

Mario Kusch
Klaus-Jürgen Matthes
Werner Schneider

Schweißtechnik

Schweißen von metallischen
Konstruktionswerkstoffen



8., aktualisierte Auflage

HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Kusch / Matthes / Schneider
Schweißtechnik



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

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 (Abschnitt 3.12, 3.13, 4.4, Kapitel 7 bis 10)

Dr.-Ing. Stefan Thurner (Abschnitt 3.7 bis 3.10)

Dr.-Ing. Marcel Todtermuschke (Kapitel 1 und 2)

Mario Kusch
Klaus-Jürgen Matthes
Werner Schneider

Schweißtechnik

Schweißen von metallischen
Konstruktionswerkstoffen

8., aktualisierte Auflage

HANSER



Print-ISBN: 978-3-446-48543-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-48692-8

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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 dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © stock.adobe.com/Ilshat

Satz: le-tex publishing services, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

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,

- Schweißseignung,
- 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 Fugestelle 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 systematische Gliederung des Buches und die annähernd 800 Begriffe des Sachwortverzeichnis geben dem Nutzer eine klare Orientierung und ermöglichen ein schnelles Auffinden der gesuchten Informationen.

Bei der aktualisierten 8. 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

Vorwort	V
1 Grundlagen	1
1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580	1
1.2 Fügen durch Schweißen	5
1.3 Wirkprinzipien beim Schweißen	7
2 Schweißbarkeit	14
2.1 Grundlagen und Einteilung	14
2.2 Schweißseignung von Stählen	16
2.3 Schweißsicherheit	25
2.3.1 Konstruktive Gestaltung	26
2.3.2 Beanspruchungszustand	28
2.3.3 Regelwerke zur Auslegung von Schweißkonstruktionen	29
2.3.4 Anwendung von Finite-Elemente-Methoden zur Bemessung geschweißter Tragwerke	32
2.4 Schweißmöglichkeit	34
2.4.1 Grundlagen	34
2.4.2 Vorbereitungen zum Schweißen	35
2.4.3 Durchführung des Schweißens	39
2.4.4 Nacharbeiten beim Schweißen	47
2.4.5 Anwendung numerischer Simulationen für die Prozessanalyse beim Schweißen	48

2.5	Qualitätssicherung beim Schweißen	49
2.6	Arbeitsschutz beim Schweißen	52
2.7	Schweißen im Produkt-, Umwelt- und Energiemanagement	54
3	Schweißen mit Lichtbogen	58
3.1	Grundlagen der Lichtbogentechnik	58
3.1.1	Physik des Lichtbogens	58
3.1.2	Zünden des Lichtbogens	63
3.1.3	Betrieb des Lichtbogens	66
3.2	Schweißstromquellen zum Lichtbogenschweißen	69
3.2.1	Überblick	69
3.2.2	Schweißumformer	70
3.2.3	Schweißtransformatoren	70
3.2.4	Schweißgleichrichter	72
3.2.5	Schweißumrichter	76
3.2.6	Statische Kennlinien von Schweißstromquellen	77
3.2.7	Dynamische Eigenschaften von Schweißstromquellen	79
3.2.8	Regelungsprinzipien zur Arbeitspunktstabilisierung	80
3.2.9	Modulationsarten bei Impulsstromquellen	82
3.2.10	Angaben auf dem Leistungsschild	84
3.3	Schweißbrenner zum Lichtbogenschweißen	87
3.3.1	Stabelektrodenhalter	87
3.3.2	Stromkontakteinrichtung zum UP-Schweißen	88
3.3.3	Schweißbrenner mit nichtabschmelzender Elektrode	89
3.3.4	Schweißbrenner mit abschmelzender Elektrode	92
3.3.5	Bolzenschweißpistolen	93
3.4	Drahtvorschubsysteme zum Lichtbogenschweißen	94
3.4.1	Grundaufbau	94
3.4.1.1	Stirnrollenantrieb	95
3.4.1.2	Planetarantrieb	97
3.4.2	Bauformen mit potenzialführender Drahtelektrode	98
3.4.2.1	Bauformen mit nicht potenzialführender Drahtelektrode	100
3.4.2.2	Drahtrichteinheiten	101
3.5	Zusatzwerkstoffe zum Lichtbogenschweißen	102
3.5.1	Stabelektroden	102
3.5.2	Schweißstäbe	108

3.5.3	Massivdrahtelektroden	109
3.5.4	Fülldrahtelektroden	113
3.5.5	Schweißpulver zum UP-Schweißen	118
3.5.6	Schweißpulver zum Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA)	123
3.5.7	Schweißbolzen	124
3.6	Gase zum Lichtbogenschweißen	126
3.6.1	Aufgaben von Schutzgasen	126
3.6.2	Eigenschaften von Schutzgasen	126
3.6.3	Einteilung und Bezeichnung von Schutzgasen	128
3.6.4	Herstellung von Schutzgasen	131
3.6.5	Lieferarten und Entnahmestellen	131
3.6.6	Kennzeichnung von Druckgasflaschen	133
3.7	Lichtbogenhandschweißen (Prozess 111)	135
3.7.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	136
3.7.1.1	Funktionsweise	136
3.7.1.2	Schweißstromquellen	137
3.7.1.3	Elektrodenhalter	137
3.7.1.4	Stabelektroden	138
3.7.2	Anwendung	145
3.7.2.1	Allgemeines	145
3.7.2.2	Reparaturschweißen	145
3.7.2.3	Auftragschweißen	146
3.7.2.4	Verbindungsschweißen	146
3.7.3	Fertigungshinweise	146
3.7.3.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	146
3.7.3.2	Zündvorgang	149
3.7.3.3	Führen der Elektrode	149
3.7.3.4	Schweißparameter	153
3.7.4	Fehler beim Lichtbogenhandschweißen	155
3.7.4.1	Häufige Ursachen und Fehlerbilder	155
3.7.4.2	Poren	156
3.7.4.3	Schlackeeinschlüsse	157
3.7.4.4	Bindefehler	157
3.7.4.5	Geometrische Unregelmäßigkeiten	157
3.7.5	Gefährdungen für den Schweißer	158

3.8	Wolfram-Inertgasschweißen (Prozess 141)	159
3.8.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	160
3.8.1.1	Funktionsweise	160
3.8.1.2	Schutzgase	161
3.8.1.3	Wolframelektroden	165
3.8.1.4	Zusatzwerkstoff	168
3.8.1.5	Schweißstromquellen und Brennertechnik	168
3.8.2	Verfahrensvarianten	170
3.8.2.1	Zünden des Lichtbogens	170
3.8.2.2	Stromart und Polarität	171
3.8.2.3	Mechanisierungsgrad	177
3.8.2.4	WIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoff	177
3.8.3	Anwendung	178
3.8.3.1	Verbindungsschweißen	178
3.8.3.2	Reparaturschweißen	179
3.8.3.3	WIG-Orbitalschweißen	180
3.8.3.4	WIG-Punktschweißen	181
3.8.3.5	WIG-Engspaltschweißen	182
3.8.3.6	WIG-Auftragschweißen	184
3.8.3.7	Sonderanwendungen	184
3.8.4	Fertigungshinweise	185
3.8.4.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	185
3.8.4.2	Zündvorgang	185
3.8.4.3	Brennerführung	187
3.8.4.4	Heften	187
3.8.4.5	Gasschutz	188
3.8.4.6	Richtwerte	190
3.8.5	Fehler beim WIG-Schweißen	191
3.8.5.1	Gaseinschlüsse	191
3.8.5.2	Bindefehler	192
3.8.5.3	Wolframeinschlüsse	193
3.8.5.4	Oxideinschlüsse	193
3.8.5.5	Häufige Fehlerbilder und Ursachen	193
3.8.6	Gefährdungen für den Schweißer	196

3.9	Plasmaschweißen (Prozess 15)	198
3.9.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	199
3.9.1.1	Funktionsweise	199
3.9.1.2	Prozess- und Schutzgase	203
3.9.1.3	Wolframelektroden	207
3.9.1.4	Zusatzwerkstoff	210
3.9.1.5	Schweißstromquellen und Brennertechnik	211
3.9.2	Verfahrensvarianten	215
3.9.2.1	Zünden des Lichtbogens	215
3.9.2.2	Stromart und Polarität	216
3.9.2.3	Mechanisierungsgrad	222
3.9.2.4	Plasmaschweißen mit Zusatzwerkstoff	222
3.9.2.5	Schmelzbadausbildung	224
3.9.3	Anwendung	226
3.9.3.1	Verbindungsschweißen	226
3.9.3.2	Plasma-Punktschweißen	227
3.9.3.3	Plasma-Auftragschweißen	228
3.9.3.4	Mikroplasmaschweißen	230
3.9.3.5	Additive Fertigung	231
3.9.4	Fertigungshinweise	232
3.9.4.1	Allgemeines	232
3.9.4.2	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	234
3.9.4.3	Zündvorgang	236
3.9.4.4	Brennerführung	236
3.9.4.5	Heften	237
3.9.4.6	Gasschutz	237
3.9.4.7	Richtwerte	240
3.9.5	Fehler beim Plasmaschweißen	241
3.9.5.1	Gaseinschlüsse	241
3.9.5.2	Nahtunterwölbung	242
3.9.5.3	Einbrandkerben	242
3.9.5.4	Oxideinschlüsse	242
3.9.5.5	Häufige Fehlerbilder und Ursachen	243
3.9.6	Gefährdungen für den Schweißer	244

- 3.10 Metall-Schutzgasschweißen (Prozess 13) 245
 - 3.10.1 Verfahrensprinzip und Anlagentechnik 246
 - 3.10.1.1 Funktionsweise 246
 - 3.10.1.2 Schutzgase 247
 - 3.10.1.3 Zusatzwerkstoff 253
 - 3.10.1.4 Schweißstromquellen und Brennertechnik 254
 - 3.10.2 Lichtbogenarten 258
 - 3.10.2.1 Allgemein 258
 - 3.10.2.2 Kurzlichtbogen 258
 - 3.10.2.3 Übergangslichtbogen 259
 - 3.10.2.4 Sprühlichtbogen 259
 - 3.10.2.5 Impulslichtbogen 260
 - 3.10.2.6 Hochleistungs-Kurzlichtbogen 260
 - 3.10.2.7 Instabiler Lichtbogen 260
 - 3.10.2.8 Rotierender Lichtbogen 261
 - 3.10.2.9 Hochleistungs-Sprühlichtbogen 261
 - 3.10.2.10 Kräfte beim Werkstoffübergang 262
 - 3.10.3 Verfahrensvarianten 265
 - 3.10.3.1 Hochleistungsschweißen 265
 - 3.10.3.2 Energiereduzierte MSG-Prozesse 271
 - 3.10.3.3 Modifizierte MSG-Impulsprozesse 275
 - 3.10.3.4 MSG-Hybridprozesse 277
 - 3.10.3.5 Zünden des Lichtbogens 280
 - 3.10.3.6 Mechanisierungsgrad 280
 - 3.10.4 Anwendung 281
 - 3.10.4.1 Verbindungsschweißen 281
 - 3.10.4.2 MSG-Engspaltschweißen 282
 - 3.10.4.3 MSG-Auftragschweißen 283
 - 3.10.4.4 Additive Fertigung 285
 - 3.10.4.5 Sonderanwendungen 286
 - 3.10.5 Fertigungshinweise 287
 - 3.10.5.1 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung 287
 - 3.10.5.2 Zündvorgang 288

3.10.5.3	Brennerführung	289
3.10.5.4	Heften	291
3.10.5.5	Gasschutz	291
3.10.5.6	Richtwerte	293
3.10.6	Fehler beim MSG-Schweißen	296
3.10.6.1	Gaseinschlüsse	296
3.10.6.2	Bindefehler	296
3.10.6.3	Häufige Fehlerbilder und Ursachen	297
3.10.7	Gefährdungen für den Schweißer	298
3.11	Unterpulverschweißen (Prozess 12)	299
3.11.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	300
3.11.1.1	Funktionsweise	300
3.11.1.2	Schweißpulver	302
3.11.1.3	Elektroden	324
3.11.1.4	Stromquellen und Brennertechnik	326
3.11.1.5	Mechanisierungseinrichtungen	329
3.11.2	Verfahrensvarianten	331
3.11.2.1	Überblick	331
3.11.2.2	UP-Eindrahtschweißen	332
3.11.2.3	UP-Doppeldrahtschweißen	333
3.11.2.4	UP-Tandemschweißen	335
3.11.2.5	UP-Mehrdrahtschweißen	335
3.11.2.6	UP-Bandschweißen	336
3.11.2.7	UP-Kaltdrahtschweißen	337
3.11.2.8	UP-Heißdrahtschweißen	338
3.11.2.9	UP-Schweißen mit Metallpulverzugabe	338
3.11.3	Anwendung	338
3.11.3.1	Überblick	338
3.11.3.2	Verbindungsschweißen	339
3.11.3.3	UP-Auftragschweißen	340
3.11.3.4	UP-Engspaltschweißen	341
3.11.3.5	UP-Quernahtschweißen	342
3.11.3.6	Verfahrensvergleich	343

- 3.11.4 Fertigungshinweise 344
 - 3.11.4.1 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung 344
 - 3.11.4.2 Schmelzbadsicherung 347
 - 3.11.4.3 Heften 348
 - 3.11.4.4 An- und Auslaufbleche 348
 - 3.11.4.5 Werkstückneigung 349
 - 3.11.4.6 Zünden des Lichtbogens 351
 - 3.11.4.7 Nahtformung 351
 - 3.11.4.8 Richtwerte 354
- 3.11.5 Fehler beim UP-Schweißen 357
 - 3.11.5.1 Häufige Fehlerbilder und Ursachen 357
 - 3.11.5.2 Durchschweißfehler 358
 - 3.11.5.3 Nahtüberhöhung 359
 - 3.11.5.4 Risse 359
 - 3.11.5.5 Lunker 359
 - 3.11.5.6 Schlackeeinschlüsse 360
- 3.11.6 Gefährdungen für den Schweißer 360
- 3.12 Lichtbogenschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen 360
 - 3.12.1 Grundlagen 361
 - 3.12.2 Pressstumpfschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (Prozess 185) 361
 - 3.12.2.1 Verfahrensprinzip 361
 - 3.12.2.2 Anwendungsbereiche 362
 - 3.12.2.3 Ausrüstungen 363
 - 3.12.2.4 Zusatzstoffe 364
 - 3.12.2.5 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit 364
 - 3.12.2.6 Fertigungshinweise 364
 - 3.12.3 Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (MBS-Schweißen) 365
 - 3.12.3.1 Verfahrensprinzip 365
 - 3.12.3.2 Anwendungsbereiche 365
 - 3.12.3.3 Zusatzstoffe 365
 - 3.12.3.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit 366
 - 3.12.3.5 Fertigungshinweise 366

3.13	Lichtbogenbolzenschweißen	367
3.13.1	Grundlagen	367
3.13.2	Verfahrensprinzip	368
3.13.2.1	Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung (Prozess 785)	368
3.13.2.2	Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung (Prozess 786)	369
3.13.2.3	Hubzündungs-Bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas (Prozess 783)	369
3.13.3	Anwendungsbereiche	370
3.13.4	Zusatzstoffe	371
3.13.5	Fertigungshinweise	372
3.13.6	Ausrüstungen	374
3.14	Sensorik beim Lichtbogenschweißen	375
3.14.1	Überblick	375
3.14.2	Taktile Sensoren	377
3.14.3	Elektromagnetische Sensoren	378
3.14.4	Lasersensoren	379
3.14.5	Lichtbogensensoren	382
3.15	Gefährdungen beim Lichtbogenschweißen	384
3.15.1	Elektrischer Strom	384
3.15.2	Elektromagnetische Strahlung	387
3.15.3	Rauch, Stäube und Gase	387
3.15.4	Sauerstoffmangel	388
3.15.5	Spritzer und Schlacke	389
3.15.6	Druckgasflaschen	389
4	Schweißen mit Brenngas-Sauerstoff-Flamme	390
4.1	Grundlagen der Autogentechnik	390
4.1.1	Autogenflamme	390
4.1.1.1	Allgemeines	390
4.1.1.2	Verbrennung	391
4.1.1.3	Flammeneinstellung	393
4.1.2	Autogenbrenner	395
4.1.2.1	Allgemeines	395
4.1.2.2	Brennerarten	397

4.1.2.3	Betreiben der Autogenbrenner	400
4.1.2.4	Flammenstörungen	401
4.1.3	Betriebsmittel der Autogentechnik	402
4.1.3.1	Allgemeines	402
4.1.3.2	Sauerstoff	402
4.1.3.3	Brenngase	406
4.1.3.4	Gegenüberstellung von Gasen der Autogentechnik	415
4.1.4	Sicherheitshinweise und -vorschriften für den Umgang mit Sauerstoff und Brenngasen	417
4.1.5	Armaturen und Zubehör	418
4.1.5.1	Allgemeines	418
4.1.5.2	Druckminderer	418
4.1.5.3	Gasschläuche	421
4.1.5.4	Sicherheitseinrichtungen	423
4.2	Einteilung der Verfahren der Autogentechnik nach DIN 8522	426
4.3	Gasschmelzschweißen (Prozess 31)	428
4.3.1	Grundlagen	428
4.3.2	Anwendungsbereiche	430
4.3.2.1	Allgemeines	430
4.3.2.2	Fugenformen	430
4.3.2.3	Schweißpositionen	432
4.3.2.4	Werkstückdicken	432
4.3.3	Ausrüstung	433
4.3.4	Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe	434
4.3.5	Technologische Merkmale	437
4.3.5.1	Nachrechtsschweißen (NR)	438
4.3.5.2	Nachlinksschweißen (NL)	439
4.4	Gaspressschweißen (Prozess 47)	440
4.4.1	Verfahrensprinzip	441
4.4.2	Anwendungsbereiche	441
4.4.3	Zusatzstoffe	442
4.4.4	Fertigungshinweise	442
4.4.5	Ausrüstungen	443

5	Schweißen mit Widerstandserwärmung	444
5.1	Einteilung der Widerstandsschweißverfahren	444
5.2	Konduktives Widerstandspressschweißen	445
5.2.1	Widerstandserwärmung durch konduktive Stromübertragung ..	445
5.2.2	Ausrüstungen zum konduktiven Widerstandspressschweißen ...	447
5.2.2.1	Aufbau einer konduktiven Widerstandsschweißmaschine	447
5.2.2.2	Schweißstromquellen zum konduktiven Widerstandspressschweißen	449
5.2.2.3	Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen	455
5.2.3	Widerstandspunktschweißen (Prozess 21)	456
5.2.3.1	Verfahrensmerkmale	456
5.2.3.2	Verfahrensprinzip/-beschreibung	458
5.2.3.3	Schweißanlagenaufbau	460
5.2.3.4	Elektroden zum Widerstandspunktschweißen	463
5.2.3.5	Schweißseignung	468
5.2.3.6	Konstruktive Gestaltung	473
5.2.3.7	Fertigungshinweise	476
5.2.3.8	Qualitätssicherung	482
5.2.3.9	Prüfen der Schweißverbindung	486
5.2.3.10	Verfahrensvarianten	490
5.2.3.11	Arbeits- und Gesundheitsschutz	491
5.2.4	Rollennahtschweißen (Prozess 22)	493
5.2.4.1	Verfahrensmerkmale	493
5.2.4.2	Verfahrensprinzip/-beschreibung	494
5.2.4.3	Schweißanlagenaufbau	495
5.2.4.4	Elektroden zum Rollennahtschweißen	499
5.2.4.5	Schweißseignung	500
5.2.4.6	Konstruktive Gestaltung	501
5.2.4.7	Fertigungshinweise	503
5.2.4.8	Qualitätssicherung	506
5.2.4.9	Prüfen der Schweißverbindung	509
5.2.4.10	Verfahrensvarianten	510
5.2.5	Buckelschweißen (Prozess 23)	514
5.2.5.1	Verfahrensmerkmale	514
5.2.5.2	Verfahrensprinzip/-beschreibung	516

5.2.5.3	Schweißanlagenaufbau	516
5.2.5.4	Elektroden zum Buckelschweißen	518
5.2.5.5	Schweißseignung	519
5.2.5.6	Konstruktive Gestaltung	520
5.2.5.7	Fertigungshinweise	524
5.2.5.8	Qualitätssicherung	526
5.2.5.9	Prüfen der Schweißverbindung	528
5.2.5.10	Verfahrensvarianten	529
5.2.6	Abbrennstumpfschweißen (Prozess 24)	530
5.2.6.1	Verfahrensmerkmale	530
5.2.6.2	Verfahrensprinzip/-beschreibung	531
5.2.6.3	Schweißanlagenaufbau	532
5.2.6.4	Schweißseignung	534
5.2.6.5	Konstruktive Gestaltung	534
5.2.6.6	Fertigungshinweise	537
5.2.6.7	Qualitätssicherung	539
5.2.6.8	Prüfen der Schweißverbindung	540
5.2.7	Pressstumpfschweißen (Prozess 25)	541
5.2.7.1	Verfahrensmerkmale	541
5.2.7.2	Verfahrensprinzip/-beschreibung	542
5.2.7.3	Schweißanlagenaufbau	544
5.2.7.4	Schweißseignung	545
5.2.7.5	Konstruktive Gestaltung	545
5.2.7.6	Fertigungshinweise	546
5.2.7.7	Qualitätssicherung	548
5.2.7.8	Prüfen der Schweißverbindung	548
5.2.7.9	Verfahrensvariante Kammerschweißen	549
5.3	Induktives Widerstandspressschweißen	550
5.3.1	Widerstandserwärmung durch induktive Stromübertragung	550
5.3.2	Ausrüstungen zum induktiven Widerstandspressschweißen	552
5.3.2.1	Aufbau einer induktiven Widerstandsschweißmaschine	552
5.3.2.2	Schweißstromquellen zum induktiven Widerstandspressschweißen	553
5.3.2.3	Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen	554

5.3.3	Induktives Hochfrequenzschweißen (Prozess 743)	555
5.3.3.1	Verfahrensmerkmale	555
5.3.3.2	Verfahrensprinzip/-beschreibung	556
5.3.3.3	Schweißseignung	558
5.3.3.4	Fertigungshinweise	558
5.3.4	Induktives Stumpfschweißen (Prozess 741)	559
5.4	Elektroschlackeschweißen (Prozess 72)	560
5.4.1	Grundlagen zum Elektroschlackeschweißen	560
5.4.2	Elektroschlacke-Verbindungsschweißen	561
5.4.2.1	Verfahrensprinzip/-beschreibung	561
5.4.2.2	Schweißanlagenaufbau	562
5.4.2.3	Schweißpulver	563
5.4.2.4	Zusatzwerkstoff	564
5.4.2.5	Schweißseignung	564
5.4.2.6	Fertigungshinweise	565
5.4.2.7	Verfahrensvarianten	568
5.4.3	Elektroschlacke-Auftragschweißen	570
5.4.3.1	Verfahrensprinzip/-beschreibung	570
5.4.3.2	Schweißanlagenaufbau	571
5.4.3.3	Schweißpulver	572
5.4.3.4	Zusatzwerkstoff	572
5.4.3.5	Fertigungshinweise	572
6	Schweißen mit Strahlen	575
6.1	Grundlagen der Strahltechnik	575
6.2	Lichtstrahlschweißen – Schweißen mit inkohärentem Licht (Prozess 75)	577
6.3	Elektronenstrahlschweißen (Prozess 51)	578
6.3.1	Grundlagen des Elektronenstrahlschweißens	580
6.3.1.1	Entstehung und Besonderheiten des Elektronenstrahls	580
6.3.1.2	Elektronenstrahlerzeugung	581
6.3.1.3	Elektronenstrahlführung	583
6.3.1.4	Elektronenstrahlschweißanlagen	584
6.3.2	Anwendung des Elektronenstrahlschweißens	590
6.3.2.1	Tiefschweißeffect	590
6.3.2.2	Vorbereitung der Werkstücke	592

6.3.2.3	Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis	595
6.3.2.4	Schweißeignung metallischer Werkstoffe	599
6.3.2.5	Industrielle Anwendung	603
6.3.3	Weitere Verfahren der Elektronenstrahlmaterialbearbeitung	606
6.3.4	Strahlenschutz	607
6.4	Laserstrahlschweißen (Prozess 52)	608
6.4.1	Grundlagen des Laserstrahlschweißens	611
6.4.1.1	Entstehung und Besonderheiten von Laserlicht	611
6.4.1.2	Eigenschaften des Laserlichts	613
6.4.2	Laseranlagen	614
6.4.2.1	Laserstrahlquellen	614
6.4.2.2	Laserstrahlführung	623
6.4.2.3	Fokussierende Optiken	625
6.4.2.4	Bewegungseinrichtungen	625
6.4.2.5	Steuerung und Bedienung	627
6.4.3	Anwendung des Laserstrahlschweißens	627
6.4.3.1	Tiefschweißeffekt	627
6.4.3.2	Vorbereitung der Werkstücke	629
6.4.3.3	Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis	629
6.4.3.4	Schweißeignung metallischer Werkstoffe	637
6.4.3.5	Industrielle Anwendung	638
6.4.4	Weitere Verfahren der Lasermaterialbearbeitung	641
6.4.4.1	Überblick	641
6.4.4.2	Laserstrahlschneiden	644
6.4.4.3	Additive Fertigung mit dem Laserstrahl	645
6.4.5	Strahlenschutz	651
6.4.6	Gegenüberstellung Elektronenstrahlschweißen – Laserstrahlschweißen	653
7	Schweißen durch Bewegungsenergie	657
7.1	Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung kinetischer Energie	657
7.2	Reibschweißen	658
7.2.1	Rotationsreibschweißen (Prozess 42)	658
7.2.1.1	Verfahrensprinzip	659
7.2.1.2	Ausrüstungen	660

7.2.1.3	Anwendungsbereich	663
7.2.1.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	665
7.2.1.5	Fertigungshinweise	667
7.2.1.6	Richtwerte	669
7.2.2	Linearreibschweißen	670
7.3	Rührreibschweißen (Prozess 43)	672
7.3.1	Verfahrensprinzip	672
7.3.2	Ausrüstungen	674
7.3.3	Anwendungsbereiche	675
7.3.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	676
7.3.5	Fertigungshinweise	677
7.3.6	Punktreibschweißen	679
7.3.6.1	Verfahrensprinzip	679
7.3.6.2	Anwendungsbereiche	680
7.4	Ultraschallschweißen (Prozess 41)	681
7.4.1	Verfahrensprinzip	681
7.4.2	Ausrüstungen	682
7.4.3	Anwendungsbereiche	684
7.4.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	685
7.4.5	Fertigungshinweise	687
7.5	Kaltpressschweißen (Prozess 48)	688
7.5.1	Verfahrensprinzip	688
7.5.2	Anwendungsbereich	689
7.5.3	Konstruktive Gestaltung	692
7.5.4	Fertigungshinweise	693
7.6	Sprengschweißen (Prozess 441)	694
7.6.1	Verfahrensprinzip	694
7.6.2	Anwendungsbereich	696
7.6.3	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	697
7.6.4	Fertigungshinweise	697
7.6.5	Spezielle Gefährdungen	698
7.7	Magnetimpulsschweißen (Prozess 442)	698
7.7.1	Verfahrensprinzip	699
7.7.2	Anwendungsbereich	700
7.7.3	Spezielle Gefährdungen	701

8 Schweißen durch festen Körper..... 702

8.1 Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung von Heizelementen 702

8.2 Heizelementschweißen 702

 8.2.1 Verfahrensprinzip 703

 8.2.2 Anwendungsbereich, Ausrüstungen 705

 8.2.3 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit 705

 8.2.4 Fertigungshinweise 706

9 Schweißen mit Metallschmelzen..... 707

9.1 Grundlagen der schweißtechnischen Nutzung von Metallschmelzen 707

9.2 Gießschweißen (Thermitschweißen) 708

 9.2.1 Aluminothermisches Schmelzschweißen (Prozess 71) 708

 9.2.1.1 Verfahrensprinzip 708

 9.2.1.2 Anwendungsbereich 709

 9.2.1.3 Ausrüstungen 710

 9.2.1.4 Fertigungshinweise 711

 9.2.2 Aluminothermisches Pressschweißen 712

 9.2.2.1 Verfahrensprinzip 712

 9.2.2.2 Anwendungsbereich 713

 9.2.2.3 Fertigungshinweise 713

9.3 Besondere Gefährdungen 713

10 Schweißen durch Diffusion..... 714

10.1 Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung der Diffusion 714

10.2 Diffusionsschweißen (Prozess 45) 715

 10.2.1 Verfahrensprinzip 715

 10.2.2 Anwendungsbereich 718

 10.2.3 Konstruktive Gestaltung 719

 10.2.4 Fertigungshinweise 720

Literaturverzeichnis..... 723

Index..... 747

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 Fertigungsverfahren sinnvoll bearbeiten. Diese Einflüsse und Wechselbeziehungen müssen sowohl bei der Produkt- und Fertigungspro-

zessgestaltung 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.

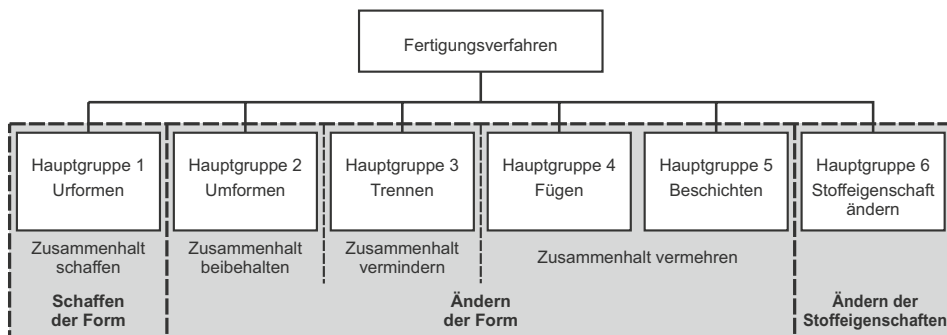


Bild 1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach Art des Zusammenhalts und deren Wirkungsweise nach DIN 8580

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).

Tabelle 1.1 Teiloperationen des Montageprozesses nach VDI 2860

Fügen (DIN 8593)	Handhaben (VDI 2860)	Kontrollieren (VDI 2860)	Justieren durch	Sonderoperation
■ Zusammensetzen ■ Füllen ■ Anpressen und Einpressen ■ Fügen durch Urformen ■ Fügen durch Umformen ■ Fügen durch Schweißen ■ Fügen durch Löten ■ Fügen durch Kleben ■ textiles Fügen	■ Speichern ■ Mengen verändern ■ Bewegen ■ Sichern ■ Kontrollieren	■ Messen ■ Prüfen	■ Einformen ■ Umformen ■ Trennen ■ Fügen von Ausgleichsteilen ■ Einstellen ■ Nachbehandeln	■ Markieren ■ Erwärmen ■ Kühlen ■ Reinigen ■ Entgraten ■ Bedrucken ■ Abdecken ■ Abziehen ■ Auspacken ■ Ölen ■ Einsprühen ■ Abdichten

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-Lage-bringen“, „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 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 Thermomechanisches 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		6.6 Bestrahlen
			4.7 Fügen durch Löten DIN 8593-7 DIN ISO 857-2	5.7 Beschichten durch Löten	6.7 Photochemische 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

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 **Schmelzschweißen** 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.

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.

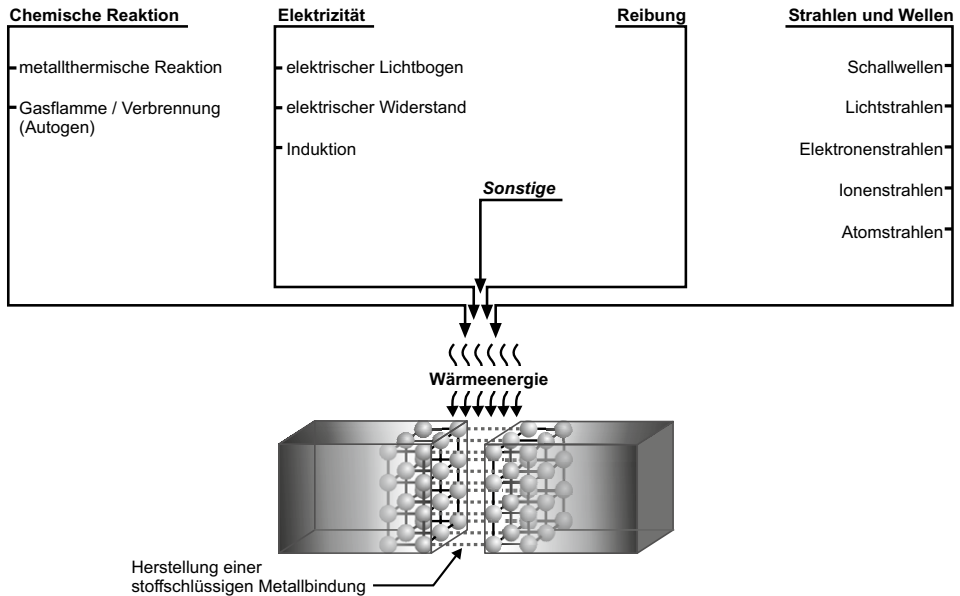


Bild 1.3 Formen der Wärmeerzeugung an der Fügestelle

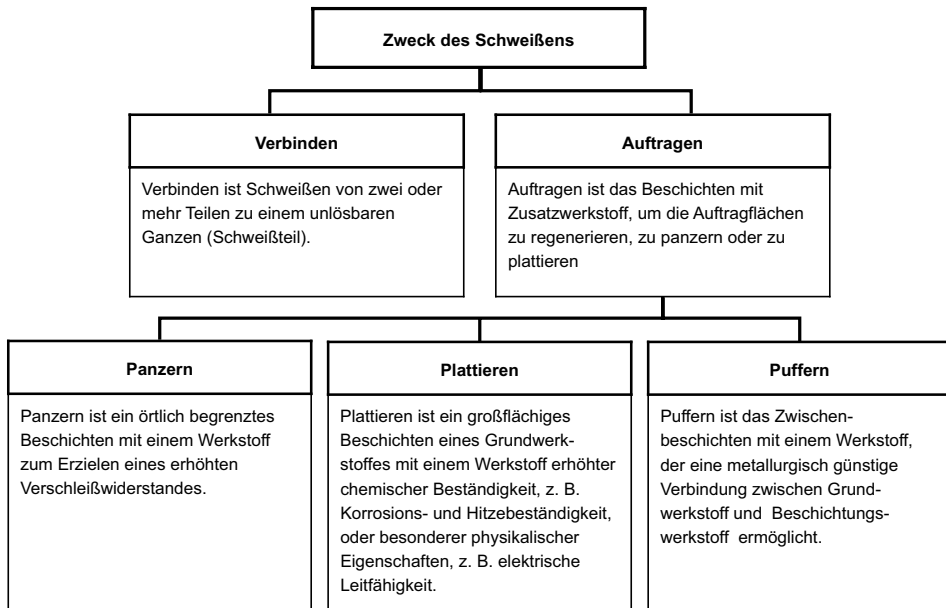


Bild 1.4 Einteilung des Schweißens nach dessen Zweck

1.3 Wirkprinzipien beim Schweißen

Die Schweißverbindung ist eine stoffschlüssige Verbindung. Sie beruht auf der Wirkung zwischenatomarer und zwischenmolekularer Kräfte. Sie zählt zu den **unlösbaren 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, Verformbarkeit) 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 Fugestelle) wirksam wird. Zusätzlich zur Annäherung ist aber auch die Entfernung jeglicher Fremdschichten auf der Oberfläche (z. B. Oxide, Verunreinigungen etc.) der beiden Fügeteile im Bereich der Fugestelle erforderlich. Diese Anforderungen können u. a. durch das Aufschmelzen des Werkstoffes bzw. durch starke Druckeinwirkung oder auch Relativbewegung der Fügeteiloberflächen 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 Fügeteile an der Fugestelle – 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 den Tabellen 1.2 und 1.3 werden ausgewählte Schweißverfahren entsprechend dieser Einteilung nach den Wirkprinzipien dargestellt. Diese Einteilung bei der Herstellung der Schweißverbindung ist ebenfalls Grundlage des Aufbaus dieses Buches in den nachfolgenden Kapiteln.

Für die 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 ther-

mische Schneiden sowie für Lötverfahren angewendet. Die nachfolgenden Ziffern (eine oder zwei) kennzeichnen gegebenenfalls vorhandene Verfahrensuntergruppen und -varianten.

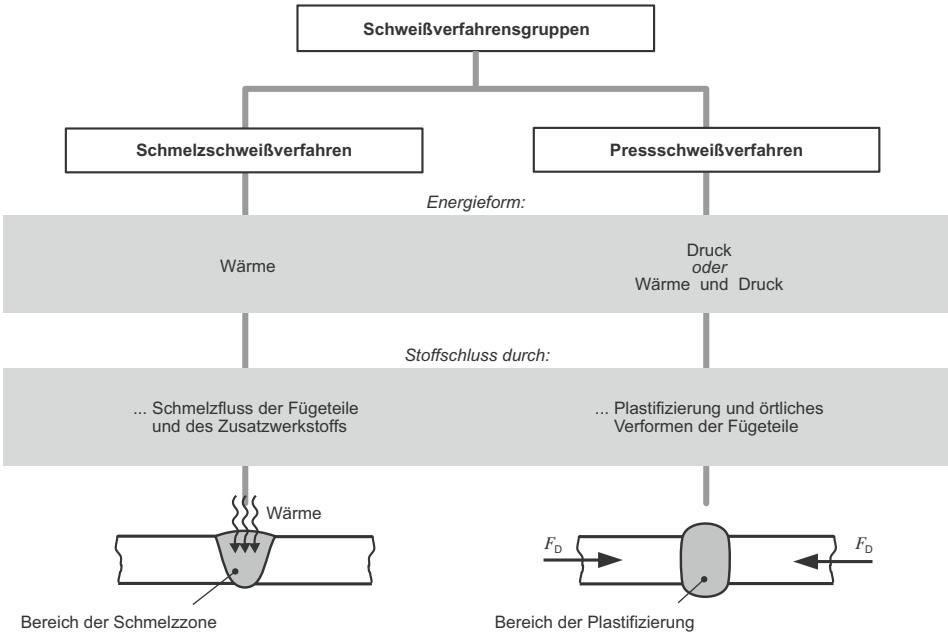
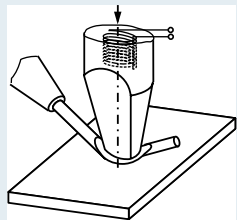
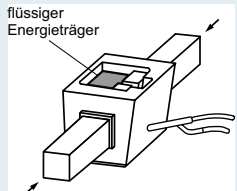


Bild 1.5 Wirkpaarungen beim Schweißen

Tabelle 1.2 Wirkprinzipien beim Schmelz- und Pressschweißen (in Anlehnung an DIN 8593-6) **Untergruppe 6.1 Pressschweißen**

Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1.1 ... durch feste Körper	Heizelementschweißen	Fügen von Werkstücken durch Anpressen mit einem beheizten Schweißwerkzeug	
6.1.2 ... durch Flüssigkeit	Gießpressschweißen	Fügen, indem die Fügestelle der Werkstücke durch Umgießen mit einem flüssigen Energieträger erwärmt und verpresst wird	

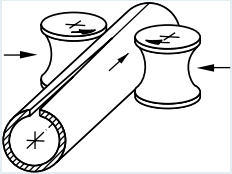
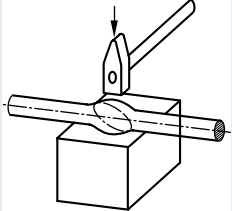
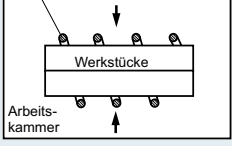
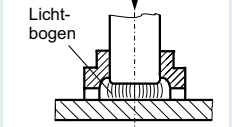
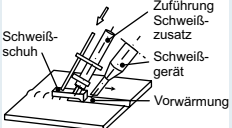
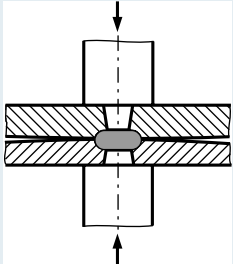
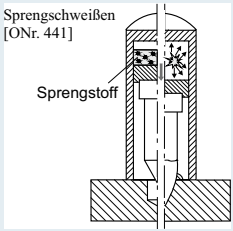
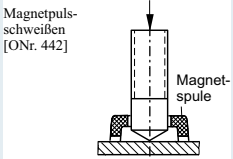
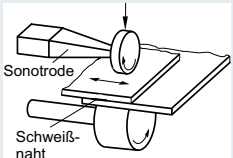
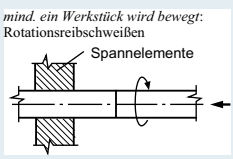
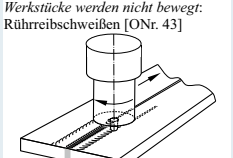
Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1.3 ... durch Gas	Gaspressschweißen [ONr. 47]	Fügen durch Verpressen von Werkstücken mit durch Flammen erwärmten Stoßflächen	
	Walzschweißen	Fügen, indem erwärmte Werkstücke gemeinsam gewalzt werden	
	Feuerschweißen	Fügen von Werkstücken durch Freiformen, Gesenkformen oder Durchdrücken der durch Feuer erwärmten Stoßflächen	
	Diffusionsschweißen [ONr. 45]	Fügen von Werkstücken im Vakuum, unter Schutzgas oder in einer Flüssigkeit auf grund von Diffusion an den Stoßflächen durch Wärme und Kraft	 Heizelemente Werkstücke Arbeitskammer
6.1.4 ... durch elektrische Gasentladung	Lichtbogenpressschweißen	Fügen durch Verpressen von Werkstücken, die durch einen kurzzeitig brennenden Lichtbogen erwärmt wurden	 Bolzenschweißen [ONr. 78] Lichtbogen <u>alternative Verfahrensvariante:</u> Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr.185]
6.1.5 ... durch Strahlung	Lichtstrahl-Extrusionsschweißen <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 Stoßflächen drückt	 Zuführung Schweißzusatz Schweißschuh Vorwärmung Schweißgerät

Tabelle 1.2 Wirkprinzipien beim Schmelz- und Pressschweißen (in Anlehnung an DIN 8593-6) **Untergruppe 6.1 Pressschweißen** (Fortsetzung)

Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]	Beispiel
6.1.6 ... durch Bewegung	Kaltpressschweißen [ONr. 48]	Fügen, indem Werkstücke an der Fügestelle durch stetige Krafteinwirkung ohne Wärme stark plastisch verformt werden 
	Schockschweißen	Fügen von Werkstücken durch schlagartige Krafteinwirkung 
		
	Ultraschallschweißen [ONr. 41]	Fügen durch Kraft und schwingende Bewegung mit Frequenzen im Ultraschallbereich ($f \geq 20 \text{ kHz}$) 
	Reibschweißen [ONr. 42]	Fügen, indem die durch Reibung erwärmten Werkstücke miteinander verpresst werden 
		

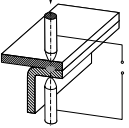
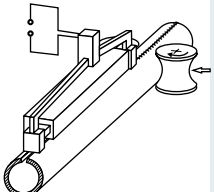
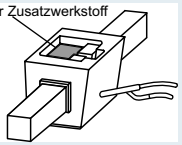
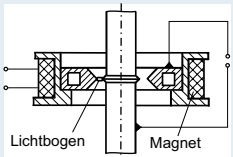
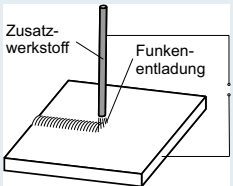
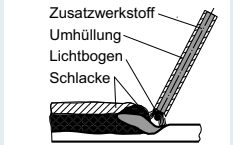
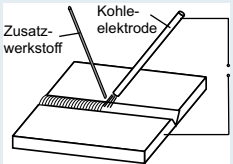
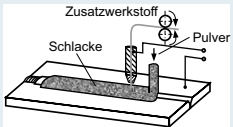
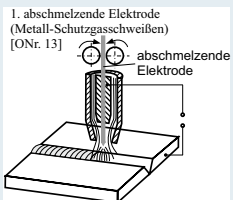
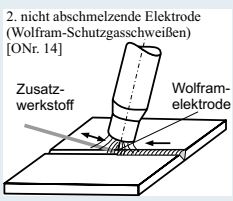
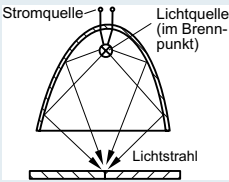
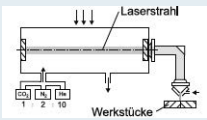
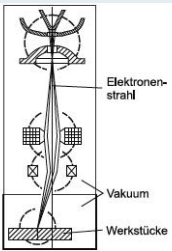
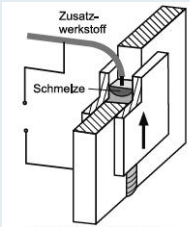
Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1.7 ... durch elektrischen Strom	Widerstandspressschweißen	Fügen von Werkstücken durch partielle elektrische Widerstandserwärmung in der Schweißzone und nachfolgendes Verpressen	<i>konduktives Pressschweißen:</i> Widerstandspunktschweißen [ONr. 21]  <i>andere Verfahrensvarianten:</i> Buckel-, Rollennaht-, Rolltransformator-, Schleifkontakt-, Abbrennstumpf- und Pressstumpfschweißen <i>induktives Pressschweißen:</i> Induktionsschweißen [ONr. 74] 

Tabelle 1.3 Wirkprinzipien beim Schmelz- und Pressschweißen (in Anlehnung an DIN 8593-6) **Untergruppe 6.2 Schmelzschweißen**

Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2.1 ... durch feste Körper	<i>kein Prozess bekannt</i>		
6.2.2 ... durch Flüssigkeit	Gießschmelzschweißen	Fügen, indem die eingeformte Füge­stelle durch Umgießen mit einem flüssigen Zusatzwerkstoff angeschmolzen wird	flüssiger Zusatzwerkstoff 
6.2.3 ... durch Gas	Gasschmelzschweißen [ONr. 3]	Fügen durch Erzeugen des Schweiß­bades mit einer konzentrierten Brenngas-O ₂ -Flamme	Zusatzwerkstoff (alternativ auch Pulver einsetzbar) 

Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
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	 Lichtbogen Magnet
	Funkenschweißen	Fügen, indem durch Funkentladungen der Werkstoff der Elektrode zum Werkstück abgetragen wird	 Zusatzwerkstoff Funkenentladung
	Metalllichtbogen-schweißen [ONr. 11]	Fügen durch Aufschmelzen der Füge-stelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer abschmelzenden, schlackebildenden Elektrode und dem Werkstück brennt	Lichtbogenhandschweißen [ONr. 111]  Zusatzwerkstoff Umhüllung Lichtbogen Schlacke <u>andere Verfahrensvarianten:</u> Schwerkraft-, Federkraft-, Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode, Unterschieneschweißen
	Kohlelichtbogen-schweißen	Fügen durch Aufschmelzen der Füge-stelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer nicht abschmelzenden Kohlelektrode und dem Werkstück brennt	 Zusatzwerkstoff Kohlelektrode
	Unterpulverschweißen [ONr. 12]	Fügen durch Aufschmelzen der Füge-stelle mit einem Lichtbogen, der zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück brennt, wobei der Lichtbogen mit schlackebildendem Pulver abgedeckt ist	 Zusatzwerkstoff Pulver Schlacke
	Schutzgasschweißen	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]  abschmelzende Elektrode 2. nicht abschmelzende Elektrode (Wolfram-Schutzgasschweißen) [ONr. 14]  Zusatzwerkstoff Wolframelektrode

Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2.5 ... durch Strahl	Lichtstrahlschweißen [ONr. 75]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines nicht kohärenten Lichtstrahls aufgeschmolzen wird	
	Laserstrahlschweißen [ONr. 52]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines kohärenten Strahls aufgeschmolzen wird	
	Elektronenstrahlschweißen [ONr. 51]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit einem Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird	
6.2.6 ... durch Bewegung von Masse	kein Prozess bekannt		
6.2.7 ... durch elektrischen Strom	Widerstandsschmelzschweißen	Fügen von Werkstücken, indem die Fügezone durch Widerstandserwärmung geschmolzen wird	 andere Verfahrensvariante: Kammerschweißen

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:

1. der Eignung von Fügeteilen, diese in eine Verbindung zu überführen, bei denen der Zusammenhalt örtlich geschaffen und insgesamt vermehrt wird,
2. der Sicherheit der gefügten Verbindung während des gesamten Betriebs-Lebenszyklus und
3. 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 **Schweißeignung** 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).

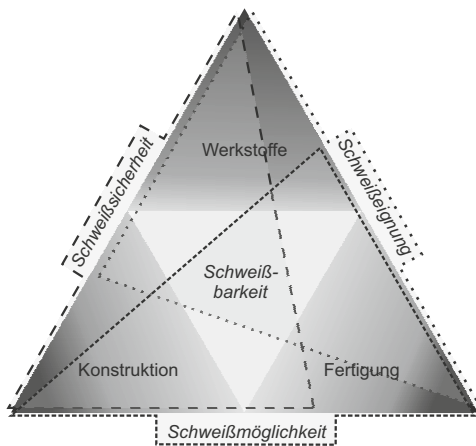


Bild 2.1

Beschreibung der Schweißbarkeit als Wechselbeziehung von Schweißsicherheit, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit

Als Verallgemeinerung der Schweißbarkeit kann für die Vielzahl der existierenden Fügeverfahren der Begriff der **Fügbbarkeit** definiert werden, und damit wird in Analogie die Eigenschaft von Fügebauteilen beschrieben, 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.

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 Schweißsicherheit, -sicherheit und -möglichkeit sowie deren Wechselbeziehungen sind in Bild 2.2 dargestellt.

Schweißbarkeit eines Bauteiles	Schweißneigung Werkstoffbedingte Schweißneigung Chemische Zusammensetzung z. B.: ▪ Härteneigung, ▪ Alterungsneigung, ▪ Sprödbrechneigung, ▪ Heißrissneigung, ▪ Schmelzbadverhalten. Metallurgische Eigenschaften z. B.: ▪ Seigerungen, ▪ Einschlüsse ▪ Korngröße, ▪ Gefüge, ▪ Anisotropie. Physikalische Eigenschaften z. B.: ▪ Ausdehnungsverhalten, ▪ Wärmeleitfähigkeit, ▪ Schmelzpunkt, ▪ Festigkeit, ▪ Zähigkeit.
	Schweißsicherheit Konstruktionsbedingte Schweißsicherheit Konstruktive Gestaltung z. B.: ▪ Kraftfluss im Bauteil, ▪ Anordnung der Schweißnähte, ▪ Werkstückdicke, ▪ Kerbwirkung, ▪ Steifigkeitsunterschied. Beanspruchungszustand z. B.: ▪ Art und Größe der Spannungen im Bauteil, ▪ Räumlichkeitsgrad der Spannungen, ▪ Beanspruchungsgeschwindigkeit, ▪ Temperatur, ▪ Korrosion.
	Schweißmöglichkeit Fertigungsbedingte Schweißmöglichkeit Vorbereitung zum Schweißen z. B.: ▪ Auswahl von Schweißverfahren, ▪ von Zusätzen und Hilfsstoffen, ▪ Stoßart, ▪ Fugenform, ▪ Vorwärmung, ▪ Maßnahmen bei ungünstigen Witterungsverhältnissen (z. B. Einhausungen). Ausführung der Schweißarbeiten z. B.: ▪ Wärmeführung, ▪ Wärmeeinbringung, ▪ Schweißfolge. Nachbehandlung z. B.: ▪ Wärmebehandlung, ▪ Schleifen, ▪ Beizen, ▪ Richten.

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

Eine Auswahl dieser Einflussgrößen, soweit sie für das weitere Verständnis bei der Behandlung von Schweißverfahren von Bedeutung sind, wie z. B. Wärmeeintrag, mechanische Gütewerte, Verformungen und Spannungen, werden in den nachfolgenden Ausführungen erläutert.

2.2 Schweißneigung von Stählen

Die Schweißneigung eines Werkstoffs ist vorhanden, wenn bei der Fertigung aufgrund der werkstoffbedingten chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften eine anforderungsgerechte Schweißverbindung hergestellt werden

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

Tabelle 2.1 Einflussfaktoren auf die Schweißseignung

Einflussfaktor	Beispiele	Mögliche Auswirkung auf ...
Chemische Zusammensetzung	■ Art der Basislegierung (z. B. Eisen-, Aluminium-, Nickel-, Kupfer- usw.) ■ Legierungsbestandteile (gewünschte) ■ Begleitelemente/Verunreinigungen	■ Aufhärtung ■ Heißrissbildung ■ Lunkerentstehung ■ Korrosionsbeständigkeit ■ Alterung ■ Sprödbbruchneigung ■ Anlegierungsneigung
Metallurgische Eigenschaften	■ Gefügearten ■ Korngröße ■ Kornstreckung ■ Kornorientierung ■ Seigerungsverhalten	■ Gefügeausbildung ■ Anisotropie ■ Umwandlungsverhalten ■ Bildung von Einschlüssen ■ Aufhärtung ■ Rissbildung
Physikalische Eigenschaften	■ Schmelztemperatur ■ elektrische Leitfähigkeit ■ Wärmeleitfähigkeit ■ Wärmeausdehnungskoeffizient ■ E-Modul ■ Streckgrenze ■ elastische/plastische Dehnbarkeit ■ Zugfestigkeit ■ Glanz/Reflexion	■ Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten ■ Schrumpfung ■ Eigenspannungen ■ Verzug

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 Schweißseignung mit zunehmenden Legierungsgehalten sowie Verunreinigungen. Neben der chemischen Zusammensetzung bestimmt vor allem die Metallurgie metallischer Werkstoffe die Schweißseignung 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 Seigerungszone) vergossenen Stähle mehr hergestellt, da im industriell 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 Aufhärtung. 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 Schweißseignung 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.

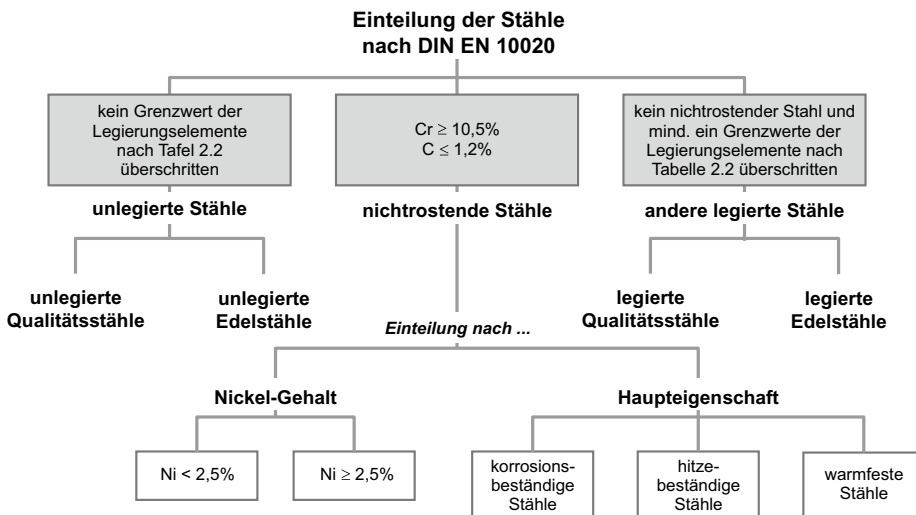


Bild 2.3 Einteilung der Stähle nach DIN EN 10020

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 Stähle

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

Je nach Grad der Erwärmung des Werkstoffes an der Fugestelle 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 °C verbessert werden.

Methode B – Abschätzung der Schweißseignung von legierten Stähle (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 Schweißseignung dieser Stähle, kann das **Kohlenstoffäquivalent** herangezogen werden. Das Kohlenstoffäquivalent wird in Abhängigkeit von den Anteilen der Legierungselemente in Gewichtsprozenten bestimmt. Für die Einschätzung der Schweißseignung 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:

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

Die Schweißseignung 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 ¹⁾	$t < 25$	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
1) Bei Stahlguss ist bereits ab einem CEV > 0,35 % vorzuwärmen, dabei sind die Normen und Herstellerangaben zu beachten.		

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

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

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:

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

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 Schweißseignung 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 sogenannten 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 Wärmeeinflusszone. 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-SZTU-Diagramme über die Abschätzung der Schweißseignung hinaus, wie Vermeidung von Kaltrissen durch Vorwärmen und Optimieren der Streckenenergie, des Kaltverformungsvermögens u. a., sind in Bild 2.4 aufgeführt.

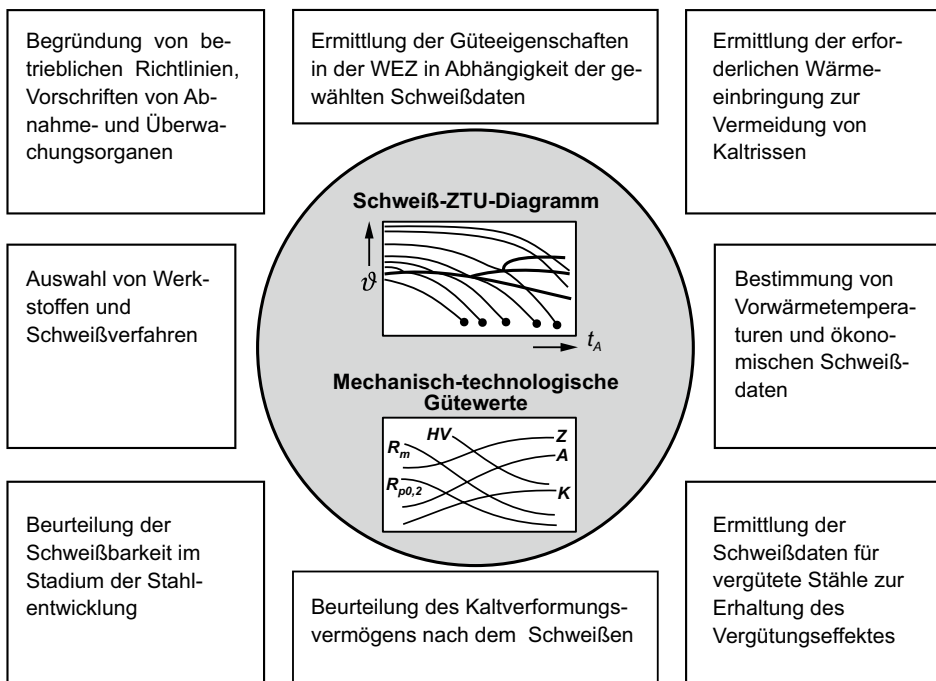


Bild 2.4 Schematisches SZTU-Diagramm und seine Anwendungsmöglichkeiten [SEY92]

Methode C – Abschätzung der Schweißseignung 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 Schmelzschweißseignung 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 verschiedene Bereiche gekennzeichnet, die spezifische Gefahren des Versagens der Schweißnaht kennzeichnen. Entscheidend für die Schweißseignung 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 DeLong-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 Schmelzschweißseignung bei Strahlverfahren (Elektronenstrahl, Laserstrahl) schließt die bereits vorgestellte Schmelzschweißseignung 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.

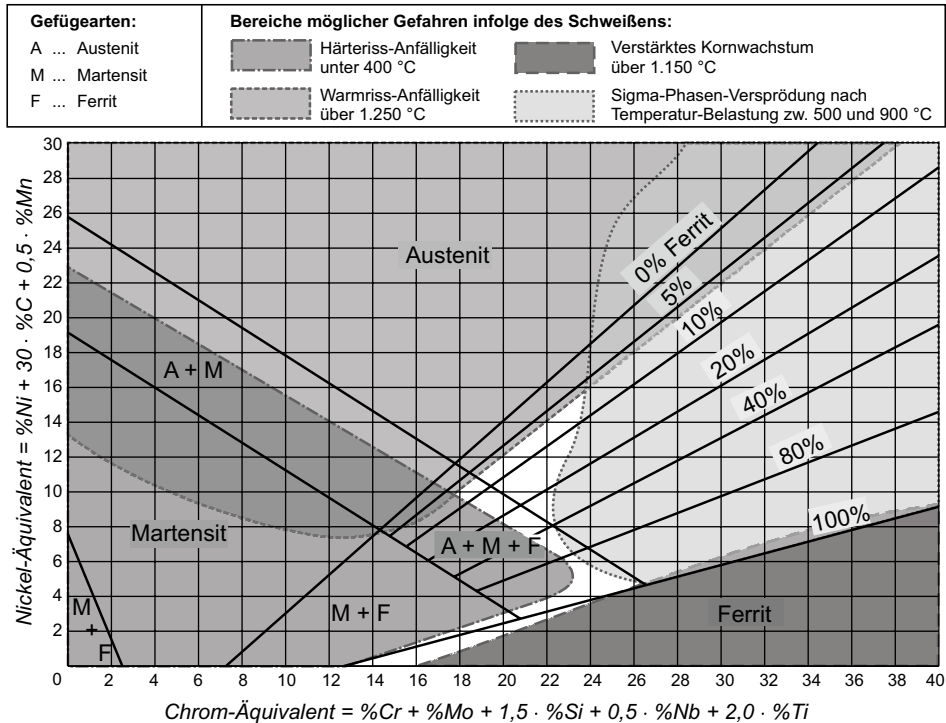


Bild 2.5 Schaeffler-Diagramm mit Gefahrenbereichen zum Versagen der Schweißnaht

2.3 Schweißsicherheit

Die Schweißsicherheit einer Konstruktion ist gegeben, wenn das zu fügende Bauteil mit dem dafür verwendeten Werkstoff aufgrund seiner konstruktiven 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.).

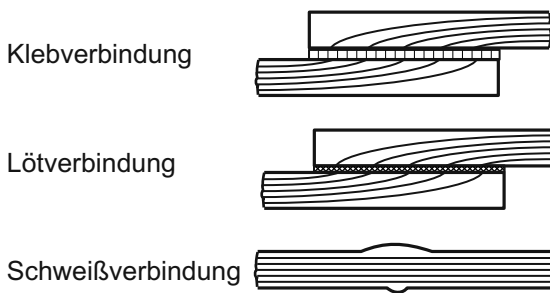


Bild 2.6

Kraftfluss im Bauteil bei stoffschlüssigen Verbindungen [NEU96]

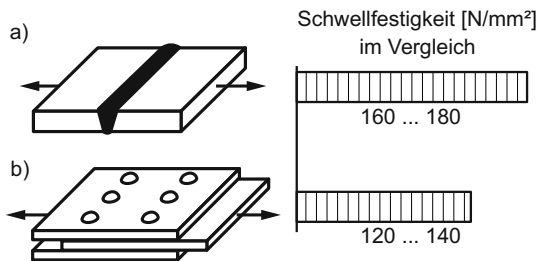


Bild 2.7

Einfluss des Kraftflusses auf die Schweißfestigkeit (Werte am Beispiel von Werkstoff S235).
a) Stumpfnah (Normalgüte);
b) Nietlaschenstoß [NEU96]

An ausgewählten Beispielen wird der Einfluss der Gestaltung auf die dynamische Schweißfestigkeit des Bauteils bzw. der Verbindung gezeigt (Bild 2.7 und Bild 2.10). Die Wirkung von Kerben auf die Schweißfestigkeit von Bauteilen bzw. Schweißverbindungen zeigen die Bild 2.9 bis Bild 2.12.

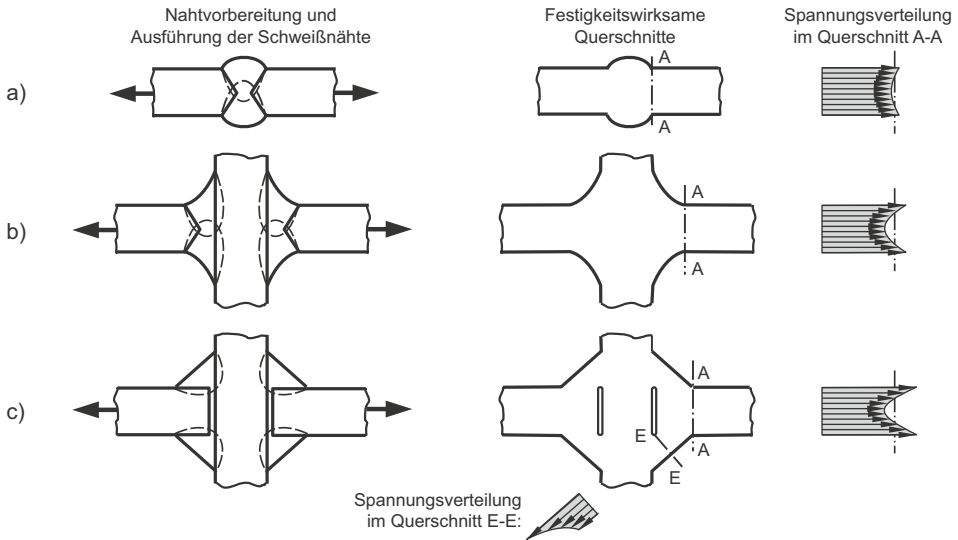


Bild 2.8 Spannungsverteilungen in Schweißverbindungen bei Zug-Druck-Belastung in Abhängigkeit von der Art und Anordnung der Schweißnähte. a) Stumpfnah; b) K-Nah; c) Kehlnah [NEU96]

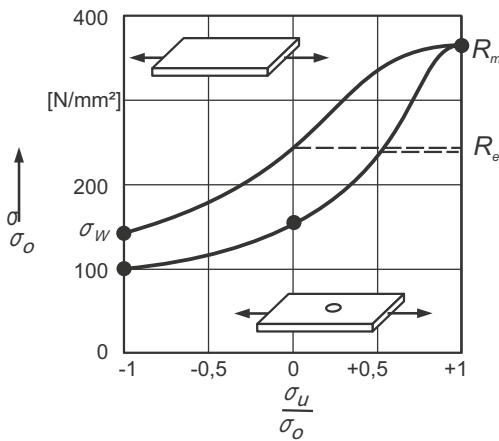


Bild 2.9

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

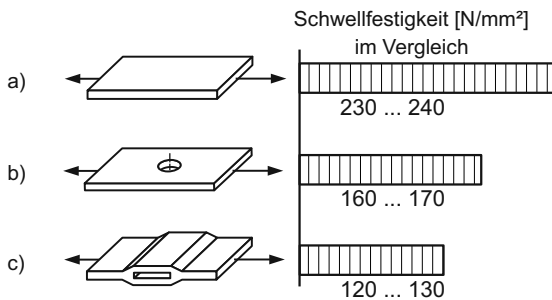
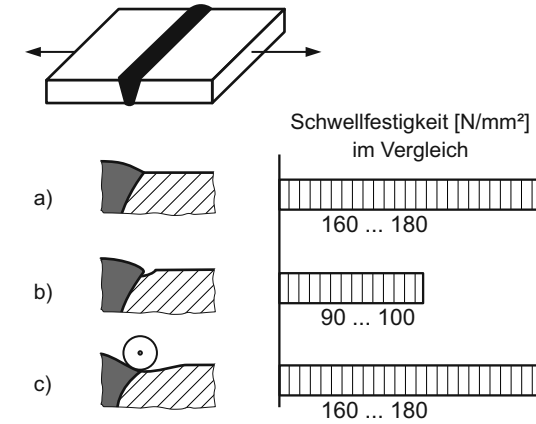
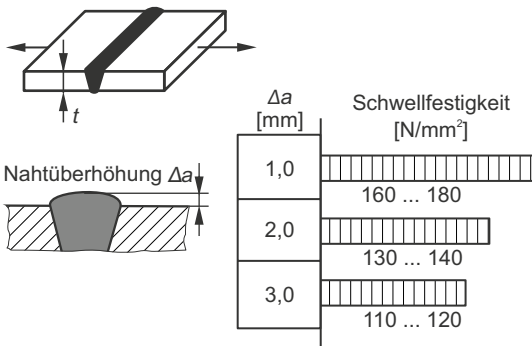


Bild 2.10

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

**Bild 2.11**

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

**Bild 2.12**

Schweißfestigkeit von Stumpfnähten (unbearbeitet) in Abhängigkeit von der Nahtüberhöhung, $t = 10$ mm (Werte am Beispiel von Werkstoff S235) [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.

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	σ_w Wechsel- festigkeit	—	σ_{Sch} Schwell- festigkeit	—	R_e Streckgrenze R_m Zugfestigkeit

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

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 Regelwerke 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 ¹⁾	Beanspruchungsart ²⁾	Werkstoffe
Statisch beanspruchte Stahlbauten	DIN EN 1993-1-1	statisch	Baustähle, z. B. S235, S275, S355, S450 sowie verschiedene Feinkornbaustähle
Krane und Kranausrüstungen (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-Al Mg1, EN AW-Al Mg4,5Mn0,7, EN AW-Al Mg3 u. a. sowie Aluminiumgusslegierungen, z. B. EN AC-Al Si7Mg0,3, EN AC-ALSi9 Mg, EN AC-Al 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 AlMg4,5Mn0,7; EN AW AlMg3 und Aluminiumgusslegierungen, z. B. EN AC AlSi12, EN AC AlMg5
Dynamisch beanspruchte Schweißkonstruktionen	IIW-Empfehlungen XIII-1965-03 / XV-1127-03 [HOB07]	dynamisch	Stahl, Aluminium
Dynamisch beanspruchte Maschinenbauteile	FKM-Richtlinie [FOR03]	statisch, dynamisch	Stahl, Eisenguss, Aluminium

Anwendungsbereich	Berechnungsvorschrift/Normenwerk ¹⁾	Beanspruchungsart ²⁾	Werkstoffe
Geschweißte Schienenfahrzeuge	DIN EN 15085 DVS 1608-1 DVS 1612 DS 952 DS 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 Braunkohletagebau	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/2014/68/EU AD 2000 Regelwerk (speziell Merkblatt HP 0, Merkblatt HP 1, Merkblatt S 1 und 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

1) Es sind die jeweils mit geltenden Normen zu beachten.

2) 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 spezifischen Normen und Regelwerke existieren, können geschweißte Tragwerke auch im unregulierten 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 Anwendung 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.

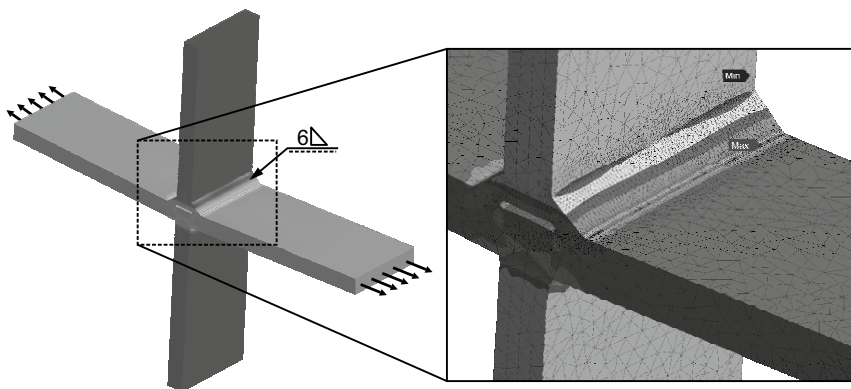


Bild 2.14 Numerische Simulation einer mittels Kehlnähten geschweißten Kreuzstoßverbindung bei äußerer Beanspruchung als Grundlage für das Struktur- oder Kerbspannungskonzept

2.4 Schweißmöglichkeit

2.4.1 Grundlagen

Die Schweißmöglichkeit für ein Schweißverfahren ist gegeben, wenn die an einer Konstruktion geplanten Schweißnähte unter den gewählten Fertigungsbedingungen 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, Wärmeleitung, 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:

$$\text{Schweißnahtwertigkeit} = \frac{R_{m_Sw-Verbindung}}{R_{m_Grundwerkstoff}} \quad (2.4)$$

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 Schweißeigenstressungen 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 Schweißeigenstressungen 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.

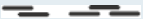
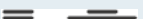
2.4.2 Vorbereitungen zum Schweißen

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

- der Stoßart der Bauteile zueinander (Tabelle 2.7),
- der Halbzeugform (Blech, Rohr, Profil),
- den Bauteilabmessungen (z. B. der Blechdicke) sowie
- dem Schweißverfahren

vorzunehmen.

Tabelle 2.7 Stoßarten von Bauteilen (in Anlehnung an DIN EN ISO 17659)

Benennung	Merkmale	Sinnbild
Stumpfstoß	Teile liegen in einer Ebene	
Überlappstoß	Teile überlappen sich	
Parallelstoß	Teile liegen breitflächig aufeinander	
T-Stoß	Zwei Teile, eins mit seinem Ende, stoßen rechtwinklig aufeinander	
Kreuzstoß	Zwei in einer Ebene liegende Teile stoßen je mit einem Ende rechtwinklig gegen ein dazwischenliegendes drittes	
Schrägstoß	Ein Teil stößt mit einem Ende schräg gegen ein anderes	
Eckstoß	Zwei Teile stoßen mit ihren Enden im beliebigen Winkel gegeneinander	
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 **Schmelzbadsicherungen** (Kupfer- oder Keramikschienen auf der Wurzelseite der Schweißnaht) erfordern.

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		 Doppel-U-Naht		 halbe U-Naht (HU)
	 Steilflanken-naht		 halbe V-Naht (HV)		 Doppel-HU-Naht
	 DV-Naht				
	 Y-Naht				

R - Radius, b - Spaltbreite, c - Steghöhe, h - Flankenhöhe, t - Blech-/Wurzelstärke, α - Öffnungswinkel, β - 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)

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 Fügestellen-Geometrie während des Schweißens.

Des Weiteren ist vor dem Schweißen eine Reinigung des Fügestellenbereiches unbedingt erforderlich. Sowohl Oxide als auch Fette, Öle und konventionelle organische Beschichtungen (Farben, Folien) sind mit geeigneten Reinigungsverfahren mechanisch oder chemisch zu entfernen. Die Fügestelle 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 Schweißseignung zu verbessern. Tabelle 2.8 zeigt Richtwerte für Vorwärmtemperaturen in Abhängigkeit vom K-Wert, vom Elektroden-durchmesser, 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 1.3) mithilfe des K-Wertes sowie des Elektroden-durchmessers, der Nahtform und der Blechdicke der zu schweißenden Bauteile die Wirkung der Legierungselemente auf die Schweißseignung beschrieben sowie eventuell erforderliche Vorwärmtemperaturen festgelegt werden. Außerdem lässt dies auch Rückschlüsse auf den Wärmeeintrag durch das Lichtbogenhandschweißen sowie das Wärmeabführungsmodell (zwei- oder dreidimensional) zu. Alternative Möglichkeiten zur Bestimmung der erforderlichen Vorwärmtemperaturen beim Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen beschreibt DIN EN 1011-2.

Tabelle 2.8 Vorwärmtemperaturen in Abhängigkeit vom K-Wert, dem Elektroden-durchmesser, der Blechdicke und der Nahtform (Temperaturwerte in Klammern erfor-dern einen erhöhten Aufwand beim Vorwärmen, da es zu Verzunderungen kommen kann, die vor dem Schweißen entfernt werden müssen.)

K-Wert	Elektro-dendurch-messer	Vorwärmtemperatur [°C]							
		Stumpfnah – Blechdicke [mm]				Kehlnah – Blechdicke [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.

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 Fügeiteile 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 aufgeschmolzenen Nahtquerschnitt und damit auf die Nahtform als auch auf die räumliche Ausbreitung des Temperaturfeldes im Bauteil (Bild 2.17) aus.

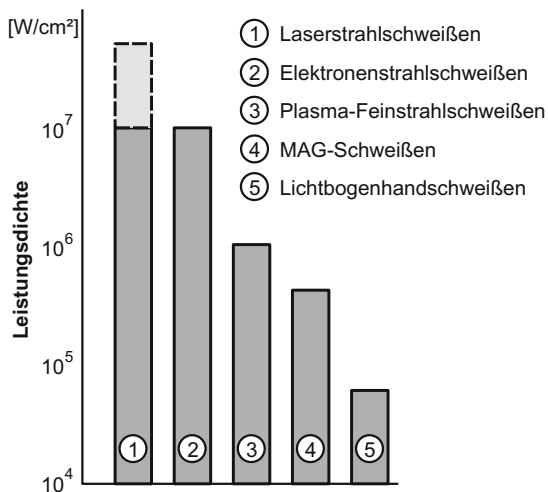


Bild 2.16

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).

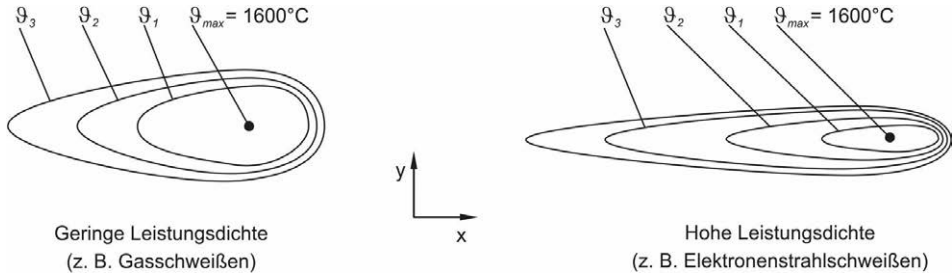


Bild 2.17 Temperaturfelder bei unterschiedlicher Leistungsdichte [MAL77]

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, so dass auch die Härtespitzen zurückgehen (Bild 2.18).

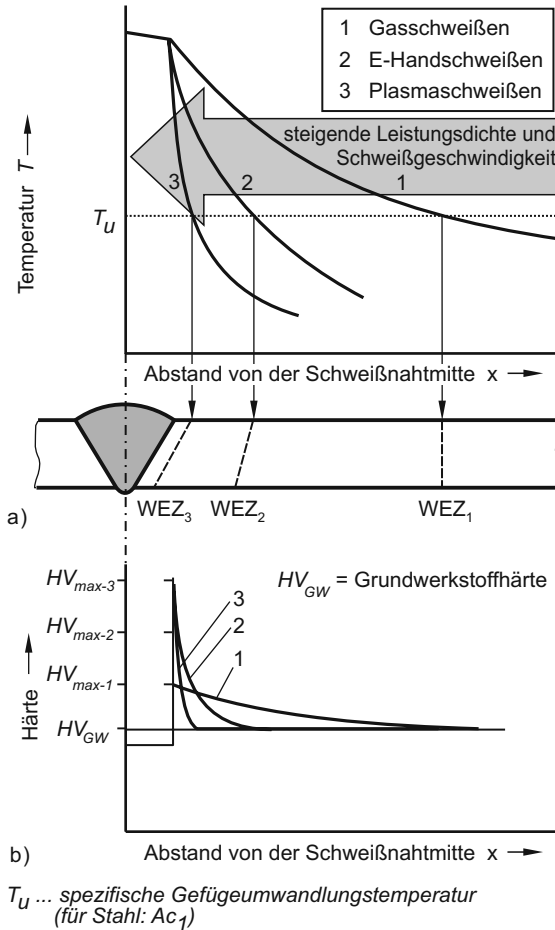


Bild 2.18

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 λ (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.

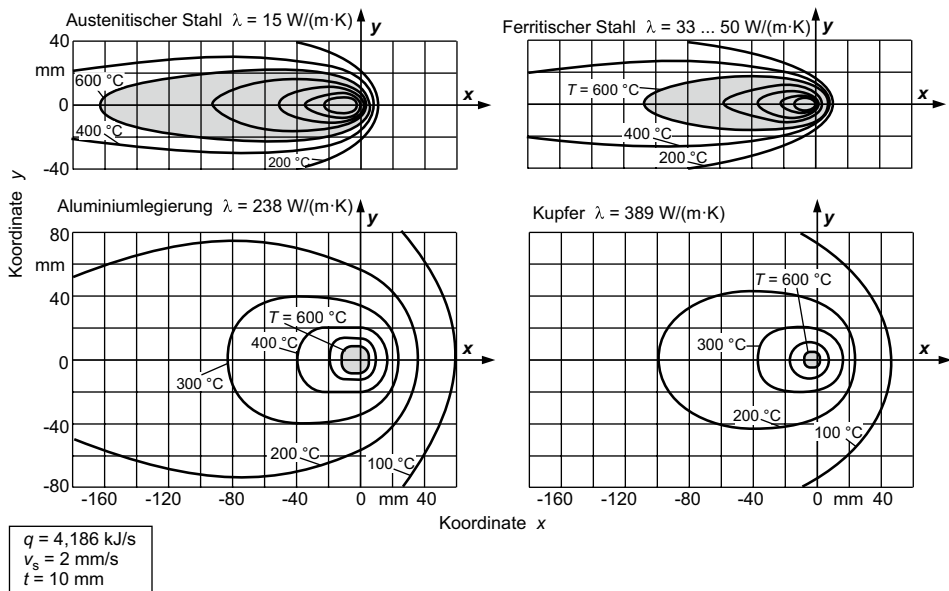


Bild 2.19 Temperaturfeld um wandernde Linienquelle, unterschiedliche Werkstoffe bei gleicher Wärmeleistung q , Geschwindigkeit v_s und Wanddicke t [MAL77]

Für die Abkühlgeschwindigkeit ist in erster Linie die bauteilbedingte Wärmeableitung bestimmend. Die Wärmeableitung erfolgt entweder zweidimensional bei Dünnscheiben 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.

– zweidimensional

– dreidimensional

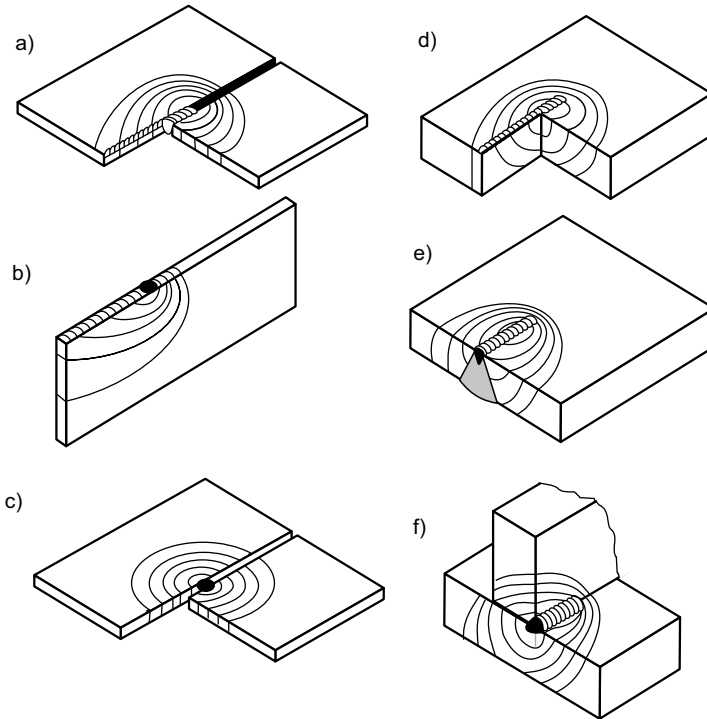


Bild 2.20 Beispiele von ebenen und räumlichen Temperaturfeldern beim Schweißen.
a) Stumpfschweißung dünner Bleche; b) Aufschweißung auf die Kante eines dünnen Blechs; c) Heftschweißen als Verbindung zwischen dünnen Blechen; d) Aufschweißung einer Naht auf ein dickes Blech; e) Nachschweißen der Wurzel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

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 2.9) bestimmt 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]

Tabelle 2.9 Richtwerte für die Streckenenergie

Schweißverfahren	Elektrodenndurchmesser [mm]	Streckenenergie [J/cm]
E-Hand-Schweißen	3,25	7000...11.000
	4,0	9000...13.000
	5,0	11.000...18.000
MAG-C-Langlichtbogen	1,2	5500...8000
	1,6	7000...11.000
	2,0	11.000...16.000
MAG-C-Kurzlichtbogen	0,8...1,2	4000...7000
UP-Schweißen	2,5	9000...14.000
	3,0	10.000...18.000
	4,0	12.000...30.000
	5,0	18.000...42.000

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 η erweitert werden, der 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], η relativer thermischer Wirkungsgrad [-] (siehe Tabelle 2.10)

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 2.10 zusammengestellt. Diese lassen erkennen, dass mit steigendem Elektrodendurchmesser d_e die Streckenenergie zunimmt. Das ergibt sich zwangsläufig aus deren Korrelation.

Tabelle 2.10 Relativer thermischer Wirkungsgrad verschiedener Schweißverfahren

Schweißverfahren	Relativer thermischer Wirkungsgrad η
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

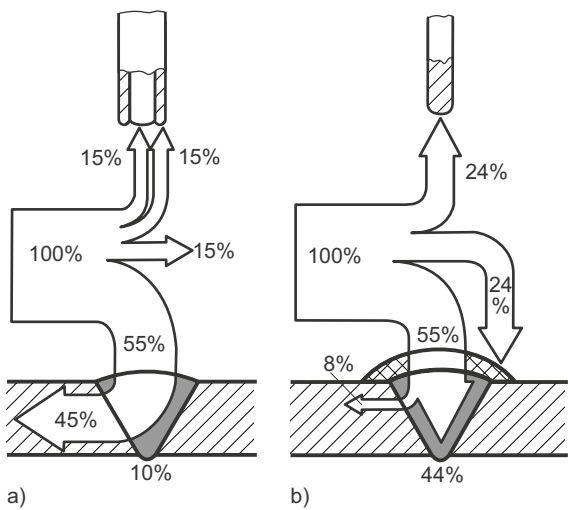


Bild 2.21
Wärmebilanz beim a) Lichtbogenhandschweißen und b) Unterpulverschweißen
[BOE84], [RYK57]

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

$$v_s \sim \frac{I_s}{d_e}$$

(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.

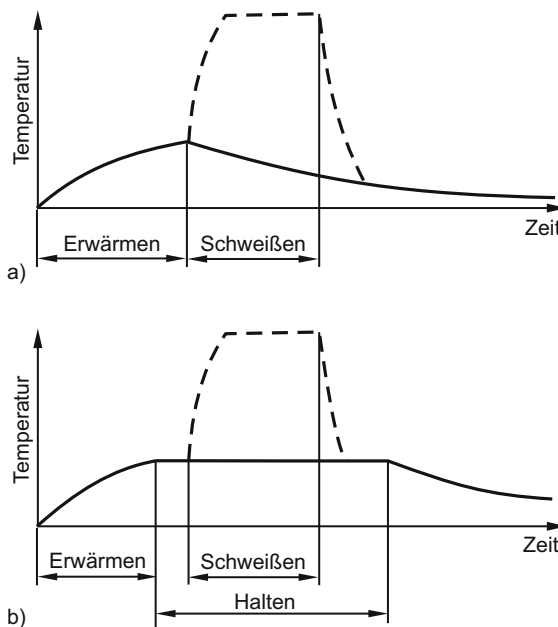


Bild 2.22

Zeit-Temperatur-Verlauf für das Schweißen. a) mit Vorwärmen; b) mit konstanter Arbeitstemperatur [NEU96]

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

Eine gezielte örtliche und zeitliche Folge von Wärmeeinträgen (z. B. auf Basis definierter Schweißfolgen für eine Schweißverbindung) führt zu sehr komplexen Erwärmungs- und Abkühlungsvorgängen, die häufig nur empirisch optimiert werden können. Den zusätzlichen Einfluss der Schweißposition auf den Wärmeeintrag und die Wärmeabfuhr lassen Bild 2.23d und Bild 2.23e erkennen. Das gilt sowohl für den unterschiedlichen Nahtaufbau („Pendelraupe“ Bild 2.23d und „Zugraupe“ Bild 2.23e) als auch für die sich damit ändernden Streckenenergien und Schweißzeiten, d. h. der Dauer des Wärmeeintrags. Diese Dauer hängt dabei auch von der Arbeitsposition bei der Durchführung der Schweißarbeiten ab. Diese ist unabhängig von der geometri-

schen Gestaltung der Bauteile, hängt aber wesentlich von der Zugänglichkeit des Schweißwerkzeuges (Brenner) zum Nahtstoß sowie vom Mechanisierungsgrad (z. B. Schweißen mithilfe eines Industrieroboters) ab. Bild 2.24 erklärt die Bezeichnungen der einzelnen Arbeitspositionen.

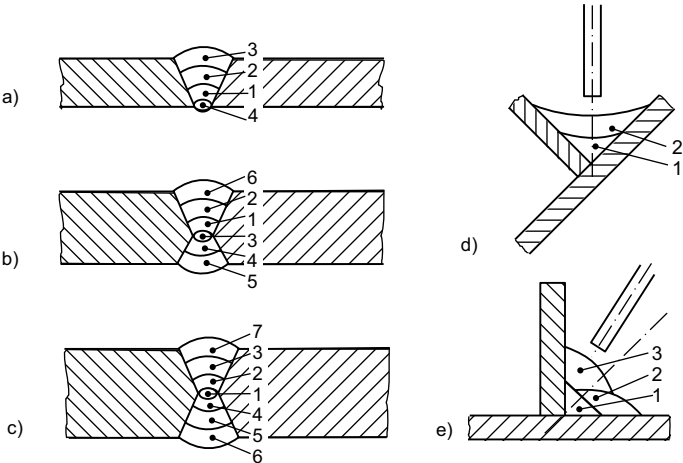


Bild 2.23 Schweißfolgen bei unterschiedlichem Nahtaufbau. a) V-Naht; b) 2/3-Doppel-V-Naht; c) Doppel-V-Naht; d) Kehlnaht Position PA; e) Kehlnaht Position PB

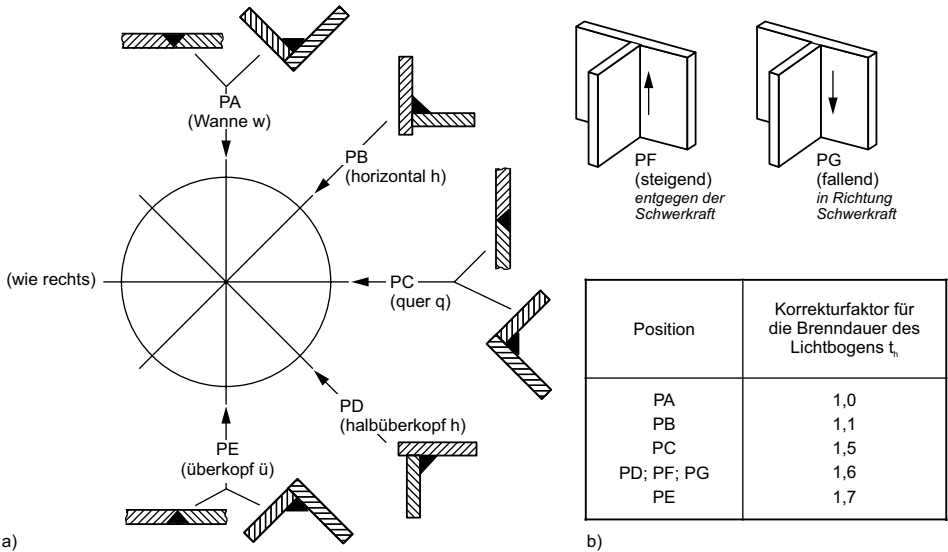


Bild 2.24 a) Schweißpositionen nach DIN EN ISO 6947 und b) deren Korrekturfaktoren für Schweißzeiten, bezogen auf die Wannenposition (PA)

Gelangen schweißempfindliche Werkstoffe zur Anwendung bzw. sind Werkstoffkombinationen zu schweißen, so überlagern sich zusätzlich die Wirkungen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten und verschiedener Wärmeausdehnungskoeffizienten. Ein derart komplexes Zusammenspiel von Faktoren inklusive deren Auswirkungen auf Verformung und Spannung sowie auf Gefügeart und Gefügezusammensetzung erfordern von den ausführenden Schweißern und den Schweißaufsichtspersonen sowohl ausreichende thermodynamische als auch werkstoffliche Fachkenntnisse und einen angemessenen Umfang an praktischen Erfahrungen und Schweißfertigkeiten (siehe DIN EN ISO 9606-1 und DIN EN ISO 9606-2).

2.4.4 Nacharbeiten beim Schweißen

Das Nacharbeiten umfasst:

- das Säubern der Naht (mechanisch oder chemisch),
- das Bearbeiten der Naht durch vorzugsweise Schleifen, um Spannungsspitzen im Nahtbereich infolge einer Kerbwirkung abzubauen,
- das Richten der Bauteile (mechanisch oder thermisch) sowie
- eventuell eine Wärmebehandlung (Bild 2.25) der Bauteile in Verbindung mit dem Schweißen.

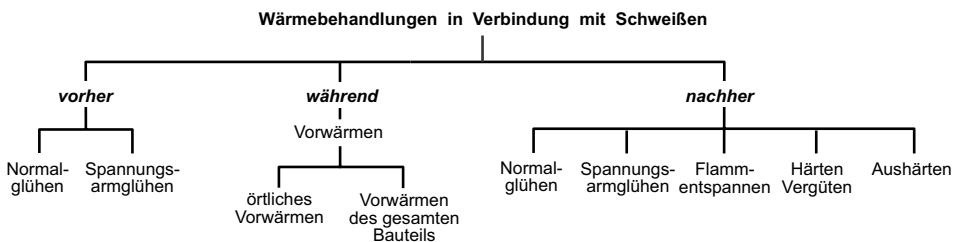


Bild 2.25 Wärmebehandlungen beim Schweißen

Wesentliche Wärmebehandlungsmaßnahmen in Verbindung mit dem Schweißen sind:

- für die Schweißnaht selbst einschließlich der WEZ: das Normalisieren (Bild 2.26a), wodurch eine Umwandlung von grobkörnigem in feinkörniges Gefüge erfolgt, um damit die Zähigkeit der Schweißverbindung zu erhöhen,
- für das Bauteil insgesamt: der Abbau der Schweißseigenspannungen durch Spannungsarmglühen (Bild 2.26b).

Typische Zeit-Temperatur-Verläufe für das thermische Nachbehandeln (Nachwärmen) in Verbindung mit einem Schweißvorgang zeigt Bild 2.27.

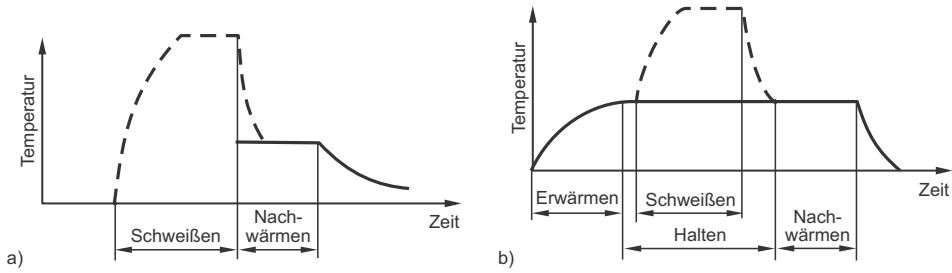


Bild 2.26 Zwei Grafiken zur Wärmebehandlung abhängig von Zeit und Temperatur. Die Zeiten für Erwärmen (nur in b), Schweißen und Nachwärmen sind markiert.

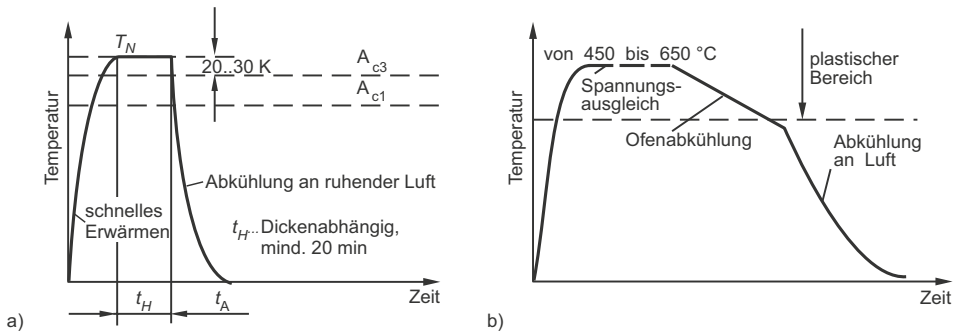


Bild 2.27 Zeit-Temperatur-Verlauf beim Schweißen. a) mit Nachwärmen und b) mit Vor- und Nachwärmen [NEU96]

2.4.5 Anwendung numerischer Simulationen für die Prozessanalyse beim Schweißen

Neben dem Einsatz numerischer Methoden als Hilfsmittel für die Dimensionierung und Bemessung von Schweißnähten und komplexen geschweißten Strukturen kann die FEM auch ganz wesentlich bei der **Prozessanalyse** unterstützen. So erlauben numerische Simulationen, die Wirkung der Prozessparameter, wie z. B. der Schweißgeschwindigkeit und des Energieeintrags, zu ermitteln und gezielt die Eigenschaften der Schweißnaht zu optimieren. Um dies zu erreichen, müssen die Simulationsprogramme multi-physikalische Berechnungen durchführen können, d. h. verschiedene physikalische Randbedingungen in eine Berechnung einbeziehen, um beispielsweise Wärmequellen (Lichtbogen, Gasflamme etc.), **Gefügeumwandlungen** und **Eigen-**

spannungen inklusive Deformation und Verzug von Bauteilen zu simulieren. Dazu müssen Bauteil- und Nahtgeometrie, Metallurgie des Werkstoffes und mechanisches Materialverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur bekannt sein sowie die entsprechenden Prozessparameter berücksichtigt werden.

Weiterhin ist es neben der Vorhersage auftretender Materialveränderungen auch möglich, den Schweißprozess selbst mithilfe der FEM besser zu verstehen, beispielsweise die Bewegungen des flüssigen Schmelzbades gezielt zu kontrollieren (Bild 2.28a), den Einfluss des Schutzgasstromes auf die Nahtausbildung zu ermitteln (Bild 2.28b) oder auch die Tropfenablösung des Zusatzwerkstoffes bei einer abschmelzenden Drahtelektrode zu analysieren, um Schweißspritzer zu vermeiden.

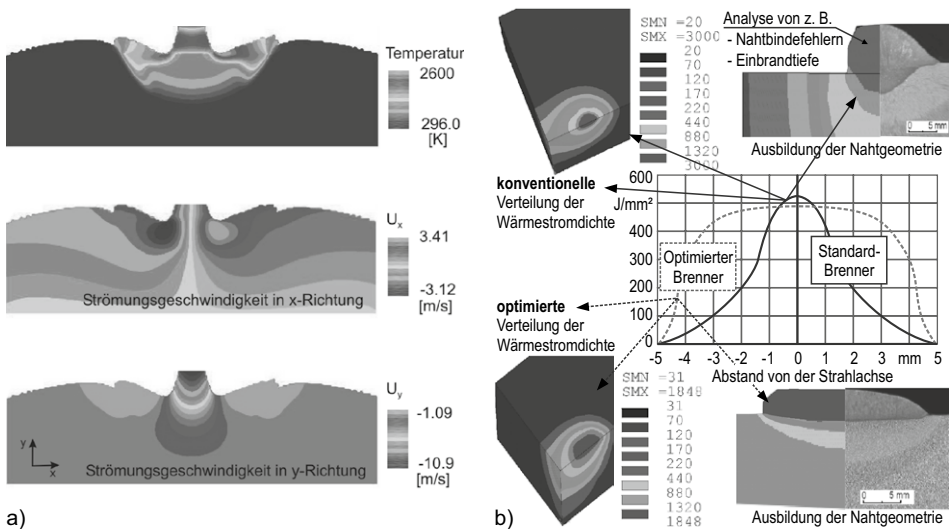


Bild 2.28 Anwendung der numerischen Simulation für die Prozessanalyse. a) Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten in einer Schweißnaht; b) Auswirkungen unterschiedlicher Schweißbrennerdüsenformen auf die Schweißnahtausbildung

2.5 Qualitätssicherung beim Schweißen

Die Qualitätssicherung umfasst alle erforderlichen Maßnahmen, mit denen sichergestellt werden kann, dass ein Produkt oder ein Verfahren definierte Eigenschaften erreicht. Für eine Schweißverbindung bedeutet dies, dass eine geschweißte Struktur

über einen festgelegten Zeitraum die an sie gestellten Anforderungen erfüllen muss, d. h. deren Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen ist. Je nach Einsatzgebiet können unterschiedliche Anforderungen an die Schweißverbindungen gestellt werden, z. B.:

- mechanische Belastungen,
- thermische Belastungen,
- Korrosionsbeständigkeit,
- Dichtheit oder
- Aussehen der Nahtoberfläche.

Dieses Ziel wird erreicht durch Definition der Anforderungen an die Qualität der jeweiligen Schweißverbindung eines Produktes bzw. Bauteiles, mit denen ein zuverlässiger, sicherer, störungsfreier und möglichst wartungsarmer Betrieb während seiner gesamten Lebensdauer erreicht werden kann. Die Definition der Anforderungen erfolgt interdisziplinär zwischen Konstrukteur, Hersteller und Anwender. Im Allgemeinen wird bei der Beurteilung von der **Güte einer Schweißverbindung** gesprochen. Diese wird bestimmt durch die Ausführung der Schweißverbindung sowie deren Eigenschaften (Bild 2.29).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass nahezu jede Schweißverbindung sogenannte **Unregelmäßigkeiten**, d. h. Abweichungen von einem Idealzustand bei der Schweißnahtausbildung, aufweist, wie z. B. Poren, Einschlüsse, Risse, Nahtenfall, Nahtdurchhang, Bindefehler oder Nahtversatz u. a. Eine Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an Metallen für das Schmelzschweißen erfolgt in DIN EN ISO 6520-1 und für das Pressschweißen in DIN EN ISO 6520-2. Diese Normen sollen als Basis für eine genaue Einordnung und Beschreibung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten dienen. Metallurgische Unregelmäßigkeiten sind darin nicht enthalten.

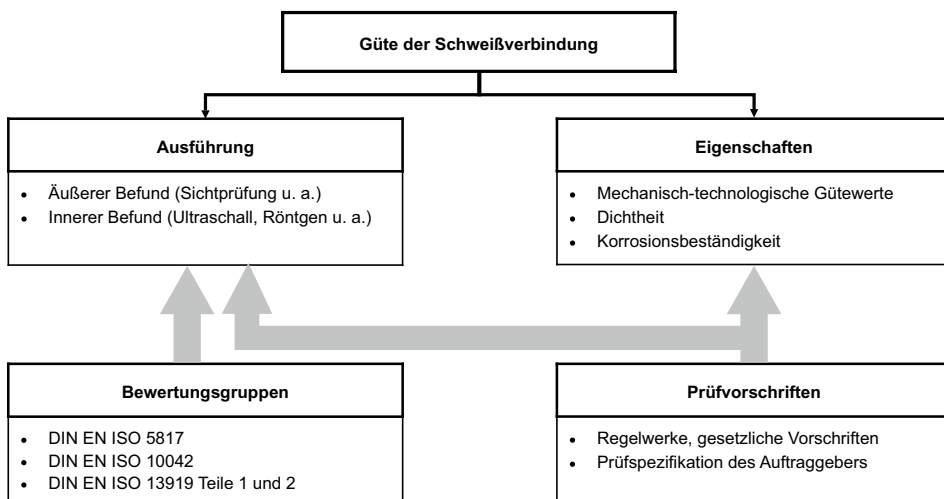


Bild 2.29 Beschreibung der Güte von Schweißverbindungen

Ob eine festgestellte Unregelmäßigkeit der Schweißverbindung für den geplanten Einsatz toleriert werden kann, wird durch die Festlegung von Bewertungsgruppen für Schweißnähte geregelt. Diese können zwischen Hersteller und Anwender abgestimmt bzw. in Abhängigkeit vom Einsatzfall festgelegt sein. Für verschiedene Werkstoffgruppen und Schweißverfahren sind unterschiedliche Normenwerke für Bewertungsgruppen anzuwenden. Allen gemeinsam ist eine Einteilung in drei verschiedene Gruppen D, C und B, die in dieser Reihenfolge zugleich eine Zunahme der qualitativen Anforderungen bedeuten. Für Schmelzschweißverbindungen an Stahl, die mittels Lichtbogenverfahren hergestellt werden, ist DIN EN ISO 5817 anzuwenden. Für Aluminium gilt DIN EN ISO 10042. Für Strahlschweißverfahren (Elektronenstrahl und Laserstrahl) sind DIN EN ISO 13919 Teil 1 für Stahl und Teil 2 für Aluminium heranzuziehen.

Werden die Toleranzen überschritten, so sind Nacharbeiten an der Schweißnaht erforderlich – vom „Beschleifen“ bis zum vollständigen „Ausfugen und Nachschweißen“. Für das Bauteil ist beim Überschreiten der Maßtoleranz ein **Ablängen oder Anschweißen** notwendig und beim Überschreiten der Formtoleranzen ein Richten der Bauteile. Zur Sicherung der Qualität von Schweißverbindungen bzw. Auftragschweißungen ist aber grundsätzlich mehr als die ausschließliche Beurteilung der Schweißnähte erforderlich. Für die durchgängige Qualitätssicherung bei einem Produzenten (unabhängig von der Art des Produktes oder der Dienstleistung) ist die Anwendung eines Qualitätsmanagementsystems erforderlich, wie in DIN EN ISO 9000 und DIN EN ISO 9001 geregelt. Speziell für die durch Schmelzschweißen hergestellten metallischen Strukturen enthält DIN EN ISO 3834-1 ergänzende Kriterien für eine geeignete Stufe der Qualitätsanforderungen. Solche Kriterien sind beispielsweise Regelungen zur Fertigungsplanung, Lagerung von Werkstoffen und Schweißzusätzen sowie die Qualifikation von Schweißverfahren, der ausführenden Schweißer und der Schweißaufsicht. Die wichtigsten Bereiche der Qualitätssicherung in der Schweißtechnik sowie eine diesbezügliche Auswahl grundlegender Normen zeigt Bild 2.30.

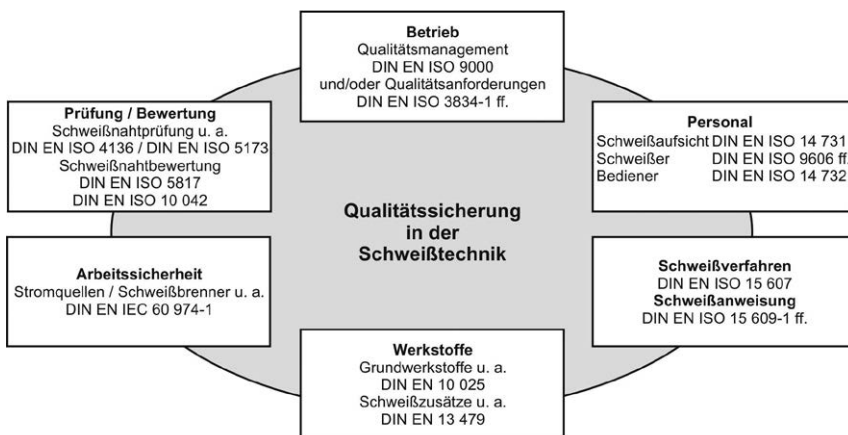


Bild 2.30 Überblick der Bereiche der Qualitätssicherung in der Schweißtechnik (in Anlehnung an [MAT03])

2.6 Arbeitsschutz beim Schweißen

Das Ziel des Arbeitsschutzes im Allgemeinen besteht darin, die in einem Unternehmen tätigen Personen vor gesundheitlichen Gefahren aller Art zu schützen. Dazu müssen die jeweiligen Arbeitsplätze, Arbeitsverfahren und Arbeitsabläufe entsprechend der körperlichen, geistigen und psychischen Leistungsfähigkeit der Beschäftigten gestaltet werden.

Der Gesetzgeber hat die Ziele des Arbeitsschutzes in verschiedenen Gesetzen, Vorschriften und Regelwerken verankert. Die wichtigsten in diesem Kontext sind das Grundgesetz und das Arbeitsschutzgesetz.

Im Wesentlichen ist der Unternehmer verpflichtet, die für seinen Anwendungsfall gültigen Gesetze und Vorschriften zu kennen und anzuwenden. Auch wurden Berufsgenossenschaften gebildet, die dabei auf das Unternehmen einwirken. Berufsgenossenschaften sind sogenannte Sozialversicherungsträger. Als Körperschaften des öffentlichen Rechts finanzieren sie sich ausschließlich aus Beiträgen der ihnen durch Pflichtmitgliedschaft zugeordneten Unternehmen. Zurzeit existieren neben neun landwirtschaftlichen auch dreizehn gewerbliche Berufsgenossenschaften, welche nach Wirtschaftszweigen gegliedert und zugleich die Träger der gesetzlichen Unfallversicherung sind. Aus dieser Verantwortung heraus erarbeiten die Berufsgenossenschaften technische Vorschriften und Regelwerke mit dem Ziel, den Arbeitsschutz zu gewährleisten. Dazu gehören **Unfallverhütungsvorschriften** und **DGUV-Vorschriften**. Die allgemeinen Grundsätze zur Prävention sind in DGUV Vorschrift 1 verankert.

Beim Schweißen treten je nach angewandtem Wirkprinzip sehr unterschiedliche Gefährdungen für den durchführenden Schweißer sowie die Umgebung der Schweißstelle auf. Eine der häufigsten auftretenden Gefahren geht dabei von der oftmals sehr starken Erwärmung der Schweißstelle aus, die neben Verbrennungen für den Schweißer auch zu Bränden führen kann. Aus diesem Grund sind beim Schweißen auf Baustellen und bei Reparaturen die Schweißstellen nach der Herstellung bis zur völligen Abkühlung – bei potenziell brennbaren Stoffen in der Umgebung auch darüber hinaus – zu überwachen. Dies wird durch Erstellung eines **Schweißerlaubnischeines** geregelt, wie in DGUV Information 205-001 dargestellt.

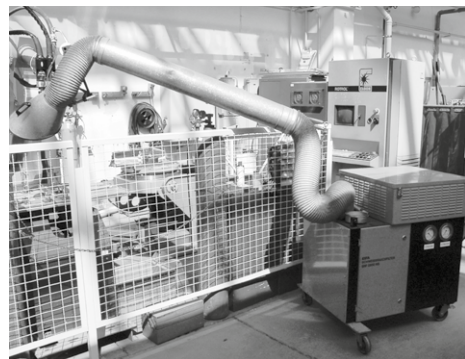
Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass Pressschweißverfahren ein geringeres Gefahrenpotenzial als Schmelzschweißverfahren besitzen, bei denen neben der meist deutlich höheren Erwärmung eine Vielzahl weiterer Gefährdungen existieren. Waren es früher – bei überwiegender Anwendung des autogenen Gasschweißens – vor allem die Gefahren im Zusammenhang mit den eingesetzten brennbaren Gasen, sind es aufgrund der heutigen großen Verbreitung der Lichtbogenschweißverfahren (Lichtbogenhandschweißen, Metallschutzgasschweißen, Wolfram-Inert-Gas-Schweißen usw.) vor allem potenzielle Gefährdungen durch Strom (speziell Hochfrequenz), UV-Strahlung (aus dem

Lichtbogen) und vor allem durch die aus dem Schweißbereich austretenden Schadstoffe. Letztere können in Form von Gasen oder Partikeln auftreten. Für diese wesentlichen Emissionen ist die TRGS 528 zu berücksichtigen, welche die für die Einrichtung und den Betrieb von Schweißarbeitsplätzen erforderlichen Informationen zu Schadstoffen und entsprechenden Schutzmaßnahmen zusammenfasst. Gleichzeitig wurden in diesem Regelwerk auch wichtige Inhalte aus der zwischenzeitlich außer Kraft gesetzten Unfallverhütungsvorschrift BGV D1 „Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren“ übernommen. Weiterhin sind bezüglich der Gefahrstoffe beim Schweißen vor allem DGUV Information 209-016 und TRGS 900 zu beachten. Zur Ermittlung der tatsächlich auftretenden Art und Menge von Schadstoffen existieren ebenfalls verschiedene Regelwerke und Normen, wie z. B. DIN EN ISO 15011-4 und DIN EN ISO 10882-1.

Beim Laserschweißen ist eine weitere Gefährdungsquelle zu berücksichtigen – das hochenergetische, fokussierte, kohärente Licht, welches abhängig von der Wellenlänge auch für das Auge gefährlich werden kann. Deshalb existieren für das Laserschweißen weitere spezifische Regelwerke, wie DGUV Vorschrift 11.



a)



b)

Bild 2.31 Arbeitsschutzeinrichtungen gegen Gefahrstoffe beim Schweißen. a) persönliche Schweißausrüstung (Augenschutz, Luftfilter, Schutzbekleidung) beim manuellen Schutzgasschweißen; b) mobile Absaugeinrichtung

Exemplarische Schutzmaßnahmen beim Schweißen zeigt Bild 2.31. Beim manuell durchgeführten Metallschutzgasschweißen muss der Schweißer zum Schutz gegen die auftretende UV-Strahlung des Lichtbogens Augen und Haut mit entsprechenden Abschirmungen, d. h. Filter und Kleidung, bedecken. Beim Schweißen in Zwangslagen (liegend oder über Kopf) sowie in sehr engen Räumen ist ein zusätzlicher Atemschutz erforderlich.

Die spezifischen Gefährdungen der einzelnen Schweißverfahren werden in den nachfolgenden Kapiteln jeweils gesondert erläutert.

2.7 Schweißen im Produkt-, Umwelt- und Energiemanagement

Moderne Methoden für Planung, Entwicklung und Herstellung eines Produktes gehen weit über die technologische Betrachtung des einzelnen Prozesses, wie z. B. eines Schweißprozesses hinaus. So werden für ein Produkt heute vielfach alle Phasen seiner gesamten Existenz, sozusagen von der „Wiege bis zur Bahre“ berücksichtigt und als **Produktlebensphasen** bezeichnet (Bild 2.32). Gründe dafür sind zum einen, dass Entwicklung, Produktion, Vertrieb, Nutzung, Wartung und auch Recycling immer komplexere Prozesse darstellen, und zum anderen, dass die Produktlebensphasen aufgrund höherer Dynamik des Absatzmarktes immer kürzer werden und dementsprechend die Produktvielfalt immer weiter zunimmt. Die Verwaltung der Daten, die während aller Produktlebensphasen (bzw. im Produktlebenszyklus) erzeugt werden, erfordert spezielle Maßnahmen, um eine sinnvolle und dauerhafte Lösung zu erhalten. Realisiert werden kann dies mithilfe eines sogenannten „**Product Lifecycle Managements**“ (Produkt-Lebenszyklus-Management bzw. **PLM**).

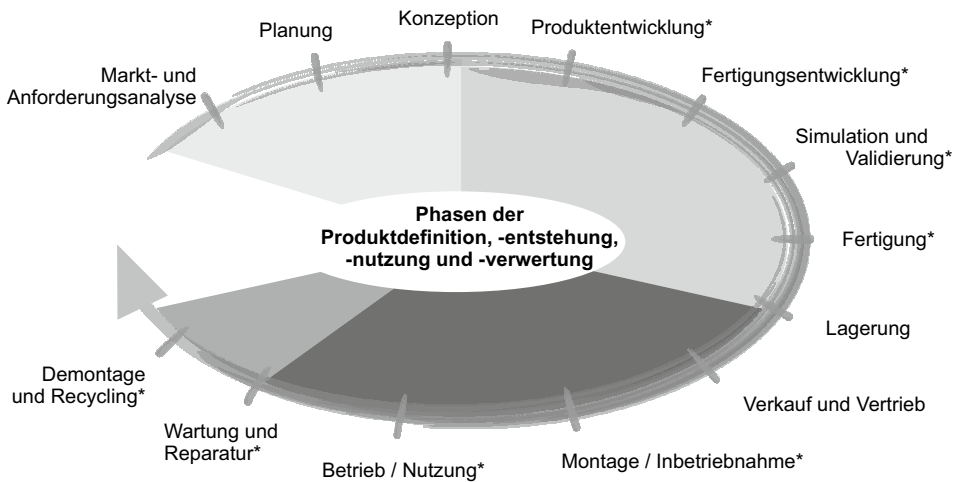


Bild 2.32 Übersicht der Produktlebensphasen (* Phasen mit Einfluss auf bzw. durch das Schweißen)

Für geschweißte Produkte bedeutet PLM, dass neben der ohnehin erforderlichen Dokumentation und Aufbewahrung relevanter Daten aus der Produktentwicklungsphase, wie z. B. Konstruktions- und Berechnungsunterlagen, sowie der Phase der Fertigungsplanung auch technologischen Prozessdaten während der gesamten Fertigung protokolliert und archiviert werden. Dazu ist eine Überwachung des Schweißprozesses mithilfe von Online-Messsystemen (häufig eingesetzt z. B. in der Automobilindus-