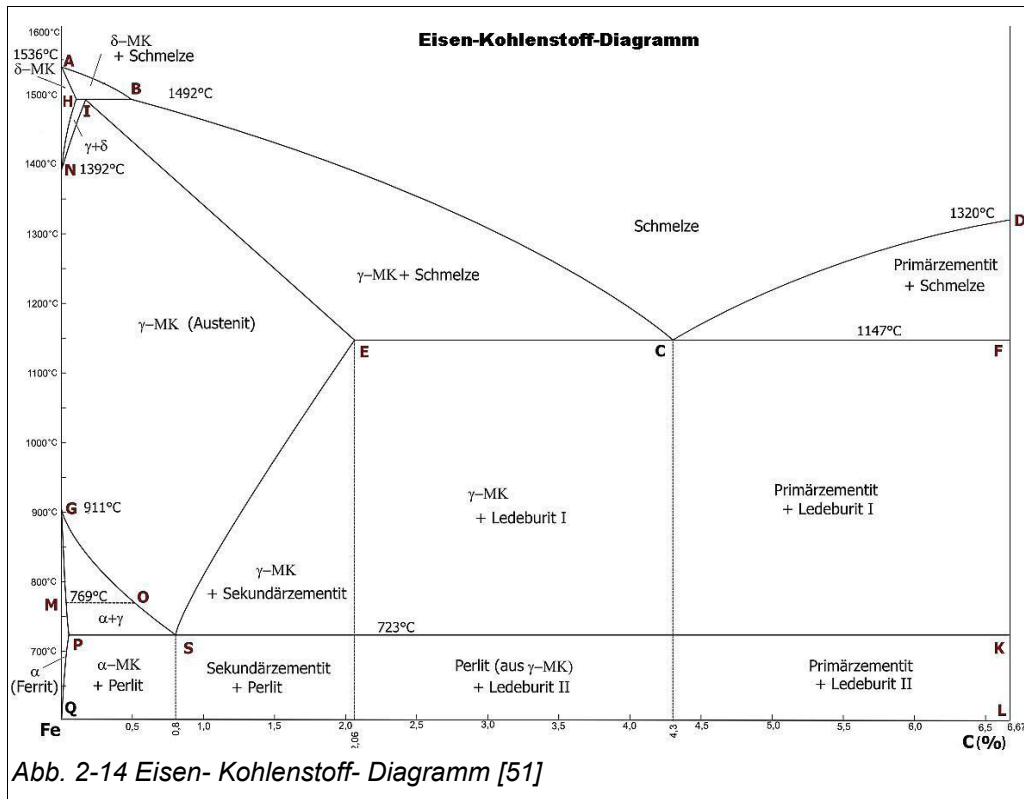
Um den Werkstoff bei Richtarbeiten nicht zu schädigen, muss auf eine angemessene Temperaturführung geachtet werden. Wie auch beim Schweißen, kann der Werkstoff durch eine falsche Wärmebehandlung grundlegend in seinen Eigenschaften beeinflusst werden. Je nach Werkstoff ergeben sich unterschiedliche Bedingungen.

3.3.2.1 Umwandlungsfähige Stähle

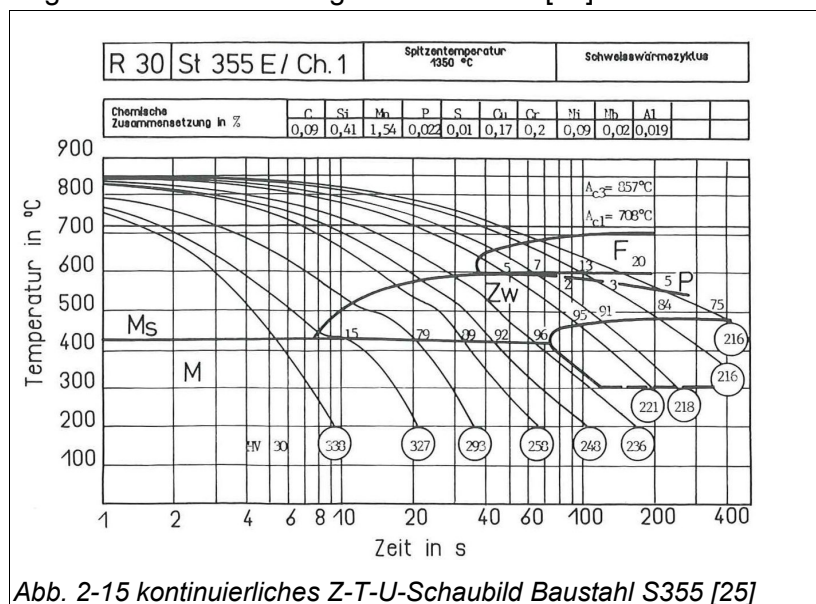
Ferritisch- austenitische Stähle erfahren bei bestimmten Temperaturen Umwandlungen in ihrer Gefügestruktur (Abb. 4-3). Bei den Eisen- Kohlenstofflegierungen beginnen bereits bei 723°C erste Bestandteile des Gefüges, sich vom kubisch raumzentrierten α - Eisen in das kubisch flächenzentrierte γ - Eisen umzuwandeln. Bei einer anschließend langsamen Abkühlung kann sich der diffuse Prozess zurückbilden.

Beim thermischen Richten ist jedoch das Bestreben, kleine Werkstoffbereiche zügig zu erwärmen, der kritische Einfluss, der diese γ - α -Umwandlung behindern kann. Gerade bei dickeren Bauteilgeometrien mit einer dreidimensionalen Wärmeableitung kann die Abkühlgeschwindigkeit kritische Werte annehmen, die zu einer Aufhärtung des Gefüges

führen. Auch wenn die Richtstellen aktiv mit Druckluft oder Wasser gekühlt werden sollen, ist diese Mechanik zu berücksichtigen.



Beim Schweißen wird zur Vermeidung dieses Problems die $t_{8/5}$ - Zeit bestimmt. Sie beschreibt die Zeit, in dem der Werkstoff beim Abkühlen den Temperaturbereich von 800°C auf 500°C durchläuft. Mit Hilfe eines kontinuierlichen ZTU- Schaubilds (Abb. 2-15) kann die minimal benötigte Zeit bestimmt werden, um die Aufhärtung zu vermeiden bzw. um das gewünschte Gefüge nach der Abkühlung zu bestimmen [22].



Die Härteneigung des Stahls wird vor allem durch Legierungselemente bestimmt. Legierungselemente wie Kohlenstoff, Mangan, Chrom, Vanadium, Molybdän, Kupfer und Nickel setzen die kritische Abkühlgeschwindigkeit stark herab. Eine Einschätzung der Härteneigung lässt sich aus dem in der Schweißtechnik gebräuchlichen Kohlenstoffäquivalent bestimmen.

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

Ein Kohlenstoffäquivalent von unter 0,40% impliziert prinzipiell einen Härte und Kaltriss unempfindlicheren Werkstoff. [18]

Generell sollte die maximale Richttemperatur also so abgestimmt werden, dass die α - γ -Umwandlung vermieden wird. Kann dieses nicht sichergestellt werden, muss die Temperaturführung überwacht werden.

Für die maximal einsetzbaren Temperaturen kann je nach Größe der Wärmebilder ein angepasster Maximalwert angestrebt werden. In Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung sowie des Grundgefüges des Werkstoffs und der Aufheizgeschwindigkeit verschiebt sich die Austenitumwandlung zu höheren Temperaturen. Wobei die chemische Zusammensetzung vor allem bei kleinen Aufheizgeschwindigkeiten die Temperatur der α - γ -Umwandlung bestimmt, ist der Einfluss des Grundgefüges bei erhöhten Aufheizgeschwindigkeiten umso entscheidender [24]. Mit zunehmend metastabilen Zuständen wird die Austenitumwandlung unterstützt und verschiebt sich so zu tieferen Temperaturen. Ein weichgeglühtes, gleichgewichtsnahes, Gefüge kann also mit höheren Temperaturen ohne Umwandlung beaufschlagt werden, als z.B. ein Vergütungsgefüge. Ähnlich wie bei der Unterkühlung eines Werkstoffs ist auch hier die Aufheizgeschwindigkeit und die anschließende Haltezeit der maximalen Temperatur entscheidend. Dementsprechend sind kleine Wärmebilder, z.B. Wärmepunkte, aufgrund der hohen Wärmeableitung unempfindlicher gegen umwandlungsbedingte Werkstoffschäden. Das dieser Sachverhalt praktisch genutzt werden kann, bestätigen einige Versuche [2, 3, 27, 28, 41, 42].

Um eine Aussage über Möglichkeiten einer Überhitzung machen zu können, muss ein Zeit-Temperatur- Austenitisierung Schaubild herangezogen werden (ZTA-Diagramm) [z.B. 24]. Wie beim ZTU- Schaubild gibt ein kontinuierliches Schaubild eine Aussage über einen Temperaturverlauf, ein isothermes Schaubild eine Aussage der Gefügeentwicklung bei einer Haltetemperatur. Im Abgleich mit einer Temperaturmessung kann so eine Bestimmung der

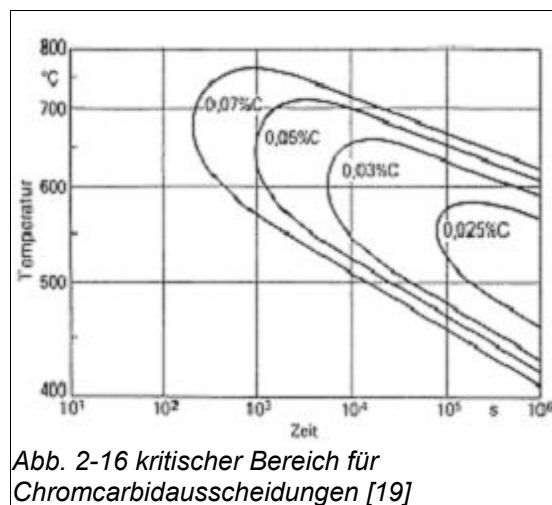
maximalen Richttemperatur bzw. der Notwendigkeit einer Temperaturüberwachung getroffen werden.

Da gerade bei größeren Wärmebildern bzw. größeren Querschnitten des Werkstücks die Temperaturführung nicht exakt eingehalten werden kann und die Aufheiz- und Haltezeiten wesentlich länger werden als im Dünoblechbereich, kann für eine sicherere Behandlung der Temperaturverlauf berechnet werden. Auch eine mögliche Notwendigkeit zum Vorwärmen kann, wie in der Schweißtechnik, berechnet werden [41].

3.3.2.2 Umwandlungsfreie Stähle

Da diese Stähle keine α - γ -Umwandlung aufweisen, ist die Abkühlgeschwindigkeit unbegrenzt hoch ausführbar. Allerdings handelt es sich meist um hochlegierte austenitische CrNi-Stähle. Diese Stähle neigen bei höheren Temperaturen zum Kornwachstum und zur Ausscheidung von Chromcarbiden.

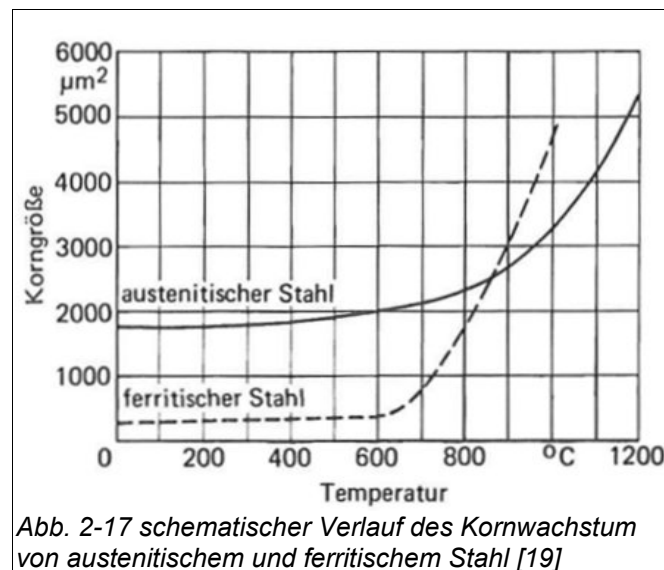
Zudem bilden diese Stähle bei Wärmebeaufschlagung Anlauffarben aus, die im Anschluss der Wärmebehandlung zwingend zu beseitigen sind, um eine Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten.[16]



Wie dem Schaubild (Abb. 2-16) zu entnehmen ist, kann es bei falscher Temperaturbehandlung zur Ausbildung von Chromcarbiden kommen. Da die Erwärmung im Dünoblechbereich jedoch nur einige Sekunden dauert und die Temperaturen im kritischen Gebiet von 600°C – 800°C bei Abkühlung an Luft ebenfalls zügig durchschritten werden, ist bei diesem Stahl nicht mit einer Chromcarbidausscheidung zu rechnen. Die Wärmeableitung ist deutlich groß genug, um auch bei höheren Erwärmungstemperaturen von bis zu 1000°C innerhalb von 6-8 Minuten moderate Temperaturen zu erreichen [19, 27].

Auch die Tatsache, dass heute gebräuchliche korrosionsbeständige Stähle entweder stark im Kohlenstoffgehalt reduziert, oder mit stabilisierenden Elementen wie Titan oder Niob legiert sind, machen eine Chromcarbidausscheidung beim thermischen Richten sehr unwahrscheinlich.

Kritischer ist jedoch die erhöhte Neigung von Kornwachstum bei den austenitischen Stählen zu bewerten. Bei erhöhten Temperaturen und längeren Haltezeiten kann das Gefüge negativ beeinflusst werden (Abb. 2-17). Durch Versuche [27] wurde ermittelt, dass es im Dünoblechbereich bis 8mm nicht zu einem Kornwachstum kommt, wenn die Temperaturen unter der 800°C-Grenze bleiben. Da dies ein diffusionbedingter Prozess ist kann durch eine beschleunigte Abkühlung die Richttemperaturen ebenfalls auf etwa 1000°C erhöht werden ohne ein Kornwachstum zu erwarten.



Diese Eigenschaften erlauben eine Temperaturbeaufschlagung von etwa 1000°C, ohne die wesentlichen Ausgangseigenschaften des Stahls zu beeinflussen. Eine Richttemperatur die durchaus angestrebt werden sollte. Durch den geringen Wärmeleitwert, bzw. die Wärmeabfuhr in den umliegenden Werkstoff, wird der erwärmte Bereich stark plastisch gestaucht und führt so zu effektivsten Richtergebnissen.

Durch die fehlende γ - α -Umwandlung kann dieser Stahl zudem aktiv Abgekühlt werden. Die Abkühlung kann metallurgisch reaktionsfrei mit Druckluft oder unter Berücksichtigung der Korrosionsgefahr durch Wasser erreicht werden. Dadurch kann zudem die Arbeitsgeschwindigkeit erhöht werden. [1, 2]

3.3.2.3 Nichteisenmetalle, Aluminiumlegierungen

Bei Aluminiumlegierungen müssen zwei Charakteristika unterschieden werden. Hier treten zwei verschiedene Legierungsarten auf, die unterschiedliche Behandlungen bestimmen.

Die nicht aushärtbaren Aluminiumlegierungen werden zum einen im „weichen“ Zustand ausgeliefert. Selbst beim Schweißen sind hier keine Festigkeitsverluste zu beobachten [9].

Dem entsprechend ist auch eine hohe Richttemperatur bis zu 450°C unkritisch.

Eine weitere Lieferoption ist der Zustand „kaltverfestigt“. Durch Umformung (Recken) ist hier eine Verfestigung durch die Erhöhung der Versetzungsdichte erreicht worden. Ab Temperaturen von 250°C kann sich die Rekristallisation d.h. eine Rückbildung der Verfestigung einsetzen. Genaue Aussagen zur Rekristallisationstemperatur und -geschwindigkeit können hier nicht getroffen werden, da diese stark vom Grad der vorausgegangenen Kaltverformung und der Haltezeit Abhängig ist. Daher sollte die Richttemperatur die Rekristallisationsgrenze nicht überschreiten und auf minimale Haltezeiten beschränkt werden. Eine zuverlässige Aussage über die Festigkeit bieten nur zerstörende Werkstoffprüfungen bzw. Arbeitsproben.

Eine weitere Legierungsart stellen die aushärtbaren Aluminiumwerkstoffe dar. Sie sind durch die Einlagerung teil- und inkohärenter Ausscheidungen im Gefüge in ihrer Festigkeit erhöht. Die Aushärtung erfolgt hierbei größtenteils durch eine Auslagerung bei erhöhten Temperaturen. Eine weitere Wärmebeaufschlagung setzt den Ausscheidungsprozess fort, der in einem Verlust der Festigkeit resultiert. Je nach Legierungsart kann die Festigkeit durch eine weitere anschließende Aushärtebehandlung wiederhergestellt werden. Das stellt jedoch einen hohen technologischen Aufwand dar, den es zu vermeiden gilt. Eine scharf begrenzte Temperatur und Haltezeit kann die Entfestigung minimieren. [2, 9, 48]

Gemein haben beide Legierungsarten, dass sie bei erhöhten Haltezeiten zu Kornwachstum neigen [9]. Nur eine kurze Haltezeit vermindert hier negative Einflüsse. Da dieser Werkstoff umwandlungsfrei ist, kann die Abkühlgeschwindigkeit durch Druckluft oder Wasser erhöht werden.

3.4 spezifische Werkstoffe des Schienenfahrzeugbaus

Am Beispiel 1.0579 / S355J2C

Chemische Zusammensetzung [%]		C	Si	Mn	P	S	CEV
		<0,2	<0,55	<1,6	<0,035	<0,035	~0,45
Bruchdehnung		Min. 8%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	>355	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	>470	
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]		~12	Wärmeleitfähigkeit [(W/m*K)]	~42	Wärmekapazität [J/(kg*K)]	~480	
E-Modul [kN/mm ²]	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
	212	207	199	192	184	175	164

Tab. 1 Werkstoffkennwerte 1.0579 nach 10025-2 und SEW 310

Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen umwandlungsfähigen Stahl. Der Kohlenstoffäquivalent CEV von mehr als 0,4 % gibt Anlass, die Abkühlbedingungen genauer zu betrachten. Die maximale Richttemperatur ist ausschlaggebend für den Werkstoff schonende Richtarbeiten. Da eine α - γ -Umwandlung prinzipiell vermieden werden sollte, ist auch unter Rücksichtnahme der verzögerten Austenitbildung (Abb. 2-19) eine maximal angestrebte Richttemperatur von 700°C sinnvoll.

Für eine sichere Behandlung ist es ratsam, die Abkühlgeschwindigkeit auf die t_{8/5}-Zeit anzupassen. Angemessene Werkstoffeigenschaften werden so selbst bei einer Überhitzung beibehalten. Für den S355J2C ergibt sich aus den Angaben des ZTU-Diagramms (Abb. 2-18) eine Abkühlzeit zwischen 800°C und 500°C von etwa 40 s, um die Güterwerte des Grundwerkstoffs zu erhalten. Besonders bei dicken Querschnitten ist es ratsam, eine Vorwärmtemperatur nach z.B. DIN EN 1011 oder SEW 088 vor dem Richten zu bestimmen, damit zum einen eine Durchwärmung des Querschnittes auf Richttemperatur gewährleistet und somit der Temperaturgradienten-Mechanismus reduziert wird, und zum anderen, um die Abkühlzeit auf moderate Zeiten zu begrenzen. Gerade durch die erhöhte Erwärmungszeit ist eine Überhitzung auf Seiten der Energiequelle zu erwarten und kaum zu vermeiden.

Eine grundsätzliche Begrenzung der Richttemperatur auf 600°C, laut [1, 2], ist gerade bei größeren Wärmebildern wie Wärmekeile, -ovale sinnvoll, da hier die Erwärmungs- und Haltezeiten wesentlich höher sind.

Versuche von [28, 42] zeigen, dass bei diesen Temperaturen lediglich eine oberflächennahe Auflösung der Walztextur mit einem Anstieg der Härte von etwa 10% im Vergleich zum Grundwerkstoff zu erwarten ist, was auf die Überhitzung des oberflächennahen Bereichs durch die Flamme zurückzuführen ist.

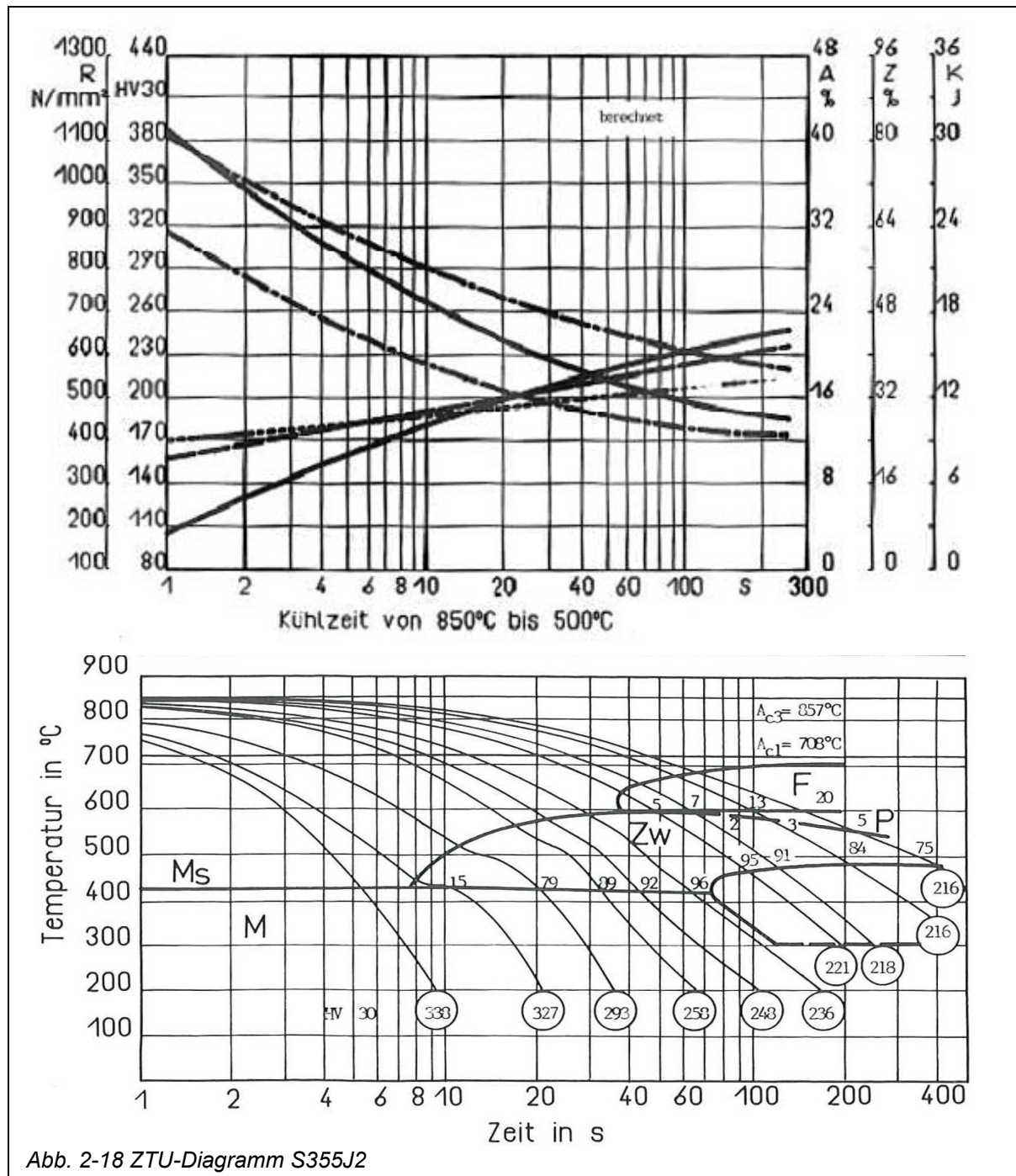


Abb. 2-18 ZTU-Diagramm S355J2

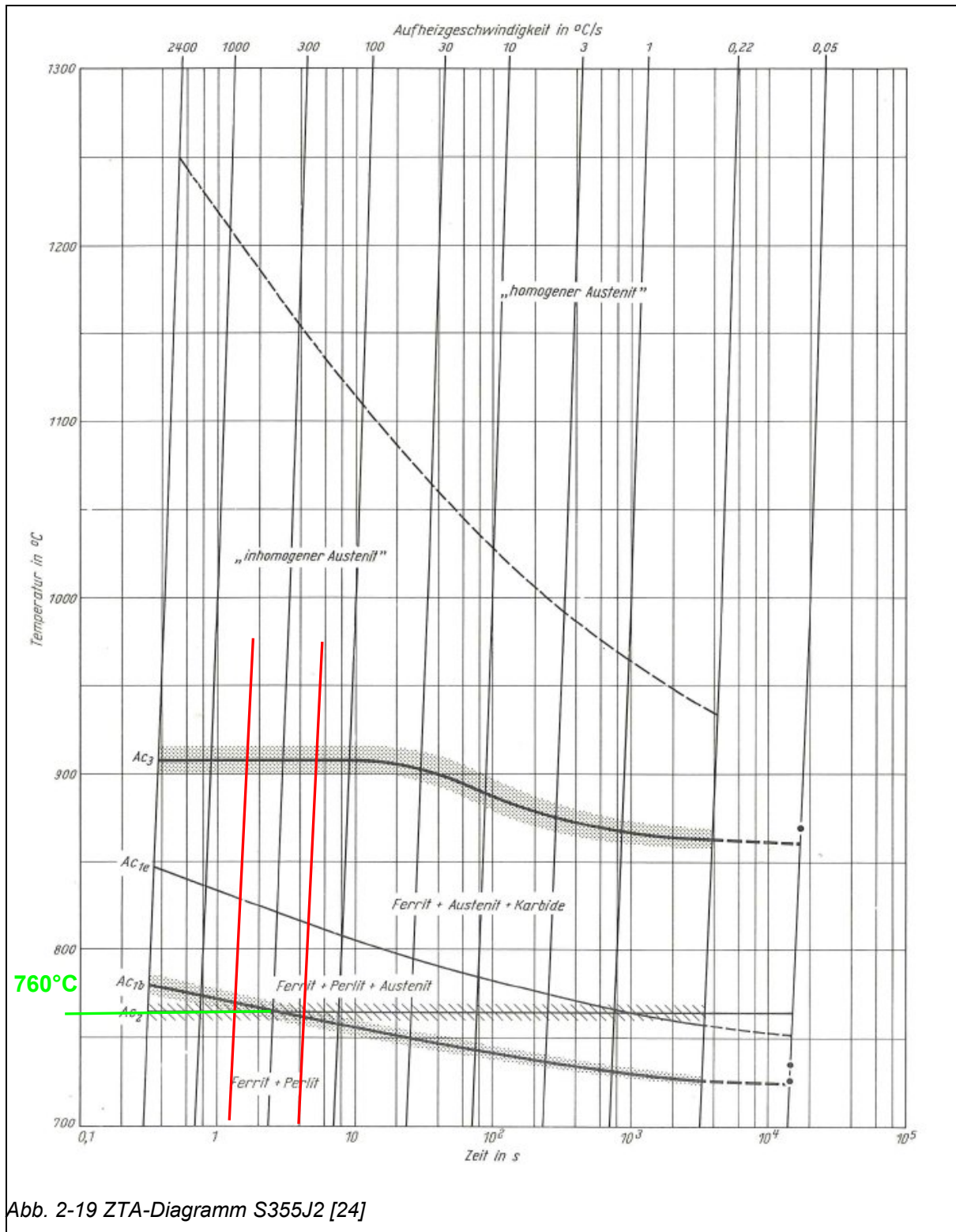


Abb. 2-19 ZTA-Diagramm S355J2 [24]

Für hohe Aufheizgeschwindigkeiten, die sich im Dünoblechbereich um 300°C/s [Kap. 5] bewegen, und kurze Haltezeiten kann die maximale Temperatur durchaus höher ausfallen, ohne dass eine Austenitumwandlung stattfindet. Für kleine Wärmebilder können dem entsprechend höhere Temperaturen angestrebt werden.

Am Beispiel P355NL1 / 1.0566

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Al	CEV
	<0,18	<0,5	1,1-1,7	<0,025	<0,015	>0,02	~0,45
Bruchdehnung	Min. 22%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	>355	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	>490		
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~13	Wärmeleit-zahl [(W/m*K)]	~48	Wärmekapazität [J/(kg*K)]	~461		
E-Modul [kN/mm ²]	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
	212	207	199	192	184	175	164

Tab 2. Werkstoffkennwerte 1.0566 nach DIN EN 10028-3 und SEW 310

Ebenso wie der Baustahl S355J2C neigt der normalisierte kaltzähe Druckstahl mit einem CEV über 0,4 % zum Aufhärten, falls die Umwandlungstemperatur überschritten wird. Da dieser Stahl geringe Anteile der Mikrolegierungselementen Niob und Aluminium enthält, ist die Gefahr eines Kornwachstums bei zu hohen Abkühlzeiten reduziert und konnte nicht beobachtet werden, wenn die Behandlungstemperaturen auf 700°C begrenzt wurden [1, 2].

Die Mikrolegierungselemente beeinflussen zudem die Umwandlungstemperatur. Bei den hohen Aufheizgeschwindigkeiten des thermischen Richtens liegt die Ac3- Kurve um 50-70°C im Vergleich zum S355J2C höher [24], wodurch eine Überhitzung geringfügig erschwert wird. Ein Spielraum, der eher als Sicherheitsfaktor denn als nutzbare Temperatur angesehen werden sollte.

Zum einen, um der Härteneigung dieses Stahl gerecht zu werden, und zum anderen, um das normalisierte Gefüge zu erhalten, muss eine Überschreitung der Umwandlungstemperatur vermieden werden.

Am Beispiel S500MC / 1.0984

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti
	<0,12	<0,5	1,7	<0,025	<0,01	>0,015	<0,09	<0,2	<0,15
Bruchdehnung	Min. 14%	Mindest-streckgrenze Re [N/mm ²]	>500	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	>550				
Ausdehnungs-Koeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~13	Wärmeleit-zahl [(W/m [*] K)]	~48	Wärme-kapazität [J/(kg [*] K)]	~461				
E-Modul [kN/mm ²]	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C		
	212	207	199	192	184	175	164		

Tab. 3 Werkstoffkennwerte 1.0984 nach DIN EN 10149 SEW 310

Über die Behandlung der thermomechanisch behandelten Stähle gibt es verschiedene Versuche [27, 28, 32, 38], die unterschiedliche Aussagen liefern. Im Gegensatz zu den in gängigen Normen [33, 38] angegebenen Höchstwert der Richttemperatur wurden teils erst ab Temperaturen von 900°C signifikant negative Auswirkungen auf den Grundwerkstoff festgestellt. In Anlehnung an die verzögerte Austenitbildung betrifft dies kleine Wärmebilder wie Punkte und Striche. Jedoch fallen mit erhöhter Abkühlzeit aus derart hohen Temperaturen die Festigkeitswerte stark ab. Im Mittel stellte sich ein Festigkeitsverlust von 18% und eine Härteabnahme von 30 HV 10 ein. Außerdem zeigen größere Wärmebilder ein leichtes Kornwachstum über den gesamten erwärmten Querschnitt.

Aufgrund des erhöhten Mangangehalt dieser Stähle kann eine Überhitzung mit anschließender hoher Abkühlgeschwindigkeit schnell zu einem Härteanstieg und zu signifikanten Festigkeitssteigerungen führen (Abb. 2-20). Jedoch kann für maximale Temperaturen von 700°C in allen Untersuchungen keine Gefügebeeinflussung festgestellt werden. Auch durch Mikrolegierungselemente wie Niob und Aluminium werden Kornwachstum und Rekristallisationsvorgänge wesentlich verzögert [33].

Aus den Ergebnissen dieser Versuche geht einschlägig hervor, dass diese Stähle sehr gut für Richtarbeiten geeignet sind. Auch entgegen den Vorschriften der Hersteller, die eine maximale Richttemperatur auf die der thermomechanischen Behandlung der Halbzeuge

begrenzen, können durchaus höhere Temperaturen angesetzt werden, wobei auch hierbei zwingend zwischen den Größen der Wärmebilder unterschieden werden muss.

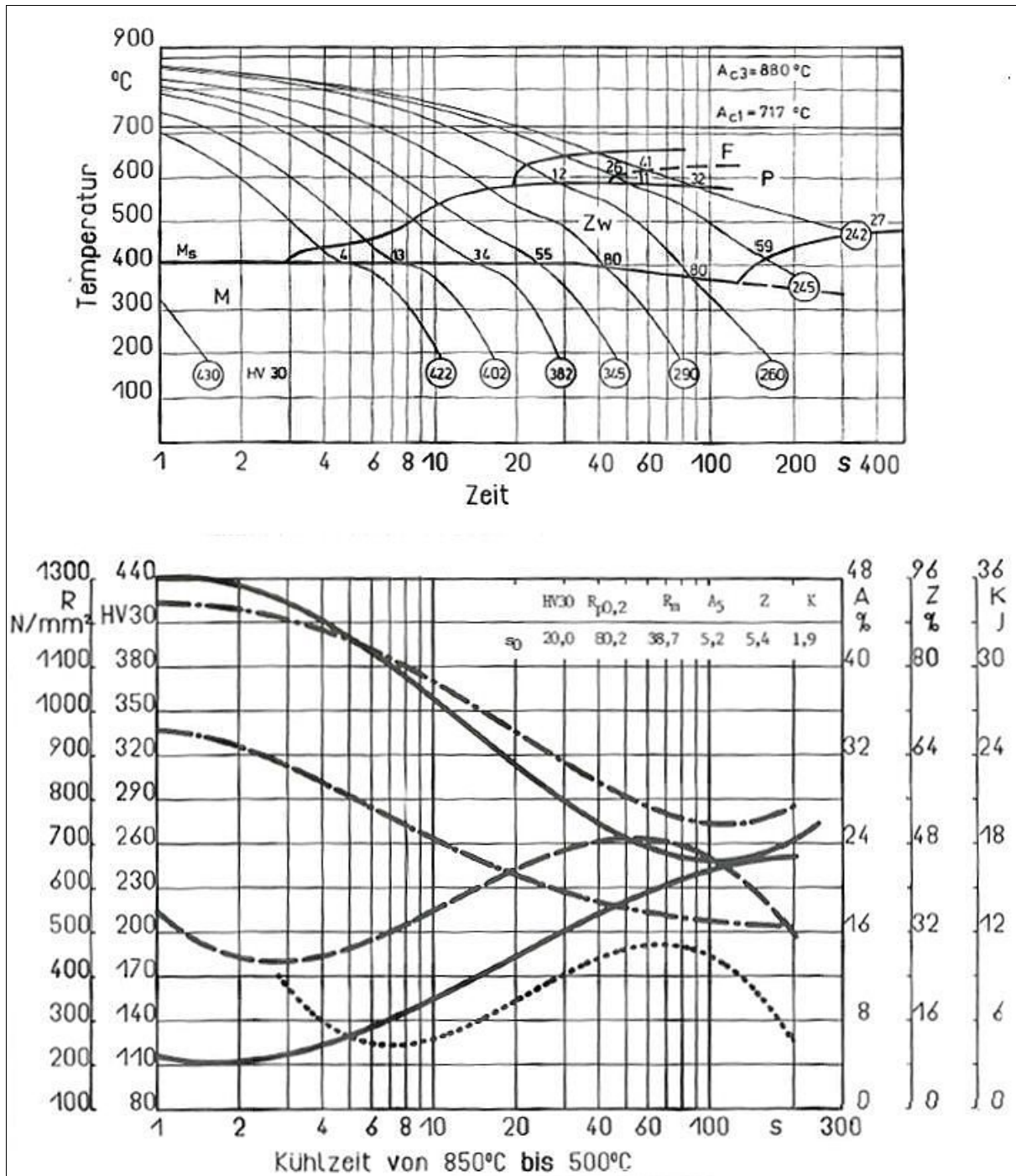


Abb. 2-20 ZTU-Diagramm S500MC [25]

Am Beispiel X 5 CrNi 18-10 / 1.4301 und X 2 CrNiN 18-7 / 1.4318

Chemische Zusammensetzung [%] 1.4301	C	Cr	Ni	Mn			
	<0,07	17-19,5	8,0-10,5	2,0			
Bruchdehnung	Min. 45%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	>230	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	>540		
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~17	Wärmeleit-zahl [(W/m*K)]	~15	Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	~500		
E-Modul [kN/mm ²]	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
	196	190	182	174	166	158	150

Chemische Zusammensetzung [%] 1.4318	C	Cr	Ni	Mn	N		
	<0,03	16,5-18,5	6,0-8,0	2,0	0,1-0,2		
Bruchdehnung	Min. 35%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	>350	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	>650		
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~17	Wärmeleit-zahl [(W/m*K)]	~15	Wärme-kapazität [J/(kg*K)]	~450		
E-Modul [kN/mm ²]	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	
	200	194	186	179	172	165	

Wie der 1.4301 neigt auch der 1.4318 zur Ausscheidung von Chromcarbiden. Diese ist jedoch stark von dem Kohlenstoffgehalt bzw. von stabilisierenden Elementen wie Titan und Niob abhängig. Durch den reduzierten Gehalt an Kohlenstoff erhöht sich die für Diffusionsvorgänge benötigte Zeit erheblich.[5]

Ein Verlust der Korrosionsbeständigkeit ist bei korrekter Ausführung der Richtarbeiten auszuschließen.

Jedoch neigt auch der 1.4318 wie alle austenitischen Stähle zu Kornwachstum und ist somit in seiner Richttemperatur auf 1000°C beschränkt, wenn aktiv abgekühlt wird. Für eine

sicherere Behandlung sollten die maximalen Temperaturen auf 800°C begrenzt werden [1, 2, 3, 27].

Einen wesentlichen Unterschied im Richtergebnis des 1.4318 im Vergleich zum 1.4301 macht die deutlich erhöhte Festigkeit aus.

Durch die erhöhte Festigkeit im umliegenden Material wird der erwärmte Werkstoffbereich verstärkt gestaucht. Es ist ein stärkerer Richteffekt zu erwarten.

Beide Werkstoffe sind unproblematisch in ihren Eigenschaften. Negative Beeinflussungen des Gefüges treten nur bei hohen Temperaturen und Haltezeiten auf. Diese beiden Parameter können problemlos durch eine Temperaturbegrenzung auf 700°-800°C und eine aktive Abkühlung im Anschluss der Erwärmung kontrolliert werden.

Ein Augenmerk muss bei der Planung der Richtarbeiten auf die stärkere Richtwirkung der austenitischen Stähle gelegt werden. Mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der um etwa 40% größer ist im Vergleich zu Baustählen, können die Richtstellen kleiner ausfallen. Kleinere Wärmebilder reduzieren zudem die Gefahr zu großer Ausdehnungskräfte, die die Struktur übermäßig verziehen könnten.

Am Beispiel X2CrNi12 / 1.4003

Chemische Zusammensetzung [%]	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
	<0,03	10,5-12,5	0,3-1,0	<1,5	<1,0	<0,04	<0,015
Bruchdehnung	Min. 20%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	>280	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	>450		
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~11	Wärmeleitfähigkeit [(W/m*K)]	~25	Wärmekapazität [J/(kg*K)]	~430		
E-Modul [kN/mm ²]	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
	220	215	210	205	200		

Tab. 4 Werkstoffkennwerte 1.4003 nach DIN EN 10088-2

Dieser ferritische Chrom-Stahl wird häufig für die Seitenwandbeblechung von Wagenkästen verwendet. Da er nicht umwandlungsfrei ist (Abb. 2-22), muss auch hier die maximale Temperatur begrenzt werden. Aufgrund des hohen Chromgehaltes neigt der 1.4003 stark zur Martensitbildung (Abb. 2-22), ist aber in seinen Härtewerten ob des stark reduzierten Kohlenstoffgehaltes beschränkt. Problematischer ist hier die Volumenvergrößerung des

Martensits, der durch seine Ausdehnung das Richtergebnis verschlechtert. Da die Umwandlungstemperatur generell schon höher ist und bei kleinen Wärmebildern zusätzlich weiter erhöht wird (Abb. 2-21), sind Temperaturen bis 800°C unproblematisch. Eine aktive Kühlung kann bei diesem Stahl aufgrund der nur geringen Härtewerte eingesetzt werden, wenn die Umwandlungstemperatur nicht überschritten wird. Aufgrund des hohen Chromgehaltes ist die Wärmeleitfähigkeit geringer als bei anderen umwandlungsfähigen Stählen, was bei der Wärmeführung beachtet werden muss, um eine Überhitzung zu vermeiden.

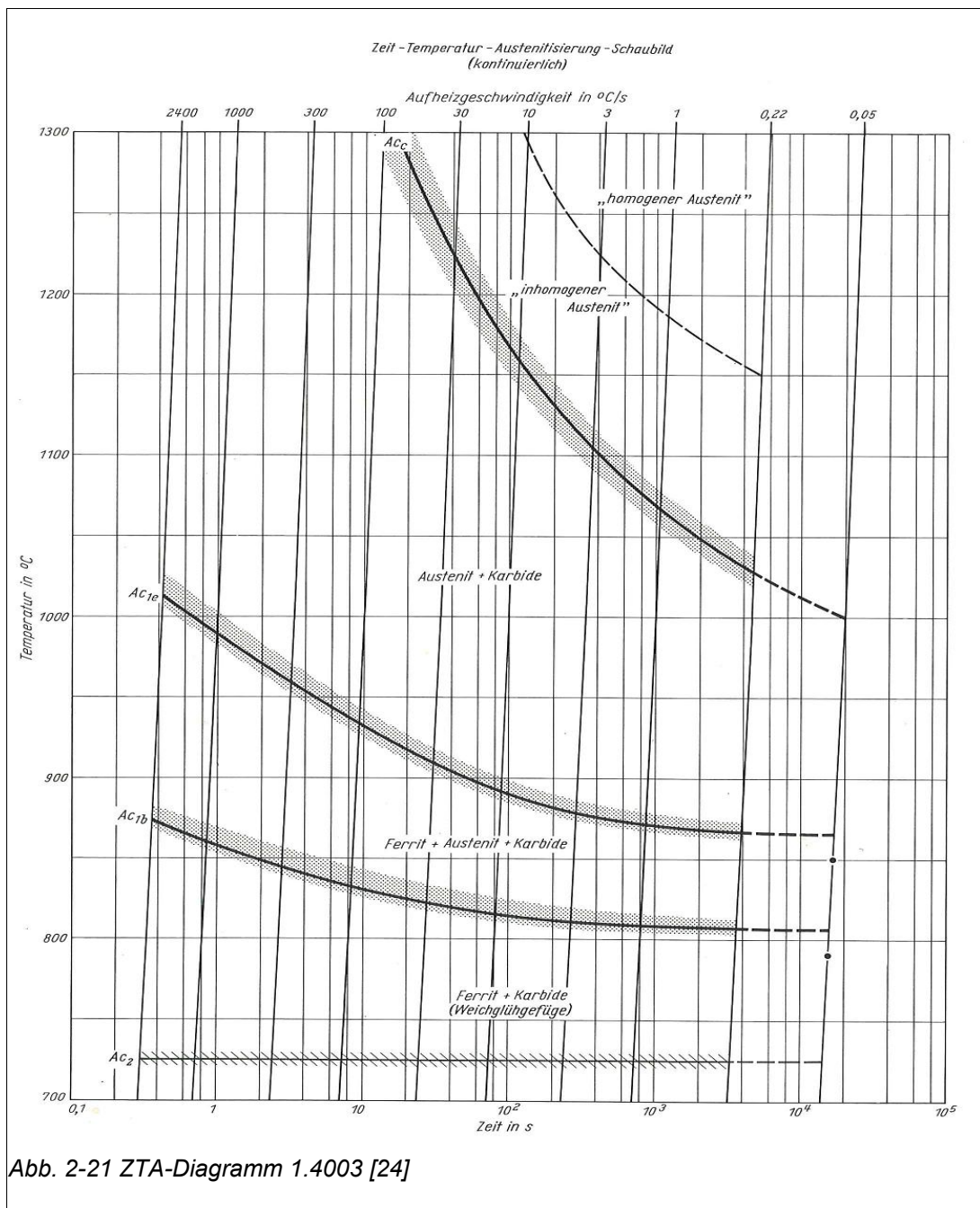
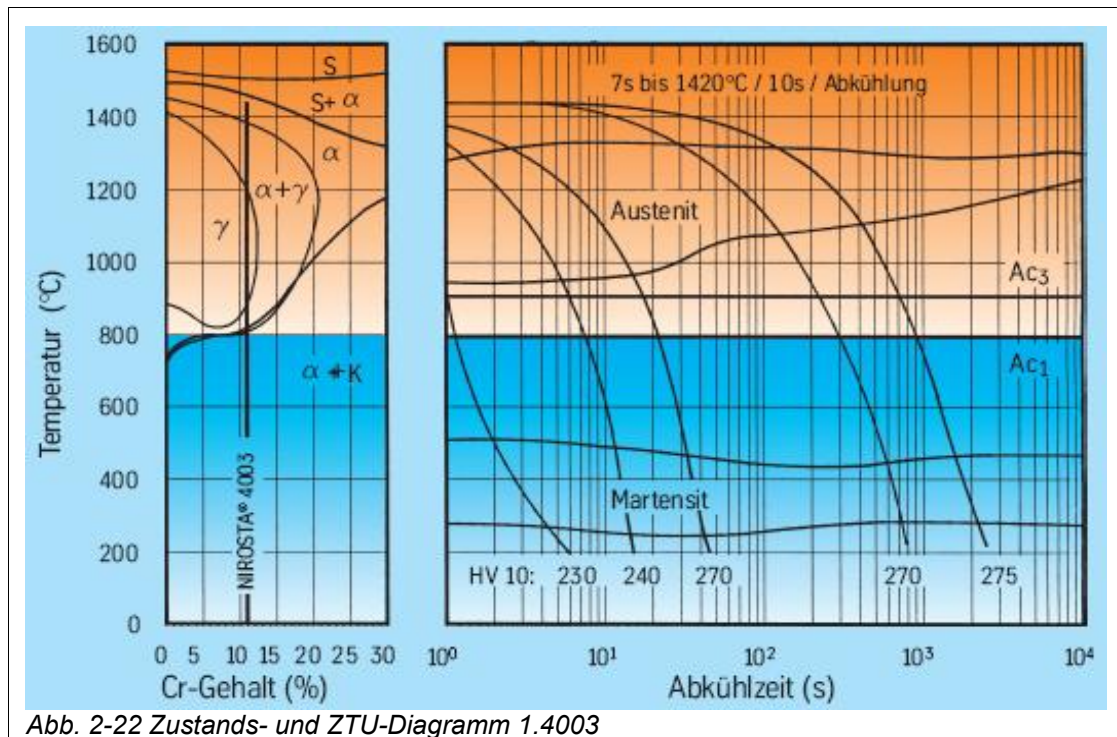


Abb. 2-21 ZTA-Diagramm 1.4003 [24]



Am Beispiel 3.3547 / AW 5083

Chemische Zusammensetzung [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	<0,4	<0,4	<0,1	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	<0,25	<0,15
Bruchdehnung	Min. 15%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	125-190	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	275-350			
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~23	Wärmeleitfähigkeit [(W/m*K)]	~105	E-Modul [kN/mm ²]	20°C			
					71			

Tab. 5 Werkstoffkennwerte 3.3547 nach EN 573-3

Diese Legierung ist naturhart. Im Schienenfahrzeugbau findet sie meist im Zustand der Kaltverfestigung Anwendung. Der Rekristallisationsprozess setzt bei dieser Legierung – abhängig vom Verformungsgrad- bei etwa 250°C ein. Da die Rekristallisation ein Diffusionsprozess ist, kann durch eine Begrenzung der Richttemperatur und der Reduzierung der Haltezeit der kaltverfestigte Zustand erhalten werden. [9]

Wird der Werkstoff im Zustand weich geliefert, ist eine Erwärmung von bis zu 450°C ohne einen Verlust an Festigkeit möglich. [2,37]

Am Beispiel 3.2315 / AW 6082

Chemische Zusammensetzung [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	0,7-1,3	<0,5	<0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	<0,25	<0,2	<0,1
Bruchdehnung	Min. 6%	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	240-255	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]	275-300			
Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	~23	Wärmeleitfähigkeit [(W/m*K)]	~170	E-Modul [kN/mm ²]	20°C 69			

Tab. 6 Werkstoffkennwerte 3.2315 nach EN 573-3

Diese Aluminiumlegierung stellt einen sehr speziellen Werkstoff für Richtaufgaben dar. Die Festigkeitseigenschaften, insbesondere die geringe Bruchdehnung, sprechen prinzipiell gegen eine nachträgliche Umformung. Kritischer jedoch ist der mögliche Festigkeitsverlust bei zu starker Erwärmung.

Dieser Werkstoff wird warm ausgelagerten geliefert. Für die Einstellung der Festigkeitswerte wird die Warmauslagerung vom Hersteller angepasst und gezielt unterbrochen, um einen Festigkeitsabfall bei fortschreitender Warmauslagerung zu vermeiden. Durch thermische Verfahren, wie dem Schweißen oder Richten, wird der Ausscheidungsprozess fortgesetzt und die ideale Größe und feine Struktur der Ausscheidungen zerstört. Durch einen erneuten Aushärtungsprozess - Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern - der jedoch sehr kostspielig und aufwändig ist, kann das ursprüngliche Gefüge wieder hergestellt werden. Durch die Abschreckbehandlung kann zudem durch das starke Verziehen der Profile keine Maßgenauigkeit garantiert werden, was selbst die Planung einer solchen Verfahrensweise hinfällig macht.

Um einen erneuten Aushärtungsprozess zu vermeiden, muss die Temperaturführung angepasst werden. Bis zu einem Temperaturbereich von 200°C ist der Festigkeitsverlust nur gering (Abb. 2-23). [2, 9, 42]

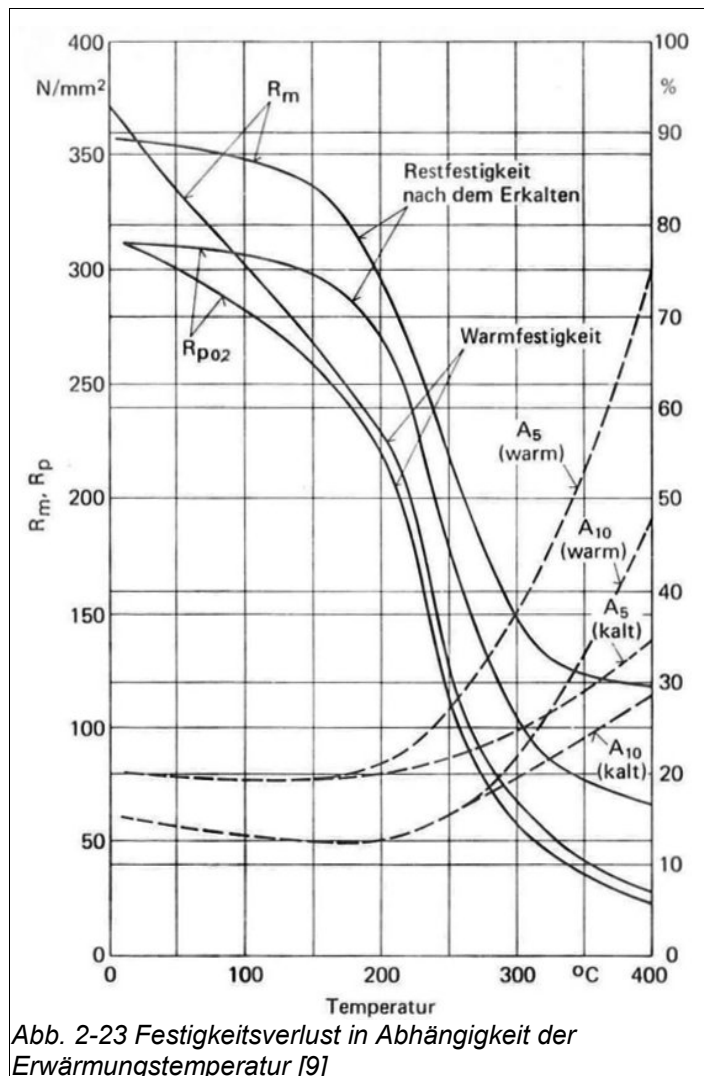
Auf ein Überschreiten dieser Temperatur und zu langen Haltezeiten muss hier stets geachtet werden. Aufgrund der hohen Wärmeausdehnung ist es sinnvoll, die Richttemperaturen auf

150°C zu begrenzen und gegebenenfalls iterativ Schrumpfmaße zu erzeugen, um sich an das gewünschte Maß heranzutasten.

Die größte Schwierigkeit besteht darin, die Wärmestelle örtlich zu begrenzen, ohne eine Überhitzung des Werkstoffs zu riskieren. Die ausgesprochen hohe Wärmeleitfähigkeit, selbst im Vergleich zum artverwandten AW 5083, erfordert dafür eine hohe Energiedichte und sehr kurze Erwärmungszeiten.

Generell günstiger ist die Festlegung mehrerer kleiner Richtstellen. So kann das Schrumpfmaß genauer überprüft werden und ein Festigkeitsverlust durch mehrfaches Erwärmen des selben Werkstoffbereichs wird vermieden.

Wegen dieser schwierigen Handhabung des Werkstoffs wird im Schienenfahrzeugbau meistens das Kaltrichten mit Schlagwerkzeugen eingesetzt.



4 Stand der Technik der Erwärmungsverfahren

Wie vorab bereits erläutert, wird beim Richten eine möglichst geringe Wärmeausbreitung angestrebt. Durch die im allgemeinen recht hohe Wärmeleitfähigkeit der metallischen Werkstoffe kann dieses nur durch eine kurze Erwärmungszeit erreicht werden, um einen angemessenen örtlich begrenzten Wärmestau zu erzeugen. Die Hauptanforderung an ein Erwärmungsverfahren muss also die Bereitstellung einer möglichst hohen Energiedichte sein, um die Erwärmungszeit zu reduzieren.

Eine weitere Anforderung an das Erwärmungsverfahren ist eine werkstoffschonende Wärmeeintrag. Im Idealfall ist das Erwärmungsmedium grundsätzlich ungefährlich für den Werkstoff. Andernfalls muss für eine angemessene Handhabung gesorgt werden.

Bei der Wahl der Wärmequelle muss zudem beachtet werden, ob sie den spezifischen Anforderungen der Fertigungsbetriebe entspricht. Vor allem die Größe der Wärmebilder und die benötigten Wirkmechanismen grenzen die Erwärmungsverfahren ein.

4.1 autogene Erwärmung, Flammrichten

Beim Flammrichten wird die für das thermische Richten benötigte Energie durch ein Brenngas bereitgestellt.

Dieses Verfahren ist das älteste und trotzdem heute noch am meisten verbreitete Verfahren in der metallverarbeitenden Industrie.

4.1.1 Das Gasmisch

Um die beim Richten erwünschte hohe Energiedichte zu realisieren, wird bei diesem Verfahren ein Acetylen-Sauerstoff-Gemisch verwendet. Im Vergleich zu anderen üblichen Brenngasen kann damit die höchste Temperatur im Flammkegel erzeugt werden.

Das Gas Acetylen besteht aus kurzen Ketten von C_2H_2 - Verbindungen. Die Verbrennung lässt sich in zwei Schritte unterteilen.



In der ersten Stufe, unmittelbar an der Gasdüse, dissoziiert das Brenngas und reagiert exotherm mit dem zugeführten Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Im Bereich dieser Reaktionen bildet sich die Primärflamme aus. Durch die ungesättigten Verbindungen CO und H entsteht die reduzierende Wirkung der Primärflamme, was bedeutet, dass der fehlende Sauerstoff aus der Umgebung gebunden wird, und so auch die erwünschten Passivschichten korrosionsbeständiger Stähle auflösen kann.

In der zweiten Stufe bildet sich die Sekundärflamme aus. Hier verbrennen CO und H zu CO₂ und H₂O. Der dafür benötigte Sauerstoff wird der Umgebung entzogen [22].



Das Verhältnis der dem Brenner zugeführten Gase Acetylen und Sauerstoff beträgt in etwa 1:1 bis 1:2. Das bedeutet, dass für eine vollständige Verbrennung des Brenngases ca. 1,5 Teile des benötigten Sauerstoffs aus der Umgebung herangezogen werden. Die ausgeprägteste exotherme Reaktion findet etwa 2- 3 mm vor der Spitze der Primärflamme statt. Dieser Bereich setzt die meiste Wärmeenergie in der Flamme um.

Eine Veränderung des Gasgemisches bewirkt eine Beeinflussung der Temperatur im Arbeitspunkt. Ein leicht sauerstoffüberschüssiges Verhältnis von etwa 1:1,3 erzeugt die höchsten Temperaturen von bis zu 3200°C [31].

Das richtige Mischungsverhältnis des Brenngases ergibt sich aus den zu behandelnden Werkstoffen und Richtaufgaben. Hier lassen sich drei grundsätzliche Unterteilungen ansetzen.

Austenitische korrosionsbeständige Stähle müssen mit einem leicht sauerstoffüberschüssigen (Abb. x/1) Gasgemisch behandelt werden. Ein erhöhter Sauerstoffanteil bewirkt eine schnellere Oxidation des dissoziierten Kohlenstoffs in der Flamme und verringert so die Gefahr der Aufkohlung des Werkstoffs. So kann die Anfälligkeit für interkristalline Korrosion minimiert werden. Jedoch sollte der Sauerstoffüberschuss auf 10% bis 30% begrenzt werden, um ein unnötiges Aufdicken der Passivschicht zu vermeiden, was zu deutlichen Anlauffarben führt, und das Risiko der Anschmelzung der Oberfläche zu vermeiden [2, 31].

Aluminium und Aluminiumlegierungen sind sehr anfällig für Sauerstoff [9]. Hier ist ein neutrales (Abb. x/2) bis acetylenüberschüssiges (Abb. x/3) Gasgemisch anzuwenden, da diese Leichtmetalle für Kohlenstoff eher unempfindlich sind. Außerdem wird die maximale

Temperatur im Arbeitspunkt reduziert, was bei dem niedrigschmelzenden Werkstoff eine Beschädigung erschwert.

Niedriglegierte (Bau-)Stähle sollten mit einer neutralen bis leicht sauerstoffüberschüssigen Flamme gerichtet werden. Sie sind verhältnismäßig unempfindlich gegenüber Kohlen- oder Sauerstoffdiffusion. Je nach Erwärnungsaufgabe sollte der entsprechende Mischungsgrad eingestellt werden. Sauerstoffüberschüssige Gasmische erhöhen die Energiedichte und ermöglichen so eine zügige Erwärmung oberflächennaher Bereiche. Für eine Durchwärmung dickerer Werkstoffe sollte eine neutrale Flamme eingestellt werden, um einen Wärmefluss über den Querschnitt des Bauteils ohne eine Überhitzung der Oberfläche zu erreichen. [2,3,31]

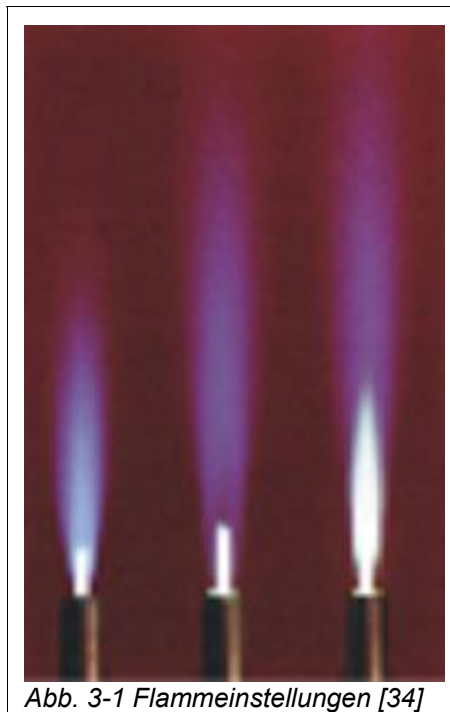
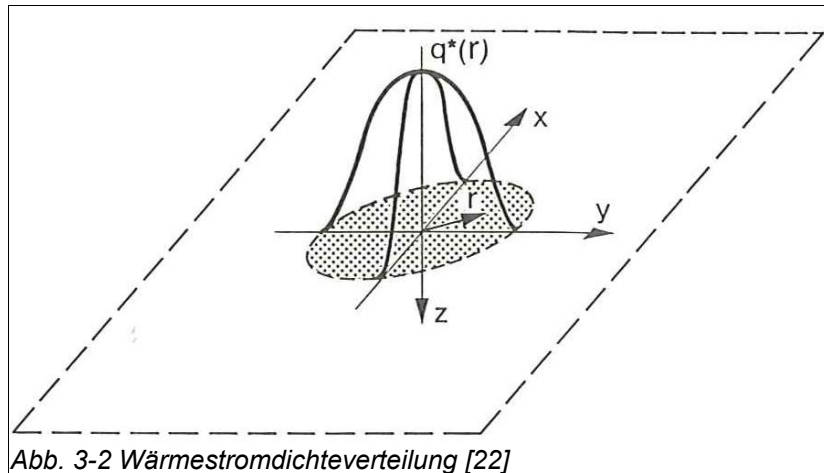


Abb. 3-1 Flammeinstellungen [34]

4.1.2 Die Brennergröße und –arten

Für das Flammrichten im Blechbereich kommt nur eine Art von Brenner in Betracht. Der Einflammenbrenner ermöglicht bei guter Wärmeleistung eine konzentrierte Wärmeeinbringung, Grundvoraussetzungen um Wärmebilder gezielt und effektiv einbringen zu können [1, 2, 34, 36].

Erst bei Werkstückdicken größer 15-18mm ist ein Einsatz von Mehrflammenbrennern sinnvoll, um den erhöhten Energiebedarf aufzubringen.



Warum Mehrflammenbrenner trotz des erhöhten Wärmeangebots für dünne Bleche ungeeignet sind, ergibt sich aus der Wärmestromdichteverteilung [22]. Bei Mehrflammenbrenner vergrößert sich der Radius der Wärmeeinbringung im Vergleich zu Einflammenbrennern. Dementsprechend ungenau kann die Wärmeeinbringung kontrolliert werden, und ein erhöhter Wärmefluss in den umgebenden Werkstoff ist das Resultat.

Für Einflammenbrenner sind Versuche zu Wirkungsgrad und effektiver Flammenleistung bei neutralem Mischungsverhältnis durchgeführt worden [27].

Um eine möglichst schnelle Erwärmung zu erreichen, ist eine hohe Leistung anzustreben. Jedoch muss dabei der Werkstoff, die Werkstückdicke und vor allem die im Zentrum des

Brennergröße		Acetylenverbrauch (l/h)
DIN 8543	Werkstückdicke (mm)	
Größe 2	1-2	150
Größe 3	2-4	300
Größe 4	4-6	500
Größe 5	6-9	750
Größe 6	9-14	1150
Größe 7	14-20	1700
Größe 8	20-30	2500
Größe 9	30-50	4000
Größe 10	50-100	7500

Tab. 7 Brennergrößen nach DIN 8543

Wärmestroms (Abb. 3-2) konzentrierte Energiedichte berücksichtigt werden. Zu groß ausgelegte Brenner führen punktuell schnell zu einer Überhitzung bzw. Aufschmelzung des Werkstoffs. Zu kleine Brenner verlängern die Erwärmungszeit, bis die angestrebte Richttemperatur erreicht ist. Um einen brauchbaren Anhaltswert für die Bestimmung der Brennergröße zu bekommen, kann die Einteilung aus DIN 8543 herangezogen werden (Tab. 7). Dort werden die Größen für das thermische Schneiden verschiedener Blechdicken eingeteilt. Aus dieser Tabelle kann je nach Blechdicke eine Referenzgröße bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften wird die Brennergröße um diese Referenzgröße variiert [2, 3, 36, 37].

Hochlegierte nichtrostende Stähle mit einer schlechten Wärmeleitfähigkeit sollten tendenziell mit einer Nummer kleineren Brennergröße beaufschlagt werden. Durch den schlechten Wärmeabfluss und den im vorigen Absatz erwähnten sauerstoff-überschüssigem Gaseinsatz entsteht schon bei geringerer Erwärmungszeit ein starker Wärmestau, der für gute Richteffekte benötigt wird. Gleichzeitig wird ein Überhitzen des Werkstoffs erschwert.

Niedriglegierte Baustähle können mit der angegebenen Referenzgröße oder aber auch einer Nummer höheren Brennergröße behandelt werden. Kleinere Querschnitte mit einer zügigeren Durchwärmung sollten mit der Referenzgröße erwärmt werden um eine Überhitzung oder auch ein Aufschmelzen des Werkstoff zur vermeiden. Größere Querschnitte ab ca. 10 mm Dicke sollten mit erhöhter Energiezufuhr erwärmt werden um einen guten Wärmestau in der Erwärmungszone zu erreichen.

Aluminium und seine Legierungen bestechen durch einen sehr hohen Wärmeleitwert. Von daher sollte mit einem ein bis zwei Nummern größeren Brenner gearbeitet werden um den benötigten Wärmestau zu erreichen. [2, 3, 36, 37]

4.1.3 Die Brennerhaltung

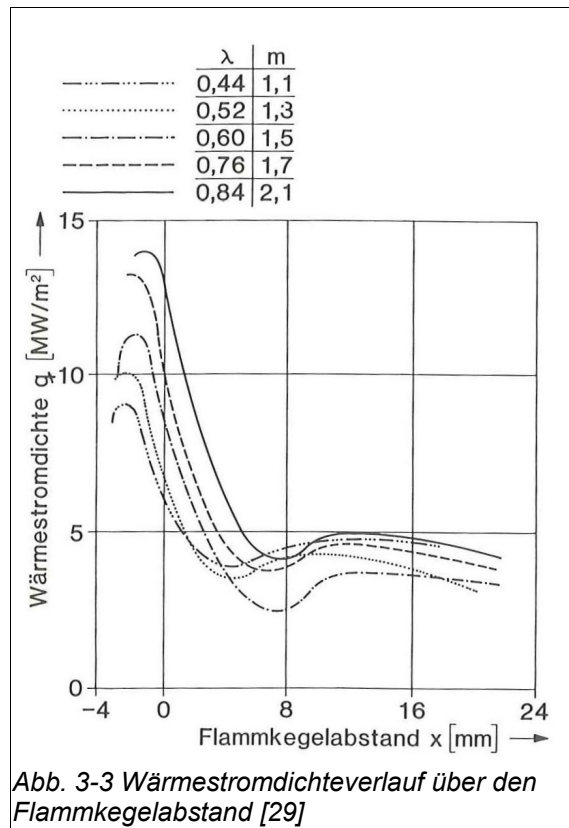
Je nach Werkstoff und Einsatzgebiet ist auch die Brennerhaltung von entscheidender Bedeutung für ein gutes Richtergebnis.

In Anlehnung an den Abschnitt über das Gasgemisch erklärt sich die Brennerhaltung über die Reaktionsgleichungen in den Verbrennungsschritten. Durch die hohe Anzahl dissoziierter und reaktionsfreudiger Kohlenstoff- und Sauerstoffatome in der Primärflamme, ist ein Eintauchen der Primärflamme für austenitische Stähle und Aluminium schädigend.

Bei austenitischen Stählen ist mindestens der Arbeitspunkt als Abstandshalter anzusehen um sicherzustellen, dass Rekombinationsvorgänge in der Flamme tendenziell abgeschlossen sind.

Aluminium schließt durch seine niedrige Schmelztemperatur generell eine zu nahe Brennerhaltung aus.

An niedriglegierten Baustählen, die vergleichsweise unempfindlich auf derartige diffusible Elemente reagieren, kann die Brennerhaltung je nach Einsatz stärker variiert werden.



So führt eine näher am Werkstück geführte Flamme zu einer punktuellen, höheren Energiedichte (Abb. 3-3) und somit zu einer zügigen Erwärmung der Werkstückoberfläche. Gleichzeitig steigt die Gefahr der Überhitzung oder Aufschmelzung der Oberfläche, sollen so größere Querschnitte erwärmt werden. Für eine sicherere Durchwärmung in Dickenrichtung wird also ein größerer Abstand gewählt. [1, 2]

4.1.4 Wärmebilder

Je nach Einsatzgebiet sind für möglichst effektive Richtarbeiten die passenden Wärmebilder zu wählen. Die Wahl der Wärmebilder ist grundlegend für eine werkstoffschonende und betriebswirtschaftlich günstige Anwendung. So lassen sich unnötige Wärmeeinbringung bzw. Arbeitsschritte und die damit erhöhte Arbeitszeit minimieren.

Der Grundsatz der Wärmebilder ist, die Steifigkeit des umliegenden kalten Materials größtmöglich zu erhalten, um die plastische Stauchung des sich ausdehnenden Werkstoffs zu maximieren. Eine erhöhte plastische Stauchung verstärkt den Richteffekt auch bei kleineren Wärmeeinflussbereichen und trägt so drastisch zu einer günstigen Arbeitsweise bei.

Zudem bestimmt die sich ausbildende Zugspannung bei der Abkühlung die bestmögliche Wahl des Wärmebildes. Generell lässt sich der Schrumpf über die Abmaße der Wärmebilder abschätzen. Je größer die dehnungsbehindert erwärmte Länge, umso größer ist der Schrumpf in selbiger Richtung [2, 3, 9].

Wärmepunkt

Der Wärmepunkt wird bei Blechen zur Erzeugung von Membranspannungen verwendet. Durch seine Symmetrie erzeugt er ein isotropes Spannungsbild. Mit steigendem Durchmesser erhöht sich prinzipiell die Schrumpfkraft. Jedoch reicht die Steifigkeit des Bleches meist nicht aus, beim freien Richten die Ausdehnung zu behindern. Als Folge neigen Wärmepunkte zu Überhöhungen. Je nach Blechdicke sollten die Wärmepunkte angepasst werden, um diese Überhöhungen zu reduzieren.

Die Spannungsverteilung eines durchgewärmten Punktes wird qualitativ durch Abb. 3-4 beschrieben [22, 21]. Es beschreibt das Verhältnis der Zugspannung in radialer Richtung und die durch die Materialschrumpfung entstehenden Druckspannungen in tangentialer Richtung bezogen auf die Streck-/ Fließgrenze des Werkstoffs.

Er ist für die Erzeugung des Temperaturgradienten- und Stauchmechanismus geeignet.

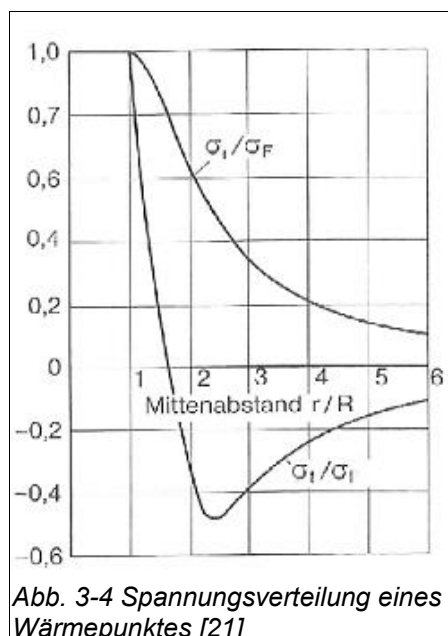


Abb. 3-4 Spannungsverteilung eines Wärmepunktes [21]

Wärmepunktfelder werden zum thermischen Richten bzw. Spannen von verworfenen Blechfeldern eingesetzt. Je nach der Ausbildung von Verwerfungen müssen die Felder angepasst werden. Einheitliche Aussagen oder Untersuchungen zu optimalen Feldstrukturen sind nicht vorhanden. So gibt es Aussagen, die bei unregelmäßig verteilten Wärmepunkten beste Ergebnisse erzielen [28, 35], oder geometrisch definierte Wärmepunktfelder unterstützen.

Der **Wärmestrich** bildet ein anisotropes Spannungsbild aus. In Abhängigkeit der Länge des Strichs kommt es zu einer ausgeprägteren Schrumpfung in Längsrichtung. Er wird ebenfalls bei dem Richten von Beblechungen angewendet. Auf oder neben den Versteifungen führt er mit seiner Querschrumpfung zu der Ausbildung von Zugspannungen im Blechfeld bei. Allerdings kann er durch seine Längsschrumpfung zu einem unerwünschten Einfallen, d.h. zu einem Winkelverzug, der Versteifung führen. [1, 2]

Mit ihm können Stauchmechanismen, hauptsächlich jedoch Temperaturgradienten-Mechanismen (Abb. 3-5), erzeugt werden.

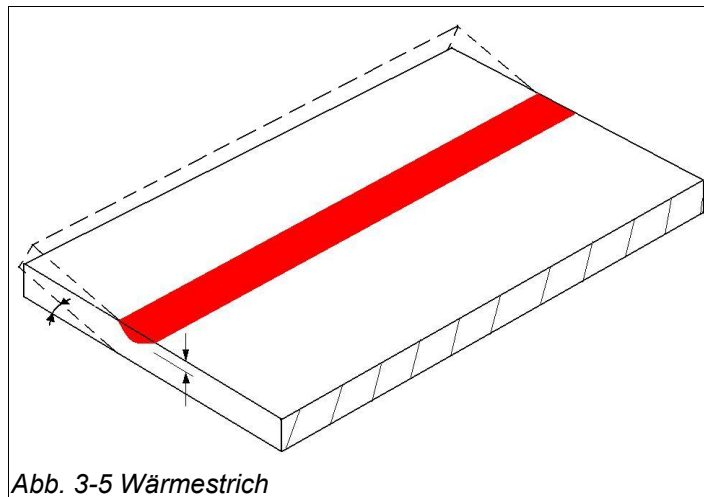
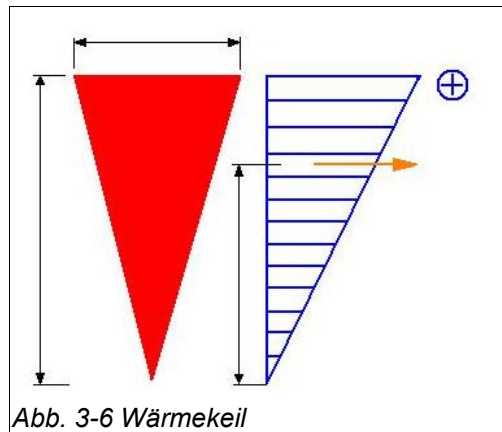


Abb. 3-5 Wärmestrich

Das **Wärmeoval** dient dem gleichmäßigen Richten von zylindrischen Bauteilen. Mit diesem Wärmebild wird ein Knickmechanismus erzeugt, der je nach Abmaßen des Ovals unterschiedlich ausgeprägt ist. [1, 2]

Der **Wärmekeil** (Abb. 3-6) kann auf verschiedene Arten eingesetzt werden. Mit ihm wird der Knickmechanismus erzeugt, kann bei einem über dem Bauteilquerschnitt durchgewärmten Bereich auch zum Stauchen führen. [1, 2]

Er wird meistens zum Richten von Trägern verwendet. Aufgrund seiner Geometrie erzeugt er eine lineare Schrumpfkraftverteilung zwischen einem Minimum in der Keilspitze und einem Maximum in seinem Scheitel. Je nach Abstand des Schwerpunktes dieser Schrumpfkräfte zur neutralen Faser, erzeugt er eine Überlagerung von axialer Zugkraft und Moment.



Temperaturführung

Auch die Temperaturführung ist grundlegend für effektive Ergebnisse der Richtarbeiten und einer werkstoffschonenden Behandlung.

Die Wärmebilder sollten stets so erzeugt werden, dass die Steifigkeit des umgebenden Materials möglichst lange erhalten bleibt und so die größtmögliche plastische Stauchung erreicht werden kann [1].

Durch eine zusätzliche Kühlung des Werkstoff parallel oder nach der Erwärmung können das Richtergebnis, bzw. die Arbeits- und Haltezeiten, beeinflusst werden.

Als Abkühlmedium kommen Druckluft, CO₂-Schnee oder Fluide in Frage [1, 2]. Auch hier sind die spezifischen Werkstoffeigenschaften zu beachten.

4.1.5 Allgemeine Bewertung dieses Richtverfahrens

Das autogene Flammrichtverfahren bewährt sich seit Jahrzehnten. Und gerade dieser Zeitraum verifiziert diese Bewährung. Während all dieser Zeit sind nur sehr selten Unfälle oder Betriebsausfälle von Anlagen verzeichnet worden, welche auf grundlegend falsche Behandlungsvorschriften verstoßen haben. Für einen effektiven Einsatz ist ein hoher Grad an Erfahrung und handwerklichem Geschick vonnöten, um alle die bereits genannten Kriterien bewerten und umsetzen zu können. Besonders die richtige Einschätzung der Richtwirkung kann nur am Bauteil selbst beobachtet werden, da das Ergebnis durch derart viele Variablen beeinflusst wird, dass ein konkrete Vorhersage der Schrumpfmaße nicht möglich ist.

Der größte Vorteil dieses Verfahrens ist wohl, dass es sich schnell und unkompliziert auf jeden Werkstoff und jede Richtaufgabe einstellen lässt, wenn die dazugehörigen Vorschriften

eingehalten werden. Zudem ist die Anlage flexibel zu transportieren und kann ausserdem für diverse andere Fertigungsverfahren, wie dem thermischen Trennen o.ä., eingesetzt werden. Nachteilig für dieses Verfahren ist vor allem die hohe Lärm-, Abgas- und Wärmebeaufschlagung der Umgebung, die mit geeignete Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden muss. Auch der nahezu permanente, nur sporadisch schaltbare Energieverbrauch bei größeren Richtaufgaben stellt einen Nachteil des Verfahrens dar.

Ob alternative Erwärmungsverfahren das Flammrichten im Schienenfahrzeugbau sinnvoll ablösen können, ist jedoch nach dem heutigen Stand der Technik nicht denkbar.

Es wurden bereits zahlreiche Versuche firmenintern sowie durch beauftragte Forschungsinstitute zum induktiven Erwärmen und der Erwärmung mit dem Lichtbogen (WIG, Plasma) und dem Laserstrahl durchgeführt [13].

Mit dem Laserstrahl und dem Plasmabogen sowie dem induktiven Erwärmen wurden Untersuchungen an verworfenen Blechfeldern durchgeführt. Die größten Schwierigkeiten bestanden und bestehen darin, den Fokus des Laserstrahls bzw. den Abstand der Energiequelle den Verwerfungen anzupassen um eine beherrschbare Energieeinbringung zu realisieren. Da auch während der Erwärmung ein dynamischer Verzug der Bauteile erfolgt, ist ein konstanter Abstand zwischen Energiequelle und Blech nur mit erheblichem Aufwand zu kontrollieren. Als Konsequenz kann die Energiequelle nur automatisch mittels Messsensorik gesteuert werden. Weiter Nachteile ergeben sich aus den momentan nicht zuverlässig vorhersagbaren, partiell stark variierenden Eigenspannungszuständen der Bauteile. Durch die mangelnde Flexibilität der Anlagen kann nicht ausreichend auf die daraus resultierenden Maßabweichungen reagiert werden. Ebenfalls wird durch die örtliche Bindung der Anlagen ein vollständiger Ersatz des Flammrichtens nicht möglich sein. Da Richtarbeiten teils in mehreren Fertigungsschritten durchgeführt werden müssen und im Kleinserien- oder Einzelfertigungsbereich der Schienenfahrzeuge stets variieren, ist eine flexible Anwendungsmöglichkeit unverzichtbar.

5 Hintergrund effektiver Wärmebilder

Im folgenden Kapitel sollen die grundlegenden Einflüsse auf die Schrumpfkraftentwicklung von Wärmebildern erläutert werden. In den einschlägigen Literaturquellen zu der Thematik des thermischen Richtens werden vor allem Ratschläge für den richtigen Einsatz von Wärmebildern gegeben. Jedoch sind hierfür nur sehr wenig aussagekräftige und hinterlegte technische Erläuterungen vorhanden. Wobei gerade die technische Mechanik und Thermodynamik sinnvolle Ergänzungen zum Verständnis der Wirkung von Wärmebildern beitragen kann. Für den Verfasser dieser Arbeit sind durch die folgende Betrachtungen die Zusammenhänge und Wirkungsweisen von Wärmebildern deutlicher geworden.

5.1 Art und Ausführung des Wärmebildes

Entscheidend für die effektive Erzeugung von Schrumpfkraften ist die Wärmeeinbringung. Die Wärme muss so in das Bauteil eingebracht werden, dass eine Erhöhung der Wärmzeit durch übermäßigen Wärmeabfluss vermieden wird und dem akut erwärmten Werkstoffbereich die maximal mögliche Steifigkeit entgegengestellt wird. Da der sich ausdehnende Werkstoffbereich im Bauteil Druckkräfte erzeugt und somit Biegemomente um die Schwerachsen entstehen, muss diesen Kräften der maximal mögliche Widerstand entgegengesetzt werden, um die Ausdehnung zu behindern und die höchste Stauchung zu erreichen. In der Fertigung werden oftmals sehr unterschiedliche Wege der Wärmeeinbringung eingesetzt. Dementsprechend variieren die Richtergebnisse stark.

Die Bedingungen für eine effektive Wärmeeinbringung ergeben sich zum einen aus den Flächenträgheitsmomenten. Die Steifigkeit eines Bauteils ergibt sich aus dem Quotienten der Flächenträgheit und des E-Moduls [14]. Da der E-Modul mit der Erwärmung abnimmt, kann nur über die Flächenträgheitsmomente die Steifigkeit des Bauteils längstmöglich erhalten bleiben. Aus den Berechnungen der Flächenträgheitsmomente ergibt sich, dass die Staineranteile bzw. die Flächen mit einem Hebelarm um die neutrale Faser des Profils den größten Widerstand darstellen.

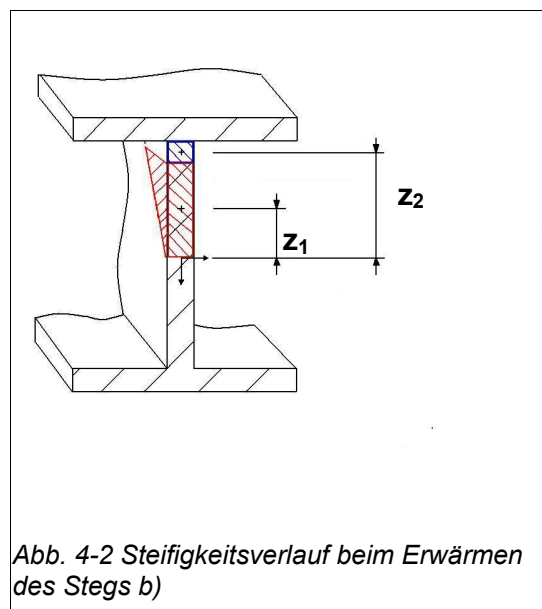
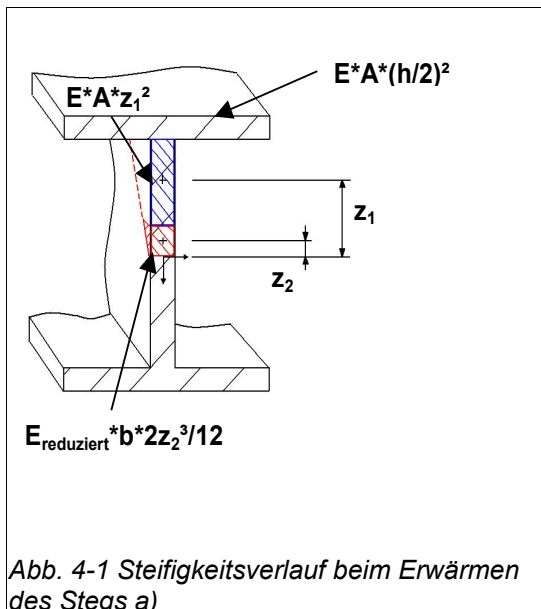
Analog zu der Schweißtechnik wird die Krümmung infolge thermische eingebrachter Schrumpfkraften durch die Steifigkeit $E \cdot I$ bestimmt.

$$\varphi = F_s \cdot e \cdot I_{Sch} / (E \cdot I_x) \quad (5)$$

Wobei $F_s \cdot e$ das durch die Schrumpfkkräfte erzeugte Moment um die neutrale Faser darstellt. Die Steifigkeit von Halbzeugen und Profilen berechnet sich aus den Flächenträgheitsmomenten und dem E-Modul des Werkstoffs.

$$E \cdot I_x = E \cdot t_{\text{Steg}} \cdot h_{\text{Steg}}^3 / 12 + E \cdot 2 \cdot b_{\text{Gurt}} \cdot t_{\text{Gurt}} \cdot (z_i / 2)^2 \quad (6)$$

In Abb. 4-1 a) und b) soll der Vorgang am Beispiel eines I-Profils erläutert werden. Hier wird deutlich, dass mit fortschreitender Erwärmung (roter Bereich) von der neutralen Faser aus der Bereich mit reduziertem E-Modul vergrößert wird, der Staineranteil der verbleibenden Flächenträgheit (blauer Bereich) jedoch stets mit maximalem Hebelarm z_2 wirkt. Eine Erwärmung sollte also stets von der Schwerachse aus erfolgen, um die Hebelarme längst möglich zu erhalten.



5.2 Effektive Wärmebilder

Alle Wärmebilder sind nur dann effektiv, wenn sie auf die richtige Art und Weise in den Werkstoff bzw. das Bauteil gebracht werden. Jede Wärmestelle kann das Risiko einer Beschädigung des Werkstoffs mit sich bringen. Da eine falsche Wärmeeinbringung den Richteffekt wesentlich verringern bzw. umkehren kann, ist es nicht selten der Fall, dass der Richtaufwand erheblich ansteigt, was oftmals zu Maßverkürzungen führt bis der gewünschte Richteffekt erreicht ist. Das Ziel muss also sein, mit möglichst kleinen und wenigen Wärmestellen zu arbeiten.

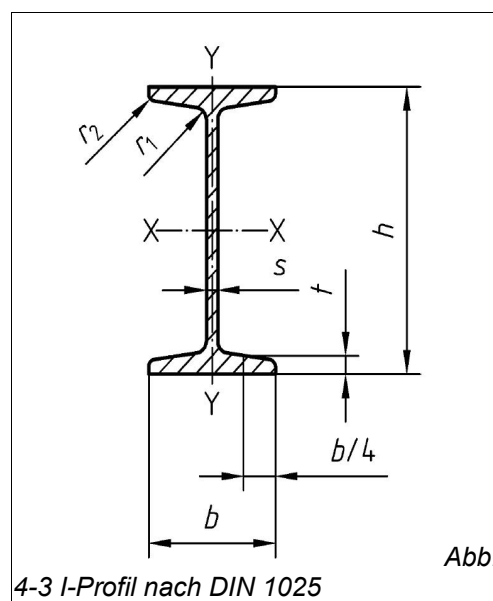
Um das zu erreichen müssen für jede Richtstelle vorab die Eigenspannungszustände, die Steifigkeit und die Dicke des Bauteils, der Werkstoff sowie der gewünschte Richtmechanismus analysiert werden.

Im Schienenfahrzeugbau tauchen zwei typische Richtsituationen auf, die jeweils eigene Behandlungsweisen benötigen.

Das Richten von Profilen und Halbzeugen

Vorab soll unterschieden werden, welcher Mechanismus bei dem Richtvorgang ausgelöst werden soll.

Für eine Stauchung des Profils muss der gesamte Querschnitt möglichst homogen erwärmt werden, um die Einflüsse des Knickens und des Temperaturgradienten in Dickenrichtung möglichst gering zu halten. Die Konsequenz daraus ist, die Steifigkeit des Bauteils beim Erwärmen größtmöglich symmetrisch zu erhalten. Bei Standardprofilen wie U-, I-, T- Profilen ist es entscheidend, die Hauptachsen sowie die Stainer- Anteile zu berücksichtigen, die aus der Geometrie der Profile resultieren (Abb. 4-3). Zusätzlich ist der qualitative Einspannungszustand festzustellen, um Bereiche mit Zugspannungen bestimmen.



Die Gesamtsteifigkeit eines Profils bestimmt sich aus dem Quotienten vom E-Modul E und den Flächenträgheitsmomenten I_x und I_y , wobei sich aus

$$E \cdot I_x = E \cdot t_{\text{Steg}} \cdot h_{\text{Steg}}^3 / 12 + E \cdot 2 \cdot b_{\text{Gurt}} \cdot t_{\text{Gurt}} \cdot (h_{\text{Gurt}} / 2)^2 \quad (7)$$

und

$$E \cdot I_y = E \cdot 2 \cdot t_{\text{Gurt}} \cdot b_{\text{Gurt}}^3 / 12 + E \cdot h_{\text{Steg}} \cdot t_{\text{Steg}}^3 / 12 \quad (8)$$

ergibt, dass die Gurte die größten Widerstandsmomente gegen Biegung erzeugen. Als Konsequenz stellt eine Erwärmung des Stegs die größte Stauchung und somit die größten Schrumpfkraften ohne Biegung in x- oder y- Richtung dar.

Wird der Steg erwärmt, d.h. der E-Modul im Steg wird stark reduziert, verringert sich die Steifigkeit des Profils auf

$$E \cdot I_x = E_{\text{reduziert}} \cdot t_{\text{Steg}} \cdot h_{\text{Steg}}^3 / 12 + E \cdot b_{\text{Gurt}} \cdot t_{\text{Gurt}} \cdot (h/2)^2 \quad (9)$$

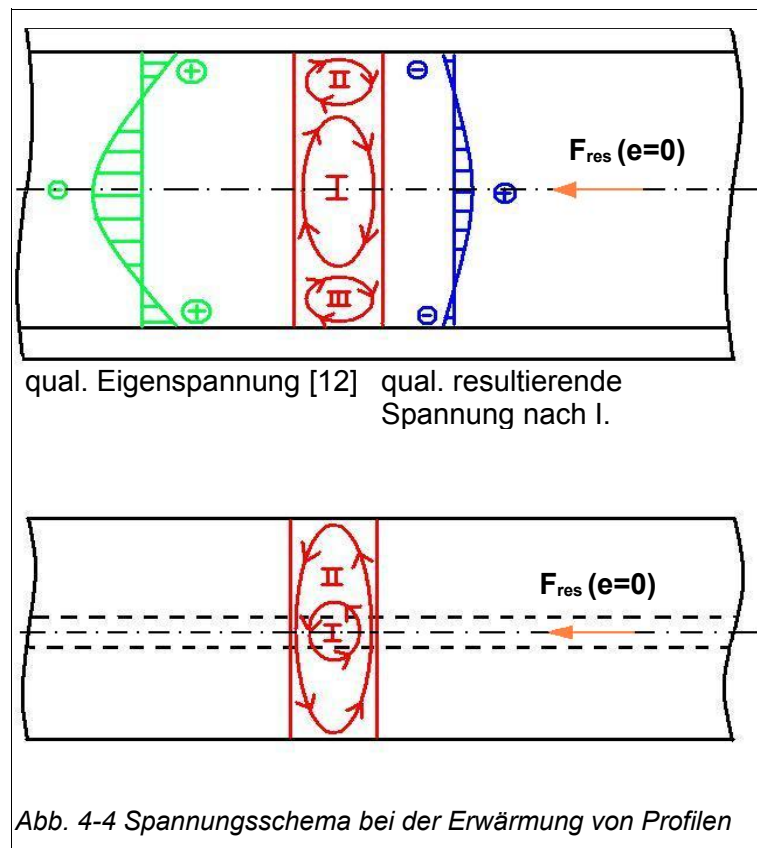
stellt aber immer noch eine erhöhte Steifigkeit dar, als bei einer Erwärmung der Gurte:

$$E \cdot I_x = E \cdot t_{\text{Steg}} \cdot h_{\text{Steg}}^3 / 12 + E_{\text{reduziert}} \cdot b_{\text{Gurt}} \cdot t_{\text{Gurt}} \cdot (h/2)^2 \quad (10)$$

Sowohl geschweißte, als auch gewalzte Profile weisen einen typischen Eigenspannungsverlauf [12, 21] auf. Im Bereich der Kehlen kommt es durch die Abkühlung der erhöhten Materialansammlung bei der Herstellung der gewalzten Profile zur Ausbildung von Zugspannungen, ebenso bei geschweißten Profilen. Resultierend müssen diese Zugspannungen durch Druckkräfte im Steg sowie in den Flanken der Gurte ausgeglichen werden. Um effektiv Schrumpfkraften erzeugen zu können, müssen die Wärmestellen möglichst in Bereichen von Druckspannungen bzw. der geringsten Zugspannungen erzeugt werden. Ein anfängliches Erwärmen im Kehlenbereich muss vermieden werden. Nicht nur aufgrund der hohen Zugspannungen, sondern auch der durch die größere Materialansammlung erhöhte Wärmebedarf verringern den Richteffekt signifikant.

Wird zunächst der Steg symmetrisch auf etwa 2/3 seiner Höhe erwärmt und abgekühlt, treten -durch die Druckspannung unterstütz- verstärkte Schrumpfkraften auf, welche die Zugspannungen im Kehlenbereich verringern bzw. so weit überlagern können, dass auch hier Druckspannungen auftreten. Werden dann die Kehlen erwärmt, stellt sich somit ein gleichmäßigerer Schrumpfkraftverlauf über den Steg ein, als es im einstufig erwärmten Steg der Fall wäre (Abb. 4-4).

Um der von vorne herein geringen Steifigkeit bei y-Biegung und des unterschiedlichen Wärmeabflusses gerecht zu werden, sollte der Steg symmetrisch vom Kehlenbereich erwärmt werden.



Für einen Einsatz des Knickmechanismus muss das Profil über den Querschnitt unsymmetrisch erwärmt werden. Besonders bei diesem Mechanismus muss berücksichtigt werden, dass es je nach Wärmefigur zusätzlich zur Auslösung des Stauchmechanismus und somit zu einer Verkürzung des Bauteils kommen kann.

Die erzeugte Spannung ergibt sich aus der Stauchung des erwärmten Bereichs beim Abkühlen. Da die Schrumpfspannung über die Keilform linear zunimmt, lässt sich folgender Zusammenhang bestimmen:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \Delta L / L \cdot E \quad (11)$$

Für das verfügbare Moment gegen die Ausdehnung ergibt sich

$$M = \sigma \cdot I_x / z \quad (12)$$

Auch bei diesen Profilen gilt wieder, die Steifigkeit der Gurte größtmöglich zu erhalten, was nur durch eine von der Keilspitze ausgehende Erwärmung möglich ist.

Entscheiden für den einsetzenden Mechanismus ist die Lage des Wärmekeils. Ein vollständig durchgewärmter Keil reduziert nicht nur die Steifigkeit des Bauteils nach (9).

Er verschiebt zudem die Lage der resultierenden Schrupfkkräfte näher an die neutrale Faser des Profils. Der verkürzte Hebelarm e verringert das Moment der Schrupfkkräfte um die neutrale Faser und erhöht die axialen Zugkräfte. Eine verstärkte Verkürzung über den gesamten Querschnitt und eine Winkelschrumpfung ist das Resultat.

Für einen gezielten Winkelverzug mit minimierter Längsschrumpfung muss der Wärmekeil auf die neutrale Faser begrenzt werden.

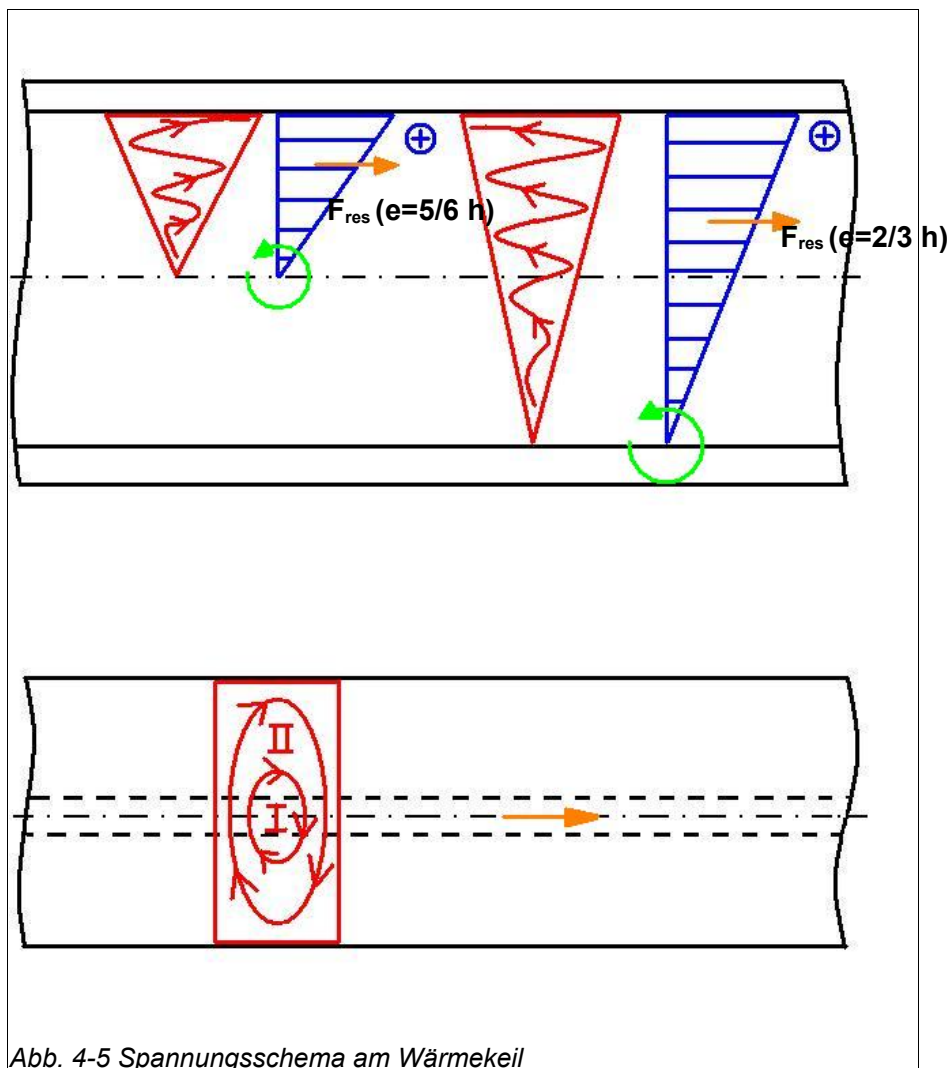


Abb. 4-5 Spannungsschema am Wärmekeil

Über den Öffnungswinkel kann der Winkelverzug bzw. die gestauchte Länge beeinflusst werden. Allerdings wird durch die mechanischen Vorgänge deutlich, dass mehrere kleine Wärmekeile weniger großen vorzuziehen sind, was sich auch auf die Wärmeleitung positiv auswirkt. Da ein übermäßiger Wärmestrom in das umgebende Material beim Erwärmen vermieden werden muss, wird durch kleinere Wärmebilder die Erwärmungszeit verringert und der zeitabhängige Wärmestrom wird reduziert. Die Abhängigkeit des Wärmestroms von

den isothermen Querschnittsflächen unterstützt zudem eine Erwärmung von der Keilspitze bzw. von der kleinsten Fläche aus. In Abb. 4-6 und 4-7 wird der Wärmestrom [8] im Werkstoff erläutert. Vernachlässigt werden dabei die Verluste der konvektiven und strahlenden Wärmeströme in die Umgebung, da diese nur, laut [27, BEFA], ca. 10-15% der Wärmeströme bedeuten und kaum Einfluss auf die erzeugten Schrumpfkkräfte haben.

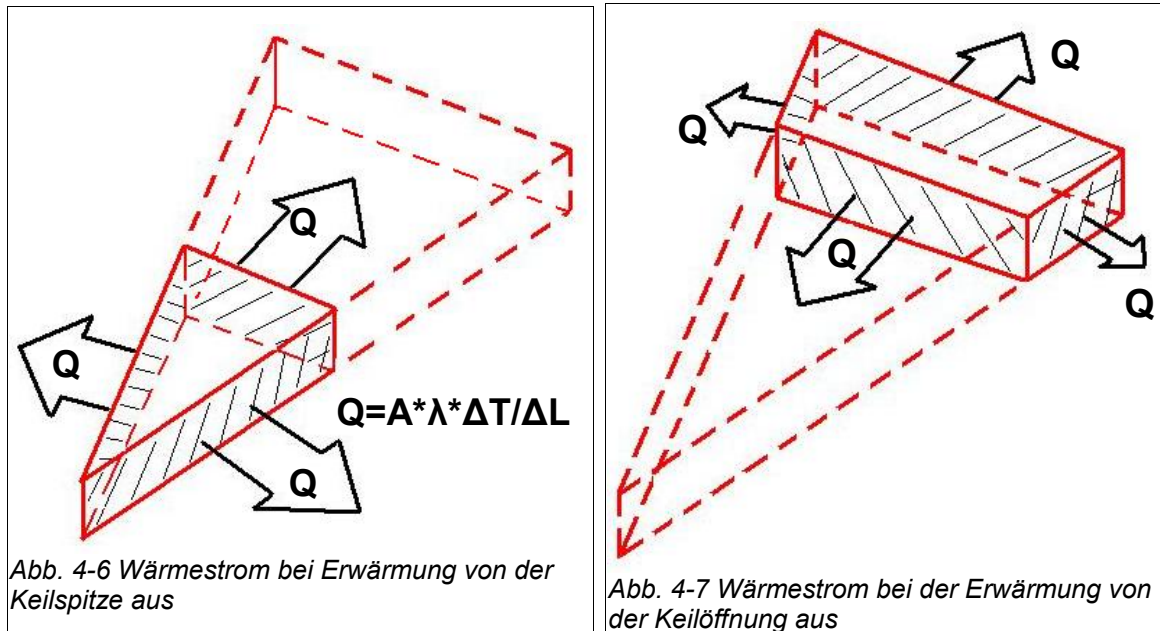


Bild 4-6 zeigt, wie sich der Wärmestrom bei der Erwärmung von der Keilspitze aus im Werkstoff verteilt. Die Wärme wird in das umgebende Material abgegeben. Allerdings hat in diesen Bereich bereits die benötigte Stauchung stattgefunden, so dass kaum Schrumpfkraftverluste auftreten. Der Wärmestrom zur Öffnung des Keils geht effektiv in die weitere Erwärmung mit ein.

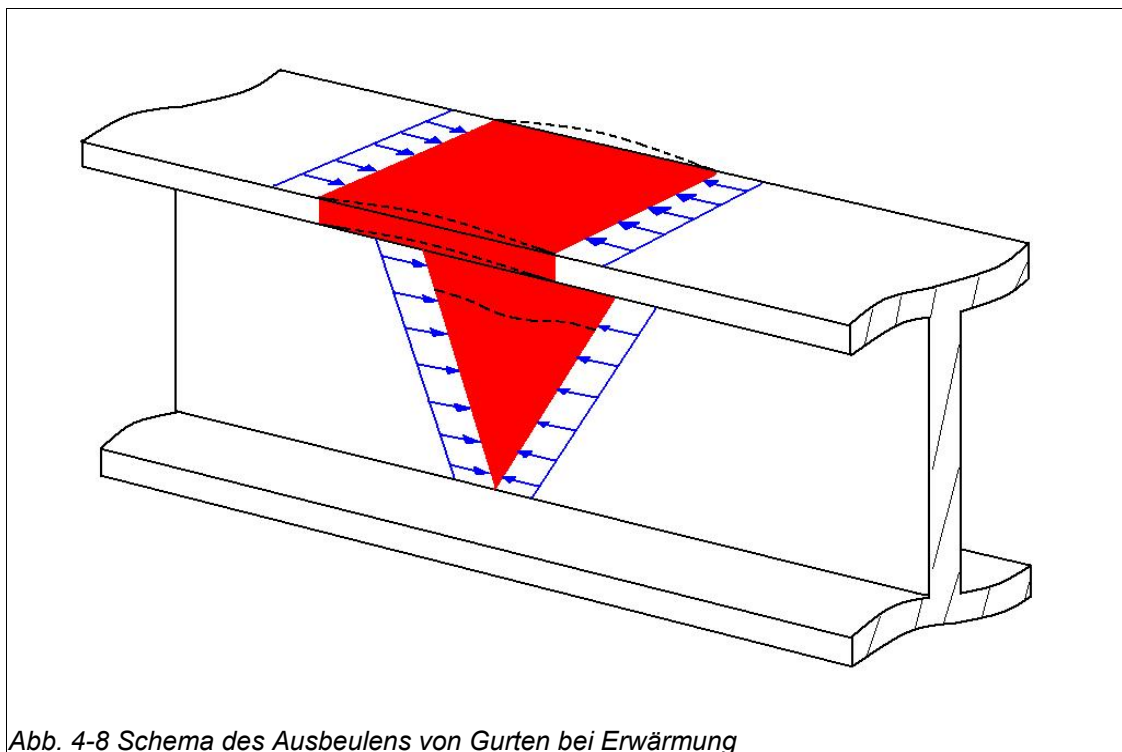
Bild 4-7 zeigt die Wärmeverteilung bei der Erwärmung von der Öffnung des Keils aus. Hier wird ein Großteil der Wärme in das noch zu erwärmende Material und in seine direkte Umgebung abgegeben. Die Steifigkeit der Umgebung nimmt ab und resultiert in einer verringerten Stauchung.

Zusätzlich wird durch die Erwärmung die Beulsteifigkeit der Profile reduziert. Angenähert ergibt sich für Gurte eine kritische Beulspannung [44] von

$$\sigma_{\text{krit}} = 4 * E * \pi^2 / (12 * (1 - \nu^2)) * (t_G / b)^2 \quad (13)$$

Durch die Erwärmung wird E- Modul reduziert und die kritische Beulspannung verringert. Ein Überschreiten der kritischen Spannung ist bei den hohen Richttemperaturen kaum zu vermeiden, muss aber berücksichtigt werden, insbesondere wenn durch externe

Dehnungsbehinderungen zusätzliche Spannungen erzeugt werden. Die Zusammenhänge aus (11) und (13) zeigen, dass eine Änderung des Öffnungswinkels keinen Einfluss auf die Beulspannung hat und lediglich über die Dicke bzw. über die Breite des Gurtes bestimmt wird. Jedoch geht die Länge des erwärmten Gurtes direkt in die Beulüberhöhung mit ein und bestimmt so den Grad der Ausbeulung. Eine genaue Berechnung ist für den Einsatz in der Praxis nur schwer möglich. Allerdings muss die Konsequenz aus dem Einfluss der Gurtlänge sein, dass gerade mit zunehmend dünnwandigen Profilen der Öffnungswinkel begrenzt werden muss, um die erwärmte Länge zu minimieren. Auch hieraus ergibt sich wieder der Grundsatz, Richtstellen in mehrere kleine Wärmebilder zu unterteilen, falls eine erhöhte Schrumpfkraft erzeugt werden soll.



Es muss sich zudem durch die Schrumpfkraft ein hoher Druckspannungszustand im Bereich der Keilspitze einstellen, der zu einem Verwerfen des Steges führen kann. Es liegen jedoch leider keine aufgezeichneten Erfahrungswerte zu dieser Ausbildung vor, und es kann mit den in dieser Arbeit gegebenen Mitteln leider nicht hinreichend untersucht werden..

5.3 Position der Wärmebilder

Zu den herstellungsbedingten Eigenspannungen und den erzeugten Spannungen durch Wärmebilder müssen die schweißbedingten Spannungen berücksichtigt werden.

Durch die vorangegangenen Schweißarbeiten werden sehr hohe Spannungen im Werkstoff erzeugt, die das Stauchen des Werkstoffs bei Erwärmung erheblich beeinflussen können. Wärmebilder müssen also so gesetzt werden, dass ein Erwärmen im Bereich von Zugspannungen vermieden wird, oder zumindest minimalst zugbeanspruchte Bereiche erreichen können. Vorteilhaft sind die sich wiederholenden Spannungsverteilungen an Schweißprofilen. Diese können qualitativ bestimmt und vor dem Einsatz der Richtarbeiten eingeplant werden, wie bereits vorab erläutert wurden.

6 Untersuchungen zum Richten von Verwerfungen

Im folgenden Versuch sollen einige Untersuchungen hinsichtlich eines effektiven Arbeitseinsatzes beim Richten von Beblechungen gemacht werden. In der Literatur gibt es nur spärliche Angaben zu dieser Thematik und auch unter den Praktikern herrschen eine Vielzahl an unterschiedlichen Ansichten für eine richtige Handhabung. Oftmals ist gerade deshalb das Ergebnis, dass ein Blech übermäßig wärmebehandelt wird und es sehr fragwürdig ist, ob der Grundwerkstoff noch angemessene Gütewerte erreichen kann. So variieren die Punktgrößen, die Bereiche, an denen die Punkte gesetzt werden und die Abkühlbedingungen.

6.1 Versuchsaufbau

6.1.1 Messmittel

Für die Temperaturmessung wurde das Thermometer 925 der Firma *testo* verwendet.

Für die Erfassung der Temperatur wurden zwei Thermoelemente verwendet.

Zum einen von der Firma *testo*. Der Fühler 0602 0393 hat einen Messbereich bis +300°C und eine Reaktionszeit von 2 s. Er wurde für die Messung der Umgebungstemperatur am Blech verwendet.

Zum anderen ein Thermoelement der Firma *B + B*. Der Fühler hat einen Messbereich von -200°C bis +1100°C und eine Reaktionszeit von 0,9 s. Er wurde für die Temperaturmessung der Wärmepunkte verwendet.

Die Messungen der Maßänderungen wurden mit einer Messuhr bei Raumtemperatur durchgeführt.

Für die Zeitaufnahme wurde eine Stoppuhr verwendet.

6.1.2 Vorbereitung

Um reproduzierbar die Einflüsse der Richtparameter ermitteln und auswerten zu können, wurde folgender Versuchsaufbau entworfen.

Zunächst mussten Rohlinge erzeugt werden, die stets den gleichen Spannungszustand und somit ein gleiches Verformungsbild aufweisen. Außerdem sollten diese Rohlinge einen praxisnahen Vergleich ermöglichen. Um zudem noch eine zumindest vergleichbare Aussage über den Eigenspannungszustand nach der thermischen Behandlung machen zu können, sollten die Rohlinge entspannbar sein.

So hat sich zunächst ein Rohling ergeben, der eine Aussage über die Einflüsse eines einzelnen Wärmepunktes ermöglicht (Abb. 5-1).

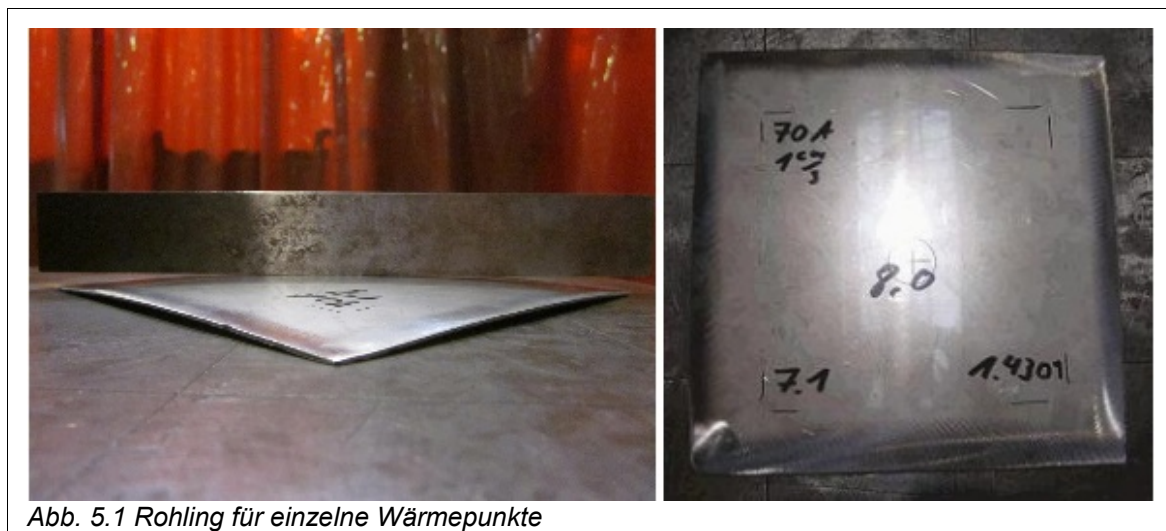


Abb. 5.1 Rohling für einzelne Wärmepunkte

Dabei handelt es sich um 200x200x2,5 mm Bleche aus dem korrosionsbeständigen Stahl 1.4301. Durch die Lieferart *lösungsgeglüht und abgeschreckt* ist das Blech kaum von Eigenspannungen behaftet und weist ein größtenteils quasiisotropes Verformungsverhalten auf. Um eine einstellbare und reproduzierbare Verformung zu realisieren, ist das Blech umlaufend mit einem WIG-Schweißgerät erwärmt worden. Über die Schweißgeschwindigkeit und den eingestellten Schweißstrom konnte so ein geregeltes Verformen der Bleche in einem Toleranzbereich von 0,2 mm eingestellt werden. Die größten Abweichungen wurden durch das anschließende Beschleifen der erwärmten Bereiche erzeugt, die eine nachträgliche ungenaue Wärmeeinbringung bedeuteten.

Um gleiche Einspannbedingungen darzustellen, wurde ein Rahmen gebaut, der zur Praxis vergleichbare Spannungen erzeugt (Abb.). Dieser besteht aus einem Grundrahmen aus einem 80x40x4 mm Vierkantprofil aus S235J2 und einem Spannrahmen aus geschweißten Winkelprofilen mit den Abmaßen 15x30x4 mm (Abb.). Er wurde sehr steif dimensioniert und

sorgfältig gemessen, um eine plane Auflagefläche zu realisieren. Die verworfenen Rohlinge wurde zwischen dem Grundrahmen und dem Spannrahmen ausgerichtet und verschraubt. Im eingespannten Zustand wurden nun die Wärmepunkte gesetzt.

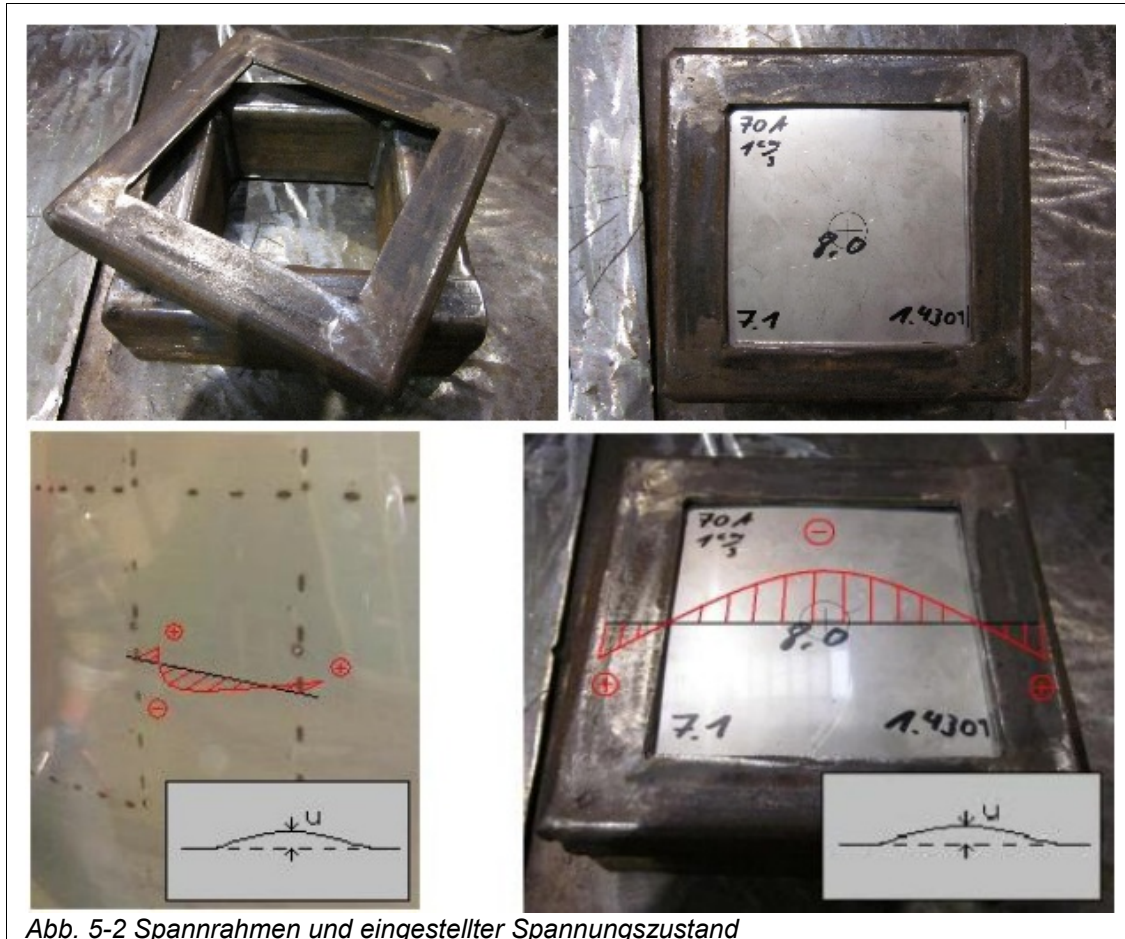


Abb. 5-2 Spannrahmen und eingestellter Spannungszustand

6.2 Versuchsabläufe

Versuchsablauf 1

Im ersten Durchlauf sollte zunächst die Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Folgende Randbedingungen wurden gesetzt:

Autogenbrenner Größe 2 (Empfehlung der Literatur: [1,2,36])

- Flammeinstellung leicht O₂- überschüssig
- Brennerhaltung mit Abstandshalter, Flammkegel aufgesetzt

- Betriebsdrücke: O2 - 4,5 bar (Ringleitung)
- Acetylen - 0,7 bar (Ringleitung)

Wärmepunkte mit 8 / 13 / 25 / 35 / 40 mm Durchmesser

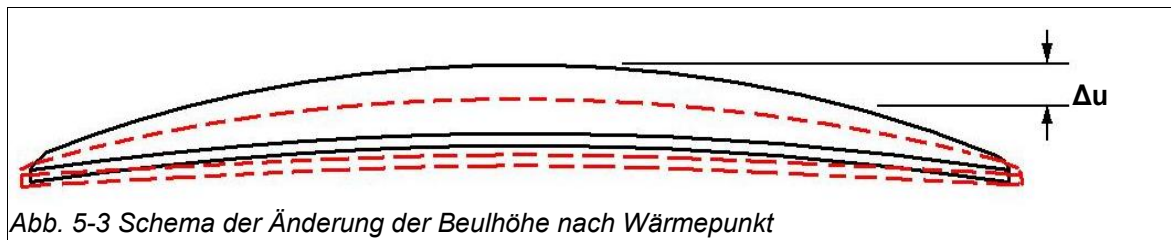
- je drei Proben pro Durchmesser für statistische Sicherheit

Richttemperatur ~880°C im Zentrum des Wärmepunktes

- entspricht einer Erwärmungszeit von 2 s bei 13mm Durchmesser / 4 s bei 25mm / 7 s bei 35mm / 9 s bei 40mm

Abkühlung an ruhiger Luft

Die Bleche wurden zunächst auf eine Beulhöhe von 5 mm eingestellt und gemessen (Abb. 5-3). Im eingespannten Zustand wurden nun die Wärmepunkte gesetzt. Während der Erwärmung und Abkühlung wurden zudem die Temperaturverläufe auf der Rückseite des Zentrums vom Wärmepunkt gemessen. Die Wärmebehandlung der Proben erfolgte im voll eingespannten Zustand. Nachdem die Bleche wieder Raumtemperatur erreichten, wurden sie ausgespannt und die Änderung der Beulhöhe Δu vermessen (Abb.).



Um die entstehenden Auswölbungen der Wärmepunkte nicht in das Messergebnis der Beulhöhe einzubringen, wurden die Messpunkte vor und nach der Erwärmung außerhalb des Einflussbereiches der Auswölbungen gesetzt.

Auswertung

Für die Temperaturverläufe zeigte sich zunächst folgendes Bild (Abb.).

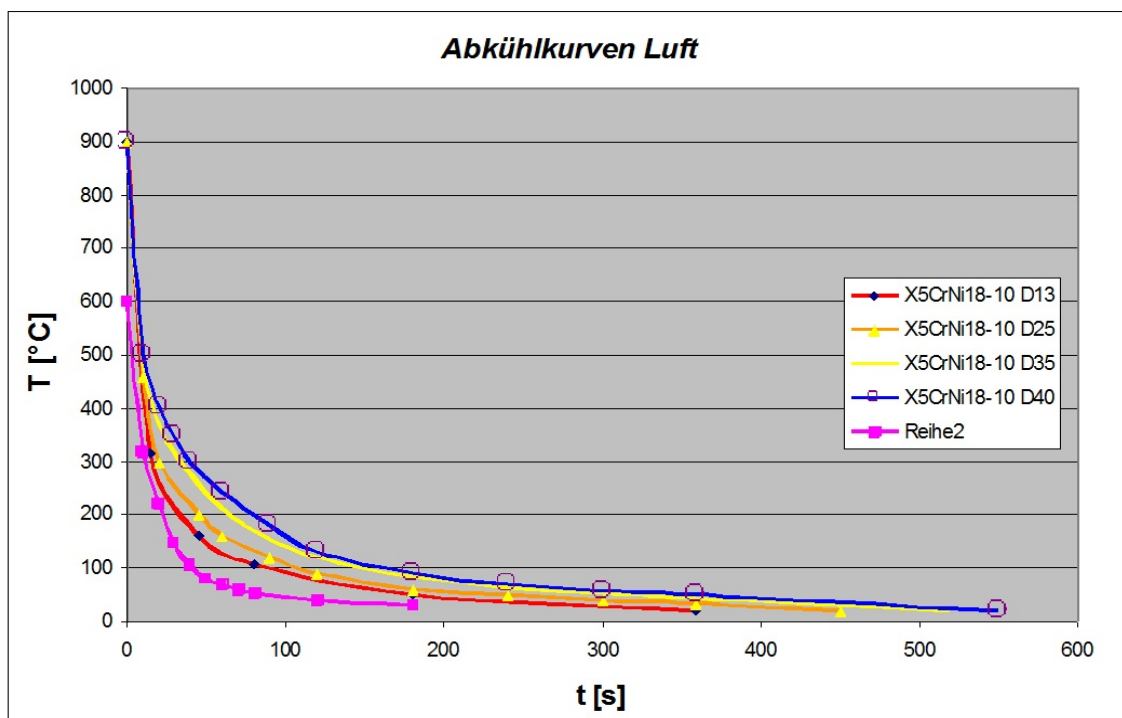


Abb. 5-4 Abkühlkurven 1.4301 an Luft

Wie zu erwarten war, steigen mit zunehmendem Durchmesser die Abkühlzeiten deutlich an. Aufgrund der hohen Temperaturgradienten direkt nach der Erwärmung ist in den ersten Sekunden eine schnelle Wärmeabfuhr bei allen Durchmessern zu beobachten. Aufgrund des zunehmenden Wärmestaus reduziert sich die Abkühlzeit mit zunehmend kleineren Temperaturgradienten über die Oberfläche.

Für die Änderung der Beulhöhe Δu (Tab. 8) ergeben sich sehr gleichmäßige Verläufe bei den verschiedenen Durchmessern.

Probennummer\Durchmesser	8mm	13mm	25mm	35mm	40mm
1	0,6	0,9	1,6	1,8	1,9
2	0,5	1,0	1,6	1,7	1,9
3	0,5	0,9	1,6	1,8	1,9
Mittelwerte der Änderung der Beulüberhöhung Δu	0,53	0,93	1,6	1,76	1,9

Tab. 8 Messergebnisse Luft

Hier ergeben sich maximale Abweichungen von 0,1 mm, die hauptsächlich auf die Handhabungsungenauigkeiten des Brenners zurückzuführen sein dürften.

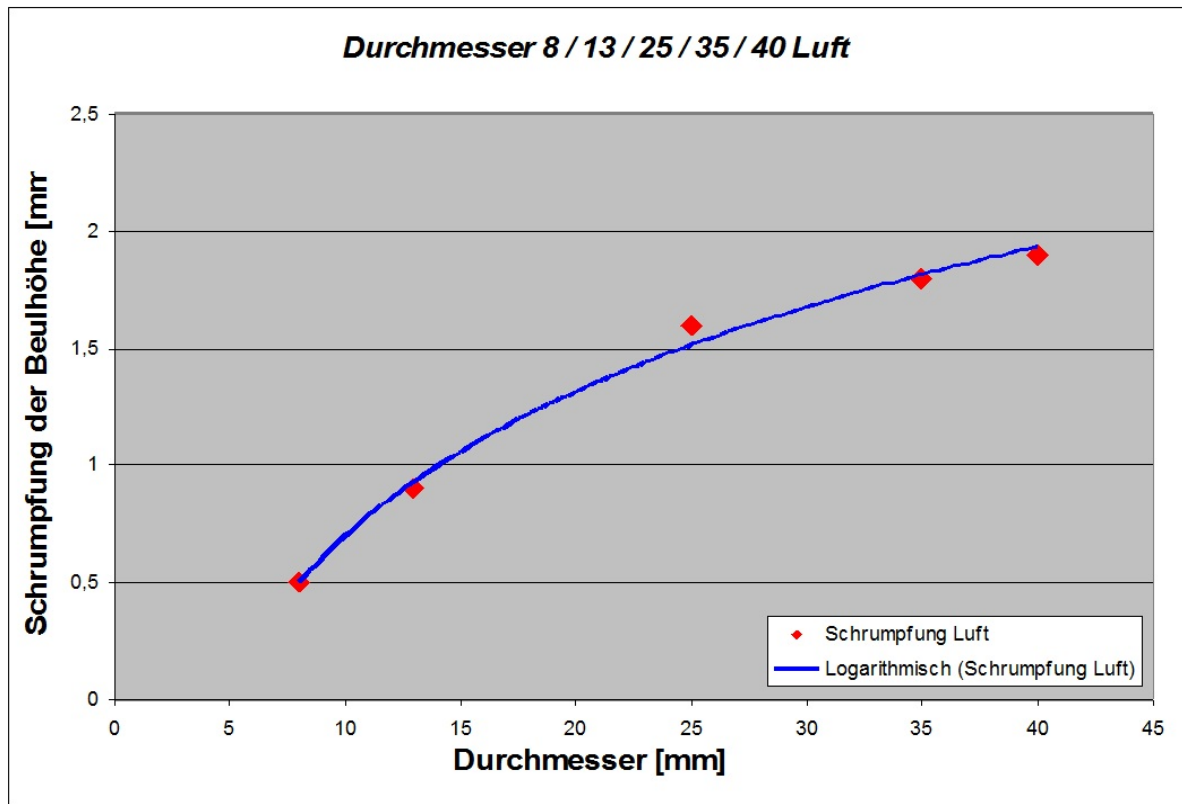


Abb. 5-5 Schrumpfungen der Beulhöhe 1.4301 an Luft

Aus den Mittelwerten der Schrumpfungen der Beulhöhe ergibt sich über die Wärmepunktgrößen folgender Verlauf (Abb. 5-5). Interessant ist hier die eindeutig degressive Tendenz der Schrumpfkkräfte mit steigendem Durchmesser.

Die sehr gleichmäßigen und reproduzierbaren Ergebnisse bestätigen den Versuchsaufbau.

Versuchsablauf 2

Im zweiten Durchlauf sollte der Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit untersucht werden.

Die Geräte und Einstellungen entsprechen Versuch 1. Angepasst werden nur die Abkühlgeschwindigkeiten durch

- Druckluft 2 bar
- Druckluft 8 bar
- CO₂- Schnee aufgelegt

Die Wärmepunkte wurden unmittelbar nach der Erwärmung vom Außendurchmesser aus abgekühlt und ebenfalls von der Rückseite die Abkühlgeschwindigkeit des Kerns gemessen.

Auswertung

Für die Abkühlgeschwindigkeiten der Wärmepunkte ergaben sich folgende Kurven.

Abkühlkurve D13

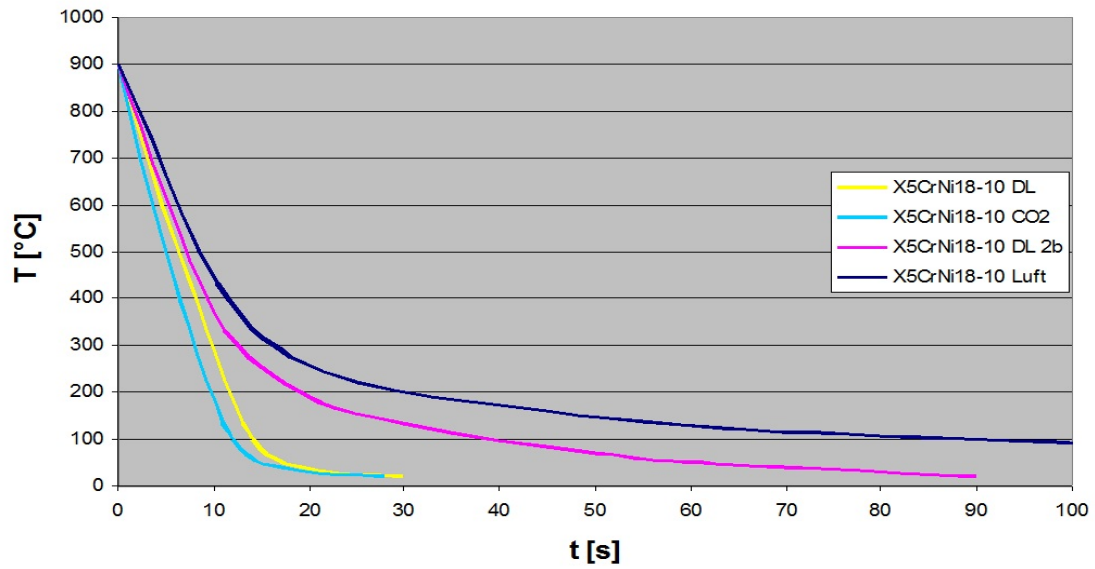


Abb. 5-6 Abkühlkurve D13 Luft

Abkühlkurve D25

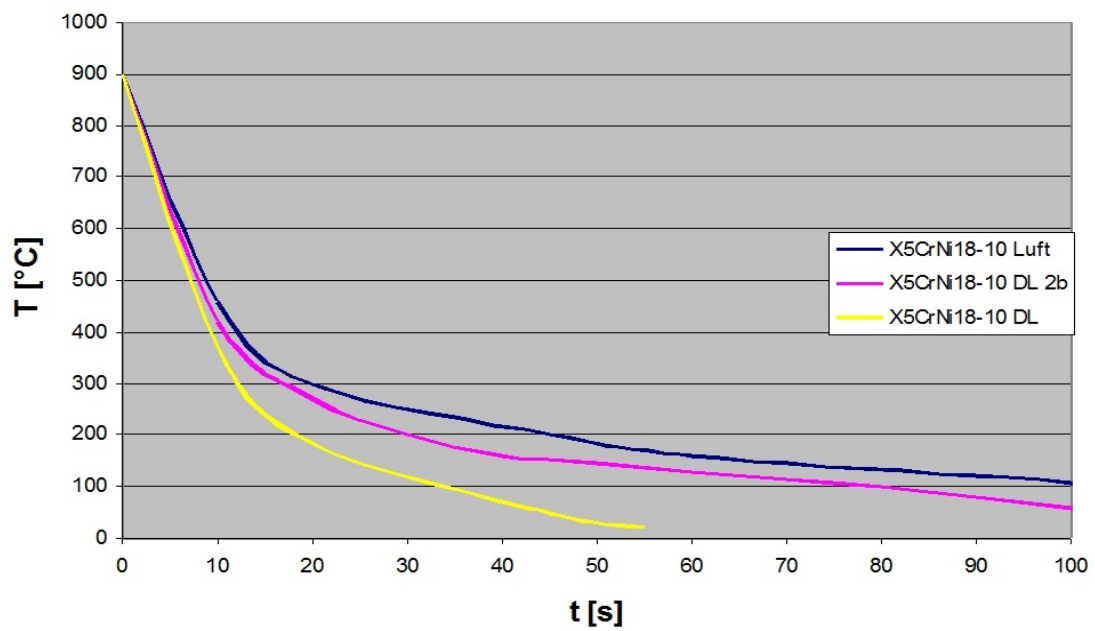


Abb. 5-7 Abkühlkurve D25 Luft

Abkühlkurve D35

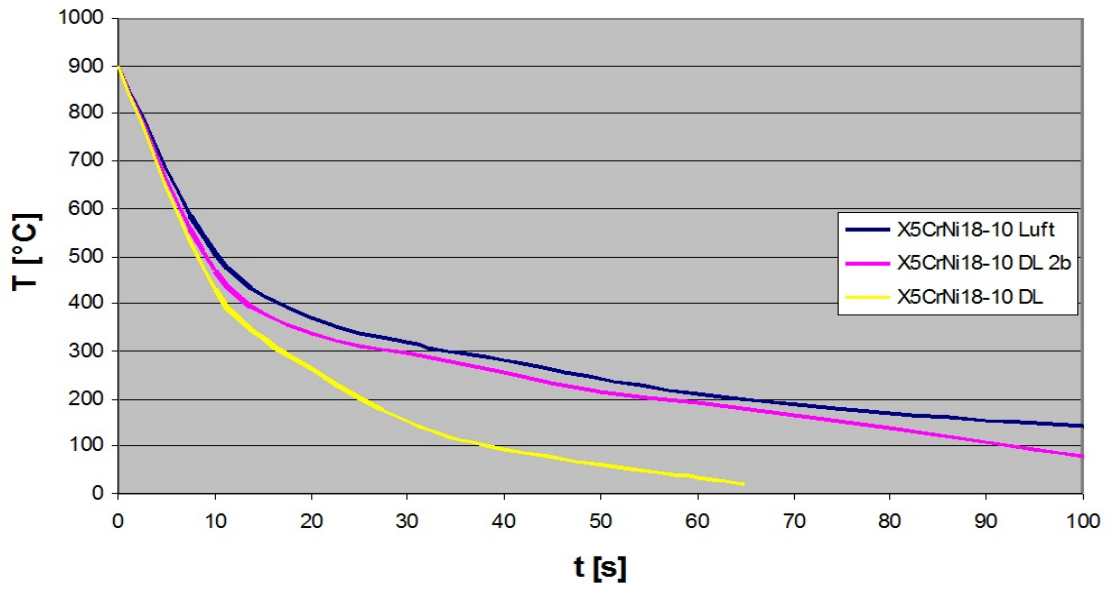


Abb. 5-8 Abkühlkurve D35 Luft

Abkühlkurve D40

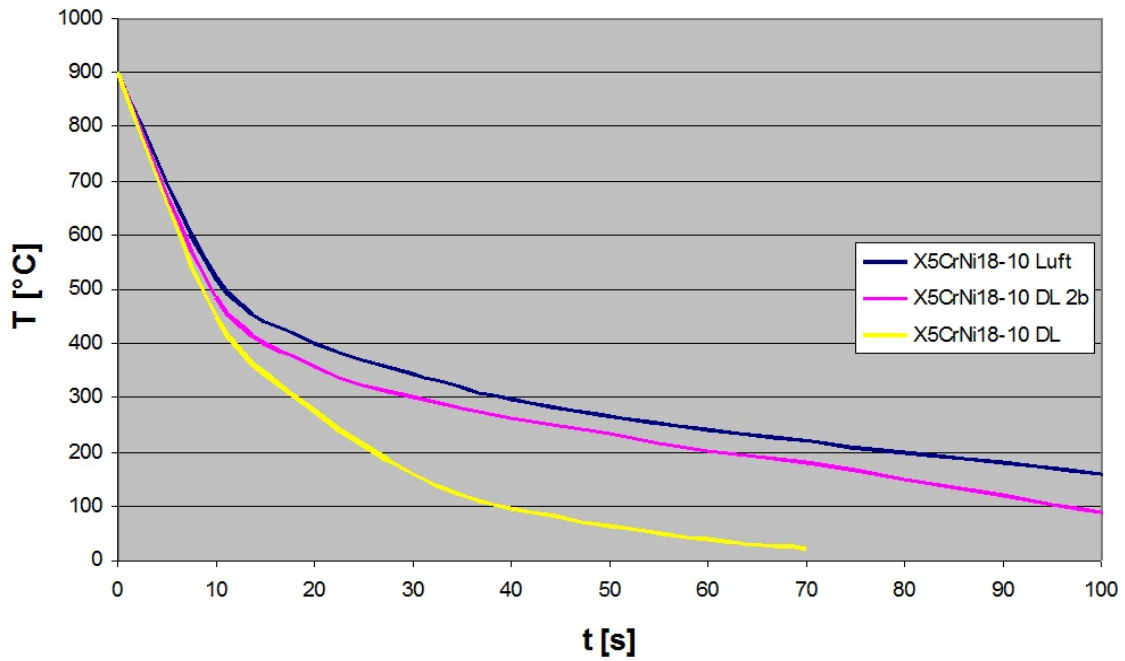


Abb. 5-9 Abkühlkurve D40 Luft

Für die Schrumpfmaße ergaben sich folgende Messergebnisse.

Probennummer/Durchmesser					
Luft 8bar	8mm	13mm	25mm	35mm	40mm
1	0,2	0,5	1,0	1,4	1,7
2	0,3	0,5	1,0	1,3	1,7
3	0,2	0,5	1,0	1,4	1,8
Mittelwerte der Änderung der Beulüberhöhung Δu	0,23	0,5	1,0	1,36	1,73

Tab. 9 Messergebnisse 1.4301 Druckluft 2 bar

Probennummer/Durchmesser					
Luft 2bar	8mm	13mm	25mm	35mm	40mm
1	0,3	0,7	1,1	1,5	1,7
2	0,3	0,6	1,1	1,5	1,8
3	0,4	0,7	1,1	1,4	1,7
Mittelwerte der Änderung der Beulüberhöhung Δu	0,33	0,66	1,1	1,46	1,73

Tab. 10 Messergebnisse 1.4301 Druckluft 2 bar

Auch hier ergaben sich leichte Schwankungen um bis zu 0,1 mm. Für eine qualitative Aussage über die Einflüsse der Abkühlgeschwindigkeit können die Ergebnisse aber herangezogen werden. Aufgrund der nur geringfügig erhöhten Abkühlgeschwindigkeit und den nur geringen Abweichungen der Beulhöhenänderung mit aufgelegtem CO₂- Schnee im Vergleich zur Druckluftabkühlung bei 8 bar, wurden die Versuche mit CO₂- Schnee verworfen.

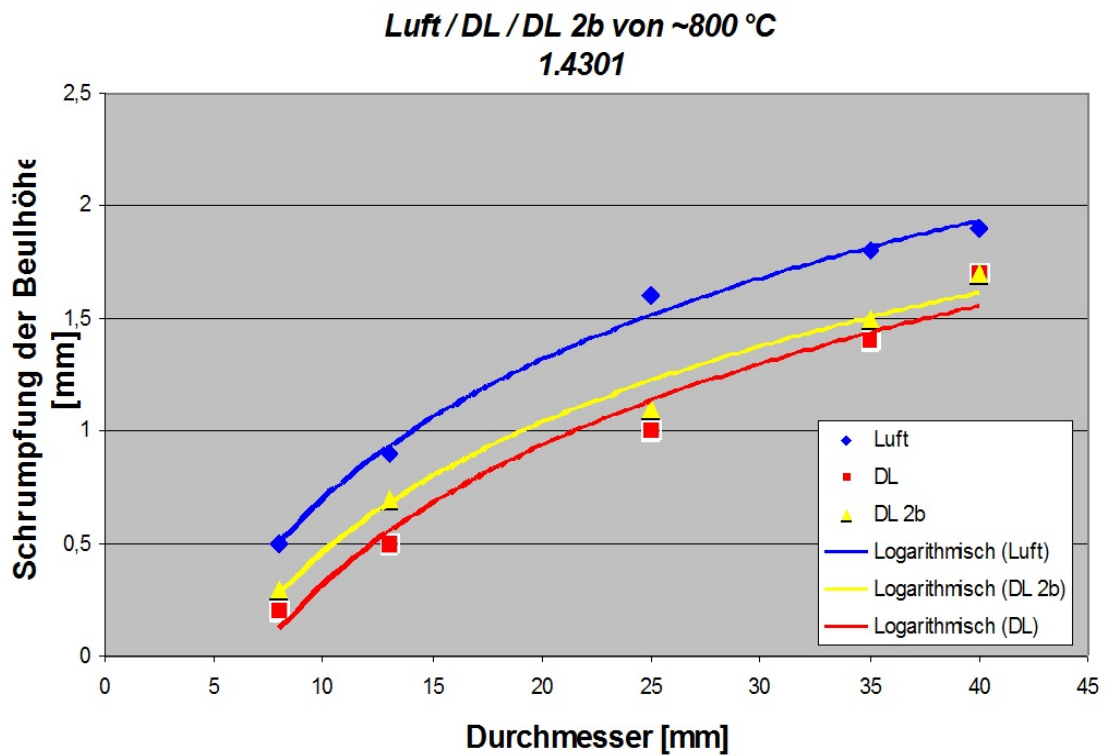


Abb. 5-10 Schrumpfungen der Beulhöhen bei verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten

In der Gegenüberstellung der Ergebnisse bei drei unterschiedlichen Abkühlmedien wird deren Einfluss deutlich erkennbar. Gerade bei kleineren Durchmessern mit der höchsten Abkühlgeschwindigkeit konnten Schrumpfkraftverluste von bis zu 45% beobachtet werden. Da im Bereich der größeren Durchmesser mit den selben Abkühlmitteln eine verringerte Abkühlgeschwindigkeit eingestellt wurde, war hier ein geringer Schrumpfkraftverlust von etwa 17% zu erkennen. Hieraus ergibt sich ein proportionaler Anstieg des Schrumpfkraftverlustes mit steigender Abkühlgeschwindigkeit.

Überhöhungen 1.4301

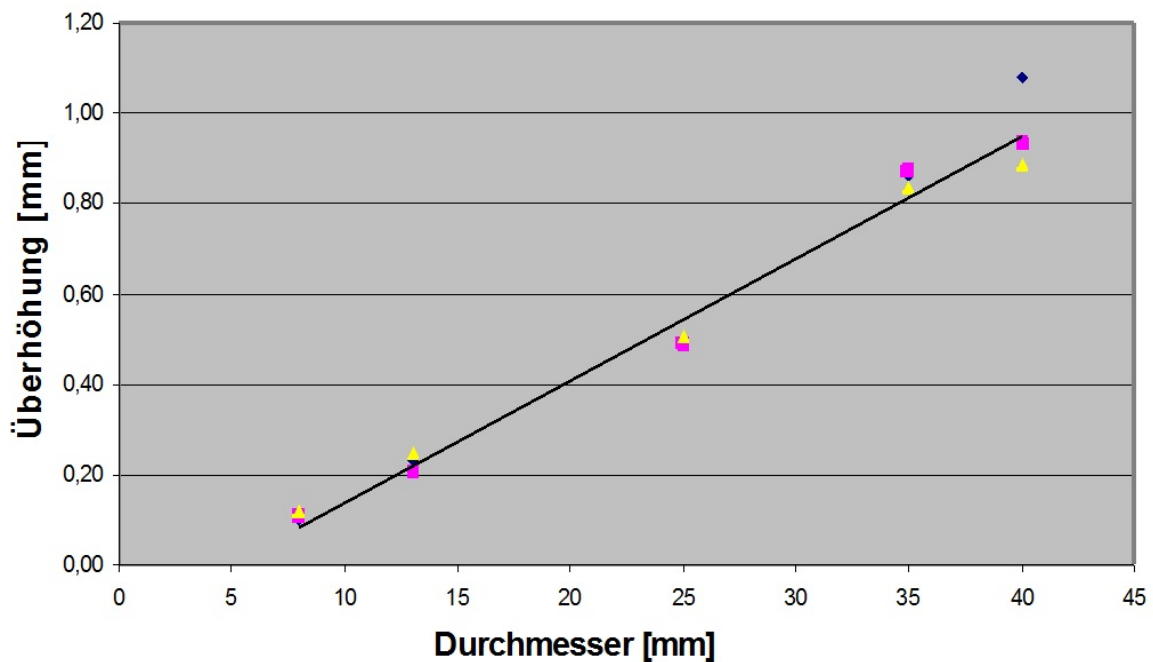


Abb. 5-11 Überhöhungen 1.4301

Aus den Messungen der Überhöhungen der Wärmepunkte wird deutlich, wie gravierend der Einfluss der Punktgrößen darauf ist. Mit steigendem Durchmesser nimmt die Überhöhung konstant zu.

Versuchsablauf 3

Im dritten Versuchsablauf wurde ein weiterer Werkstoff untersucht, um neben dem austenitischen Stahl 1.4301 einen Vergleich zu umwandlungsfähigen Stähle zu erreichen. Verwendet wurde dafür der ferritische Chromstahl 1.4003, der ebenfalls in der Fertigung zum Einsatz kommt.

Der Versuchsablauf ist identisch zu den vorangegangenen Versuchen.

Auswertung

Abkühlkurven 1.4003 Luft

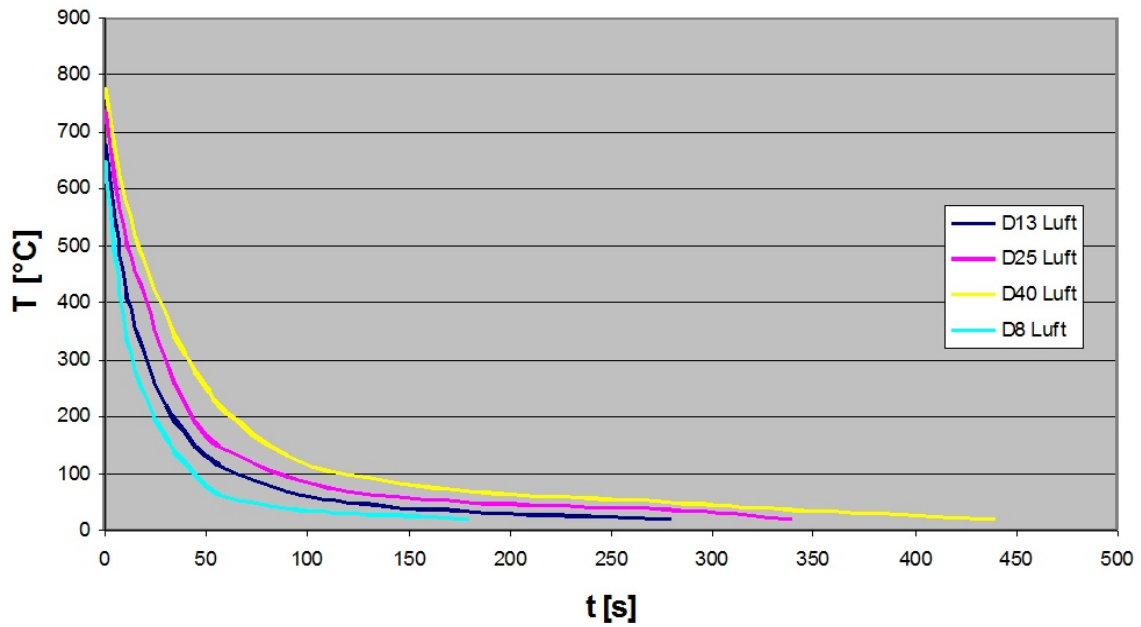


Abb. 5-12 Abkühlkurven 1.4003 Luft

Abkühlkurven 1.4003 DL 2b

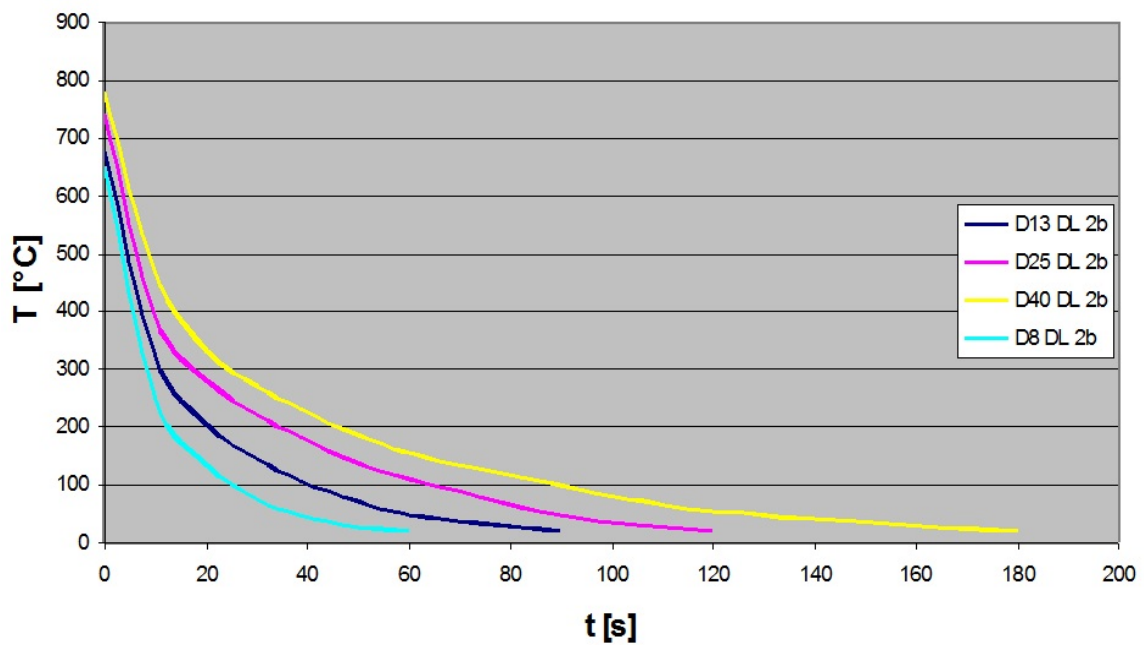


Abb. 5-13 Abkühlkurven 1.4003 Druckluft 2 bar

Abkühlkurven 1.4003 DL

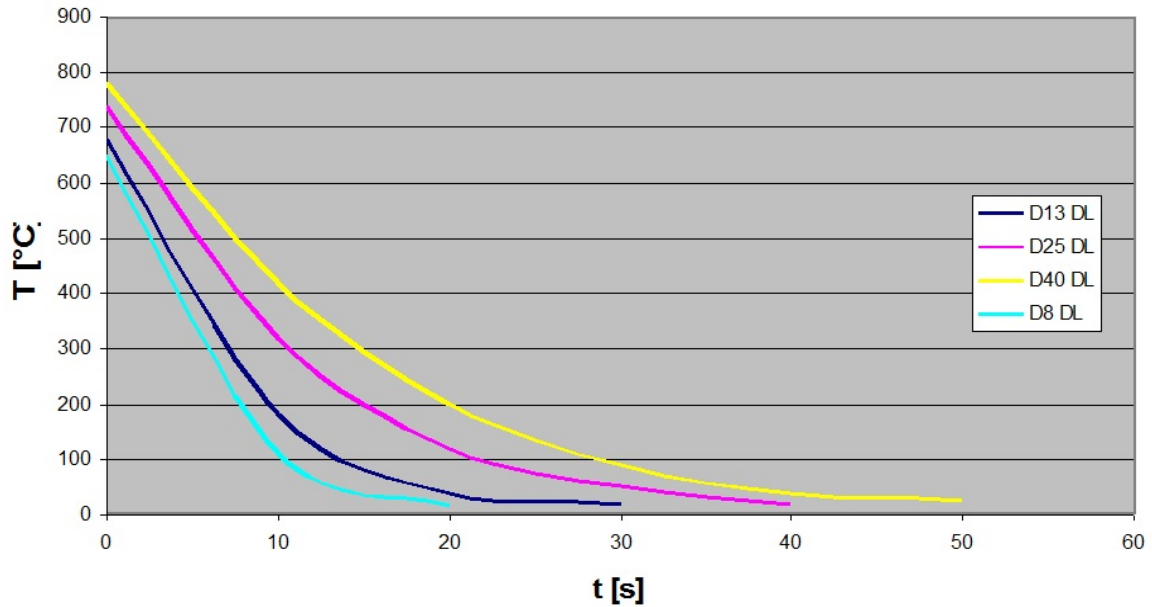


Abb. 5-14 Abkühlkurven 1.4003 Druckluft 8 bar

Aufgrund der etwas höheren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu 1.4301 ist der Temperaturabfluss zügiger.

Auch bei den beschleunigten Abkühlungen ist die Raumtemperatur schneller erreicht.

Luft / DL / DL 2b 1.4003

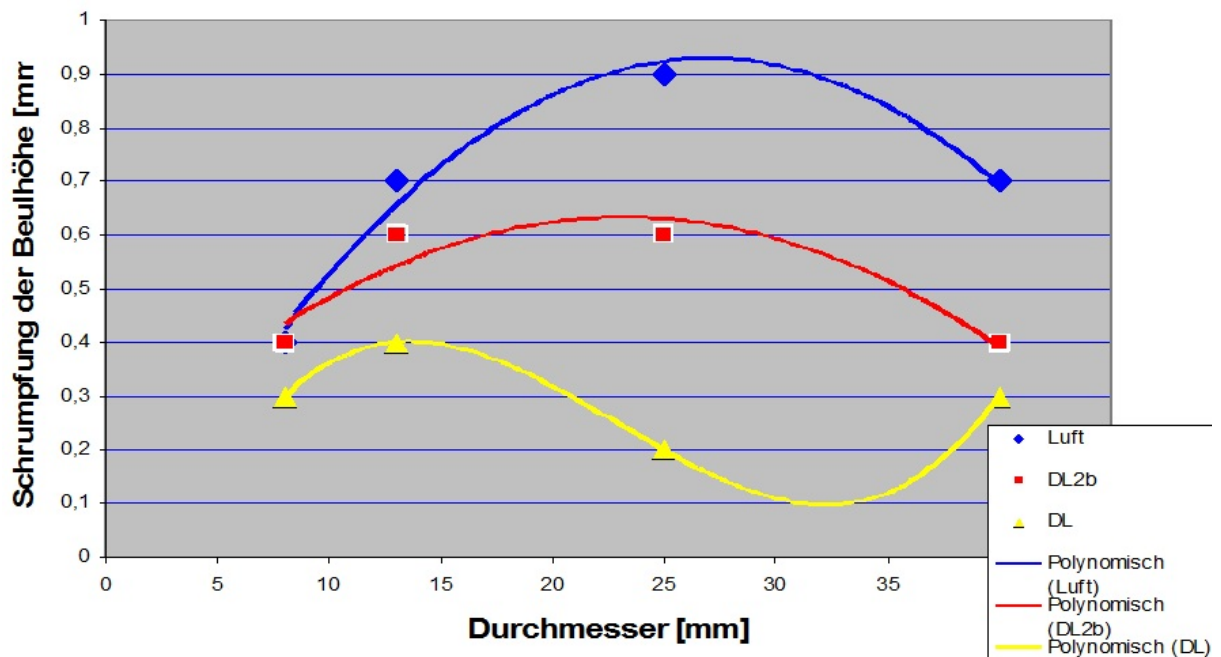
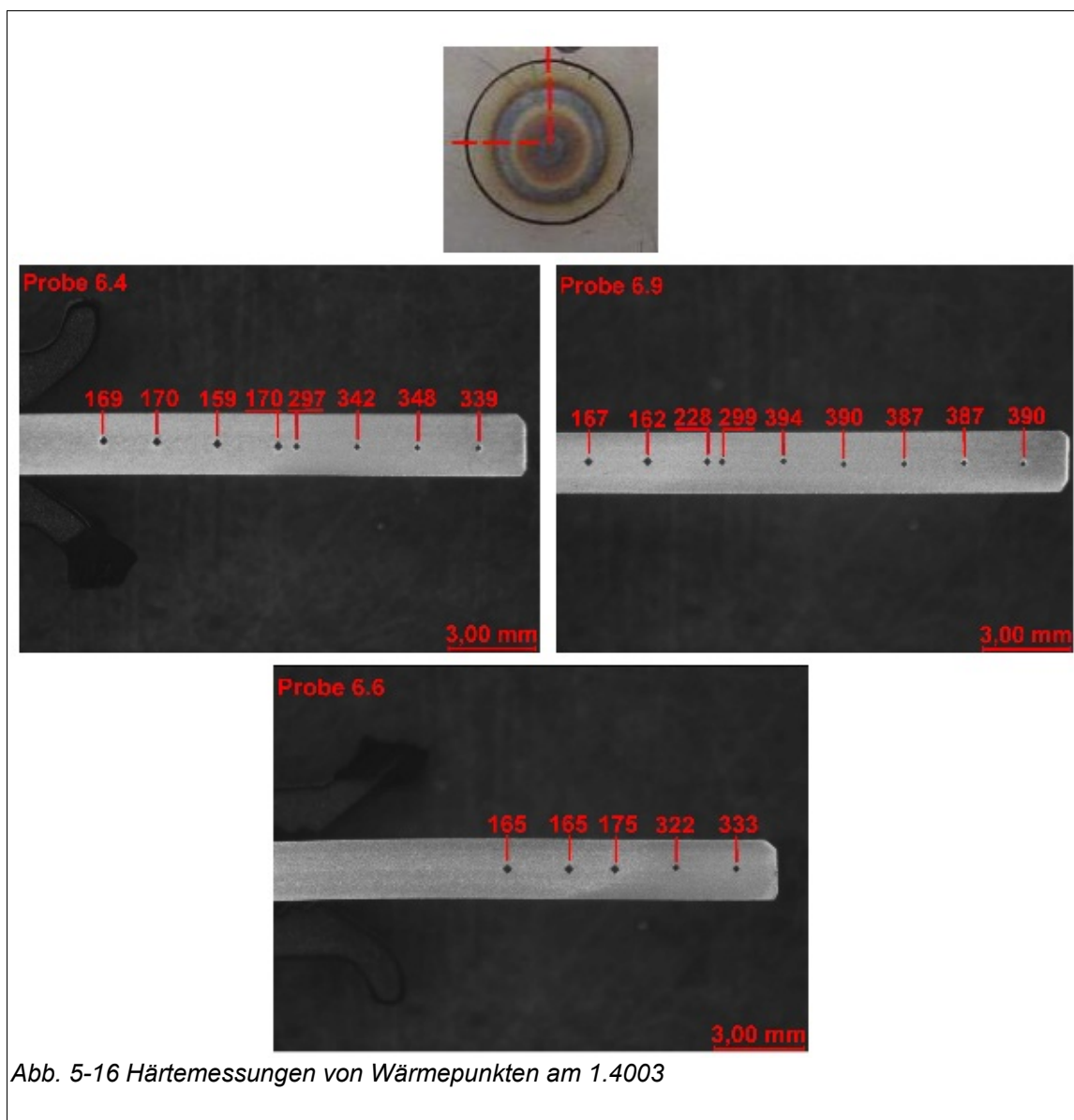


Abb. 5-15 Schrumpfungen der Beulhöhe 1.4003

Im Vergleich zu dem austenitischen Stahl stellt sich ein wesentlich abweichender Verlauf ein. Steigt die Schrumpfkraft mit zunehmendem Durchmesser zunächst an, fällt sie ab einem Durchmesser von 25 mm stark ab und erreicht bei 40 mm teils nur noch Werte der 8 mm Punkte. Verantwortlich für diesen atypischen Verlauf werden Gefügeveränderungen vermutet. Mit steigendem Durchmesser erhöht sich die maximale Temperatur sowie die Haltezeit, so dass teilweise eine α - γ -Umwandlung stattfindet. Da keine Mikroschliffe für eine direkte Untersuchung des Gefüges angefertigt werden konnten, wurden Härteverläufe für von drei Proben erstellt.

Die Messpunkte wurden über den Querschnitt der WEZ (Abb. 5-16) mit der Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507) und einer Prüfkraft von 9,8 N aufgenommen.



Zu beobachten sind hier sich überlagernde Effekte. Im Vergleich der an Luft abgekühlten Wärmepunkte von 25 (Probe 6.4) und 40mm (Probe 6.9) Durchmesser (Abb. 5-16) sind in der Wärmeeinflusszone sehr hohe Härtewerte zu beobachten, die sich bei 6.9 jedoch über einen wesentlich größeren Bereich erstrecken. Zurückzuführen sind diese hohen Werte von bis zu 394 HV1 wahrscheinlich auf eine martensitische Umwandlung. Da auf der Rückseite der Wärmepunkte Temperaturen von ca. 700-760°C gemessen wurden, ist eine Überschreitung der Umwandlungstemperatur auf der erwärmten Seite anzunehmen. Mit erhöhtem Durchmesser steigt zudem die Haltezeit auf Temperaturen über Ac3, was die erhöhten Härtewerte aufgrund von vermehrter Austenitumwandlung erklärt. Ein Härteanstieg aufgrund von Kornwachstum kann durch die kurzen Haltezeiten auf dafür kritischen Temperaturen ausgeschlossen werden.

Der starke Rückgang der Schrumpfkkräfte ist auf eine eben solche martensitische Umwandlung zurückzuführen. Wie bereits erläutert, erfährt das martensitische Gefüge eine Volumenausdehnung, die den Schrumpfkkräften entgegen wirkt. Der starke Abfall der Schrumpfkkräfte zeigt den nicht unerheblich Einfluss dieser Ausdehnung.

Überlagert wird die Schrumpfkraftentwicklung von der Abkühlgeschwindigkeit, die wie in den vorherigen Versuchen das Ergebnis negativ beeinflusst. Besonders deutlich wird der Vorgang aus Probe 6.6, Wärmepunkt mit 25mm Durchmesser, in der Reihe der druckluftgekühlten Wärmepunkte. Während bei kleineren Durchmessern keine derart hohen Härtewerte verzeichnet wurden und somit keine Umwandlung stattgefunden hat, überlagert sich ab 25 mm Durchmesser der Schrumpfkraftverlust durch erhöhte Abkühlung sowie martensitische Umwandlung.

Überhöhungen 1.4003

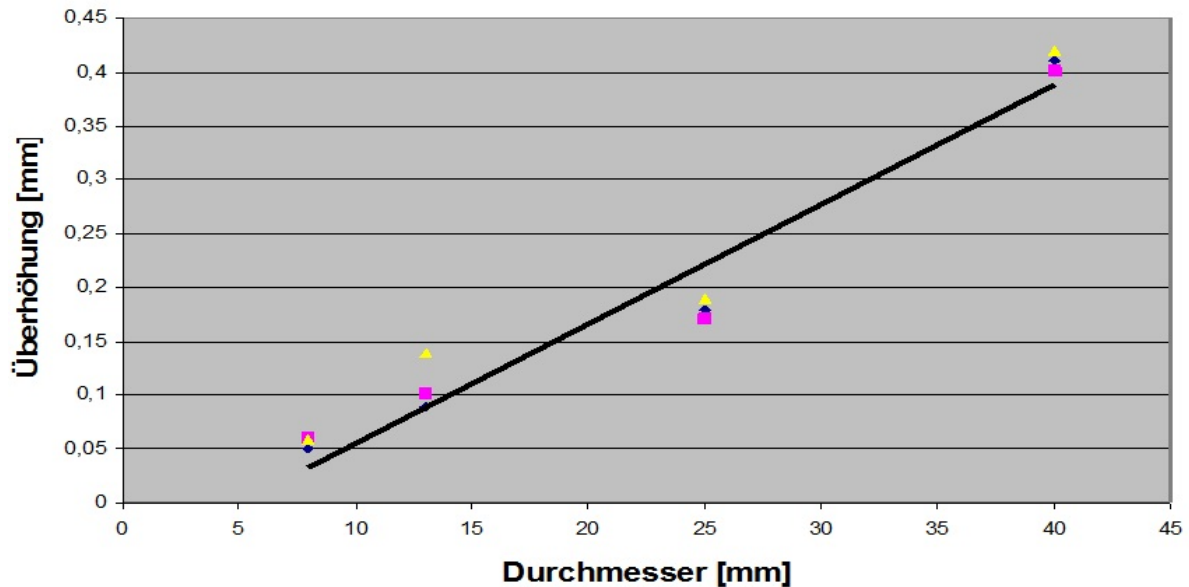


Abb. 5-17 Überhöhungen 1.4003

Auch wie beim 1.4301 zeigt sich ein stetiger Anstieg der Ausbildung von Überhöhungen. Jedoch sind diese im Betrag annähernd halbiert, was auf den verringerten Ausdehnungskoeffizienten zurückzuführen ist.

Versuchsablauf 4

Dieser Ablauf soll einen Bezug zwischen verschiedenen Wärmebildern und Punktgrößen sowie -folgen herstellen. Dafür wurde ein zweiter Spannrahmen mit größeren Abmaßen von 350x350 mm gebaut. Analog zu den vorangegangenen Versuchen wurden 350x350x2,5 mm dicke Bleche aus 1.4301 und 1.4003 mit dem WIG-Schweißgerät umschweißt, um ein Verwerfungsbild zu erzeugen.

Um variable Einflussgrößen auf das Richterergebnis auszuschließen, sollte eine Bearbeitung der sich ausbildenden Überhöhungen mit dem Hammer vermieden werden. Daher wurden für diesen Versuch ausschließlich Punktgrößen von 8 und 13mm Durchmesser verwendet. Diese werden, wie aus den vorigen Versuchen ersichtlich, den Toleranzbereichen der maximalen Beulhöhen auch ohne zusätzliche Bearbeitung gerecht.

Die Brennergröße und -einstellung wurde auch hier wie in Versuchsablauf 1 beschrieben übernommen. Für die Beulhöhe der Bleche wurde ein Wert zwischen 8,5 und 8,8 mm eingestellt.

Vorab muss angemerkt werden, dass die hier folgenden Ergebnisse teils nur subjektiv, aber durchaus verwertbar, erfasst werden können, weil ein Bezug der Messpunkte mit manuellen Messmitteln nicht möglich ist.

Als Vergleichsblech wurde zunächst eine Punktfolge gewählt, wie sie in diversen Literaturquellen angegeben ist [1, 2, 35, 36].

Hier wird empfohlen, die Wärmepunkte kreisförmig von außen Richtung Zentrum auszurichten. Für den Abstand der Wärmepunkte untereinander wurden die der Lochplatten von der Magnetspannvorrichtung gewählt, in diesem Falle 50 mm. Zusätzlich wurden nach jedem Wärmepunkt mit 8 bar Druckluft - nach Versuchsablauf 2 – gekühlt.

Das erste Blech wurde mit Wärmepunkten von 13 mm Durchmesser behandelt.

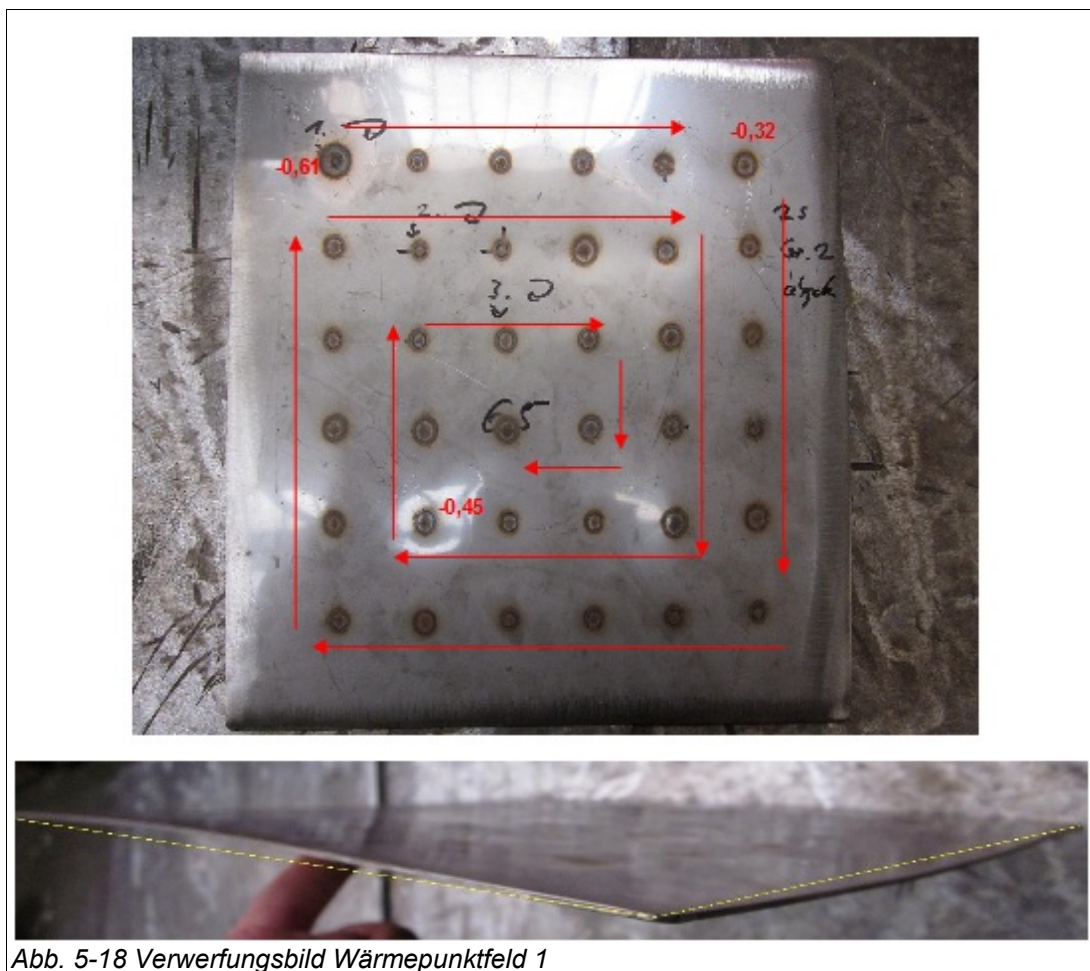


Abb. 5-18 Verwerfungsbild Wärmepunktfeld 1

Deutlich zu sehen ist der variierende Einfall der Überhöhungen (Abb. 5-18). Besonders in den Eckbereichen der Bleche, in denen die Zwängungsspannungen durch die Einspannung im Rahmen höchste Werte annehmen, werden die Wärmepunkte in die Ebene hineingedrückt. Aber auch in Richtung Zentrum des Blechs sind sehr unregelmäßige Überhöhungsausbildungen zu erkennen. Durch diese starken Verwerfungen des Blechs ist kein direkter Vergleich auf das effektive Schrumpfmaß möglich.

Ebenfalls weist das Blech nach dem Ausspannen aus dem Rahmen ein deutliches Verwerfungsbild auf (Abb. 5-18 unten).

Zurückzuführen dürfte dieses Verhalten auf die Spannungsverteilung der Wärmepunkte sein. Wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben, bilden Wärmepunkte in radialer Richtung Zugspannungen aus. Reaktiv werden allerdings in tangentialer Richtung Druckspannungen aufgebaut. Da Druckspannungen wiederum die Ursache für Beulen sind, dürfte in diesem Fall eine Überlagerung dieser Druckspannungen (Abb. 5-19, grün markierte Bereiche) verantwortlich für das starke Verwerfen des Bleches sein. Das Blech wurde übermäßig gespannt bzw. die Punktabstände sind zu gering.

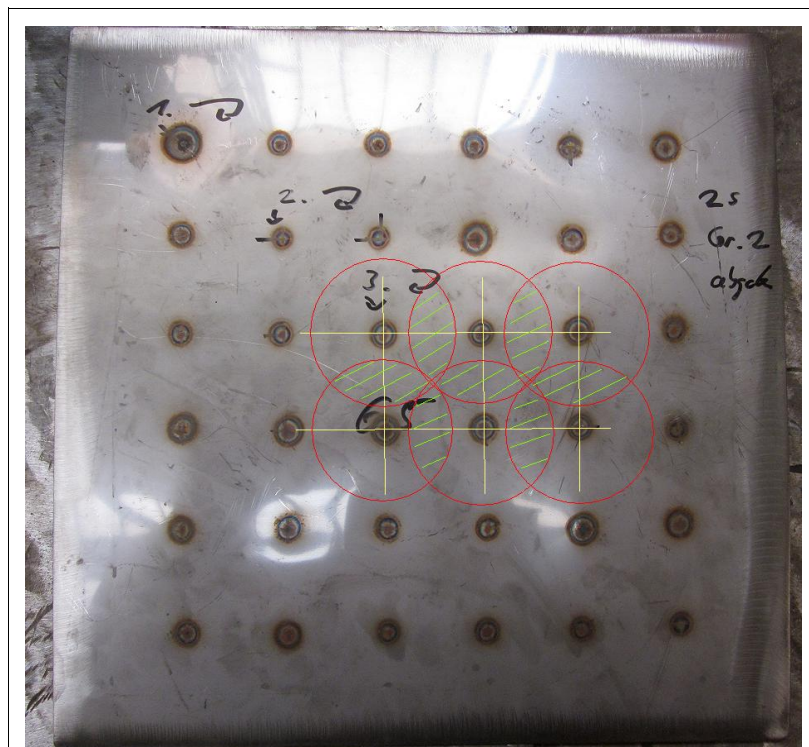


Abb. 5-19 schematischer Spannungsverlauf eines Wärmepunktfeldes

Im nächsten Schritt wurden die Punktabstände auf 75 mm vergrößert. Die Punktfolge und -durchmesser bleiben identisch.

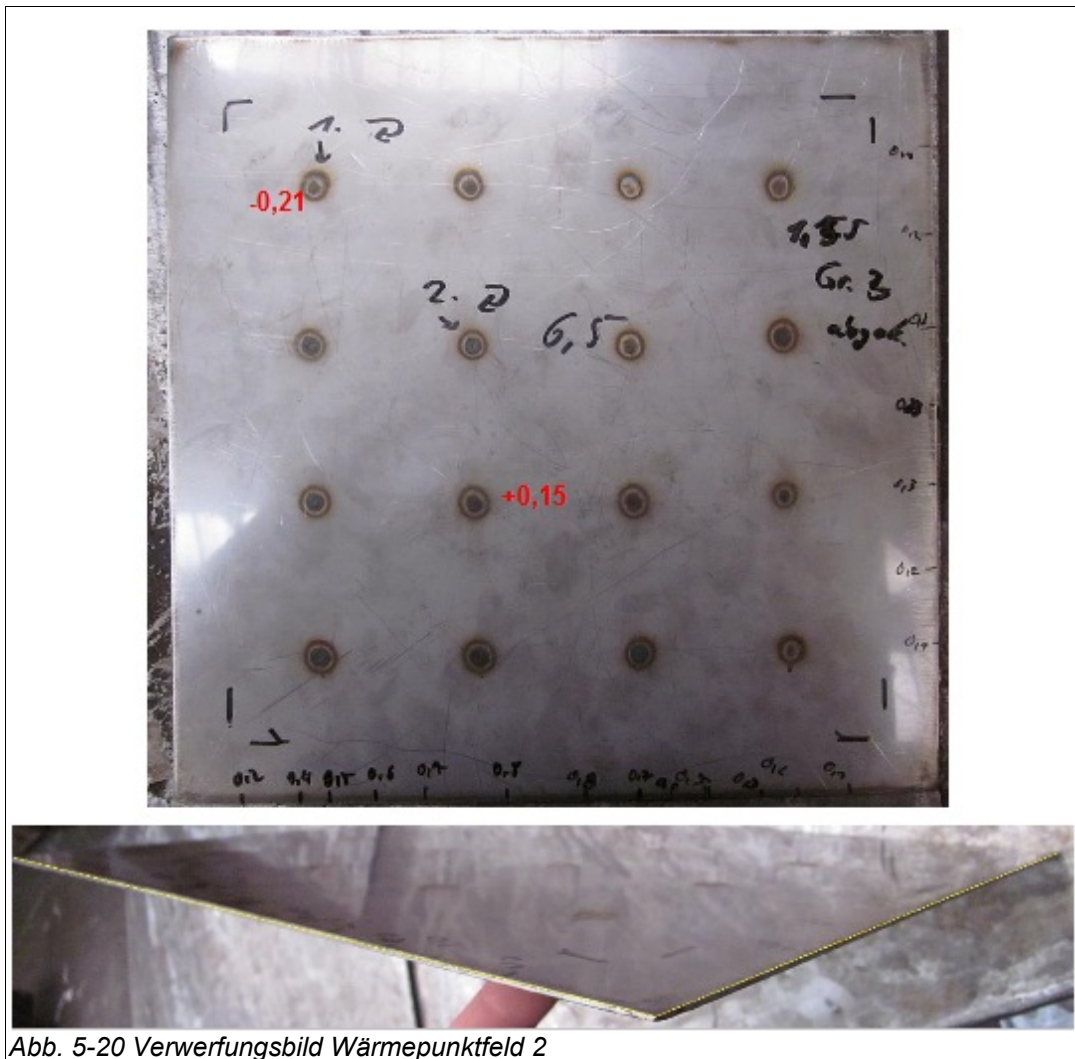


Abb. 5-20 Verwerfungsbild Wärmepunktfeld 2

Im Ergebnis ist der Spannungszustand wesentlich homogener. Die Überhöhungen der Wärmepunkte sind deutlich reduziert, was die Vermutung der direkten Beeinflussung der Druckspannungen auf deren Ausbildung bestätigt.

Ebenso bleibt das unkontrollierte Wechseln von positiven und negativen Überhöhungen aus. Lediglich der Startpunkt zeigt einen negativen Einfall.

Das Richtergebnis war deutlich besser. Auch ohne den Einsatz eines Hammers kann so ein gute Ebenheit im Blech erhalten bleiben.

Des weiteren fiel trotz gutem Richtergebnis eine ästhetische Unzulänglichkeit auf (Abb. 5-21). Zwischen den Feldern der Wärmepunkte zeigte sich ein sich wiederholendes Verzugsbild. Im Zentrum der Felder war stets eine positive Verwerfung im Zusammenspiel mit negativen Einfällen zwischen den kürzesten Abständen der Wärmepunkte zu beobachten. Die Amplituden dieser Verwerfungen sind sehr gering und können nur sehr schwer gemessen werden.

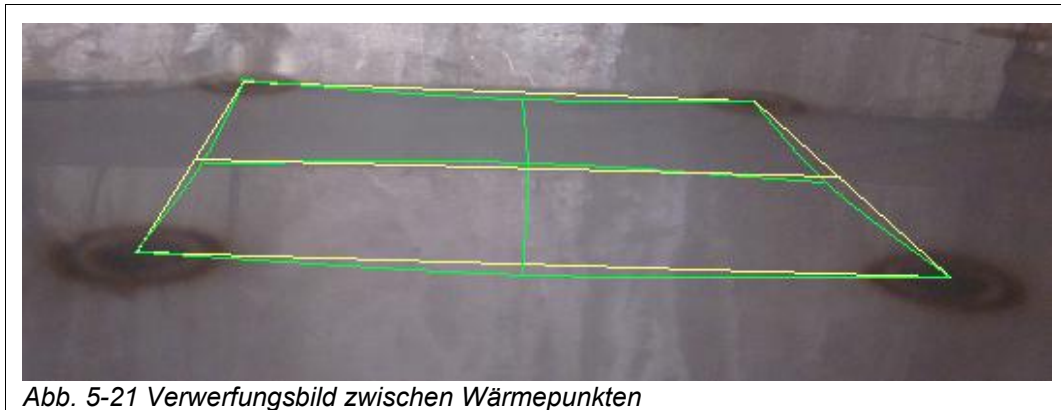


Abb. 5-21 Verwerfungsbild zwischen Wärmepunkten

Über die Blechebene bilden diese Verwerfungen aber ein sichtbares Muster aus. Zurückzuführen dürften diese Ausbildungen auf die inhomogene Spannungsverteilung bei dieser Wärmepunktanordnung sein. Durch die rasterförmige Anordnung bilden sich stets Bereiche mit kürzesten Punktabständen aus. Wieder bezogen auf die radiale Zugspannungsausbildung von Wärmepunkten bedeutet dies eine variierende maximale Zugspannung infolge unterschiedlich ausgeprägter Überlagerungen (Abb.). Über die kürzesten Abstände zwischen den Wärmepunkten muss sich ein konstanter Spannungsverlauf einstellen. Über die Diagonalen jedoch muss die Zugspannung aufgrund des größeren Abstandes geringer sein. Es bildet sich ein inhomogenes Spannungsbild aus. Das Ziel beim Spannen von Blechfeldern sollte aber ein möglichst gleichmäßiges Ausbilden der Spannungen sein, um die beste Ebenheit zu erreichen.

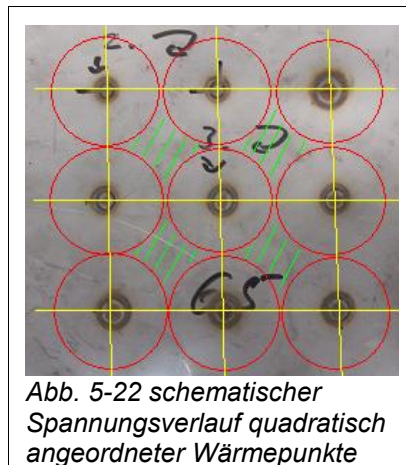


Abb. 5-22 schematischer Spannungsverlauf quadratisch angeordneter Wärmepunkte

Unter der Betrachtung dieses Spannungsbildes von Wärmepunkten, kann ein maximal homogenes Spannungsbild über das Blechfeld nur mit einer geometrischen Anordnung der Punkte als dichteste Packung erreicht werden. Unter diesem Gesichtspunkt wurde ein weiteres Blech angefertigt (Abb. 5-23). Der Abstand der Punkte untereinander beträgt ebenfalls 75 mm. Auch die Wärmepunkte wurden wieder mit einem Durchmesser von 13 mm erzeugt.

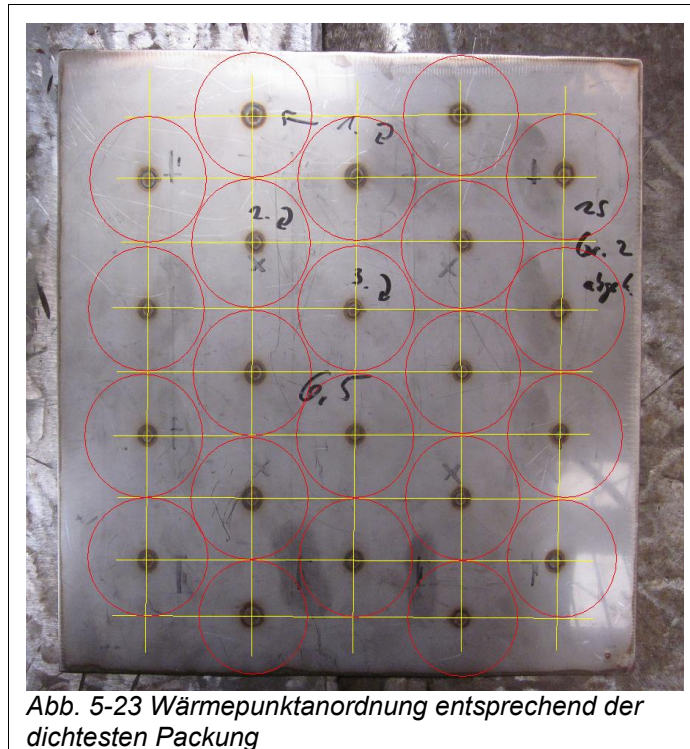


Abb. 5-23 Wärmepunktanordnung entsprechend der dichtesten Packung

Ein negatives Überhöhen der Wärmepunkte war nicht mehr festzustellen. Da die Wärmepunkte bei dieser Anordnung nicht direkt im Eckbereich des Blechfeldes gesetzt wurden und auch untereinander keinen Einfluss ausüben, bilden sich die Überhöhungen sehr gleichmäßig und nur noch im geringen Maße aus. Die maximalen Überhöhungen zeigten Werte von etwa 0,15 mm. Auch das Verwerfungsbild zwischen den Wärmepunkten bildete sich deutlich gleichmäßiger aus.

6.3 Zusammenfassung

Aus dieser Versuchsreihe lassen sich einige Rückschlüsse für die Erstellung einer Arbeitsanweisung gewinnen. Eine direkte Einplanung der Beträge der Schrumpfmaße ist nicht möglich, so variieren mit verschiedenen Verwerfungen, Wärmebildern und Schweißkonstruktionen die Spannungszustände in der Beblechung und somit die effektive Dehnungsbehinderung. Auch eine exakte Maßgenauigkeit bei der Ausführung der Versuchsreihe konnte mit den gegebenen Mitteln nicht garantiert werden.

Jedoch sind eindeutige Tendenzen der Schrumpfkraftentwicklung zu beobachten. Der Wirkungsgrad der Wärmepunkte fällt mit größeren Durchmessern deutlich ab. Gleichzeitig nimmt die Erwärmungszeit erheblich zu, wodurch zusätzlich die exakte Temperaturführung erschwert wird. Eine gleichzeitige Verringerung des Wirkungsgrades der Wärmeübertragung mit zunehmender Erwärmungsdauer und den steigenden Wärmeverlusten durch konvektive

und strahlende Abwärme spricht sich ebenfalls gegen zu große Punktdurchmesser aus. Auch die Überhöhung nimmt mit steigendem Durchmesser erheblich zu und muss, um den Vorgaben der Maßgenauigkeit zu entsprechen, mit einem Hammer zurückgeschlagen oder abgeschliffen werden.

Für die Bleche aus 1.4301 ergeben sich damit ideale Punktdurchmesser von 8 bis maximal 13mm. Die Überhöhungen bleiben so gering, dass diese gar nicht oder nur mit sehr leichten Werkzeugen zurückgeschlagen werden müssen. Zudem ist die Notwendigkeit zur aktiven Abkühlung durch die verringerte und örtlich begrenztere Wärmeeinbringung nicht zwingend gegeben. Gravierende Vorteile bietet außerdem die genauere Kontrolle der Schrumpfmaße, so dass eine übermäßige Behandlung vermieden werden kann.

Wo bei dem austenitischen Stahl eher empfohlen wird, sollte bei dem ferritischen Chromstahl 1.4003 generell ein maximaler Punktdurchmesser von 13 mm vorgegeben werden. Gerade da die Temperatur in der Fertigung nicht laufend überprüft werden kann, sollte eine Vermeidung von Überhitzung durch kleinere Wärmebilder angestrebt werden. Nicht nur, da die Schrumpfkraft und somit der Wirkungsgrad durch eine mögliche Martensitbildung verringert wird, auch die metallurgische Kerbwirkung durch Härtesprünge von bis zu 200 HV1 sollte zwingend vermieden werden. Zusätzlich sollte die Brennergröße ob der ohnehin schlechteren Wärmeleitfähigkeit (diese liegt mit $\sim 25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ zwischen Baustahl (~ 35) und CrNi-Stahl (~ 15)) nach der Referenzgröße (Kap. 4.1.2) gewählt werden.

Außerdem lässt sich aus diesen Versuchen ableiten, dass ein freies Richten von Beblechungen durchaus auch ohne die Benutzung von Schlagwerkzeugen möglich ist.

Mit kleinen Wärmepunkten kann die Wärmeausbreitung im Blech auf moderaten Werten gehalten werden, ohne auf eine aktive Kühlung zurückgreifen zu müssen. Auch das wirkt sich wiederum positiv auf die effektive Schrumpfkraft aus.

Aus den Betrachtungen der Wärmepunktfelder können ebenfalls einige Zusammenhänge abgeleitet werden. Die Auswirkungen übermäßig oder falsch gesetzter Wärmepunkte beeinflussen gerade im Dünnblechbereich deutlich das Richtergebnis. Nur ein günstiges Wärmepunktfeld und ein iteratives Erarbeiten des gewünschten Schrumpfmaßes kann sehr gute Ergebnisse liefern und muss für jede Situation angepasst werden.

7 Entwurf einer Arbeitsanweisung

Mit den in dieser Arbeit gesammelten Erkenntnissen lässt sich eine allgemeine Arbeitsanweisung für Flammrichtaufgaben im Schienenfahrzeugbau, und anderen verwandten Fertigungsgebieten, erstellen.

Eine Arbeitsanweisung zum Flammrichten sollte leicht verständliche, grundsätzliche Regeln für die Ausführung von Richtarbeiten und Hinweise bei der Auswahl der angemessenen Werkzeuge enthalten.

Die Regeln und Hinweise müssen für einen Facharbeiter leicht verständlich sein. Das heißt oft aber auch, dass die in Arbeitsanweisungen gemachten Aussagen wissenschaftlichen Vorgaben nicht genügen können.

Wegen der Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften [44] müssen sicherheitstechnische Vorgaben vor und während des Einsatzes von Flammanlagen in der Arbeitsanweisung beachtet werden.

Diese im Folgenden beschriebene Arbeitsanweisung ist für den Einsatz in den Fertigungshallen gedacht, damit im laufenden Betrieb die Richtarbeiten hinsichtlich einer werkstoffschonenden und effektiven Arbeitsweise ausgeführt werden.

Die Positionen und Arten der Wärmebilder sowie eine mögliche Notwendigkeit von zusätzlichen Dehnungsbehinderungen und sonstige baugruppenspezifische Maßnahmen können nur am einzelnen Bauteil selbst bestimmt werden, wodurch diese nicht zu vereinheitlichen sind.

Arbeitssicherheit



optische Strahlung

Bei dem Umgang mit der Flamme muss mindestens ein Augenschutzfilter der Schutzstufe 5 getragen werden!



nitrose Gase

Es darf nur mit ausreichender Belüftung gearbeitet werden.
Zwischen den Arbeitsschritten muss der Brenner ausgestellt werden.
(Vergiftung: Übelkeit, Atemnot, Lungenödem, Tod)!

brandfördernde



Gase

Bei dem Umgang mit der Flamme muss eine vollständige schwer entflammbare Schutzkleidung getragen werden!
(Jacke, Hose, Handschuhe, Sicherheitsschuhe)
Das Ausblasen der Kleidung mit Sauerstoff ist streng verboten!



Explosionsgefahr

Acetylen ist hochgradig explosiv!
Bei Flammrückschlägen muss die Gaszufuhr unterbrochen und die Anlage kontrolliert werden.

Vor dem Richten

Bevor Richtarbeiten durchgeführt werden dürfen, müssen folgende Fragen geklärt werden!

Schläuche dicht?
Schlauchanschlüsse intakt?
Gebrauchsstellenvorlagen intakt?
Brennbare Stoffe in direkter Umgebung?

Richtstelle sauber?
Rückstände von Beschriftungen, Eisenstaub, Aufkleber und ölige Verschmutzungen müssen vor dem Richten beseitigt werden!

Richtige Brennergröße und Flammeinstellung gewählt?








Wie muss die Flamme ausgerichtet werden?

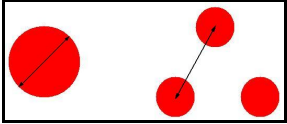
Welche Temperatur darf nicht überschritten werden?

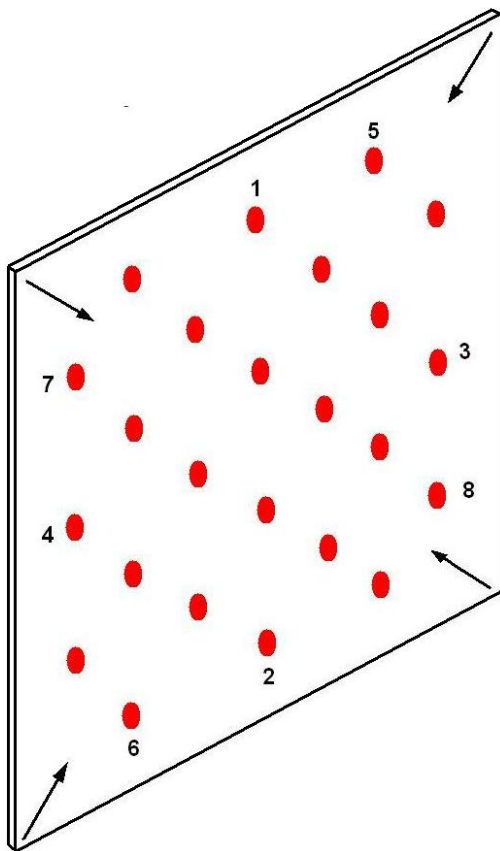
Darf der Werkstoff gekühlt werden?
Verantwortlichen Schweißfachmann, -techniker oder -ingenieur fragen.

Wie muss das Wärmebild ausgeführt werden?

freies Richten von Beblechungen mit Wärmepunkten

<p>Brennergröße</p>  <p><i>Einflammenbrenner</i></p>	<p>„weißer“ Stahl (1.4301 / 1.4318 / 1.4003)</p>	<p>„schwarzer“ Stahl (S355J2 / P355NL1 / S500MC)</p>
<p>Flammeinstellung</p>	 <p><i>„neutral“</i></p>	 <p><i>„sauerstoffüberschüssig“</i></p>
<p>Wärmepunkte</p>  <p><i>Glühfarben</i></p>	<p>1.4003</p>  <p>740°C</p> <p>1.4301/1.4318</p>  <p>850°C</p>	 <p>700°C</p>

Wärmepunkte und -felder 	„weißer Stahl“	„schwarzer Stahl“
	Durchmesser <i>8 bis maximal 13 mm</i> Mindestabstand <i>50 mm</i>	Durchmesser <i>8 bis maximal 25 mm</i> Mindestabstand <i>50 mm</i>

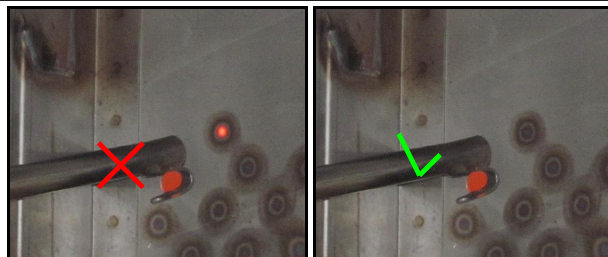


Die Wärmepunkte sollen wechselseitig vom Rand des Blechfelds bis zur Mitte gesetzt werden. Dabei ist das gezeigte Muster einzuhalten.

Die Erwärmung erfolgt immer von der ausgebeulten Seite.




Mögliche Überhöhungen, und nur Überhöhungen, müssen mit einem Kunststoffhammer zurückgeschlagen werden.

Erst wenn das gezeigte Wärmebild nicht ausreicht, dürfen die Zwischenräume der Punkte erwärmt werden.



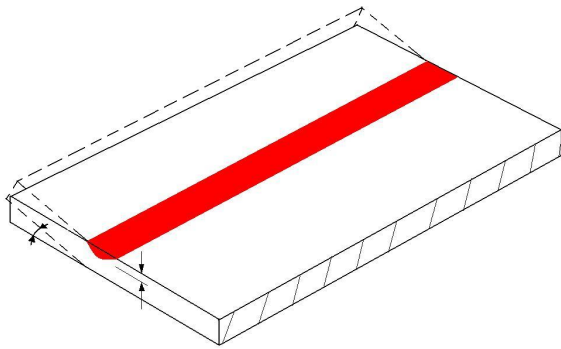
Eine Abkühlung darf erst erfolgen, wenn der Wärmepunkt durchgewärmt und ausgeglüht ist!

Richten an Rahmenstrukturen

<p style="text-align: center;">Brennergröße</p>  <p style="text-align: center;"><i>Einflammenbrenner</i></p>	<p style="text-align: center;">„weißer“ Stahl (1.4301 / 1.4318 / 1.4003)</p>	<p style="text-align: center;">„schwarzer“ Stahl (S355J2 / P355NL1 / S500MC)</p>
<p style="text-align: center;">Flammeinstellung</p>	<p style="text-align: center;">Blechdicke 2-4 mm → Größe 2</p> <p style="text-align: center;">4-6 mm → Größe 3</p>  <p style="text-align: center;"><i>„neutral“</i></p>	<p style="text-align: center;">Blechdicke 2-4 mm → Größe 3</p> <p style="text-align: center;">4-6 mm → Größe 4</p> <p style="text-align: center;">6-9 mm → Größe 5</p> <p style="text-align: center;">9-14 mm → Größe 6</p> <p style="text-align: center;">14-20 mm → Größe 7</p>  <p style="text-align: center;"><i>„sauerstoffüberschüssig“</i></p> <hr style="width: 20%; margin: 10px auto;"/> <p style="text-align: center;">ab 6 mm „neutral“</p>

Wärmebilder

Wärmestrich



Maximale Temperatur

700°C - 740°C

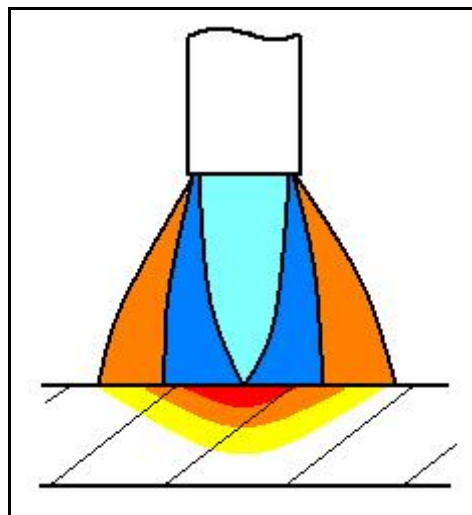
700°C

740°C

Die Durchwärmung darf nur ein Drittel der Blechdicke betragen.

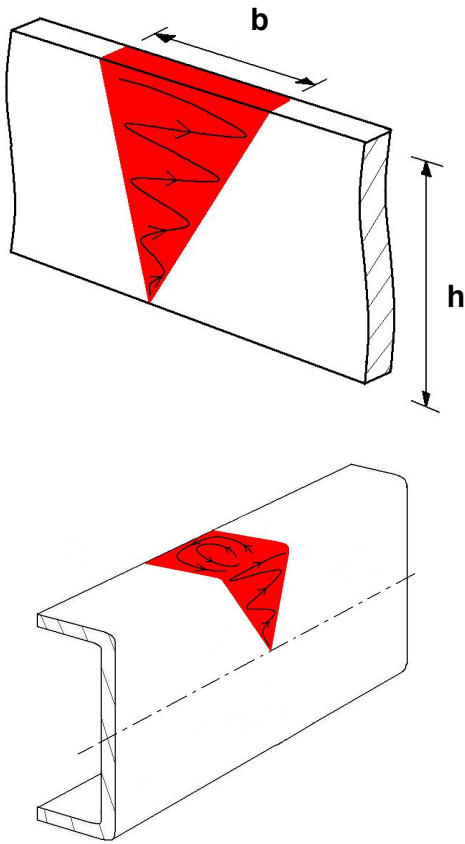
Ein erneutes Erwärmen der Striche ist verboten! Ist das Ergebnis nicht ausreichend, müssen mehrere Striche mit einem Abstand von mind. 5 x Blechdicke gesetzt werden.

Brennerhaltung



Die Primärflamme muss aufgesetzt werden.

Wärmekeile



Maximale Temperatur

Glühfarbe



600°C

Öffnungswinkel

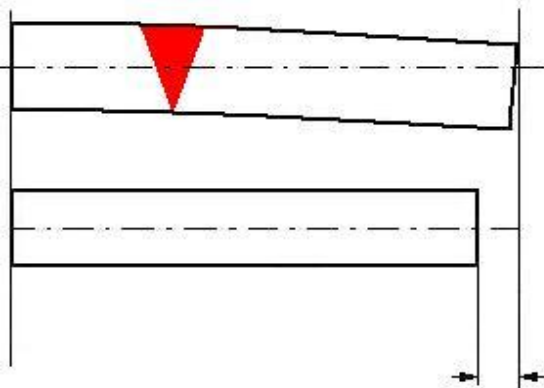
bis 4 mm Blechdicke

$h:b \sim 3:1$ (max. 20°)

ab 4 mm Blechdicke

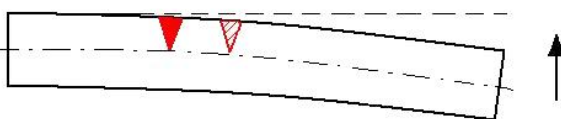
$h:b \sim 2:1$ (max. 30°)

Erwärmung immer von der Keilspitze aus nach Muster.

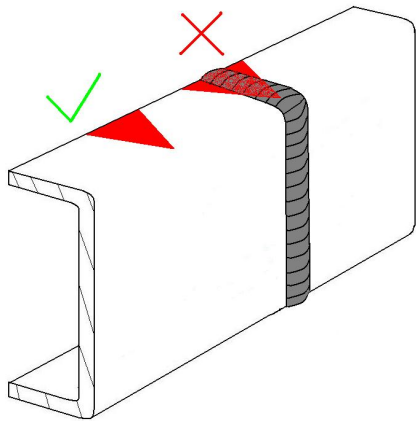


Bis zur Mitte des Profils erwärmte Keile biegen!

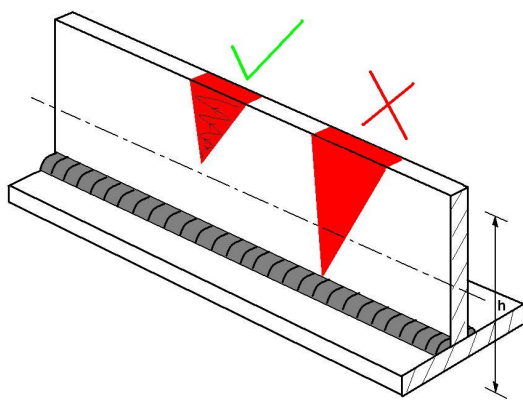
Vollständig durchgewärmte Keile biegen UND verkürzen!



Ist ein Wärmekeil nicht ausreichend, müssen mehrere, im Mindestabstand von 2 Wärmekeilbreite gesetzt werden.



Wärmebilder dürfen nicht auf
Schweißnähte gesetzt werden!

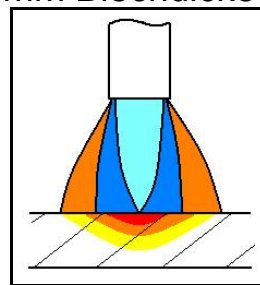


Geschweißte Profile dürfen
nicht vollständig erwärmt
werden.

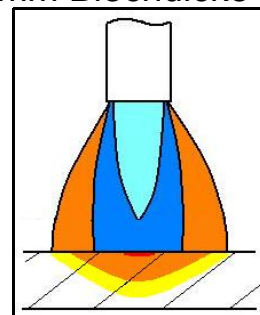
Ein Erwärmen ist nur bis zur
neutralen Faser sinnvoll.

Brennerhaltung

bis 4mm Blechdicke



ab 4mm Blechdicke



8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich sehr allgemein mit dem Thema des thermischen Richtens im Schienenfahrzeugbau. Während der Erarbeitung hat es sich gezeigt, dass das Thema ausgesprochen umfangreich ist und einige Fragen nicht ohne weiteres zu klären sind.

Sehr deutlich hat sich gezeigt, dass sich im Fertigungsbereich des Schienenfahrzeugbaus und ähnlichen industriellen Zweigen mit hohem Anteil an manuellen Arbeitsschritten und sehr groß dimensionierten Konstruktionen, kaum eine zuverlässige Planung von Richtarbeiten durchführen lässt. Zu groß sind die Einflüsse auf das erzeugte Verzugsbild und die Spannungsbildung in den Baugruppen, als dass sich eine genaue Voraussage zu benötigten Wärmepositionen und dem sich einstellenden Richtergebnis machen lässt.

Auch die Beeinflussung des Werkstoffs lässt sich nur mit erheblichem Aufwand bestimmen. Das resultierende Gefüge nach der Erwärmung ist stark abhängig von der Aufheizgeschwindigkeit, der Haltezeit und der Abkühlgeschwindigkeit. Da sich alle diese Parameter sowohl mit dem Werkstoff, der Flammeinstellung, der Brennerhaltung, der Werkstoffdicke als auch mit dem Wärmebild und der Brennerführung des Richtarbeiters ändern, können selbst unter Laborbedingungen erzeugte Werkstoffversuche keine Aussage liefern, wie das Gefüge der tatsächlich erzeugten Richtstelle aussieht.

Dementsprechend hat sich auch bei der Erstellung der Arbeitsanweisung eine allgemeine Grundstruktur als angemessener herausgestellt. Gerade da die beeinflussenden Parameter nicht zuverlässig bestimmt werden können, konzentriert sie sich darauf, kritische Bereiche grundsätzlich zu vermeiden und einige unnötige Fehlerquellen aufzuzeigen. Das Ziel dabei soll sein, die Richtarbeiter für eine akkurate Arbeitsweise zu sensibilisieren.

Die durchgeführten Versuchsreihen liefern einige interessante Aussagen, die gerade im Schienenfahrzeugbau Rückschlüsse für eine akkurate Richtarbeit an den Seitenwänden zulassen. So hat sich gezeigt, dass die Art der Ausführung von Wärmepunkten und -feldern erheblichen Einfluss auf eine genaue und effektive Richtarbeit an Beblechungen hat. Exakte Schrumpfmaßbestimmungen können mit dieser Versuchsreihe nicht garantiert werden, und es bleibt fraglich, ob dafür eine Notwendigkeit besteht, da diese wieder Laborbedingungen unterliegen, die am tatsächlichen Bauteil nicht zutreffen bzw. nach dem heutigen Stand der Technik nicht genau bestimmt werden können. Jedoch zeigt sich, dass ein besonderes Augenmerk auf diesen Sachverhalt gelegt werden muss, an dem weitere Untersuchungen unter genaueren Bedingungen durchaus sinnvoll wären.

Literaturliste

- [1] [Pfeiffer, Handbuch der Flammrichttechnik, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS GmbH, 1996]
- [2] [Pfeiffer, Richten und Umformen mit der Flamme, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS GmbH, 1983]
- [3] [Bernard/Schreiber, Verfahren der Autogentechnik, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1973]
- [4] [Boese/Ippendorf, Das Verhalten der Stähle beim Schweißen Teil II 4. Aufl., Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2001]
- [5] [Büttemeier/Kaßner/Strothmann, Schweißtechnisches Handbuch Schienenfahrzeugbau, DVS Media, 2010]
- [6] [Bargel/Schulze, Werkstoffkunde 10. Aufl., Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008]
- [7] [Ilschner, Hochtemperatur-Plastizität, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1973]
- [8] [Marek/Nitsche, Praxis der Wärmeübertragung, Fachbuchverlag Leipzig Carl Hanser Verlag, 2007]
- [9] [Schoer, Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen 2. Aufl., Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2003]
- [10] [Throne/Beine, Thermoformen, Carl Hanser Verlag, 1999]
- [11] [Baehr/Stephan, Wärme- und Stoffübertragung 4. Aufl., Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2004]
- [12] [Hänsch, Schweißeigenstressspannungen und Formänderungen an stabartigen Bauteilen, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS GmbH, 1984]
- [13] [Dilger, Zusammenfassung der Forschungsberichte aus dem WaRiS-Forschungskreis, Vortrag an der SLV Halle zum Workshop thermisches Richten, November 2011]
- [14] [Gross/Hauger/Schröder/Wall, Technische Mechanik 2 11. Auflage, Springer Verlag, 2008]
- [15] [Vollertsen, SFB Teilbericht B8 - Thermisch induziertes Vorspannen zur Verzugsminimierung - *Distortion Engineering*, <http://www.sfb570.uni-bremen.de/?q=node/69>]
- [16] [Boese, Das Verhalten der stähle beim Schweißen Teil I 4. Aufl., Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 1995]
- [17] [Probst/Herold, Kompendium der Schweißtechnik Band 2, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2002]

- [18] [Beckert, Kompendium der Schweißtechnik Band 3, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2002]
- [19] [Strassburg/Wehner, Schweißen nichtrostender Stähle 4. Aufl., DVS Media GmbH, 2009]
- [20] [Koltz, Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, VDI Verlag GmbH, 1994]
- [21] [Malisius, Schrumpfungen, Spannungen und Risse beim Schweißen 4. Aufl., Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS GmbH, 1977]
- [22] [Radaj, Wärmewirkung des Schweißens, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1988]
- [23] [Hänsch/Krebs, Eigenspannungen und Formänderungen in Schweißkonstruktionen, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS Verlag GmbH, 2006]
- [24] [Veröffentlichung Max-Planck-Institut, Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle Band 3, ZTA Schaubilder, Verlag Stahleisen mbH]
- [25] [Seyffarth/Meyer/Scharff, Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS Verlag GmbH]
- [26] [FHWA Veröffentlichungen, www.fhwa.dot.gov]
- [27] [Dennin, Flammrichten von 5 bis 50mm dicken Blechen aus verschiedenen Stählen, Schweißen und Schneiden Bd. 57]
- [28] [Thiele/Weirich, Flammrichten im Stahl-, Behälter- und Maschinenbau, Schweißen und Schneiden Bd. 105]
- [29] [Schumacher, Gezieltes Flammwärmen unter schwierigen Randbedingungen, Schweißen und Schneiden Bd. 112]
- [30] [Hermann/Haan/Schumacher, Flammrichten an großen Bauteilen und Bauwerken, Schweißen und Schneiden Bd. 123]
- [31] [Jansen, Beispiele für das Flammrichten von hochfesten vergüteten Feinkornbaustählen sowie austenitischen Stählen, Schweißen und Schneiden Bd. 128]
- [32] [Pieschel, Untersuchungen zur Werkstoffbeeinflussung und Eigenspannungsentstehung und –verteilung beim Schweißen und Flammrichten hochfester schweißbarer Feinkornbaustähle, Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1999]
- [33] [Schulze, Die Metallurgie des Schweißens 4. Aufl., Springer Verlag, 2010]
- [34] [H. Jansen, Schrumpfungen und Spannungen beim Schweißen und deren Beseitigung durch das Flammrichten, Veröffentlichung der Linde AG]
- [35] [Flammrichten, Informationsschreiben von PanGas, [http://www.pangas.ch/international/web/lg/ch/like/gchpangasde.nsf/repositorybyalias/pangas_tfp_flammrichten_d/\\$file/PanGas_TfP_flammrichten_d.pdf](http://www.pangas.ch/international/web/lg/ch/like/gchpangasde.nsf/repositorybyalias/pangas_tfp_flammrichten_d/$file/PanGas_TfP_flammrichten_d.pdf)]

- [36] [Strich, Flammrichten von un- und niedriglegierten Stählen, Vortrag der Linde AG, November 2011]
- [37] [Hanus, Thermomechanisch gewalzte Stähle für den Stahl- und Behälterbau, Vortrag zum Seminar „Schweißen der thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustähle“ der SLV-Duisburg im Oktober 2000]
- [38] [Sharma, Behavior of heat straightened plates bent along the minor axis, Masterthesis Department of Civil and Environmental Engineering (USA), 2005]
- [39] [Beckert, Kompendium der Schweißtechnik Band 3, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS Verlag GmbH, 2002]
- [40] [Siebert, Beitrag zur Frage der Eigenspannungen in warmgewalzten Breitflanschträgern *Dissertation*, TU Hannover, 1973]
- [41] [Thiele/Weirich, Flammrichten- Grundlagen, Werkstoffverhalten , Praxis, Schweißen im Anlagen- und Behälterbau DVS- Berichte Band 159]
- [42] [Hanus, Flammrichten thermomechanisch gewalzter Stähle, Schweißen im Anlagen- und Behälterbau DVS- Berichte Band 159]
- [43] [Unfallverhütungsvorschriften Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren, BGV D1, Maschinenbau- und Metall-Berufsgenossenschaft, 2002]
- [44] [Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 088:1993]
- [45] [Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 310:1992 zurückgezogen]
- [46] [DVS MB 1002:1986]
- [47] [DVS MB 1602:1968]
- [48] [DVS MB 1608:2010]
- [49] [DVS MB 1614:1998]
- [50] [GL – Bauvorschriften und Richtlinien II – Teil 3 (06.99)]
- [51] [Eisen-Kohlenstoff-Diagramm,
<http://www.derwirtschaftsingenieur.de/bilder/werkstofftechnik/EKD.png>]