

Thomas Böhme

Grundwissen Maschinenkunde

für das Ingenieurstudium und die Berufspraxis



HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Aufgrund der komplexen Strukturen der vorliegenden Inhalte, war es dem Verlag mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht möglich, den Inhalt in barrierefreier Form zur Verfügung zu stellen.

Sollten Sie Bedarf an den Inhalten in barrierefreier Form haben, wenden Sie sich bitte an den Verlag.

Böhme
Grundwissen Maschinenkunde



bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Thomas Böhme

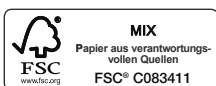
Grundwissen Maschinenkunde

für das Ingenieurstudium und die Berufspraxis

HANSER

Über den Autor:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Böhme ist Professor für maschinenbauliche Grundlagen an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE).



Print-ISBN: 978-3-446-48027-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-48114-5

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

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

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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © gettyimages.de/pengyou91, Sergii Zhmurchak, elgol, themorningstudio

Satz: Thomas Böhme

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

1	Vorbemerkungen zur Maschinenkunde	1
1.1	Bauteil, Baugruppe, Auslegung und Dimensionierung.....	1
1.2	Produktentwicklung im industriellen Umfeld	3
1.2.1	APQP-Prozess: Ablauf and Akteure	3
1.2.1.1	Angebotsphase	6
1.2.1.2	Entwicklungs- und Validierungsphase.....	8
1.2.1.3	Auftragsphase	11
1.2.2	GANTT-Chart und FMEA.....	12
1.2.2.1	GANTT-Chart.....	12
1.2.2.2	FMEA	13
1.2.3	Kostengerechtes Konstruieren (Design to Cost)	18
	Literatur	21
2	Werkstoffkundliche Grundlagen von Stahl und Eisen	23
2.1	Was ist Stahl und wie wird er hergestellt.....	24
2.2	Mikrostrukturen im Stahl	32
2.2.1	Atome und Gitterstrukturen	32
2.2.1.1	Reinstoffe, z.B. Eisen	33
2.2.1.2	Stoffgemische, z.B. Stahl	33
2.2.1.3	Chemische Verbindungen, z.B. Zementit Fe_3C	34
2.2.2	Erstarrung und Gefüge	35
2.2.3	Eisen-Kohlenstoff- und (isothermes) Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm	37
2.2.4	Legierungselemente	40
2.3	Eisengusswerkstoffe	41
2.4	Mechanische Materialkennwerte.....	43
2.4.1	Generelle Vorgehensweise bei der Dimensionierung von Bauteilen.....	43
2.4.2	Der (eindimensionale) Zugversuch.....	46

2.5	Normgerechte Bezeichnung von Stahl.....	51
2.5.1	Bezeichnungsschema nach DIN EN 10027	51
2.5.1.1	(A) Verwendung und mechanischen Eigenschaften.....	52
2.5.1.2	(B) Chemische Zusammensetzung	53
2.5.1.3	Werkstoffnummer	54
2.5.2	Weitere verbreitete Stahlbezeichnungen	54
2.6	Festigkeitsklassen von Schrauben und Muttern.....	57
	Literatur	58
3	Zeichnerische Darstellung von Maschinenelementen	61
3.1	Elemente Technischer Zeichnungen.....	63
3.1.1	Rahmen und Koordinatenraster	64
3.1.2	Schriftfeld bzw. Zeichnungskopf.....	65
3.1.3	Bauteilliste bzw. Stückliste	66
3.1.4	Zeichnungsänderungen.....	67
3.1.5	Produktansichten	67
3.1.5.1	Projektionsmethoden	68
3.1.5.2	Schnitt- und Detailansichten	69
3.1.6	Bemaßung und Toleranzen	71
3.1.7	Weitere Textbausteine	75
3.2	Weitere Symbole und Angaben	76
3.2.1	Oberflächen	76
3.2.2	Gewinde	78
3.2.3	Maßstab	79
3.2.4	Werkstückkanten	80
	Literatur	83
4	Grundlagen der Technischen Mechanik	87
4.1	Wichtige mechanische Größen der Maschinenkunde.....	88
4.1.1	Kraft und (Dreh-)Moment	88
4.1.2	Arbeit und Leistung	90
4.1.3	Spannung, Druck und Dehnung	92
4.2	Kraftzerlegung, Kräftegleichgewicht	95
4.3	Momentengleichgewicht	99
4.4	Freiheitsgrade, Freischnitt, Lager- und Schnittkräfte	102
4.5	Normalspannungen	111
4.5.1	Zug und Druck.....	112
4.5.2	Biegung.....	113
4.6	Tangentialspannungen	120

4.6.1	Scherung (Schub)	120
4.6.2	Torsion	123
4.7	Sicherheit und Vergleichsspannung	128
4.8	Reibung	134
4.8.1	Haft- und Gleitreibung	137
4.8.1.1	Waagerechte Ebene	137
4.8.1.2	Geneigte Ebene	139
4.8.1.3	Zapfenreibung	141
4.8.1.4	Seilreibung (Umschlingsreibung)	146
4.8.2	Rollreibung	148
Literatur		150
5	Federn	153
5.1	Federsteifigkeit	156
5.1.1	Federsteifigkeit: Zug- bzw. Druckstab	157
5.1.2	Federsteifigkeit: Torsionsstab	158
5.1.3	Federsteifigkeit: Biegestab	160
5.2	Mehrere Federn	162
5.3	Federungsarbeit und Dämpfungshysterese	167
5.4	Dimensionierung ausgewählter Federbauformen	169
5.4.1	Zugstabfeder	169
5.4.2	Drehstabfeder (Torsionsstab)	171
5.4.3	Schraubenfeder	173
5.4.4	Gummifedern	179
Literatur		186
6	Achsen und Wellen	187
6.1	Definitionen, Beispiele, Funktionen und Bauformen	187
6.2	Lagerung von Achsen	192
6.3	Lagerung von Wellen	194
6.4	Wellen- und Achszapfen	198
6.5	Zeitlich veränderliche Lasten und Dauerfestigkeit	202
6.5.1	Wöhler-Diagramm	204
6.5.2	Smith-Diagramm	207
6.6	Gestaltfestigkeit	210
6.7	Sicherheiten bzgl. Dauerfestigkeit	215
6.8	Gelenkwellen	218
6.8.1	Kreuzgelenkwellen	219
6.8.2	Gleichlaufgelenkwellen	223
Literatur		225

7	Verbindungselemente und -techniken	227
7.1	Nietverbindungen	229
7.1.1	Nietarten und -verfahren	230
7.1.2	Kaltnietverbindung: Dimensionierung eines Einzelniets	233
7.1.2.1	Schubbelastung durch Querkräfte	233
7.1.2.2	Lochleibungsdruck	235
7.1.2.3	Sicherheiten	237
7.1.3	Kaltnietverbindung: mehrere Nieten	237
7.2	Stifte und Bolzen	242
7.2.1	Funktionen und Bauformen	242
7.2.2	Festigkeitsberechnung von Bolzen und Gelenkstiften	248
7.2.2.1	A. Lochleibungsdruck	248
7.2.2.2	B. Schubspannungen	249
7.2.2.3	C. Biegespannungen	249
7.2.3	Querkraftbelastung von Steckstiften	249
7.2.3.1	A. Schub und Biegung	250
7.2.3.2	B. Flächenpressung	250
7.3	Schweißverbindungen	253
7.3.1	Definition, Merkmale, Schweißarten	254
7.3.2	Normung	256
7.3.3	Schweißverfahren	257
7.3.4	Schweißbarkeit	262
7.3.5	Nahtgeometrien und zeichnerische Darstellung	262
7.3.6	Gestaltungsregeln und mögliche Schweißfehler	267
7.3.7	Festigkeitsberechnungen an Schweißverbindungen	270
7.3.7.1	Zug- / Druckbelastungen	272
7.3.7.2	Schubbelastung	274
7.3.7.3	Biegung	274
7.3.7.4	Torsion	278
7.3.7.5	Kombination mehrerer Belastungsfälle: Spannungsaddition und Vergleichsspannung	279
7.4	Schraubverbindungen	283
7.4.1	Vorbemerkungen zum Schraubenbegriff	283
7.4.2	Schraubengeometrie, Gewindearten, Bauformen von Schrauben und Muttern	285
7.4.3	Zusammenhang zwischen Drehung und axialer Verschiebung im Gewinde	291
7.4.4	Kräfte und Momente beim Anziehen und Lösen einer Schraube	292

7.4.5	Festigkeitsberechnung von Schraubverbindungen	300
7.4.5.1	Spannungen bei der Montage und Verspannungsdiagramm...	300
7.4.5.2	Betriebslasten: Querkräfte	303
7.4.5.3	Betriebslasten: Längskräfte	305
7.4.6	Konstruktive Hinweise zur Schraubverbindung	307
Literatur		315
8	Welle-Nabe-Verbindungen	321
8.1	Stoffschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	323
8.1.1	Geklebte Verbindungen	323
8.1.2	Geschweißte Verbindungen	325
8.2	Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	327
8.2.1	Passfeder	327
8.2.2	Keilwelle	329
8.3	Kraft- bzw. reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	333
8.3.1	Klemmverbände	333
8.3.1.1	Axialer Klemmverband	333
8.3.1.2	Radialer Klemmverband	338
8.3.2	Spannverbände	346
8.3.2.1	Beispiel: Spannelemente	347
8.3.2.2	Beispiel: Sternscheiben	356
8.3.3	Zylindrische Pressverbände	358
8.3.3.1	ISO-Toleranzsystem (DIN EN ISO 286)	359
8.3.3.2	Passungen, Passungsarten, Passsysteme	366
8.3.3.3	Dimensionierung des zylindrischen Pressverbandes	369
Literatur		383
9	Führungen und Lagerungen	385
9.1	Linearführungen	386
9.2	Wellenlagerungen	390
9.2.1	Gleitlager	391
9.2.2	Wälzlager	396
9.2.2.1	Wirkprinzip, Aufbau, Einteilung	396
9.2.2.2	Typische Bauformen	401
9.2.2.3	Lagerabdichtung, -anordnung und -fixierung	405
9.2.2.4	Dimensionierung von Wälzlagern	407
9.2.2.5	Grenzdrehzahl, Schmierung, Lagerauswahl	420
9.3	Elastomerlager zur Schwingungsreduktion	425
9.3.1	Allgemeines zur Lagerung von Kabinen, Motoren und Maschinen	425

9.3.2	Physikalische Beschreibung von Schwingungen	428
9.3.2.1	Ungedämpfte, freie Schwingung	429
9.3.2.2	Ungedämpfte, erzwungene Schwingung (Kraftanregung): Vergrößerungsfunktion, Resonanz, Isolationsgrad	432
9.3.2.3	Gedämpfte Schwingungen	437
Literatur		444
10	Kupplungen und Bremsen	445
10.1	Kupplungen: Definition, Funktion, Wirkprinzip, Einteilung	445
10.2	Bauformen von Kupplungen	451
10.2.1	Nichtsichtbare, starre Kupplungen	451
10.2.2	Nichtsichtbare Ausgleichkupplungen	453
10.2.3	Sichtbare, fremdbetätigte Kupplungen	458
10.2.4	Sichtbare, selbstbetätigte Kupplungen	463
10.3	Kinetische Größen im Antriebsstrang	466
10.3.1	Analogien zwischen Translation und Rotation, Massenträgheitsmoment	466
10.3.2	Drehmomente und effektives Massenträgheitsmoment	470
10.3.3	Kupplungsmoment	473
10.4	Dimensionierung von Kupplungen	478
10.4.1	Statische und dynamische Auslegung drehelastischer Kupplungen nach DIN 740-2	478
10.4.2	Übertragbares Kupplungsmoment und Schaltarbeit bei kraftschlüssigen Schaltkupplungen	488
10.5	Bremsen	492
10.5.1	Funktion und Wirkprinzip	492
10.5.2	Klassifizierung von Bremsen	494
10.5.3	Ausgewählte Bauformen von Reibbremsen	496
10.5.4	Bremsmoment, -zeit und -arbeit	500
Literatur		502
Stichwortverzeichnis		505

Vorwort

*In dankbarer Erinnerung an:
W. Frömmel (1935-2022) und D. Frömmel (1935-2024).*

Dieses Buch basiert auf der Veranstaltung *Maschinenkunde I und II*, die ich seit nunmehr drei Jahren für Studierende im Studienfach *Holzingenieurwesen* der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNE) in Eberswalde durchführe.

Bei der ursprünglichen Erarbeitung der Inhalte der Lehrveranstaltung fiel auf, dass zur Thematik *Maschinenelemente* verschiedene, umfangreiche Lehrbücher existieren, die sich vor allem an Studierende der Fachrichtung Maschinenbau richten. Lehrbücher, die in gekürzter, kompakter Form die Grundlagen der Maschinenelemente darstellen, insbesondere für Studierende technischer Fächer jenseits des Maschinenbaus, sind dagegen weniger stark vertreten. Diesem Umstand soll dieses Buch Rechnung tragen, wobei bewusst – auch in Abgrenzung an die oben erwähnten, ausführlichen Bücher – der Titel *Maschinenkunde* gewählt wurde. Damit richtet sich das Buch an Studierende technischer Fachrichtungen, z.B. Wirtschaftsingenieurwesen, Verfahrenstechnik, Mechatronik oder Holztechnik, die mit grundlegenden Elementen des Maschinenbaus vertraut sein müssen, jedoch nicht die Tiefe und Details eines voll umfänglichen Maschinenbaustudiums benötigen. Darüber hinaus eignet sich das Buch auch als Nachschlagewerk im Berufsalltag von Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen.

Das Buch fokussiert sich auf den Aufbau, die Funktion- und Wirkungsweise sowie die Berechnungsgrundlagen zur Dimensionierung und Gestaltung wesentlicher Maschinenelemente. Dabei wird auf eine konsistente und verständliche Herleitung der für die Berechnung notwendigen Gleichungen Wert gelegt. Außerdem werden Aspekte des Projekt- und Qualitätsmanagements als auch der metallischen Werkstoffkunde behandelt, die oftmals im Rahmen von Entwicklungsprojekten mit berücksichtigt werden müssen.

Ziel des Buches ist es, die Leserinnen und Leser zu befähigen, auf Augenhöhe mit Maschinenbauspezialisten zu kommunizieren, Entwicklungsprojekte zu koordinieren, technische Dokumente inhaltlich zu durchdringen sowie Maschinen und deren Komponenten in ihrer Funktionsweise zu verstehen, normgerecht zu gestalten und zu berechnen.

Selbstverständlich habe ich bei der Erstellung des Buches Unterstützung erfahren. Mein besonderer Dank gilt Frau *Anneke Brüns* sowie Herrn *Richard Heinrichs*, die beide einen

Großteil der Bilder und Illustrationen erstellt und bei der Korrektur des Manuskriptes tatkräftig unterstützt haben. Außerdem danke ich dem Hanser-Verlag, und insbesondere Frau *Natalia Silakova* sowie Frau *Christina Kubiak*, für die stets freundliche Kommunikation und die Bereitschaft, meine Vorlesungsnotizen in Form eines Buches zu publizieren.

Leider bleibt es nicht aus, dass sich – trotz aller Sorgfalt – Fehler im Buch einschleichen. Für Hinweise, Anmerkungen und Kritiken bin ich stets dankbar. Vielen Dank.

Thomas Böhme

im Frühjahr 2025

1

Vorbemerkungen zur Maschinenkunde



Lernziele:

- Was ist ein Bauteil bzw. eine Baugruppe?
- Was versteht man unter Auslegung und Dimensionierung?
- Wie ist die Entwicklung von Produkten im Unternehmen organisiert? Welche Akteure sind beteiligt; welche Rolle spielt die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung?
- Was versteht man unter *Advanced Product Quality Planning (APQP)*?
- Was sind Lasten- und Pflichtenhefte bzw. Spezifikationen und wozu sind sie notwendig?
- Was ist ein Erstmusterprüfbericht (EMPB)? Wozu dient er?
- Welche Rolle spielen Geheimhaltungsvereinbarung, FMEAs und GANTT-Charts?
- Was versteht man unter kostengerechtem Konstruieren?

■ 1.1 Bauteil, Baugruppe, Auslegung und Dimensionierung

Anlagen, Maschinen und Apparate setzen sich aus verschiedenen Elementen zusammen. Dabei bilden unterschiedliche, funktional zusammengehörende **Elemente/Bauteile** eine **Baugruppe**, die wiederum in Summe die Maschine abbilden. [Bild 1.1](#) zeigt hierzu verschiedene Beispiele. Betrachtet man exemplarisch das abgebildete Schneckengetriebe, so können z.B. die Elemente Welle (2x), Schneckenrad, Stirnrad und Kurbelrad identifiziert werden. Hierbei ist das Schnecken- und Kurbelrad so auf der horizontalen Welle montiert, dass eine schlupffreie, das heißt ohne Durchrutschen, Momentenübertragung möglich ist. Gleiches gilt für das Stirnrad auf der vertikalen Welle. Diese fünf Elemente können als eine Baugruppe aufgefasst werden, die im Rahmen des Rührwerks verbaut ist und zusammen mit weiteren Elementen/Baugruppen die Maschine darstellt.

Das Fach *Maschinenkunde* behandelt zum einen Aspekte des Faches *Maschinenelemente*, d.h. **(a)** den Aufbau, die Funktionen und die Wirkungsweise unterschiedlicher maschinenbaulicher Elemente und Baugruppen, **(b)** die normgerechte Gestaltung sowie **(c)** die Be-

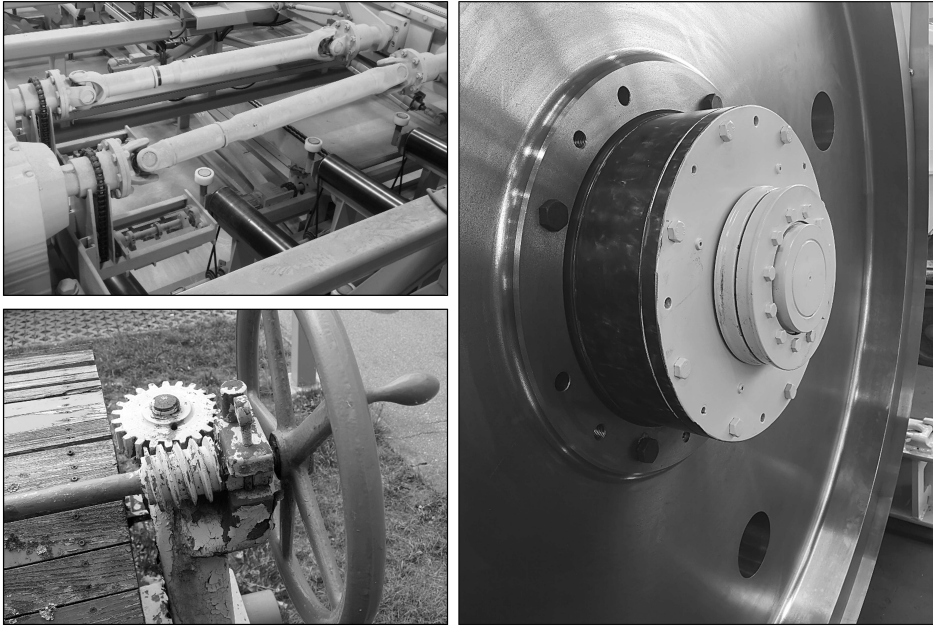


Bild 1.1 Beispiele für Maschinenelemente und Baugruppen: Gelenkwellen im Antriebstrang einer Förderanlage (links oben), Schneckengetriebe in einem historischen Rührwerk (links unten), Spannsatz zur Verbindung der Blattrolle mit der Antriebswelle in einer Bandsäge (rechts)

rechnungsgrundlagen zur **Auslegung** und **Dimensionierung** von Bauteilen. Zum anderen kommen auch Themen zur Sprache, die ebenfalls zum Ingenieuralltag gehören und über den Erfolg eines Entwicklungsprojektes entscheiden können, z.B. **(d)** Aspekte des Projekt- und Qualitätsmanagements oder **(e)** der metallischen Werkstoffkunde.



Begriffe (*Auslegung* und *Dimensionierung*):

Obwohl beide Begriffe oftmals gleichbedeutend verwendet werden, gibt es im strengen Sinne einen Unterschied:

Auslegung: Festlegung von Gestalt und Form von Bauteilen, damit diese ihren festgelegten Zweck erfüllen. Auch die Definition technische Betriebsparameter zur Erfüllung von Leistungsanforderungen an eine Maschine zählt zur Auslegung.

Beispiel: Festlegung der Mindestleistung einer Antriebsmaschine einer Hubvorrichtung (z.B. Kran), damit eine vorgegebene Hubgeschwindigkeit oder eine definierte Mindesthublast realisiert wird.

Dimensionierung: Definition der Maße eines Bauteils, damit es den zu erwartenden Belastungen genügt und nicht vorzeitig ausfällt, d.h. die geforderte Lebensdauer erfüllt. Die Auswahl geeigneter Werkstoffe ist oft von den Maßen abhängig und zählt damit auch zur Dimensionierung.

Beispiel: Definition des Durchmessers des Drahtseils der o.g. Hubvorrichtung, damit dieses der Maximal-Hublast standhält.

Im Laufe des Buches sollen die o.g. Themen **(a)** bis **(e)** diskutiert und erörtert werden. Dabei werden u.a. wesentliche Maschinenelemente vorgestellt und unter den o.g. Aspekten **(a)** bis **(c)** betrachtet. Gleichwohl können nicht alle Facetten und Details behandelt werden; hierzu soll auf die weiterführenden, z.T. sehr ausführlichen Standardwerke des Maschinenbaus verwiesen werden [Grote, 2012, Decker und Kabus, 2011, Wittel et al., 2021].

■ 1.2 Produktentwicklung im industriellen Umfeld

Kenntnisse von Maschinenelementen werden vor allem in den Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen von Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus benötigt. Dabei stellt sich die Frage, wie der Prozess einer technischen Produktentwicklung, von der Kundenanfrage bis zur Serienproduktion, abläuft und welche Akteure beteiligt sind.

1.2.1 APQP-Prozess: Ablauf and Akteure

Zur Darstellung der Chronologie der Produktentwicklung soll an dieser Stelle eine konkrete Anwendung betrachtet werden. Der **Kunde** soll ein Hersteller von Radladern sein, der selbstverständlich nicht alle Komponenten selbst fertigt, sondern verschiedene Bauteile und Baugruppen zukaft. Exemplarisch soll angenommen werden, dass z.B. die in [Bild 1.2](#) illustrierten Motorlagerungen von einem externen **Lieferanten** bezogen werden. Diese sind notwendig, damit die vom Motor ausgehenden Schwingungen nicht über den Rahmen in die Kabine und damit auf den Fahrer übertragen werden. Dazu wird der Motor mithilfe von Gummielementen, hier sog. Konuslagern¹, flexibel auf dem Rahmen montiert. Damit kann sich der Motor relativ zum Rahmen bewegen und somit im begrenzten Umfang frei schwingen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von **elastischer Entkopplung**, was insbesondere für den Fahrkomfort und den Arbeitsschutz von hoher Relevanz ist. In [Kapitel 9](#) wird vertieft auf diese Thematik eingegangen.

Es ist leicht einzusehen, dass der Radladerhersteller (Kunde) ein hohes Interesse an zuverlässigen Lieferanten hat. Nur wenn die Motorlager zuverlässig, das heißt in konstanter Qualität und zum vereinbarten Datum, geliefert werden, kann eine störungsfreie Montage der Radlader und eine fristgerechte Auslieferung an den Endkunden gewährleistet werden. Zuverlässige Lieferanten sind daher für jede Firma von entscheidender Bedeutung, um den eigenen Unternehmenserfolg langfristig zu sichern.

Aber woher wissen Kunden, ob potentielle Lieferanten zuverlässig sind? Ein Indiz für Zuverlässigkeit ist, wie Unternehmen intern organisiert sind. Existieren z.B. eindeutig definierte Hierarchieebenen und Verantwortlichkeiten. Sind alle anfallenden Aufgaben klar zugeordnet? Sind die Arbeitsabläufe (Prozesse) festgelegt und praktikabel, um den unterschiedlichen Aufgaben gerecht zu werden? In diesem Zusammenhang hat sich

¹ Vgl. [Bild 1.2](#) (oben rechts): Der innere Metallkern und der äußere Metallflansch haben eine konusförmige Außen- bzw. Innenkontur. Zwischen den beiden Metallteilen befindet sich der Gummi.

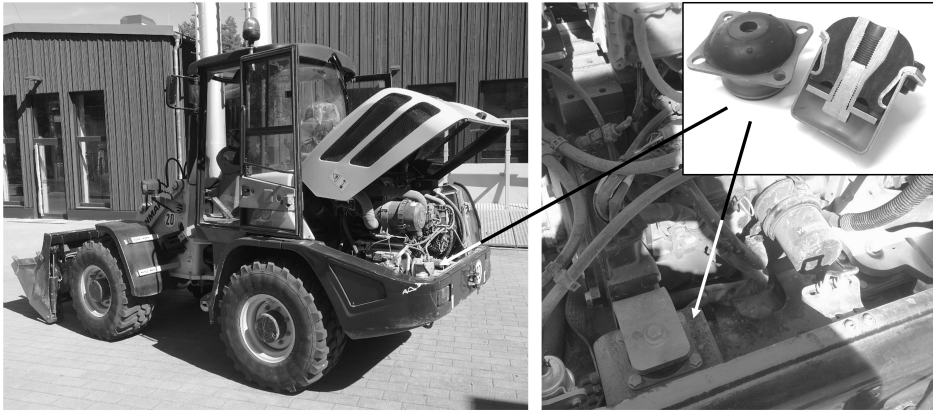


Bild 1.2 Radlader mit Konuslagern als Motorlagerung

ein Industriestandard etabliert, der in der Norm **DIN EN ISO 9001** festgeschrieben ist [[DIN EN ISO 9001](#)]. Unternehmen können sich von externen Gutachtern, sog. Zertifizierungsfirmen, auditieren lassen und erhalten - sofern sie das Audit bestehen, ein Zertifikat, dass ihnen die Konformität zur ISO DIN EN 9001 attestiert. Kunden wiederum können bei der Auswahl potentieller Lieferanten² darauf achten, ja z.T. sogar darauf bestehen, dass diese nach DIN EN ISO 9001 zertifiziert sind. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit für einen zuverlässigen Lieferanten, wenngleich das Zertifikat keine 100-prozentige Garantie darstellt.

Mit Blick auf die technische Produktentwicklung hat der sog. **APQP-Prozess** (*Advanced Product Quality Planning*) eine gewisse Popularität erlangt. Dieser ist an die Vorgaben der DIN EN ISO 9001 bzw. an das Pendant der Automobilbranche, die **IATF 16949** [[IATF 16949](#)], angelehnt. Er beschreibt den Ablauf, die Aufgaben und die beteiligten Unternehmensbereiche (Akteure) der Produktentwicklung, vgl. [Bild 1.3](#).

Die finale Qualität des späteren Serienproduktes wird im Wesentlichen in der Entwicklungsphase festgelegt, für die vorrangig die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung verantwortlich zeichnet. Gleichwohl wird in [Bild 1.3](#) deutlich, dass die gesamte Produktentwicklung aus verschiedenen Phasen besteht, in denen unterschiedliche Organisationseinheiten zusammenarbeiten. Es handelt sich also um einen bereichsübergreifenden Prozess, der von allen Akteuren neben den fachlichen Fähigkeiten auch sog. *soft skills*, wie z.B. Kommunikations- und Teamfähigkeit, verlangt.

Darüber hinaus ist es durchaus üblich, technische Kundenanfragen in Form von Projekten abzuarbeiten. Dazu wird ein **Projektleiter** definiert, der bereichsübergreifend alle Aufgaben und Termine koordiniert und bei dem alle Ergebnisse zusammenlaufen. Dieser kann z.B. der Vertriebsmitarbeiter oder der verantwortliche Ingenieur der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung sein. Er definiert einen **Projektplan** (z.B. in Form einer **GANTT-Chart**, vgl. [Abschnitt 1.2.2](#)), aus dem Aufgaben, Kosten, Verantwortlichkeiten, Meilensteine (Etappenziele) und Termine hervorgehen. Außerdem stellt er sicher, dass der Kunde zeit-

² Die ISO DIN EN 9001 spricht anstelle von Kunde und Lieferant von Auftraggeber und Auftragnehmer.

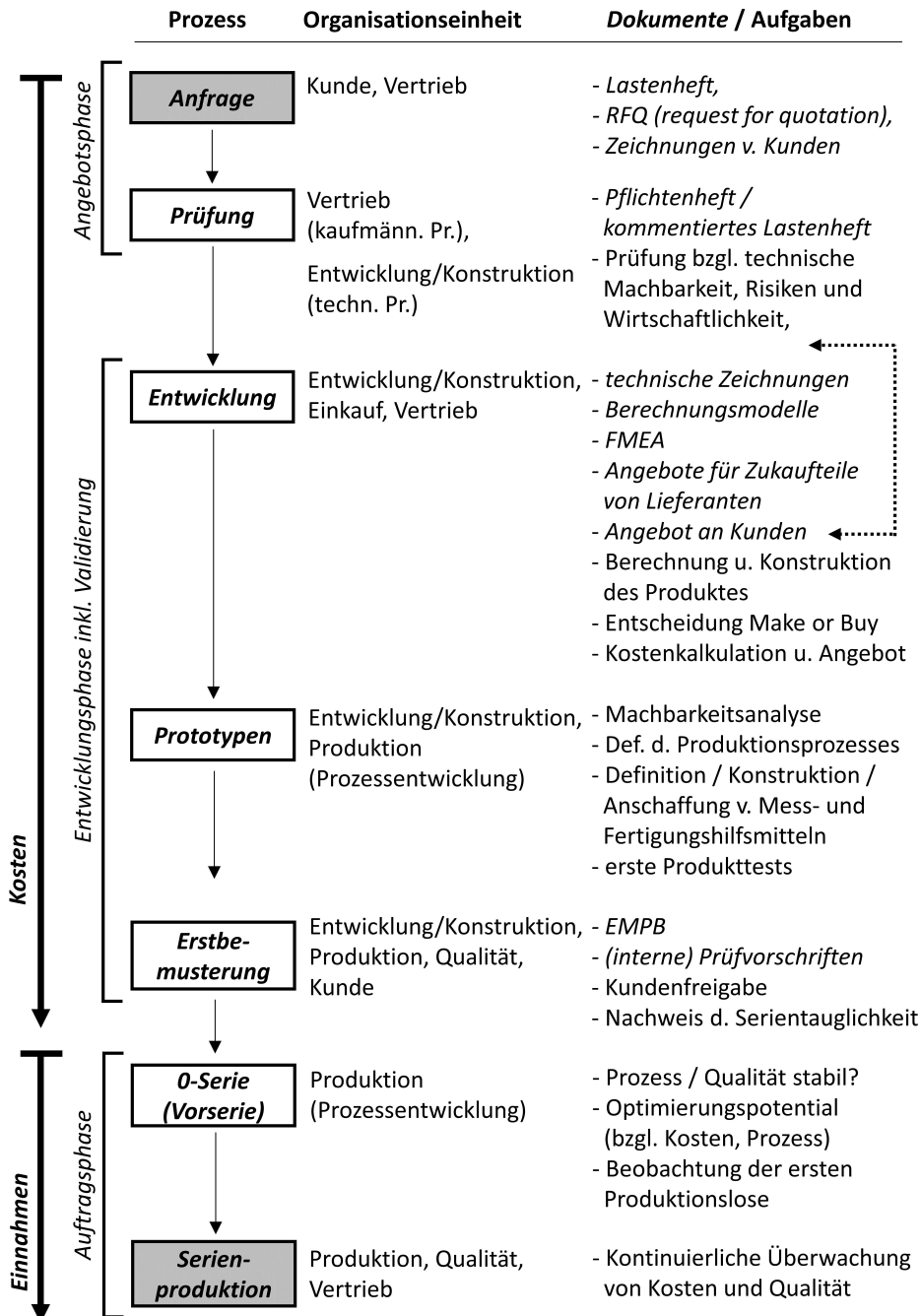


Bild 1.3 Schematische Darstellung der Etappen von der Kundenanfrage bis zum Serienprodukt

nah das Angebot erhält und später – im Falle der Auftragsvergabe – das Produkt fristgerecht und serienreif zur Verfügung steht.

Während des gesamten Produktentwicklungsprozesses ist auf eine nachvollziehbare, lückenlose **technische Dokumentation** Wert zu legen. Im Falle späterer Reklamationsfälle ist es wichtig, dass Berechnungsunterlagen, Testprotokolle, oder auch E-Mails mit dem Kunden, in denen technische Absprachen getroffen wurden, verfügbar und einsehbar sind.

Im Folgenden sollen nun die drei Phasen des APQP-Prozesses gemäß [Bild 1.3](#), d.h. die Angebotsphase, die Entwicklungs- und Validierungsphase sowie die Auftragsphase näher betrachtet werden.

1.2.1.1 Angebotsphase

Mit der Zusendung der Anfrage (RFQ, engl.: *Request for Quotation*) vom Kunden startet die Anfrageprozess. Der o.g. Radladerhersteller bittet einen Motorlagerhersteller um ein Angebot. Dabei teilt es ihm typischerweise mit, was für ein Lager er benötigt, wie viele Lager pro Jahr geliefert werden sollen und wann der Serienstart geplant ist. Bestenfalls wird auch eine Preisvorstellung (Zielpreis) mitgeteilt.

Die Anfrage erreicht das Unternehmen i.d.R. über den Vertrieb (Verkaufsabteilung). Dieser koordiniert sämtliche Kommunikation zwischen Unternehmen und Kunden und ist unter anderem für die Preisverhandlungen zuständig. Er prüft die Anfrage hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, d.h.

- Ist der Zielpreis realisierbar?
- Kann das Produkt mit dem vorhandenen Maschinenpark produziert werden?
- Können die jährlich geforderten Stückzahlen hergestellt werden?
- Welche Risiken bestehen im Falle eines Auftrages?

Insbesondere der letzte Punkt ist sorgfältig zu prüfen. Bei der sog. **Risikoanalyse** ist z.B. zu klären, welche Folgekosten im Falle von Reklamationen entstehen. Im o.g. Fall ist beispielsweise das Szenario zu betrachten, ob bei fehlerhaft, gelieferten Motorlagern Radlader vom Endkunden zurückgerufen werden müssen, um die Lager zu tauschen. Die daraus resultierenden Kosten sind oftmals durch den Lieferanten zu tragen. Auch Kosten für sog. **Bandstillstände**, also die Unterbrechung der Produktion wegen fehlender Lieferungen, können in Rechnung gestellt werden. Diese Kosten können z.T. beträchtlich und insbesondere für kleinere Unternehmen kritisch werden. In solchen Fällen kann es ratsam sein, von derartigen Anfragen abzusehen.

Darüber hinaus ist in der Angebotsphase eine technische Prüfung durch die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung durchzuführen. Hierbei gilt es, die Entwicklungskosten abzuschätzen und dem Vertrieb für die spätere Produktkalkulation mitzuteilen. Außerdem ist zu prüfen, ob alle notwendigen technischen Daten vorliegen oder ob ggf. technische Rückfragen zum angefragten Produkt bestehen.

In diesem Zusammenhang sind zwei Aspekte hervorzuheben: **(1)** Oft werden in der Angebotsphase bereits sensible technische Daten ausgetauscht. Der Radladerhersteller sendet z.B. technische Zeichnungen vom Motor oder CAD-Modelle vom neuen Radladermodell. Auch der Zulieferer wird im Laufe des Projektes Daten vom Motorlager generieren, die er andersrum dem Radladerhersteller zur Verfügung stellt. Das heißt, beide Parteien tauschen

Daten aus, in die sie Kosten und unternehmensspezifisches Know-How investiert haben. Diese sollen natürlich nicht an Dritte, schon gar nicht an den Wettbewerb, weitergegeben werden. Dazu ist es üblich im Vorfeld des Projektes zwischen den Unternehmen eine vertraglich ratifizierte Geheimhaltung zu vereinbaren, die sog. **Geheimhaltungsvereinbarung** (kurz: **GHV**). (2) ist seitens des angefragten Lieferanten davon auszugehen, dass der Kunde nicht nur ihn angefragt hat. Oft werden Anfragen in Form eines Bieterverfahren durchgeführt, bei dem verschiedene, potentielle Lieferanten angefragt werden.

Gleichwohl erfordert die Erarbeitung eines Angebots unternehmensweit Ressourcen: Die Entwicklungsabteilung muss die kundenseitig bereitgestellten technischen Daten prüfen und auf deren Basis ein Produkt entwickeln, d.h. Berechnungen durchführen und Zeichnungen erstellen. Der Einkauf muss bei Unterpelieferanten Preise für Rohstoffe und Zukaufteile erfragen, die Produktion muss den Herstellungsprozess definieren und die Kosten ermitteln, die Qualität muss die Prüfaufwendungen definieren. Demzufolge entstehen Kosten und es ist zu klären, wie diese zu berücksichtigen sind. Werden diese im Produktpreis abgebildet, so gehen sie verloren, sofern das Auftrag an den Wettbewerb geht. Daher kann es bei Bieterverfahren von Vorteil sein, mit dem Kunden eine Entwicklungsvereinbarung abzuschließen, der die Kostenerstattung regelt, sofern es später nicht zum Serienauftrag kommt.

Im Falle des Radladers kann die Anfrage verschiedene „Reifegrade“ aufweisen, die wiederum unterschiedliche Entwicklungsschritte und -aufwendungen nach sich ziehen:

1. Der Kunde fragt mit einer technischen Zeichnung des gewünschten Motorlagers an. Das Produkt ist bereits konstruiert; er sucht lediglich einen Hersteller.
2. Der Radladerhersteller übersendet ein sogenanntes **Lastenheft** in dem die Anforderungen an das Produkt definiert sind, z.B. welchen Belastungen es standhalten muss oder welche Anforderungen an die Lieferung/Verpackung gestellt werden. Dieses ist durch den verantwortlichen Entwickler absatzweise zu prüfen und ggf. mit Kommentaren zu Änderungen/Einschränkungen an den Kunden zurückzusenden; man spricht auch von einer **clause-by-clause** Kommentierung. In einem iterativen Prozess wird gemeinsam ein **kommentiertes Lastenheft** entwickelt in dem die für beide Seiten annehmbare Anforderungen an das Produkt niedergeschriebenen sind. Alternativ kann der Entwickler auch ein separates Dokument erstellen und an den Kunden senden, das sog. **Pflichtenheft**. Hierin legt er fest, wie und mit welchen Einschränkungen er das geforderte Motorlager umsetzen kann.
3. Der Radladerhersteller übersendet die technischen Daten vom Gesamtsystem (z.B. vom Radlader oder vom Motor) und fragt nach einem passenden Motorlager, dass den Eintrag der auftretenden Motorschwingungen in die Karosserie bestmöglich minimiert.



Lasten- und Pflichtenheft, Spezifikation:

Das Lastenheft enthält gemäß der DIN 69901-5 [DIN 69901] die Gesamtheit der kundenseitigen Forderungen an die Lieferungen und Leistungen des Lieferanten. Es wird auch Kunden-, Anforderungs- oder Produktspezifikation genannt. Es ist die „Wunschliste“ des Kunden und enthält u.a.:

- das Entwicklungsziel,
- geforderte Produktfunktionen,
- technische Anforderungen (Lasten, Anschlussmaße, Lebensdauer, etc.),

- Liefer- und Lagerbedingungen,
- Anforderungen an die technische Dokumentation.

Das Pflichtenheft wird vom Lieferanten nach Zusendung des Lastenhefts erstellt und beschreibt, wie und womit er die Anforderungen des Lastenheftes realisiert. Es wird auch Umsetzungs- oder Gesamtspezifikation genannt, vgl. DIN 69901-5 [DIN 69901]. Gemäß der VDI-Richtlinie 2519 wird auch von der Beschreibung der Realisierung der Kundenanforderungen gesprochen, vgl. [VDI 2519].

Oftmals taucht in der Kunden-Lieferanten Korrespondenz der verkürzte Begriff Spezifikation auf. In diesem Fall ist zu prüfen, wer der Urheber des Dokumentes ist und ob es sich dementsprechend um das Lastenheft, das kommentierte Lastenheft oder das Pflichtenheft handelt.

Abhängig von diesen drei Möglichkeiten ergeben sich unterschiedliche Aufgaben und Umfänge in der späteren Entwicklungs- und Validierungsphase.

1.2.1.2 Entwicklungs- und Validierungsphase

Sofern die offenen Fragen, speziell an Produktanforderungen, zur Machbarkeit, zu Risiken, zur Geheimhaltung und eventueller Erstattung von Entwicklungskosten, geklärt wurden, kann mit der Entwicklung inkl. Validierung des angefragten Produktes gestartet werden. Abhängig vom o.g. „Reifegrad“ ergeben sich in dieser Phase unterschiedliche Arbeitsschritte. Im ersten Fall können die Berechnungs- und Konstruktionsschritte des Motorlagers entfallen. Im zweiten Fall ist auf Basis der abgestimmten Anforderungen ein Produkt zu entwickeln. Dazu muss die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung ein Motorlager auslegen und dimensionieren. Hierbei sind verschiedene Berechnungs- und Konstruktionsschritte durchzuführen, die am Ende in der Festlegung von Gestalt und Form sowie der verwendeten Werkstoffe münden. Im dritten Fall muss zuerst das Gesamtsystem Radlader betrachtet werden und eine schwingungstechnische Analyse des Systems erfolgen. Daraus können dann die Anforderungen an das Motorlager geschlussfolgert werden. Erst dann kann die Auslegung und Dimensionierung eines passenden Lager beginnen. Zweifelsohne erfordert der dritte Fall die größten Aufwendungen innerhalb des Entwicklungsprozesses.

In allen drei Fällen liegen als Ergebnis des Entwicklungsprozesses technische Produktzeichnungen vor. Mit diesen Zeichnungen muss nun die Beschaffung von Rohstoffen, Zukaufteilen (**Halbzeuge**) oder des gar Gesamtproduktes geklärt werden. Dieser Arbeitsschritt erfolgt meistens in der Einkaufsabteilung. Dabei ist auch der Zukauf des vollständigen Motorlagers oftmals eine Option, was wiederum bedeutet, dass keine Eigenfertigung stattfindet. Diese sog. **Make-or-Buy**-Entscheidung sollte idealerweise mit der Unternehmensstrategie übereinstimmen und zwischen Einkaufs-, Entwicklungs- und Produktionsabteilung abgestimmt sein.



Begriff (Halbzeuge):

Der Begriff Halbzeuge kann am besten mit Vormaterial umschrieben werden, also einfache Werkstücke, bei denen das Rohmaterial schon zu einfachen geometrischen Formen verarbeitet wurde.

Beispiele: Schnittholz oder Stahlprofile und -rohre.

Im Falle einer Eigenfertigung wird parallel zur Beschaffungsklä rung auch der Herstellungsprozess erarbeitet. Diese Aufgabe nehmen typischerweise Prozessingenieure in der Produktion wahr, die sowohl alle erforderlichen Arbeitsschritte, die dazugehörigen Zeiten und Kosten als auch die notwendigen Fertigungshilfsmittel (Werkzeuge) definieren. Auch die Qualitäts- und Logistikabteilung ist zu involvieren, um die notwendigen Prüfungen und Prüfvorrichtungen im Rahmen der Qualitätssicherung der späteren Serienproduktion zu definieren bzw. produktspezifische Verpackungen, Lagerungs- und Transportkosten abzuklären.

Erst jetzt liegen alle Informationen und Kosten vor, so dass durch den Vertrieb eine produktspezifische Kalkulation durchgeführt und ein Angebotspreis ermittelt werden kann. Das heißt, erst an dieser Stelle im Ablauf der Produktentwicklung kann das Angebot an den anfragenden Kunden erfolgen.³

Entspricht das Angebot den Kundenerwartungen, können kundenseitig **Prototypen** (oft auch als **Funktionsmuster** bezeichnet) bestellt werden. Damit startet ein weiterer Prozess innerhalb der Entwicklungs- und Validierungsphase, bei der es darum geht, mit einfachen Mitteln und Werkzeugen wenige funktionsfähige Motorlager herzustellen. Ziel ist es, die Herstellbarkeit zu prüfen und ggf. den definierten Herstellungsprozess anzupassen. Auch werden die Prototypen sowohl von den Entwicklern beim Lieferanten als auch vom Kunden inspiziert und bewertet, insbesondere mit Blick auf die errechneten physikalischen Eigenschaften, der Erfüllung der geforderten Funktionen und der Montierbarkeit im Gesamtsystem.

Mitunter verzichtet der Kunde auf Prototypen und bestellt direkt die sog. **Erstmuster**. Die Erstmusterbestellung und die damit verbundene Erstbemusterung des angebotenen Produktes ist ein wichtiger **Meilenstein** in der Produktentwicklung. Mit ihr wird auch die Beschaffung aller in der Serienfertigung notwendigen Fertigungshilfsmittel, Werkzeuge und Prüfvorrichtungen gestartet, die teilweise hohe Kosten verursachen und in der Regel vom Kunden bezahlt werden. Wenn der Kunde daher Erstmuster bestellt und damit hohe Kosten in Kauf nimmt, so ist das ein Indiz dafür, dass er gedenkt, den Lieferanten für das Seriengeschäft zu berücksichtigen.

Im Zuge der Erstmusterherstellung und Erstmusterprüfung wird nachgewiesen, dass der Lieferant das Produkt unter Serienbedingungen herstellen kann. Im Falle unseres o.g. Beispiels werden dazu Motorlager auf den Serienmaschinen mit den Serienwerkzeugen gefertigt und geprüft. Alsdann wird ein sog. **Erstmusterprüfbericht (EMPB)** angefertigt, der typischerweise folgende Elemente aufweist:

- Deckblatt inkl. Angaben zu Vertragsparteien und Entscheidungsfeld,
- Maßbericht, der alle SOLL-Maße der Produktzeichnung mit den IST-Maßen vergleicht,
- Materialzeugnisse zu den verwendeten Bauteilen/Komponenten (z.B. für den Gummi und für das äußere sowie innere Metallteil des Motorlagers nach Bild 1.2),
- Prüfprotokolle für weitere vereinbarte physikalische Eigenschaften (z.B. zur Steifigkeit des Motorlagers oder Tests über die Maximallast bis zum Lagerausfall).

³ Es mag verwirren, dass in der hier präsentierten Darstellung das Angebot in der Entwicklungsphase und nicht in der gleichnamigen Angebotsphase erfolgt. Mitunter kann schon in der Angebotsphase ein Angebot erarbeitet werden; dies hängt von der Branche und dem angefragtem Produkt ab. Mitunter haben Unternehmen Strategien und Werkzeuge entwickelt, die ohne detaillierte Produkt- und Prozessdefinition die Kosten abschätzen können.

Cover Page		Page <u>1</u> / <u>4</u>
Absender: 	Translation ☐ Deutsch ☒ English Initial Sample Inspection Report VDA ☐ Production Process and Production Approval Report ☐ DwsA - (Documents (Parts) with special Archiving) Template level ☒ Sampling ☒ New Part ☐ Product Modification (Specification Modification) ☐ Production Relocation ☐ Production Process Modification ☐ Suspend The Manufacturing More Than 12 Months ☐ Tooling Changing / Repairing ☐ Change of Purchased Parts ☐ Change of Supplier ☐ Other ☐ Re-Sampling ☐ New Sampling ☐ Report Any Other Sampling	

Bild 1.4 Typisches Deckblatt eines Erstmusterprüfberichtes (EMPB)

Dieser wird zusammen mit den Erstmustern an den Kunden versandt, der die Motorlager ebenfalls prüft. [Bild 1.4](#) zeigt das Deckblatt eines möglichen EMPBs, das im unteren Bereich (*Customer Decision*) das Entscheidungsfeld des Kunden enthält. Hierin legt der Kunde fest, ob er die ihm vorgestellten Erstmuster freigibt, unter Auflagen freigibt oder nicht freigibt. Im Falle einer Freigabe ended die Entwicklungs- und Validierungsphase; das Produkt ist „serientauglich“. Im Falle einer Freigabe mit Auflage bzw. einer Nichtfreigabe ist die Erstbemusterung mit entsprechenden Korrekturmaßnahmen zu wiederholen bis die Freigabe erfolgt.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass speziell in der Entwicklungs- und Validierungsphase das Gros die späteren Kosten des Produktes festgelegt werden. Der Entwicklungsingenieur sollte sich dieser Tatsache bewusst sein und die Entwürfe immer hinsichtlich der resultierenden Kosten hinterfragen, man spricht auch vom **kostengerechten Konstruieren** (*Design to Cost*), vgl. [Abschnitt 1.2.2](#). Des weiteren ist anzumerken, dass Fehler, selbst Tippfehler auf den Zeichnungen, z.B. falsche Maßangaben, oft – sofern sie in diesem Stadium unentdeckt bleiben – kostenintensive Auswirkungen haben. Daher ist es wichtig, eventuelle Fehler, die selbstverständlich jedem passieren können, abzufangen und zu entdecken. Dazu gibt es Methoden, wie im Entwicklungsprozess Fehler abgefangen und entdeckt werden können, z.B. das sog. **Vier-Augen-Prinzip** (d.h. jede Zeichnung wird von einer weiteren Personen kontrolliert) oder die sog. **Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)**. Auf letztere wird detaillierter in [Abschnitt 1.2.2](#) eingegangen.

1.2.1.3 Auftragsphase

Die Auftragsphase startet mit der Serienbestellung des Kunden. Dabei wird er i.d.R. nicht den gesamten Jahresbedarf auf einmal bestellen, sondern entsprechend seiner Produktionskapazitäten mehrere Bestellungen über das Jahr platzieren. Beispielsweise montiert der Radladerhersteller pro Monat 100 Fahrzeuge und benötigt somit 400 Motorlager pro Monat (vier Lager pro Motor). Entsprechend könnte er vierteljährlich 1200 Lager ordern.

Der Lieferant hat die Wahl mit jeder Bestellung neu zu produzieren oder im Voraus zu produzieren und einen Lagerbestand anzulegen, aus dem er dann die Kundenbestellungen bedient. Für beide Strategien gibt es Vor- und Nachteile (z.B. werden im letztgenannten Fall Rüstzeiten minimiert allerdings gebundenes Kapital im Lager erzeugt). Unabhängig von der individuell festzulegenden Mengenstrategie wird der Lieferant die Kundenbedarfe über kontinuierlich wiederkehrende **Produktionslose** realisieren.

Entsprechend [Bild 1.3](#) startet die Auftragsphase mit der **Vorserie**, die sich beispielsweise über die ersten drei bis fünf Produktionslose erstreckt. Hierbei wird der Herstellungsprozess durch Prozessingenieure in der Produktion begleitet und hinsichtlich Stabilität und Optimierungspotential untersucht. Ziel ist es, mögliche Schwachstellen im Prozess zu identifizieren und abzustellen bzw. unnötige Kosten zu minimieren. Nach erfolgreicher Absolvierung der Vorserie startet die **Serienproduktion**, was nicht bedeutet, dass ab nun das Produkt sich selbst überlassen ist. Zur Sicherstellung von Wirtschaftlichkeit und Produktqualität sollte sowohl der Herstellprozess als auch das Produkt selbst einer kontinuierlichen, stichprobenartigen Überwachung unterliegen. Diese Aufgabe wird typischerweise durch die Qualitätsabteilung wahrgenommen.

1.2.2 GANTT-Chart und FMEA

Im vorangegangenen Abschnitt wurden bereits die GANTT⁴-Chart als Möglichkeit eines Projektplans und die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) angesprochen. Hinter beiden Begriffen verbergen sich zwei wichtige und zugleich praktische Werkzeuge die im Rahmen der Produktentwicklung vielfach angewendet werden.

1.2.2.1 GANTT-Chart

Hierbei handelt es sich um eine praktische, grafische Darstellungsmöglichkeit, bei der alle Aufgaben eines Projektes mithilfe von Balken in ihrer zeitlichen Abfolge illustriert werden. Dazu werden zuerst alle anfallenden Aufgaben und Arbeitsschritte gesammelt, den Projektphasen zugeordnet und in eine chronologische Reihenfolge gebracht. Bild 1.5 zeigt exemplarisch mögliche Aufgaben (Arbeitspakete), hier nur verkürzt für die ersten beiden Projektphasen, d.h. Angebotsphase und Entwicklungs-/Validierungsphase. Selbstverständlich haben die Arbeitspakete nur illustrativen Charakter, weitere bzw. andere Aufgaben können natürlich, abhängig von dem spezifischen Projekt, erforderlich sein.

Wichtig ist, für die einzelnen Arbeitspakete, u.U. auch für die einzelnen Projektphasen, eine verantwortliche Person zu definieren. Der Zeitraum wird in Form von fortlaufenden Monaten, Wochen oder auch Tagen horizontal im oberen Bereich aufgetragen. Anschließend kann die Bearbeitung der Arbeitspakete mittels der dargestellten Balken geplant werden. Dabei definiert die Position und horizontale Ausdehnung der Balken deren Bearbeitungszeitpunkt und -dauer.

GANTT-chart

Projekt: Motorlagerung für Radlader

Projektleiter: Hr. Schmidt

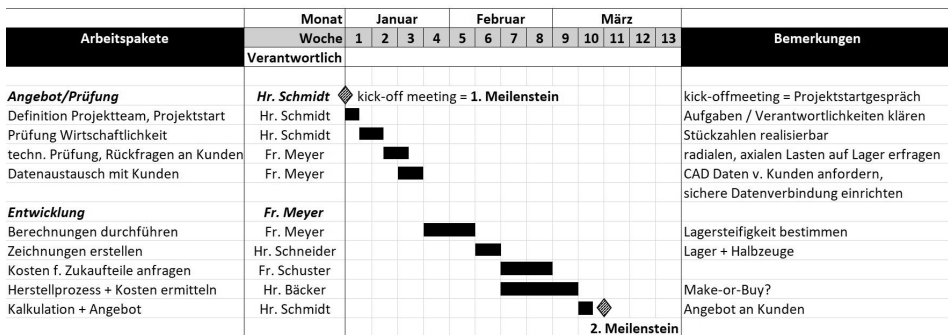


Bild 1.5 Beispiel einer GANTT-Chart als Visualisierung des Projektplans

Die Anordnung der Balken kann zeitlich parallel bzw. nacheinander erfolgen, je nachdem ob verschiedene Arbeitspakete unabhängig voneinander bearbeitet werden können oder aufeinander aufbauen. Auch ist empfohlen, sog. **Meilensteine** im Projekt zu definieren. Diese stellen wichtige Etappenziele dar; an ihnen kann beurteilt werden, inwieweit das

⁴ Benannt nach dem US-Amerikaner Henry Laurence Gantt (1861–1919).

Projekt entsprechend der Planung verläuft oder im zeitlichen Verzug ist (was durchaus vorkommen kann).

1.2.2.2 FMEA

Die FMEA erscheint auf den ersten Blick sehr formal und wird deshalb auch oftmals „stiefmütterlich“ behandelt. Gleichwohl ist es sinnvoll, sich während der Entwicklungs- und Validierungsphase kurz zu besinnen und über mögliche Fehler, die während der technischen Produktentwicklung auftreten können, Gedanken zu machen. Dies betrifft besonders die Berechnung und Konstruktion des Produktes als auch den Herstellungsprozesses, bei dem verschiedene Fehler auftreten können.

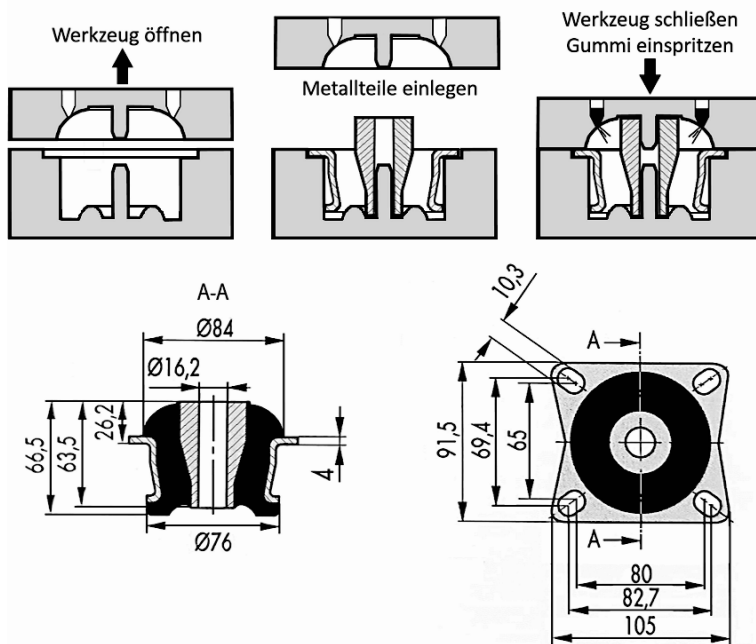


Bild 1.6 Oben: Vulkanisation und Formgebung des Gummis im Spritzgussverfahren. Unten: Schnittansicht (links), Draufsicht des Motorlagers (rechts) (schraffierte Flächen = Metall, schwarze Fläche = Gummi)

Mit Blick auf das betrachtete Beispiel zeigt **Bild 1.6** (unten) ein mögliches Motorlager in der geschnittenen Seitenansicht und der Draufsicht mit einigen wichtigen Maßen. Folgende Fehler können z.B. während der Produktberechnung und -konstruktion auftreten:

- **Falsche Bemaßung und Maßtoleranzen:** Würden beispielsweise die Langlochdurchmesser durch fehlerhafte Maßangaben zu klein ausgeführt, so würden die später in der Montage verwendeten M10 Schrauben nicht in die Langlöcher passen.
- **Falsch berechnete Gummihärte:** Zu geringe Gummihärten resultieren in zu kleinen Lagersteifigkeiten, was wiederum bedeuten würde, dass die Lager unter der Motorlast zu tief einfedern. Dies kann zu Kollisionen des Motors mit Nachbarkomponenten im Motorraum führen.

- **Falsch definierte Gummisorte:** Gummi ist nicht gleich Gummi. Es gibt zahlreiche Gummisorten für unterschiedlichste Anwendungen. Naturkautschuk (NR) kann z.B. nur längerfristige Temperaturen bis max. 60°C ertragen. Für höhere Temperaturniveaus sind synthetische Kautschuk-Typen zu wählen. Ein Motorlager mit NR würde bei Temperaturen über 60°C im Motorraum schneller altern, frühzeitig porös werden und vorzeitig ausfallen.

Mögliche Fehler, die bei der Herstellung des Motorlagers auftreten können, sind beispielhaft:

- **Zu kurze Vulkanisation:** Während der Vulkanisation wird der Rohgummi mittels Druck und Temperatur erweicht und in eine Form eingespritzt oder eingepresst, vgl. [Bild 1.6](#) (oben). Neben der Formgebung findet auch ein chemischer Prozess statt, bei dem die einzelnen Polymerketten des Gummis durch sog. Schwefelbrücken miteinander verbunden werden. Man spricht auch von Vernetzung, da die einzelnen Polymerketten nun untereinander vernetzt sind. Bei zu kurzer Vulkanisation ist das Netz unvollständig. Die elastischen Eigenschaften des Lagers sind unzureichend ausgebildet. Das Lager - und mit ihm der Motor - wird sich unter Last setzen, d.h. schrittweise plastisch verformen („absacken“), wodurch an der vom Motor abgehende Antriebswelle ein Winkelversatz auftritt, der zu Schäden führen kann.
- **Beschädigungen der Metalloberfläche:** Durch unachtsame Lagerung der Motorlager zwischen den einzelnen Produktionsstationen können Beschädigungen an der Oberflächenlackierung auftreten. Dadurch kann es zu ungewollter Korrosion an den Metallteilen kommen, was zu Reklamationen seitens des Kunden führen kann.
- **Fehlerhafte Bindung zwischen Gummi und Metall:** Während der Vulkanisation wird der Gummi chemisch an das Metall angebunden. Dazu werden die entsprechenden Kontaktflächen des Metalls vor der Vulkanisation gereinigt und mit einem speziellen Bindungsmittel beschichtet. Ist beispielsweise der Reinigungsprozess unzureichend durchgeführt, so kann dies zu mangelhafter Bindung zwischen dem Gummi und dem Metall führen. Bei Belastung des Lagers im späteren Betrieb kann die Bindung aufbrechen, wodurch das Lager i.d.R. seine Stützwirkung verliert; es kommt zum Ausfall der Lagerung.

Diese sechs, beispielhaften Fehlermöglichkeiten sind mitnichten vollständig, jedoch illustrieren sie, dass entlang der gesamten Wertschöpfungskette Fehler möglich sind, die zum Teil schwerwiegende Konsequenzen haben können. Grundsätzlich gilt, **je später ein Fehler am Produkt entdeckt wird, desto kostenintensiver ist die Behebung**. Der Worst Case ist, wenn der Fehler erst beim Kunden im Seriengeschäft auffällt; hier drohen hohe Kosten durch Rückruf- und Tauschaktionen.

Aus diesem Grunde ist es wichtig, so umfangreich wie möglich, alle denkbaren Fehler im Zuge der Produktentwicklung zu sammeln und hinsichtlich der Entdeckungswahrscheinlichkeit sowie der Konsequenzen zu bewerten. Die sog. Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ist ein methodisches Werkzeug mit dem nach einem festgelegtem Schema potentielle Fehler identifiziert und - durch Definition von Korrekturmaßnahmen minimiert werden können.

Mit Blick auf die Produktentwicklung liegt der Fokus auf zwei Zeitabschnitten: Fehler, die **(a)** während der Berechnung und Konstruktion und **(b)** während der Produktherstellung auftreten können. Dabei können beide Phasen in unterschiedlichen FMEAs analysiert wer-

den; man spricht dementsprechend von **Konstruktions-FMEA** und von **Prozess-FMEA**⁵. Da in den Produktentwicklungsprozess verschiedene Bereiche des Unternehmens involviert sind, sollten mehrere Personen, stellvertretend für die involvierten Abteilungen, die FMEA durchführen. Der Projektleiter stellt das Team zusammen, wobei die Entwicklungs- und konstruktionsabteilung, die Produktion (speziell die Prozessentwicklung) sowie die Qualitätsabteilung vertreten sein sollten. Außerdem moderiert er die gemeinsamen Gespräche, sammelt alle Informationen und führt diese zusammen. Als Ergebnis kann ein FMEA-Formblatt, wie in [Bild 1.7](#) illustriert, erstellt werden. Hierin sind zwei mögliche Fehler während der Berechnung und Konstruktion des bereits diskutierten Motorlagers und ein möglicher Fehler während der Produktion des Lagers exemplarisch aufgeführt.

Aber wie wird nun die FMEA im Detail erstellt und wie kommen die einzelnen Einträge zustande? Dazu sollen die Spalten im [Bild 1.7](#) betrachtet und stichpunktartig erörtert werden:

- Bei der Konstruktions-FMEA werden zuerst die einzelnen Bauteile, die Berechnungs- und Konstruktionsschritte und die Funktionen des Produktes betrachtet. Bei der Prozess-FMEA werden die verschiedenen Herstellungsschritte zusammengetragen.
- Danach wird im Team erörtert, welche Fehler am Bauteil, an den Funktionen bzw. während der einzelnen Arbeits- und Herstellungsschritte auftreten können. Diese werden zeilenweise notiert.
- Anschließend wird jeder Fehler hinsichtlich seiner Wahrscheinlichkeit des Auftretens A , seiner Bedeutung B und seiner Entdeckungswahrscheinlichkeit E quantifiziert, also zahlenmäßig erfasst. Dabei gilt der Bewertungsschlüssel aus [Tabelle 1.1](#).
- Nun wird die sog. **Risiko-Prioritäts-Zahl (RPZ)** mithilfe der Formel

$$RPZ = A \cdot B \cdot E$$

gebildet. Der resultierende RPZ-Wert kann zwischen 1 und 1000 liegen und definiert das Fehlerrisiko sowie den Handlungsbedarf gemäß [Tabelle 1.2](#).

- Insbesondere für RPZ-Werte größer als 50 sind Verbesserungsmaßnahmen zu definieren. Dabei sind dringende Maßnahmen geboten, sofern Werte über 100 vorliegen. Ziel der Verbesserungsmaßnahmen ist, die A, B, E -Werte zu verringern und so das Produkt, also den RPZ-Wert, zu verkleinern.
- Die Maßnahmen sind möglichst nahe zur Empfehlung umzusetzen, wobei eine verantwortliche Personen die Umsetzung koordiniert. Gleichwohl ist festzustellen, dass die empfohlene Maßnahme von der später implementierten Maßnahme – z.B. aus Kostengründen – abweichen kann.
- Abschließend wird der verbesserte Zustand wiederholt bewertet, d.h. A, B, E werden erneut quantifiziert und der RPZ-Wert wird neu berechnet. Hierbei sind RPZ-Werte kleiner 50 anzustreben.

Zur Veranschaulichung soll der mögliche Fehler „*falsch berechnete Steifigkeit*“ aus [Bild 1.7](#) betrachtet werden. Hierzu ist es notwendig, zuerst einige physikalisch-technische Aspekte des Motorlagers zu erörtern. Es wurde bereits ausgeführt, dass die wesentliche Funktion

⁵ Der Begriff Prozess-FMEA bezieht sich nicht nur auf Herstellungsprozesse. Hierin können auch allgemeine Prozesse analysiert werden, z.B. Geschäftsprozesse im Unternehmen oder Änderungsprozesse, wie beispielsweise die Einführung einer neuen Software im Betrieb.

Fehlermöglichkeits-Einflussanalyse (FMEA)															
Kopfdaten		FMEA-Typ (bitte ankreuzen)													
Produktbezeichnung:		Ersteller:		☐ Konstruktions-FMEA											
Artikelnummer:		Erstelldatum:		☐ Prozess-FMEA											
aktueller Zustand				verbesserter Zustand											
Funktion/ Arbeitsschritt	A	B	C	RPZ	empfohlene Verbesserung	Verant- wortlicher	durchgeführte Maßnahme	A	B	E	RPZ				
Zeichnungs- erstellung	falsche Bemaßung	4	Lager beim Kunden nicht montierbar	6	fehlende Gegenkontrolle	7	keine	168	Einführung 4-Augen-Prinzip	Leiter Entwicklung	Modifikation d. internen Zeichnungs- freigabeprozesses	4	6	2	48
Schwingungs- isolation	falsch berechnete Steifigkeit	3	zu starke statische Einfederung des Motors	7	keine Prototypen vorgesehen	6	Überprüfung der Gummihärte an den Erstmustern	126	Herstellung von Prototypen + Steifigkeits- messung	Projektleiter	zusätzl. Messung d. Steifigkeiten an den Erstmustern + zusätzl. Anschlag an Lagern konstruiert	3	5	2	30
Vulkanisation	unzureichende Vernetzung	7	Lager setzen sich im Betrieb, Lagerausfall	7	zu kurze Vulkanisations- zeit	8	opt. Kontrolle (Blasenbildung im Gummi) an aufgeschnittenen Lagern	392	Messung des DVR an Gummiprüben (aus dem Lager geschnitten)	Prozess- ingenieur	Messung des DVRs an Erstmustern	2	7	3	42
Skala	A=Auftretswahrscheinlichkeit	B=Bedeutung des Fehlers	E=Entdeckungswahrscheinlichkeit	RPZ = A x B x E	Maßnahmen										
1	unwahrscheinlich	keine / kaum wahrnehmbare Auswirkungen	sehr hoch	1	keine										
2-3	sehr gering	unbedeutende Auswirkungen	hoch	2 ... 50	können										
4-6	gering	moderate Auswirkungen	gering	51 ... 100	sollten										
7-8	hoch	schwere Auswirkungen	sehr gering	101 ... 1000	müssen										
9-10	sehr hoch	sehr schwere Auswirkungen	äußerst gering												

Bild 1.7 FMEA mit drei mögliche Fehlern bei der Entwicklung und Herstellung des Motorlagers (DVR = Druckverformungsrest)

Tabelle 1.1 Bewertungsskala für A, B und E der FMEA

Zahl	A	B	E
1	unwahrscheinlich	keine bzw. nicht wahrnehmbare Auswirkungen	sehr hoch
2–3	sehr gering	unbedeutende Auswirkungen, Kunde akzeptiert den Fehler	hoch
4–6	gering	moderate Auswirkungen, vereinzelt Probleme beim Kunden	gering
7–8	hoch	schwere Auswirkungen, die Mehrzahl der Kunden hat Probleme, Reklamationen	sehr gering
9–10	sehr hoch	sehr schwere Auswirkungen, alle Kunden betroffen, zahlreiche Reklamationen, Rückruf, Produkttausch, Schadensersatz	äußerst gering

Tabelle 1.2 Bewertungsskala für die unterschiedlichen RPZ-Werte

RPZ	Fehlerrisiko	Handlungsbedarf
101–1000	hoch	Maßnahmen müssen dringend formuliert und umgesetzt werden
51–100	mittel	Maßnahmen sollten definiert und implementiert werden
2–50	gering	Maßnahmen können überlegt und ggf. umgesetzt werden
1	kein Risiko	keine Maßnahmen erforderlich

des Motorlagers darin besteht, den Eintrag der Motorschwingungen in die Karosserie des Fahrzeuges zu minimieren. Betrachtet man den theoretischen Grenzfall eines „unendlich“ steifen Lagers, so würde dies einer starren Anbindung des Motors an den Fahrzeugrahmen (z.B. durch Anschweißen) entsprechen. Hierbei würden die Motorschwingungen einzu-eins in den Rahmen eingeleitet, da der Rahmen zwangsläufig der Schwingbewegung des Motors folgen müssten. Aus dieser Grenzbetrachtung folgt: je steifer das Lager, desto größer der Schwingungseintrag oder umgekehrt, je weicher das Lager, desto geringer der Schwingungseintrag⁶. Das heißt, aus schwingungstechnischen Überlegungen sind möglichst weiche Lager anzustreben. Allerdings steigt damit auch die statische Einfederung unter der Motorlast, und zu große Gummiverformungen führen zu vorzeitigem Materialversagen und Lagerausfall. Damit ist ein Kompromiss zwischen möglichst kleiner Lagersteifigkeit für bestmögliche Schwingungsisolierung und hinreichend großer Steifigkeit für möglichst große Lagerlebensdauer anzustreben.

Betrachtet man als Funktion des Lagers die sog. **Schwingungsisolierung** (zweiter Fehler in Bild 1.7), also das Vermögen des Lagers, Motorschwingungen vom Rahmen „fernzuhalten“, so wird diese Funktion unter anderem durch die physikalische Größe **Steifigkeit** $c = F/s$ bestimmt. Die Steifigkeit beschreibt also, wie viel Kraft $F = c \cdot s$ notwendig ist, um das Lager um einen bestimmten Weg s zu verformen.

Die optimale Steifigkeit wird entsprechend der erwarteten Lagerbelastungen und den bekannten Motordrehzahlen berechnet. Darauf aufbauend wird ein Lager entworfen und konstruiert, dass diese Steifigkeit abbildet. Natürlich können, aus welchen Gründen auch

⁶ Mögliche Resonanzen sind hier nicht betrachtet.

immer, Berechnungsfehler vorkommen, die z.B. in zu kleinen Lagersteifigkeiten resultieren. Die Auftretswahrscheinlichkeit A wurde hier allerdings als **gering (3)** bewertet. Bleibt dieser Fehler unentdeckt, so würde diese Lagerung im späteren Betrieb unter den Betriebslasten zu stark einfedern, was wiederum die Lebensdauer des Lagers reduziert. Das Lager wird früher als vom Kunden erwartet ausfallen; Reklamationen, Radladerstillstand und kostenintensive Lagerwechsel würden folgen. Je nachdem, wie viele Radlager bis zum ersten Lagerausfall – und damit bis zur Entdeckung des Fehlers – ausgeliefert wurden, können mitunter mehrere tausend Radlader von der Reklamation betroffen sein. Die Bedeutung des Fehlers bzw. die Auswirkungen wurden daher mit **schwer (7)** bewertet. Die Frage, wie hoch die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers ist wurde hier als **gering (6)** eingestuft. Hier sind auch höhere Werte denkbar, da – wie erläutert – der Fehler erst zu einem sehr späten Zeitpunkt, im Betrieb der Radlader auffällt.

Somit ergibt sich ein **RPZ-Wert von 126**, was wiederum Verbesserungsmaßnahmen zwingend erforderlich macht. Dabei können die Maßnahmen so angelegt sein, dass A und/oder B und/oder E verringert wird. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens kann reduziert werden, die Auswirkungen des Fehlers können weniger schwerwiegend gestaltet werden und die Wahrscheinlichkeit der Fehlerentdeckung kann erhöht werden. Eine mögliche Maßnahme könnte die Herstellung von Prototypen inklusive Steifigkeitsprüfung sein. So kann direkt an realen Lagern und vor Serienstart abgeklärt werden, ob die entwickelten Lager der geforderten Steifigkeit entsprechen. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit mögliche Berechnungsfehler frühzeitig zu entdecken und zu korrigieren, E sinkt von 6 auf 2. **Bild 1.7** zeigt weiter, dass die durchgeführte Maßnahme von der empfohlenen abweicht. Der Grund könnte z.B. sein, dass aus Zeitgründen auf Prototypen verzichtet wurde. Stattdessen wurden die empfohlenen Steifigkeitsmessungen an den Erstmustern durchgeführt. Außerdem wurde eine weitere Maßnahme umgesetzt: zur Senkung der Fehlerauswirkung bei Nichtentdeckung des Fehlers wurde am Lager ein zusätzlicher Anschlag konzipiert, der ein zu weites Einfedern und Verformen der Lager verhindert. Damit wird B von 7 auf 5 verringert und im Ergebnis dessen resultiert ein neuer RPZ-Wert von 30. Dieser ist deutlich unter 50, so dass eine wesentliche Verbesserung des Ausgangszustandes erreicht wurde.

1.2.3 Kostengerechtes Konstruieren (Design to Cost)

Neben den technischen Aspekten sollte der verantwortliche Entwickler bzw. der Konstrukteur auch immer die Kosten im Blick behalten. **90 % der Produktkosten werden in der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung festgelegt!** Unter der Voraussetzung, dass Funktion und Qualität des Produktes unberührt bleiben, sind während der Produktentwicklung folgende, allgemeine Regeln zu beachten:

- **Günstige Materialien:** Bei der Auswahl der verwendeten Werkstoffe sind neben Nachhaltigkeitsaspekten, z.B. Fragen nach Umweltverträglichkeit, Wiederverwendbarkeit oder umweltschonendem Rohstoffabbau, auch Kostengesichtspunkte zu berücksichtigen. Unlegierter Stahl ist günstiger als hochlegierter Stahl. Faserverstärkte Kunststoffe können mitunter alternativ zu Aluminium verwendet werden. Eine verzinkte Schraube ist günstiger als eine Schraube aus nichtrostendem Stahl.
- **Normteile:** Zahlreiche Bauteile haben sich in Art und Geometrie über die Jahre etabliert und werden vielseitig und in großen Stückzahlen verwendet. Hierzu zählen z.B.

Schrauben und Muttern, Rohre, Scheiben, Bolzen, u.v.m., für die genormte Standardgeometrien verfügbar sind. Auf derartige Normteile sollte, wenn möglich, zurückgegriffen werden, da sie von zahlreichen Herstellern produziert werden und im Handel umfangreich, schnell und günstig verfügbar sind. Eine Schraube mit einem metrischen ISO-Gewinde M12 nach DIN 13-1 [DIN 13-1] kann in jedem Baumarkt erworben werden, eine Schraube mit Sondergewinde, z.B. einem Nenndurchmesser von 13 mm muss mit großer Wahrscheinlichkeit kundenspezifisch produziert werden, was längere Lieferzeiten und höhere Preise nach sich zieht. Ein nahtloses Stahlrohr mit einem Außendurchmesser von $D = 90$ mm und einer Wanddicke von $T = 3$ mm ist durchaus zulässig, allerdings ist zu überlegen, ob nicht ein Stahlrohr mit einer Norm Abmessung nach DIN EN 10220, z.B. mit $D = 88,9$ mm und $T = 2,9$ mm verwendbar ist [DIN EN 10220].

- **Materialsparbarkeit:** Die zur Herstellung des Produktes notwendigen Rohstoffe, Halbzuge und Betriebsmittel stellen, je nach Weltmarktpreise für Stahl, Rohöl, Kautschuk, etc., einen erheblichen Anteil am finalen Produktpreis dar. Aus diesem Grunde ist der notwendige Materialeinsatz kritisch zu hinterfragen. Großzügige Überdimensionierung, also unnötig hohe Sicherheitsfaktoren aber auch Fertigungsprozesse mit großem Materialabfall sind – wenn möglich – zu vermeiden.
- **Toleranzen:** Die Geometrie und Größe des Bauteils wird über die Bemaßung, also die Angabe von Maßen (im Maschinenbau in der Regel mit der Einheit mm), z.B. für Längen, Durchmesser oder Oberflächenrauheiten, in der technischen Zeichnung angegeben, vgl. Bild 1.8 und Kapitel 2. Dabei ist einzusehen, dass jedes Maß innerhalb eines Minimal- und Maximalwertes schwanken wird. Kein Fertigungsprozess wird exakt das sog. **Nennmaß** treffen; und sei die Schwankung noch so klein, es wird eine Schwankung vorliegen. Die erlaubte oder gar gewollte Schwankung (z.B. bei Passungen, vgl. Abschnitt 8.3.3) ist durch den Produktentwickler zu definieren und in der Zeichnung anzugeben, vgl. Bild 1.8 (c). Hierbei macht es einen Unterschied, ob der Wellendurchmesser um ± 30 μ m oder nur um ± 5 μ m schwanken darf. Speziell bei der engeren, zweiten Toleranz sind zusätzlich zum Drehprozess weitere Arbeitsschritte, wie Schlichten/Feindreihen oder zusätzliches Schleifen der Wellenoberfläche, notwendig. Damit wird klar, dass die Festlegung der Toleranzen einen direkten Einfluss auf die Fertigungsprozesse und damit auf die Produktkosten hat.
- **Einfache Geometrien und Formen:** Die Formgebung der Bauteile erfolgt überwiegend durch mechanische Bearbeitungsverfahren, wie die spanabhebende Bearbeitung (Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen, ...), durch Umformung (Biegen, Tiefziehen, Walzen, Schmieden, ...) oder durch Trenn- (z.B. Stanzen, Schneiden) und Fügeverfahren (z.B. Löten, Schweißen, Kleben). Mit Blick auf die Kosten kann etwas grob festgestellt werden: je komplexer die Bauteilgeometrie, desto vielschichtiger der damit verbundene Herstellungsprozess. Dies kann bedeuten, dass unterschiedliche Bearbeitungsverfahren, teure Werkzeuge oder zeitintensives Werkstückhandling notwendig sind. Daher sind Art und Umfang unterschiedlicher Formelemente, z.B. Fasen, Rundungen oder Absätze an Werkstücken, so weit wie möglich zu minimieren.
- **Einfache Fertigungsverfahren:** Unterschiedliche Herstellungsverfahren sind unterschiedlich teuer. Neben dem Zeitaufwand für die Bauteilproduktion sind auch Bedienerqualifikation und Anschaffungskosten der entsprechenden Maschinen relevant für die Kosten des jeweiligen Arbeitsschrittes. So können zwei Bauteile durch Verschweißen oder durch Bördeln miteinander verbunden werden, vgl. Bild 1.8 (d). Dazu braucht

man entweder eine Schweißmaschine mit entsprechenden Arbeitsschutzvorrichtungen, was in der Regel mit beträchtlichen, allerdings einmaligen Investitionskosten einhergeht oder eine Hydraulikpresse mit entsprechendem Umformwerkzeug. Letztere Option stellt mit großer Wahrscheinlichkeit den kostengünstigeren Prozess dar; hier sind kürze Herstellungszeiten und geringe Investitionsbedarfe zu erwarten.

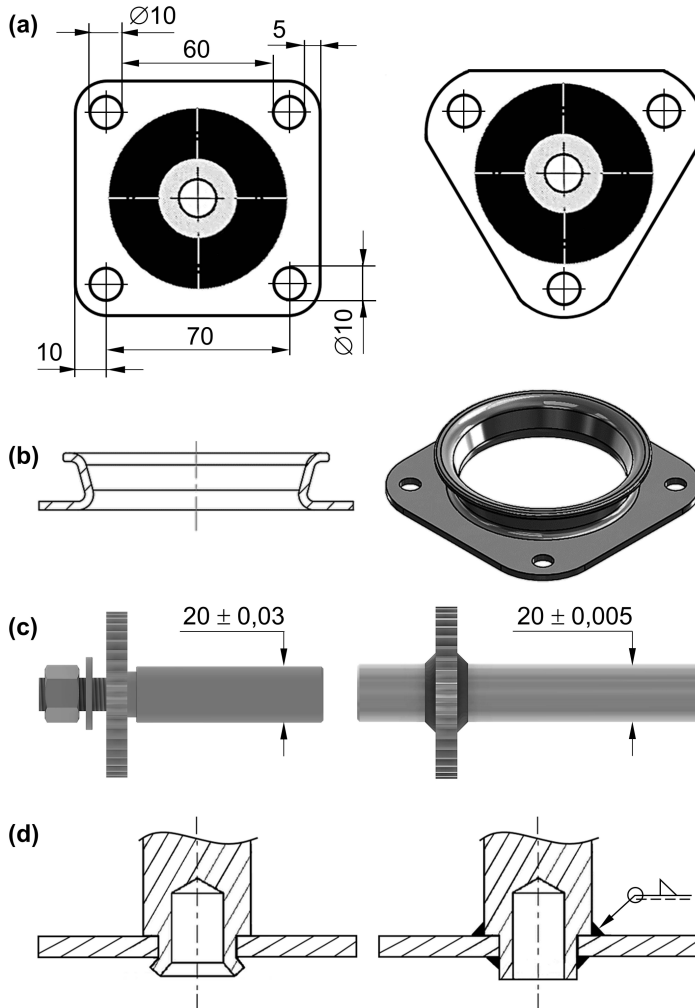


Bild 1.8 Kostengerechtes Konstruieren, vier Beispiele

Neben diesen allgemeinen Regeln sind weitere Gesichtspunkte beim kostengerechten Konstruieren zu berücksichtigen. So sind auch Folgekosten bzgl. Prüfung, Montage und Wartung zu beachten; entsprechend spricht man von **prüf-, montage- und wartungsgerechtem Konstruieren**. Betrachtet man Bild 1.8 (a), so zeigt die linke Draufsicht zwei unterschiedliche Bemaßungen für die horizontale Festlegung der Bohrungen. Die obere Bemaßung kann hierbei freihändig mit einem einfachen Messschieber durchgeführt werden. Die untere Bemaßung erfordert aufwendigere Messmethoden, da die Bohrungs-

mittelpunkte nur ungenau freihändig bestimmt werden können. Entsprechend ist aus messtechnischer Sicht die obere Bemaßung vorteilhafter. Darüber hinaus zeigt [Bild 1.8](#) (a) zwei unterschiedliche Flansche für das Motorlager. Die linke Variante erfordert vier, die rechte nur drei Verbindungselemente (Schrauben + Muttern). Damit resultieren beim rechten Drei-Bohrungs-Flansch kürzere Montagezeiten und Materialkosten. [Bild 1.8](#) (b) illustriert einen Metallflansch, wie es in ähnlicher Form im Motorlager verbaut ist, vgl. [Bild 1.6](#) (unten). Natürlich kann ein derartiges Bauteil aus Vollmaterial gedreht und gestanzt werden. Die dabei entstehenden Abfallspäne und die Bearbeitungszeiten sind allerdings erheblich. Alternativ dazu kann der Flansch auch im Tiefziehverfahren aus einem planarem Blech geformt werden. Hierzu sind allerdings sehr teure Tiefziehwerkzeuge notwendig, dafür dauert die Herstellung des Flansches nur wenige Sekunden. Das heißt, oft ist der Herstellungsprozess von den zu produzierenden Stückzahlen abhängig. Für kleine Stückzahlen ist, trotz langer Herstellungszeit, der Dreh- und Stanzprozess kostengünstiger; für große Stückzahlen ist der Tiefziehprozess wirtschaftlicher, da die hohen Werkzeugkosten auf die große Stückzahl verteilt werden können. [Bild 1.8](#) (c) zeigt ein Beispiel, wie während der Konstruktion die zukünftigen Wartungskosten berücksichtigt werden können. Im Fokus steht die Verbindung zwischen Welle und Zahnrad (Stirnrad). Dabei kann entweder eine Verschraubung gewählt werden, bei dem das Stirnrad mittels Spannmutter gegen einen Wellenabsatz gepresst wird oder das Stirnrad wird mittels zweier herumlaufender Kehlnähte auf der Welle verschweißt. Im Falle der Verschraubung kann das Zahnrad durch Lösen der Schraubverbindung bei späteren Wartungsarbeiten ausgewechselt werden; die Schweißung hingegen erfordert einen vollständigen Austausch der Zahnrad-Welle Baugruppe, was vermutlich mit höheren Wartungskosten verbunden ist.

■ Literatur

- Decker, K.-H., Kabus, K. (bearbeitet von Frank Rieg, Frank Weidemann, Gerhard Engelken, Reinhard Hackenschmidt): *Maschinenelemente - Funktion, Gestaltung und Berechnung*. 18., aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- DIN 13-1:1999-11: *Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung - Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde; Gewinde-Nenndurchmesser von 1 mm bis 68 mm*. Beuth-Verlag, Berlin, 1999.
- DIN 69901-5:2009-01: *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. Beuth-Verlag, Berlin, 2009.
- DIN EN 10220:2003-03: *Nahtlose und geschweißte Stahlrohre - Allgemeine Tabellen für Maße und längenbezogene Masse*. Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- DIN EN ISO 9001:2015-11: *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. Beuth-Verlag, Berlin, 2015.
- Grote, K.-H.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 23. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.

- IATF 16949:2016-10: *Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie*. VDA e.V. (Hrsg.), Berlin, 2016.
- VDI 2519, Blatt 1: *Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften*. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2001.
- Wittel, H., Spura, C., Jannasch, D.: *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. 25. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, 2021.

2

Werkstoffkundliche Grundlagen von Stahl und Eisen



Lernziele:

- Was ist Stahl und wie wird Stahl, insbesondere Flachstahl, hergestellt?
- Was versteht man unter integrierten Hüttenwerken?
- Erläutere die Begriffe: Koks, Frischen, Kokille, Zunder, Haspel, Coil.
- Was unterscheiden Reinstoffe, Stoffgemische und chemische Verbindungen?
- Wie sind Atome in Metallen angeordnet?
- Welche Atomgitterkonfigurationen sind bei Stahl relevant?
- Erläutere die Begriffe: Polykristall, Körner, Textur, Phasen, Gefüge?
- Welche Gefügearten gibt es bei Stahl?
- Wie ist das Fe-C- und das ZTU-Diagramm zu lesen?
- Was versteht man unter Umwandlungshärtung und Vergüten?
- Welchen Einfluss haben Legierungselemente auf Stahl?
- Was zeichnet Eisengusswerkstoffe aus; welche gibt es; was unterscheidet sie?
- Wie ist das generelle Vorgehen bei der Dimensionierung von Bauteilen?
- Was ist der Zugversuch, wie wird er durchgeführt?
- Welche mechanischen Kennwerte folgen aus dem Zugversuch? Erläutere sie.
- Welche drei Möglichkeiten der normgerechten Bezeichnung von Stahl gibt es?
- Was versteht man unter Edelstahl, nichtrostendem Stahl, Vergütungsstahl, Einsatzstahl, Automatenstahl, Baustahl?
- Welche Festigkeitsklassen gibt es bei Schrauben und Muttern? Welche Kenngrößen können wie abgeleitet werden?

Nach wie vor ist der Werkstoff **Stahl** im Maschinenbau der wichtigste Material. Auch wenn mit Blick auf Leichtbau, Kostendruck und Nachhaltigkeit alternative Werkstoffe, wie Kunststoffe, Nichteisenmetalle (z.B. Al) oder Verbundwerkstoffe, zunehmend an Bedeutung gewinnen, so kommt das Gros der Maschinenbaukomponenten nicht ohne Stahl und Gusswerkstoffe aus. Aus diesem Grund soll in den nachfolgenden Abschnitten ein kurzer Abriss über Stahl und Eisengusswerkstoffe, die Herstellung am Beispiel Flachstahl, die charakteristischen „Mikrostrukturen“, die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften, die normgerechte Bezeichnung sowie die Erläuterung der gängigen Schraubenfestigkeitsklassen gegeben werden.

■ 2.1 Was ist Stahl und wie wird er hergestellt

Stahl ist im Wesentlichen eine Legierung (d.h. Mischung) aus **Eisen** (Fe) und **Kohlenstoff** (C), wobei der Kohlenstoff <2 % beträgt. Höhere Kohlenstoffgehalte führen zu brüchigem/sprödem Materialverhalten, der Werkstoff wird brüchig und lässt sich schlecht plastisch verformen, z.B. Schmieden oder Walzen. Darüber hinaus werden in der Regel weitere Elemente, sog. **Legierungselemente**, beigegeben, um verschiedene Eigenschaften des Stahls zu verbessern (z.B. höhere Festigkeiten zu erzielen) oder zusätzliche Eigenschaften einzustellen (z.B. Korrosionsbeständigkeit durch Hinzugabe von 12–18 % Chrom (Cr)). In Europa werden mehr als 2500 genormte **Stahlsorten** („Stahlrezepturen“) hergestellt.

Reines Eisen weist im Vergleich zum Stahl geringe **Festigkeiten**¹ auf. Außerdem ist Eisen im festen Zustand nahezu nicht verformbar. Stahl hingegen kann deutlich höhere Festigkeiten besitzen und ist - je nach Rezeptur - im festen Zustand mitunter sehr gut umformbar. Diese vorteilhaften Eigenschaften begründen die Popularität von Stahl im Maschinenbau und seine wichtige Rolle im Rahmen der **Industrialisierung**, ausgehend von England ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts und später in Europa und Deutschland ab ca. 1830.

Stahl wird heutzutage in integrierten Hüttenwerken (z.B. bei ThyssenKrupp Steel in Duisburg Bruckhausen) oder durch Einschmelzen von Schrott in sog. Elektrostahlwerken (z.B. bei Riva Stahl in Hennigsdorf (b) Berlin) hergestellt². Damit wird auch klar, das Stahl vollständig recyclebar ist; der Schrottanteil an der globalen Rohstahlerzeugung beträgt ungefähr 35 % [Degner et al., 2007].

In **integrierten Hüttenwerken** wird die gesamte Prozesskette, von der Eisenerz- und Kohleanlieferung bis hin zum verzinktem Automobilblech, abgebildet, vgl. **Bild 2.1**. Die wichtigsten Ausgangsstoffe sind hierbei das **Eisenerz** (eisenoxidhaltiges Gestein, z.B. Hämatit Fe_2O_3), **Bild 2.2** (links), und schwefelarme Kohle (Braun- oder Steinkohle). Die Kohle wird in der Kokerei unter Luftabschluss erhitzt (Pyrolyse oder Verschwelung), so dass flüchtige Kohlebestandteile wie Teer, Benzol oder Schwefelwasserstoffe herausgelöst werden und ein stark kohlenstoffhaltiger Brennstoff, sog. **Koks**, zurückbleibt. Die dabei entstehenden Pyrolysegase werden auf der Hütte aufgefangen und als Verbrennungsgase, z.B. zur Energieerzeugung, genutzt.

Der Koks wird als sog. **Reduktionsmittel** zusammen mit Eisenerz abwechselnd im **Hochofen** aufgeschichtet, **Bild 2.1**, **Bild 2.3**. Mithilfe des im unteren Bereich eingeblasenen Sauerstoffs des Heizwindes kommt es zu einer chemischen Reduktionsreaktion, bei der Wärme freigesetzt wird. Dabei verbindet sich der Kohlenstoff des Koks mit dem Sauerstoff des Eisenoxids in einer „dreistufigen“ chemischen Reaktion zu Kohlendioxid ($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (Koksverbrennung); $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ (Kohlenmonoxidbildung); $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$ (Eisen + Kohlendioxid)). Das Eisenoxid wird also durch Reduktion des Sauerstoffs zu „reinem“³ Eisen, und das **flüssige Roheisen** sammelt sich im unteren Teil des Hochofens.

¹ Der Begriff Festigkeit wird später, in **Abschnitt 2.4.2**, näher erläutert.

² Der nachfolgend erläuterte Herstellroute orientiert sich am integrierten Hüttenwerk von ThyssenKrupp Steel in Duisburg Bruckhausen und betrachtet die Herstellung von Bandstahl/Flachstahl (also keine Stahlprofile oder -rohre).

³ Anführungszeichen wurden verwendet, da im Roheisen noch Begleitelemente gelöst sind.

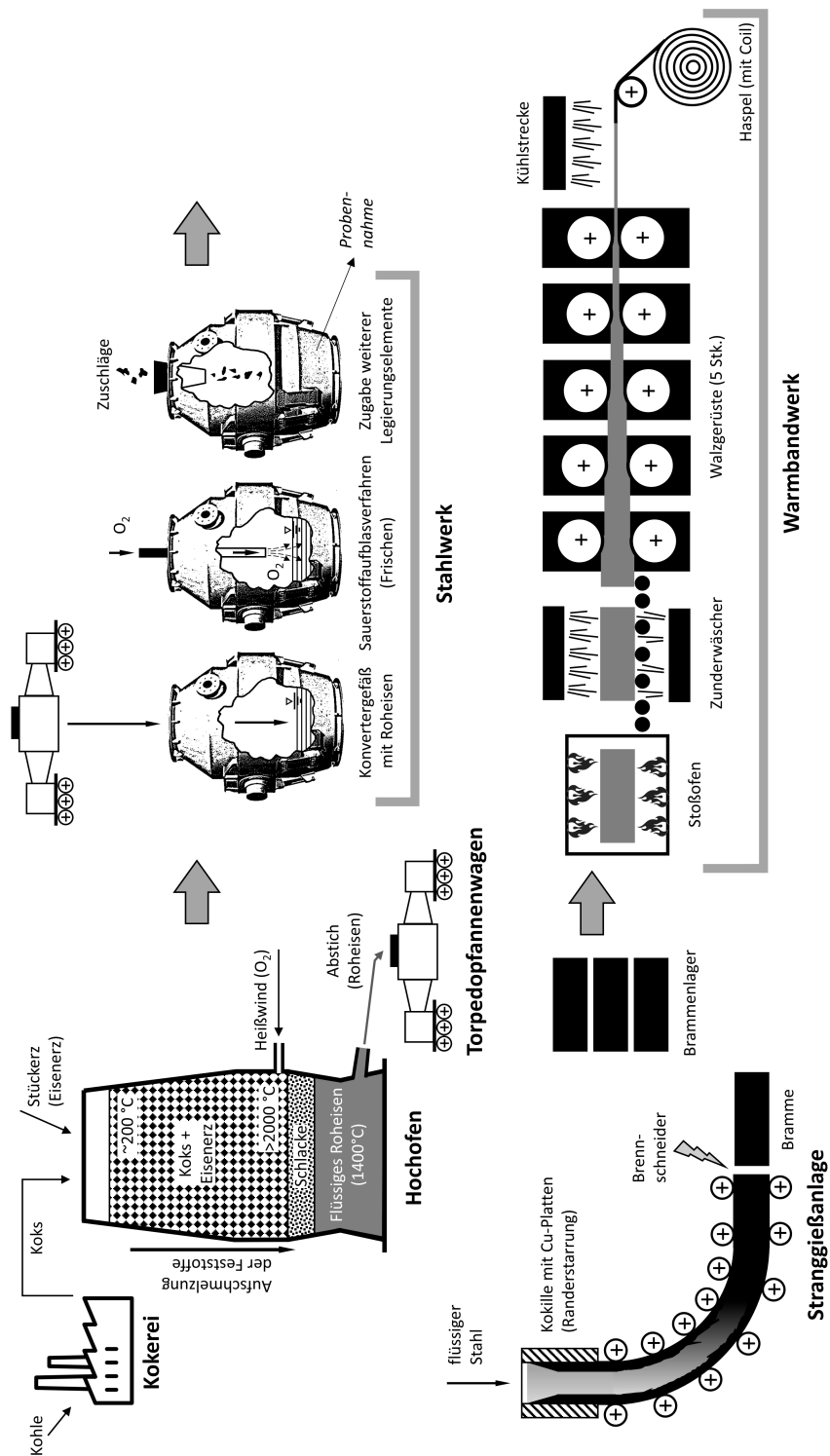


Bild 2.1 Zum Herstellungsprozess von Stahl in einem integrierten Hüttenwerk: vom Eisenerz bis zum aufgewickeltem Stahlblech (Coil)

Kohle selbst ist als Reduktionsmittel ungeeignet, da bei der Verbrennung zu viel Schwefel und Ruße entstehen, die wiederum das Roheisen zu stark verunreinigen und zu nachteiligen Ablagerungen im Hochofen führen.

Das Roheisen kann im unteren Teil des Hochofens durch den **Abstich** entnommen, [Bild 2.3](#) (rechts), und in sog. **Torpedopfannenwagen** zum **Stahlwerk** transportiert werden, [Bild 2.1](#), [Bild 2.5](#) (links). Die verbleibenden aufgeschmolzenen Restbestandteile des Erzes schwimmen aufgrund der geringeren Dichte über dem Roheisen auf und bilden die sog. **Schlacke**. Diese kann ebenfalls über den Abstich entnommen und z.B. im Straßenbau verwertet werden. Das flüssige Roheisen enthält noch gelöste **Begleitelemente** wie aus dem Koks stammenden Kohlenstoff sowie z.B. Schwefel, Silizium, Mangan oder Phosphor, die aus der Schlacke in die Eisenschmelze diffundieren.



Bild 2.2 Eisenerzgestein (links), Stahlprobe aus einem Stahlwerk zur Analyse der chemischen Zusammensetzung der Stahlschmelze

Im **Stahlwerk** wird das flüssige Roheisen im wesentlichen⁴ drei unterschiedlichen Prozessen unterzogen, so dass am Ende aus dem Roheisen der Stahl in der gewünschten chemischen Zusammensetzung resultiert. Das Roheisen wird über das Schienennetz in Torpedopfannenwagen, [Bild 2.5](#) (links), im flüssigen Zustand angeliefert und in sog. **Roheisenpfannen**, [Bild 2.4](#), umgefüllt und den einzelnen Prozessschritten zugeführt:

- 1. Entschwefelung:** Das unerwünschte Begleitelement Schwefel (S) wird im Roheisen in einem separaten Prozess reduziert, [Bild 2.4](#) (links). Der Schwefel bildet mit dem Eisen sog. Schwefelsulfide ($S + Fe \rightarrow FeS$), die im späteren Stahl zu festen Ausscheidungen führen. Diese wiederum bilden bei Warmumformprozessen, oder gar beim Schweißen Ausgangspunkte für den sog. Warmbruch. Stahl mit hohen Schwefelgehalten tendiert also zum Warmbruch, weshalb der Schwefelgehalt, z.B. bei schweißgeeignetem Baustahl begrenzt werden muss ($S < 0.025 \%$ (Schmelzeanalyse) nach DIN EN 10025 [[DIN EN 10025](#)]). Dazu wird dem Roheisen in einem vorgeschalteten Prozess ein Entschwefelungsmittel zugeführt, in der Regel Calciumoxid (CaO), der mit dem Eisensulfid zu Calciumsulfid reagiert ($S + CaO \rightarrow CaS + O$) und in die Schlacke übergeht.
- 2. Frischen mit Sauerstoff:** Neben Schwefel müssen weitere Begleitelemente, z.B. Silizium (Si), Phosphor (P) oder Mangan (Mn), reduziert/entfernt werden. Außerdem weist das Roheisen einen zu hohen Anteil an gelöstem Kohlenstoff auf, der ebenfalls herabgesenkt werden muss, um den Stahl zäh/duktile und damit umformbar zu machen. Dazu

⁴ Hier wird nur eine sehr verkürzte Darstellung gegeben; eine detaillierte Darstellung übersteigt den Umfang des Buches und definiert ein eigenständiges, wissenschaftliches Fachgebiet, die Metallurgie.

wird das Roheisen in den Konverterbehälter überführt, **Bild 2.4** (rechts), und Sauerstoff (O_2) eingeblasen. Das Einblasen kann dabei über eine Lanze von oben (Sauerstoffaufblasverfahren⁵), **Bild 2.1** oder durch Bodendüsen im Konvertergefäß von unten (Sauerstoffbodenblasverfahren) geschehen. Dieser Prozess wird in der „Montan-Sprache“ als **Frischen** bezeichnet. Der Sauerstoff verbindet sich mit dem gelösten Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid ($C + O \rightarrow CO$), dass als Abgas aus dem Konverter geführt wird. Bei dieser Oxidation entsteht im erheblichen Maße Wärme, die den Stahl flüssig hält aber auch eine Kühlung der Schmelze erfordert. Diese Kühlung wird typischerweise durch Zugabe von **Schrott** realisiert. Weitere Begleitelemente, wie Si, P oder Mn, können ebenfalls durch den eingeblasenen Sauerstoff und die resultierenden Oxidationsprozesse minimiert werden (z.B. $Mn + O \rightarrow MnO$ oder $Si + 2O \rightarrow SiO_2$). Die Reaktionsprodukte, zum Beispiel MnO oder SiO_2 , werden anschließend in die Schlacke abgeschieden⁶.

3. Legieren mit Zuschlagsstoffen: Durch gezielte Zugabe von Legierungselementen erhält der Stahl seine finale chemische Zusammensetzung, die wiederum Einfluss auf seine Eigenschaften hat. Zuschlagsstoffe wie Chrom (Cr), Nickel (Ni), Wolfram (W), Molybdän (Mo) oder Vanadium (V) haben selbst bei z.T. sehr geringen Anteilen Einfluss auf Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit, Zähigkeit oder Zerspanbarkeit. Durch wiederholte Probenentnahme aus der Schmelze wird parallel zur Produktion die Zusammensetzung kontinuierlich geprüft bis die gewünschte Rezeptur eingestellt ist. Dazu werden die Proben mittels Lanzen aus der Schmelze entnommen und z.B. über ein Rohrpostsystem in das stahlwerksinterne Labor transferiert und analysiert, **Bild 2.2** (rechts).

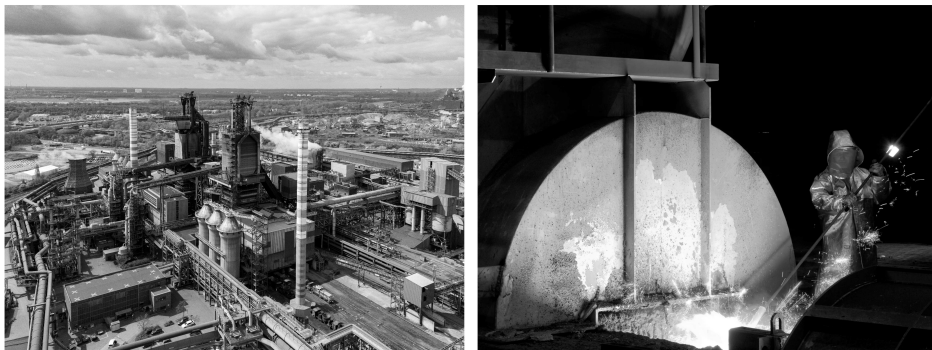


Bild 2.3 Luftbild der Hochöfen 8 und 9 von ThyssenKrupp in Duisburg Hamborn. Deutlich sichtbar im Vordergrund der Hochöfen sind die drei Winderhitzer (Zylinder), in denen die einzublasende Luft erwärmt wird (links), Abstich am Hochofen (rechts); ©thyssenkrupp Steel Europe

Neben dem Einsatz von flüssigem Roheisen wird vielerorts in sogenannten **Elektrostahlwerken** ausschließlich Stahlschrott als Ausgangsstoff eingeschmolzen. Hierbei entfällt der Hochofenprozess zur Gewinnung von Roheisen. Die für das Einschmelzen notwendige Wärme wird über elektrische Energie in **Elektrolichtbogenöfen** oder in **Induktionsöfen** erzeugt. Der eingeschmolzene Stahl wird dann ähnlich zu den oben genannten Prozess-

⁵ Auch LD-Verfahren (Linz-Donawitz) genannt

⁶ Insbesondere für die Bildung und Abscheidung von SiO_2 oder auch P_2O_5 (Entphosphorung) sind die chemischen Reaktionen komplex und hier vereinfacht dargestellt. Für eine stabile Schlackenbildung der Oxidationsprodukte ist zusätzlich CaO von Nöten.



Bild 2.4 Oxygenstahlwerk von ThyssenKrupp Steel in Duisburg Bruckhausen mit Roheisenbehälter (Roheisenpfanne) und Entschwefelung im Vordergrund (beachte Funkenflug) (links), Einfüllen von Roheisen in den Konverter (rechts); ©thyssenkrupp Steel Europe

schritten **1.** bis **3.** aufbereitet, so dass der flüssige Stahl am Ende die gewünschten chemischen Zusammensetzung aufweist.

Der flüssige Stahl kann anschließend in einer **Stranggiessanlage** (SGA) „in Form gegossen“ werden. Diese liegt in der Regel in direkter Nachbarschaft zum Stahlwerk, so dass der flüssige Stahl in der Pfanne direkt überstellt werden kann. Über eine Verteilerrinne wird der Stahl in eine **Kokille** gegossen, dessen Wandungen aus gekühlten Kupferplatten bestehen. Der Stahl erstarrt im Randbereich und bildet eine feste Schale, die den (noch) flüssigen Kern einschließt. Durch vertikale Schwingungen der Kokille wird verhindert, dass der Stahl an der Wandung fest haftet, so dass dieser unterhalb der Kokille über Rollen herausgeführt werden kann. Der vertikale Strang wird horizontal abgelenkt und entlang der Förderstrecke fortlaufend über Düsen mit Wasser gekühlt, so dass der flüssige Kern nach und nach erstarrt, [Bild 2.1](#).



Bild 2.5 Torpedopfannenwagen vor dem Stahlwerk (links), erstarrte aber noch glühende Bramme am Ausgang der Stranggießanlage (rechts); ©thyssenkrupp Steel Europe

Typische Fördergeschwindigkeiten moderner SGAs liegen bei **1–2 m/min**. Dabei variieren die Strangdicken üblicherweise zwischen **10 und 40 cm**, typische Strangbreiten sind **1 bis 2 m**. Der kontinuierliche Strang wird am Ende des Prozesses mit einem Brennschneider

in Stahlquader mit Längen von **5 bis 20 m**, sog. **Brammen**, zerteilt, [Bild 2.5](#) (rechts). Diese können bis zur weiteren Verarbeitung zwischengelagert werden⁷.

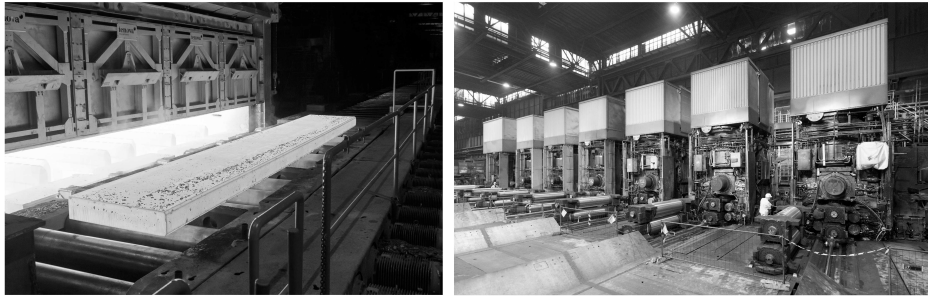


Bild 2.6 Stoßofen (Hubbalkenofen) mit glühender Bramme im Warmbandwerk (links), Walzgerüst mit davor bereitstehenden Wechselwalzen (rechts); ©thyssenkrupp Steel Europe

Als nächstes werden die Brammen im **Warmbandwerk** zu Stahlband mit Dicken von **0,8 mm bis 25 mm** ausgewalzt. Dazu werden die abgekühlten und z.T. korrodierten Brammen (je nach Lagerort und -zeit) in einem **Stoßofen** (Hubbalkenofen, vgl. [Bild 2.6](#) (links)) bis zu Temperaturen von $>1200^{\circ}\text{C}$ aufgeheizt. Bei diesen Temperaturen ist der Stahl „erweicht“ und besser verformbar, allerdings auch reaktionsfreudiger, so dass an der Oberfläche sofort Oxidation mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft (Korrosion/Rostbildung) einsetzt. Deshalb durchfahren die Brammen zunächst einen sog. **Zunderwäscher**, in dem mit hohem Wasserdruck die Oxidschicht an der Oberfläche, sog. **Zunder**, abgespült wird. Im Anschluss daran folgt der eigentliche Walzvorgang, bei dem die glühende Bramme über mehrere Walzgerüste (z.B. 7 Gerüste, vgl. [Bild 2.6](#) (rechts)) sukzessiv dünner gewalzt wird, so dass nach dem letzten Walzgerüst die final gewünschte Banddicke vorliegt, [Bild 2.7](#) (links). Dazu beachte man, dass das Stahlband aufgrund der Dickenabnahme eine beachtliche Längenänderung erfährt. Eine Bramme von 10 m Länge und 20 cm Dicke, die auf 2 mm Dicke ausgewalzt wird, wird so zu einem Band von 1 km Länge (Dickenabnahme um Faktor 100 und resultierende Längenzunahme: $10\text{ m} \times 100 = 1000\text{ m}$). Am Ende der Walzstrecke hat das „warme“ Band (daher der Begriff Warmbandwerk) noch **Temperaturen von $>900^{\circ}\text{C}$** . Damit ist gewährleistet, dass der Stahl ein einheitliches **Gefüge**⁸ aufweist, nämlich das sog. Austenitgefüge. Erst in der nachfolgenden **Kühlstrecke** wird das Stahlband gezielt abgekühlt. Hierzu durchfährt das Stahlband eine Strecke mit hintereinander geschalteten Düsenbalken, über die in großen Mengen Wasser auf die Bandoberfläche gesprüht werden. Dabei kühlt das Band von außen nach innen auf Temperaturen von **ca. 600°C** ab und wird schließlich in einem sog. **Haspel** zum einem sog. **Coil** aufgewickelt (aufgehaspelt). Sowohl die Abkühlgeschwindigkeit (resultierend aus der eingestellten Wassermenge) als auch die finale Haspeltemperatur sind entscheidend für die resultierende Mikrostruktur (Gefüge, vgl. [Abschnitt 2.2](#)) und die mechanischen Eigenschaften des Stahls. Mit dem Coil und den

⁷ Neben Stranggießanlagen kann der Stahl auch in sog. Gießwalzanlagen verarbeitet werden. Dabei wird der Strang nach dem Vergießen direkt ausgewalzt. Das Aufwärmen der Brammen nach der Abkühlung/Lagerung entfällt.

⁸ vgl. dazu im Detail [Abschnitt 2.2](#).

festgelegten mechanischen Eigenschaften ist der Stahl prinzipiell verkaufsfähig, [Bild 2.7](#) (rechts). Dies geschieht teilweise auch, wenngleich oft weitere **Veredelungsschritte** folgen.

So können die Warmbandcoils in sog. **Kaltbandwerken** bei Raumtemperatur weiter ausgewalzt werden, um so **Banddicken bis 0,1 mm** zu erzielen (sog. **Weißblech**, z.B. für die Verpackungsindustrie). Dabei wird jedoch auch die im Warmbandwerk eingestellte Mikrostruktur in Walzrichtung gestreckt, wodurch sich die mechanischen Eigenschaften ändern. Insbesondere nimmt, bedingt durch die sog. **Kaltverfestigung**, das Verformungsvermögen, d.h. der Umfang der möglichen plastischen Verformung bis zum Materialversagen, des Stahls ab.

Durch Erhitzen der kaltgewalzten Bänder (**Kaltband**) auf Temperaturen zwischen **500°C–700°C** kann die ursprüngliche Mikrostruktur wieder hergestellt werden. Dazu erhitzt man die Coils entweder in großen zylinderförmigen Öfen (sog. **Haubenglühen**) oder die abgewickelten Bändern kontinuierlich in Durchgangsöfen (sog. **Kontiglühen**). Man spricht auch vom **Rekristallisationsglühen**.



Bild 2.7 Blick zwischen die Walzgerüste auf das ausgewalzte, glühende Stahlblech (links), Warmband-Coils im Lager von ThyssenKrupp Steel in Duisburg Bruckhausen (rechts); ©thyssenkrupp Steel Europe

Zur Verbesserung des Korrosionsschutzes wird der Stahl häufig mit einer **Oberflächenbeschichtung** versehen. Hier sind insbesondere die verzinkten Oberflächen zu erwähnen. **Zink** (Zn) ist bzgl. seiner elektrochemischen Eigenschaften unedler als Eisen. Wird Stahl mit einem Zinküberzug versehen, so oxidiert das Zink anstelle des Stahls und wirkt als sog. **Opferanode**. Zinküberzüge können in kontinuierlichen Prozessen, z.B. im Tauchverfahren (**Feuerverzinkung**), aufgetragen werden. Dazu werden die Coils abgewickelt, und zu einem Endlosband aneinander geschweißt. Anschließend durchläuft das Band ein Säurebad zur Reinigung, einen Vorwärmofen und das Zinkbad bei ca. **480°C**, in dem ein Zinkfilm von ca. **50–150 µm** aufgetragen wird. Zuletzt wird das beschichtete Band getrocknet, aufgewickelt und in einzelne Coils getrennt, [Bild 2.8](#).

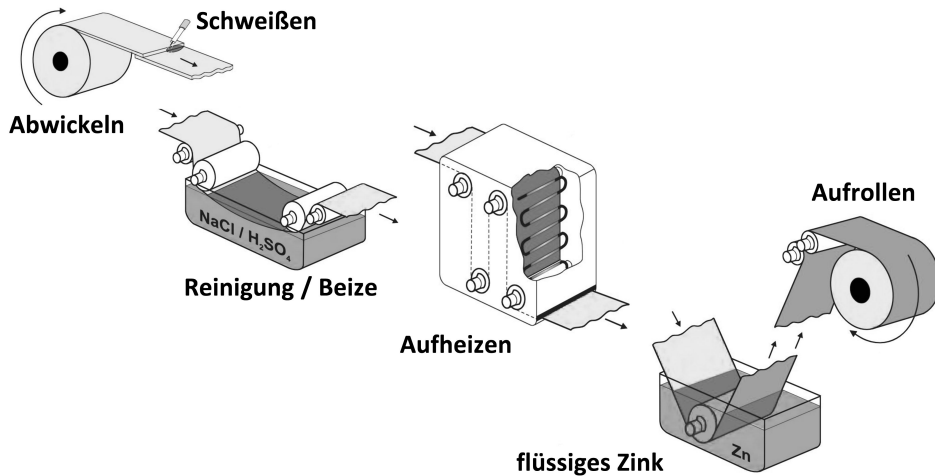


Bild 2.8 Schematische Darstellung des kontinuierlichen Feuerverzinkungsprozess von Stahlband



Zusammenfassung (Vom Eisenerz zum Stahl...)

In **integrierten Hüttenwerken** wird die gesamte Herstellroute des Stahls, d.h. vom Eisenerz bis zum verkaufsfähigem Stahlblech, abgebildet. Die dabei anfallenden Prozessgase in der Kokerei oder am Hochofen (z.B. Kohlenmonoxid, Methan oder Wasserstoff) werden aufgefangen, aufbereitet und als Energieträger auf der Hütte verwendet.

Im **Hochofen** werden die Ausgangsstoffe Eisenerz und Koks eingeschmolzen. Dabei entsteht flüssiges Roheisen.

Das Roheisen wird im **Stahlwerk** gefrischt; durch Einblasen von Sauerstoff werden Kohlenstoffgehalt und Begleitelemente, wie Schwefel oder Phosphor, reduziert. Durch Zulegieren weiterer Elemente, z.B. Chrom, Nickel oder Wolfram, wird die finale Stahlrezeptur festgelegt.

Der flüssige Stahl wird in **Stranggießanlagen** kontinuierlich zu festen **Brammen** vergossen.

Die abgekühlten Brammen werden im **Warmbandwerk** erneut aufgeheizt, entzündert und schließlich im mehrstufigen Walzgerüst zu einem langen Band gewalzt. Am Ende der Walzstraße befindet sich eine Kühlstrecke, in der durch gezieltes Abkühlen des Stahls das finale Gefüge und die mechanischen Eigenschaften eingestellt werden. Das sog. **Warmband** wird schließlich im **Haspel** zu einem **Coil** aufgewickelt.

In weiteren Veredelungsschritten kann der Stahl **kaltgewalzt** (inklusive **glühen**) oder mit **Zink beschichtet** werden.

■ 2.2 Mikrostrukturen im Stahl

2.2.1 Atome und Gitterstrukturen

Alle Werkstoffe bestehen aus **Atomen**. Hierbei gibt es unterschiedliche Atome, die sich im Atomgewicht oder der Anzahl der Elektronen und Protonen unterscheiden und die die verschiedenen chemischen Elemente repräsentieren.

Grundsätzlich kann zwischen **A. Reinstoffen**, z.B. elementares Eisen (Fe) oder **B. Stoffgemischen** (z.B. Stahl, Fe-C) oder **C. chemischen Verbindungen** (z.B. Eisenoxid, Fe_2O_3 oder Eisencarbid/Zementit, Fe_3C) unterschieden werden. Außerdem können Stoffe in unterschiedlichen Aggregatzuständen (fest – flüssig – gasförmig) vorliegen. Man spricht auch von der festen, der flüssigen oder der gasförmigen Phase, wobei die Unterscheidung ausschließlich in der kinetischen Energie und der örtlichen Anordnung der Atome begründet ist.

So bewegen sich Atome und Moleküle im gasförmigen Zustand stochastisch im Raum, stoßen mit anderen Teilchen zusammen und ändern so permanent ihre Bewegungsrichtung. Die mittlere Geschwindigkeit von Luftmolekülen bei Raumtemperatur beträgt beispielsweise 400–500 m/s (abhängig vom Molekül: O_2 , N_2 , CO_2 ...) bei einer mittleren freien Weglänge (durchschnittliche Weglänge eines Teilchen bis zur Kollision mit einem anderen Teilchen) von ca. 68 nm (Nanometermeter = 10^{-9} mm).

Im flüssigen Zustand sind die Atome und Moleküle dichter angeordnet, wodurch erste, vereinzelte Wechselwirkungen untereinander auftreten. Es bilden sich erste kleine „Cluster“ von Atomen, also lokale „Anhäufungen“ von Atomen, die sich gemeinsam und in einer gewissen Nahordnung zueinander im Raum bewegen.

Der feste Zustand, insbesondere bei metallischen Festkörpern, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Atome in periodischen Strukturen, dem sog. **Atomgitter** angeordnet sind. Es existieren Wechselwirkungen zwischen den Atomen, die mit zunehmendem Atomabstand abnehmen. Der kleinste Baustein des Atomgitters ist die **Elementarzelle**. Aus ihr ergibt sich durch sukzessives Aneinanderreihen (also periodisches Fortsetzen) in alle drei Raumrichtungen das Atomgitter, [Bild 2.9](#).

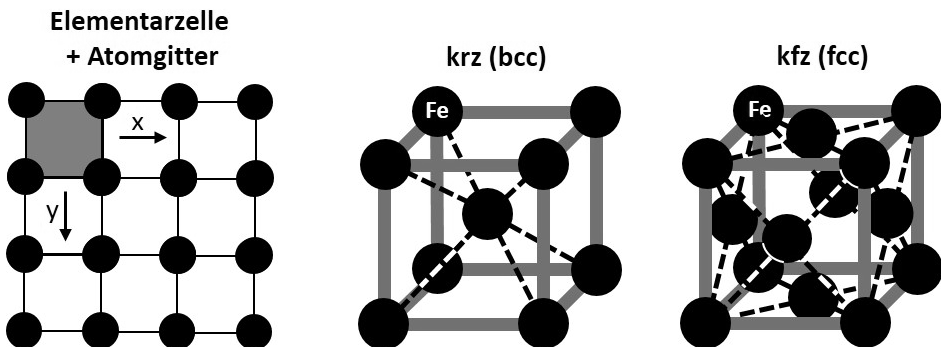


Bild 2.9 Atomgitter als periodische Fortsetzung der Elementarzelle (links), Elementarzellen von Eisen (krz: α -Eisen; kfz: γ -Eisen) (Mitte/rechts)

2.2.1.1 Reinstoffe, z.B. Eisen

Eisen (Fe) ist ein chemisches Element und ist bei Raumtemperatur im festen Aggregatzustand. Schaut man in das Periodensystem der Elemente, so findet man für Eisen ein Atomgewicht von $m_{\text{Fe}}^{\text{A}} = 55,85 \cdot (1,66 \cdot 10^{-27})$ kg. Außerdem besitzt Eisen die Ordnungszahl 26, also 26 Protonen im Kern und somit auch 26 Elektronen in der Atomhülle.

Bei Raumtemperatur sind die Fe-Atome in einem **kubischen-raumzentrierten** (krz; engl. *body-centered-cubic*, BCC) Gitter angeordnet, Bild 2.9 (Mitte). Stellt man sich die Elementarzelle als Würfel vor, so sind Atome auf den Ecken und im Zentrum des Würfels angeordnet. Man spricht auch von **α -Eisen**. Oberhalb von 911°C ordnen sich die Atome in einem **kubisch-flächenzentrierten** Gitter an (kfz; engl. *face-centered-cubic*, FCC). Hierbei sind die Atome auf den Ecken und den Flächen des Würfels angeordnet, Bild 2.9 (rechts). Man spricht von **γ -Eisen**. Bei weiterer Erwärmung bildet sich wieder oberhalb von 1392°C α -Eisen (zur Unterscheidung auch **δ -Eisen** genannt) bis das Eisen schließlich oberhalb von 1536°C schmilzt, also das Atomgitter zerfällt und in die flüssige Phase übergeht.

2.2.1.2 Stoffgemische, z.B. Stahl

Das Atomgitter von Stahl enthält Fe- und C-Atome sowie Atome weiterer Legierungselemente, z.B. Cr- oder Ni-Atome. Dabei hat das Kohlenstoffatom eine Atommasse von $m_{\text{C}}^{\text{A}} = 12,01 \cdot (1,66 \cdot 10^{-27})$ kg und eine Ordnungszahl von 6. Es ist damit deutlich kleiner als die Fe-Atome. Cr und Ni hingegen stehen zwei Positionen vor bzw. hinter Fe im Periodensystem, haben also eine ähnliche Atomgröße.

Auch Stahl ist bei Raumtemperatur fest, d.h. die Atome sind in einem Gitter angeordnet. Allerdings befinden sich nun im Gitter verschiedene Atome, z.B. Fe-, C-, Cr- und Ni-Atome. Man spricht von einem **Mischkristall**. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten, wie die „Fremdatome“ im ursprünglichen Eisengitter „platziert werden“:

- Fremdatome ähnlicher Größe ersetzen die Eisenatome auf deren ursprünglichen Plätzen. Man spricht auch von Substitution der Fe-Atome bzw. von **Substitutionsatomen**.
- Deutlich kleinere Fremdatome besetzen sog. Zwischengitterplätze, indem sie zwischen den ursprünglichen Fe-Atomen angeordnet sind. Man spricht auch von **Zwischengitteratomen**.

Es ist leicht einzusehen, dass C als Zwischengitteratom fungiert, wohingegen Cr und Ni Fe-Atome substituieren, vgl. Bild 2.10.

Dabei ist nicht festgelegt, welche Fe-Atome im Gitter durch Cr und Ni substituiert werden bzw. zwischen welchen Fe-Atomen sich die C-Atome anordnen. Maßgeblich ist nur, dass die Anzahl der Fremdatome im Gitter die prozentuale chemische Zusammensetzung der Stahlrezeptur widerspiegeln. Das bedeutet beispielsweise, dass bei 1 % C-Gehalt im Stahl auf 100 Fe-Atome im Gitter 1 C-Atom auf einem Zwischengitterplatz vorkommt.

Verbleibt abschließend noch die Frage, in welchen Gitterkonfigurationen sich die verschiedenen Atome im Stahl anordnen. Diese Frage ist nicht leicht zu beantworten. Abhängig von der Stahlrezeptur, i.w. vom C-Gehalt, und von den Herstellbedingungen, i.w. von der Abkühlgeschwindigkeit in der Kühlstrecke des Warmbandwerkes, können sich unterschiedliche Gitterkonfigurationen ausbilden, für die sich spezifische Bezeichnungen etabliert haben:

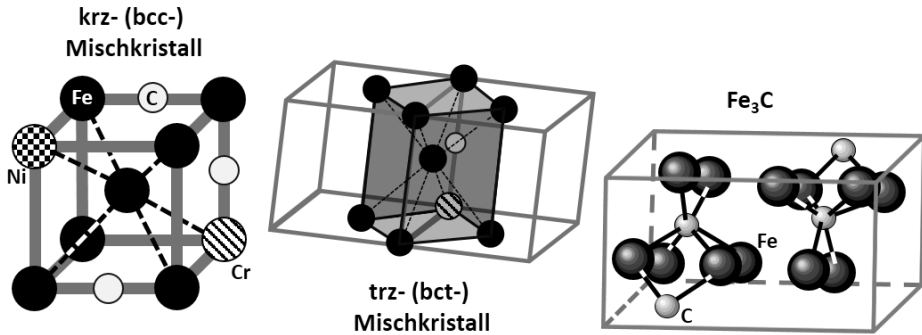


Bild 2.10 Möglicher Mischkristall von Stahl am Beispiel eines BCC-Gitters (z.B. Ferrit) (links), Tetragonal-raumzentrierter Mischkristall (z.B. Martensit) (Mitte), Elementarzelle von Zementit (Fe_3C) mit einem sog. orthorhombischen Gitter (rechts)

- **Austenit:**⁹ Mischkristall mit kfz-Atomgitter (angelehnt an Eisen oft als **γ -Mischkristall** bezeichnet, Bild 2.9).
- **Ferrit:** Mischkristall mit krz-Atomgitter (oft auch als **α -Mischkristall** bezeichnet).
- **Martensit:**¹⁰ Mischkristall mit **tetragonalem-raumzentrierten** (trz; engl. body-centered tetragonal, bct) Atomgitter. Hierbei entspricht die Elementarzelle einem Quader mit drei unterschiedlichen Kantenlängen, Bild 2.10 (Mitte).

Sowohl Austenit als auch Ferrit bilden sich durch Umordnungsprozesse, das heißt durch Diffusion der Atome auf andere Gitterplätze. Martensit hingegen bildet sich diffusionslos bei sehr schnellen Abkühlprozessen. Hierbei kommt es zur Scherung des Gitters zu einer neuen Elementarzelle, die Nachbarschaftsbeziehungen der Atome bleiben dabei erhalten.

Die unterschiedlichen Gitterkonfigurationen werden auch häufig als **Phasen** bezeichnet. Dabei können im Stahl verschiedene, räumlich verteilte oder eine alleinige Phase auftreten, vgl. Abschnitt 2.2.3.

2.2.1.3 Chemische Verbindungen, z.B. Zementit Fe_3C

Neben Mischkristallen können sich im Stahl auch chemische Verbindungen durch chemische Reaktionen ausbilden. Zementit bzw. Eisencarbid z.B. bildet sich im Stahl ab einem Kohlenstoff Masseanteil von ca. 0,02 %. Hierbei kann der Kohlenstoff nicht mehr vollständig auf Zwischengitterplätzen eingebunden werden, so dass dieser mit den Fe Atomen zu Fe_3C reagiert und ein eigenes Atomgitter bildet. Insbesondere haben die Fe- und C-Atome, anders als beim Mischkristall, alle einen fest definierten Gitterplatz. Fe_3C bildet ein sog. **orthorhombisches Atomgitter**. Die Elementarzelle enthält 12 Fe-Atome und 4 C-Atome, was exakt dem Verhältnis der Elemente in der chemischen Formel entspricht, Bild 2.10 (rechts).

⁹ Benannt nach Sir William Chandler Roberts-Austen (1843–1902).

¹⁰ Benannt nach Adolf Karl Gottfried Martens (1850–1914).

2.2.2 Erstarrung und Gefüge

Stähle erstarren, abhängig vom C-Gehalt, bei unterschiedlichen Temperaturen¹¹, Bild 2.12 (links). So liegt der Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur bei einem Kohlenstoff-Anteil von 0 % (also reines Eisen) bei 1536°C und bei einem C-Gehalt von 2 % bei etwas unter 1400°C. Hierbei ist anzumerken, dass die prozentuale Angabe des Kohlenstoffs C auf zwei Arten geschehen kann:

- Massenanteil

$$c_C = \frac{m_C}{m_{\text{ges}}} \quad (2.1)$$

- Atomanteil

$$y_C = \frac{n_C}{n_{\text{ges}}} \quad (2.2)$$

Die Variablen m_C und $m_{\text{ges}} = m_C + m_{\text{Fe}}$ repräsentieren die Masse des Kohlenstoffs in der Stahlprobe bzw. die Gesamtmasse der Stahlprobe. In gleicher Weise stellt n_C und $n_{\text{ges}} = n_C + n_{\text{Fe}}$ die Anzahl der C-Atome bzw. die Gesamtatomzahl der Stahlprobe dar. Betrachtet man z.B. eine Stahlprobe mit 1 Mol, so enthält diese $n_{\text{ges}} = N_A$ Atome ($N_A = 6,0237 \cdot 10^{23}$, Avogadro-Zahl). Damit ergibt sich beispielsweise für 1 Mol Stahl mit einem Kohlenstoffanteil von 2 Massen-% unter Verwendung von $n_{\text{Fe}} = N_A - n_C$:

$$c_C = 0,02 = \frac{m_C}{(m_C + m_{\text{Fe}})} = \frac{n_C m_C^A}{n_C m_C^A + n_{\text{Fe}} m_{\text{Fe}}^A} \Leftrightarrow n_C = \frac{N_A}{\frac{49 m_C^A}{m_{\text{Fe}}^A} + 1}, \quad (2.3)$$

und damit die Anzahl von $n_C = 5,22 \cdot 10^{22}$ Kohlenstoffatomen.

Betrachtet man die Erstarrung einer Stahlschmelze, vgl. Bild 2.11 (oben), so sind in der Schmelze alle Atome ungeordnet und frei beweglich. Mit Erreichung der Erstarrungstemperatur startet die Formation der Atomgitter, ausgehend an verschiedenen, stochastisch verteilten sog. Nukleationspunkten. Die Orientierungen der einzelnen Gitter ist dabei beliebig und unabhängig voneinander. Mehr noch, die lokal begrenzten Gitter wachsen in alle Richtungen und treffen nach einer gewissen Zeit aufeinander und behindern sich bei der weiteren räumlichen Ausdehnung. Es kommt zur Ausbildung von **Korngrenzen**, die die unterschiedlichen sog. **Körner** (auch **Kristallite** genannt), also Gitterstrukturen mit unterschiedlicher Orientierung, voneinander abgrenzen. Der resultierende Festkörper besteht folglich aus einer Vielzahl von Körnern, weshalb von einem sog. **Polykristall**¹² gesprochen wird. Die Gesamtheit der Orientierungen der Körner wird auch als **Textur** bezeichnet. Die polykristalline Struktur kann bei Stahl in sog. Schliffbildern mittels metallografischer Methoden sichtbar gemacht werden. Dazu werden die Probenoberflächen geschliffen, poliert und angeätzt, um sie anschließend unter dem Mikroskop zu analysieren. In einigen Fällen können Polykristalle auch ohne Probenpräparation und Mikroskopie beobachtet werden. Feuerverzinkte Bauelemente zeigen meist eine fleckige Oberfläche. Man spricht auch von Zinkblumen, die nichts weiteres als die polykristalline Struktur des erstarrten Zinks widerspiegeln, Bild 2.11 (links unten).

¹¹ Der Einfluss von zusätzlichen Legierungselementen wird hier nicht näher betrachtet.

¹² Im Gegensatz dazu besteht ein **Einkristall** nur aus einem Korn, also aus einem einheitlichen Atomgitter ohne Korngrenzen.

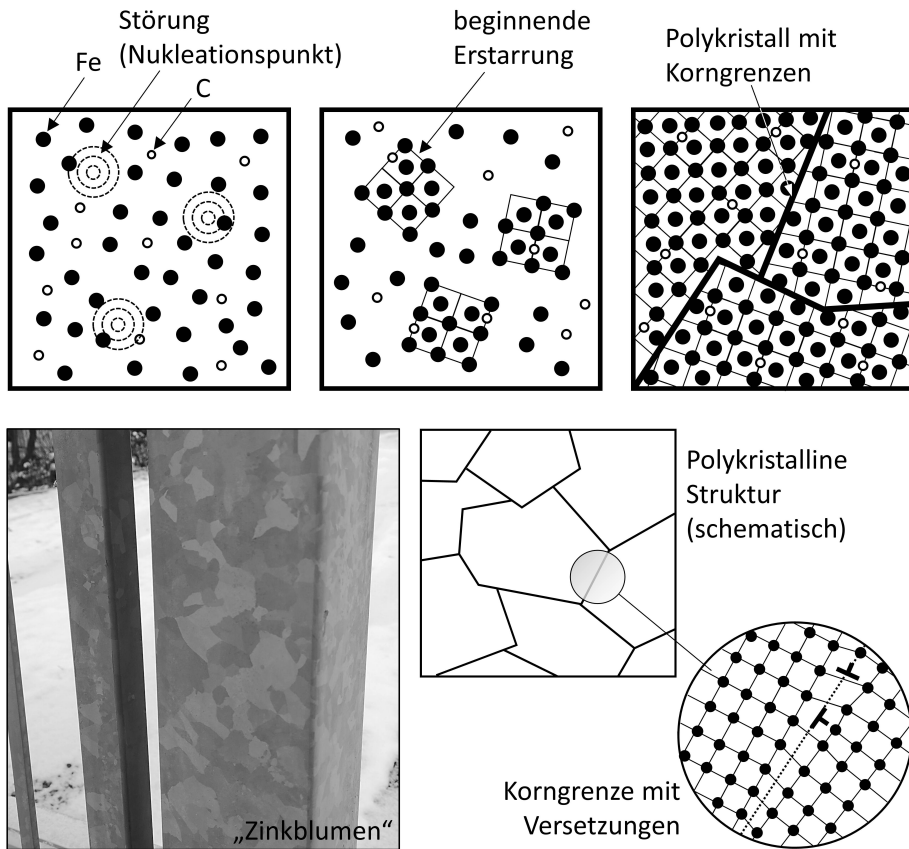


Bild 2.11 Illustration des Erstarrungsprozesses und die Entstehung eines Polykristalls mit Korngrenzen (oben), Polykristall im Alltag, sichtbar an einem feuerverzinkten Gartenzaun (unten links), Darstellung einer Korngrenze mit „ins Leere laufende“ Atomen (Versetzungen) (unten rechts)

Wie viele Kristallite in welcher Größe im Polykristall vorliegen, entscheidet sich über den Abkühlprozess. Hier kann folgender Mechanismus notiert werden: je höher die Abkühlgeschwindigkeiten, umso mehr Nukleationskeimen beginnt simultan die Erstarrung. Demzufolge resultieren zahlreiche, feine Körner und – ergo – viele Korngrenzen. Hieraus resultieren die sog. **Feinkornstähle**, die in der Regel hohe Festigkeiten aufweisen. Demgegenüber führen langsame Abkühlgeschwindigkeiten zu wenigen Nukleationspunkten, so dass die wenigen Körner über weite Strecken ungehindert wachsen können und so einen grobkörnigen Polykristall bilden.

Bild 2.11 (unten rechts) zeigt, dass auf den Korngrenzen, aufgrund der verschiedenen Orientierungen der Kristallite, einige Atome „ins Leere laufen“, also zu einer Seite kein direktes Nachbaratom besitzen. Man spricht von sog. **Versetzungen**. Außerdem wird im Bereich der Korngrenze das Atomgitter gestaucht oder aufgeweitet, um eine möglichst energetisch günstige Atombindung über die Korngrenzen hinweg zu gewährleisten. Dies führt zu Gitterverspannungen. Beide Effekte, Versetzungen und Gitterverspannungen, steigen mit zu-

nehmender Anzahl an Korngrenzen und haben einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. So kann bei Stählen durch gezieltes Einstellen eines feinkörnigen Gefüges die Festigkeit und die Duktilität gesteigert werden.

Zusätzlich zur polykristallinen Mikrostruktur können Stähle auch in unterschiedlichen Phasen, also Atomgitterkonfigurationen, vorliegen. Abhängig von Temperatur, C-Gehalt und Abkühlgeschwindigkeit können sich im Stahl eine Phase, mehrere koexistierende Phasen und lokal begrenzte chemische Verbindungen (Zementit) ausbilden. Die Gesamtheit der Mikrostruktur, das heißt Textur und Phasenkonfiguration repräsentiert das **Gefüge**. Im Folgenden Abschnitt sollen nun einige für den Stahl relevante Gefügearten diskutiert werden. Dabei soll der Fokus auf den Eigenschaften und die Entstehung verschiedener Phasenkonfigurationen und des Zementits gelegt werden.

2.2.3 Eisen-Kohlenstoff- und (isothermes) Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm

In [Abschnitt 2.2.1](#) wurde die unterschiedlichen, für Stahl relevanten Gitterstrukturen vorgestellt und die zugehörigen Phasen Ferrit, Austenit und Martensit eingeführt. Abhängig vom C-Gehalt können sich mit der Erstarrung Ferrit- bzw. Austenit-Kristallite ausbilden. Bei weiterer Abkühlung können diese Phasen wechseln, um so energetisch günstigere Gitterkonfigurationen anzunehmen. Welche Phase(n), bei einer definierten Temperatur und einem bestimmten C-Gehalt vorliegt bzw. vorliegen, kann im sog. **Eisen-Kohlenstoff-Diagramm** abgelesen werden, [Bild 2.12](#) (links).

Hierin sind die unterschiedlichen Phasenübergangslinien eingezeichnet, die wiederum die verschiedenen Phasengebiete, abhängig von T und c_C definieren. Betrachtet man beispielsweise im Diagramm eine Stahlschmelze mit einem Kohlenstoffgehalt von $c_C = 0,7$ Massen-%, die von ca. 1550°C auf 1100°C und weiter auf 500°C *langsam* abgekühlt wird (gestrichelte, vertikale Pfeillinie), so kann folgende Chronologie notiert werden: Ab ca. 1495°C beginnt der Erstarrungsprozess, feste Austenitkristallite bilden sich in der Schmelze, beide Phasen liegen gleichzeitig vor. Ab ca. 1400°C ist die Schmelze vollständig erstarrt. Der Stahl ist nun austenitisch. Bei 740°C beginnen sich einzelne Austenitbereiche in Ferrit umzuwandeln. Dieser Vorgang setzt sich fort, bis sich schließlich bei ca. 720°C der Austenit in Perlit umwandelt und sich das finale Ferrit-Perlit Gefüge einstellt. Bei **Perlit** handelt es sich nicht um eine spezifische Phase, sondern vielmehr um ein Gefüge, bei dem Ferrit und Zementit (Fe_3C) gleichzeitig existieren, [Bild 2.12](#) (rechts oben). Hierbei bildet sich der Zementit ab Kohlenstoff-Massenanteilen von ca. $0,02\%$ unterhalb von etwa 720°C . Der Kohlenstoff kann nicht mehr vollständig auf Zwischengitterplätzen eingelagert werden, so dass er sich mit dem Eisen zu Fe_3C verbindet. Diese äußerst spröden Ausscheidungen bilden lamellenartige Strukturen im Ferrit oder lagern sich an dessen Korngrenzen ab.

Die im Eisenkohlenstoff-Diagramm dargestellten Gefügekonstellationen bilden sich durch Diffusion, also durch Umordnung der Atome. Diese auf atomarer Ebene ablaufenden Prozesse nehmen eine endliche Zeit in Anspruch. Außerdem benötigen die Atome kinetische Energie, die durch die Temperatur des Körpers repräsentiert wird. Demzufolge stellen sich die im Fe-C Diagramm dargestellten Phasen nur bei genügend langsamer Abkühlung ein, so dass den Atome genügend Zeit für die Umordnungsprozesse bleibt.

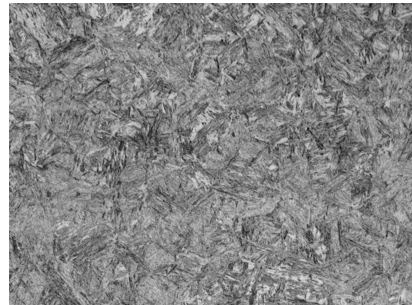
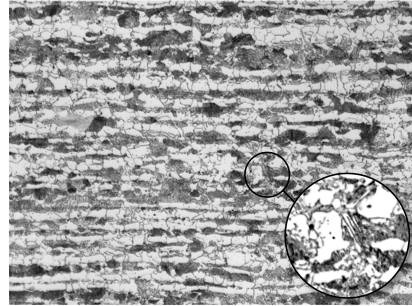
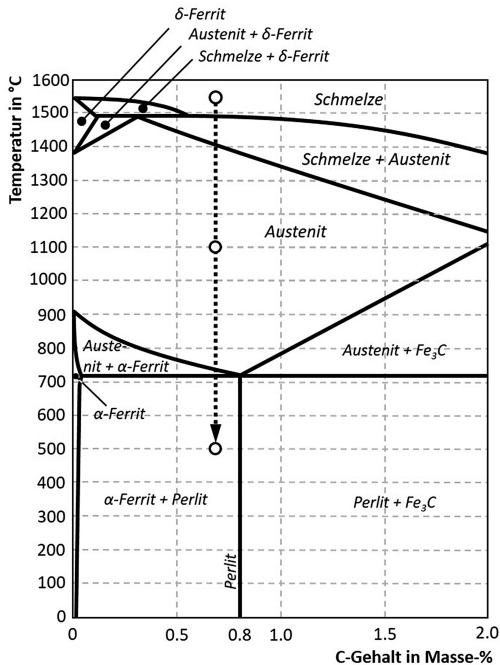


Bild 2.12 Auszug des Eisen-Kohlenstoffdiagramms mit den relevanten Phasen (analog zu Eisen werden die von der Temperatur abhängigen zwei Ferritphasen mit α - und δ -Ferrit bezeichnet (links), Schliffbild eines Ferrit-Perlit Gefüges), die hellen Bereiche zeigen den Ferrit, die dunklen Bereiche den Perlit mit lamellenförmigen Zementit (oben rechts), Martensitgefüge mit charakteristischer pfeilförmiger Kristallstruktur (unten rechts), ©thyssenkrupp Steel Europe

Bei schnellen Abkühlgeschwindigkeiten (oder gar beim „Abschrecken“ des Stahls) können noch ablaufende Diffusionsprozesse zum vorzeitigen Stillstand gelangen. Ab Unterschreitung einer kritischen Temperatur, z.B. der **Martensitstarttemperatur** M_S , reicht die kinetische Energie der Atome nicht mehr aus, um sich im Atomgitter zu bewegen. Phasenänderungen kommen abrupt zum Stillstand, die Phasenkonfiguration wird „eingeforen“, oder Gefügeänderungen finden, wenn überhaupt, diffusionslos statt. In diesem Zusammenhang können **Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramme** (ZTU-Diagramme) zu Rate gezogen werden, um die zu erwartende Gefügekonstellation vorherzusagen, **Bild 2.13**.

Betrachtet man einen unlegierten, austenitischen Stahl mit 900°C und schreckt diesen in 0,5 Sekunden auf Raumtemperatur ab, **Bild 2.13** (1), so wird die kinetische Energie der Atome derart schnell abgesenkt, dass keine Zeit für diffusionsgesteuerte Atomumordnung verbleibt. Gleichwohl beginnt das kfz-Gitter unterhalb von M_S durch Gitterscherung in das energetisch günstigere trz-Gitter umzuklappen, wodurch sich ein sehr hartes Martensitgefüge ausbildet, **Bild 2.12** (rechts unten). Dieser Abschreckungsvorgang wird auch als **Umwandlungshärtung**¹³ bezeichnet und beispielsweise bei der Herstellung hochwertiger Messerklingen angewandt.

¹³ Neben der Umwandlungshärtung gibt es auch den Begriff des **Vergütens**. Hierunter versteht man das gezielte Aufheizen bis zur Umwandlung in das Austenitgefüge, anschließendes schnelles Abkühlen (Abschrecken).

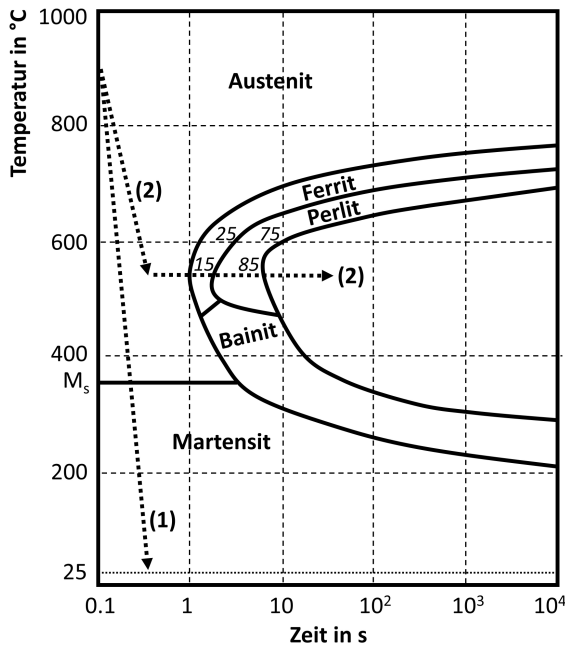


Bild 2.13 Schematisches ZTU-Diagramm für einen unlegierten Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,45 Massen-%

Wird der Stahl gemäß der gestrichelten Linie (2) in [Bild 2.13](#) in 0,5 Sekunden von 900°C auf ca. 550°C abgekühlt und anschließend (isotherm) bei dieser Temperatur gehalten, so wandelt sich der Austenit nach ca. 1 Sekunde in Ferrit um. Nach ca. 1,5 Sekunden beginnt sich Perlit zu bilden. Schließlich kommt die Phasenumwandlung nach ca. 7 Sekunden zum Stillstand. Das finale Gefüge zeichnet sich durch 15 % Ferrit und 85 % Perlit aus, was durch entsprechende Zahlen an den Kurven des ZTU-Diagramms deutlich gemacht wird.

[Bild 2.13](#) zeigt neben Austenit, Ferrit, Martensit und Perlit auch ein **Bainit**-Gebiet¹⁴. Ähnlich wie Perlit, besteht auch Bainit aus Ferrit und Zementit, unterscheidet sich allerdings in Form und Anordnung vom Perlit.

cken) zur Bildung des harten Martensitgefüges und abschließendes Anlassen (moderates Aufheizen bis ca. 150°C), zum Abbau von Gitterverzerrungen und innere Spannungen.

¹⁴ Benannt nach Edgar Collins Bain (1891–1971).



Die wichtigsten Gefügearten im Stahl zusammengefasst:

Ferrit hat eine krz-Atomgitter und damit 2 Atome in der Elementarzelle (1 Atom im der Würfelmitte, und $8 \cdot 1/8$ Atom auf den Ecken). Es ist ein Mischkristall mit Kohlenstoff auf Zwischengitterplätze. Ferrit kann bei tiefen (α -Ferrit) und bei hohen Temperaturen (δ -Ferrit) auftreten. Stähle mit Ferritgefüge zeigen geringe Festigkeiten, sind gut umformbar und anfällig für Korrosion.

Austenit hat ein kfz-Atomgitter, also 4 Atome in der Elementarzelle ($6 \cdot 1/2$ Atome auf den Flächen und $8 \cdot 1/8$ Atom auf den Ecken). Damit hat der Austenit eine höhere Packungsdichte, d.h. es sind mehr Atome in die Einheitszelle gepackt. Er bildet ebenfalls ein Mischkristall mit gelöstem Kohlenstoff auf Zwischengitterplätzen. Austenitische Stähle sind nicht magnetisierbar und besitzen hohe Zähigkeiten, sind also sehr gut plastisch umformbar.

Martensit entsteht aus dem austenitischen kfz-Atomgitter diffusionslos durch reine Gitterscherung. Er bildet sich durch schnelle Abkühlprozesse und besitzt ein trz-Gitterstruktur. Martensit-Gefüge zeichnen sich durch eine nadel- bzw. pfeilförmige Kristallitstruktur aus und sind äußerst hart. Die Martensitumwandlung wird zum Härten von Stahl ausgenutzt, bei dem der Stahl bis zum Glühen erwärmt (Austenit) und dann abgeschreckt wird (Austenit $\rightarrow$ Martensit).

Zementit (Fe_3C), auch Eisencarbid genannt, ist eine chemische Verbindung, die sich lokal im Stahlgefüge in Form von Ausscheidungen bilden kann. Er besitzt ein orthorhombisches Atomgitter, in dem 4 Kohlenstoffatome mit 12 Eisenatomen chemisch verbunden sind. Zementit kann sich bei Abkühlung aus der Schmelze, dem Austenit oder dem Ferrit bilden, wenn der Kohlenstoff nicht mehr vollständig im Zwischengitter aufgenommen werden kann. Er bildet sich häufig an Korngrenzen und ist sehr hart und spröde. Stähle mit hohen Zementitanteilen sind schlecht plastisch verformbar.

Perlit und *Bainit* sind beides Phasengemische. Sie setzen sich aus Ferrit und Zementit zusammen. Der Unterschied zwischen beiden Gefügearten besteht im Wesentlichen in Form und Verteilung der Zementitausscheidungen. Bainitische Stähle weisen hohe Festigkeiten und gleichzeitig sehr gute (Kerbschlag-)Zähigkeiten auf. Perlitische Stähle zeigen aufgrund des verstärkend wirkenden Zementits hohe Festigkeiten und Verschleißwiderstände.

2.2.4 Legierungselemente

Bis jetzt wurde nur der Fokus auf unlegierte Stähle gelegt, d.h. [Bild 2.12](#) (links) und [Bild 2.13](#) zeigen nur die Gefügearten des Fe-C-Systems. Dementsprechend kann gefragt werden, welchen Einfluss zusätzliche Legierungselemente auf die Eigenschaften des Stahls haben und in wieweit die bereits diskutierten Aspekte der Gefügeausbildung dadurch verändert werden. Dazu sollen exemplarisch drei Einflüsse herausgestellt werden:

1. **Korrosionsbeständigkeit** Ab einem Chromanteil (Cr) von mehr als 10,5% bildet Stahl auf der Oberfläche eine Chromoxid-Schicht (z.B. CrO oder Cr_2O_3) aus. Dadurch wird der darunter liegende Stahl vom Luftsauerstoff abgeschildert, Oxidation - also Korrosion des Stahls - wird unterbunden. Derartige Schutzschichten werden auch Passivierungsschichten genannt. Durch Hinzugabe von z.B. Nickel (Ni) kann die Ausprägung der Passivierungsschichten weiter verbessert werden.