

Wolfgang Bleck

Elvira Moeller

Handbuch Stahl

**Auswahl, Verarbeitung,
Anwendung**

HANSER

Vorwort

Noch ein Buch über Stahl! Ja, denn dieses Buch ist besonders.

Wir sind angetreten, als Praktiker für Praktiker einen Leitfaden durch die verwirrende Vielfalt der Stähle und ihrer Nutzung zu entwickeln. Ausgehend vom Anwendungsbeispiel werden die Anforderungen an den Werkstoff, die bewährten Werkstofflösungen und schließlich Hintergrund-Informationen zur Bereitstellung und Charakterisierung der Werkstoffe gegeben. Bewusst wird dabei die Perspektive des Nutzers von Stahl gewählt, ebenso bewusst haben wir die Themenauswahl beschränkt, um nicht die Übersicht in der Informationsflut über Bauteile und Anwendungsbereiche bei mehr als 2500 genormten Werkstoffen auf Eisenbasis zu verlieren. Gusseisen mit seinen vielfältigen Verarbeitungs- und Anwendungsformen wird ausgeklammert, einige Randbereiche der Stahlanwendung wie die Pulvermetallurgie werden nur gestreift.

Dieses Grundkonzept stößt allerdings an viele Grenzen, die es zu überwinden galt. Ein spezieller Stahl kann in verschiedenen Produktformen für viele Anwendungsbereiche diskutiert werden. Manche Anwendungsbereiche lassen sich nicht deutlich voneinander abgrenzen. Schließlich kommt auch ein Buch für Praktiker nicht ohne die Bereitstellung von Grundlagen aus. Ein widerspruchsfreies, eindeutiges Konzept für unser Unterfangen gibt es nicht, aber wir haben – nach unserer Meinung – eine akzeptable Lösung gefunden.

Im Teil A des Buches werden die Grundlagen zu den Stählen, ihren physikalischen, chemischen und technologischen Eigenschaften, ihrer Herstellung, Verarbeitung und Normung in kondensierter Form zusammengestellt. Der Teil B gliedert sich in 10 anwendungsbezogene Kapitel, die von einem Konsortium von Fachleuten zusammengestellt wurden. Angesichts der Vielfalt der Stähle und der Verschiedenartigkeit ihrer Anwendungen ist die Zahl der Autoren sehr groß geworden; unterschiedliche Stile der Darstellung und verschie-

dene Schwerpunktsetzungen sind so vorgegeben. Neben der Beschreibung des Standes der Technik wird häufig auf die absehbaren Zukunftsentwicklungen eingegangen.

Anhand vieler Anwendungsbeispiele und der Konzentration auf die jeweils bedeutendsten für ein bestimmtes Anwendungsgebiet genutzten Stahlsorten wird ein Leitfaden erstellt, der konzentriert, detailreich und – hoffentlich – auch unterhaltsam in die Welt der Stähle und ihrer Nutzung einführt. Uns ist bewusst, dass die Darstellung viele Lücken aufweist, viele Themen sind bei weitem nicht vollständig behandelt. Gleichwohl bieten wir dem Leser eine Reise von der Bauteilanforderung zur Werkstoffwahl und selbstverständlich auch umgekehrt vom Werkstoff über die Verarbeitung zum Produkt mit definierten Eigenschaften.

Die Beiträge wurden von zahlreichen Fachleuten aus Industrie und Forschung in Eigenverantwortung geschrieben; Redundanzen lassen sich nicht immer vermeiden. Trotz aller Sorgfalt mögen sich Fehler oder Ungenauigkeiten eingeschlichen haben; die Herausgeber sind für Verbesserungsvorschläge und Anregungen dankbar.

Wir danken unseren vielen Autorinnen und Autoren, die sich in dem dreijährigen Entstehungsprozess dieses Buches engagiert haben. Das Autorenverzeichnis weist auf den jeweiligen industriellen oder wissenschaftlichen Hintergrund hin. Wir danken den Firmen und Organisationen, die Abbildungen und Informationen zu Verfügung gestellt haben. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Volker Herzberg vom Carl Hanser Verlag, der den Anstoß am Anfang und die vielen notwendigen Anstöße unterwegs für dieses Buch gab. Unseren Lesern wünschen wir eine anregende Lektüre

Wolfgang Bleck Elvira Moeller

im August 2017

Inhalt

Vorwort	V
Autorenverzeichnis	XXIII
Stahl – eine Werkstoffgruppe mit Zukunft	XXIX
<i>Wolfgang Bleck</i>	
TEIL A	
Der Werkstoff Stahl	
1 Definition und Systematik von Stählen	3
<i>Wolfgang Bleck</i>	
1.1 Systematik der Stähle	5
1.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen	5
1.1.1.1 Unlegierte Stähle	6
1.1.1.2 Nichtrostende Stähle	6
1.1.1.3 Andere legierte Stähle	7
1.1.2 Bezeichnungssystem für Stähle	7
1.1.2.1 Bezeichnung nach Verwendungszweck sowie mechanischen und physikalischen Eigenschaften	7
1.1.2.2 Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung	8
1.1.2.3 Bezeichnung der Stähle mit Werkstoffnummern	9
2 Informationsquellen zu Stahl	13
<i>Uwe Diekmann</i>	
2.1 Einleitung	13
2.2 Aufbau unternehmensinterner Informationsquellen	14
2.3 Der Werkstoff Stahl im Vergleich – konzeptionelle Werkstoffauswahl	16
2.4 Werkstoffdatenbanken	17
2.4.1 StahlDat SX	18
2.4.2 Stahlschlüssel	22
2.4.3 StahlWissen NaviMAT	24
2.4.4 Weitere Faktendatenbanken mit Bezug zu Stahl	26
2.5 Simulationssysteme für die Berechnung von Werkstoffeigenschaften	28
2.6 Bibliotheken, Literaturdaten, Wissensbasen und Nachschlagewerke	30
2.7 Selbststudium und Weiterbildung	32

3	Eigenschaften von Stählen	35
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
3.1	Thermische Eigenschaften	35
3.1.1	Volumen- und Längenänderung von Eisen	35
3.1.2	Volumen- und Längenänderung von Stählen	37
3.1.3	Wärmeleitfähigkeit des Eisens	38
3.2	Elastische Eigenschaften	39
3.2.1	Elastizitätsmodul und Schubmodul	39
3.2.2	Anelastizität	42
3.3	Magnetische und elektrische Eigenschaften	43
3.3.1	Magnetische Eigenschaften von Eisen	43
3.3.2	Magnetische Eigenschaften von Stählen	47
3.3.3	Elektrische Eigenschaften von Eisen	49
3.3.4	Elektrische Eigenschaften von Stählen	49
3.4	Legierungen des Eisens	50
3.4.1	Legierungsbildung	50
3.4.2	Zustandsschaubilder von Fe-Legierungen	52
3.4.3	Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff	55
3.5	Ausscheidungen	57
3.6	Wirkung der Legierungselemente	58
3.6.1	Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften	58
3.6.2	Wirkung auf technologische Eigenschaften	60
3.7	Einfluss einzelner Legierungselemente	62
3.7.1	Häufige Legierungselemente	62
3.7.2	Spurenelemente im Stahl	73
3.8	Zusammenfassung	74
4	Herstellung und Lieferformen von Stahl	77
	<i>Hannah Schwich, Serosh Engineer, Ulrich Prahl</i>	
4.1	Erzeugung von Stahl	77
4.1.1	Primärmetallurgie	77
4.1.1.1	Hochofen- und Konverterroute	78
4.1.1.2	Rohstahlerzeugung durch Direktreduktion	79
4.1.1.3	Elektrolichtbogenofenroute	80
4.1.2	Sekundärmetallurgie	81
4.1.3	Reinigung des Stahls durch Umschmelzen	82
4.1.3.1	Elektroschlacke-Umschmelzverfahren (ESU)	82
4.1.3.2	Lichtbogen-Vakuum-Umschmelzverfahren (LBVU)	83
4.1.4	Vergießen von Stahl zu Halbzeug	83
4.1.4.1	Gießen in Strang und Block	84
4.1.4.2	Gießen in Formen	87
4.2	Herstellung von Halbzeug	88
4.2.1	Definition	88
4.2.2	Herstellen von Flacherzeugnissen	89
4.2.2.1	Warmwalzen von Blechen und Bändern	91
4.2.2.2	Kaltwalzen von Blechen	92
4.2.3	Herstellen von Langerzeugnissen	92
4.2.3.1	Warmgewalzter und warmgezogener Stabstahl und Draht (Walzdraht)	92
4.2.3.2	Kaltgewalzter und kaltgezogener Stabstahl und Draht	94

4.2.4	Herstellen von Rohren	96
4.2.5	Herstellen von Schmiedeteilen	97
4.2.6	Ringwalzen	98
4.3	Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Halbzeug	98
4.3.1	Ultraschallverfahren (US-Verfahren)	99
4.3.2	Durchstrahlungs- oder Röntgenstrahlprüfung	100
4.3.3	Elektromagnetische Prüfung	100
4.3.4	Penetrationsverfahren	100
4.3.5	Fazit	101
5	Verarbeitung von Stählen	103
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
5-1	Umformen und Schneiden von Blechbauteilen	105
	<i>Wolfram Volk, Christoph Hartmann, Maria Hiller, Daniel Opritescu, Annika Weinschenk, Martin Feistle, Michael Krinninger</i>	
5-1.1	Blechumformung	105
5-1.1.1	Bauteilspektrum und Prozesskette	105
5-1.1.2	Auslegung des Fertigungsprozesses	105
5-1.1.3	Verfahren der Blechumformung	108
5-1.1.4	Bewertungskriterien und Fehler in der Blechumformung	110
5-1.2	Schneiden von Blechen	117
5-1.2.1	Beschneideoperationen	117
5-1.2.2	Scherschneiden	118
5-1.2.3	Fehler und Qualitätskriterien beim Schneiden	128
5-2	Kaltmassivumformung von Stahl	130
	<i>Mathias Liewald, Alexander Felde, Robert Meißner</i>	
5-2.1	Einleitung	130
5-2.2	Kaltfließpressverfahren	131
5-2.2.1	Stauhen	132
5-2.2.2	Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP)	133
5-2.2.3	Napf-Rückwärts-Fließpressen (NRFP)	134
5-2.2.4	Voll-Quer-Fließpressen (VQFP)	135
5-2.3	Tribologie	136
5-2.3.1	Konversionsschichten	136
5-2.3.2	Typische Schmierstoffe für Stahlwerkstoffe in der Kaltmassivumformung	137
5-2.4	Stähle für die Kaltmassivumformung	138
5-2.4.1	Allgemeines	138
5-2.4.2	Einsatzmöglichkeiten verschiedener Stahlsorten	139
5-2.4.2.1	Baustähle	140
5-2.4.2.2	Einsatzstähle	141
5-2.4.2.3	Vergütungsstähle	142
5-2.4.2.4	Nichtrostende Stähle	142
5-2.4.2.5	Bainitische Stähle	143
5-2.5	Wärmebehandlungsstrategien	143
5-2.5.1	Wärmebehandlung vor der Kaltmassivumformung	144
5-2.5.2	Wärmebehandlung nach der Kaltmassivumformung	144

5-3 Warmmassivumformung von Stahl	146
<i>Bernd-Arno Behrens, Anas Bouguecha, Jan Puppa</i>	
5-3.1 Einleitung	146
5-3.2 Verfahren der Warmmassivumformung	147
5-3.2.1 Walzen	147
5-3.2.2 Freiformen	149
5-3.2.3 Gesenkformen	150
5-3.3 Warmumformbarkeit von Stählen	152
5-3.3.1 Fließkurven	152
5-3.3.2 Formänderungsvermögen	155
5-4 Biegeumformung von Stählen	157
<i>Goran Grzancic, Christoph Becker, Sami Chatti, A. Erman Tekkaya</i>	
5-4.1 Einleitung	157
5-4.2 Grundlagen des Biegens	158
5-4.3 Blechbiegen	161
5-4.3.1 Blechbiegeverfahren mit geradliniger Werkzeugbewegung	161
5-4.3.2 Blechbiegeverfahren mit drehender Werkzeugbewegung	162
5-4.3.3 Fertigungsfehler und Gegenmaßnahmen beim (Blech-)Biegen	163
5-4.4 Rohr- und Profilbiegen	164
5-4.4.1 Formgebundenes Rohr- und Profilbiegen	164
5-4.4.2 Kinematisches Rohr- und Profilbiegen	165
5-4.4.3 Versagensfälle und Gegenmaßnahmen beim Rohr- und Profilbiegen	166
5-4.5 Spannungsüberlagerung zum Biegen hochfester Stähle	169
5-4.5.1 Streckbiegen	169
5-4.5.2 Freibiegen mit inkrementeller Druckspannungsüberlagerung	170
5-4.5.3 Inkrementelles Rohrumformen	171
5-5 Spanen und Abtragen	173
<i>Fritz Klocke, Guido Wirtz, Frederik Vits, Andreas Klink</i>	
5-5.1 Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide	173
5-5.1.1 Verfahrensgrundlagen	173
5-5.1.2 Zerspanbarkeit von Stählen	177
5-5.1.3 Technologiesteckbriefe	186
5-5.2 Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide	192
5-5.2.1 Verfahrensgrundlagen	193
5-5.2.2 Schleifbarkeit von Stählen	198
5-5.2.3 Technologiesteckbriefe	200
5-5.3 Abtragende Verfahren – Funkenerosion und elektrochemische Bearbeitung	204
5-5.3.1 Verfahrensgrundlagen und resultierende Werkstoffmodifikationen	205
5-5.3.2 Erodierbarkeit und elektrochemische Bearbeitbarkeit von Stahlwerkstoffen	210
5-5.3.3 Technologiedatenblätter	213
5-5.3.4 Zusammenfassung	221

5-6 Clinchen	223
<i>Bernd-Arno Behrens, Sven Hübner</i>	
5-7 Schweißen und Löten von Stählen	233
<i>Uwe Reisgen, Lars Stein</i>	
5-7.1 Fügen durch Schweißen	233
5-7.1.1 Schweißverfahren	235
5-7.1.2 Auswahl geeigneter Schweißparameter	252
5-7.1.3 Schweißen unterschiedlicher Stahlwerkstoffe	253
5-7.2 Fügen durch Löten	256
5-7.2.1 Lote und Lotklassen	258
5-7.2.2 Flussmittel als Hilfsstoffe	259
5-8 Metallkleben	262
<i>Uwe Reisgen, Lars Stein</i>	
5-8.1 Eigenschaften von Klebungen	263
5-8.2 Funktionen in den Klebverbindungen	264
5-8.3 Technische Klebstoffe	265
5-9 Thermisches Trennen von Stählen	269
<i>Uwe Reisgen, Lars Stein</i>	
5-9.1 Brennschneiden	269
5-9.2 Schmelzschneiden	271
5-9.3 Sublimierschneiden	271
5-10 Wärmebehandlung von Stählen	272
<i>Jan Bültmann, Jan Hof, Ulrich Prah</i>	
5-10.1 Glühen	274
5-10.1.1 Erholungsglühen	274
5-10.1.2 Spannungsarmglühen	274
5-10.1.3 Rekristallisationsglühen	274
5-10.1.4 Weichglühen oder GKZ-Glühen	279
5-10.1.5 Normalglühen	280
5-10.1.6 Patentieren	282
5-10.1.7 Grobkornglühen	282
5-10.1.8 Diffusionsglühen	283
5-10.1.9 Wasserstoffarmglühen	286
5-10.2 Härten	286
5-10.2.1 Durchgreifendes Härten	286
5-10.2.2 Randschichthärten	290
5-10.2.3 Bainitisieren	292
5-10.2.4 Presshärten	293
5-10.2.5 Öl-Schlussvergüten	294
5-10.3 Anlassen	295
5-10.4 Thermochemische Behandlung	297
5-10.4.1 Einsatzhärten	298
5-10.4.2 Aufkohlen	302
5-10.4.3 Karbonitrieren	303
5-10.4.4 Nitrieren	304

5-10.4.5 Nitrocarburieren	307
5-10.4.6 Borieren	309
5-10.4.7 Chromieren	313
5-10.5 Thermomechanische Behandlung	313
5-10.6 Fazit	318
5-11 Korrosion und Korrosionsschutz	320
<i>Elvira Moeller</i>	
5-11.1 Ursachen und Ablauf der Korrosion	320
5-11.1.1 Überblick	320
5-11.1.2 Korrosion und Korrosionssysteme	321
5-11.1.3 Einfluss von Medien auf das Korrosionsverhalten	321
5-11.1.4 Korrosionserscheinungen und Korrosionsarten	325
5-11.2 Prinzipien des Korrosionsschutzes und Verfahren zu deren Umsetzung	327
5-11.2.1 Verfahren und Materialien	327
5-11.2.2 Korrosionsschutzgerechte Gestaltung	330
5-11.2.3 Korrosionsschutz durch Beschichtungssysteme	330
5-11.2.4 Korrosionsschutz durch metallische Überzüge	330
5-11.2.5 Korrosionsschutz durch nicht-metallische anorganische Überzüge	331
5-11.2.6 Elektrochemischer Korrosionsschutz	331
5-11.2.7 Korrosionsschutz durch Inhibierung	332
5-11.2.8 Temporärer Korrosionsschutz	333
5-11.3 Genormter Korrosionsschutz	336
5-11.3.1 Spezifikationen für den Erstschutz	337
5-11.3.2 Beschreibung des Objektes und der Belastungen	338
5-11.3.3 Auswahl des Beschichtungssystems	339
5-11.3.4 Prüfung der Beschichtungssysteme	340
5-11.3.5 Spezifikationen für die Instandsetzung	340
5-11.4 Korrosionsschutz und Umweltschutz	342
6 Life Cycle Assessment	345
<i>Johannes Gediga</i>	
6.1 Einführung	345
6.2 Die LCA-Methode	345
6.3 LCA-Methode im Stahlsektor	347
6.4 Anwendungen von LCA in der Industrie	351
6.4.1 Interne Nutzung der Lebenszyklusanalyse in der Stahlindustrie	351
6.4.2 Interner Nutzen von Lebenszyklusanalysen bei Kunden der Stahlindustrie	352
6.4.3 Nutzen von LCA-Ergebnissen zur Kommunikation	353
6.5 Zusammenfassung und Ausblick	354

TEIL B

Stähle für unterschiedliche Anwendungsbereiche	357
1 Stähle für das Bauwesen – Stahl für die Infrastruktur der Welt	359
<i>Wolfgang Bleck</i>	
1-1 Stähle für den Hoch- und Ingenieurbau	363
<i>Sebastian Münstermann</i>	
1-1.1 Stähle für den Massivbau	363
1-1.2 Stähle für den Skelett- und Fachwerkbau	364
1-1.2.1 Typische Werkstoffkonzepte	364
1-1.2.2 Anforderungen an die Festigkeit	368
1-1.2.3 Anforderungen an die Zähigkeit	369
1-1.2.4 Anforderungen an die Verfestigung	371
1-1.2.5 Anforderungen an die Festigkeit bei zyklischer Beanspruchung	371
1-1.2.6 Anforderungen an das Verarbeitungs- und Gebrauchsverhalten	374
1-1.2.7 Etablierte Stahlkonzepte für den Skelett- und Fachwerkbau	375
1-1.3 Stähle für den Verbundbau	380
1-1.4 Stähle für Verbindungselemente	381
1-1.5 Ausblick	382
1-2 Stähle für Drahtseile	383
<i>Peter Janßen</i>	
1-2.1 Drahtseile für das Bauwesen	383
1-2.2 Drahtseile als Aufzug- und Kranseile	384
1-2.3 Drahtseile im Brückenbau	385
1-2.4 Einsatz in Drahtseilbahnen	385
1-2.5 Hochfeste Drahtseile zur Befestigung von Offshore-Förderplattformen	386
1-2.6 Sonstige Anwendungen	387
1-2.7 Zukunftschancen für Drahtseile	387
1-3 Stahl im Erd- und Grundbau	388
<i>Hans-Uwe Kalle, Oliver Hechler</i>	
1-3.1 Stahlspundwände	388
1-3.2 Lieferformen und Rammelemente	388
1-3.3 Normative Regelungen zu Spundbohlen	389
1-3.4 Ausführung von Spundwandkonstruktionen	390
1-3.5 Einbringen von Stahlspundwänden	391
1-3.6 Beanspruchung und Bemessung von Stahlspundwänden	392
1-3.7 Besondere Stahlwandkonstruktionen – Stahlträger für Verbauwände	392
1-3.8 Verankerungen von Stahlspundwänden – Stahlzugelemente	393
1-3.9 Anwendungsmöglichkeiten von Stahlspundwänden	395
1-3.10 Einsatz von Spundwänden für Brückenwiderlager (Saale-Elster-Talbrücke)	397
1-4 Stähle für die Gebäudehülle	399
<i>Markus Kuhnhenne, Ralf Podleschny</i>	
1-4.1 Allgemeines	399
1-4.2 Trapez- und Wellprofile, Sandwichelemente und Paneelprofile	399
1-4.3 Feuerverzinkte Bauelemente	400

1-4.4	Bauelemente aus nichtrostendem Stahl	401
1-4.5	Bauelemente aus wetterfestem Baustahl	402
1-4.6	Nachhaltigkeitsaspekte im Stahlleichtbau	403
1-5	Stähle für den Kran- und Kranbahnbau	404
	<i>Markus Feldmann, Sandro Citarelli</i>	
1-5.1	Einleitung	404
1-5.2	Entwurf und Bemessung	406
1-5.2.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit	406
1-5.2.2	Ermüdung und Betriebsfestigkeit	407
1-5.2.3	Wahl der Stahlsorte	407
1-5.3	Ausblick	409
1-6	Nichtrostende Langprodukte im Bauwesen	410
	<i>Frank Wilke</i>	
1-7	Nichtrostender Betonstahl	414
	<i>Frank Wilke</i>	
1-8	Feuerverzinkter Betonstahl	416
	<i>Holger Glinde</i>	
1-9	Brücken aus feuerverzinktem Stahl	418
	<i>Holger Glinde</i>	
2	Stähle für den Anlagen- und Apparatebau – Werkstoffe in extremer Umgebung	421
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
2-1	Stähle für den Kessel- und Druckbehälterbau	423
	<i>Andreas Kern, Esther Pfeiffer, Sebastian Münstermann</i>	
2-1.1	Allgemeines	423
2-1.2	Anforderungen an Druckgeräte	424
2-1.2.1	Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften	424
2-1.2.1.1	Anforderungen an die Festigkeit	424
2-1.2.1.2	Anforderungen an die Verfestigung	425
2-1.2.1.3	Anforderungen an die Zähigkeit	427
2-1.2.2	Anforderungen an das Verarbeitungs- und Gebrauchsverhalten	430
2-1.3	Herstellung und Eigenschaften	434
2-1.3.1	Stahlherstellung	434
2-1.3.2	Walzen und Wärmebehandlung	438
2-1.3.3	Charakteristische Eigenschaften von Behälterstählen	439
2-1.3.3.1	Unlegierte Behälterstähle	440
2-1.3.3.2	Kaltzähe Behälterstähle	445
2-1.4	Wichtige Stahlgüten für den Behälterbau	452
2-1.4.1	Unlegierte Behälterstähle	452
2-1.4.2	Kaltzähe Behälterstähle	455
2-1.5	Künftige Entwicklungen	457

2-2 Werkstoffauswahl für den Bau chemischer Anlagen	462
<i>Jürgen Korkhaus</i>	
2-2.1 Einleitung	462
2-2.2 Gesichtspunkte für die Werkstoffauswahl beim Bau von Chemieanlagen	463
2-2.2.1 Sicherheit chemischer Anlagen	463
2-2.2.2 Wirtschaftlichkeit für Anlagenbau und -instandhaltung	464
2-2.3 Metallische Werkstoffe für Chemieanlagen	467
2-2.4 Einsatztemperaturen und Anwendungsgebiete metallischer Werkstoffe	468
2-2.5 Korrosionsbeständigkeit als Auswahlkriterium	474
2-2.6 Die Auslegung von Chemieapparaten	482
2-2.7 Sonderausführungen von Behältern	483
2-3 Getränkeabfüllmaschinen aus nichtrostendem Stahl	485
<i>Frank Wilke</i>	
2-4 Einsatz von Stahl in Abwasserbehandlungsanlagen	487
<i>Wolfgang Branner</i>	
2-4.1 Abwasseranfall und -zusammensetzung	487
2-4.2 Funktionsweise einer Abwasserbehandlungsanlage	487
2-4.3 Werkstoffe und deren Eigenschaften	488
2-4.4 Abmessungen	490
2-4.5 Herstellungsprozesse	490
2-4.6 Perspektiven/Alternativen	491
3 Stähle für den Maschinenbau – Werkstoffvielfalt für höchste Beanspruchungen	493
<i>Wolfgang Bleck</i>	
3-1 Stähle für Maschinenelemente	497
<i>Klaus Brökel</i>	
3-1.1 Systematik der Maschinen- und Konstruktionselemente	497
3-1.2 Mechanische Verbindungselemente	498
3-1.2.1 Stift- und Bolzenverbindungen	498
3-1.2.2 Schraubenverbindungen	500
3-1.3 Elastische Elemente	504
3-1.3.1 Funktionen und Wirkungen von Federn	504
3-1.3.2 Systematik der Federn	504
3-1.4 Lager- und Führungselemente	507
3-1.4.1 Wälzlager	507
3-1.4.2 Gleitlager	511
3-1.5 Achsen und Wellen	512
3-1.6 Welle-Nabe-Verbindungen	513
3-1.7 Gleichförmig übersetzende Getriebe	514
3-1.8 Zusammenfassung	516
3-2 Stähle für Zahnräder	517
<i>Karsten Stahl, Thomas Tobie, Florian Dobler</i>	
3-2.1 Einleitung	517
3-2.2 Grundlagen der Zahnradbeanspruchung und der Tragfähigkeitsrechnung	518
3-2.3 Überblick über typische Zahnradchadensarten und Mechanismen	520

3-2.4	Anforderungen an die Eigenschaften von Zahnradstählen	522
3-2.4.1	Einsatzstähle	524
3-2.4.2	Nitrierstähle	527
3-2.4.3	Stähle zum Randschichthärten	528
3-2.4.4	Vergütungsstähle	529
3-2.5	Zusammenfassung und Ausblick	529
3-3	Zähne für eine Baggerschaufel	531
	<i>Frank Wilke</i>	
3-4	Wälzlager für verschiedene Bereiche	532
	<i>Frank Wilke</i>	
3-5	Auswerferstifte	534
	<i>Serosh Engineer</i>	
3-6	Linearführungssysteme aus Blankstahl	536
	<i>Serosh Engineer</i>	
3-7	Klemmkörperprofile für Freiläufe	538
	<i>Serosh Engineer</i>	
3-8	Rakelwellen für Auftragssysteme für das Streichen von Papier und Karton	540
	<i>Serosh Engineer</i>	
3-9	Pulvermetallurgische Werkstoffe	541
	<i>Frank Baumgärtner, Ingolf Langer</i>	
3-9.1	Axiale Presstechnik	541
3-9.1.1	Werkstoffe und deren Eigenschaften	542
3-9.1.2	Herstellungsverfahren	543
3-9.1.3	Eigenschaften der Formteile und Perspektiven	544
3-9.2	Pulvermetallurgisches Spritzgießen (metal injection moulding – MIM)	545
3-9.3	Perspektiven	548
4	Stähle für die Verkehrstechnik – <i>Qualität und Quantität in höchster Perfektion</i>	551
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
4-1	Stähle für Pkw-Karosserien	555
	<i>Mingxuan Lin, Maria Zielesnik, Ulrich Prahl</i>	
4-1.1	Einleitung	555
4-1.2	Terminologie und Klassifizierung	559
4-1.3	Metallurgische Betrachtungen	563
4-1.4	Korrosionsschutz	564
4-1.5	Stähle im Einzelnen	565
4-1.5.1	DDQ – weiche Tiefziehstähle	565
4-1.5.2	IF- und IF-HS-Stähle	566
4-1.5.3	BH-Stähle	569
4-1.5.4	HSLA-Stähle	572

4-1.5.5	FB-Stähle	574
4-1.5.6	DP- und DH-Stähle	575
4-1.5.7	CP-Stähle	579
4-1.5.8	TRIP-Stähle	581
4-1.5.9	MS-Stähle	584
4-1.5.10	LH-Stähle	585
4-1.5.11	PH-Stähle	587
4-1.5.12	TWIP-Stähle	589
4-1.6	Abschließende Betrachtung	591
4-2	Stähle für den Nutzfahrzeugbau	593
	<i>Andreas Kern</i>	
4-2.1	Allgemeines	593
4-2.2	Anforderungen	596
4-2.3	Anforderungen an das Verarbeitungs- und Gebrauchsverhalten	598
4-2.3.1	Herstellung und Eigenschaften	601
4-2.3.1.1	Stahlherstellung	602
4-2.3.1.2	Walzen und Wärmebehandlung	603
4-2.3.1.3	Charakteristische Eigenschaften	606
4-2.3.2	Hochfeste verschleißbeständige Baustähle	616
4-2.3.3	Wichtige Stahlgüten für den Nutzfahrzeugbau	620
4-2.3.4	Künftige Entwicklungen	621
4-3	Stähle für das Fahrwerk und den Antriebsstrang in der Automobiltechnik	624
	<i>Peter Janßen, Serosh Engineer</i>	
4-3.1	Federstähle	624
4-3.2	Stähle für Schrauben und Verbindungselemente	627
4-3.3	Schmiedestähle für Kurbelwellen, Antriebswellen, Achsen und Achsschenkel	629
4-3.4	Stähle für Wellen in Hilfsaggregaten	631
4-3.5	Stähle für zerspanend hergestellte Teile	632
4-3.6	Stähle für Lenkungsteile	634
4-3.7	Stähle für Reifeneinlegedrähte (Stahlkord)	634
4-3.8	Stähle für Stabilisatoren	635
4-3.9	Stähle für Pleuel	636
4-3.10	Stähle für Einspritzsysteme in Dieselmotoren	636
4-3.11	Erwartete Entwicklungen für Langprodukte in der Antriebstechnik für den Automobilbau	638
4-4	Leichtbau mit massivumgeformten Komponenten in der Automobilindustrie	640
	<i>Hans-Willi Raedt, Frank Wilke, Christian-Simon Ernst</i>	
4-4.1	Motivation für Leichtbau	640
4-4.2	Massivumformung im Automobilbau	640
4-4.3	Prozesse der Massivumformung	641
4-4.4	Übersicht über die verwendeten Werkstoffe	642
4-4.5	Weiterveredlung	643
4-4.6	Ideen mit Leichtbaupotenzial	644
4-4.7	Stärkere Stähle – leichtere Getriebe und andere Verzahnungsanwendungen	652
4-4.8	Fazit und Ausblick	653

4-5 Präzisionsstahlrohre im Automobilbau	654
<i>Steffen Zimmermann, Jürgen Klabbers-Heimann</i>	
4-5.1 Eigenschaften und Fertigung von Präzisionsstahlrohren	654
4-5.2 Beispiele für Präzisionsstahlrohre im Automobilbau	658
4-5.2.1 Einspritzleitungen für Dieselmotoren (DEL)	658
4-5.2.2 Stabilisatoren als Beitrag zum Fahrkomfort	660
4-5.2.3 Wellen in der Antriebstechnik	662
4-5.2.4 Airbag dient der Sicherheit	662
4-5.3 Zusammenfassung und Ausblick	663
4-6 Stähle für den Schienenfahrweg	665
<i>Albert Jörg</i>	
4-6.1 Einleitung	665
4-6.2 Aufgaben der Schiene	666
4-6.3 Anforderungen an das Schienenprofil	667
4-6.4 Anforderungen an die Schienenlänge	668
4-6.5 Anforderungen an die Werkstoffe	669
4-6.6 Bewährte Stähle und deren Herstellungskonzepte	671
4-6.6.1 Anwendung der Legierungstechnik	671
4-6.6.2 Anwendung der Wärmebehandlung	672
4-6.7 Bemessung von Schienenstählen	675
4-6.8 Betriebsverhalten von Schienenstählen	675
4-6.9 Fazit	678
4-7 Nichtrostende Federn	679
<i>Frank Wilke</i>	
4-8 Zahnstangen für Lenkungen	681
<i>Frank Wilke</i>	
4-9 Achsen für Eisenbahnen und Straßenbahnen	683
<i>Frank Wilke</i>	
4-10 Stähle für Auspuff-Flansche von Kraftfahrzeugen	685
<i>Frank Wilke</i>	
4-11 Einsatzstähle für Kolbenbolzen in Verbrennungsmotoren	686
<i>Frank Wilke</i>	
4-12 Gebaute Nockenwelle für die Motorsteuerung	687
<i>Frank Wilke</i>	
4-13 Motorventile aus Edelstahl	688
<i>Frank Wilke</i>	
4-14 Vorgelegewelle als Teil des Fahrzeuggetriebes	691
<i>Frank Wilke</i>	

4-15 Exzenterwelle für die Motorsteuerung	694
<i>Frank Wilke</i>	
4-16 Benzinverteilerleiste in Pkw-Motoren	696
<i>Frank Wilke</i>	
4-17 Kolben für Anwendung in der Servo-Hydraulik	698
<i>Frank Wilke</i>	
4-18 Edelstähle für die Luftfahrt	699
<i>Frank Wilke</i>	
5 Stähle für Offshore-Anwendungen und den Stahlwasserbau – Stähle erschließen die maritime Welt	701
<i>Wolfgang Bleck</i>	
5-1 Stähle für Offshore-Bauwerke	705
<i>Andreas Thieme</i>	
5-1.1 Entwicklung der Offshore-Technologie	705
5-1.2 Offshore-Bauten zur Öl- und Gasförderung	706
5-1.2.1 Arbeitsplattformen	706
5-1.2.2 Gründungsstrukturen	707
5-1.2.3 Schwimmende Konstruktionen	709
5-1.2.4 Spezielle Formen der Plattform	711
5-1.2.5 Unterwassertechnologie	714
5-1.2.6 Transport von und zur Plattform	715
5-1.2.7 Installation und Instandhaltung	716
5-1.3 Offshore-Bauten zur Gewinnung regenerativer Energien	717
5-1.3.1 Offshore-Windkraftanlagen	717
5-1.3.2 Gewinnung von Strömungs-, Wellen- und Gezeitenenergie	720
5-1.4 Stahl für den Offshore-Bereich	720
5-1.4.1 Anforderungen an Stahl für Offshore-Anwendungen	721
5-1.4.2 Herstellung von Stahl für Offshore-Anwendungen	722
5-1.4.3 Internationale Normung der Stahlgüten	723
5-1.5 Stahlbedarf für den Offshore-Bereich in der Praxis	727
5-2 Stähle für Hubketten im Stahlwasserbau	729
<i>Thomas Hesse, Ulrike Gabrys</i>	
5-3 Stähle für Stahlwasserbauverschlüsse	731
<i>Thomas Hesse, Ulrike Gabrys</i>	
5-4 Nichtrostende Stähle im Flusswasserbau	734
<i>Frank Wilke</i>	
5-5 Stähle für den Hafenausbau	736
<i>Oliver Hechler, Hans-Uwe Kalle</i>	
5-5.1 Hafen Hamburg	736

5-5.2	Eurogate-Containerterminal Predöhlkai	736
5-5.3	Schleusenkanal Langwedel	738
5-5.4	Donauhafen Straubing-Sand	739
5-6	Grobbleche aus hochfesten Stählen für den Schiffbau	741
	<i>Jörg Maffert</i>	
6	Stähle für Leitungsrohre – Stahl für die unsichtbare Transport-Infrastruktur	743
	<i>Wolfgang Bleck, Juliane Mentz, Axel Kulgemeyer</i>	
6.1	Anwendung von Leitungsrohren	747
6.1.1	Einsatz von Leitungsrohren	747
6.1.2	Normenbasis	750
6.1.3	Typen, Abmessungen und Herstellprozesse von Leitungsrohren	752
6.1.4	Historie	757
6.2	Anforderungen an Leitungsrohre	760
6.2.1	Mechanische Kennwerte und deren Bestimmung	760
6.2.2	Widerstand gegen langlaufende Risse	762
6.2.3	Offshore-Pipelines – mechanisch-technologische Anforderungen	763
6.2.4	Schweißverhalten	765
6.2.5	Korrosionseigenschaften	766
6.2.6	Beschichtungen	769
6.3	Eingesetzte Stähle	770
6.3.1	Stähle für längsnahtgeschweißte Leitungsrohre	770
6.3.2	Stähle für nahtlose Leitungsrohre	772
6.4	Schlussbemerkungen	773
7	Stähle für den Werkzeugbau – Unverzichtbare Werkstoffe für agrarische und industrielle Gesellschaften	777
	<i>Wolfgang Bleck, Evelin Ratte</i>	
7.1	Eigenschaften von Werkzeugstählen	779
7.1.1	Härte	779
7.1.2	Zähigkeit	780
7.1.3	Verschleißbeständigkeit	781
7.2	Einteilung der Werkzeugstähle	781
7.2.1	Kaltarbeitsstähle	782
7.2.2	Warmarbeitsstähle	783
7.2.3	Schnellarbeitsstähle	784
7.3	Einsatzbereiche für Werkzeugstähle	784
7.3.1	Stähle für Schneid- und Stanzwerkzeuge	784
7.3.2	Stähle für Druckgussformen	787
7.3.3	Stähle für Walzen	788
7.3.4	Stähle für die Kunststoffverarbeitung	789
7.3.5	Werkzeuge zur Warmumformung	792
7.3.6	Zerspanungswerkzeuge	794
7.4	Zusammenfassung	795

8	Stähle für die Energietechnik – Hochwarmfeste Stähle für die ressourcenschonende Stromerzeugung	797
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
8-1	Thermische Kraftwerke	801
	<i>Ulrich Brill</i>	
8-1.1	Einleitung	801
8-1.2	Anforderungen an Werkstoffe für die Kraftwerkstechnik	803
8-1.3	Hochtemperaturwerkstoffe	806
8-1.4	Nasskorrosionswerkstoffe	814
8-1.5	Zusammenfassung und Ausblick	817
8-2	Stähle für eine Rauchgasentschwefelungsanlage	820
	<i>Winfried Heimann</i>	
8-3	Kesselrohre für den Kraftwerksbau	823
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
8-3.1	Einleitung	823
8-3.2	Anforderungen an die Werkstoffe	824
8-3.3	Bewährte Stähle	825
8-3.4	Mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen	825
8-3.5	Einflussgrößen auf die Kriecheigenschaften	828
8-3.6	Zukünftige Entwicklungen	829
8-4	Nichtrostende Rohr-Abhänger für Kraftwerke	830
	<i>Frank Wilke</i>	
9	Stähle für Anwendungen im Haushalt, in der Medizintechnik und im Sportbereich – Der Mensch im Mittelpunkt	831
	<i>Wolfgang Bleck</i>	
9-1	Stähle für Anwendungen im Haushalt	833
	<i>Wolfgang Bleck, Frank Wilke</i>	
9-1.1	Haushaltsgeräte	833
9-1.2	Haushaltswaren	839
9-1.2.1	Kochgeschirr	839
9-1.2.2	Essbesteck und andere Messer	840
9-2	Stähle für die Medizintechnik	844
	<i>Frank Wilke</i>	
9-2.1	Chirurgische Instrumente	844
9-2.2	Implantate	845
9-3	Stähle für Anwendungen im Spiel- und Sportbereich	847
	<i>Wolfgang Bleck, Frank Wilke</i>	
9-3.1	Spiel- und Sportgeräte	847
9-3.2	Funktionselemente im Sport	848

10 Stähle für Sonderanwendungen – Attraktive Kombination von funktionellen und strukturellen Eigenschaften	851
<i>Wolfgang Bleck</i>	
10-1 Stähle für die Elektrotechnik	855
<i>Wolfgang Bleck, Markus Schulte, Frank Wilke</i>	
10-1.1 Weichmagnetische Stähle	855
10-1.1.1 Nicht kornorientiertes Elektroblech und -band	857
10-1.1.2 Kornorientiertes Elektroblech und -band	860
10-1.1.3 Nichtrostende weichmagnetische Stähle	862
10-1.2 Hartmagnetische Stähle – Dauermagnetwerkstoffe	864
10-1.3 Nichtmagnetisierbare Stähle	865
10-1.4 Stähle mit guter elektrischer Leitfähigkeit	866
10-2 Stähle und Legierungen für Heizleiter	868
<i>Serosh Engineer</i>	
10-3 Stähle mit definierter Wärmeausdehnung	872
<i>Wolfgang Bleck</i>	
10-4 Stähle für die Sicherheitstechnik	874
<i>Frank Wilke</i>	
10-4.1 Bügelschlösser – Bauteile für die Sicherheit	874
10-4.2 Feindraht für Schutzkleidung	875
10-4.3 Nichtrostender Feindraht	876
10-4.4 Hitzebeständige Ketten für Zement-Drehrohröfen	876
10-5 Additive Fertigung von Bauteilen aus Stahl	879
<i>Christian Haase</i>	
10-5.1 Einleitung	879
10-5.2 Verfahren zur additiven Fertigung	880
10-5.3 Prozessbedingte Besonderheiten	881
10-5.4 Eingesetzte Stähle und ihre Anwendungen	882
Zu guter Letzt – Sprüche, Weisheiten, Dummheiten, Mythen zu Eisen und Stahl	885
ANHANG	
Verzeichnis der im Buch erwähnten Normen	889
Stichwortverzeichnis	897

Autorenverzeichnis

Dr.-Ing. Frank Baumgärtner

SchUNK Sintermetalltechnik GmbH, Heuchelheim
Frank.Baumgaertner@schunk-group.com
Kapitel: B 3-9

Dr.-Ing. Christoph Becker

Institut für Umformtechnik und Leichtbau
Technische Universität Dortmund
christoph2.becker@tu-dortmund.de
Kapitel: A 5-4

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
(IFUM), Leibniz Universität Hannover
behrens@ifum.uni-hannover.de
Kapitel: A 5-3, A 5-6

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
Wolfgang.Bleck@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: A 1, A 3, B 8-3, B 9-1, B 10-1, B 10-3,
alle Zwischentexte

Dipl.-Ing. Wolfgang Branner

HUBER SE
Berching
Wolfgang.Branner@huber.de
Kapitel: B 2-5

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Brill

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
u.brill@t-online.de
Kapitel: B 8-1

Prof. Dr.-Ing. habil., Prof. E. h. em. Klaus Brökel

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Universität Rostock
klaus.broekel@uni-rostock.de
Kapitel: B 3-1

Dipl.-Ing. Jan Bültmann

ehem. IEHK Aachen
Kapitel: A 5-10

M. Sc. Sandro Citarelli

Institut für Stahlbau und Lehrstuhl für Stahlbau und
Leichtmetallbau
RWTH Aachen
s.citarelli@stb.rwth-aachen.de
Kapitel: B 1-5

Dr.-Ing. habil. Sami Chatti

ehem. Institut für Umformtechnik und Leichtbau
Technische Universität Dortmund
sami.chatti@tu-dortmund.de
Kapitel: A 5-4

Dr.-Ing. Uwe Diekmann

MATPLUS GmbH
Kamen
uwe.diekmann@matplus.de
Kapitel: A 2

Dipl.-Ing. Florian Dobler

ehem. FZG München
Kapitel: B 3-2

Dr.-Ing. Serosh Engineer

EZM EdelstahlZieherei Mark GmbH
Wetter
s.engineer@ezm-mark.de
Kapitel: A 4, B 3-5 bis B 3-8, B 4-3, B 10-2

Christian-Simon Ernst

Kapitel: B 4-4

Dipl.-Ing. Martin Feistle

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen,
Technische Universität München, Garching
martin.feistle@utg.de

Kapitel: A 5-1.2

Dr.-Ing. Alexander Felde

Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart
alexander.felde@ifu.uni-stuttgart.de

Kapitel: A 5-2

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Institut für Stahlbau und Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

RWTH Aachen

feldmann@stb.rwth-aachen.de

Kapitel: B 1-5

Dr.-Ing. Johannes Gediga

Thinkstep

Leinfeld-Echterdingen

johannes.gediga@thinkstep.com

Kapitel: A 6

Dipl.-Ing. Ulrike Gabrys

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Karlsruhe

ulrike.gabrys@baw.de

Kapitel: B 5-2, B 5-3

Dipl.-Kfm. Holger Glinde

Institut Feuerverzinken GmbH

Düsseldorf

holger.glinde@feuerverzinken.com

Kapitel: B 1-8, B 1-9

Dipl.-Ing. Goran Grzancic

Institut für Umformtechnik und Leichtbau

Technische Universität Dortmund

goran.grzancic@tu-dortmund.de

Kapitel: A 5-4

Dr.-Ing. Christian Haase

Inst. für Eisenhüttenkunde (IEHK)

RWTH Aachen

Christian.Haase@iehk.rwth-aachen.de

Kapitel: B 10-5

M. Sc. Christoph Hartmann

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen

Technische Universität München, Garching

christoph.hartmann@utg.de

Kapitel: A 5-1.1

Dr.-Ing. Oliver Hechler

ArcelorMittal Sheet Piling,

Esch-sur-Alzette (Luxembourg)

oliver.hechler@arcelormittal.com

Kapitel: B 1-3, B 5-5

Dr.-Ing. Winfried Heimann

Krefeld

winfried.heimann@web.de

Kapitel B 8-2

Dipl.-Ing. Thomas Hesse

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Karlsruhe

thomas.hesse@baw.de

Kapitel: B 5-2, B 5-3

Dipl.-Ing. Maria Hiller

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen,

Technische Universität München, Garching

maria.hiller@utg.de

Kapitel: A 5-1.1

B. Sc. Jan Hof

ehem. IEHK Aachen

Kapitel: A 5-10

Dr.-Ing. Sven Hübner

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen

(IFUM), Leibniz Universität Hannover

huebner@ifum.uni-hannover.de

Kapitel: A 5-6

Dr.-Ing. Peter Janßen

Muhr und Bender KG, Attendorn

stahlpeter64@web.de

Kapitel: B 1-2, B 4-3

Dr.-Ing., Dr. techn. Albert Jörg

voestalpine Schienen GmbH
Leoben (Österreich)
albert.joerg@voestalpine.com
Kapitel: B 4-7

Dipl.-Ing. Hans-Uwe Kalle

ArcelorMittal Sheet Piling,
Esch-sur-Alzette (Luxembourg)
uwe.kalle@arcelormittal.com
Kapitel: B 1-3, B 5-5

Prof. Dr.-Ing. Andreas Kern

thyssenkrupp Steel Europe, Technology and
Innovation – Hot Rolled Products Duisburg
andreas.kern@thyssenkrupp.com
Kapitel: B 2-1, B 4-2

Dr.-Ing. Jürgen Klabbers-Heimann

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg
j.klabbers-heimann@du.szmf.de
Kapitel: B 4-5

Dr.-Ing. Andreas Klink

Werkzeugmaschinenlabor der
RWTH Aachen University
A.Klink@wzl.rwth-aachen.de
Kapitel: A 5-5.3

Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., Dr. h. c., Dr. h. c.**Fritz Klocke**

Werkzeugmaschinenlabor der
RWTH Aachen University
F.Klocke@wzl.rwth-aachen.de
Kapitel: A 5-5.1, A 5-5.2, A 5-5.3

Dr.-Ing. Jürgen Korkhaus

ehem. Werkstofftechnik BASF SE Ludwigshafen
Juergen.Korkhaus@gmail.com
Kapitel: B 2-2

Dipl.-Ing. Michael Krinninger

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Technische Universität München, Garching
michael.krinninger@utg.de
Kapitel: A 5-1.2

Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne

Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit
im Metalleichtbau
RWTH Aachen University
mku@stb.rwth-aachen.de
Kapitel: B 1-4

Dr. mont. Axel Kulgemeyer

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg
a.c.kulgemeyer@du.szmf.de
Kapitel: B 6

Dipl.-Ing. Ingolf Langer

Schunk Sintermetalltechnik GmbH, Thale
Ingolf.Langer@schunk-group.com
Kapitel: B 3-9

Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald

Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart
mathias.liewald@ifu.uni-stuttgart.de
Kapitel: A 5-2

M. Sc. Mingxuan Lin

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
Mingxuan.Lin@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: B 4-1

Dipl.-Ing. Jörg Maffert

Rehlingen-Siersburg
p.j.maffert@t-online.de
Kapitel: B 5-5

M. Sc. Robert Meißner

Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart
mathias.liewald@ifu.uni-stuttgart.de
Kapitel: A 5-2

Dr.-Ing. Juliane Mentz

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg
j.mentz@du.szmf.de
Kapitel: B 6

Dipl.-Chem. Elvira Moeller

Leinfelden-Echterdingen
elvira.moeller@t-online.de
Kapitel: A 5-11

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
muenstermann@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: B 1-1, B 2-1

Dipl.-Math. Daniel Opritescu

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Technische Universität München, Garching
daniel.opritescu@utg.de
Kapitel: A 5-1.1

Dipl.-Kffr. Esther Pfeiffer

thyssenkrupp Steel Europe – Quality Management
Heavy Plate, Duisburg
esther.pfeiffer@thyssenkrupp.com
Kapitel: B 2-1

Dr.-Ing. Ralf Podleschny

Internationaler Verband für den Metalleichtbau
(IFBS)
Krefeld
ralf.podleschny@ifbs.eu
Kapitel: B 1-4

Dr.-Ing. Ulrich Prah

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
Ulrich.Prah@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: A 4, A 5-10, B 4-1

Dipl.-Ing. Jan Pupp

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
(IFUM), Leibniz Universität Hannover
massivumformung@ifum.uni-hannover.de
Kapitel: A 5-3

Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt

Vice President Advanced Engineering
Hirschvogel Automotive Group
Denklingen
HHG@Hirschvogel.com
Kapitel: B 4-4

Dr.-Ing. Evelin Ratte

Carpenter Technology Europe
erate@cartech.com
Kapitel: B 7

Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Institut für Schweißtechnik und Füge-technik (ISF)
der RWTH Aachen
office@isf.rwth-aachen.de
Kapitel: A 5-7, A 5-8, A 5-9

M. Sc. Markus Schulte

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
Markus.Schulte@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: B 10-1

M. Sc. Hannah Schwich

Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
Hannah.Schwich@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: A 4

Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Lehrstuhl für Maschinenelemente (FZG),
Technische Universität München, Garching
stahl@fzg.mw.tum.de
Kapitel: B 3-2

Dr.-Ing. Lars Stein

Institut für Schweißtechnik und Füge-technik (ISF)
der RWTH Aachen
stein@isf.rwth-aachen.de
Kapitel: A 5-7, A 5-8, A 5-9

Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya

Institut für Umformtechnik und Leichtbau,
Technische Universität Dortmund
erman.tekkaya@iul.tu-dortmund.de
Kapitel: A 5-4

Dipl.-Ing. Andreas Thieme

Rehlingen-Siersburg
andreas.thieme1962@gmail.com
Kapitel: B 5-1

Dr.-Ing. Thomas Tobie

Lehrstuhl für Maschinenelemente (FZG),
Technische Universität München, Garching
Tobie@fzg.mw.tum.de
Kapitel: B 3-2

M. Sc. Frederik Vits

Werkzeugmaschinenlabor der
RWTH Aachen University
F.Vits@wzl.rwth-aachen.de
Kapitel: A 5-5.2

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Technische Universität München, Garching
wolfram.volk@utg.de
Kapitel: A 5-1.1, A 5-1.2

Dipl.-Ing. Annika Weinschenk

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen
Technische Universität München, Garching
annika.weinschenk@utg.de
Kapitel: A 5-1.1

Dipl.-Ing. Frank Wilke

ehem. Deutsche Edelstahlwerke GmbH
frank.wilke@dew-stahl.com
Kapitel: B 2-3, B 3-3, B 3-4, B 4-7 bis B 4-18, B 5-4,
B 8-4, B 10-4

Dr.-Ing. Guido Wirtz

Werkzeugmaschinenlabor der
RWTH Aachen University
G.Wirtz@wzl.rwth-aachen.de
Kapitel: A 5-5.1

Dipl.-Ing. Maria Zielesnik

Inst. für Eisenhüttenkunde (IEHK)
RWTH Aachen
Maria.Zielesnik@iehk.rwth-aachen.de
Kapitel: B 4-1

Dr.-Ing. Steffen Zimmermann

Salzgitter Mannesmann Precision GmbH
Mülheim/Ruhr
Steffen.Zimmermann@smp-tubes.com
Kapitel: B 4-5

Stähle für das Fahrwerk und den Antriebsstrang in der Automobiltechnik

Peter Janßen, Serosh Engineer

4-3.1 Federstähle

Federn werden an vielen Stellen im Automobil eingesetzt. Es gibt sehr hoch dynamisch belastete Federn im Antriebsstrang (Ventilfedern, Transmissionsfedern, Kupplungsfedern, Federn in Kraftstoffeinspritzsystemen). Weitere Anwendungen sind Achsfedern und Kofferraumdeckelfedern (Bilder 4-3.1 und 4-3.2). Alle Anwendungen in modernen Automobilen erfordern eine hohe Belastbarkeit des Stahls. Es sind daher fast ausschließlich SiCr- und Cr-legierte Federstähle im Einsatz. Die Belastungskollektive sind je nach Einsatzzweck so unterschiedlich, dass die Anforderungen an Eigenschaften wie den oxidischen Reinheitsgrad, die Randentkohlung und maximale Oberflächenfehlerntiefe sehr unterschiedlich sind. In der Regel werden im Automobil Schraubenfedern eingesetzt. Die Form und Größe der Federn werden von den Anforderungen, dem Einsatzzweck und dem Einbauraum bestimmt. Federn im Automobil sind daher immer maßgeschneidert und keine Normteile. Der Anwender muss sich mit dem Federnhersteller immer detailliert abstimmen.

Die höchsten Anforderungen an den eingesetzten Stahl stellt die Motorventilfeder. Es wird daher im gesamten Fertigungsprozess ein sehr hoher Aufwand getrieben. Im Stahlwerk wird der Stahl mit einer speziellen „SuperClean“-Metallurgie erschmolzen, um einen für den Anwendungszweck besonders geeigneten oxidischen Reinheitsgrad zu erhalten. Motorventilfedern sind hochbelastete Schraubenfedern, bei denen im Versagensfall der Bruch von der Oberfläche oder dem oberflächennahen Bereich ausgeht. Im Fall des Bruchausgangs von einem Einschluss ist die Einschlussgröße der entscheidende Parameter. Je größer der oxidische Einschluss ist, desto höher ist das Risiko für einen Federbruch. Es müssen im Stahlherstellungsprozess also zu allererst möglichst kleine Einschlüsse gezüchtet werden. In heute üblichen Stahlherstellungsverfahren werden



Bild 4-3.1 Ventilfeder (Stahlsorte 54SiCr6)



Bild 4-3.2 Achsfeder (Stahlsorte 54SiCrV6)

Federstähle von den für die Duktilität schädlichen Elementen – wie Phosphor – durch Sauerstoff befreit. Beim Abstich des primärmetallurgischen Prozesses (z. B. Sauerstoffaufblasverfahren im Konverter) enthält der Stahl daher einen relativ hohen Sauerstoffanteil (ca. 500 – 1000 ppm), der beim Abstich entfernt werden muss. Für diesen Beruhigungsprozess können verschiedene Verfahren und Elemente eingesetzt werden. Die Kombination von Verfahren und eingesetzten chemischen Elementen beeinflusst den oxidischen Reinheitsgrad erheblich. Der Verfahrensweg, der zu einem sehr niedrigen Gesamtsauerstoffgehalt im Stahl führt, hat den Nachteil, dass sich relativ große, unverformbare, hoch aluminiumoxidhaltige Einschlüsse bilden. Diese Einschlüsse würden zu Federbrüchen führen. Oxide, die sich als Desoxidationsprodukte in der Schmelze bilden, haben in Abhängigkeit von der lokalen Übersättigung und nachlaufenden Agglomerationsvorgängen Größen von $1\ \mu\text{m}$ bis zu mehreren Millimetern. Ziel der Sekundärmetallurgie ist es, die Einschlüsse in die Schlacke zu überführen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss auf den Einschluss eine Auftriebskraft wirken. Die Auftriebskraft entsteht durch den Dichteunterschied zwischen Desoxidationsprodukt und Stahl. Allerdings wirkt der Auftriebskraft eine Reibungskraft entgegen. Das Gleichgewicht zwischen Auftriebskraft und Reibungskraft liegt bei etwa $50\ \mu\text{m}$ für einen ideal runden Partikel, d. h., ein oxidischer Einschluss, der $50\ \mu\text{m}$ oder kleiner ist, kann selbst bei unendlicher Zeit nicht in die Schlacke aufsteigen. Da in einem technischen Prozess selten ideal runde Einschlüsse entstehen, muss in einem nach dem Stand der Technik gefertigten Stahl auch mit oxidischen Einschlüssen mit einer Größe über $50\ \mu\text{m}$ gerechnet werden. Selbst bei Einschlüssen von $50\ \mu\text{m}$ Größe können, wenn sie oberflächennah in der Feder zu finden sind, bereits Federbrüche auftreten. Die Lösung des Problems ist die Züchtung von verformbaren Einschlüssen mit Hilfe der „SuperClean“-Metallurgie. Mit Hilfe einer Si-Mischdesoxidation und weiteren sekundärmetallurgischen Maßnahmen wird die Zusammensetzung der Einschlüsse so beeinflusst, dass der Schmelzpunkt des Einschlusses sehr niedrig liegt. Der Einschluss wird im Warmwalzprozess teigig bzw. flüssig und verformt sich besser als die Stahlmatrix. Trotz eines relativ hohen Gesamtsauerstoffgehalts ist die Anzahl größerer Einschlüsse sehr gering und somit das Risiko eines Federbruchs um Zehnerpotenzen niedriger als bei einem aluminiumberuhigten Stahl.

Schraubenfedern werden nach verschiedenen Verfahren hergestellt. Alle handelsüblichen SiCr-Federstähle können in diesen Verfahren eingesetzt werden. Zunächst unterscheidet man zwischen warm- und kaltgewickelten Federn. Bei warmgewickelten Federn wird der Walzdraht gezogen, zu Stäben abgelängt, die Stäbe werden erwärmt, zur Feder gewickelt und anschließend vergütet. Die Stäbe können vor der Federfertigung geschliffen werden, um eventuell vorhandene Oberflächenfehler zu beseitigen (Bild 4-3.3). Dieses Verfahren wird z. B. zur Fertigung von Achsfedern eingesetzt. Bei kaltgewickelten Federn wird der Draht zunächst gezogen. Anschließend erfolgt eine Ölschlussvergütung. Der ölschlussvergütete Draht wird dann kalt zur Feder gewickelt. Ein Sonderverfahren ist eine kaltgewickelte Feder, die aus hartgezogenem Draht hergestellt wird. In diesem Fall erfolgt nach dem Federwickelprozess eine Stückvergütung.

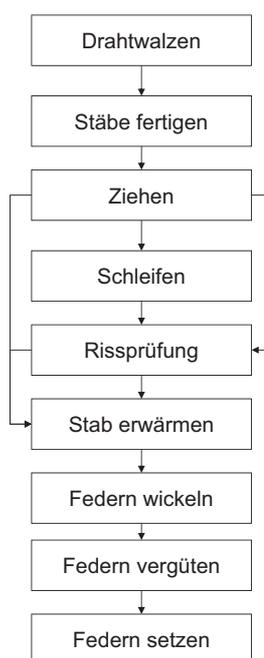


Bild 4-3.3 Ablaufdiagramm für die Herstellung warmgewickelter Federn

Die Anforderungen an Randentkohlung und Oberflächenqualität sind bei kaltgewickelten Federn für hochdynamische Belastungen ebenfalls sehr hoch. In der Regel wird aus diesem Grund der Draht vor dem Ziehen und Vergüten geschälpt. Durch den Schälprozess kann es zur Bildung von Reibmartensit in der Oberfläche kommen, der im nachfolgenden Ziehprozess zu vielfältigen Problemen führen kann. Der geschälpte

Walzdraht muss daher vor dem Ziehen angelassen oder patentiert werden. Fehler auf der Oberfläche werden mit dieser Maßnahme zu einem großen Teil entfernt. Nach dem Vergüten bzw. Ziehen wird der Draht rissgeprüft und fehlerhafte Stellen werden mit einer Farbmarkierung versehen. Diese Stellen werden dann im Federwickelprozess aussortiert (Bild 4-3.4).

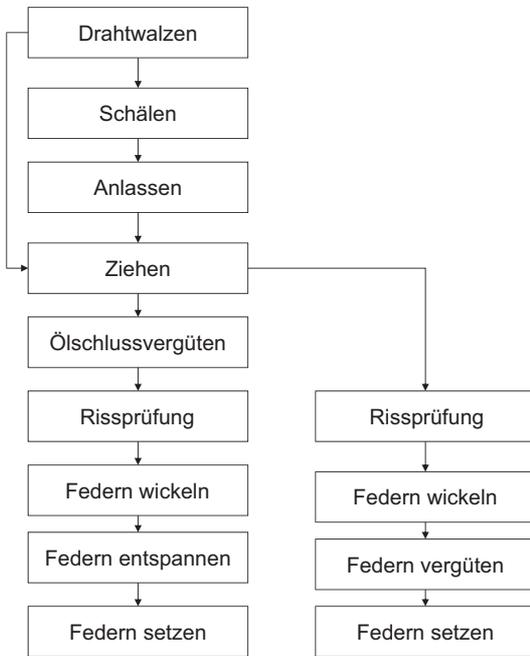


Bild 4-3.4 Ablaufdiagramm für die Herstellung kaltgewickelter Federn

4

Die Erhöhung der Verdichtung in Verbrennungsmotoren und der engere Bauraum haben in den letzten Jahren zu einer immer höheren Belastung der Ventildfedern geführt. Diese Tendenz erhöht wiederum die Festigkeitsanforderungen an den ölschlussvergüteten Draht. Neben der Standardstahlsorte 54SiCr6 sind heute auch höherfeste Stahlsorten mit weiteren Legierungselementen im Einsatz (Tabelle 4-3.1).

Die Zugfestigkeit des ölschlussvergüteten Drahts liegt in Abhängigkeit von Stahlsorte und Drahtdurchmesser zwischen 1760 und 2280 MPa. Es werden Mindestbrucheinschnürungen zwischen 35 und 50% erreicht. Ventildfedern werden in der Regel kaltgewickelt.

Die Transmissionsfedern liegen von den Anforderungen her zwischen den Kupplungs- und den Ventildfedern. Hochbelastete Transmissionsfedern werden daher häufig aus ölschlussvergütetem Ventildfederdraht hergestellt. Bei geringeren Belastungen können die Anforderungen an den oxidischen Reinheitsgrad heruntergeschraubt werden. Transmissionsfedern werden häufig in Kurbelwellendämpfern und Zweimassenschwungrädern zur Reduzierung von Drehmomentspitzen eingesetzt.

Kupplungsfedern haben in der Regel eine niedrigere Belastung als Transmissionsfedern. Aus diesem Grund können die Anforderungen an den oxidischen Reinheitsgrad weiter herabgesetzt werden. Auf der anderen Seite wird Kupplungsfederdraht aus Kostengründen häufig nicht geschält. Da bei ungeschältem Draht Fehler des Walzdrahts auf dem Endprodukt erhalten bleiben, sind die Anforderungen an Oberflächenqualität und Randentkohlung des Walzdrahts höher. Eine typische Stahlsorte für Kupplungsfedern ist der 54SiCr6. Achsfedern sind die schwersten Federn im Automobil. Die Anforderungen an den Reinheitsgrad sind in der Regel nochmals niedriger als bei der Kupplungsfeder. Da die Achsfeder in einem korrosions- und steinschlaggefährdeten Bereich verbaut wird, wird sie in der Regel mit einer Beschichtung geschützt. Durch Steinschlag und Korrosion kann Wasserstoffversprödung auftreten, die wiederum zu einem Versagen der Achsfeder führen kann. Aus diesem Grund sind hochfeste Stahlsorten in diesem Segment noch nicht sehr verbreitet. Hochfeste Stahlsorten müssen in dieser Anwendung eine Resistenz gegen Wasserstoffversprödung aufweisen. Die Standardstahlsorte ist immer noch der 54SiCr6. Achsfedern werden kalt- oder warmgewickelt. Eine Sonder-

Tabelle 4-3.1 Beispiele von Stahlsorten für Ventildfedern, Achsfedern, Federn in Kraftstoffeinspritzsystemen und Transmissionsfedern nach DIN EN 10089 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%								
		C	Si	Mn	Al	P	S	Mo	V	Cr
54SiCr6	1.7102	0,54	1,4	0,7	max. 0,004	max. 0,025	max. 0,02			0,65
54SiCrV6	1.8152	0,56	1,5	0,7	max. 0,004	max. 0,025	max. 0,02		0,15	0,75
60SiCrMoV8	-	0,6	2,0	0,3	max. 0,004	max. 0,025	max. 0,02	0,1	0,15	0,9

Tabelle 4-3.2 Beispiele von Stahlsorten für Kofferraumdeckelfedern nach DIN EN 10089 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%							
		C	Si	Mn	Al	P	S	V	Cr
60SiCrV7	1.8153	0,6	1,7	0,8	max. 0,004	max. 0,025	max. 0,02	0,15	0,4
65SiCr6	1.7107	0,65	1,7	0,8	max. 0,004	max. 0,025	max. 0,02		0,4
67SiCr6	1.7103	0,67	1,5	0,6	max. 0,004	max. 0,025	max. 0,02		0,6

anwendung ist die Bremsspeicherfeder in Lastkraftwagen. Typischerweise wird in dieser Anwendung ein 54SiCrV6 eingesetzt.

Ein steigender Bedarf an Federn entsteht in der letzten Zeit durch die Verbreitung von automatischen Schließsystemen für Kofferraumdeckel. Die Kofferraumdeckelfeder wird ebenfalls aus einem hochfesten Stahl hergestellt (Tabelle 4-3.2).

4-3.2 Stähle für Schrauben und Verbindungselemente

Schrauben für die Automobilindustrie sind üblicherweise genormt (DIN EN ISO 898, VDA 235-204). Sie sind in Festigkeitsklassen eingeteilt (Tabelle 4-3.3).

Im Automobilbau werden aktuell häufig noch Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 oder niedriger eingesetzt. Für Zylinderkopfschrauben werden in der Regel die Festigkeitsklassen 8.8 oder höher verwendet. Schrau-

ben werden im Automobil zur Befestigung von Anbauteilen im Karosseriebereich sowie im Antriebsstrang und dem Fahrwerk zur Montage von Komponenten genutzt. Der große Vorteil der Schraubverbindung im Vergleich zu anderen Fügeverfahren ist, dass die Verbindung ohne großen Aufwand wieder gelöst werden kann. Hauptaufgabe der Schraube ist der Aufbau der Klemmkraft zwischen zwei Fügeteilen. Je nach Einsatzort können noch weitere Anforderungen hinzukommen. Die Radschraube zur Befestigung der Felge ist zum Beispiel einem erheblichen Korrosionsangriff durch Spritzwasser, das im Winter auch salzhaltig ist, ausgesetzt. Üblicherweise werden hier beschichtete Schrauben eingesetzt.

Zylinderkopfschrauben (Bild 4-3.5) hingegen haben ein vergleichbar geringes Risiko der Korrosion, sind aber höheren Temperaturen ausgesetzt. Es wurden für diesen Einsatzzweck 15.9-Schrauben entwickelt, die z. B. auf der Stahlsorte 38CrNiMoB5 basieren. Anwender haben beim Einsatz höherfester Schrauben häufig Bedenken wegen möglicher Wasserstoffversprödung, da hochfeste Stahlsorten für dieses Phänomen eher anfällig sind. Die Wasserstoffaufnahme geschieht häufig durch Korrosion während des Einsatzes. Bei der

Tabelle 4-3.3 Festigkeitsklassen für Schrauben (DIN EN ISO 898)

Festigkeitsklasse	Zugfestigkeit [MPa]	Mindestbruchdehnung [%]	Werkstoff und Wärmebehandlung
3.6	300	25	Kohlenstoffstahl
4.6	400	22	Kohlenstoffstahl
4.8	400	14	Kohlenstoffstahl
5.6	500	20	Kohlenstoffstahl
5.8	500	10	Kohlenstoffstahl
6.8	600	8	Kohlenstoffstahl evtl. mit Zusätzen von z. B. B, Mn, Cr, vergütet
8.8	800	12	Kohlenstoffstahl evtl. mit Zusätzen von z. B. B, Mn, Cr, vergütet
9.8	900	10	Kohlenstoffstahl evtl. mit Zusätzen von z. B. B, Mn, Cr, vergütet
10.9	1000	9	Kohlenstoffstahl evtl. mit Zusätzen von z. B. B, Mn, Cr, vergütet oder legierter Stahl, vergütet
12.9	1200	8	legierter Stahl, vergütet



Bild 4-3.5 Hochfeste Zylinderkopfschraube

Zylinderkopfschraube besteht dieses Risiko nicht, da sie sich in einem mit Schmieröl gefüllten Raum befindet.

Je nach Einsatzzweck wird die Stahlsorte und – falls erforderlich – die Vergütungsbedingung ausgewählt. DIN EN ISO 898 gibt hierfür erste Hinweise. Allgemein gilt, dass mit höherer Festigkeitsklasse der Legierungsgehalt ansteigt. Vom C15 zum 38CrNiMoB5 gibt es jede Menge Varianten für jeden Anwendungszweck (Tabelle 4-3.4).

Da in Automobilen heutzutage nur wenige Schrauben mit Festigkeitsklassen größer 8.8 zu finden sind, ist hier noch ein großes Gewichtseinsparpotenzial zu finden. Auch wenn die einzelne Schraube nur wenige Gramm wiegt, sind aufgrund der großen Anzahl mehrere Kilogramm Schrauben in einem PKW verbaut. Je nach Fahrzeugtyp und -größe findet man zwischen 15 und 50 kg Schrauben in einem PKW.

Ein Kriterium, das für den Einsatz hochfester Schrauben erfüllt sein muss, ist die Resistenz gegen Wasserstoffversprödung. Wasserstoff kann in verschiedenen Stadien im Herstellungsprozess und der Verwendung vom Stahl aufgenommen werden. Es gibt aber auch zahlreiche Prozesse in der Fertigungskette, die eine Reduzierung des Wasserstoffgehalts ermöglichen. Legierte Kaltstauchstähle, die üblicherweise für hochfeste Schrauben verwendet werden, werden bei westeuropäischen Premiumstahlherstellern in der Regel einer Vakuumbehandlung unterzogen. Eine ca. 2 Wochen

dauernde Lagerung des Walzdrahts nach Drahtwalzung reduziert den ohnehin schon niedrigen Wasserstoffgehalt westeuropäischen Stahls unter die Nachweisgrenze. Im weiteren Fertigungsweg kann dann z.B. beim Beizen oder elektrolytischen Verzinken Wasserstoff aufgenommen werden. Die Prozesseigner dieser Prozesse haben dafür zu sorgen, dass Wasserstoffaufnahme vermieden wird. Bei richtiger Prozessführung in der gesamten Lieferkette kann also verhindert werden, dass die Schraube einen messbaren Wasserstoffgehalt hat.

Beim Einsatz im Automobil kann die Schraube Wasserstoff in Folge von Korrosionsprozessen aufnehmen. Diese Möglichkeit ist bei einigen Einsatzzwecken nicht sicher zu verhindern. Die Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung kann über eine künstliche Wasserstoffbeladung nachgewiesen werden. Für die Stahlsorte 38CrNiMoB5 wurde beispielsweise die Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung bis zur Löslichkeitsgrenze von Wasserstoff nachgewiesen.

In Norm DIN EN ISO 898 ist für hochfeste Schrauben eine Vergütung der Schraube vorgeschrieben. Die Werksnormen der Automobilhersteller lehnen sich üblicherweise an diese Norm an. Stand der Technik ist also eine vergütete hochfeste Schraube. In den letzten Jahren wurden neue Werkstoffklassen entwickelt, die auch für die Kaltverformung geeignet sind. Als Beispiel kann hier der bainitische Stahl genannt werden. Weitere Werkstoffklassen, wie TRIP-Stahl oder Dualphasenstahl, sind in unterschiedlichen Entwicklungsstadien bzw. in der Markteinführung (Tabelle 4-3.5). Mit neuen Werkstoffklassen kann unter Umständen auf die Vergütung der Schraube verzichtet werden, da das Gefüge aus der Walzhitze bzw. durch eine Glühbehandlung des Drahts eingestellt werden kann und ein ausreichendes Verformungsverhalten aufweist. Wichtig bei nicht ver-

Tabelle 4-3.4 Beispiele von Stahlsorten für Schrauben nach DIN EN 10263 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%							
		C	Si	Mn	Al	P	S	B	Cr
C15	1.0401	0,15	max. 0,4	0,4	0,04	max. 0,045	max. 0,045		
C20	1.0411	0,2	max. 0,1	0,8	0,04	max. 0,025	max. 0,025		
19MnB4	1.5523	0,2	max. 0,4	1,0	0,04	max. 0,03	max. 0,035	0,0035	
23MnB3	1.5507	0,23	max. 0,15	0,9	0,04	max. 0,015	max. 0,015	0,0035	0,3
32CrB4	1.7076	0,32	max. 0,3	0,8	0,03	max. 0,025	max. 0,025	0,0030	1,1
35B2	1.5511	0,35	max. 0,4	0,8	0,04	max. 0,035	max. 0,035	0,0030	
38CrNiMoB5		0,38	max. 0,2	0,8	0,03	max. 0,025	max. 0,025	0,0030	1,3

Tabelle 4-3.5 Beispiele von bainitischem Stahl und Dualphasenstahl nach DIN EN 10263 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%							
		C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Al	V
20MnCrMo7	1.7911	0,2	0,5	1,7	0,3	0,25	1,6	max. 0,01	
18MnCrSiMo6		0,18	1,2	1,6	0,3				
18MnCr5-3mod		0,2		1,9			1,5		
8MnSi5	1.5113	0,09	1,0	1,7					0,02

güteten hochfesten Schrauben ist, dass sie wie vergütete Schrauben auch bei Beaufschlagung mit höheren Temperaturen die mechanischen Eigenschaften behalten. Für erste Anwendungen konnte dies bereits nachgewiesen und die Werkvorschriften entsprechend angepasst werden. Ausgangsgefüge und Kaltumformgrad müssen hierbei beachtet werden, um die Anforderungen zu erfüllen. Es sollten bei diesen Werkstoffen maßgeschneiderte Lösungen gewählt werden, um das Maximum an Vorteilen aus den neuen Stählen herauszuholen. Aus diesem Grund sollte die komplette Fertigungskette des Verbindungselements (Stahlwerk, Drahtverarbeitung, Schraubenhersteller) ihr Wissen bei der Festlegung des Fertigungswegs und der Werkstoffeigenschaften auch in den Zwischenschritten einbringen. Neben Kostenvorteilen durch die eingesparte Vergütungsbehandlung ist auch die bessere Maßhaltigkeit zu nennen, da Verzug beim Vergüten bei diesem Fertigungsweg mit den neuen Stählen nicht auftreten kann.

4-3.3 Schmiedestähle für Kurbelwellen, Antriebswellen, Achsen und Achsschenkel

Schmiedestähle sind in unterschiedlichen Festigkeitsniveaus verfügbar. Neben konventionellen Kohlenstoffstählen werden AFP-Stähle (ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle), Vergütungsstähle und neuerdings bainitische Stähle eingesetzt. Im PKW-Bereich gibt es bei kleinen Fahrzeugen aus Kostengründen Konkurrenz mit Stahlguss, der aber einen erheblichen Gewichtsnachteil hat. Für Leichtbaulösungen ist die Schmiedestahlvariante zu bevorzugen. Der Zwang zu Leichtbau ergibt sich aus den Forderungen der Poli-

tik zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit der Emissionen. Im Motorenbereich hat sich ein Trend zur Reduzierung der Anzahl der Zylinder bei gleicher Leistung der Zylinder herausgebildet. Während der VW Käfer zu Beginn der 1970er Jahre aus 1600 ccm Hubraum eine Leistung von 50 PS (37 kW) generierte, werden in modernen Motoren mit Hilfe von Turbolader und Kraftstoffeinspritzung Leistungen bis in die Größenordnung von 155 PS (115 kW) erreicht. Auch das Drehmoment ist dementsprechend größer geworden. Aus dieser Tendenz ergibt sich eine höhere Belastung der Kurbelwelle bei gleichem Hubraum. Ferner wird auch der zur Verfügung stehende Bauraum für den Motor immer kleiner. Während Fahrzeuge der 1970er und 1980er Jahre noch einen sehr übersichtlichen Motorraum hatten, ist der zur Verfügung stehende Platz heute nahezu komplett ausgenutzt. Der Weg zur Elektrifizierung wird den für den Verbrennungsmotor zur Verfügung stehenden Raum weiter reduzieren. Der Trend geht also beim Verbrennungsmotor zu einer Reduzierung der Zylinder bei gleicher Leistung. Schon heute sind in der gehobenen Mittelklasse häufig statt 6-Zylindermotoren 4-Zylindermotoren verbaut. Die Laufruhe wird dabei mit Hilfe von Ausgleichswellen sichergestellt, um den gewohnten Fahrkomfort des 6-Zylindermotors zu erhalten. Diese Ausgleichswellen sind ebenfalls häufig Schmiedeteile.

Ist eine Kerndichte des Schmiedeteils vom Anwendungszweck gefordert, muss ein Mindestumformgrad eingehalten werden, der von der Stahlsorte und dem Anwendungszweck abhängig ist. Da der Stahl beim Übergang von der flüssigen zur festen Phase sein Volumen reduziert, entstehen in der Enderstarrung im Kern des Stranggussriegels Erstarrungshohlräume. Die Oberflächen dieser Erstarrungshohlräume sind metallisch blank und verschweißen während des Warmwalzprozesses. Um die Erstarrungshohlräume sicher zu verschweißen, ist eine Mindestumformung durchzuführen.

Aufgrund der eben geschilderten höheren Anforder-

Tabelle 4-3.6 Beispiele von Stählen für Schmiedeteile nach DIN EN 10267, DIN EN 10083 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%							
		C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	N	V
C60	1.0601	0,6	max. 0,4	0,75	max. 0,1	0,4	max. 0,4		
38MnSiVS6	1.1303	0,38	0,7	1,5	max. 0,08		max. 0,3	0,015	0,15
42CrMo4	1.7225	0,42	0,25	0,75	0,22				
18MnCr5-3mod		0,2		1,9			1,5		
38MnCr6 IH		0,38	1,2	1,6			1,0		

rungen sind einfache C-Stähle auf dem Rückzug. Auch AFP-Stähle werden aktuell bis an die Grenze belastet. Viele Konstrukteure sehen dann nur die Möglichkeit, auf Vergütungsstähle auszuweichen, die aber eine zusätzliche Wärmebehandlung erfordern. Stähle mit bainitischem Gefüge, die aus der Schmiedehitze vergütet werden können, sind hier eine gute Alternative (Tabelle 4-3.6).

Die Stahlsorten C60 und 42CrMo4 müssen vergütet werden. Der 38MnSiVS6 erreicht seine mechanischen Werte durch eine BY-Behandlung aus der Schmiedehitze. Das bainitische Gefüge der Stahlsorten 18MnCr5-3mod und 38MnCr6 IH kann durch kontrollierte Abkühlung aus der Schmiedehitze erreicht werden. Die mechanischen Kennwerte sind nach Wärmebehandlung bzw. Abkühlung aus der Schmiedehitze für einen Durchmesser von ca. 100 mm angegeben (Tabelle 4-3.7).

Da für die Auslegung von Schmiedeteilen in der Regel die Streckgrenze herangezogen wird, wird beim Studium der Tabelle verständlich, dass C-Stähle und AFP-Stähle bei ansteigenden Belastungen zurückgedrängt werden. Die in der Tabelle angegebenen Werte sind als Richtwerte zu verstehen, die üblicherweise ohne großen Aufwand erreicht werden können. Die Mindeststreckgrenze kann angehoben werden, wenn mit dem Stahllieferanten Vereinbarungen zur Streubreite bzw. zur Lage der chemischen Zusammensetzung in der Spanne der Norm getroffen werden. Ferner kann durch

ein geringeres Streuband in der Wärmebehandlung bzw. Einhaltung der Abkühlvorschrift bei AFP- und bainitischen Stählen die Mindeststreckgrenze angehoben werden. Besonders bei bainitischen Stählen ist die Einhaltung der Abkühlvorschrift zur Erreichung der angestrebten mechanischen Kennwerte wichtig. Die Bainitumwandlung ist ein diffusionsgesteuerter Prozess. Diffusion benötigt Zeit. Es ist daher wichtig, dass im Temperaturintervall für die Bainitumwandlung ausreichend Zeit zur Verfügung steht. Das Temperaturintervall für die Bainitumwandlung ist dem ZTU-Schaubild für die verwendete Stahlsorte zu entnehmen. In der Regel liegt dieses Intervall zwischen 300 und 600 °C. Der günstigste Abkühlzyklus ist eine beschleunigte Abkühlung aus der Schmiedehitze (z.B. im Luftstrom) bis zur Bainitumwandlungstemperatur und anschließend eine Umwandlung unter stark verzögerter Abkühlung oder gar eine isotherme Umwandlung. Die Auswirkung der Abkühlung auf die mechanischen Eigenschaften eines bainitischen Stahls wird am Beispiel des Stahls 18MnCr5-3 mod gezeigt (Tabelle 4-3.8). Dieser Stahl wurde für Achsen und Achsschenkel entwickelt.

Kann der optimale Abkühlzyklus aus anlagentechnischen Gründen nicht eingehalten werden, kann bei einer erfolgten zu schnellen Abkühlung im Temperaturbereich 500 – 250 °C durch eine Anlassbehandlung (Tabelle 4-3.9) trotzdem das gewünschte Niveau der mechanischen Kennwerte erreicht werden. Da es sich

Tabelle 4-3.7 Mechanische Kennwerte für Schmiedestähle (typische Werte)

Stahlsorte	Werkstoffnummer	Gefüge	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
C60	1.0601	Martensit	min. 450	850	min. 14
38MnSiVS6	1.1303	Ferrit Perlit	min. 550	870	min. 25
42CrMo4	1.7225	Martensit	min. 600	1000	min. 50
18MnCr5-3mod		Bainit	min. 700	min. 1100	min. 40
38MnCr6 IH		Bainit	750	1190	25

Tabelle 4-3.8 Eigenschaften von 18MnCr5-3mod in Abhängigkeit von den Abkühlbedingungen; Abkühlung von der Austenitisierungstemperatur (Janßen 2014)

Abkühlbedingungen	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
Ruhende Luft	710	1150
Luftstrom bis 450 °C + 1 h isotherme Umwandlung	750	1280
Luftstrom bis 350 °C + 1 h isotherme Umwandlung	780	1020
Luftstrom bis 300 °C + 1 h isotherme Umwandlung	810	1130

Tabelle 4-3.9 Mechanische Kennwerte des Stahls 18MnCr5-3mod nach Anlassbehandlung (Janßen 2014)

Anlasstemperatur	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
Ohne Anlassen	685	1160
250 °C	820	1140
300 °C	860	1110
350 °C	890	1110
400 °C	870	1070

nicht um einen aufwändigen Vergütungsprozess handelt, bleibt ein Kostenvorteil gegenüber dem Vergütungsstahl erhalten. Beim Fügen von bainitischen Stählen ist aufgrund der besonderen Anforderungen an die Abkühlung einiges zu beachten. Fügeprozesse mit einer sehr hohen Temperaturbelastung sollten vermieden werden, da nach einer Austenitisierung des Gefüges der Abkühlzyklus eingehalten werden muss, um wieder ein bainitisches Gefüge zu erhalten.

Schmiedeteile, die aus bainitischen Stählen gefertigt werden, haben in der Regel eine Dauerfestigkeit, die auf dem Niveau von Vergütungsstählen liegt. In vielen Anwendungsfällen ist das Verhalten unter zyklischer Belastung sogar besser als das von Vergütungsstählen. Der Stahl 38MnCr6 IH wurde speziell für Kurbelwellen (Bild 4-3.6) entwickelt und ist für die Induktionshärtung von Laufflächen und/oder Radien geeignet.



Bild 4-3.6 Beispiel einer Kurbelwelle (Stahlsorte 42CrMo4)

Generell sollte bei allen Stahlsortengruppen berücksichtigt werden, dass die Zugabe von Schwefel zur Verbesserung der Zerspanungseigenschaften negative Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit hat. Gut ausgerüstete Unternehmen sind aufgrund der Fortschritte in der Zerspanungstechnik bereits heute in der Lage, schwefelarme Stähle zu vertretbaren Kosten und mit guter Produktivität zu verarbeiten. Auch Kurbelwellen, die häufig einen hohen Zerspannungsaufwand haben, werden bereits aus schwefelarmen Stählen hergestellt.

4-3.4 Stähle für Wellen in Hilfsaggregaten

Auch in Hilfsaggregaten – wie Wasserpumpen, Generatoren und Turboladern – sind Wellen aus Stahl verbaut. Eine interessante Anwendung sind Wasserpumpenwellen. Sehr häufig wird hier der Wälzlagerstahl 100Cr6 eingesetzt. Der typische Fertigungsweg ist:

1. Erschmelzung im Stahlwerk
2. Strangguss
3. Warmwalzen von Draht- oder Stabstahl
4. Glühen des Walzdrahts oder Stabstahls auf kugeligem Zementit
5. Ziehen
6. Fertigung der Wasserpumpenwelle.

Je nach Zerspannungsaufwand wird der Stahl 100Cr6 mit unterschiedlichen Schwefelgehalten eingesetzt.

Tabelle 4-3.10 Beispiel eines Stahls für Wasserpumpenwellen nach EN ISO 683-17 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
100Cr6	1.3505	1,0	0,25	0,35	max. 0,01	0,01	1,5

4-3.5 Stähle für zerspanend hergestellte Teile

In Automobilen ist eine Vielzahl von Teilen verbaut, die zerspanend hergestellt werden. Typische Beispiele sind Nockenwellenendstücke, Spannhülsen und Spannmutter. Grundsätzlich werden bei Stählen für zerspanend hergestellte Teile zwei Stahlsorten unterschieden: Bei Anwendungen mit höheren Festigkeitsanforderungen werden Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt, sogenannte Vergütungsautomatenstähle, eingesetzt. Für geringere Festigkeitsanforderungen verwendet man üblicherweise Weichautomatenstähle mit geringerem Kohlenstoffgehalt.

Automatenstähle werden je nach Zerspanungsanforderungen mit Elementen legiert, die zerspanungsfördernd wirken. Leider hat eine Legierung mit zerspanungsfördernden Elementen unerwünschte Nebenwirkungen. Eine Legierung mit Schwefel reduziert z.B. die Dauerfestigkeit eines Stahls. Bei Vergütungsautomatenstählen, die üblicherweise für höher belastete Teile eingesetzt werden, wirkt sich diese Eigenschaft der zerspanungsfördernden Elemente besonders negativ aus. Diese Elemente fördern einerseits den Spanbruch, was erwünscht ist. Andererseits erhöhen sie die Sprödigkeit des Stahls, was bereits im Herstellungsprozess zu Problemen führt und einen erhöhten Befall des Walzdrahts oder Stabstahls mit Oberflächenfehlern hervorrufen kann. Schwefel bildet im Stahl Sulfide, die den Spanbruch fördern. Eisensulfid wirkt sich besonders negativ auf die Warmzähigkeit von Stählen aus. Mangansulfide sind hingegen gutmütiger. Eine Legierung des Stahls mit höheren Mangangehalten verbessert also die Warmzähigkeitseigenschaften von Automatenstählen und reduziert die Rissempfindlichkeit beim Stranggießen und Warmwalzen. Elemente wie Wismut, Blei, Tellur und Selen haben nicht nur negative Auswirkungen auf die Zähigkeitseigenschaften von Stählen, sondern können auch die Gesundheit von Lebewesen schädigen. Allerdings werden diese Elemente im Stahl gebunden und bei üblichem Einsatz im Automotive-Bereich nicht freigesetzt. Trotzdem wird die Verwendung dieser Elemente schon seit Jahren immer wieder in Frage gestellt. Dies gilt besonders für Blei. Für viele Anwendungen ist die Nutzung von Stählen mit Legierung von Blei, Wismut, Tellur oder Selen nicht mehr notwendig, da sich in Westeuropa die Zerspanungstechnik erheblich weiterentwickelt hat und

Tabelle 4-3.11 Beispiele von Vergütungsautomatenstählen nach DIN EN 10083, DIN EN 10087 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%					
		C	Si	Mn	P	S	Pb
44SMn28	1.0762	0,44	0,2	1,4	max. 0,06	0,28	
C45mod	1.1191	0,45	0,2	0,8	max. 0,045	0,03	
C45Pb	1.0504	0,45	0,2	0,8	max. 0,045	0,028	0,25
C35Pb	1.0502	0,35	0,2	0,7	max. 0,045	0,1	0,25

ohne solche Stähle auskommen kann. Nichtsdestotrotz gibt es auch heute noch Anwendungen mit sehr hohen Anforderungen, die nicht ohne bleilegierte Stähle auskommen können. Bei der Stahlauswahl sollte der Fortschritt in der Zerspanungstechnik berücksichtigt werden, um die Legierung mit gesundheitsschädlichen Elementen möglichst zu vermeiden. An dieser Stelle muss noch einmal daran erinnert werden, dass durch diesen Schritt auch positive Effekte bei der Dauerfestigkeit erreicht werden und bei der ganzheitlichen Kosten/Nutzen-Betrachtung berücksichtigt werden müssen.

Ein Beispiel für den Einsatz von Vergütungsautomatenstählen ist das Nockenwellenendstück (Bild 4-3.7). Die Geometrie dieses Teils wird zerspanend hergestellt. Anschließend wird eine Vergütung durchgeführt. Sehr häufig kommt die Stahlsorte 44SMn28 zum Einsatz (Tabelle 4-3.11). Dieser Stahl enthält einen hohen Schwefelanteil, der zur Bildung von großen Sulfiden führt und die Sprödigkeit des Materials erhöht. In der Vergütung können diese beiden Eigenschaftsveränderungen zur Bildung von Rissen führen, die ein Versagen des Teils in der Montage oder im Einsatz verur-



Bild 4-3.7 Nockenwellenendstück (Stahlsorte: 44SMn28)

sachen können. Ferner ist zu berücksichtigen, dass im 44SMn28 ein Teil des Mangans durch Schwefel als MnS abgebunden ist. Dieser Anteil des Mangans steht zur Festigkeitssteigerung des Stahls nicht mehr zur Verfügung, da MnS eine geringere Festigkeit als das Grundgefüge hat. Mangansulfideinschlüsse sind also eine Schwachstelle im Gefüge. Der sulfidische Reinheitsgrad ist somit ein wichtiger Gradmesser für die Qualität eines Stahls. Der Schwefelgehalt bestimmt allerdings entscheidend den sulfidischen Reinheitsgrad des Stahls. Ein hoher Schwefelgehalt und ein guter sulfidischer Reinheitsgrad schließen sich somit gegenseitig aus. Die Stahlsorte 44SMn28 hat aufgrund des sehr hohen Schwefelgehalts von 0,28% immer einen geringen sulfidischen Reinheitsgrad. Der Herstellungsprozess kann nur die Schwefelverteilung beeinflussen. Der Haupteinfluss stammt hierbei vom Stranggussformat. Als Faustregel gilt, dass die Sulfidgröße mit dem Stranggussquerschnitt wächst. Die Streckung der Sulfide ergibt sich aus dem Umformgrad zum fertigen Produkt. Ein höherer Gesamtumformgrad in der Formgebung verursacht eine größere Streckung der Sulfide. Diese Tatsache erklärt unterschiedliche Kerbschlagarbeitswerte in Abhängigkeit von der Hauptumformrichtung bei schwefellegierten Stählen. Je niedriger der Schwefelgehalt des Stahls ist, desto weniger ist dieses Phänomen ausgeprägt.

Alternativ könnte für diesen Einsatzzweck der Stahl C45 eingesetzt werden, der einen geringeren Schwefelgehalt als der Stahl 44SMn28 hat. In der bleilegierten Variante C45Pb wird der niedrigere Schwefelgehalt mit seinen Auswirkungen auf die Zerspanbarkeit durch Blei kompensiert. Allerdings hat auch Blei, wie schon erwähnt, negative Auswirkungen auf die Zähigkeit, da es sich bevorzugt an den Korngrenzen ausscheidet. Ein weiterer bevorzugter Ort zur Bildung von Bleiausscheidungen sind die Mangansulfide. Die Störstelle Mangansulfid wird zwar durch die Verringerung des Schwefelgehalts im C45Pb im Vergleich zum 44SMn28 in ihrer Größe reduziert; allerdings führen vergesellschaftete Bleiausscheidungen wieder zu einer Vergrößerung der Störstelle. Im Falle von Vergütungsautomatenstahl spricht eine weitere Eigenschaft des Bleis gegen eine erhöhte Legierung mit diesem Element. Die Löslichkeit des Bleis im Stahl wird durch Elemente wie Kohlenstoff oder Chrom deutlich herabgesetzt. In handelsüblichen Vergütungsautomatenstählen liegt aus diesem Grund die maximale Löslichkeit des Bleis in flüssigem Stahl zwischen 0,3 und 0,4%. Wird diese Grenze überschrit-

ten, kann es zur Bildung von Bleizeilen (große Bleiausscheidungen) kommen, die im Einsatz aufgrund der niedrigen Festigkeit des Bleis zu einem Versagen des Bauteils führen können. In den letzten Jahren haben verschiedene Stahlhersteller Konzepte zur Verbesserung der Zerspanbarkeit von C45 entwickelt. Diese modifizierten C45-mod-Varianten wurden durch Mikrolegierung und/oder sekundärmetallurgische Maßnahmen in ihren Zerspanungseigenschaften optimiert. Mit angepassten Zerspanungsparametern können diese Stähle häufig eine Zerspanungsleistung wie ein Stahl 44SMn28 erreichen. Ein typisches Bauteil für die Stahlsorte C45 ist die Düsenspannmutter in Kraftstoffeinspritzsystemen (Bild 4-3.8).

Wismutlegierte Vergütungsautomatenstähle sind in den USA verbreitet und werden dort häufig als „grüner Stahl“ beworben. Diese Stähle dienen als Ersatz für bleilegierte Vergütungsautomatenstähle (C45Pb etc.). Wismut weist allerdings eine Toxizität wie Blei auf und ist ein Nebenprodukt der Bleiproduktion. Eine wirkliche Alternative zu bleilegierten Stählen sind diese Stähle also nicht. In der Herstellung sind sie zudem sehr teuer, da der Ausschuss durch Oberflächenfehler als Folge einer schlechten Strangvergießbarkeit (großer Nullzähigkeitsbereich im Heißzugversuch) sehr hoch ist. Tellurlegierte Stähle sind sowohl in Asien als auch in Europa für Spezialanwendungen im Einsatz. Auch diese Stähle sind aufgrund der schlechten Warmzähigkeitseigenschaften sehr teuer in der Herstellung. Die Preise von selenlegierten Stählen sind getrieben von den hohen Kosten in der Beschaffung von Selen. Für weniger belastete Teile mit hohem Zerspanungsaufwand werden Weichautomatenstähle eingesetzt



Bild 4-3.8 Düsenspannmutter (Stahlsorte: C45)

(Tabelle 4-3.12). Auch bei dieser Stahlsortengruppe sind zerspannungsfördernde Elemente legiert. Es handelt sich um die gleichen Elemente wie bei den Vergütungsautomatenstählen. Auch die Auswirkungen im Fertigungsprozess sind vergleichbar. Nur die Grenzwerte verschieben sich. Weichautomatenstähle haben z.B. eine höhere Löslichkeit für Blei, d.h., das Risiko für große Bleiausscheidungen ist entsprechend niedriger. Die Versprödungsneigung bei der Legierung mit Tellur verändert sich nicht stark.

Tabelle 4-3.12 Beispiele für Weichautomatenstähle nach DIN EN 10087 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%					
		C	Si	Mn	P	S	Pb
11SMn28	1.0715	0,08	0,04	1,1	max. 0,1	0,3	
11SMnPb28	1.0718	0,08	0,04	1,1	max. 0,1	0,3	0,3
11SMnPb36	1.0737	0,08	0,04	1,1	max. 0,1	0,37	0,3

4-3.6 Stähle für Lenkungsteile

4

Lenkungsteile sind in der Regel Sicherheitsteile. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Fehlerfreiheit des fertigen Lenkungssystems besonders hoch. Viele Teile in Lenkungssystemen sind kaltmassivumgeformt oder geschmiedet. Kaltstauchstähle und AFP-Stähle sind daher häufig in Lenkungssystemen zu finden (Tabelle 4-3.13).

Häufig verwendet wird der AFP-Stahl 30MnSiVS6. Dieser Stahl ist zwar sehr gut für diese Anwendung und den üblichen Fertigungsweg geeignet, trotzdem müssen einige wichtige Punkte beachtet werden, um ein fehlerfreies Endprodukt zu bekommen. Der Stahl ist beim Stranggießen und Warmwalzen extrem rissempfindlich. Das Stahlwerk muss daher die Oberflächen-

temperatur im richtigen Temperaturfeld halten und eine Stranggießanlage mit einem ausreichenden Gießradius betreiben. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Einstellung des richtigen Gefüges. Bei falscher Kühlung nach dem Drahtwalzprozess kann sich Kernmartensit bilden, der im weiteren Verarbeitungsprozess zu Kernauffreiungen (Chevrons) führen kann. Diese Kernauffreiungen können tückisch sein, wenn sie im Kaltstauchprozess nicht bis zur Oberfläche wachsen. Sie bleiben dann unentdeckt und können im Einsatz zum Bauteilversagen führen. Eine Herstellung des Werkstoffs ohne einzelne Martensitkörner im Drahtkern ist fast unmöglich. Es muss daher die Anzahl und Größe der Martensitkörner durch prozesstechnische Maßnahmen so gering wie möglich gehalten werden. Neben einer ausreichend ausgestatteten Luftkühlstrecke im Drahtwalzwerk ist die Kontrolle der Spurenelemente sehr wichtig. Elektrostahlwerken ist es aufgrund der großen Mengen von Spurenelementen im Schrott nur mit sehr großem Aufwand möglich, diese Stahlsorte für Kaltstauchanwendungen herzustellen. Auch bei der Wärmebehandlung und beim Ziehen müssen speziell an den Werkstoff angepasste Parameter benutzt werden. Etablierte Fertigungsketten in Deutschland liefern den Werkstoff schon seit Jahrzehnten qualitativ stabil.

4-3.7 Stähle für Reifeneinlegedrähte (Stahlkord)

Der Stahlgürtelreifen ist eigentlich ein Verbundwerkstoff. Das Gummi wird durch Stahllitzen und -drähte verstärkt. Diese Stahlprodukte gibt es in unterschiedlichen Durchmessern und Festigkeitsklassen. Man unterscheidet 5 Festigkeitsklassen:

1. Normale Festigkeit (NT - ca. 2700 MPa)
2. Hohe Festigkeit (HT - ca. 3200 MPa)
3. Sehr hohe Festigkeit (SHT - ca. 3400 MPa)

Tabelle 4-3.13 Beispiele von Stählen für Kugellzapfen nach DIN EN 10083, DIN EN 10267 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%							
		C	Si	Mn	Mo	Cr	S	N	V
37Cr4	1.7034	0,37	0,25	0,8		1			
41Cr4	1.7035	0,41	0,3	0,8		1			
30MnSiVS6	1.1302	0,28	0,6	1,5	max. 0,08	max. 0,3	0,04	0,015	0,15

4. Extrem hohe Festigkeit (UHT – ca. 3600 MPa)

5. Höchste Festigkeit (SUHT – ca. 4000 MPa)

Die Festigkeit wird durch den Kohlenstoffgehalt und die Kaltverformung durch Ziehen erreicht (Tabelle 4-3.14).

Tabelle 4-3.14 Beispiele von Stahlsorten für Stahlkord nach DIN EN 10083 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
C60D3	1.1228	0,6	0,2	0,5	max. 0,02	max. 0,02	
C70D3	1.1237	0,7	0,2	0,5	max. 0,02	max. 0,02	
C80D3	1.1238	0,8	0,2	0,5	max. 0,02	max. 0,02	
C90D3	1.1239	0,9	0,2	0,5	max. 0,02	max. 0,015	
C92Cr	1.1239	0,92	0,25	0,5	max. 0,02	max. 0,015	0,2

Für diese Anwendung ist eine gute Kaltverformbarkeit erforderlich, da der Stahl durch große Kaltverformung auf sehr dünne Abmessungen (z. B. 0,1 mm) gezogen wird. Da dieses Ziel nicht in einem Schritt erreicht werden kann, erfolgen nach erschöpfter Verformbarkeit in der Regel Zwischenpatentierungen. Der Walzdraht hat normalerweise ein sehr feinstreifiges perlitisches Gefüge (sorbitisches Gefüge). Dieses Gefüge wird in Drahtstraßen durch beschleunigte Abkühlung mit Hilfe von Gebläsen eingestellt. Das Gefüge muss auch über den Querschnitt homogen sein. Aus diesem Grund sind ausgeprägte Mittenseigerungen schädlich und müssen vermieden werden. Martensitkörner, die durch Seigerungen oder falsche Abkühlung entstehen können, verursachen häufig Napf- und Kegelbrüche oder Chevrons im Ziehprozess, da Verformung und Ziehgeschwindigkeit sehr hoch sind. Nicht entdeckte Chevrons können im Verseilprozess und in anderen Weiterverarbeitungsprozessen zu Brüchen führen, die

ein Verwerfen des Produkts erforderlich machen können. Auch große oxidische Einschlüsse können zu diesem Fehlerbild führen, daher ist ein guter oxidischer Reinheitsgrad erforderlich.

Da die Haftung von Gummi auf Stahl sehr schlecht ist, wird der Draht vor dem letzten Ziehschritt üblicherweise elektrolytisch mit einer Messingschicht versehen. Die dünnen Drähte werden im ersten Schritt nach dem Ziehen zu Litzen verseilt oder direkt in einer Konstruktion verarbeitet. Drähte, die für Litzen in dem Reifenwulst verarbeitet werden, sind in der Regel dicker und haben aufgrund der geringeren Kaltverformung etwas geringere Anforderungen an die Stahlqualität. Zur Reduzierung des Gewichts des Reifens geht der Trend zu höheren Festigkeiten und dünneren Drähten. Auf diese Art und Weise lässt sich auch mit Stahl eine Gewichtsreduzierung des Reifens darstellen.

Eine weitere interessante Anwendung für Seile aus Stahlkord sind elektrische Fensterheber in Automobilen. Auch für dünne Federelemente im statischen Bereich kann eine Stahlkordqualität eingesetzt werden.

4-3.8 Stähle für Stabilisatoren

Stabilisatoren im Fahrwerk werden überwiegend aus Stahlstäben oder Stahlrohren hergestellt. Walzdraht wird in der Regel auf Maß gezogen und auf Länge geschnitten. Anschließend wird der Stabilisator gebogen. Häufig wird abschließend oder vor der Herstellung des Stabilisators noch eine Vergütung durchgeführt. Es kommen verschiedene Stahlsortengruppen zum Einsatz. Neben normalen Kohlenstoffstählen werden auch AFP-Stähle und vergütbare Stähle eingesetzt (Tabelle 4-3.15).

Typische Abmessungen des Walzdrahts liegen zwischen 12 und 22 mm. Da keine große Kaltverformung aufgebracht wird, sind keine besonderen Anforderun-

Tabelle 4-3.15 Beispiele von Stählen für Stabilisatoren nach DIN EN 10132, DIN EN 10089, DIN EN 10267 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Ck67	1.1231	0,67	0,25	0,75	max. 0,015	max. 0,015	0,25	
38MnSiVS6	1.1303	0,38	0,7	1,5	max. 0,035	max. 0,025	0,15	0,15
38Mn6	1.1127	0,38	0,25	1,5	max. 0,025	max. 0,025		
55Cr3	1.7176	0,55	0,2	0,75	max. 0,025	max. 0,025	0,75	

gen an den Stahlreinheitsgrad zu beachten. Die Oberfläche ist mit der für Automobilanwendungen üblichen Qualität herzustellen. Da es sich um ein relativ großes Teil handelt, sind Gewichtseinsparungen natürlich ein wichtiges Thema. Der Einsatz von Rohren ist hier eine Möglichkeit. Es ist hierbei zu beachten, dass die Fertigung aus Rohren erheblich aufwändiger ist. Unter Kostengesichtspunkten kommen auch höherfeste Stahlsorten zum Einsatz. Interessant ist es auch, die Vergütung einzusparen und aus der Walzhitze vergütete Drähte einzusetzen.

4-3.9 Stähle für Pleuel

In Verbrennungsmotoren sind Pleuel häufig als Crackpleuel ausgeführt. Die Pleuel werden in einem Stück geschmiedet und das große Auge wird anschließend aufgebrochen. Durch diese Herstellung wird sichergestellt, dass der Pleuel nach der Montage im Motor wieder passgenau einfach zusammengesetzt werden kann. Hierbei werden Pleueldeckel und Pleuelstangen mit Hilfe einer Pleuelschraube verspannt. Stähle für diese Anwendung müssen eigentlich unvereinbare Eigenschaften haben. Neben einer hohen Zähigkeit in der Endanwendung müssen sie sich im Herstellungsprozess an einem bestimmten Punkt spröde brechen lassen. Die chemische Zusammensetzung muss daher an diese Anwendung gut angepasst werden (Tabelle 4-3.16).

4-3.10 Stähle für Einspritzsysteme in Dieselmotoren

Die erste Idee für eine Einrichtung, bei der die Kraftstoffeinspritzung unabhängig von der Stellung der Pleuellwelle erfolgen konnte, stammt aus dem Jahr 1930 (Bartsch o.J.). Eine vom Motor angetriebene Kraftstoffpumpe versorgt eine Verteilerleiste (Common-Rail), mit der die Einspritzventile über kurze Rohrleitungen verbunden sind. Die Einspritzventile werden durch Magnete geöffnet und durch die Federkraft geschlossen. Diese grundlegenden Gedanken sind das Prinzip der Common-Rail-Einspritztechnologie (Bild 4-3.9).

Die Fertigung in Großserien erfolgte im Jahr 1997. Damals lag der Einspritzdruck in dem Dieselmotor bei etwa 1300 bar. Inzwischen werden Drücke von 2200 bar in Diesel-PKW erreicht, mit dem Ziel, die Drücke auf rd. 3000 bar zu erhöhen. Bei den Motoren, die mit höheren Drücken betrieben werden, erfolgt die Steuerung des Einspritzvorgangs statt über Magnetventile über solche, die den Piezoeffekt nutzen (Bartsch o.J.). Der Einspritzvorgang erfolgt etwa viermal schneller als der Hub eines Magnetventils. Zudem wird das Injektorverhalten in Bezug auf die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Einspritzvorgangs im Vergleich zu dem Magnetventil verbessert. Durch diese Technik werden der Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen erheblich gesenkt. Die Piezoaktoren bestehen aus vielen feinsten Keramikplättchen, die einen Stapel (Stack) von einer Höhe von etwa 30 mm bilden. Die obere und untere Seite des Stacks wird mit einer hauchdünnen Schicht eines guten elektrischen Leiters als Elektrode bedrückt. Bei Anlegen einer elektrischen Spannung dehnt sich der Keramikstapel aus (Bild 4-3.10).

Der Common-Rail (Verteilerleiste) wird bis zu Drücken von rd. 2200 bar in der Regel aus dem AFP-Stahl (ausscheidungshärtender ferritisch-perlitischer Stahl) 38MnSiVS6 nach DIN EN 10267 geschmiedet und spanabhebend bearbeitet. Für höhere Drücke werden die

Tabelle 4-3.16 Beispiel eines Stahls für Pleuel nach ISO 683-12 und DIN EN 10027 (typische Werte)

Kurzname	Werkstoffnummer	Legierungsanteile in Massen-%							
		C	Si	Mn	P	Ni	Cr	S	V
C70S6	1.0603	0,71	0,2	0,6	max. 0,03	0,065	0,1	0,06	0,04

Stichwortverzeichnis

Symbole

3D-Druck *879*

A

Abgasreinigungsanlage

- Seeschiffe *822*

Abkühlbedingungen

- Additive Fertigung *881*

Abkühlung *316*

Abrichtwerkzeuge *196*

Abschrecken *287*

Abtragende Verfahren *173, 204*

Abwasserbehandlung *487*

Achsen *512, 629, 683*

Achsfeder *624*

Achsschenkel *629*

Additive Fertigung *879*

AHSS-Werkstoffe *561*

Airbag *662*

Allokationsmodell *348*

Aluminium

- als Legierungselement *71*

Anelastizität *42*

Anlassbeständigkeit *296*

Anlassen *295*

Anlauffarben *478*

Ansprunghärte *604*

Antriebsstrang

- Leichtbaupotenzial *648*

- Stähle für *624*

Antriebswellen *629*

API *726*

AREMA *668*

Atmosphärentyp *323*

Atmosphärische Korrosion *321*

Atomvolumen *36*

Aufkohlen *302*

Aufsprungkompensation *113*

Aufzugseile *384*

Aushärtung

- von Klebstoffen *268*

Ausklinken *119*

Auslassventil *689*

- Edelstahl *689*

Auslegedrehkran *405*

Auslegevorschriften

- Kranbau *405*

Auspuff-Flansche *685*

Ausscheidungen *57*

Ausschneiden *119*

Austenitisieren *287, 314*

Auswerferstifte *534*

Autofrettageprozess *659*

Automatenstähle *500*

Axiale Presstechnik *541*

B

Baggerschaufel

- nichtrostender Stahl *531*

Bainitische Stähle *629*

- Kaltmassivumformung *143*

Bainitisieren *292*

Bake Hardening *569*

Baustähle *366*

- für Fassadenelemente *400*

- Kaltmassivumformung
140

Bauteilqualität

- Bewertung *112*

Behälterbau *423*

- Stahlgüten *452*

Benzinverteilerleiste
- Pkw-Motoren 696
Beschichtung
- Leitungsrohre 769
- Stahlwasserbau 730
Beschneideoperationen 117
Betonstahl
- feuerverzinkt 416
- Kohlenstoffäquivalent 364
Bewehrungskorrosion 416
BH-Stähle 569
Biegemoment 160
Biegen
- Grundlagen 158
- hochfeste Stähle 169
Biegeumformung 157
Biegewechselfestigkeit
- Einfluss durch Legierungselemente 59
Blankstahl 96
Blasformen 791
Blechbiegen 161
Blechhalterkraft 111
Blechumformung 105
- Bewertungskriterien 110
Blockguss 87
Bodenreißer 111
Bohren 189
Bolzen
- Stahlwasserbau 729
Bolzenverbindungen 498
Bor
- als Legierungselement 72
Borieren 309
Boriermittel 311
Breiten
- beim Clinchen 224
Brennschneiden 269
Bruchbilder
- Klebverbindung 267
Bruchmechanik 611
- Druckbehälter 429
Brückenbau 397
- Spundwände 397
Brückenkran 405
Buckelschweißen 251
Bügelschlösser 874

C

Calcium-Behandlung
- Druckbehälterstahl 435
CAPCIS-Test 768
Carbonatisierung 416
Chemikalien
- Einfluss auf die Korrosion 324
Chevronrisse 133
Chirurgische Instrumente 844
Chrom
- als Legierungselement 65
Chromieren 313
Clinchen 223
- geometrische Größen 226
Common-Rail-Einspritzung 637
Compliant Tower 709
Comtest 806
Corten-Stahl 402
CP-Stähle 579
Crack Arrest Temperature
- CAT 441
Curie-Temperatur 38, 855

D

Dampfkraftwerk 801, 823
Dampfleitungen
- Stähle für 824
Dauermagnetwerkstoffe 864
DDQ-Stähle 565
De-Long-Diagramm 256
Diamagnetismus 44
Diseleinspritzleitung 658
Diffusionsglühen 283
Direktreduktion 79
DP-Stahl 575
Draht 92
Drahtfunkenerosion 216
Drahtseilbahn 385
Drahtseile 383
- Bergbau 387
- Brückenbau 385
Drehen 186
Drehrohröfen 876
Drei-Rollen-Biegen 165
Drillship 713
Druckbehälterstahl 436

Druckgussformen 787
 Dualphasenstahl 575
 Duplex-Stähle
 - Abwasserbehandlung 489
 - Chemische Industrie 481
 Durchlaufglühen 276
 Durchsetzen
 - beim Clinchen 223
 Durchsetzfügen 223
 Durchstrahlungsprüfung 100
 Düsenkörper 638
 Düsenspannmutter 638

E

E-Modul
 - Temperaturabhängigkeit 41
 EBM
 - Pulverbettverfahren 880
 ECM
 - electrochemical machining 207
 EDM
 - electro discharge machining 205
 Einachsiger Zugversuch 596
 Einlassventil 688
 Einsatzhärten 298
 Einsatzstähle
 - für Zahnräder 524
 - Kolbenbolzen 686
 Einschneiden 120
 Einspritzsystem
 - Dieselmotor 636
 Eisenbahnen
 - Achsen 683
 Eisenbahnschiene 665
 Elastische Eigenschaften, allgemein 39
 Elastische Elemente (Federn) 504
 Elastizitätsmodul 39, 40
 - Einfluss von Legierungselementen 41
 Elektrische Eigenschaften 43
 - Eisen 49
 Elektrische Leitfähigkeit 866
 Elektrochemische Bearbeitung 204, 210
 Elektrochemisches Senken 219
 Elektrolichtbogenofenroute 80
 Elektromagnetische Prüfung 100
 Elektronenstrahlhärten 292
 Elektronenstrahlschweißen 247

Elektronikbereich
 - Feinstdraht 876
 Elektroschlacke-Umschmelzverfahren
 82
 Elektrotechnik
 - Stähle für 855
 Elektrothermische Theorie 205
 Entschwefelungsanlagen 814
 Erdbau 388
 Erholungsglühen 274
 Erodierbarkeit 210
 Erosionskorrosion 326
 Exzenterwelle
 - für Motorsteuerung 694

F

Fachwerkbau
 - Stähle für 364
 FAD 429
 Fahrwerk
 - Leichtbaupotenzial 650
 - Stähle für 624
 Failure Assessment Diagram 429
 Faktendatenbanken 26
 Farbeindringprüfung 100
 FB-Stähle 574
 Federn 504
 - nichtrostend 679
 Federtechnik 507
 Feinkornbaustähle 367
 - chemische Zusammensetzung 376
 - Druckbehälter 441
 Feinschneiden 121, 785
 Feinstdraht 876
 Ferrimagnetismus 44
 Ferritisch-bainitische Stähle 574
 Ferromagnetismus 44
 Festigkeit 368
 - Baustähle 368
 - Druckbehälter 424
 - Kaltmassivumformung 138
 Festigkeitsbereiche
 - Zahnräder 523
 Festkörperlaser 245
 Feuerverzinkter Stahl 400
 Flacherzeugnisse 89
 Flammhärten 290

Fließkurven 152
 - Kaltmassivumformung 139
 Fließpress-Verfahren 131
 Fließpressen 98
 Floating Production Storage and Offloading (FPSO)
 710
 Flüssiggas-Technologie
 - Druckbehälter 446
 Flussmittel
 - beim Löten 259
 Folgeverbundfertigung 105
 Formategießen 83
 Formänderung 175
 Formänderungsgeschwindigkeit 154
 Formänderungsvermögen 130, 155
 Formguss 87
 Formpressen 150
 Fräsen 187
 Freibiegen 161
 Freiformen 149
 Freiformschmieden 97
 Freiläufe 538
 Führungselemente 507
 Führungsschienen 536
 Führungswagen 536
 Funkenerosion 204
 Funkenerosive Senkbearbeitung 213
 Furchungverschleiß 618

G

Galvanische Korrosion 325
 Gasförderung 706
 Gaslaser 245
 Gebäudehülle 399
 Gefügebestandteile
 - Einfluss auf mechanische Eigenschaften 181
 - Einfluss auf Schleifbarkeit 198
 Generatoren 631
 Geschweißte Rohre 96, 654, 655
 Gesenkbiegen 158, 162
 Gesenkformen 150
 Gesenkschmieden 97
 Getriebe
 - Leichtbaupotenzial 647
 Getriebewellen 662
 Getränkeabfüllmaschine
 - nichtrostender Stahl 485

Gießen 84
 Gitterkonstante 35
 GKZ-Glühen 279
 Gleichförmige Korrosion 325
 Gleitbruchmechanismus 428
 Gleitlager 511
 Glühen 274
 Grenzformänderung 556
 Grenzumformgrade 134, 139
 Grobbleche
 - Nutzfahrzeuge 596
 Grobkornglühen 184, 282
 Grundbau 388
 Grübchen 520
 Gründungsstrukturen 707
 GuD-Kraftwerk 802

H

Hafenausbau 736
 Halbleiterdiodenlaser 245
 Halbwarmmassivumformung 146
 Halbzeug
 - Herstellung 88
 - Qualitätskontrolle 98
 Hand in Hand-Entwicklung 657
 Härte
 - Werkzeugstähle 779
 Härten 286
 Härtespannungen 289
 Hartlöten 259
 Hartmagnetische Stähle 864
 Haspeltemperatur 317
 Haubenglühen 276
 Hauptgüteklassen 5
 Haushaltsgeräte 833
 Haushaltswaren 839
 Heizleiterlegierungen 868
 HIC
 - hydrogen induced cracking 431
 Hilfsaggregate
 - Automobilbau 631
 Hochfeste Baustähle 595
 Hochofen 78, 79
 Höchstfeste Stähle
 - Kranbau 408
 Hochtemperaturwerkstoffe 806
 Hochwarmfeste Nickellegierungen 810

Hochwasserspundwand 737
 HSLA-Stähle 572
 HSS-Stähle 561
 Hubbein für Errichterschiffe 742
 Hubketten
 – Stahlwasserbau 729
 Hubklasse
 – Kranbau 407
 Hubtor
 – Stahlwasserbau 732
 Hydraulikkolben 698
 Hydrogen Induced Cracking 767
 Hysteresekennndaten 48
 Hystereseverlust 858
 Hysteresekurve 856

I

IF-Stähle 566
 Implantate 845
 Induktionshärten 291
 Induktionsofen 80
 Informationsquellen für Stahl 13
 Initiative Massiver Leichtbau 643
 Injektoren 638
 Instandhaltung
 – Offshore 716
 Interkristalline Korrosion 325, 326
 Invar-Legierung 873

J

J-Lay-Verfahren 749
 Jack Up Platform 711
 Jacket 707
 Jagged-U-Wände 393
 Jagged-Z-Wände 393

K

Kaimauer 737
 Kaltarbeitsstähle 782
 Kaltfließpressverfahren 131
 Kaltmassivumformung 130, 144
 Kaltumformbarkeit 140
 Kaltumformstähle 606

Kaltumgeformte Langerzeugnisse 94
 Kaltverformung
 – Druckbehälterstahl 442
 Kaltwalzen
 – Bleche 92
 Kaltzähe Behälterstähle 445, 455
 Kanalbrücken 731
 Karbonitrieren 303
 Karosserieentwicklung 555
 Kerbschlagbiegeversuch 596
 Kesselbau 423, 825
 Kesselrohre
 – Kraftwerksbau 823
 Klappanker 738
 Kläranlage 488
 Klebstoffe 265
 Klebverbindungen 264
 Klemmkörperprofile 538
 Kletterkarabiner 848
 KO-Werkstoffe 856
 Kobalt
 – als Legierungselement 69
 Kofferraumdeckel
 – Federn für 627
 Kohlenstoff
 – als Legierungselement 62
 Kohlenstoffäquivalent 600
 Kolbenbolzen
 – Einsatzstähle 686
 Komet 806
 Komplexphasenstahl 579
 Kontaktkorrosion 325
 Konversionsschichten 136
 Konverterroute 78
 Kopfzugversuch 229
 Kornorientiertes Elektroblech und -band
 860
 Korrosion
 – im Erdreich 324
 – im Wasser 323
 Korrosionsarten 325
 Korrosionsbeständigkeit
 – Werkzeuge 790
 Korrosionseigenschaften
 – Leitungsrohre 766
 Korrosionserscheinungen 325
 Korrosionsschutz 564
 – Prinzipien 328
 Korrosionssystem 321

- Korrosionstemperaturen
 - kritische 821
 - Korrosivitätskategorie 323
 - Kraftstoffeinspritzsysteme
 - Federn für 626
 - Kraftwerksbau 823
 - Werkstoffe für 803
 - Kraftwerkskomponenten 806, 814
 - Kranbahnen 406
 - Kranbau 404
 - Kranseile 384
 - Kriecheigenschaft 828
 - Kriechversuch 825
 - KRT-Spundwand 739
 - Kunststoffextrusion 791
 - Kunststoffverarbeitung 789
 - Werkzeuge 789
 - Kupfer
 - als Legierungselement 68
 - Kurbelwelle 629, 631
 - Kurzlochbohren 189
- L**
- Lagerelemente 507
 - Längenänderung 35, 37
 - Längsnaht-geschweißte Rohre 752
 - Läppen 193
 - Langerzeugnisse 92
 - Langschmieden 98
 - Laschen
 - Stahlwasserbau 729
 - Laser-MSG-Hybridschweißen 246
 - Laserschmelzschnitten 271
 - Laserstrahlhärten 291
 - Laserstrahlschweißen 245
 - LCA-Ergebnisse
 - Kommunikation 353
 - LCA-Methode 345
 - Stahlsektor 347
 - Lebenszyklusanalyse 346
 - Kunden der Stahlindustrie 352
 - Stahlindustrie 351
 - Legierungen
 - von Eisen 50
 - Legierungsbildung 50
 - Legierungselemente 50
 - Einfluss auf Gefügeausbildung 182
 - Einfluss auf magnetische Eigenschaften 859
 - Einfluss auf Schleifbarkeit 199
 - Wirkung 58
 - Legierungsfaktoren 9
 - Legierungstechnik
 - Schienenstahl 671
 - Leichtbau 640
 - Automobilindustrie 640
 - Leichtbaupotenzial 644
 - Leitungsrohre 747
 - Verlegung 748
 - Lenkungsteile
 - Stähle für 634
 - LH-Stähle 585
 - Lichtbogen-Vakuum-Umschmelzverfahren 83
 - Lichtbogenschweißen 235, 238
 - Life Cycle Assessment 345
 - Linearführungssysteme 536
 - Literaturdaten 30
 - LMD
 - Laser Metal Deposition 880
 - Lochen 119
 - Lochkorrosion 325
 - Wirksumme 805
 - Lokale Korrosion 325
 - Lorenz-Konstante 39
 - Löten 233, 256
 - Lote 258
 - Lotklassen 258
 - Lotwerkstoff 258
 - Luftfahrt
 - Edelstahl für die 699
 - Lufthärtende Stähle 585
- M**
- Magnetische Eigenschaften 43
 - Eisen 43
 - Stahl 47
 - Magnetisierung 856
 - Mangan
 - als Legierungselement 64
 - Mangan-Hartstahl 531, 874
 - Martensitische Stähle 584
 - Maschinenelemente 497
 - Massivbau
 - Stähle für 363

Massivumformung
 – Automobilindustrie 640
 Maßgewalztes Rohr 654
 MC-Karbide 781
 Mechanische Eigenschaften
 – bei hohen Temperaturen 825
 Mehrfachteilefertigung 106
 Mehrstufenpressen 98
 Messer 840
 metal injection moulding 545
 Metall-Schutzgasschweißen 240
 Metallkleben 262
 Methodenkonzept 105
 Mikrobiologisch induzierte Korrosion 326
 Mikrolegierungselemente 50
 Mikrostrukturbildung
 – Additive Fertigung 881
 MIM-Werkstoffe 545
 Mindestbruchdehnung
 – Baustähle 378
 Mindeststreckgrenze
 – Baustähle 376
 Mischkristall 51
 Mobilkran 404
 Molybdän
 – als Legierungselement 68
 Motor
 – Leichtbaupotenzial 646
 Motorventile
 – Edelstahl 688
 Motorventilfeder 624
 MS-Stähle 584
 MSG-Schweißen 240
 Muldenkorrosion 325

N

Nachhaltigkeit
 – Stahlleichtbau 403
 Nachschlagewerke 30
 Nahtlose Rohre 97, 654, 752
 Nakajima-Versuche 556
 Napf-Rückwärts-Fließpressen (NRFP) 134
 Nasskorrosionswerkstoffe 814
 NDT
 – Nil ductility temperature 441
 Nicht-kornorientiertes Elektroblech und -band
 857

Nicht-metallische anorganische Überzüge 331
 Nichtmagnetisierbare Stähle 865
 Nichtrostende Federn 679
 Nichtrostende Stahlfassaden 401
 Nichtrostende Stähle 6
 – Betonstahl 414
 – Feiblech 836
 – Kaltmassivumformung 142
 – weichmagnetische Stähle 862
 Nickel
 – als Legierungselement 67
 Nickelallergie 842
 Nickelbasislegierungen 816
 – chemische Industrie 481
 Niob
 – als Legierungselement 70
 Nitrieren 304
 Nitrierstähle 698
 – für Zahnräder 527
 Nitrocarburieren 307
 NO-Elektroband 857
 Nockenwelle
 – Motorsteuerung 687
 Nockenwellenendstück 632
 Normalglühen 184, 280
 Normalisierendes Walzen
 – Druckbehälterstahl 438
 Normung
 – Stahl offshore 723
 Norsok 726
 Nutzfahrzeuge 593

O

Oberflächenbehandlung 267
 Oberflächengüte 179
 Oberflächenqualität 434
 Oberflächenvorbehandlung
 – zum Kleben 264
 Offshore-Bauten
 – Energiegewinnung 717
 Offshore-Leitungen 747
 Offshore-Normen 725
 Offshore-Plattform
 – Drahtseile 386
 Öl- und Gastransport
 – Leitungsrohre 751
 Öl-Schlussvergüten 294

Ölförderung 706
Onshore-Leitungen 748

P

Paneelprofile 399
Paramagnetismus 44
Patentieren 282
Pellini-Test 441
Penetrationsverfahren 100
Permeabilitätszahl 855
Pfannenofen 81
PH-Stähle 587
Phosphor
- als Legierungselement 64
Piezodieselinjektor 637
Plandrehen 186
Planetärerrosion 214
Planschleifen 201
Plasmaschneiden 271
Platinengeometrie 106
Pleuel 636
Polymorphie 35
Präzisionsschmieden 150
Präzisionsstahlrohre 654
PRE-Wert 820
Pressen 791
Pressendurchlaufplanung 107
Presshärten 293
Presshärtende Stähle 587
Pressschweißen 249
Primärmetallurgie 77
Profiliertes Blech 89
Pulverbettverfahren 880
Pulvermetallurgie 541
Pulvermetallurgisches Spritzgießen 545

Q

Qualitätskontrolle
- Halbzeug 98
Querkeilwalzen 148

R

R-Lay-Verfahren 749
Rakelwellen 540
Rammelemente 388
Randschichthärten 290
- von Zahnrädern 528
Rauchgasentschwefelungsanlage 814, 820
- nichtrostender Stahl 820
Rechteck-Trapez-Profile 738
Recken 149
Reckstangen 847
Reckwalzen 148
Reeling-Verfahren 764
Reifeneinlegedraht 634
Reinigung
- Abwasser 487
Reißer 110
Rekristallisationsglühen 184, 274
RH-Anlage 82
Rillenschienen
- Straßenbahn 671
Ringwalzen 98, 148
Rissauffangtemperatur 441
Robertson-Test 441
Rohr- und Profilbiegen 164
Rohr-Abhänger
- Kraftwerke 830
Rohre
- Herstellen 96
Rohrumformen 171
Rohstahlproduktion 77
Rostfreie Langprodukte
- Bauwesen 410
Rotationszugbiegen 165
Rückfederung 160
Runddrehen 186
Rundschleifen 202
Rundstahlanker 394

S

S-Lay-Verfahren 749
Sättigungsmagnetisierung 855
Sandwichbleche 89
Sauergasanwendung
- Leitungsrohre 772
Sauerstoffkonverter 79

- Schädigungsmechanismen
 - Baustähle 372
- Schälzugversuch 229
- Schadensarten
 - Zahnräder 520
- Schaeffler-Diagramm 254
- Scherschneiden 118, 784
 - Kinematik 120
 - Prozessparameter 122
 - Verfahren 119
 - Werkzeugtechnik 126
- Scherzugversuch 229
- Schiene 666
- Schienenfahrweg 665
- Schienenstahl
 - Bemessung 675
- Schiffbau 741
- Schiffshebewerke 731
- Schlammbehandlung 488
- Schlauchwehr 733
- Schleifbarkeit 198
- Schleifverfahren 194, 200
- Schleifwerkzeuge 195
- Schleusenbauwerke 731
- Schleusenkanal 738
- Schliffbild
 - beim Clinchen 228
- Schlittschuhprofile 849
- Schmelzreduktion 79
- Schmelzschnneiden 271
- Schmelzschweißen
 - Druckbehälter 451
- Schmieden
 - Fertigung 147
- Schmiedestähle 629
- Schmiedeteile 630
 - Herstellen 97
- Schmierstoffe
 - für Stahl 137
- Schneiden
 - Bleche 117
 - Qualitätskriterien 128
- Schneidwerkzeuge 784
- Schnellarbeitsstähle 784
- Schnittflächencharakteristika 124
- Schnittvorgang 174
- Schrauben 381
 - Festigkeitsklasse 501
- Schraubenstähle 627, 810
- Schraubenverbindungen 500
- Schrumpf
 - Pulvermetallurgie 548
- Schubmodul 39
- Schutzkleidung 875
- Schutzschichtmethode 335
- Schutzwesten 875
- Schwefel
 - als Legierungselement 65
- Schweiß-ZTU-Schaubilder 252
- Schweißbarkeit 234
 - Baustähle 374
 - Druckbehälterstahl 444
 - Nutzfahrzeuge 598
 - Schienenstahl 670
- Schweißen 233, 253
 - rostfreie Stähle 254
 - unlegierte, hoch- und höherfeste Stähle 253
- Schweißparameter 253
- Schweißprozesse
 - Leitungsrohre 750
- Schweißqualifikation
 - Offshore-Bereich 727
- Schweißverhalten
 - Leitungsrohre 765
- Schweißzusätze 256
- Schwerkraftgründungen 708
- Schwingungsrissskorrosion 326
- Segregation
 - Einfluss durch Legierungselemente 61
- Sekundärmetallurgie 81
- Sekundärrekristallisation 862
- Selektive Korrosion 326
- Semi-submersible Platforms 713
- Senkerosion 216
- Serienprozess
 - Bewertung 116
- Servo-Hydraulik
 - Nitrierstähle 698
- Silicium
 - als Legierungselement 63
- Simulationssysteme
 - Werkstoffeigenschaften 28
- Sinterbauteile 542, 543
- Skelettbau
 - Stähle für 364
- Skikanten 848
- SLM
 - Pulverbettverfahren 880

- Snoek-Effekt 43
 - Softreduktion 436
 - Spaltbruchmechanismus 428
 - Spaltkorrosion
 - Wirksumme 805
 - Spanen 173
 - Spanform 180
 - Spannungsarmglühen 274
 - Druckbehälterstahl 439
 - Spannungsrissskorrosion 326
 - Kraftwerkstechnik 805
 - Spar Plattform 710
 - Spiralbohrer
 - Additive Fertigung 883
 - Spiralnaht-geschweißte Rohre 752
 - Spontane Magnetisierung
 - Eisen 45
 - Sprengplattieren 484
 - Spritzgießen 791
 - Sprödbbruchverhalten 596
 - Spundbohlen 389
 - Spundwandkonstruktionen 390
 - Spurenelemente 73
 - Auswirkungen 74
 - SSC-Beständigkeit 768
 - Stabelektrodenschweißen 238
 - Stabstahl 92
 - Stahl
 - Anforderungen offshore 721
 - Eisenbahnschiene 669
 - Zusatzsymbole 7
 - Stahl-Eisen-Blätter 19
 - Stahl-Sandwichelemente 399
 - Stahlbeton 363, 364
 - Stahlbrücken
 - feuerverzinkt 418
 - StahlDat SX 18
 - Stähle 329
 - additive Fertigung 883
 - chemische Zusammensetzung 8
 - Eigenschaften 35
 - für Kaltmassivumformung 138
 - für nahtlose Rohre 772
 - Hauptgüteklassen 5
 - Hauptsymbole 7
 - längsnahtgeschweißte Rohre 770
 - Systematik 5
 - Verwendungszweck 7
 - Werkstoffnummern 9
 - Stahlgüten
 - Kranbau 407
 - Nutzfahrzeugbau 620
 - Stahlkord 634
 - Stahlschlüssel 22
 - Stahlsplundwände 388, 391
 - Stahlverbundbrücken
 - feuerverzinkt 418
 - Stahlwasserbau 324
 - Stahlwasserbauverschlüsse 729, 731
 - Stahlwerksmetallurgie 602
 - Stahlwissen NaviMAT 24
 - Stahlzugelemente 393
 - Stanzwerkzeuge 784
 - Stapelfaktor 857
 - Stapelfehlerenergie 153
 - Stauchern 132
 - beim Clinchen 223
 - Steel University 32
 - Stemmtorflügel
 - Stahlwasserbau 731
 - Stichschutzbekleidung 875
 - Stickstoff
 - als Legierungselement 72
 - Stiftverbindungen 498
 - Stirnfräsen 188
 - Strahlschweißen 243
 - Stranggießen 84
 - Stranggussformate 86
 - Strangpressen 791
 - Straßenbahn
 - Rillenschienen 671
 - Streckbiegen 169
 - Streckziehen 109
 - Streichen
 - von Papier 540
 - Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking 767
 - Stufenfertigung 105
 - Sublimierschneiden 271
 - Sulfide Stress Cracking 767
 - Sulfidische Einschlüsse 182
 - Systemraumerweiterung 348
- T**
- $t_{8/5}$ -Zeit 599
 - Tension Leg Platform 709

Textilien
 – Einlage 876
 Thermische Eigenschaften 35
 Thermisches Trennen 269
 Thermochemische Behandlung 297
 Thermomechanische Behandlung 313
 Thyssen-Niederrhein-Verfahren 435
 Tiefbau
 – Spundwände 396
 Tieflochbohren 190
 Tiefziehen 108
 Titan
 – als Legierungselement 71
 TN-Verfahren 435
 Tragfähigkeitsrechnung
 – Zahnräder 518
 Transferfertigung 106
 TRansformation-Induced Plasticity 581
 Transkristalline Korrosion 325, 326
 Transmissionsfedern 626
 Transport
 – Offshore 715
 Trapezprofile 399
 Treibhauspotenzial 350
 Trennen
 – thermisches 269
 Tribologie 136
 TRIP-Stähle 581
 Tryout
 – Bewertung 115
 Turbolader 631
 TWinning Induced Plasticity 589
 TWIP-Stähle 589

U

Überhitzerrohre 824
 Überlappung
 – beim Kleben 268
 ULSAB-Systematik 559
 Ultraschallprüfung 99
 Umfangsfräsen 188
 Umformgrad 159
 Umformlose Herstellung
 – Additive Fertigung 881
 Umformung 314
 Ummagnetisierungsverlust 855
 Umschmelzverfahren 82

Umweltschutz
 – Spundwände 396
 Unlegierte Baustähle 366
 Unlegierte Behälterstähle 440
 Unlegierte Stähle 6, 8, 329
 Unterpulverschweißen 241
 UP-Schweißen 241

V

Vanadium
 – als Legierungselement 71
 VDEh Stahl-Akademie 32
 Ventulfeder 624
 Verankerungen
 – Wasserbau 394
 Verbindungselemente 498, 627
 – Stähle für 381
 Verbundbau
 – Stähle für 380
 Verfestigung
 – Baustähle 371
 – Druckbehälterstähle 425
 Vergüten 184, 605
 Vergütungsautomatenstähle 632
 Vergütungsstähle
 – für Zahnräder 529
 – Kaltmassivumformung 142
 Verkehrswegebau
 – Spundwände 396
 Versauerungspotenzial 350
 Verschleißbeständigkeit
 – Werkzeugstähle 781
 Verschleißformen 177
 Verschleißverhalten 617
 Verschleißwiderstand
 – Härte 60
 Verschlusskörper
 – Stahlwasserbau 731
 Verteilerleiste Common-Rail 696
 Vierpunktbiegeprüfung 768
 Vignolschienen
 – Eisenbahn 671
 Virtuelle Bewertung 110
 Voll-Quer-Fließpressen (QFP) 135
 Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP) 133
 Vollbohren 189
 Volumenänderung 35, 37

Vorgelegewelle
 - Fahrzeuggetriebe 691, 693

W

Wälzlager 507, 532
 Wälzlagerstähle 510
 Wärmeausdehnung
 - Stähle 872
 Wärmeausdehnungskoeffizient 36, 872
 - austenitische Stähle 38
 - ferritische Stähle 38
 Wärmebehandlung 272
 - Einfluss auf Gefüge 184
 - Einfluss des C-Gehaltes 60
 - Schienenstahl 672
 Wärmebehandlungsstrategien 143
 Wärmeleitfähigkeit 38
 Walzdraht 92
 Walzen 147, 788
 Walzprofilieren 158, 162
 Warmarbeitsstähle 783
 Warmfeste Stähle 808
 Warmmassivumformung 146
 Warmumformbarkeit
 - Stähle 152
 Warmumformtemperatur
 - Druckbehälterstahl 444
 Warmumformung 613, 792
 Warmwalzen
 - Bleche und Bänder 91
 Wasserbau 396
 Wasserpumpe 631
 Wasserstoffarmglühen 286
 Wasserstoffinduzierte Korrosion 326
 Wasserstoffinduzierte Rissbildung 431
 Wasserstoffversprödung 326
 Wasservergütete Baustähle 609
 Wasservergütung
 - Druckbehälterstahl 439
 Wechselfestigkeit
 - Kraftwerkstechnik 803
 Wehrverschluss
 - Stahlwasserbau 729
 Weichautomatenstähle 634
 Weichglühen 184, 279
 Weichmagnetische Stähle 855
 Weiße Schicht 185

Welle-Nabe-Verbindungen 513
 Wellen 512, 662
 Wellenstähle 809
 Wellman-Lord-Verfahren 814
 Wellprofile 399
 Werkstoffauswahl 16
 Werkstoffdatenbank 15, 17
 Werkstoffinformationssystem 15
 Werkzeugstähle 779
 Werkzeugverschleiß 177
 Wetterfeste Baustähle 367
 Widerstandsschweißen 249, 251
 Wiedemann-Franz-Lorenz-Gesetz 39
 WIG-Lichtbogen 235
 WIG-Schweißen 236
 Wirbelstromverluste 858
 Wirksumme 803
 Wirkungsabschätzung 345
 Wirkungsgrad, Steigerung
 - Kraftwerke 818
 Wissenspyramide 13
 Wöhler-Diagramm 372
 Wolfram
 - als Legierungselement 70
 Wolfram-Inertgasschweißen 236

Z

Z-Profile 739
 Zähigkeit
 - Baustähle 369, 379
 - Druckbehälterstahl 427
 - Werkzeugstähle 780
 Zahnfußbruch 520
 Zahnräder 517
 - Festigkeitsbereiche 523
 - Werkstoffauswahl 517
 Zahnradstähle 522
 Zahnstangen 681
 Zeitstandversuch 826
 Zementketten 877
 Zerspanbarkeit
 - Einfluss durch Legierungselemente 61
 - Stähle 177
 Zerspankraft 178
 Zerspannung
 - mit geometrisch bestimmter Schneide 173
 - mit geometrisch unbestimmter Schneide 192

Zerspanungswerkzeuge 794

Zerteilen 118

ZMB-Halle 365

Zugfestigkeit

- Baustähle 377

- Beeinflussung durch Legierungselemente
59

Zustandsschaubild

- Eisen-Kohlenstoff 55

- Eisen-Legierungen 52

Zwischenüberhitzerrohre 824

Zyklische Beanspruchung

- Baustähle 371

Zylinderkopfschraube 628