

Mario Kusch  
Klaus-Jürgen Matthes  
Werner Schneider

# Schweißtechnik

Schweißen von metallischen  
Konstruktionswerkstoffen



7., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



Kusch/Matthes/Schneider (Hrsg.)  
Schweißtechnik



Mario Kusch  
Klaus-Jürgen Matthes  
Werner Schneider (Hrsg.)

# Schweißtechnik

Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen

7., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

*Herausgeber:*

Dr.-Ing. Mario Kusch  
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Matthes  
Dr.-Ing. Werner Schneider  
Institut für Füge- und Montagetechnik  
Technische Universität Chemnitz

*Autoren:*

Dr.-Ing. Mario Kusch (Kapitel 3, 5 und 7)  
Prof. Dr.-Ing. Heiko Lang (Kapitel 4)  
Dipl.-Ing. Holger Letsch (Kapitel 6)  
Dr.-Ing. Werner Schneider (Kapitel 5)  
Dr.-Ing. habil. Dietmar Schober (Kapitel 3.12, 3.13, 4.4, 7 bis 10)  
Dr.-Ing. Stefan Thurner (Kapitel 3.7 bis 3.10)  
Dr.-Ing. Marcel Todtermuschke (Kapitel 1 und 2)



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-46745-3  
E-Book-ISBN 978-3-446-47000-2

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg  
Herstellung: Anne Kurth  
Satz: Eberl & Kösel Studio GmbH, Altusried-Krugzell  
Covergestaltung: Thomas West  
Titelbild: © [stock.adobe.com/Ilshat](http://stock.adobe.com/Ilshat)  
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München  
Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen  
Printed in Germany

# Vorwort

Die schweißtechnische Ausbildung hat in Chemnitz eine langjährige Tradition. Ab dem Jahr 1922 erfolgte eine theoretische und praktische Ausbildung in den Hörsälen und Laborräumen der damaligen Höheren Technischen Lehranstalt. Es wurden die ersten schweißtechnischen Lehrgänge in Verfahrenstechniken des Gas- und Lichtbogenschweißens durchgeführt und Schweißerprüfungen abgenommen. Dieser Tradition fühlen sich die Herausgeber und Autoren verpflichtet.

Forschung, Entwicklung und Anwendung des Schweißens und verwandter Verfahren haben große volkswirtschaftliche Bedeutung. Geschweißte Bauteile finden wir sowohl im Maschinen-, Apparate- und Stahlbau als auch im Automobil-, Schiff- und Flugzeugbau sowie in vielen weiteren technischen Produkten. Die fortschreitende Automatisierung in der Schweißtechnik ermöglicht u. a. auch eine umfassende fertigungstechnische Nutzung physikalischer und chemischer Effekte zum örtlich begrenzten Energieeintrag (Wärme und/oder Druck). Diese unterschiedlichen physikalischen und chemischen Effekte und ihre Kombinationen bilden die Grundlage für die Gliederung dieses Buches und der Verfahrensbeschreibungen.

Neben den theoretischen Grundlagen werden die Schweißverfahren vorgestellt und ihre Anwendungsgebiete aufgezeigt. Schwerpunkte bei den einzelnen Verfahren sind:

- Wirkprinzipien und gerätetechnische Umsetzung,
- Verfahrensmerkmale und Anwendungen,
- Merkblätter und Fachnormen,
- Verfahrensprinzip und Anlagentechnik,
- Verfahrensvarianten,
- Zusatzwerkstoffe,
- Schweißbeignung,
- Gestaltungs- und Fertigungshinweise,

- Qualitätsmerkmale, Gütesicherung und Prüfverfahren sowie
- Arbeits- und Gesundheitsschutz.

Schweißen dient dazu, eine Schweißverbindung oder eine geschweißte Beschichtung herzustellen. Voraussetzung für eine qualitätsgerechte Ausführung ist die Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit. Diese Einflussfaktoren umfassen sowohl die konstruktive Gestaltung und die stofflichen Gegebenheiten des zu schweißenden Produkts als auch die fertigungstechnischen Bedingungen. Die fachkundige Ausführung des Schweißvorganges kann nur dann zur qualitätsgerechten Verbindungen führen, wenn das Vorbereiten der Fügestelle und das Nachbereiten sowie Kontrollieren der Verbindung mit Sorgfalt und Umsicht ausgeführt werden. Eine komplexe Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse ist im realen Schweißprozess deshalb in jedem Fall unerlässlich.

Das vorgelegte Lehr- und Fachbuch wendet sich vor allem an Studierende des Maschinenbaus, der Produktionstechnik und der Konstruktionstechnik an Universitäten, Fachhochschulen, Berufsakademien und Weiterbildungseinrichtungen. Es soll ihnen die Möglichkeit geben, den Lernstoff aus den Vorlesungen zu vertiefen sowie Seminare und Übungen gezielt und fundiert vorzubereiten. Natürlich bietet es auch Studienbewerbern die Möglichkeit, sich über das Wissensgebiet „Schweißen und verwandte Verfahren“ umfangreich zu informieren. Nicht zuletzt wird es zur Auffrischung und als Nachschlagewerk für in der Praxis tätige Ingenieure und interessierte Leser nutzbar sein.

Das Buch präsentiert den aktuellen Stand des Fachgebietes und der Fachnormen. Die systemati-

sche Gliederung des Buches und die annähernd 800 Begriffe des Sachwortverzeichnisses geben dem Nutzer eine klare Orientierung und ermöglichen ein schnelles Auffinden der gesuchten Texte, Tafeln und Bilder.

Bei der aktualisierten 7. Auflage dieses Buches haben sehr fachkompetente Autoren mitgewirkt. Es wurden neueste technische Entwicklungen auf dem Gebiet der Schweißtechnik aufgenommen und das zitierte Norm- und Regelwerk dem aktuellen Stand angepasst.

Wir wünschen den Lesern, dass sie die Antworten auf ihre Fragen zu den Schweißverfahren finden und dass trotz der Fülle des Stoffs Klarheit und Verständnis dominieren.

Den Autoren und allen, die an der Fertigstellung dieses Fachbuches maßgeblich mitgearbeitet haben, wird für die gute Zusammenarbeit gedankt.

*Die Herausgeber*

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>Schweißen mit Lichtbogen</b> .....	<b>64</b>
<b>1 Grundlagen</b> .....	<b>15</b>	<b>3.1</b>	<i>Grundlagen der Lichtbogentechnik</i> .....	64
1.1 <i>Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580</i> .....	15	3.1.1	Physik des Lichtbogens .....	64
1.2 <i>Fügen durch Schweißen</i> .....	17	3.1.2	Zünden des Lichtbogens .....	67
1.3 <i>Wirkprinzipien beim Schweißen</i> .....	19	3.1.3	Betrieb des Lichtbogens .....	69
<b>2 Schweißbarkeit</b> .....	<b>29</b>	<b>3.2</b>	<i>Schweißstromquellen zum Lichtbogen-</i> <i>schweißen</i> .....	71
2.1 <i>Grundlagen und Einteilung</i> .....	29	3.2.1	Überblick .....	71
2.2 <i>Schweißbeignung von Stählen</i> .....	31	3.2.2	Schweißumformer .....	71
2.3 <i>Schweißsicherheit</i> .....	36	3.2.3	Schweißtransformatoren.....	72
2.3.1 <i>Konstruktive Gestaltung</i> .....	37	3.2.4	Schweißgleichrichter .....	73
2.3.2 <i>Beanspruchungszustand</i> .....	40	3.2.5	Schweißumrichter .....	75
2.3.3 <i>Regelwerke zur Auslegung von Schweißkonstruktionen</i> .....	40	3.2.6	Statische Kennlinien von Schweißstromquellen .....	76
2.3.4 <i>Anwendung von Finite-Elemente-Methoden zur Bemessung geschweißter Tragwerke</i> .....	43	3.2.7	Dynamische Eigenschaften von Schweißstromquellen.....	77
2.4 <i>Schweißmöglichkeit</i> .....	44	3.2.8	Regelungsprinzipien zur Arbeitspunktstabilisierung ..	78
2.4.1 <i>Grundlagen</i> .....	44	3.2.9	Modulationsarten bei Impulsstromquellen .....	79
2.4.2 <i>Vorbereitungen zum Schweißen</i> .....	45	3.2.10	Angaben auf dem Leistungsschild .....	80
2.4.3 <i>Durchführung des Schweißens</i> .....	47	<b>3.3</b>	<i>Schweißbrenner zum Lichtbogen-</i> <i>schweißen</i> .....	82
2.4.4 <i>Nacharbeiten beim Schweißen</i> .....	55	3.3.1	Stabelektrodenhalter .....	82
2.4.5 <i>Anwendung numerischer Simulationen für die Prozessanalyse beim Schweißen</i> .....	55	3.3.2	Stromkontakteinrichtung zum UP-Schweißen .....	83
2.5 <i>Qualitätssicherung beim Schweißen</i> .....	56	3.3.3	Schweißbrenner mit nicht-abschmelzender Elektrode ...	83
2.6 <i>Arbeitsschutz beim Schweißen</i> .....	59	3.3.4	Schweißbrenner mit abschmelzender Elektrode ...	85
2.7 <i>Schweißen im Produkt-, Umwelt- und Energiemanagement</i> .....	60	3.3.5	Bolzenschweißpistolen .....	86
		<b>3.4</b>	<i>Drahtvorschubsysteme zum Lichtbogenschweißen</i> .....	87
		3.4.1	Grundaufbau .....	87
		3.4.1.1	Stirnrollenantrieb.....	88
		3.4.1.2	Planetarantrieb.....	89

3.4.2	Bauformen mit potenzial- führender Drahtelektrode.....	90	3.7.3.6	Schweißparameter.....	125
3.4.2.1	Bauformen mit nicht potenzialführender Draht- elektrode.....	91	3.7.4	Fehler beim Lichtbogen- handschweißen.....	126
3.4.2.2	Drahtrichteinheiten.....	91	3.7.4.1	Häufige Ursachen und Fehlerbilder.....	126
3.5	<i>Zusatzwerkstoffe zum Lichtbogen- schweißen.....</i>	92	3.7.4.2	Poren.....	128
3.5.1	Stabelektroden.....	92	3.7.4.3	Schlackeeinschlüsse.....	128
3.5.2	Schweißstäbe.....	96	3.7.4.4	Bindefehler.....	128
3.5.3	Massivdrahtelektroden.....	97	3.7.4.5	Geometrische Unregel- mäßigkeiten.....	128
3.5.4	Fülldrahtelektroden.....	99	3.7.5	Gefährdungen für den Schweißer.....	129
3.5.5	Schweißpulver zum UP-Schweißen.....	103	3.8	<i>Wolfram-Inertgasschweißen (Prozess 141).....</i>	129
3.5.6	Schweißpulver zum Plasma- Pulver-Auftragschweißen (PTA).....	105	3.8.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik.....	130
3.5.7	Schweißbolzen.....	106	3.8.1.1	Funktionsweise.....	130
3.6	<i>Gase zum Lichtbogenschweißen.....</i>	108	3.8.1.2	Schutzgase.....	131
3.6.1	Aufgaben von Schutzgasen...	108	3.8.1.3	Wolframelektroden.....	133
3.6.2	Eigenschaften von Schutzgasen.....	108	3.8.1.4	Zusatzwerkstoff.....	135
3.6.3	Einteilung und Bezeichnung von Schutzgasen.....	109	3.8.1.5	Schweißstromquellen und Brenner-technik.....	136
3.6.4	Herstellung von Schutzgasen.....	111	3.8.2	Verfahrensvarianten.....	137
3.6.5	Lieferarten und Entnahme- stellen.....	111	3.8.2.1	Zünden des Lichtbogens.....	137
3.6.6	Kennzeichnung von Druckgasflaschen.....	112	3.8.2.2	Stromart und Polarität.....	138
3.7	<i>Lichtbogenhandschweißen (Prozess 111)</i>	113	3.8.2.3	Mechanisierungsgrad.....	141
3.7.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik.....	113	3.8.2.4	WIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoff.....	142
3.7.1.1	Funktionsweise.....	113	3.8.3	Anwendung.....	143
3.7.1.2	Schweißstromquellen.....	114	3.8.3.1	Verbindungsschweißen.....	143
3.7.1.3	Elektrodenhalter.....	115	3.8.3.2	Reparaturschweißen.....	143
3.7.1.4	Stabelektroden.....	115	3.8.3.3	WIG-Orbitalschweißen.....	143
3.7.2	Anwendung.....	120	3.8.3.4	WIG-Punktschweißen.....	145
3.7.2.1	Allgemeines.....	120	3.8.3.5	WIG-Engspaltschweißen.....	145
3.7.2.2	Reparaturschweißen.....	120	3.8.3.6	WIG-Auftragschweißen.....	146
3.7.2.3	Auftragschweißen.....	120	3.8.3.7	Sonderanwendungen.....	147
3.7.2.4	Verbindungsschweißen.....	120	3.8.4	Fertigungshinweise.....	147
3.7.3	Fertigungshinweise.....	120	3.8.4.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung.....	147
3.7.3.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung.....	120	3.8.4.2	Zündvorgang.....	148
3.7.3.4	Zündvorgang.....	121	3.8.4.3	Brennerführung.....	149
3.7.3.5	Führen der Elektrode.....	123	3.8.4.4	Heften.....	149
			3.8.4.5	Gasschutz.....	149
			3.8.4.6	Richtwerte.....	151
			3.8.5	Fehler beim WIG-Schweißen	151
			3.8.5.1	Gaseinschlüsse.....	151
			3.8.5.2	Bindefehler.....	153

3.8.5.3	Wolframeinschlüsse.....	153	3.10	<i>Metall-Schutzgasschweißen (Prozess 13)</i>	191
3.8.5.4	Oxideinschlüsse .....	153	3.10.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik.....	192
3.8.5.5	Häufige Fehlerbilder und Ursachen.....	153	3.10.1.1	Funktionsweise.....	192
3.8.6	Gefährdungen für den Schweißer .....	156	3.10.1.2	Schutzgase.....	192
3.9	<i>Plasmaschweißen (Prozess 15)</i> .....	157	3.10.1.3	Zusatzwerkstoff .....	196
3.9.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik.....	158	3.10.1.4	Schweißstromquellen und Brennertechnik.....	197
3.9.1.1	Funktionsweise.....	158	3.10.2	Lichtbogenarten.....	199
3.9.1.2	Prozess- und Schutzgase.....	161	3.10.2.1	Allgemein .....	199
3.9.1.3	Wolframelektroden .....	164	3.10.2.2	Kurzlichtbogen .....	200
3.9.1.4	Zusatzwerkstoff .....	165	3.10.2.3	Übergangslichtbogen.....	200
3.9.1.5	Schweißstromquellen und Brennertechnik.....	166	3.10.2.4	Sprühlichtbogen .....	200
3.9.2	Verfahrensvarianten.....	169	3.10.2.5	Impulslichtbogen.....	200
3.9.2.1	Zünden des Lichtbogens .....	169	3.10.2.6	Hochleistungs-Kurz- lichtbogen .....	201
3.9.2.2	Stromart und Polarität.....	170	3.10.2.7	Instabiler Lichtbogen.....	201
3.9.2.3	Mechanisierungsgrad.....	174	3.10.2.8	Rotierender Lichtbogen .....	201
3.9.2.4	Plasmaschweißen mit Zusatzwerkstoff .....	174	3.10.2.9	Hochleistungs-Sprüh- lichtbogen .....	202
3.9.2.5	Schmelzbadausbildung .....	176	3.10.2.10	Kräfte beim Werkstoff- übergang.....	202
3.9.3	Anwendung .....	177	3.10.3	Verfahrensvarianten.....	204
3.9.3.1	Verbindungsschweißen .....	177	3.10.3.1	Hochleistungsschweißen.....	204
3.9.3.2	Plasma-Punktschweißen .....	178	3.10.3.2	Energiereduzierte MSG- Prozesse .....	208
3.9.3.3	Plasma-Auftragschweißen ....	178	3.10.3.3	Modifizierte MSG- Impulsprozesse.....	210
3.9.3.4	Mikroplasmaschweißen .....	179	3.10.3.4	MSG-Hybridprozesse .....	212
3.9.3.5	Additive Fertigung .....	181	3.10.3.5	Zünden des Lichtbogens .....	214
3.9.4	Fertigungshinweise.....	182	3.10.3.6	Mechanisierungsgrad.....	214
3.9.4.1	Allgemeines.....	182	3.10.4	Anwendung .....	214
3.9.4.2	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung .....	183	3.10.4.1	Verbindungsschweißen .....	214
3.9.4.3	Zündvorgang.....	183	3.10.4.2	MSG-Engspaltschweißen.....	215
3.9.4.4	Brennerführung .....	184	3.10.4.3	MSG-Auftragschweißen.....	216
3.9.4.5	Heften.....	185	3.10.4.4	Additive Fertigung .....	217
3.9.4.6	Gasschutz .....	185	3.10.4.5	Sonderanwendungen .....	218
3.9.4.7	Richtwerte .....	187	3.10.5	Fertigungshinweise.....	219
3.9.5	Fehler beim Plasma- schweißen.....	188	3.10.5.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung .....	219
3.9.5.1	Gaseinschlüsse .....	188	3.10.5.2	Zündvorgang.....	220
3.9.5.2	Nahtunterwölbung.....	189	3.10.5.3	Brennerführung .....	220
3.9.5.3	Einbrandkerben.....	189	3.10.5.4	Heften.....	222
3.9.5.4	Oxideinschlüsse .....	189	3.10.5.5	Gasschutz .....	222
3.9.5.5	Häufige Fehlerbilder und Ursachen.....	190	3.10.5.6	Richtwerte .....	223
3.9.6	Gefährdungen für den Schweißer .....	190	3.10.6	Fehler beim MSG- Schweißen.....	224

3.10.6.1	Gaseinschlüsse .....	224	3.11.5.1	Häufige Fehlerbilder und Ursachen.....	269
3.10.6.2	Bindefehler .....	224	3.11.5.2	Durchschweißfehler.....	269
3.10.6.3	Häufige Fehlerbilder und Ursachen.....	227	3.11.5.3	Nahtüberhöhung .....	269
3.10.7	Gefährdungen für den Schweißer .....	227	3.11.5.4	Risse .....	270
3.11	<i>Unterpulverschweißen (Prozess 12)</i> .....	227	3.11.5.5	Lunker .....	271
3.11.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik.....	228	3.11.5.6	Schlackeeinschlüsse .....	271
3.11.1.1	Funktionsweise.....	228	3.11.6	Gefährdungen für den Schweißer .....	271
3.11.1.2	Schweißpulver .....	229	3.12	<i>Lichtbogenschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen</i> .....	271
3.11.1.3	Elektroden .....	244	3.12.1	Grundlagen.....	272
3.11.1.4	Stromquellen und Brennertechnik .....	246	3.12.2	Pressstumpfschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (Prozess 185).....	272
3.11.1.5	Mechanisierungseinrichtungen .....	248	3.12.2.1	Verfahrensprinzip .....	272
3.11.2	Verfahrensvarianten des Unterpulverschweißens .....	249	3.12.2.2	Anwendungsbereiche .....	272
3.11.2.1	Überblick .....	249	3.12.2.3	Ausrüstungen.....	273
3.11.2.2	UP-Eindrahtschweißen .....	249	3.12.2.4	Zusatzstoffe .....	273
3.11.2.3	UP-Doppeldrahtschweißen ...	249	3.12.2.5	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	273
3.11.2.4	UP-Tandemschweißen .....	252	3.12.2.6	Fertigungshinweise.....	273
3.11.2.5	UP-Mehrdrahtschweißen .....	252	3.12.3	Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (MBS-Schweißen) .....	274
3.11.2.6	UP-Bandschweißen .....	253	3.12.3.1	Verfahrensprinzip .....	274
3.11.2.7	UP-Kaltdrahtschweißen.....	254	3.12.3.2	Anwendungsbereiche .....	274
3.11.2.8	UP-Heißdrahtschweißen.....	254	3.12.3.3	Zusatzstoffe .....	274
3.11.2.9	UP-Schweißen mit Metallpulverzugabe.....	254	3.12.3.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	274
3.11.3	Anwendung des UP-Verfahrens.....	255	3.12.3.5	Fertigungshinweise.....	275
3.11.3.1	Überblick .....	255	3.13	<i>Lichtbogenbolzenschweißen</i> .....	275
3.11.3.2	Verbindungsschweißen .....	255	3.13.1	Grundlagen.....	276
3.11.3.3	UP-Auftragschweißen .....	255	3.13.2	Verfahrensprinzip .....	276
3.11.3.4	UP-Engspaltschweißen .....	256	3.13.2.1	Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung (Prozess 785) ..	276
3.11.3.5	UP-Quernahtschweißen.....	257	3.13.2.2	Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung (Prozess 786) .....	276
3.11.3.6	Verfahrensvergleich.....	258	3.13.2.3	Hubzündungs-Bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas (Prozess 783) .....	276
3.11.4	Fertigungshinweise.....	258	3.13.3	Anwendungsbereiche .....	277
3.11.4.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung .....	258	3.13.4	Zusatzstoffe .....	278
3.11.4.2	Schmelzbadabsicherung .....	261			
3.11.4.3	Heften.....	262			
3.11.4.4	An- und Auslaufbleche.....	262			
3.11.4.5	Werkstückneigung.....	263			
3.11.4.6	Zünden des Lichtbogens .....	263			
3.11.4.7	Nahtformung.....	264			
3.11.4.8	Richtwerte .....	266			
3.11.5	Fehler beim UP-Schweißen... ..	269			

3.13.5	Fertigungshinweise.....	279	4.1.5.3	Gasschläuche .....	312
3.13.6	Ausrüstungen.....	279	4.1.5.4	Sicherheitseinrichtungen .....	314
3.14	<i>Sensorik beim Lichtbogenschweißen.....</i>	281	4.2	<i>Einteilung der Verfahren der Autogentechnik nach DIN 8522.....</i>	316
3.14.1	Überblick .....	281	4.3	<i>Gasschmelzschweißen (Prozess 31) .....</i>	317
3.14.2	Taktile Sensoren.....	282	4.3.1	Grundlagen.....	318
3.14.3	Elektromagnetische Sensoren .....	283	4.3.2	Anwendung .....	319
3.14.4	Lasersensoren.....	284	4.3.2.1	Allgemeines.....	319
3.14.5	Lichtbogensensoren.....	285	4.3.2.2	Fugenformen.....	320
3.15	<i>Gefährdungen beim Lichtbogenschweißen.....</i>	287	4.3.2.3	Schweißpositionen .....	320
3.15.1	Elektrischer Strom .....	287	4.3.2.4	Werkstückdicken.....	320
3.15.2	Elektromagnetische Strahlung .....	288	4.3.3	Ausrüstung.....	320
3.15.3	Rauch, Stäube und Gase.....	289	4.3.4	Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe.....	322
3.15.4	Sauerstoffmangel.....	290	4.3.5	Technologische Merkmale ...	325
3.15.5	Spritzer und Schlacke.....	290	4.3.5.1	Nachrechtsschweißen (NR)...	325
3.15.6	Druckgasflaschen.....	290	4.3.5.2	Nachlinksschweißen (NL)....	327
4	<b>Schweißen mit Brenngas-Sauerstoff-Flamme .....</b>	<b>291</b>	4.4	<i>Gaspressschweißen (Prozess 47).....</i>	327
4.1	<i>Grundlagen der Autogentechnik.....</i>	291	4.4.1	Verfahrensprinzip.....	327
4.1.1	Autogenflamme.....	291	4.4.2	Anwendungsbereiche .....	328
4.1.1.1	Allgemeines.....	291	4.4.3	Zusatzstoffe .....	328
4.1.1.2	Verbrennung.....	291	4.4.4	Fertigungshinweise.....	328
4.1.1.3	Flammeneinstellung.....	293	4.4.5	Ausrüstungen.....	329
4.1.2	Autogenbrenner.....	295	5	<b>Schweißen mit Widerstandserwärmung .....</b>	<b>330</b>
4.1.2.1	Allgemeines.....	295	5.1	<i>Einteilung der Widerstandsschweißverfahren .....</i>	330
4.1.2.2	Brennerarten.....	295	5.2	<i>Konduktives Widerstandspressschweißen .....</i>	331
4.1.2.3	Betreiben der Autogenbrenner .....	297	5.2.1	Widerstandserwärmung durch konduktive Stromübertragung .....	331
4.1.2.4	Flammenstörungen.....	299	5.2.2	Ausrüstungen zum konduktiven Widerstandspressschweißen .....	332
4.1.3	Betriebsmittel der Autogentechnik .....	299	5.2.2.1	Aufbau einer konduktiven Widerstandsschweißmaschine .....	332
4.1.3.1	Allgemeines.....	299	5.2.2.2	Schweißstromquellen zum konduktiven Widerstandspressschweißen .....	333
4.1.3.2	Sauerstoff.....	299	5.2.2.3	Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen.....	338
4.1.3.3	Brenngase.....	301	5.2.3	Widerstandspunktschweißen (Prozess 21).....	339
4.1.3.4	Gegenüberstellung von Gasen der Autogentechnik .....	309	5.2.3.1	Verfahrensmerkmale.....	339
4.1.4	Sicherheitshinweise und -vorschriften für den Umgang mit Sauerstoff und Brenngasen .....	310			
4.1.5	Armaturen und Zubehör.....	311			
4.1.5.1	Allgemeines.....	311			
4.1.5.2	Druckminderer .....	311			

5.2.3.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung .....	340	5.2.6.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung .....	387
5.2.3.3	Schweißanlagenaufbau.....	342	5.2.6.3	Schweißanlagenaufbau.....	387
5.2.3.4	Elektroden zum Wider- standspunktschweißen.....	343	5.2.6.4	Schweißbeignung .....	389
5.2.3.5	Schweißbeignung .....	346	5.2.6.5	Konstruktive Gestaltung .....	389
5.2.3.6	Konstruktive Gestaltung .....	350	5.2.6.6	Fertigungshinweise.....	390
5.2.3.7	Fertigungshinweise.....	352	5.2.6.7	Qualitätssicherung.....	392
5.2.3.9	Prüfen der Schweiß- verbindung .....	359	5.2.6.8	Prüfen der Schweiß- verbindung .....	393
5.2.3.10	Verfahrensvarianten.....	361	5.2.7	Pressstumpfschweißen (Prozess 25).....	393
5.2.3.11	Arbeits- und Gesundheits- schutz .....	362	5.2.7.1	Verfahrensmerkmale .....	393
5.2.4	Rollennahtschweißen (Prozess 22).....	363	5.2.7.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung .....	394
5.2.4.1	Verfahrensmerkmale .....	363	5.2.7.3	Schweißanlagenaufbau.....	395
5.2.4.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung .....	363	5.2.7.4	Schweißbeignung .....	396
5.2.4.3	Schweißanlagenaufbau.....	364	5.2.7.5	Konstruktive Gestaltung .....	396
5.2.4.4	Elektroden zum Rollennaht- schweißen .....	366	5.2.7.6	Fertigungshinweise.....	397
5.2.4.5	Schweißbeignung .....	367	5.2.7.7	Qualitätssicherung.....	398
5.2.4.6	Konstruktive Gestaltung .....	368	5.2.7.8	Prüfen der Schweiß- verbindung .....	398
5.2.4.7	Fertigungshinweise.....	369	5.2.7.9	Verfahrensvariante Kammerschweißen.....	398
5.2.4.8	Qualitätssicherung.....	371	5.3	<i>Induktives Widerstandspressschweißen..</i>	399
5.2.4.9	Prüfen der Schweiß- verbindung .....	373	5.3.1	Widerstandserwärmung durch induktive Strom- übertragung .....	399
5.2.4.10	Verfahrensvarianten.....	373	5.3.2	Ausrüstungen zum induktiven Widerstands- pressschweißen .....	400
5.2.5	Buckelschweißen (Prozess 23).....	376	5.3.2.1	Aufbau einer induktiven Widerstandsschweiß- maschine.....	400
5.2.5.1	Verfahrensmerkmale .....	376	5.3.2.2	Schweißstromquellen zum induktiven Widerstands- pressschweißen .....	401
5.2.5.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung .....	377	5.3.2.3	Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen.....	401
5.2.5.3	Schweißanlagenaufbau.....	377	5.3.3	Induktives Hochfrequenz- schweißen (Prozess 743).....	402
5.2.5.4	Elektroden zum Buckel- schweißen .....	378	5.3.3.1	Verfahrensmerkmale .....	402
5.2.5.5	Schweißbeignung .....	379	5.3.3.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung .....	402
5.2.5.6	Konstruktive Gestaltung .....	380	5.3.3.3	Schweißbeignung .....	404
5.2.5.7	Fertigungshinweise.....	382	5.3.3.4	Fertigungshinweise.....	405
5.2.5.8	Qualitätssicherung.....	383	5.3.4	Induktives Stumpfschweißen (Prozess 741) .....	405
5.2.5.9	Prüfen der Schweiß- verbindung .....	385			
5.2.5.10	Verfahrensvarianten.....	385			
5.2.6	Abtrennstumpfschweißen (Prozess 24).....	386			
5.2.6.1	Verfahrensmerkmale .....	386			

5.4	<i>Elektroschlackeschweißen (Prozess 72) ..</i>	406	6.3.3	Weitere Verfahren der Elektronenstrahlmaterialbearbeitung .....	439
5.4.1	Grundlagen zum Elektroschlackeschweißen.....	406	6.3.4	Strahlenschutz.....	440
5.4.2	Elektroschlacke-Verbindungsschweißen .....	407	6.4	<i>Laserstrahlschweißen (Prozess 52).....</i>	441
5.4.2.1	Verfahrensprinzip/-beschreibung .....	407	6.4.1	Grundlagen des Laserstrahlschweißens .....	443
5.4.2.2	Schweißanlagenaufbau.....	408	6.4.1.1	Entstehung und Besonderheiten von Laserlicht .....	443
5.4.2.3	Schweißpulver .....	409	6.4.1.2	Eigenschaften des Laserlichts .....	445
5.4.2.4	Zusatzwerkstoff .....	410	6.4.2	Laseranlagen.....	445
5.4.2.5	Schweißbeignung .....	410	6.4.2.1	Laserstrahlquellen .....	445
5.4.2.6	Fertigungshinweise.....	410	6.4.2.2	Laserstrahlführung .....	452
5.4.2.7	Verfahrensvarianten.....	412	6.4.2.3	Fokussierende Optiken.....	453
5.4.3	Elektroschlacke-Auftragsschweißen.....	413	6.4.2.4	Bewegungseinrichtungen ....	454
5.4.3.1	Verfahrensprinzip/-beschreibung .....	413	6.4.2.5	Steuerung und Bedienung....	454
5.4.3.2	Schweißanlagenaufbau.....	414	6.4.3	Anwendung des Laserstrahlschweißens .....	455
5.4.3.3	Schweißpulver .....	415	6.4.3.1	Tiefschweißeffekt .....	455
5.4.3.4	Zusatzwerkstoff .....	415	6.4.3.2	Vorbereitung der Werkstücke .....	456
5.4.3.5	Fertigungshinweise.....	415	6.4.3.3	Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis .....	456
6	<b>Schweißen mit Strahlen .....</b>	<b>417</b>	6.4.3.4	Schweißbeignung metallischer Werkstoffe .....	462
6.1	<i>Grundlagen der Strahltechnik .....</i>	417	6.4.3.5	Industrielle Anwendung .....	464
6.2	<i>Lichtstrahlschweißen – Schweißen mit inkohärentem Licht (Prozess 75) .....</i>	418	6.4.4	Weitere Verfahren der Lasermaterialbearbeitung ....	465
6.3	<i>Elektronenstrahlschweißen (Prozess 51) .....</i>	419	6.4.4.1	Überblick .....	465
6.3.1	Grundlagen des Elektronenstrahlschweißens.....	420	6.4.4.2	Laserstrahlschneiden .....	466
6.3.1.1	Entstehung und Besonderheiten des Elektronenstrahls.....	420	6.4.4.3	Additive Fertigung mit dem Laserstrahl.....	468
6.3.1.2	Elektronenstrahlerzeugung..	421	6.4.5	Strahlenschutz.....	473
6.3.1.3	Elektronenstrahlführung .....	422	6.4.6	Gegenüberstellung Elektronenstrahlschweißen – Laserstrahlschweißen.....	474
6.3.1.4	Elektronenstrahlschweißanlagen.....	423	7	<b>Schweißen durch Bewegungsenergie</b>	<b>478</b>
6.3.2	Anwendung des Elektronenstrahlschweißens.....	427	7.1	<i>Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung kinetischer Energie.....</i>	478
6.3.2.1	Tiefschweißeffekt .....	427	7.2	<i>Reibschweißen.....</i>	478
6.3.2.2	Vorbereitung der Werkstücke .....	429	7.2.1	Rotationsreibschweißen (Prozess 42).....	478
6.3.2.3	Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis .....	431	7.2.1.1	Verfahrensprinzip .....	479
6.3.2.4	Schweißbeignung metallischer Werkstoffe .....	435			
6.3.2.5	Industrielle Anwendung .....	438			

7.2.1.2	Ausrüstungen.....	479	<b>8</b>	<b>Schweißen durch festen Körper.....</b>	<b>509</b>
7.2.1.3	Anwendungsbereich .....	482	<i>8.1</i>	<i>Grundlagen zur schweißtechnischen</i>	
7.2.1.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	483	<i>8.2</i>	<i>Nutzung von Heizelementen .....</i>	509
7.2.1.5	Fertigungshinweise.....	484		<i>Heizelementschweißen.....</i>	509
7.2.1.6	Richtwerte .....	487	8.2.1	Verfahrensprinzip .....	509
7.2.2	Linearreibschweißen .....	487	8.2.2	Anwendungsbereich, Ausrüstungen .....	510
7.3	<i>Rührreibschweißen (Prozess 43).....</i>	489	8.2.3	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	511
7.3.1	Verfahrensprinzip .....	489	8.2.4	Fertigungshinweise.....	511
7.3.2	Ausrüstungen.....	490			
7.3.3	Anwendungsbereiche .....	491	<b>9</b>	<b>Schweißen mit Metallschmelzen .....</b>	<b>512</b>
7.3.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	492	<i>9.1</i>	<i>Grundlagen der schweißtechnischen</i>	
7.3.5	Fertigungshinweise.....	493		<i>Nutzung von Metallschmelzen .....</i>	512
7.3.6	Punktreibschweißen .....	493	<i>9.2</i>	<i>Gießschweißen (Thermitschweißen).....</i>	512
7.3.6.1	Verfahrensprinzip .....	493	9.2.1	Aluminothermisches Schmelzschweißen (Prozess 71).....	512
7.3.6.2	Anwendungsbereiche .....	494	9.2.1.1	Verfahrensprinzip .....	512
7.4	<i>Ultraschallschweißen (Prozess 41) .....</i>	495	9.2.1.2	Anwendungsbereich .....	513
7.4.1	Verfahrensprinzip .....	495	9.2.1.3	Ausrüstungen.....	514
7.4.2	Ausrüstungen.....	496	9.2.1.4	Fertigungshinweise.....	514
7.4.3	Anwendungsbereiche .....	497	9.2.2	Aluminothermisches Pressschweißen .....	515
7.4.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	498	9.2.2.1	Verfahrensprinzip .....	515
7.4.5	Fertigungshinweise.....	498	9.2.2.2	Anwendungsbereich .....	515
7.5	<i>Kaltpressschweißen (Prozess 48) .....</i>	498	9.2.2.3	Fertigungshinweise.....	515
7.5.1	Verfahrensprinzip.....	500	9.3	<i>Besondere Gefährdungen.....</i>	516
7.5.2	Anwendungsbereich.....	501			
7.5.3	Konstruktive Gestaltung.....	502	<b>10</b>	<b>Schweißen durch Diffusion.....</b>	<b>517</b>
7.5.4	Fertigungshinweise .....	503	<i>10.1</i>	<i>Grundlagen zur schweißtechnischen</i>	
7.6	<i>Sprengschweißen (Prozess 441).....</i>	503		<i>Nutzung der Diffusion .....</i>	517
7.6.1	Verfahrensprinzip .....	504	<i>10.2</i>	<i>Diffusionsschweißen (Prozess 45).....</i>	517
7.6.2	Anwendungsbereich .....	505	10.2.1	Verfahrensprinzip .....	518
7.6.3	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit .....	505	10.2.2	Anwendungsbereich .....	519
7.6.4	Fertigungshinweise.....	506	10.2.3	Konstruktive Gestaltung .....	520
7.6.5	Spezielle Gefährdungen .....	506	10.2.4	Fertigungshinweise.....	520
7.7	<i>Magnetpulsschweißen (Prozess 442) .....</i>	506			
7.7.1	Verfahrensprinzip .....	507			
7.7.2	Anwendungsbereich .....	507			
7.7.3	Spezielle Gefährdungen .....	508			
				<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>523</b>
				<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>541</b>

# 1

## Grundlagen

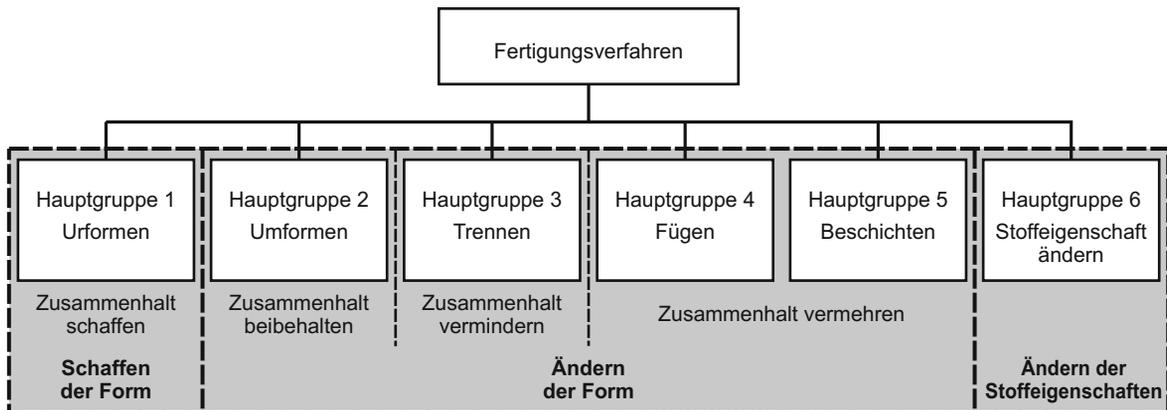
### 1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Produktion (lat.: producere = hervor führen) ist der Prozess der Transformation von Ausgangsstoffen (Rohstoffen) in fertige bzw. weiter zu verarbeitende Produkte bzw. (Wirtschafts-)Güter. Dies erfolgt unter Einsatz von Energie sowie mithilfe spezifischer Produktionsmittel – sogenannter **Produktionstechnik** – nach festgelegtem Schema, d. h. auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse in Verfahren und Prozessen, die vom Menschen technologisch beherrscht werden. Die für die Produktion von Gütern mit geometrisch bestimmter Form aus festen Stoffen erforderlichen Bearbeitungsvorgänge werden als **Fertigungsverfahren** bezeichnet. Fertigungsverfahren können durch die Arbeitskraft des Menschen manuell vollzogen werden oder mechanisiert bzw. automatisiert erfolgen. Der Fortschritt in der

industriellen Produktionstechnik wird maßgeblich durch Mechanisierung bzw. Automatisierung des **Fertigungsprozesses** sowie der Optimierung seiner Elemente (Arbeitsgegenstand – Arbeitsmittel – Arbeitskraft) zueinander und zur Fertigungsorganisation bestimmt.

Die Vielzahl der Fertigungsverfahren zwingt zur Einordnung in ein überschaubares System, in dem sowohl die bislang bekannten, aber auch die in der Zukunft neu entwickelten Verfahren Platz finden. Die Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt entsprechend DIN 8580 in sechs Hauptgruppen: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaft ändern (Bild 1.1).

Die Fertigungsverfahren lassen sich u. a. nach der Art ihrer Wirkungsweise auf den zu bearbeitenden Werkstoff unterscheiden. Dabei bestehen wechselseitige Anforderungen zwischen dem Fertigungsverfahren und dem Werkstoff. So sind einerseits nicht alle Verfahren auf jeden Werkstoff anwendbar und andererseits lässt sich nicht jeder Werkstoff mit jedem



**Bild 1.1** Einteilung der Fertigungsverfahren nach Art des Zusammenhalts und deren Wirkungsweise nach DIN 8580

**Tabelle 1.1** Teiloperationen des Montageprozesses nach VDI 2860

Montage				
Fügen (DIN 8593)	Handhaben (VDI 2860)	Kontrollieren (VDI 2860)	Justieren durch	Sonderoperation
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zusammensetzen</li> <li>▪ Füllen</li> <li>▪ Anpressen und Einpressen</li> <li>▪ Fügen durch Urformen</li> <li>▪ Fügen durch Umformen</li> <li>▪ Fügen durch Schweißen</li> <li>▪ Fügen durch Löten</li> <li>▪ Fügen durch Kleben</li> <li>▪ textiles Fügen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Speichern</li> <li>▪ Mengen verändern</li> <li>▪ Bewegen</li> <li>▪ Sichern</li> <li>▪ Kontrollieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Messen</li> <li>▪ Prüfen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einformen</li> <li>▪ Umformen</li> <li>▪ Trennen</li> <li>▪ Fügen von Ausgleichsteilen</li> <li>▪ Einstellen</li> <li>▪ Nachbehandeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Markieren</li> <li>▪ Erwärmen</li> <li>▪ Kühlen</li> <li>▪ Reinigen</li> <li>▪ Entgraten</li> <li>▪ Bedrucken</li> <li>▪ Abdecken</li> <li>▪ Abziehen</li> <li>▪ Auspacken</li> <li>▪ Ölen</li> <li>▪ Einsprühen</li> <li>▪ Abdichten</li> </ul>

Fertigungsverfahren sinnvoll bearbeiten. Diese Einflüsse und Wechselbeziehungen müssen sowohl bei der Produkt- und Fertigungsprozessgestaltung als auch beim Qualitätsmanagement berücksichtigt werden. Für das Fügen und besonders beim stoffschlüssigen Fügen, wie z. B. Schweißen, Löten, Kleben u. a., besteht in besonderem Maße diese Abhängigkeit, da hier neben Bauteilen aus artgleichen Werkstoffen auch Werkstoffkombinationen gefügt werden. Dies zeigt auch, dass das Fügen eine besondere, grundlegende Bedeutung besitzt. Einerseits existieren kaum monolithische Produkte und andererseits ermöglicht das Fügen die Herstellung komplexer Produkte aus einzelnen, fertigungstechnisch einfacher herzustellenden Bauteilen und erreicht damit außerdem eine Flexibilität in der Prozesskette.

Neben der Einteilung des Fügens in die Gruppe der Fertigungsverfahren ist Fügen auch eine primäre Operation der **Montage**, zu der auch sekundäre Vorgänge wie Handhaben, Kontrollieren, Justieren sowie weitere Sonderoperationen, wie z. B. Reinigen oder Markieren, gehören (Tabelle 1.1). Das Fügen bewirkt bei der Montage, d. h. beim gezielten Zusammenbau, den aktiven Fertigungsfortschritt am

Werkstück bzw. Arbeitsgegenstand hin zum Produkt, d. h., der Zusammenhalt zwischen den Einzelteilen und Baugruppen wird örtlich geschaffen und insgesamt vermehrt.

Unterschiedliche Werkstoffe, wie Metall, Holz, Kunststoff, Textil oder Papier, erfordern jeweils spezifische Fügeverfahren. Gefügt werden können zwei Bauteile **unmittelbar**, d. h. ohne zusätzliche Stoffe, aber auch **mittelbar** mithilfe eines **Verbindungselements**, wie z. B. Schraube, Niet, Nagel oder Spreizring, bzw. eines **Zusatzwerkstoffes** wie Vergussmittel, Schweißelektrode oder Kitt. Dementsprechend gibt es eine große Anzahl verschiedenartiger Fügeverfahren.

Die Unterteilung der Fertigungsverfahrenshauptgruppe „Fügen“ in Gruppen erfolgt in DIN 8593-0 nach dem Ordnungsgesichtspunkt „Art des Zusammenhalts unter Berücksichtigung der Art der Erzeugung“. Die Arten des Zusammenhalts lassen sich dabei unterscheiden in

- Schwerkraft (Reiben), Formschluss oder Federkraft beim Zusammensetzen,
- Einschluss in einen das Füllgut umschließenden Körper beim Füllen,

- Kraftschluss beim An- und Einpressen,
- Formschluss, der durch Urformen bzw. Umformen hervorgerufen wird,
- Stoffverbindung beim Schweißen und Löten,
- Adhäsion beim Kleben sowie
- Formschluss und/oder Kraftschluss bei textilen Faserstoffen.

Daraus resultierend ergibt sich die Einteilung der Hauptgruppe „Fügen“ in neun Verfahrensgruppen (Bild 1.2).

Für das **Fügen** wurde folgende Definition entwickelt:

Fügen ist ein auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken (Fügeteilen) geometrisch bestimmter fester Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff, dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.

Der Bereich der Fügeteile, in dem die Verbindung gezielt hergestellt wird, ist die **Fügestelle**. Diese variiert je nach Fügeverfahren in ihren Abmessungen und spezifischen Eigenschaften. Als **Fügevorgang** wird die zeitliche Folge der technologischen Operationen beim Fügen bezeichnet, wie z. B. „In-Lagebringen“, „In-Lage-halten“ etc. Der **Fügeprozess** ist die Wechselbeziehung der Elemente des Prozesses sowie deren Wirkung aufeinander in ihrer zeitlichen Folge. Elemente des Fügeprozesses sind u. a. Arbeitsgegenstand (Fügeteile), Arbeitsmittel (z. B. Schweißbrenner, Zusatzwerkstoff etc.), Arbeitskraft (des Menschen) und Arbeitsorganisation (z. B. Gruppenarbeit).

## 1.2 Fügen durch Schweißen

Beim Fügen durch **Schweißen** wird der Zusammenhalt durch Stoffverbinden unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz erzielt. Dies wird teilweise durch den Einsatz von Schweißhilfsstoffen wie Schutzgasen, Schweißpulver oder Pasten erst ermöglicht oder kann durch diese erweitert werden. Kennzeichnend für eine

Schweißverbindung ist, dass alle Fügeteile sowie eventuell verwendete Zusatzwerkstoffe aus artgleichen bzw. artähnlichen Werkstoffen bestehen und daher auch näherungsweise gleiche Schmelztemperaturen aufweisen.

Die Fügestelle wird beim Schweißen als **Schweißzone** bezeichnet und umfasst das **Schweißgut** (tatsächlich aufgeschmolzener Werkstoff) und die **Wärmeeinflusszone (WEZ)**. Die WEZ ist der durch das Schweißen verfahrensbedingt thermisch beeinflusste Bereich direkt neben dem Schweißgut, in dem es infolge der thermischen Beeinflussung zu werkstofflichen Veränderungen (z. B. Kornveränderungen, Diffusionsvorgängen) kommen kann.

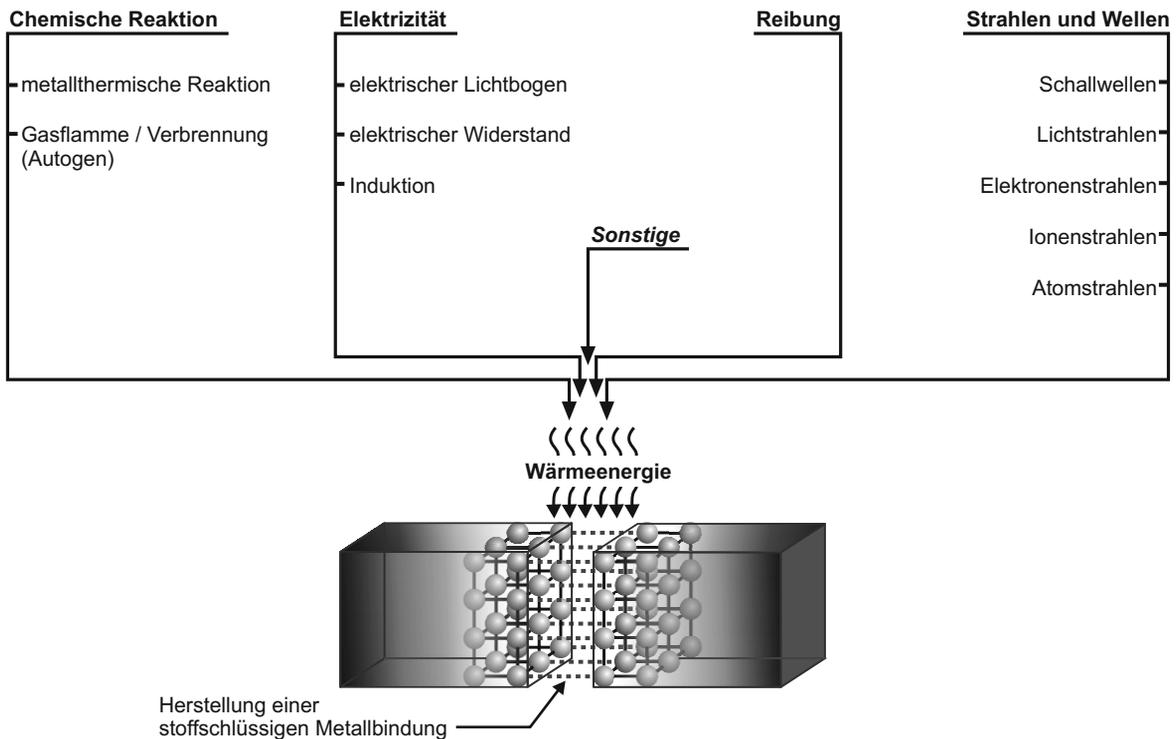
Die zum Schweißen erforderliche Energie wird stets von außen in die Fügeteile eingebracht, wobei dies verfahrensabhängig mehr oder weniger lokal an der eigentlichen Fügestelle erfolgt. Dabei können verschiedene physikalische Energieformen Anwendung finden. Die für das Schweißen häufigste Form ist **thermische Energie**, die als **Wärme** zugeführt wird. Das ermöglicht in vielen Fällen den Fügevorgang bzw. fördert in der Regel den Fügeprozess. Typische Formen der Wärmeerzeugung sind chemische Reaktionen, die Wirkung des elektrischen Stroms, Reibung, Wirkung von Strahlen u. a. (Bild 1.3).

Beim Schweißen unter ausschließlicher Anwendung von thermischer Energie wird der Werkstoff an der Fügestelle lokal bis zum Schmelzpunkt der Fügeteile erwärmt, dies führt zum Stoffverbinden. Dieser Prozess wird aus diesem Grund als **Schmelzschiessen** bezeichnet.

Neben der Einwirkung von Wärme kann der Schweißvorgang auch unter der Wirkung von Kraft oder Druck auf die Fügestelle bzw. einer Relativbewegung der Fügeteile erfolgen. Häufig ist eine zusätzliche Wärmeeinbringung erforderlich. Derartige Prozesse werden als **Pressschweißen** bezeichnet.

1 Urformen DIN	2 Umformen DIN 8582	3 Trennen	4 Fügen DIN 8593-0	5 Beschichten	6 Stoffeigen- schaft ändern
1.1 Urformen aus dem flüssigen Zustand	2.1 Druckumformen DIN 8583-1	3.1 Zerteilen DIN 8588	4.1 Zusammensetzen DIN 8593-1	5.1 Beschichten aus dem flüssigen Zustand	6.1 Verfestigen durch Umformen
1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand	2.2 Zugdruckumformen DIN 8584-1	3.2 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden DIN 8589-0	4.2 Füllen DIN 8593-2	5.2 Beschichten aus dem plastischen Zustand	6.2 Wärmebehandeln DIN EN ISO 4885
1.3 Urformen aus dem breiigen Zustand	2.3 Zugumformen DIN 8585-1	3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden DIN 8589-0	4.3 An- und Einpressen DIN 8593-3	5.3 Beschichten aus dem breiigen Zustand	6.3 Thermo- mechanisches Behandeln
1.4 Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	2.4 Biegeumformen DIN 8586	3.4 Abtragen DIN 8590	4.4 Fügen durch Urformen DIN 8593-4	5.4 Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	6.4 Sintern Brennen
1.5 Urformen aus dem span- oder faserförmigen Zustand	2.5 Schubumformen DIN 8587	3.5 Zerlegen DIN 8591	4.5 Fügen durch Umformen DIN 8593-5	Die Gruppe 5.5 entfällt, da Beschichten aus dem spanförmigen Zustand nicht vorkommt.	6.5 Magnetisieren
Da Schweißen und Löten beim Urformen im Gegensatz zum Beschichten nicht zur Anwendung kommen, bleiben die Gruppennummern 1.6 und 1.7 frei.		3.6 Reinigen DIN 8592	4.6 Fügen durch Schweißen DIN 8593-6		5.6 Beschichten durch Schweißen
		4.7 Fügen durch Löten DIN 8593-7 DIN ISO 857-2	5.7 Beschichten durch Löten	6.7 Photo- chemische Verfahren	
1.8 Urformen aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand			4.8 Kleben DIN 8593-8	5.8 Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (Vakuumbeschichten)	
1.9 Urformen aus dem ionisierten Zustand			4.9 Textiles Fügen	5.9 Beschichten aus dem ionisierten Zustand	

Bild 1.2 Detaillierte Übersicht der Fertigungsverfahren nach DIN 8580



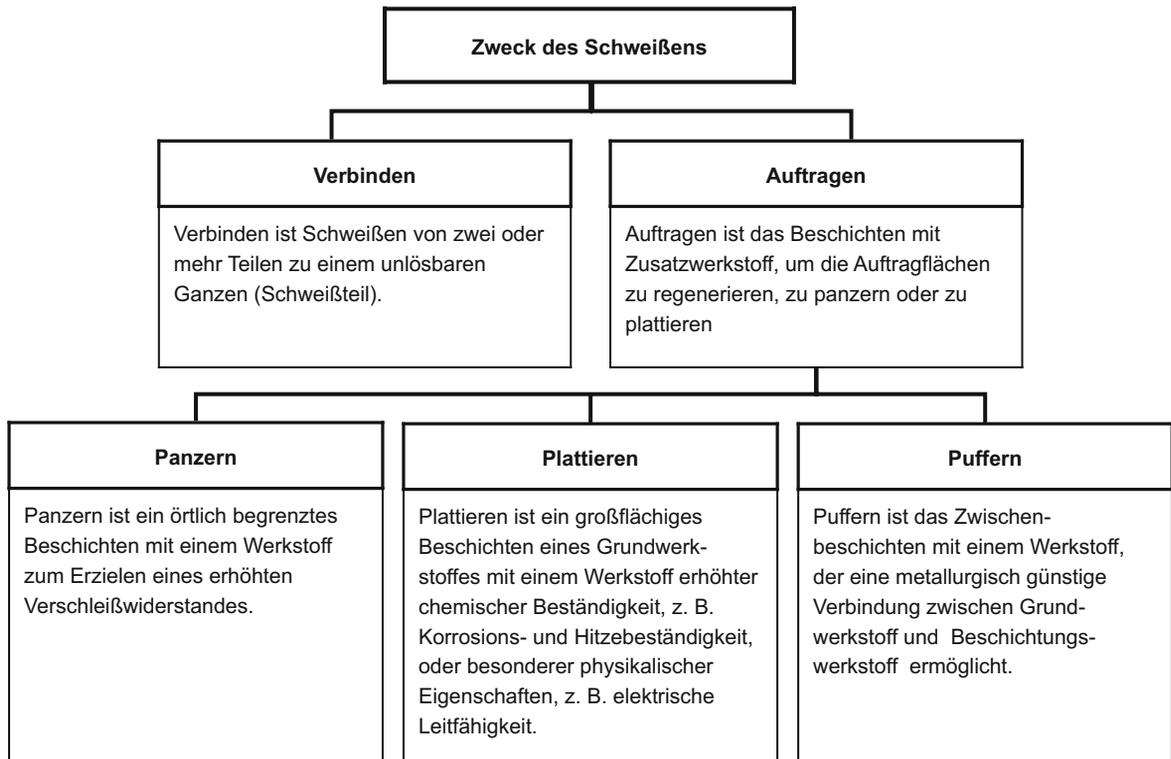
**Bild 1.3** Formen der Wärmeerzeugung an der Fugestelle

Eine weitere Unterscheidung der Schweißverfahren nach dem Grad ihrer Mechanisierung und Automatisierung ist ebenso möglich, wie auch nach der Anwendung – d. h. dem Zweck des Schweißens – in Verbindungs- und Auftragschweißverfahren (Bild 1.4). Das Verbindungsschweißen dient der Herstellung von Schweißverbindungen zwischen mindestens zwei Fügeteilen. Auch das **Beschichten** eines Bauteils mit artähnlichem Zusatzwerkstoff, aber beispielsweise höherem Verschleißwiderstand wird als Schweißen (**Auftragschweißen**) bezeichnet. Das Auftragschweißen ist demnach ein stoffschlüssiges Beschichten von Flächen, das je nach der Art der Zusammensetzung des Schweißzusatzes unterschieden wird in Panzern, Plattieren und Puffern.

## 1.3 Wirkprinzipien beim Schweißen

Die Schweißverbindung ist eine stoffschlüssige Verbindung. Sie beruht auf der Wirkung zwischenatomarer und zwischenmolekularer Kräfte. Sie zählt zu den **unlöslichen Verbindungen**, die nur durch Materialzerstörung getrennt werden können, z. B. durch mechanische oder thermische Trennverfahren.

Im Folgenden werden ausschließlich Metalle betrachtet. Deren Zusammenhalt basiert auf sogenannter Metallbindung, einer Sonderform der chemischen Bindung, wie sie bei Metallen und in deren Legierungen auftritt. Diese ist gekennzeichnet durch frei bewegliche Elektronen (sogenanntes „**Elektronengas**“) innerhalb eines Metallgitters aus Metallionen, was zugleich auch Ursache für Stromleitfähigkeit, Duktilität (Schmiedbarkeit, Verform-



**Bild 1.4** Einteilung des Schweißens nach dessen Zweck

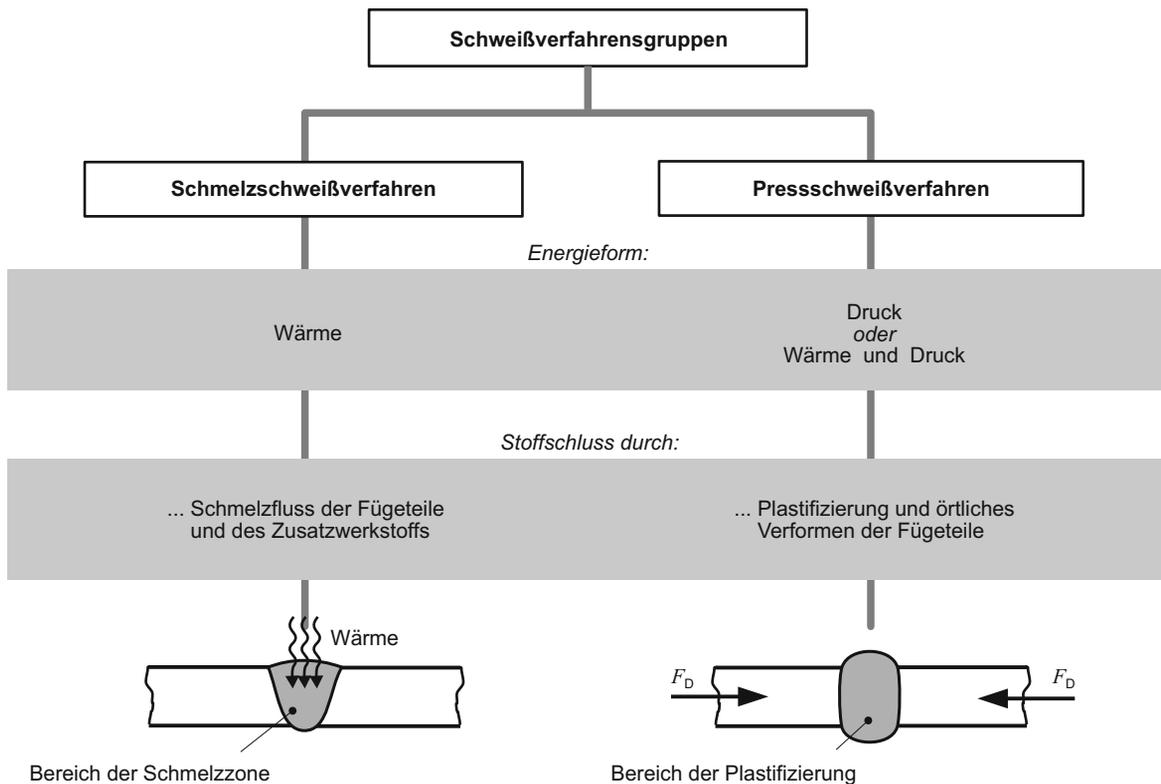
barkeit) und den metallischen Glanz dieser Werkstoffe ist. Die eigentliche Bindung innerhalb des Metalls erfolgt durch Anziehungskräfte zwischen Metallionen und freien Elektronen.

Um eine Verbindung zweier fester Metalle herzustellen, ist es notwendig, die Metallgitterstruktur beider Fügepartner sehr stark anzunähern, damit die chemische Bindung der Metallionen an der Oberfläche des Werkstoffes (in der Fügestelle) wirksam wird. Zusätzlich zur Annäherung ist aber auch die Entfernung jeglicher Fremdschichten auf der Oberfläche (z. B. Oxide, Verunreinigungen etc.) der beiden Fügepartner im Bereich der Fügestelle erforderlich. Diese Anforderungen können u. a. durch das Aufschmelzen des Werkstoffes bzw. durch starke Druckeinwirkung oder auch Relativbewegung der Fügepartneroberflächen zueinander erzielt werden.

Schmelz- und Pressschweißen unterscheiden sich in deren physikalischem Ablauf. Das **Schmelzschweißen** ist ein Fügen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Das **Pressschweißen** erfolgt unter Anwendung von Kraft ohne oder mit Schweißzusatz. Örtlich begrenztes Erwärmen der Fügepartner an der Fügestelle – auch bis zum Schmelzpunkt – ermöglicht oder erleichtert das Schweißen.

Bild 1.5 zeigt die **Wirkpaarungen** zwischen thermischer und mechanischer Energie, die je nach fertigungstechnischer und gerätetechnischer Umsetzung eine Einteilung der Schweißverfahren nach den **Wirkprinzipien** für das Pressschweißen und für das Schmelzschweißen zulassen.

In Tafel 1.1 werden ausgewählte Schweißverfahren entsprechend dieser Einteilung nach den Wirkprinzipien dargestellt. Diese Einteilung bei der



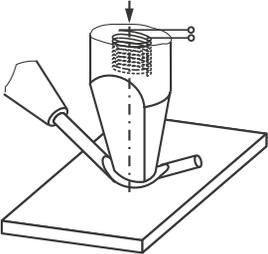
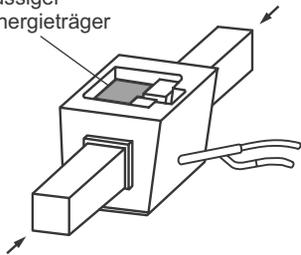
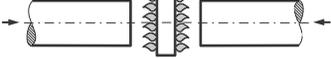
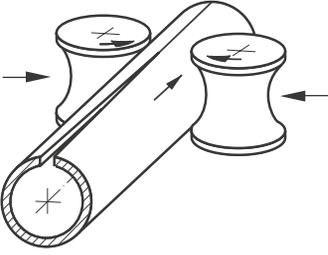
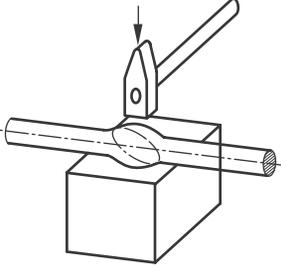
**Bild 1.5** Wirkpaarungen beim Schweißen

Herstellung der Schweißverbindung ist ebenfalls Grundlage des Aufbaus dieses Buches in den nachfolgenden Kapiteln.

Für die in Tafel 1.1 dargestellten Verfahren wird neben der Verfahrensbezeichnung – sofern vorhanden – auch die jeweilige **Ordnungsnummer** (ONr.) für Schweißverfahren nach DIN EN ISO 4063 angegeben, die auch Anwendung in den weiteren Kapiteln dieses Buches findet. Die Gliederung dieser

höchstens dreistelligen Ordnungsnummer basiert in der ersten Ziffer auf dem physikalischen Grundprinzip, d.h. dem eingesetzten Energieträger zur Durchführung des Schweißens, wird aber gleichfalls für das thermische Schneiden sowie für Lötverfahren angewendet. Die nachfolgenden Ziffern (eine oder zwei) kennzeichnen gegebenenfalls vorhandene Verfahrensuntergruppen und -varianten.

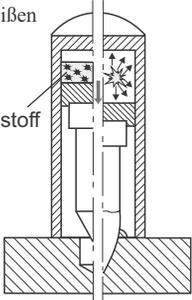
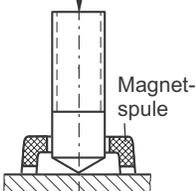
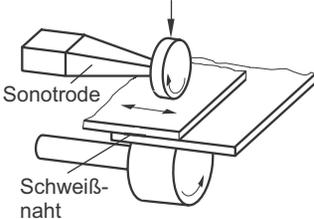
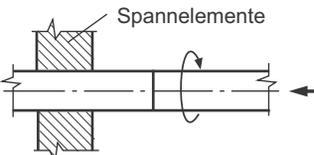
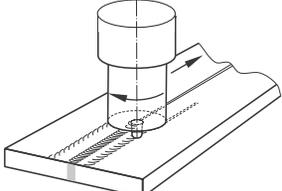
**Tafel 1.1** Wirkprinzipien beim Schmelz- und Pressschweißen (in Anlehnung an DIN 8593-6)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel	
6.1 Press- schweißen	6.1.1 ... durch feste Körper	Heizelement- schweißen	Fügen von Werkstücken durch Anpressen mit einem beheizten Schweißwerkzeug		
	6.1.2 ... durch Flüssigkeit	Gießpress- schweißen	Fügen, indem die Fügestelle der Werkstücke durch Umgießen mit einem flüssigen Energieträger erwärmt und ver- presst wird		
	6.1.3 ... durch Gas	Gaspress- schweißen [ONr. 47]		Fügen durch Ver- pressen von Werk- stücken mit durch Flammen erwär- mten Stoßflächen	
		Walz- schweißen		Fügen, indem erwärmte Werk- stücke gemeinsam gewalzt werden	
		Feuer- schweißen	Fügen von Werk- stücken durch Freiformen, Gesenkformen oder Durchdrücken der durch Feuer erwär- mten Stoßflächen		

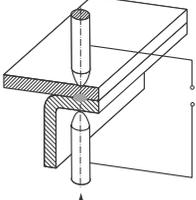
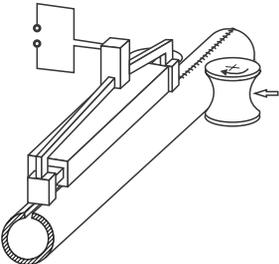
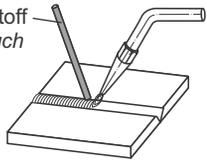
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.3 ... durch Gas	Diffusions- schweißen [ONr. 45]	Fügen von Werk- stücken im Vaku- um, unter Schutz- gas oder in einer Flüssigkeit auf- grund von Diffu- sion an den Stoß- flächen durch Wärme und Kraft	<p>Heizelemente</p> <p>Werkstücke</p> <p>Arbeits- kammer</p>
	6.1.4 ... durch elektrische Gasent- ladung	Lichtbogen- press- schweißen	Fügen durch Ver- pressen von Werk- stücken, die durch einen kurzzeitig brennenden Licht- bogen erwärmt wurden	<p>Bolzenschweißen [ONr. 78]</p> <p>Licht- bogen</p> <p>alternative Verfahrensvariante: Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr.185]</p>
	6.1.5 ... durch Strahlung	Lichtstrahl- Extrusions- schweißen  <i>Nur für Kunststoffe bekannt</i>	Kunststoff wird über einen durch Lichtstrahl beheizten Extruder zum Schweißkopf geführt, der die beheizte Masse zwischen die vorher erwärmten Stoß- flächen drückt	<p>Schweiß- schuh</p> <p>Zuführung Schweiß- zusatz</p> <p>Schweiß- gerät</p> <p>Vorwärmung</p>
	6.1.6 ... durch Bewegung	Kaltpress- schweißen [ONr. 48]	Fügen, indem Werkstücke an der Fügestelle durch stetige Kraftein- wirkung ohne Wärme stark plastisch verformt werden	

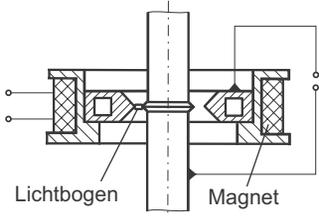
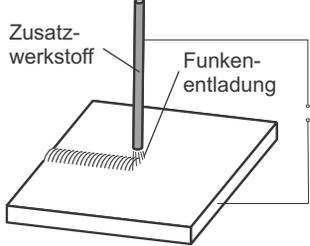
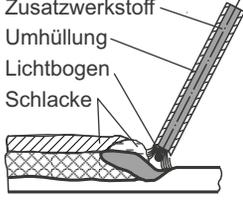
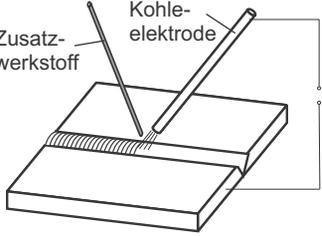
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.6 ... durch Bewegung	Schock- schweißen	Fügen von Werk- stücken durch schlagartige Krafteinwirkung	Sprengschweißen [ONr. 441]  
				Magnetpuls- schweißen [ONr. 442]  
		Ultraschall- schweißen [ONr. 41]	Fügen durch Kraft und schwingende Bewegung mit Frequenzen im Ultraschallbereich ( $f \geq 20$ kHz)	
		Reib- schweißen [ONr. 42]	Fügen, indem die durch Reibung erwärmten Werkstücke miteinander verpresst werden	<i>mind. ein Werkstück wird bewegt:</i> Rotationsreibschweißen   <i>Werkstücke werden nicht bewegt:</i> Rührreibschweißen [ONr. 43] 

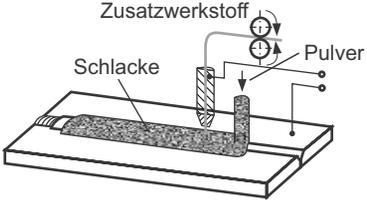
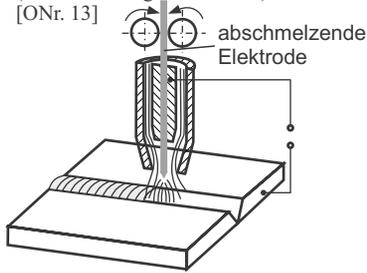
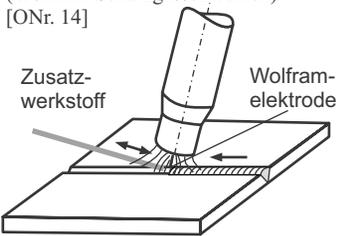
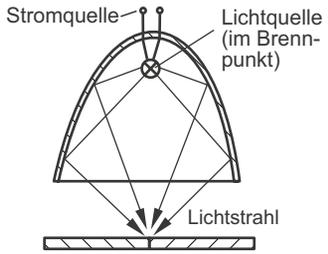
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.7 ... durch elek- trischen Strom	Widerstands- press- schweißen	Fügen von Werk- stücken durch partielle elektrische Widerstandserwär- mung in der Schweißzone und nachfolgendes Verpressen	<p><i>konduktives Pressschweißen:</i> Widerstandspunktschweißen [ONr. 21]</p>  <p><i>andere Verfahrensvarianten:</i> Buckel-, Rollennaht-, Rolltransformator-, Schleifkontakt-, Abbrennstumpf- und Pressstumpfschweißen</p>
				<p><i>induktives Pressschweißen:</i> Induktionsschweißen [ONr. 74]</p> 
6.2 Schmelz- schweißen	6.2.1 ... durch feste Körper	<i>kein Prozess bekannt</i>		
	6.2.2 ... durch Flüssigkeit	Gieß- schmelz- schweißen	Fügen, indem die eingeförmte Füge- stelle durch Um- gießen mit einem flüssigen Zusatz- werkstoff ange- schmolzen wird	<p>flüssiger Zusatzwerkstoff</p> 
	6.2.3 ... durch Gas	Gasschmelz- schweißen [ONr. 3]	Fügen durch Erzeu- gen des Schweißba- des mit einer kon- zentrierten Brenn- gas-O <sub>2</sub> -Flamme	<p>Zusatzwerkstoff (alternativ auch Pulver ein- setzbar)</p> 

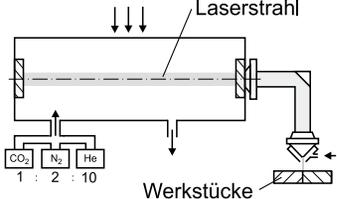
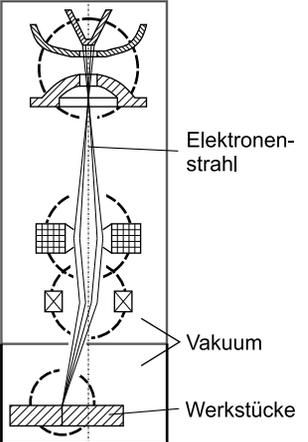
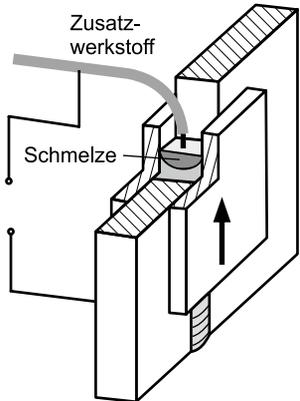
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.4 ... durch elektrische Gasentladung	(Lichtbogen)-Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr. 185]	Fügen von Werkstücken, indem ein magnetisch abgelenkter Lichtbogen die Schweißfuge aufschmilzt	 <p>Lichtbogen      Magnet</p>
		Funkenschweißen	Fügen, indem durch Funkentladungen der Werkstoff der Elektrode zum Werkstück abgetragen wird	 <p>Zusatzwerkstoff      Funkenentladung</p>
		Metalllichtbogenschweißen [ONr. 11]	Fügen durch Aufschmelzen der Fugestelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer abschmelzenden, schlackebildenden Elektrode und dem Werkstück brennt	<p>Lichtbogenhandschweißen [ONr. 111]</p>  <p>Zusatzwerkstoff Umhüllung Lichtbogen Schlacke</p> <p><u>andere Verfahrensvarianten:</u> Schwerkraft-, Federkraft-, Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode, Unterschiensschweißen</p>
		Kohlelichtbogenschweißen	Fügen durch Aufschmelzen der Fugestelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer nicht abschmelzenden Kohlelektrode und dem Werkstück brennt	 <p>Zusatzwerkstoff      Kohlelektrode</p>

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelz- schweißen	6.2.4 ... durch elektrische Gas- entladung	Unterpulver- schweißen [ONr. 12]	Fügen durch Auf- schmelzen der Fügestelle mit einem Lichtbogen, der zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück brennt, wobei der Lichtbo- gen mit schlacke- bildendem Pulver abgedeckt ist	
		Schutzgas- schweißen	Fügen, indem die Fügestelle mit einem Lichtbogen, der unter Schutzgas zwischen einer Elektrode und dem Werkstück brennt, aufgeschmolzen wird	1. abschmelzende Elektrode (Metall-Schutzgasschweißen) [ONr. 13] 
			2. nicht abschmelzende Elektrode (Wolfram-Schutzgasschweißen) [ONr. 14] 	
	6.2.5 ... durch Strahl	Lichtstrahl- schweißen [ONr. 75]	Fügen von Werk- stücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines nicht kohärenten Licht- strahls aufge- schmolzen wird	

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.5 ... durch Strahl	Laserstrahl-schweißen [ONr. 52]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines kohärenten Strahls aufgeschmolzen wird	
		Elektronenstrahl-schweißen [ONr. 51]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit einem Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird	
6.2.6 ... durch Bewegung von Masse		<i>kein Prozess bekannt</i>		
6.2.7 ... durch elektrischen Strom		Widerstandsschmelzschweißen	Fügen von Werkstücken, indem die Fügezone durch Widerstandserwärmung geschmolzen wird	 <p>andere Verfahrensvariante: Kammerschweißen</p>

# 2

## Schweißbarkeit

### 2.1 Grundlagen und Einteilung

Für die **Schweißbarkeit** gilt entsprechend DIN-Fachbericht ISO/TR 581 folgende, international gültige Definition:

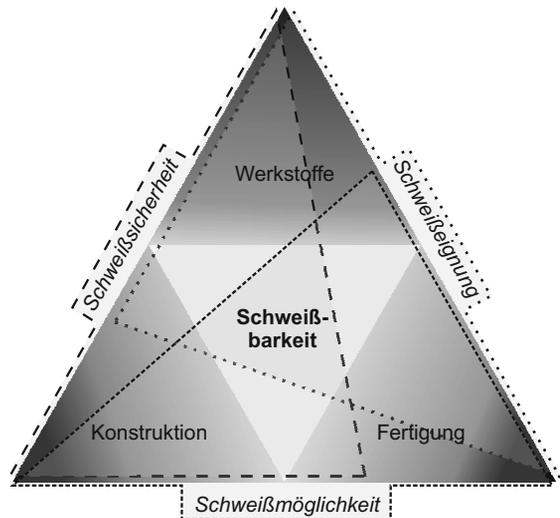
Die Schweißbarkeit eines Bauteils aus metallischem Werkstoff ist vorhanden, wenn der Stoffschluss durch Schweißen mit einem gegebenen Schweißprozess bei Beachtung eines geeigneten Fertigungsablaufs erreicht werden kann. Dabei müssen die Schweißnähte hinsichtlich ihrer örtlichen Eigenschaften und ihres Einflusses auf die Konstruktion, deren Teil sie sind, die gestellten Anforderungen erfüllen.

Die Schweißbarkeit wird von den drei Einflussgrößen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung mit näherungsweise gleicher Wichtung bestimmt. Alle drei Einflussgrößen stehen dabei in enger Wechselwirkung untereinander, und die gesamtheitliche Betrachtung der Schweißbarkeit ermöglicht eine qualitative Abschätzung bezüglich:

- der Eignung von Fügeteilen, diese in eine Verbindung zu überführen, bei denen der Zusammenhalt örtlich geschaffen und insgesamt vermehrt wird,
- der Sicherheit der gefügten Verbindung während des gesamten Betriebs-Lebenszyklus und
- der Möglichkeit, mit entsprechenden Technologien Werkstoff- und Bauelementkombinationen mit hoher Zuverlässigkeit zu fügen.

Die Wechselbeziehung zwischen den drei Einflussgrößen wird mit spezifischen Begrifflichkeiten eingeteilt. Dabei ist die **Schweißbeignung** eine Werkstoffeigenschaft, die im Wesentlichen von der

Fertigung und in geringem Maße von der Konstruktion beeinflusst wird. Die **Schweißsicherheit** als Konstruktionseigenschaft wird vor allem vom Werkstoff und in geringem Maße von der Fertigung beeinflusst. Die **Schweißmöglichkeit** ist eine Fertigungseigenschaft, die insbesondere von der Konstruktion und in geringem Maße vom Werkstoff beeinflusst wird. Jede dieser Eigenschaften hängt – wie die Schweißbarkeit eines Bauteils – von Werkstoff, Konstruktion und Fertigung ab, jedoch ist die Bedeutung der Einflussgrößen für diese drei Eigenschaften unterschiedlich (Bild 2.1).



**Bild 2.1** Beschreibung der Schweißbarkeit als Wechselbeziehung von Schweißbeignung, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit

Als Verallgemeinerung der Schweißbarkeit kann für die Vielzahl der existierenden Fügeverfahren der Begriff der **Fügarkeit** definiert werden, und damit wird in Analogie die Eigenschaft von Fügeteilen be-

schrieben, unter gegebenen stofflichen, konstruktiven und fertigungstechnischen Bedingungen so zu einer Verbindung gefügt werden zu können, dass die geforderten Gebrauchseigenschaften erfüllt werden [MAT03].

Die Abschätzung der Schweißbarkeit eines Bauteils erfolgt in drei Stufen:

1. gut geeignet
2. bedingt geeignet
3. ungeeignet

Schweißbarkeit eines Bauteiles	<b>Schweißbeignung</b>	<b>Chemische Zusammen- setzung</b>	<b>Metallurgische Eigenschaften</b>	<b>Physikalische Eigenschaften</b>
	Werkstoffbedingte Schweißbeignung	z. B.: ▪ Härteineigung ▪ Alterungsneigung ▪ Spröbruchneigung ▪ Heißrissneigung ▪ Schmelzbadverhalten	z. B.: ▪ Seigerungen ▪ Einschlüsse ▪ Korngröße ▪ Gefüge ▪ Anisotropie	z. B.: ▪ Ausdehnungs- verhalten ▪ Wärmeleitfähigkeit ▪ Schmelzpunkt ▪ Festigkeit ▪ Zähigkeit
	<b>Schweißsicherheit</b>	<b>Konstruktive Gestaltung</b>	<b>Beanspruchungs- zustand</b>	
	Konstruktionsbedingte Schweißsicherheit	z. B.: ▪ Kraftfluss im Bauteil ▪ Anordnung der Schweißnähte ▪ Werkstückdicke ▪ Kerbwirkung ▪ Steifigkeitsunter- schied	z. B.: ▪ Art und Größe der Spannungen im Bauteil ▪ Räumlichkeitsgrad der Spannungen ▪ Beanspruchungs- geschwindigkeit ▪ Temperatur ▪ Korrosion	
	<b>Schweißmöglichkeit</b>	<b>Vorbereitung zum Schweißen</b>	<b>Ausführung der Schweißarbeiten</b>	<b>Nachbehandlung</b>
	Fertigungsbedingte Schweißmöglichkeit	z. B.: ▪ Auswahl von Schweißverfahren, ▪ von Zusätzen und Hilfsstoffen ▪ Stoßart ▪ Fugenform ▪ Vorwärmung ▪ Maßnahmen bei un- günstigen Witterungs- verhältnissen (z. B. Einhausungen)	z. B.: ▪ Wärmeführung ▪ Wärmeeinbringung ▪ Schweißfolge	z. B.: ▪ Wärmebehandlung ▪ Schleifen ▪ Beizen ▪ Richten

**Bild 2.2** Wichtige Einflussgrößen auf die Schweißbeignung, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit (in Anlehnung an [BOE84])

Bei „bedingt geeigneter“ Schweißbarkeit kann neben den fertigungstechnischen Maßnahmen, d. h. der Vorbereitung zum Schweißen, dem Ausführen des Schweißens und den Nachbereitungen der geschweißten Verbindung auch mithilfe geeigneter konstruktiver Maßnahmen eine Verbesserung der Schweißbarkeit erreicht werden.

Wichtige Einflussgrößen auf die Schweißbeignung, -sicherheit und -möglichkeit sowie deren Wechselbeziehungen sind in Bild 2.2 dargestellt.

Eine Auswahl dieser Einflussgrößen, soweit sie für das weitere Verständnis bei der Behandlung von Schweißverfahren von Bedeutung sind, wie z. B. Wärmeeintrag, mechanische Güterwerte, Verfor-

mungen und Spannungen, werden in den nachfolgenden Ausführungen erläutert.

## 2.2 Schweißbeignung von Stählen

Die Schweißbeignung eines Werkstoffs ist vorhanden, wenn bei der Fertigung aufgrund der werkstoffbedingten chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften eine anforderungsgerechte Schweißverbindung hergestellt werden kann. Die Schweißbeignung eines Werkstoffes innerhalb einer

**Tabelle 2.1** Einflussfaktoren auf die Schweißbeignung

Einflussfaktor	Beispiele	Mögliche Auswirkung auf ...
Chemische Zusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Art der Basislegierung (z. B. Eisen-, Aluminium-, Nickel-, Kupfer- usw.)</li> <li>▪ Legierungsbestandteile (gewünschte)</li> <li>▪ Begleitelemente / Verunreinigungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufhärtung</li> <li>▪ Heißrissbildung</li> <li>▪ Lunkerentstehung</li> <li>▪ Korrosionsbeständigkeit</li> <li>▪ Alterung</li> <li>▪ Sprödbbruchneigung</li> <li>▪ Anlegierungsneigung</li> </ul>
Metallurgische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gefügearten</li> <li>▪ Korngröße</li> <li>▪ Kornstreckung</li> <li>▪ Kornorientierung</li> <li>▪ Seigerungsverhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gefügeausbildung</li> <li>▪ Anisotropie</li> <li>▪ Umwandlungsverhalten</li> <li>▪ Bildung von Einschlüssen</li> <li>▪ Aufhärtung</li> <li>▪ Rissbildung</li> </ul>
Physikalische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schmelztemperatur</li> <li>▪ elektrische Leitfähigkeit</li> <li>▪ Wärmeleitfähigkeit</li> <li>▪ Wärmeausdehnungskoeffizient</li> <li>▪ E-Modul</li> <li>▪ Streckgrenze</li> <li>▪ elastische/plastische Dehnbarkeit</li> <li>▪ Zugfestigkeit</li> <li>▪ Glanz / Reflexion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten</li> <li>▪ Schrumpfung</li> <li>▪ Eigenspannungen</li> <li>▪ Verzug</li> </ul>

Werkstoffgruppe ist umso besser, je weniger die werkstoffbedingten Faktoren beim Festlegen der schweißtechnischen Fertigungsoperationen beachtet werden müssen. Die Schweißbeignung eines Werkstoffes oder einer Werkstoffgruppe wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, siehe Tabelle 2.1.

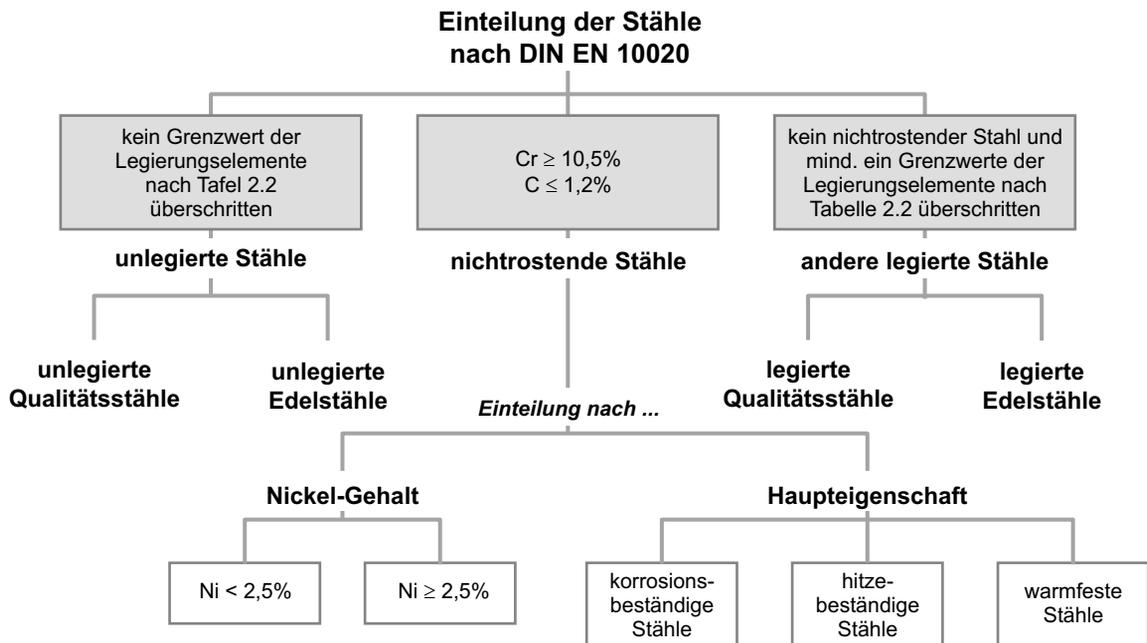
Mit der chemischen Zusammensetzung metallischer Werkstoffe, d. h. mit ihren Legierungsgehalten, aber auch mit ihren **Verunreinigungen** (Phosphor, Schwefel, Stickstoff, Wasserstoff) werden die Werkstoffeigenschaften erheblich beeinflusst. In der Regel verschlechtert sich die Schweißbeignung mit zunehmenden Legierungsgehalten sowie Verunreinigungen. Neben der chemischen Zusammensetzung bestimmt vor allem die Metallurgie metallischer Werkstoffe die Schweißbeignung ganz wesentlich. Der Anteil von Verunreinigungen und Einschlüssen wird von der **Erschmelzungsart** (z. B. im Vakuum, Elektroofen oder Herdverfahren) und der Vergießungsart (unberuhigt, beruhigt, doppelt beruhigt) bestimmt. Praktisch werden heute keine unberuhigt (d. h. mit viel Restsauerstoff und ausgeprägten Seigerungs-zonen) vergossenen Stähle mehr hergestellt, da im in-

dustriell fast ausschließlich angewandten Stranggussverfahren ein unberuhigter Stahl nicht mehr vergossen werden kann. Dies ist technisch nur noch im Kokillenguss möglich, der aber völlig unwirtschaftlich ist. Dennoch ist insbesondere bei Reparaturschweißungen an älteren Konstruktionen damit zu rechnen, unberuhigte Stähle vorzufinden, was einer speziellen Betrachtung bedarf.

Eine Nachbehandlung, z. B. mechanisch durch Walzen oder thermisch durch Glühen, bewirkt eine Änderung des Gefüges, der Korngröße bzw. der Aushärtung. Dies verdeutlicht die wechselseitige Beziehung zwischen den stofflichen Komponenten, dem metallurgischen Prozess sowie dem Fertigungsprozess und den Gebrauchseigenschaften der Schweißverbindung.

Bei Stählen erfolgt die Abschätzung der Schweißbeignung auf Basis von Stahlgruppen. Diese werden entsprechend DIN EN 10020 (Bild 2.3) unterteilt nach der Menge an Legierungsgehalten in

- unlegierte Stähle,
- nichtrostende Stähle sowie
- andere legierte Stähle.



**Bild 2.3** Einteilung der Stähle nach DIN EN 10020

Tabelle 2.2 zeigt die Grenzwerte zwischen unlegierten und legierten Stählen. **Edelstähle** unterscheiden sich von den **Qualitätsstählen** durch einen höheren Reinheitsgehalt – speziell bezüglich nichtmetallischer Einschlüsse. Unlegierte Edelstähle eignen sich vor allem zum Vergüten oder Oberflächenhärten. Die präzise Einhaltung der chemischen Zusammensetzung ermöglicht sehr gute Eigenschaften zur Erfüllung erhöhter Anforderungen, so z. B. hohe Streckgrenzen- oder Härtebarkeitswerte, aber auch die spezifische Eignung zur Kaltumformung oder zum Schweißen.

Legierte Edelstähle schließen legierte Maschinenbaustähle und legierte Stähle für Druckbehälter, Wälzlagerstähle, Werkzeugstähle, Schnellarbeitsstähle und solche mit spezifischen physikalischen Eigenschaften, wie z. B. kontrolliertem Ausdehnungskoeffizienten oder besonderem elektrischen Widerstand, ein.

**Tabelle 2.2** Grenzwerte der Legierungselemente zwischen unlegierten und legierten Stählen

Al	0,03%	Ni	0,30%
B	0,0008%	Pb	0,40%
Bi	0,10%	Se	0,10%
Co	0,30%	Si	0,60%
Cr	0,30%	Te	0,10%
Cu	0,40%	Ti	0,05%
La	0,10%	V	0,10%
Mn	1,65%	W	0,30%
Mo	0,08%	Zr	0,05%
Nb	0,06%		

Je nach Grad der Erwärmung des Werkstoffes an der Füge Stelle entweder bis zu einem schmelzflüssigen oder noch teigigen Zustand kann zwischen Schmelzschweißbeignung und Pressschweißbeignung unterschieden werden.

Zur qualitativen Abschätzung der Schmelzschweißbeignung von Stählen haben sich drei Methoden praktisch bewährt:

#### **Methode A – Abschätzung der Schweißbeignung von unlegierten Stählen:**

Sie ist gegeben, wenn der Kohlenstoffgehalt  $C \leq 0,22\%$  beträgt. Liegt der Kohlenstoffgehalt zwischen  $0,22\%$  und  $0,40\%$ , so ist die Schweißbeignung mit „bedingt schweißbar“ einzuschätzen, kann jedoch durch Vorwärmen der Werkstoffe oberhalb von  $100\text{ }^\circ\text{C}$  verbessert werden.

#### **Methode B – Abschätzung der Schweißbeignung von legierten Stählen (ausgenommen nichtrostende Stähle):**

Neben Kohlenstoff beeinflussen weitere Legierungselemente im Stahl die Gefügeausbildung in der Schweißverbindung und die resultierende Härte in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone (WEZ). Unter bestimmten Bedingungen kommt es zu Kaltrissen, d. h. Rissen in der Schweißnaht, die sich erst nach vollständiger Abkühlung der Schweißnaht, teilweise auch mehrere Stunden oder Tage später ohne zusätzliche externe Beanspruchung der geschweißten Bauteile bilden können. Zur Einschätzung der Gefahr von Kaltrissen, d. h. zur Schweißbeignung dieser Stähle, kann das **Kohlenstoffäquivalent** herangezogen werden. Das Kohlenstoffäquivalent wird in Abhängigkeit von den Anteilen der Legierungselemente in Gewichtsprozenten bestimmt. Für die Einschätzung der Schweißbeignung steht eine Vielzahl von überwiegend empirisch ermittelten Kohlenstoffäquivalenten zur Verfügung. Für unlegierte Stähle und Feinkornbaustähle mit Legierungsgehalten entsprechend Tabelle 2.3 kann nach DIN EN 1011-2 beispielsweise das Kohlenstoffäquivalent nach IIW- (International Institute of Welding)-Formel zur Einschätzung der Kaltrissgefahr durch freien Wasserstoff angewandt werden:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.1)$$

Die Schweißbeignung ist gegeben, wenn das Kohlenstoffäquivalent  $CE \leq 0,4\%$  beträgt. Liegen die Werte für das Kohlenstoffäquivalent  $CE$  oberhalb von  $0,4\%$ , so ist entweder vorzuwärmen oder der Wärmeeintrag, d. h. die Streckenenergie, zu erhöhen. Die gleiche Formel wird in der DIN EN 15085 (Schweißen

von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen) ebenfalls verwendet und dort als CEV bezeichnet. Zusätzlich werden aber bezüglich der erforderlichen Vorwärmtemperaturen die in Tabelle 2.4 dargestellten Angaben gemacht.

**Tabelle 2.3** Grenzwerte für Legierungselemente zur Anwendung des Kohlenstoffäquivalentes CE nach DIN EN 1011-2

C	0,05 ... 0,25%
Si	≤ 0,8%
Mn	≤ 1,7%
Cr	≤ 0,9%
Cu	≤ 1,0%
Ni	≤ 2,5%
Mo	≤ 0,75%
V	≤ 0,2%

**Tabelle 2.4** Empfohlene Vorwärmtemperaturen entsprechend dem Kohlenstoffäquivalent CEV nach DIN EN 15085

CEV [%]	Blechdicke [mm]	Vorwärmtemperaturen [°C]
> 0,30 ... 0,45 <sup>1)</sup>	$t < 25$	keine
	$t \geq 25$	100 ... 200
> 0,45 ... 0,60	$t \leq 50$ (in Ausnahme $t > 50$ )	150 ... 250
> 0,60 ... 0,75		200 ... 350

<sup>1)</sup> Bei Stahlguss ist bereits ab einem CEV > 0,35% vorzuwärmen, dabei sind die Normen und Herstellerangaben zu beachten.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Kalt-rissgefahr ist das Kohlenstoffäquivalent CET nach DIN EN 1011-2:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (2.2)$$

Die Grenzwerte der Legierungselemente für die Anwendbarkeit von CET sind in Tabelle 2.5 dargestellt.

**Tabelle 2.5** Grenzwerte für Legierungselemente zur Anwendung des Kohlenstoffäquivalentes CET [UWE91]

C	0,05 ... 0,32%
Si	≤ 0,8%
Mn	0,5 ... 1,9%
Cr	≤ 1,5%
Cu	≤ 0,7%
Mo	≤ 0,75%
Nb	≤ 0,06%
Ni	≤ 2,5%
Ti	≤ 0,12%
V	≤ 0,18%
B	≤ 0,005%

Die Vorwärmtemperatur lässt sich dabei basierend auf dem Kohlenstoffäquivalent CET wie folgt berechnen:

$$T_{pCET} = 750 CET - 150 \text{ °C} \quad (2.3)$$

Ferner bestehen Abhängigkeiten der Vorwärmtemperatur von der Blechdicke, dem Wasserstoffgehalt, der Wärmeeinbringung und der Eigenspannungen.

In der Literatur sind weitere Kohlenstoffäquivalente, wie z. B. CEN, CEM oder PCM, bekannt, die jeweils einen eng begrenzten Anwendungsbereich aufweisen.

Detaillierte Aussagen zur Schweißbeignung von legierten Stählen sind weiterhin durch Betrachtung der **Gefügeumwandlungen** im Zeit-Temperatur-Verlauf möglich. Beim Schweißvorgang ist die Wärmeführung durch schnelle Aufheizung auf hohe Spitzentemperaturen, kurze Haltezeiten und schnelle Abkühlung gekennzeichnet. Insbesondere die Abkühlung aus der Schweißwärme beeinflusst die Gefügeausbildung und damit die mechanisch-technologischen Eigenschaften, wie Härte, Zugfestigkeit, Dehngrenze, Brucheinschnürung, Kerbschlagarbeit, ganz entscheidend. Dafür wurden spezielle ZTU-Schaubilder unter entsprechenden Bedingungen aufgenommen. Aus diesen sogenann-

ten Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern (**SZTU-Schaubilder**) sind dann Informationen, wie z. B.

- Ermittlung der Schweißdaten für vergütete Stähle zur Erhaltung des Vergütungseffektes,
- Ermittlung der Güteeigenschaften in der WEZ in Abhängigkeit von den gewählten Schweißdaten,
- Bestimmung der Vorwärmtemperaturen,
- Auswahl von Werkstoffen und Schweißverfahren,
- Beurteilung des Kaltverformungsvermögens nach dem Schweißen zu entnehmen.

Eine Beeinflussung der Stahleigenschaften durch den Schweißprozess ist besonders in der Nähe der Schmelzlinie (Phasengrenzlinie zwischen aufgeschmolzenem und festem Werkstoff) zu erwarten, da sich hier eine **Grobkornzone** im Gefüge ausbildet. Um die Vorgänge insbesondere in der Wärmeeinflusszone bestimmen zu können, legt man die maßgeblichen Temperaturintervalle in der Abkühlphase fest. Prinzipiell können zur Charakterisierung des Abkühlverlaufes beliebige Temperaturintervalle herangezogen werden. Von besonderer Bedeutung ist aber der Temperaturbereich zwischen 800 und 500 °C, da sich hier im Wesentlichen das Umwandlungsverhalten des Austenits entscheidet. Diese als  **$t_{8/5}$ -Konzept** bezeichnete Methode basiert auf der Zeitspanne, in der die Schweißraupe und ihre WEZ von 800 auf 500 °C abkühlen. Während dieser Abkühlzeit ( $t_{8/5}$ -Zeit) finden vorrangig alle für die Eigenschaften des Stahles entscheidenden Umwandlungsvorgänge statt.

SZTU-Diagramme stellen die zu erwartenden Gefügeanteile des Schweißgutes in Abhängigkeit von der jeweiligen

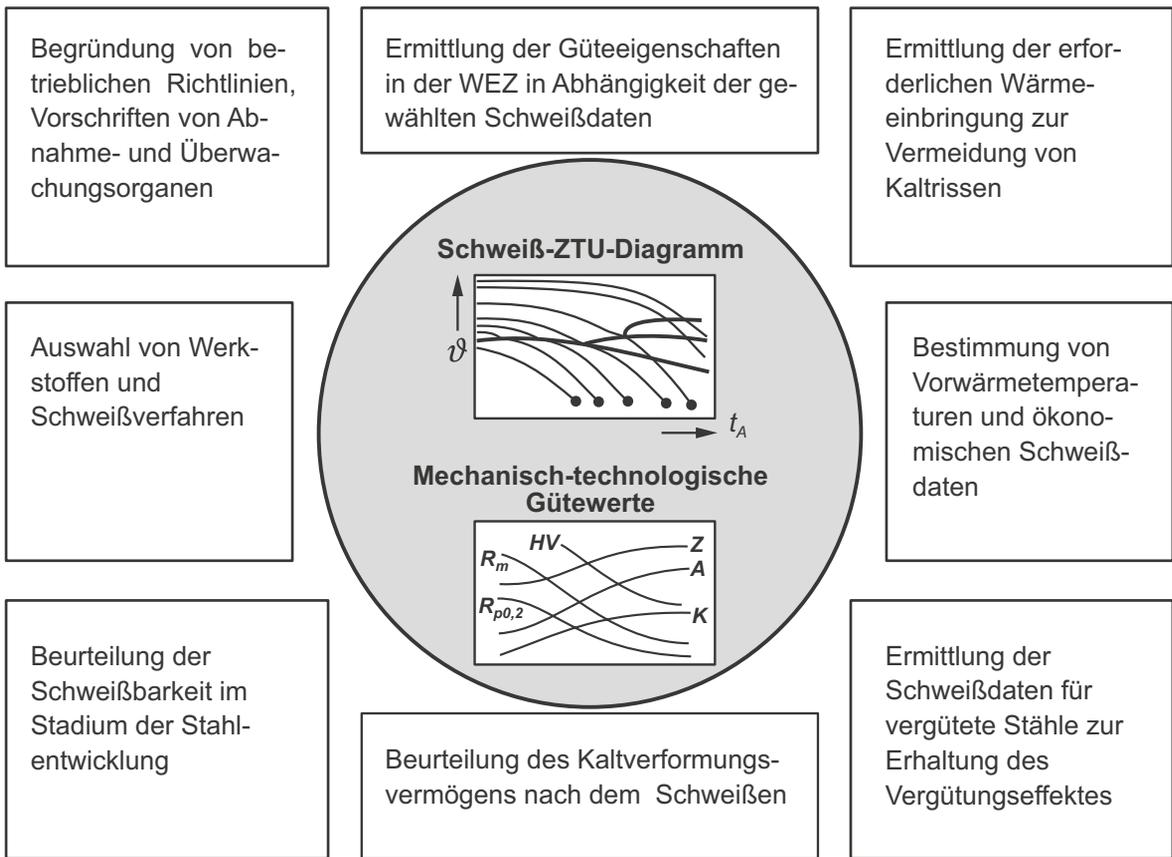
- chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes (Charge),
  - der Austenitisierungstemperatur und -dauer sowie
  - der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  im Temperaturbereich von 800 °C bis 500 °C
- dar.

In Verbindung mit dem SZTU-Diagramm steht das Diagramm der mechanisch-technologischen Gütewerte der Schweißverbindung in der Wärmeein-

flusszone. Die mechanischen Gütewerte (Härte  $HV$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , Einschnürung  $Z$ , Dehnung  $A$ , Kerbschlagarbeit  $K$ ) verändern sich ebenfalls mit sich ändernder Abkühlzeit  $t_{8/5}$ . Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Schweiß-ZTU-Diagramme über die Abschätzung der Schweißbeignung hinaus, wie Vermeidung von Kalt-rissen durch Vorwärmen und Optimieren der Streckenergie, des Kaltverformungsvermögens u. a., sind in Bild 2.4 aufgeführt.

### Methode C – Abschätzung der Schweißbeignung von nichtrostenden Stählen:

**Nichtrostende Stähle** generieren ihre Eigenschaften aus einem hohen Chromgehalt von mindestens 10,5% und einem begrenzten Kohlenstoff-Massenanteil von höchstens 1,2%. Eine weitere Einteilung nichtrostender Stähle erfolgt nach ihren jeweiligen Haupteigenschaften als korrosionsbeständig, hitzebeständig oder warmfest bzw. nach ihrem Nickelgehalt. Nickel und Chrom sind in diesen Stählen in erhöhten Anteilen vorhanden. Nickel ist dabei ein **Austenitbildner** und Chrom demgegenüber ein **Ferritbildner**, d.h., dass diese Elemente dem Stahl zulegiert werden, um nach der Abkühlung bei Raumtemperatur ein überwiegend austenitisches bzw. ferritisches Gefüge vorzufinden. Neben Nickel sind weitere Elemente wie Kobalt (Co) und Mangan (Mn) Austenitbildner. Neben Chrom erweitern folgende Elemente das Ferritgebiet ebenfalls: Mo, V, Al, Ti, P, Si, Be. Des Weiteren stabilisieren die Elemente Nb, Ta, Ce, Zr den Ferrit durch heterogene Einschränkung des Austenitgebietes. Wie beim Kohlenstoffäquivalent können deshalb auch Chrom- und Nickeläquivalente bestimmt werden. Diese Kenngrößen geben Aufschluss über die jeweiligen Gefügeanteile in nichtrostenden Stählen. Das Nickel-Äquivalent kann in einem Diagramm gegenüber dem Chrom-Äquivalent aufgetragen werden, um die jeweils auftretenden Gefügeanteile an Austenit und Ferrit zu ermitteln. Damit kann die Schmelzschweißbeignung von nichtrostenden Stählen ausreichend abgeschätzt werden. Das **Schaeffler-Diagramm** (Bild 2.5) ermöglicht die Bestimmung der Grundwerkstoffe, des Schweißzusatzes und – bei bekannter Durchmischung des Schweißgutes – dessen Lage im Diagramm. Außerdem sind



**Bild 2.4** Schematisches SZTU-Diagramm und seine Anwendungsmöglichkeiten [SEY92]

verschiedene Bereiche gekennzeichnet, die spezifische Gefahren des Versagens der Schweißnaht kennzeichnen. Entscheidend für die Schweißbeignung ist die Lage des Schweißgutes im Diagramm. Die günstigste Lage befindet sich im Austenitbereich mit 10 ... 15% Ferrit.

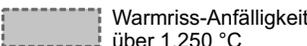
Neben dem Schaeffler-Diagramm ist auch das De-Long-Diagramm bekannt, welches zusätzlich Stickstoff mit in die Berechnung des Nickel-Äquivalents einbezieht und damit innerhalb eines engeren Analysenbereiches die genauere Abschätzung des Ferritgehaltes ermöglicht.

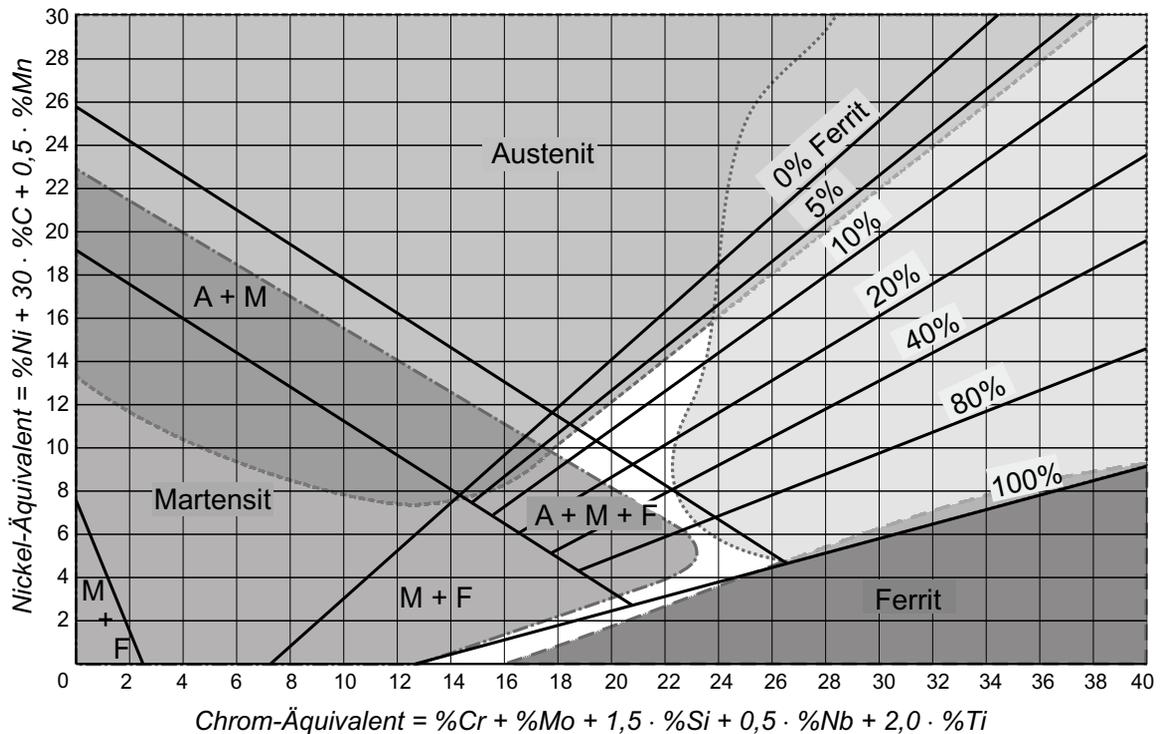
Die Schmelzschweißbeignung bei Strahlverfahren (Elektronenstrahl, Laserstrahl) schließt die bereits vorgestellte Schmelzschweißbeignung von Stahl ein

und geht vielfach darüber hinaus, d.h. mit konventionellen Lichtbogenschweißverfahren bedingt schweißbare Stähle sind demgegenüber häufig mit Strahlverfahren gut schweißbar. Insbesondere Werkstoffkombinationen, die in vielen Fällen zur Bildung von spröden Phasen führen, sind mittels Strahlverfahren schweißbar, da hierbei nur sehr schmale Aufschmelzzonen entstehen und ein sehr extremer thermischer Zyklus mit hohen Temperaturgradienten abläuft.

## 2.3 Schweißsicherheit

Die Schweißsicherheit einer Konstruktion ist gegeben, wenn das zu fügende Bauteil mit dem dafür verwendeten Werkstoff aufgrund seiner konstruk-

Gefügearten:	Bereiche möglicher Gefahren infolge des Schweißens:	
A ... Austenit	 Härteriss-Anfälligkeit unter 400 °C	 Verstärktes Kornwachstum über 1.150 °C
M ... Martensit	 Warmriss-Anfälligkeit über 1.250 °C	 Sigma-Phasen-Versprödung nach Temperatur-Belastung zw. 500 und 900 °C
F ... Ferrit		



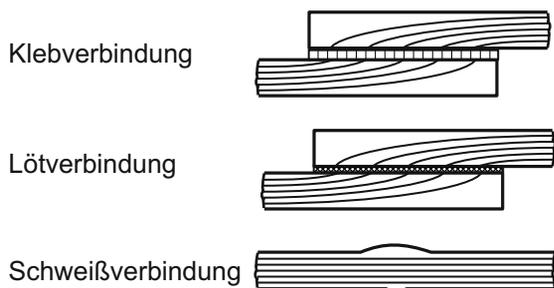
**Bild 2.5** Schaeffler-Diagramm mit Gefahrenbereichen zum Versagen der Schweißnaht

tiven Gestaltung unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen, d.h. dem **Beanspruchungszustand**, funktionsfähig bleibt (Bild 2.2). Je weniger die konstruktionsbedingten Einflussfaktoren bei der Auswahl des Werkstoffes sowie des Schweißverfahrens beachtet werden müssen, desto besser ist die Schweißsicherheit des Bauteils.

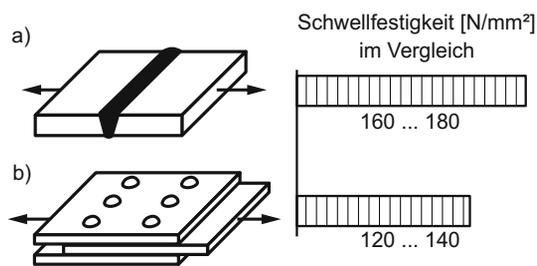
### 2.3.1 Konstruktive Gestaltung

Die konstruktive Gestaltung umfasst das Zusammenwirken von:

- Kraftfluss im Bauteil (Bild 2.6 und Bild 2.7),
- Art der Schweißnähte (punktförmig, linienförmig durchgehend oder unterbrochen),
- Anordnung der Schweißnähte (längs oder quer zur Hauptbeanspruchungsrichtung, parallel verlaufend oder sich kreuzend) sowie deren Spannungsverteilung (Bild 2.8),
- Werkstückdicke (Dünnblech = zweiachsiger Spannungszustand; Dickblech = mehrachsiger Spannungszustand),
- Kerbwirkung und
- Steifigkeitsunterschieden (sprunghafter oder allmählicher Querschnittsübergang beim Fügen von unterschiedlichen Querschnitten, bei Eckverbindungen u. a.).



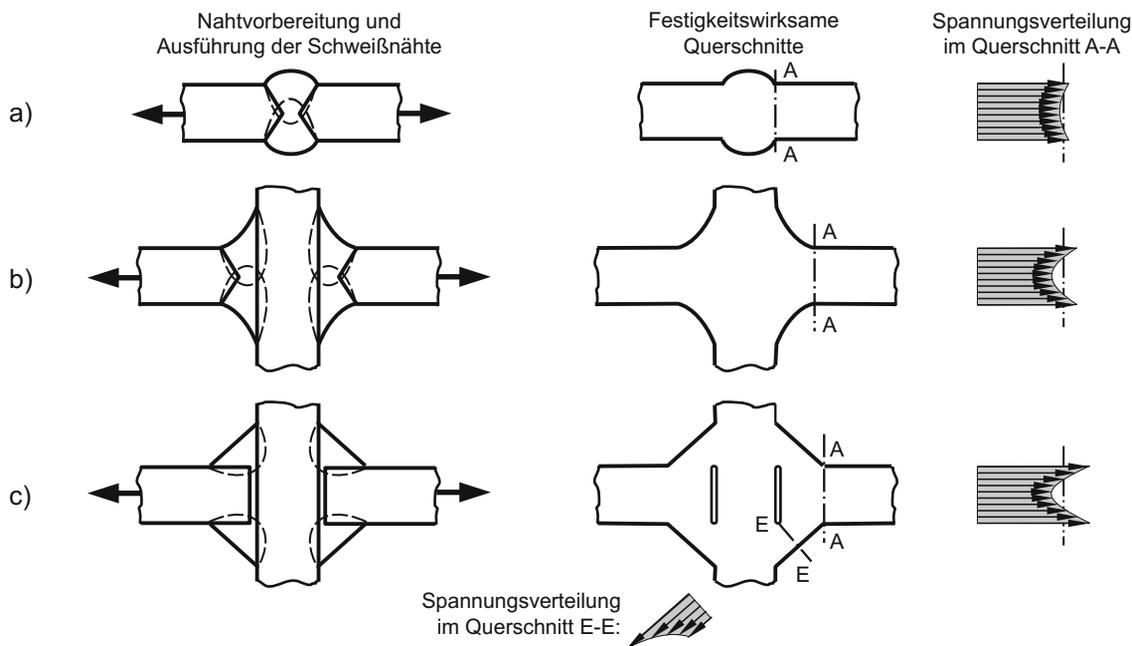
**Bild 2.6** Kraftfluss im Bauteil bei stoffschlüssigen Verbindungen [NEU96]



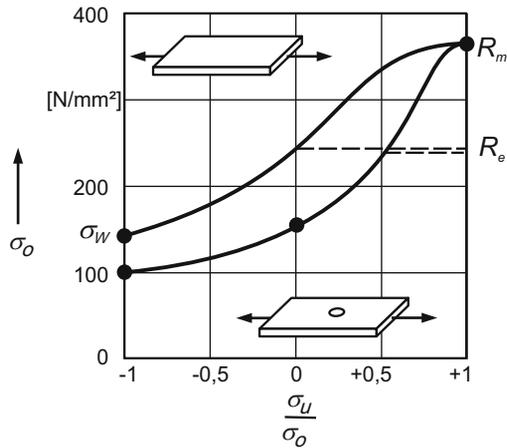
**Bild 2.7** Einfluss des Kraftflusses auf die Schwellfestigkeit (Werte am Beispiel von Werkstoff S235) a) Stumpfnah (Normalgüte); b) Nietlaschenstoß [NEU96]

An ausgewählten Beispielen wird der Einfluss der Gestaltung auf die dynamische Schwellfestigkeit des Bauteils bzw. der Verbindung gezeigt (Bild 2.7 und

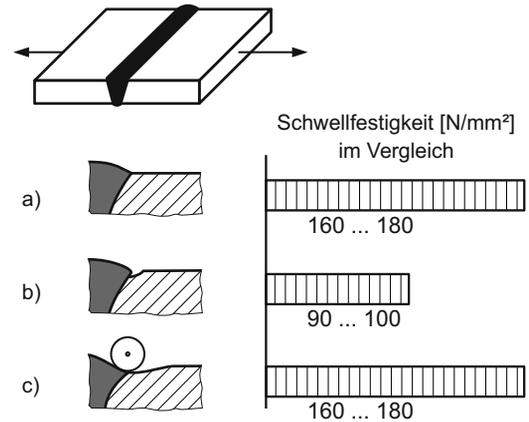
Bild 2.10). Die Wirkung von Kerben auf die Schwellfestigkeit von Bauteilen bzw. Schweißverbindungen zeigen die Bilder 2.9 bis 2.12.



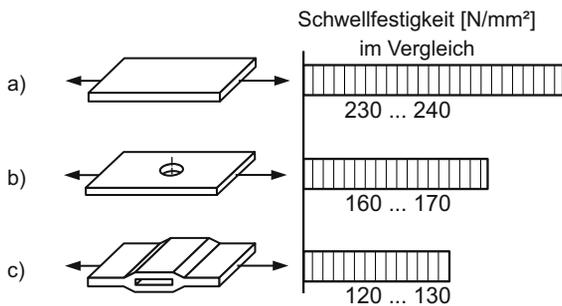
**Bild 2.8** Spannungsverteilungen in Schweißverbindungen bei Zug-Druck-Belastung in Abhängigkeit von der Art und Anordnung der Schweißnähte. a) Stumpfnah; b) K-Nah; c) Kehlnah [NEU96]



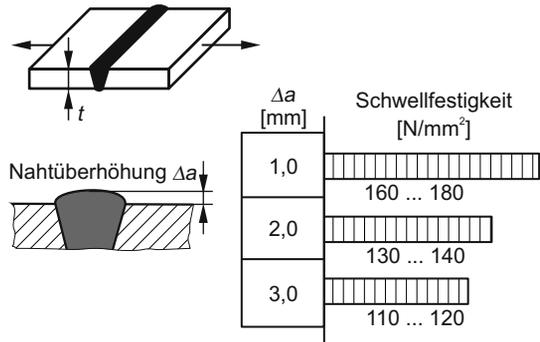
**Bild 2.9** Dauerfestigkeitswerte eines glatten und eines Lochstabes (Dauerfestigkeitsschaubild nach Moore/Kommers/Jaspers) [NEU96]



**Bild 2.11** Schwellfestigkeit von Stumpfnähten in Abhängigkeit von Einbrandkerben [NEU96]. a) Stumpfnäht unbearbeitet, Wurzel gegengeschweißt, Nahtübergang ohne Kerbe; b) mit größeren Kerben; c) Kerben verlaufend geschliffen



**Bild 2.10** Schwellfestigkeit glatter und gekerbter Stäbe (Werte am Beispiel von Werkstoff S235) [NEU96]. a) volles Blech mit Walzhaut; b) Lochstab; c) Stirnkehlnaht aus vollem Material



**Bild 2.12** Schwellfestigkeit von Stumpfnähten (unbearbeitet) in Abhängigkeit von der Nahtüberhöhung,  $t = 10$  mm (Werte am Beispiel von Werkstoff S235) [NEU96]

Spannungs-Zeit-Diagramme					
Belastungsbereiche	rein wechselnd	wechselnd mit Vorspannung	rein schwellend	schwellend mit Vorspannung	statisch (ruhend)
Belastungsfälle nach Bach	III		II		I
Spannungsverhältnis $R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} =$	- 1,0	Zwischenwerte	0	Zwischenwerte	+ 1,0
Festigkeits- bzw. Dauerfestigkeitswerte	$\sigma_w$ Wechsel- festigkeit	—	$\sigma_{Sch}$ Schwell- festigkeit	—	$R_e$ Streckgrenze $R_m$ Zugfestigkeit

**Bild 2.13** Belastungsarten mit zugehörigem Spannungs-Zeit-Diagramm [NEU96]

### 2.3.2 Beanspruchungszustand

Unter Beanspruchungszustand wird die kombinierte Beeinflussung eines Bauteils durch

- Belastungsart (vergleiche Spannungs-Zeit-Diagramme in Bild 2.13),
  - Beanspruchungsgeschwindigkeit (z.B. schwellend oder schlagartig),
  - Temperatur und
  - umgebendes Medium
- verstanden.

Die Aufwendungen für das Erzielen einer hohen Schweißsicherheit können geringer gehalten werden, wenn:

- a) ein statischer Beanspruchungszustand vorliegt,
- b) die Arbeits- und Betriebstemperaturen etwa 20 °C (Raumtemperatur) betragen und
- c) das umgebende Medium trockene Luft ist.

Sorgfältigere Gestaltungsmaßnahmen für schweiß- und beanspruchungsgerechte Konstruktionen zum Erzielen einer hohen Schweißsicherheit sind dann erforderlich, wenn:

- dynamische Beanspruchungen,
  - niedrige Betriebstemperaturen bzw.
  - aggressive Medien (z.B. Salzwasser, Säuren, elektrolytische Flüssigkeiten)
- im Einsatzfall vorliegen.

### 2.3.3 Regelwerke zur Auslegung von Schweißkonstruktionen

In Abhängigkeit vom Anwendungsbereich geschweißter Bauteile müssen verschiedene technische Regeln, nationale und internationale Normen oder gesetzliche Vorschriften für Entwurf und Konstruktion, insbesondere aber für die Bemessung

und Berechnung sowie die Fertigung und Montage derartiger Bauteile beachtet werden. Tabelle 2.6 gibt einen Überblick über aktuell geltende Regel-

werke für unterschiedliche Anwendungsbereiche sowie die darin berücksichtigten Beanspruchungsbereiche und Werkstoffe.

**Tabelle 2.6** Regel- und Normenwerke für die Bemessung geschweißter Bauteile in unterschiedlichen Anwendungsbereichen (Auswahl)

Anwendungsbereich	Berechnungsvorschrift/ Normenwerk <sup>1)</sup>	Beanspruchungs- art <sup>2)</sup>	Werkstoffe
Statisch beanspruchte Stahlbauten	DIN EN 1993-1-1	statisch	Baustähle, z. B. S235, S275, S355, S450 sowie verschiedene Feinkornbaustähle
Krane und Kran-ausrüstungen (außer Kranbahnen),	DIN EN 13001-3-1	dynamisch	Baustähle nach DIN EN 10025-2, z. B. S235, S275, S355, Feinkornbaustähle, hochfeste Baustähle
Kranbahnen	DIN EN 1993-6	dynamisch	wie DIN EN 1993-1-1
Anschlüsse in Stahlbauten unter vorwiegend ruhender Beanspruchung	DIN EN 1993-1-8	statisch	Baustähle: S235, S275, S355 und S460
Ermüdungsbeanspruchte Stahlbauteile, Verbindungen und Anschlüsse	DIN EN 1993-1-9	dynamisch	Baustähle: S235, S275, S355 und S460
Tragwerke aus Aluminiumknetlegierungen und teilweise Aluminiumgusslegierungen unter vorwiegend ruhender Belastung und einer Wanddicke von mind. 0,6 mm / geschweißt mind. 1,5 mm	DIN EN 1999-1-1	statisch	verschiedene Aluminiumknetlegierungen nach DIN EN 573-3 z. B. EN AW-AI Mg1, EN AW-AI Mg4,5Mn0,7, EN AW-AI Mg3 u. a. sowie Aluminiumgusslegierungen, z. B. EN AC-AI Si7Mg0,3, EN AC-AISi9Mg, EN AC-AI Mg5
Tragwerke aus Aluminium, Bemessung gegenüber dem Grenzzustand des durch Ermüdung hervorgerufenen Bruchs	DIN EN 1999-1-3	dynamisch	verschiedene Aluminiumknetlegierungen z. B. EN AW AIMg4,5Mn0,7; EN AW AIMg3 und Aluminiumgusslegierungen, z. B. EN AC AISi12, EN AC AIMg5
Dynamisch beanspruchte Schweißkonstruktionen	IIW-Empfehlungen XIII-1965-03 / XV-1127-03 [HOB07]	dynamisch	Stahl, Aluminium

**Tabelle 2.6** (Fortsetzung)

Anwendungsbereich	Berechnungsvorschrift/ Normenwerk <sup>1)</sup>	Beanspruchungs- art <sup>2)</sup>	Werkstoffe
Dynamisch beanspruchte Maschinenbauteile	FKM-Richtlinie [FOR03]	statisch, dynamisch	Stahl, Eisenguss, Aluminium
Geschweißte Schienenfahrzeuge	DIN EN 15085 DVS 1608-1 DVS 1612 DV 952 DV 804	statisch, dynamisch (schwellend, wechselnd)	Stahl, Aluminium
Türme und Maste aus Stahl	DIN EN 1993-3-1	statisch, dynamisch	Stahl (siehe DIN EN 1993-1-1)
Schornsteine aus Stahl	DIN EN 1993-3-2	statisch, dynamisch	Stahl (siehe DIN EN 1993-1-1)
Bagger im Braunkohlentagebau	DIN 22261-2	statisch, dynamisch	Baustähle, z. B. S235, S355 oder gleichwertige
Druckgeräte mit mehr als 0,5 bar Überdruck, z. B. Dampfkessel, Rohrleitungen, druckhaltende Ausrüstungsteile und Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion	DGRL / 97/23/EG  AD 2000 Regelwerk (speziell AD 2000-Merkblatt HP 0, AD 2000-Merkblatt HP 1, AD 2000-Merkblatt S 1 und AD 2000-Merkblatt S 6)	statisch, dynamisch	Stahl (ferritisch, austenitisch), Guss, Aluminium (siehe AD-W-Reihe)
Bewehrungsstahl in Betonverbundbauteilen	DIN EN 1992-1-1	statisch, dynamisch	Betonstahl entsprechend DIN EN 10080

<sup>1)</sup> Es sind die jeweils mit geltenden Normen zu beachten.

<sup>2)</sup> In den Normen sowie der spezifischen Fachliteratur werden statische Beanspruchungen häufig auch als vorwiegend ruhende bzw. quasi-statische bezeichnet, dynamische Beanspruchungen auch als zyklisch wiederkehrende oder wechselnde Lasten, die eine Beanspruchung auf Ermüdung des nachzuweisenden Bauteils hervorrufen.

Weiterhin gibt es häufig innerhalb großer Firmen, wie z. B. Automobilherstellern, firmeninterne Werksnormen für die Konstruktion und Herstellung geschweißter Bauteile. Neben den geregelten Anwendungsbereichen, d. h. denjenigen, für die spezifische Normen und Regelwerke existieren, können geschweißte Tragwerke auch im unregelmäßigen Bereich erstellt werden. Dies sind vor allem Bereiche, wo keine unmittelbaren Gefährdungen für den Menschen vorliegen. Hier obliegt es den Vertragspartnern, auf bestehende Regelwerke Bezug zu nehmen oder eigene Kriterien für die Bemessung und Ausführung geschweißter Bauteile festzulegen. Im Schadensfall wird dabei stets der aktuell geltende Stand der Technik für die Ursachenfindung und Feststellung einer eventuellen Schuldfrage herangezogen.

Für die Durchführung einer Tragwerksplanung, d. h. der Dimensionierung und Bemessung einer geschweißten Konstruktion, sind neben den Berechnungsmethoden vor allem die auf das Bauteil einwirkenden Belastungen (Lasten, Einwirkungen) von maßgeblicher Bedeutung. Sollten diese nicht konkret bekannt bzw. durch Experimente oder Messungen ermittelbar sein, so können diese auch auf Basis von Normen und Regelwerken bestimmt werden. Häufig gibt die zur Berechnung des Tragwerkes herangezogene Norm weitere Hilfestellungen zur Ermittlung der wirkenden Belastungen. Insbesondere für die gesamte EUROCODE-Reihe wurden in DIN EN 1990 die Grundlagen der Tragwerksplanung und in der DIN EN 1991-Reihe (EUROCODE 1) die dafür erforderlichen Lastannahmen, wie z. B. für Eigen- und Nutzlasten (nach DIN EN 1991-1-1), Wind, Temperatur, Schnee und Eis oder Brandeinwirkungen, geregelt.

#### 2.3.4 Anwendung von Finite-Elemente-Methoden zur Bemessung geschweißter Tragwerke

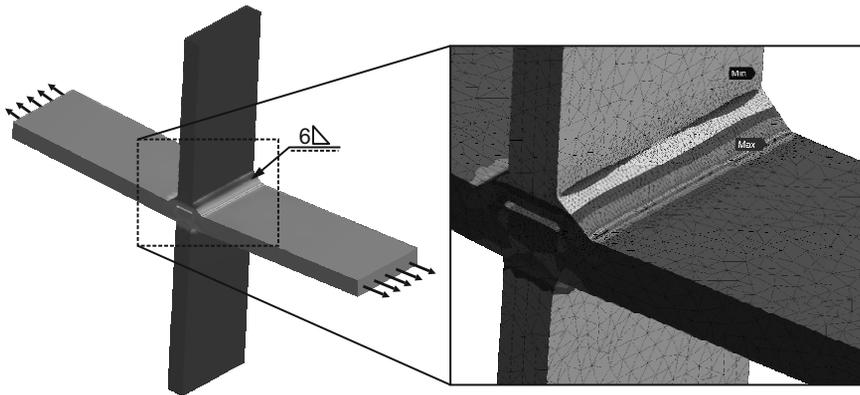
Die Bemessung geschweißter Tragwerke mittels analytischer (ingenieurtechnischer) Methoden, d. h. auf der Basis von funktionell bekannten bzw. empirisch gefundenen Zusammenhängen aus der Technischen Mechanik oder Maschinendynamik, stößt bei sehr komplexen Tragwerksstrukturen an ihre Grenzen. So können beispielsweise auftretende Spannungen in Strukturen

mit sehr vielen Einzelteilen und Schweißnähten nur noch mit hohem Aufwand ermittelt werden.

Die rechnerische (numerische) Simulation ermöglicht, das Verhalten derartiger Strukturen unter äußeren oder inneren Beanspruchungen mathematisch zu beschreiben, und unterstützt dabei die Arbeit von Ingenieuren, Konstrukteuren und Planern bei der Produktentwicklung in nahezu allen industriellen Bereichen. Speziell bei der Berechnung auftretender Verformungen und Spannungen in Bauteilen hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) als praktikables Mittel durchgesetzt. Neben linearen (elastischen) Berechnungen können auch nichtlineare (plastische) Berechnungen unter Berücksichtigung von großen Verformungen, Plastizität des Werkstoffes sowie der Kontaktierung zwischen mehreren Körpern durchgeführt werden. Diese strukturmechanischen Betrachtungen können erweitert werden auf andere physikalische Größen, wie z. B. Temperatur- oder Magnetfelder sowie Strömungen von Gasen und Flüssigkeiten.

Am Markt existiert eine Vielzahl von Softwareprodukten für die Finite-Elemente-Simulation, die teilweise auf spezielle Anwendungsbereiche oder Beanspruchungsformen, wie z. B. Crash, zugeschnitten sind. Dabei stellen diese Systeme meist standardisierte Schnittstellen zum CAD-System zur Verfügung, um Geometrien von Tragwerken direkt und ohne erneuten Modellierungsaufwand einzulesen. So können diese – vor der Realisierung – am Bildschirm auf ihre Tauglichkeit hin überprüft und notwendige Änderungen und Optimierungen schnell und ohne großen Aufwand eingearbeitet werden.

Die FEM ist insbesondere für **Nachweiskonzepte** zur Lebensdauerabschätzung von schwingend beanspruchten Bauteilen, wie z. B. Nennspannungs-, Kerbspannungs- und Strukturspannungskonzept, ein wesentliches Hilfsmittel. Grob vereinfacht kann gesagt werden, dass bei Anwendung des **Nennspannungskonzeptes** die gemittelten Schnittgrößen (Kräfte und Momente) berechnet werden, die in einer Schweißnaht vorliegen. Beim **Strukturspannungskonzept** wird die Spannung im Bauteil an spezifischen Positionen (da genau in der Schweißnaht eine Singularität vorliegt) neben der Schweißnaht ermittelt und dann in die Schweißnaht hinein extrapoliert. Demgegenüber wird für die Anwen-



**Bild 2.14** Numerische Simulation einer mittels Kehl­nähten geschweißten Kreuzstoß­verbindung bei äußerer Beanspruchung als Grundlage für das Struktur- oder Kerb­spannungskonzept

dung des **Kerb­spannungskonzeptes** ein Ersatzmodell der Schweißnaht modelliert und damit die Spannung in den geometrischen Kerben der Naht ermittelt. In jedem Fall sind anschließend technische Regelwerke hinzuzuziehen, die eine Bewertung der ermittelten Spannungswerte ermöglichen [HOB07], [FOR03], [RAD07]. Jedes der genannten Konzepte hat spezifische Vor- und Nachteile und erfordert ein hohes Maß an Grundlagen auf diesem Gebiet. Die FEM bietet dabei die Möglichkeit lokale Spannungen an den Schweißnahtkerben in Bauteilen rechnerisch zu ermitteln (Bild 2.14). Dazu wird an den Nahtübergangs- oder Wurzelkerben bzw. Wurzelspalten der tatsächlich vorliegende Radius durch einen definierten Referenzradius (1,0 mm Radius in den Nahtübergängen) ersetzt. Die in derart abgebildeten Kerben berechnete Kerb­spannung kann anschließend als Kennwert für eine Lebensdauerabschätzung unter schwingender Beanspruchung verwendet werden.

## 2.4 Schweißmöglichkeit

### 2.4.1 Grundlagen

Die Schweißmöglichkeit für ein Schweißverfahren ist gegeben, wenn die an einer Konstruktion geplanten Schweißnähte unter den gewählten Ferti-

gungsbedingungen fachgerecht hergestellt werden können. Die Schweißmöglichkeit des für die Ausführung geplanten Schweißverfahrens ist umso besser, je weniger die fertigungsbedingten Faktoren beim Entwurf der Konstruktion für einen bestimmten Werkstoff bei der Ausführung der Schweißarbeiten, einschließlich Vorbereitung und Nachbehandlung des Bauteils, berücksichtigt werden müssen.

Die Schweißmöglichkeit wird u. a. von folgenden Faktoren beeinflusst (Bild 2.2):

- Vorbereitung zum Schweißen (Auswahl von: Stoßart, Schweißverfahren, Fugenform und Schweißzusätzen, Heften und Vorwärmen),
- Ausführung des Schweißens (Wärmeeinbringung, Wärme­führung, Schweißfolge),
- Nachbehandlung der Schweißverbindung (Wärmebehandeln, Richten, Schleifen, Beizen).

Ein Kriterium für die Bewertung einer Schweißnaht ist beispielsweise im Druckbehälter- und Rohrleitungsbau die **Schweißnahtwertigkeit** als Quotient aus Zugfestigkeit der Schweißnaht und Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes:

$$\text{Schweißnahtwertigkeit} = \frac{R_{m\_Sw\text{-Verbindung}}}{R_{m\_Grundwerkstoff}} \quad (2.4)$$

Ein allgemeines Ziel der Ausführung von Schweißarbeiten ist es, die Eigenschaften einer Schweißnaht hinsichtlich Festigkeit und Duktilität so einzustellen, dass diese dem ungeschweißten Grundwerkstoff möglichst ähnlich sind, d.h. eine Schweißnahtwertigkeit möglichst nahe an 1 zu erreichen. Neben einer möglichst hohen Schweißnahtwertigkeit ist es vor allem wichtig, eine verformungs- und spannungsarme Schweißverbindung zu gewährleisten. Niedrige Schweißbeigenspannungen entlasten die Schweißverbindung und erfordern keinen zusätzlichen Spannungsabbau durch Wärmebehandlung oder durch Aufbringen von Druckspannungen, z.B. durch Hämmern oder Walzen. Geringe Bauteilendverformung senkt den Anteil der Richtarbeiten (mechanisch oder thermisch) und wirkt deshalb auch Kosten senkend. Durch fachkundiges Aufstellen und Anwenden von **Schweißfolgeplänen** (Festlegung von zeitlicher Reihenfolge und Lagenaufbau der zu schweißenden Nähte), einschließlich eines gezielten Wärmeeintrages, können Schweißbeigenspannungen und Endverformungen erheblich reduziert werden.

Neben dem fachkundigen Ausführen der Schweißarbeiten sind es vor allem die dem Schweißen unmittelbar vorgelagerten Verrichtungen, im Folgenden *Vorbereitungen* genannt, sowie die sich unmittelbar an das Schweißen anschließenden Verrichtungen, im Folgenden *Nachbehandlungen* genannt, die sich signifikant auf Nahtwertigkeit, Verformung und Eigenspannung auswirken.

### 2.4.2 Vorbereitungen zum Schweißen

Das Vorbereiten der Fügestelle zum Schweißen ist in erster Linie in Abhängigkeit von

- der Stoßart der Bauteile zueinander (Tafel 2.1),
- der Halbzeugform (Blech, Rohr, Profil),
- den Bauteilabmessungen (z.B. der Blechdicke) sowie
- dem Schweißverfahren vorzunehmen.

**Tafel 2.1** Stoßarten von Bauteilen (in Anlehnung an DIN EN ISO 17659)

Lfd. Nr.	Benennung	Merkmale	Sinnbild
1	Stumpfstoß	Teile liegen in einer Ebene	
2	Überlappstoß	Teile überlappen sich	
3	Parallelstoß	Teile liegen breitflächig aufeinander	
4	T-Stoß	Zwei Teile, eins mit seinem Ende, stoßen rechtwinklig aufeinander.	
5	Kreuzstoß	Zwei in einer Ebene liegende Teile stoßen je mit einem Ende rechtwinklig gegen ein dazwischenliegendes drittes.	
6	Schrägstoß	Ein Teil stößt mit einem Ende schräg gegen ein anderes.	
7	Eckstoß	Zwei Teile stoßen mit ihren Enden im beliebigen Winkel gegeneinander.	
8	Mehrfachstoß	Drei oder mehrere Teile stoßen unter beliebigem Winkel aneinander.	

Die **Fugenform** beeinflusst das Aufschmelzen der Bauteilkanten sowie ein Durchschweißen der Wurzel und dient vor allem zur Aufnahme des abgeschmolzenen bzw. eingebrachten Schweißzusatzwerkstoffes, der wirtschaftlichen Ausnutzung der unterschiedlichen Aufschmelzquerschnitte bei den verschiedenen Schweißverfahren und der Ausbildung einer flachen Wurzel- und Decklage. Des Weiteren sind bei der Gestaltung der Fugenform (Bild 2.15) und der Größe der Spaltbreite der Einfluss des Grundwerkstoffes mit seinen wärmephysikalischen

Kenngrößen, wie Wärmeleitfähigkeit und Ausdehnungskoeffizient, sowie die Schweißposition und die Form und Querschnittsabmessung des Schweißzusatzes (z. B. der Schweißelektrode) zu berücksichtigen.

Mit zunehmenden Querschnittsabmessungen der Schweißzusätze (Kern-/Massivdraht → Fülldraht, Band → Füllband) sind die Spaltbreiten und die Öffnungswinkel zu vergrößern. Mit größeren Elektrodenquerschnitten steigen auch die Abschmelzleistungen, die wiederum **Schmelzbad-**

Sinnbild nach DIN EN ISO 2553	Fugenform Benennung	Sinnbild nach DIN EN ISO 2553	Fugenform Benennung	Sinnbild nach DIN EN ISO 2553	Fugenform Benennung
	 Bördelnaht		 Doppel-Y-Naht		 HV-Naht
	 I-Naht		 U-Naht		 Doppel-HY-Naht
	 V-Naht		 halbe U-Naht (HU)		 Steilflanken-naht
	 DV-Naht		 Doppel-U-Naht		 halbe V-Naht (HV)
	 Y-Naht		 Doppel-HU-Naht		

R - Radius, b - Spaltbreite, c - Steghöhe, h - Flankenhöhe, t - Blech-/Wanddicke,  $\alpha$  - Öffnungswinkel,  $\beta$  - halber Öffnungswinkel

**Bild 2.15** Typische Fugenformen für das Schmelzschweißen von Stählen für verschiedenen Stoßarten (Stumpf- und T-Stoß) (nach DIN EN ISO 9692 und DIN EN ISO 2553)

**sicherungen** (Kupfer- oder Keramikschielen auf der Wurzelseite der Schweißnaht) erfordern.

Mit der Auswahl und Gestaltung der Fugenform sind die Kanten der zu schweißenden Bauteile vorbereitet. In der Regel werden zwei Bauteile, teilweise aber auch mehrere, in einem Stoß zusammengeführt. Dazu muss neben der Fugenform auch die Lage der Bauteile zueinander (Versatz, Parallelität, Koaxialität) sowie ihr Abstand voneinander (Spaltbreite) in den vorgegebenen Toleranzen gehalten werden. Die Verformungen sind beim Schweißen zu minimieren.

Deshalb gehört zur Fugenvorbereitung auch das „In-Lage-bringen“ und das „In-Lage-halten“. Der Einsatz geeigneter Vorrichtungen ist in jedem Falle vorteilhaft, aber auch das Heften durch Schweißen ist eine wirkungsvolle Maßnahme zum Sichern der Fügstellen-Geometrie während des Schweißens.

Des Weiteren ist vor dem Schweißen eine Reinigung des Fügstellenbereiches unbedingt erforderlich. Sowohl Oxide als auch Fette, Öle und konventionelle organische Beschichtungen (Farben, Folien) sind mit geeigneten Reinigungsverfahren mechanisch oder chemisch zu entfernen. Die Fügstelle muss im thermisch beeinflussten Bereich, d. h. der nahtnahen Oberfläche, metallisch blank und frei von Konservierungsmitteln und Verunreinigungen sein. Metallische Beschichtungen, wie Zink oder Aluminium (nach DIN EN ISO 14713-3), sowie einige neuartige organische Beschichtungssysteme sind prinzipiell schweißbar. Sie werden aber durch die hohen Temperaturen in der Schweißnaht teilweise zerstört. Zink besitzt dabei eine Fernwirkung, wodurch es nach dem Schweißen dennoch einen begrenzten Korrosionsschutz auf der Schweißnaht gewährleistet. Gleiches wurde für neuartige organische Beschichtungssysteme entwickelt.

Bereits in den fertigungstechnischen Maßnahmen wurde auf das Vorwärmen als eine Möglichkeit hingewiesen, die Schweißbeignung zu verbessern. Tabelle 2.7 zeigt Richtwerte für Vorwärmtemperaturen in Abhängigkeit vom K-Wert, vom Elektrodendurchmesser, der Blechdicke und der Nahtform. Der K-Wert ist dabei eine weitere Variante zur Berechnung des Kohlenstoffäquivalents unlegierter und legierter Stähle. Beispielsweise kann für das Lichtbogenhandschweißen (Ordnungs-Nummer 111, siehe

Tabelle 1.2) mithilfe des K-Wertes sowie des Elektrodendurchmessers, der Nahtform und der Blechdicke der zu schweißenden Bauteile die Wirkung der Legierungselemente auf die Schweißbeignung beschrieben sowie eventuell erforderliche Vorwärmtemperaturen festgelegt werden. Außerdem lässt dies auch Rückschlüsse auf den Wärmeeintrag durch das Lichtbogenhandschweißen sowie das Wärmeabfuhrmodell (zwei- oder dreidimensional) zu. Alternative Möglichkeiten zur Bestimmung der erforderlichen Vorwärmtemperaturen beim Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen beschreibt DIN EN 1011-2.

Für die Ermittlung des K-Wertes gilt:

$$K = C \% + \frac{Mn \%}{6} + \frac{Cr \%}{5} + \frac{Mo \%}{4} + \frac{Ni \%}{15} \quad (2.5)$$

Zu den Maßnahmen bei ungünstigen Witterungsbedingungen während der **Montage** der Fügeile auf Baustellen gehören u. a.

- Schutz vor Feuchtigkeit (stehende Nässe, Spritzwasser, Regen),
- Vermeiden von erhöhten Luftbewegungen (Wind, Zugluft) und
- Erwärmen der Frischluft sowie der Bauteile bei Außentemperaturen, die wesentlich unterhalb Raumtemperatur liegen.

Üblich ist bei Arbeiten auf Baustellen das Einhausen (Zeltabdeckung) der Schweißstelle, das Trocknen und Vorwärmen der Frischluft (Filtern der Luft und Führen über Wärmequellen sowie Einsatz von Luftduschen) und die örtliche Erwärmung der Schweißstellen.

### 2.4.3 Durchführung des Schweißens

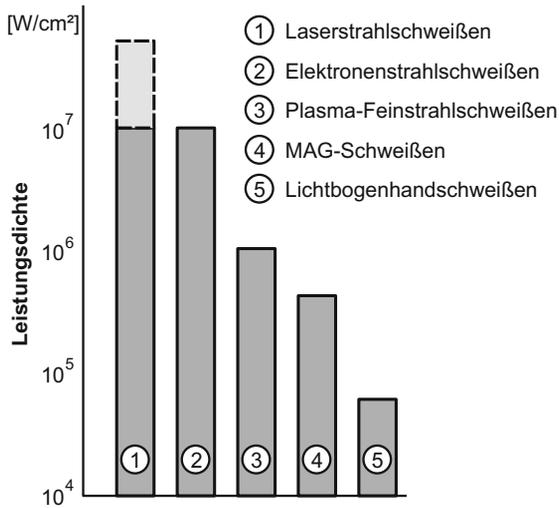
Beim Schweißen und verwandten thermischen Verfahren bewirkt der Wärmeeintrag in die Bauteile die Ausbildung von Temperaturfeldern. Diese wirken sich in Abhängigkeit von der Leistungsdichte des Verfahrens (Bild 2.16) sowohl auf den aufschmolzenen Nahtquerschnitt und damit auf die Nahtform als auch auf die räumliche Ausbreitung des Temperaturfeldes im Bauteil (Bild 2.17) aus.

**Tabelle 2.7** Vorwärmtemperaturen in Abhängigkeit vom K-Wert, dem Elektrodendurchmesser, der Blechdicke und der Nahtform (Temperaturwerte in Klammern erfordern einen erhöhten Aufwand beim Vorwärmen, da es zu Verzunderungen kommen kann, die vor dem Schweißen entfernt werden müssen.)

K-Wert	Elektroden- durchmesser	Vorwärmtemperatur in °C							
		Stumpfnah – Blechdicke in mm				Kehlnah – Blechdicke in mm			
		6	12	25	50	6	12	25	50
0,35	3,25	●	●	●	●	●	●	●	
	4	●	●	●	●	●	●	●	●
	5	●	●	●	●	●	●	●	●
	6	●	●	●	●	●	●	●	●
0,40	3,25	●	●	●	150	●	●	100	200
	4	●	●	●	●	●	●	●	150
	5	●	●	●	●	●	●	●	100
	6	●	●	●	●	●	●	●	100
0,45	3,25	●	●	150	250	●	100	250	300
	4	●	●	100	200	●	●	200	250
	5	●	●	●	150	●	●	100	200
	6	●	●	●	150	●	●	●	150
0,50	3,25	●	●	250	350	●	150	350	(450)
	4	●	●	150	300	●	100	250	400
	5	●	●	100	200	●	●	200	350
	6	●	●	●	100	●	●	150	300
0,55	3,25	●	150	400	(550)	100	300	(550)	x
	4	●	●	300	(450)	●	200	(450)	x
	5	●	●	150	350	●	100	350	(600)
	6	●	●	150	300	●	●	300	(600)
0,60	3,25	150	400	x	x	350	x	x	x
	4	100	250	x	x	250	(600)	x	x
	5	●	100	(500)	(600)	150	300	(600)	x
	6	●	●	350	(500)	●	150	(500)	x

● Vorwärmung nicht erforderlich.

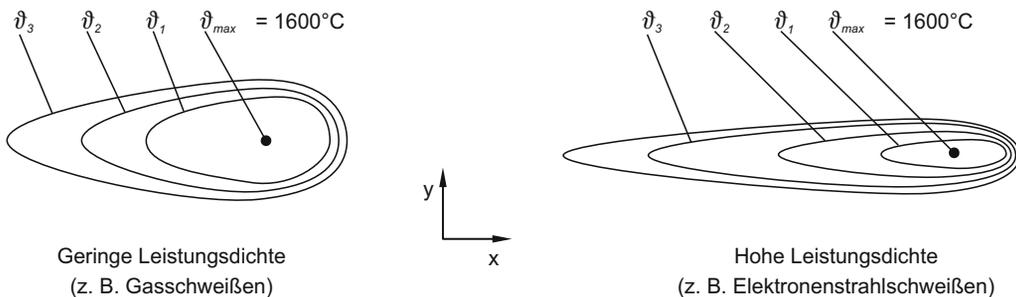
x Die notwendige Vorwärmtemperatur liegt so hoch, dass sie praktisch nicht anwendbar ist.



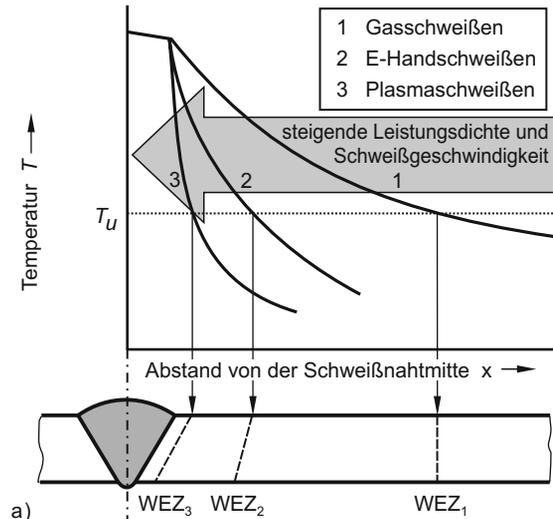
**Bild 2.16** Gegenüberstellung der Leistungsdichten bei ausgewählten Schmelzschweißverfahren

Große Leistungsdichten, wie sie bei den Strahlverfahren (Laserstrahl, Elektronenstrahl) erzielt werden, bewirken eine schmale Aufschmelzzone und erfordern deshalb eine sehr präzise Fugenvorbereitung und einen engen Schweißspalt (vergleichbar mit einem Presssitz).

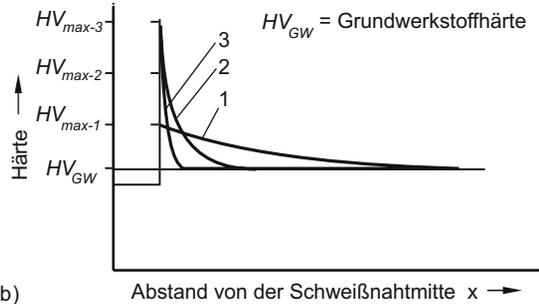
Mit abnehmender Leistungsdichte des Schweißverfahrens und damit zwangsläufig geringerer Schweißgeschwindigkeit vergrößert sich die WEZ. Damit sinken die auftretenden Temperaturgradienten, d.h., die Abkühlgeschwindigkeit reduziert sich, sodass auch die Härtespitzen zurückgehen (Bild 2.18).



**Bild 2.17** Temperaturfelder bei unterschiedlicher Leistungsdichte [MAL77]



a)



b)

$T_u$  ... spezifische Gefügeumwandlungstemperatur (für Stahl:  $A_c1$ )

**Bild 2.18** Einfluss der Leistungsdichte unterschiedlicher Schweißverfahren auf die Maximalhärte in der WEZ sowie auf ihre Breite, dargestellt für umwandlungsfähige Stähle – stark schematisiert – a) Schweißverfahren, b) maximale Härte

Das natürliche Abkühlen der Schweißteile wird sowohl von der Wärmeleitfähigkeit des Bauteilwerkstoffes als auch vom Bauteilquerschnitt und der Stoßart beeinflusst. Austenitische Stähle haben gegenüber ferritischen Stählen, Aluminiumlegierungen und Kupfer eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (Bild 2.19). Eine schmalere Wärmeeinflusszone und hoher Wärmestau im Nahtbereich sind die Folge. Der Wärmeeintrag durch Schweißen ist deshalb bei austenitischen Stählen zu senken und bei Aluminium und Kupfer zu erhöhen.

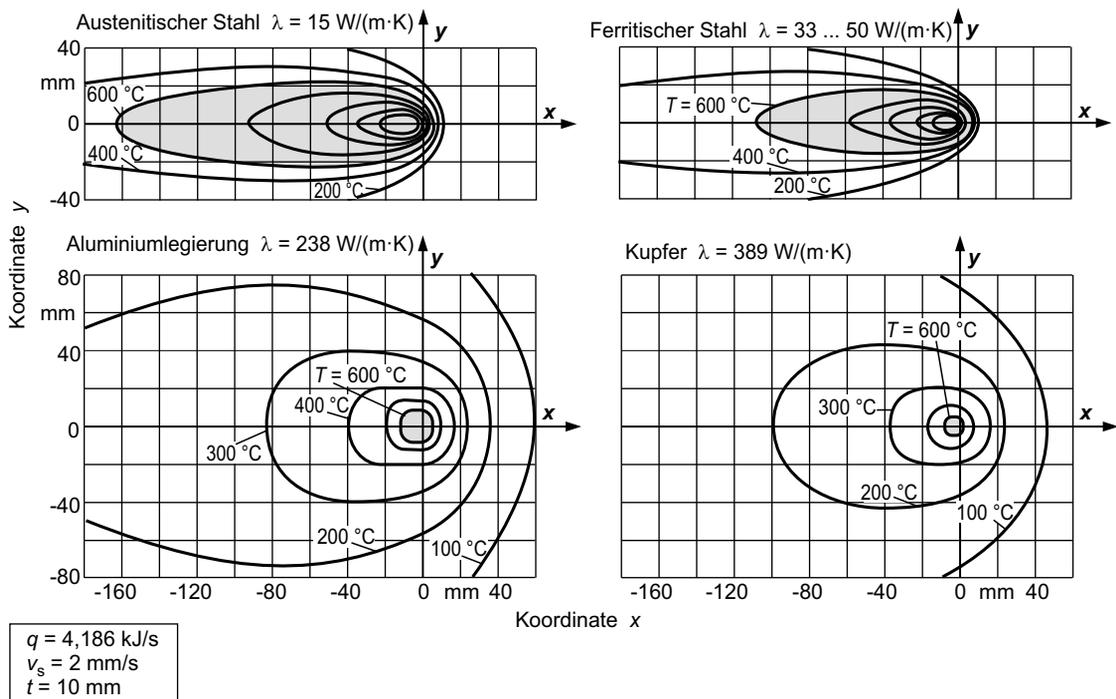
Für die Abkühlgeschwindigkeit ist in erster Linie die bauteilbedingte Wärmeableitung bestimmend. Die Wärmeableitung erfolgt entweder zweidimensional bei Dünnschichten oder dreidimensional bei Dickblechen, Mehrfachstößen oder beim Auftragschweißen (Bild 2.20).

Bei der Ausführung der Schweißarbeiten sind die fertigungstechnischen Maßnahmen zum Verbessern der Schweißmöglichkeit vor allem dem Zweck des Schweißens (Bild 1.4) anzupassen.

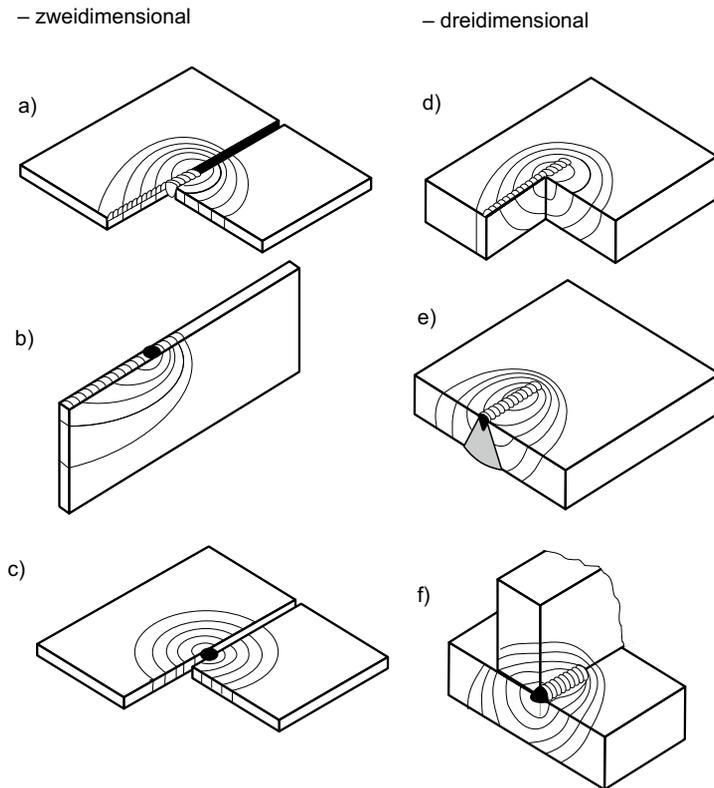
Beim Verbindungsschweißen sind vorrangig artgleiche Schweißzusätze anzuwenden, d.h. die Legierungsgehalte im Schweißzusatz entsprechen denen im Grundwerkstoff, modifiziert für auftretende Oxidations- und für erforderliche Reduktions- bzw. Desoxidationsprozesse. Beim Auftragschweißen ändern sich die chemischen Zusammensetzungen der Schweißzusätze erheblich mit dem Verwendungszweck der Auftragschicht.

Grundsätzlich gilt: Der Wärmeeintrag und die Wärmeableitung sind ebenso aufeinander abzustimmen wie der Schweißzusatz auf den Grundwerkstoff beim Verbindungsschweißen und Puffern als auch der Schweißzusatz auf den Verwendungszweck der Beschichtung beim Panzern oder Plattieren. Ziel muss es sein, günstige Gefügezusammensetzungen zu erzielen, die optimale Gebrauchseigenschaften für die Schweißverbindung oder die Auftragschweißung sichern.

Der Wärmeeintrag beim Schmelzschweißen kann mithilfe der Streckenenergie (Tabelle 2.8) be-



**Bild 2.19** Temperaturfeld um wandernde Linienquelle, unterschiedliche Werkstoffe bei gleicher Wärmeleistung  $q$ , Geschwindigkeit  $v_s$  und Wanddicke  $t$  [MAL77]



**Bild 2.20** Beispiele von ebenen und räumlichen Temperaturfeldern beim Schweißen. a) Stumpfschweißung dünner Bleche, b) Aufschweißung auf die Kante eines dünnen Blechs, c) Heftschweißen als Verbindung zwischen dünnen Blechen, d) Aufschweißen einer Naht auf ein dickes Blech, e) Nachschweißen der Wurzel einer V-Naht, f) Kehlnaht zwischen dicken Blechen

stimmt werden. Die Streckenenergie berechnet sich für das Lichtbogenschweißen zu:

$$E = \frac{P_s \cdot t_s}{l} = \frac{P_s \cdot 0,06}{v_s} \quad (2.6)$$

$E$  Streckenenergie [kJ/cm],  $P_s$  Schweißleistung [W],  $v_s$  Schweißgeschwindigkeit [cm/min],  $t_s$  Schweißzeit [s],  $l$  Schweißnahtlänge [cm]

Da beim Lichtbogenschweißen der zeitliche Verlauf der Messwerte von Spannung und Stromstärke selbst beim Gleichstromschweißen, insbesondere aber beim Wechselstrom- und Impulsschweißen nicht konstant ist, muss für die korrekte Ermittlung

der Streckenenergie die Schweißleistung als arithmetischer Mittelwert der Produkte der Momentanwerte von Strom und Spannung ermittelt werden.

Beim Schweißen wird nicht die gesamte der Stromquelle entnommene elektrische Energie dem Schweißbad zugeführt, sondern je nach Schweißverfahren und -bedingungen nur ein bestimmter Anteil. Der Erstarrungsverlauf im Schweißgut sowie die thermisch bedingten Gefügeänderungen in der WEZ werden aber nur durch diese wirklich in den Schweißnahtbereich eingebrachte Energie beeinflusst. Es ist daher bei differenzierter Betrachtung erforderlich, die Energieverluste zu berücksichtigen. Die **Streckenenergie** kann dazu um einen Faktor  $\eta$  erweitert werden, der

**Tabelle 2.8** Richtwerte für die Streckenenergie

Schweißverfahren	Elektroden-durchmesser [mm]	Streckenenergie [J/cm]
E-Hand-Schweißen	3,25	7 000 ... 11 000
	4,0	9 000 ... 13 000
	5,0	11 000 ... 18 000
MAG-C-Langlichtbogen	1,2	5 500 ... 8 000
	1,6	7 000 ... 11 000
	2,0	11 000 ... 16 000
MAG-C-Kurzlichtbogen	0,8 ... 1,2	4 000 ... 7 000
UP-Schweißen	2,5	9 000 ... 14 000
	3,0	10 000 ... 18 000
	4,0	12 000 ... 30 000
	5,0	18 000 ... 42 000

das Verhältnis der in den Nahtbereich eingebrachten Energie zur Energie, die der Stromquelle zugeführt wird, beschreibt. Der damit definierte Wärmeeintrag  $Q$  in die Schweißnaht berechnet sich zu:

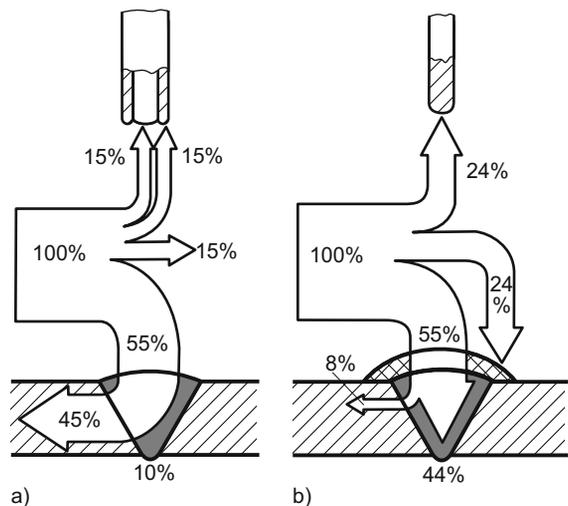
$$Q = E \cdot \eta = \frac{P_s \cdot 0,06}{v_s} \cdot \eta \quad (2.7)$$

$Q$  Wärmeeintrag in die Schweißnaht [kJ/cm],  $\eta$  relativer thermischer Wirkungsgrad [-] (siehe Tabelle 2.9)

Der relative thermische **Wirkungsgrad** liegt zwischen 0,6...1,0 und ist auf die unterschiedliche Wärmeableitung und -strahlung sowie auf die unterschiedlichen erforderlichen Abschmelzenergien für den Schweißzusatz und die Aufschmelzenergie für Grundwerkstoff und Schweißpulver zurückzuführen (Bild 2.21). Richtwerte für übliche Streckenenergien sind in Tabelle 2.9 zusammengestellt. Diese lassen erkennen, dass mit steigendem Elektrodendurchmesser  $d_e$  die Streckenenergie zunimmt. Das ergibt sich zwangsläufig aus deren Korrelation.

**Tabelle 2.9** Relativer thermischer Wirkungsgrad verschiedener Schweißverfahren

Schweißverfahren	Relativer thermischer Wirkungsgrad $\eta$
Unterpulverschweißen	1,0
Lichtbogenhandschweißen, Rutil umhüllte Stabelektrode	0,9
Lichtbogenhandschweißen, basisch umhüllte Stabelektrode	0,8
Metall-Aktivgasschweißen mit Argon bzw. Helium	0,8 ... 0,9
Metall-Inertgasschweißen mit Argon bzw. Helium	0,7 ... 0,8
Wolfram-Inertgasschweißen mit Argon bzw. Helium	0,6 ... 0,7

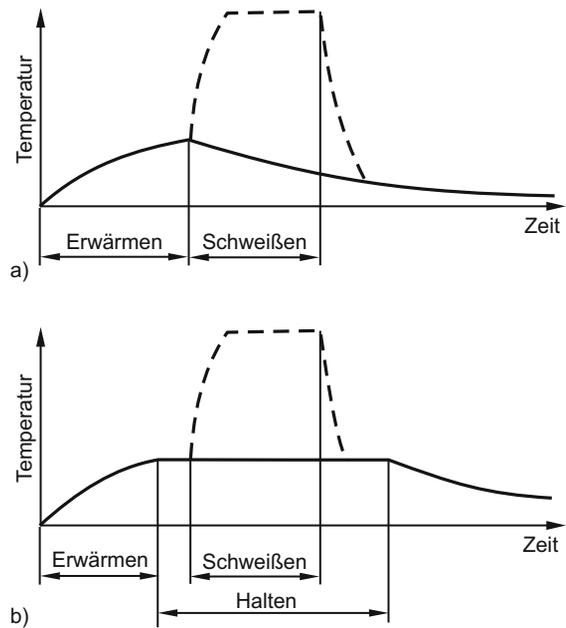
**Bild 2.21** Wärmebilanz beim a) Lichtbogenhandschweißen und b) Unterpulverschweißen [BOE84], [RYK57]

Umgekehrt nimmt die Streckenenergie mit steigender Schweißgeschwindigkeit ab. Die Schweißgeschwindigkeit korreliert mit dem Quotienten aus Stromstärke und Elektrodendurchmesser:

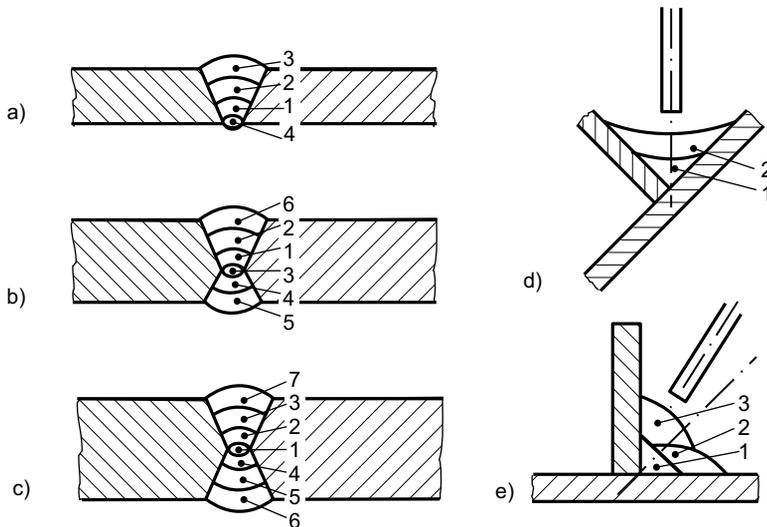
$$v_s \sim \frac{I_s}{d_e} \quad (2.8)$$

Der Einfluss der Lichtbogenspannung  $U_s$  kann praktisch vernachlässigt werden, da diese nur in geringen Bereichen infolge der statischen Kennlinien der Schweißstromquellen verändert werden kann. Der Wärmeeintrag aus dem Schweißprozess - interner Wärmeeintrag - muss bei bedingt schweißgeeigneten Stählen häufig mit einer zusätzlichen Erwärmung von außen - externer Wärmeeintrag - kombiniert werden. Der Wärmeeintrag summiert sich dann und bewirkt im zeitlichen Ablauf entsprechend unterschiedliche Effekte, sowohl bei der Gefügeausbildung und Gefügezusammensetzung als auch bei den Spannungszuständen im Bauteil nach dem Schweißen. Derartige Zeit-Temperatur-Verläufe sind in Bild 2.22 sowie Bild 2.27 dargestellt.

Diese thermischen Zyklen ändern sich, sobald in mehreren Lagen geschweißt wird (Bild 2.23).



**Bild 2.22** Zeit-Temperatur-Verlauf für das Schweißen a) mit Vorwärmen und b) mit konstanter Arbeitstemperatur [NEU96]



**Bild 2.23** Schweißfolgen bei unterschiedlichem Nahtaufbau. a) V-Naht; b) 2/3-Doppel-V-Naht; c) Doppel-V-Naht; d) Kehlnaht Position PA; e) Kehlnaht Position PB