

Studienskript



GRUNDLAGEN DER WERKSTOFFKUNDE

DLBMETGWK01

iu

INTERNATIONALE
HOCHSCHULE

GRUNDLAGEN DER WERKSTOFFKUNDE

IMPRESSUM

Herausgeber:
IU Internationale Hochschule GmbH
IU International University of Applied Sciences
Juri-Gagarin-Ring 152
D-99084 Erfurt

Postanschrift:
Albert-Proeller-Straße 15-19
D-86675 Buchdorf
media@iu.org
www.iu.de

DLBMETGWK01
Versionsnr.: 001-2023-0329
Prof. Dr. Amir Al-Munajjed

© 2023 IU Internationale Hochschule GmbH
Dieser Lehrbrief ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten.
Dieser Lehrbrief darf in jeglicher Form ohne vorherige schriftliche Genehmigung der IU Internationale Hochschule GmbH nicht reproduziert und/oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.
Die Autor:innen/Herausgeber:innen haben sich nach bestem Wissen und Gewissen bemüht, die Urheber:innen und Quellen der verwendeten Abbildungen zu bestimmen. Sollte es dennoch zu irrtümlichen Angaben gekommen sein, bitten wir um eine dementsprechende Nachricht.



WISSENSCHAFTLICHE KURSLEITUNG

PROF. DR. AMIR AL-MUNAJJED

Herr Al-Munajjed ist Professor für Medizintechnik an der IU Internationale Hochschule mit den Schwerpunkten Entwicklung, Prüfung und Zulassung von Medizinprodukten und Technologien.

Er hat einen Diplom- (FH) und Masterabschluss (TUM) und ist seit seiner erfolgreichen Promotion am Royal College of Surgeons in Ireland (Dublin, Irland) im Umfeld der Medizintechnik tätig.

Herr Al-Munajjed leitete Forschungsabteilungen und Labore im Bereich Medizintechnik und war für die Prüfung und Zulassung von Implantaten und medizinischen Geräten verantwortlich. Seine akademische und industrielle Forschung galt neben der Medizintechnik auch den Bereichen Sport, Automotive und Aerospace. Hierunter fallen die Entwicklung von biomechanischen Modellen und diversen Biomaterialien sowie die Simulation muskuloskelettaler Systeme.

INHALTSVERZEICHNIS

GRUNDLAGEN DER WERKSTOFFKUNDE

Wissenschaftliche Kursleitung	3
Einleitung	
Wegweiser durch das Studienskript	8
Basisliteratur	9
Weiterführende Literatur	10
Übergeordnete Lernziele	12
Lektion 1	
Einführung in die Werkstoffkunde	13
1.1 Gegenstand und Bedeutung	14
1.2 Grundlegende Betrachtung der Werkstoffeigenschaften	16
1.3 Anforderungen an Werkstoffe	18
Lektion 2	
Aufbau und Gruppen der Werkstoffe	21
2.1 Atomaufbau und chemische Bindung	22
2.2 Metalle	27
2.3 Keramiken	33
2.4 Polymere	39
2.5 Verbundwerkstoffe	44
2.6 Grundlagen der Wärmebehandlung	46
Lektion 3	
Mechanische Eigenschaften	53
3.1 Mechanische Beanspruchung	54
3.2 Elastizität	56
3.3 Plastizität	60
3.4 Kriechen	64
3.5 Bruch	66

Lektion 4	
Nichtmechanische physikalische Eigenschaften	71
4.1 Elektrische Eigenschaften	72
4.2 Magnetische Eigenschaften	76
4.3 Wärmeleitfähigkeit	78
4.4 Optische Eigenschaften	79
4.5 Thermische Ausdehnung	81
4.6 Überblick über weitere physikalische Eigenschaften	82
Lektion 5	
Chemische und tribologische Eigenschaften	85
5.1 Oberflächen und Versagen der Werkstoffe	86
5.2 Elektrochemische Korrosion	88
5.3 Spannungsrisskorrosion	92
5.4 Reibung und Verschleiß	94
Lektion 6	
Ingenieurtechnische Nutzung der Werkstoffe	99
6.1 Einfluss der Herstellung auf die Werkstoffeigenschaften	100
6.2 Prüfung, Normung und Bezeichnung	103
6.3 Werkstoffauswahl	112
6.4 Recycling	114
Lektion 7	
Domänenspezifische Ergänzungen und Beispiele	119
7.1 Medizintechnik	120
7.2 Maschinenbau	123
7.3 Elektrotechnik	125
7.4 Mechatronik	128
7.5 Robotik	131
Verzeichnisse	
Literaturverzeichnis	136
Abbildungsverzeichnis	138

EINLEITUNG

HERZLICH WILLKOMMEN

WEGWEISER DURCH DAS STUDIENSKRIPT

Dieses Studienskript bildet die Grundlage Ihres Kurses. Ergänzend zum Studienskript stehen Ihnen weitere Medien aus unserer Online-Bibliothek sowie Videos zur Verfügung, mit deren Hilfe Sie sich Ihren individuellen Lern-Mix zusammenstellen können. Auf diese Weise können Sie sich den Stoff in Ihrem eigenen Tempo aneignen und dabei auf lernspezifische Anforderungen Rücksicht nehmen.

Die Inhalte sind nach didaktischen Kriterien in Lektionen aufgeteilt, wobei jede Lektion aus mehreren Lernzyklen besteht. Jeder Lernzyklus enthält jeweils nur einen neuen inhaltlichen Schwerpunkt. So können Sie neuen Lernstoff schnell und effektiv zu Ihrem bereits vorhandenen Wissen hinzufügen.

In der IU Learn App befinden sich am Ende eines jeden Lernzyklus die Interactive Quizzes. Mithilfe dieser Fragen können Sie eigenständig und ohne jeden Druck überprüfen, ob Sie die neuen Inhalte schon verinnerlicht haben.

Sobald Sie eine Lektion komplett bearbeitet haben, können Sie Ihr Wissen auf der Lernplattform unter Beweis stellen. Über automatisch auswertbare Fragen erhalten Sie ein direktes Feedback zu Ihren Lernfortschritten. Die Wissenskontrolle gilt als bestanden, wenn Sie mindestens 80 Prozent der Fragen richtig beantwortet haben. Sollte das einmal nicht auf Anhieb klappen, können Sie die Tests beliebig oft wiederholen.

Wenn Sie die Wissenskontrolle für sämtliche Lektionen gemeistert haben, führen Sie bitte die abschließende Evaluierung des Kurses durch.

Die IU Internationale Hochschule ist bestrebt, in ihren Skripten eine gendersensible und inklusive Sprache zu verwenden. Wir möchten jedoch hervorheben, dass auch in den Skripten, in denen das generische Maskulinum verwendet wird, immer Frauen und Männer, Inter- und Trans-Personen gemeint sind sowie auch jene, die sich keinem Geschlecht zuordnen wollen oder können.

BASISLITERATUR

Czichos, H. (2019). *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme* (4. Aufl.). Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.022889231&site=eds-live&scope=site>

Hornbogen, E., Eggeler, G. & Werner, E. (2019). *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen* (12. Aufl.). Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.022871299&site=eds-live&scope=site>

Weißbach, W., Jaroschek, C. & Dahms, M. (2018). *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr* (20. Aufl.). Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.37827&site=eds-live&scope=site>

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

LEKTION 1

Carter, C. B. & Norton, M. G. (2007). *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.42792&site=eds-live&scope=site>

Hicking, J., Völkel, A., Schuh, G., Zeller, V. & Stich, V. (2022). Anforderungsmanagement. In G. Schuh, V. Zeller & V. Stich (Hrsg.), *Digitalisierungs- und Informationsmanagement: Handbuch Produktion und Management* 9. Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edssjb&AN=edssjb.978.3.662.63758.6.11&site=eds-live&scope=site>

LEKTION 2

Bargel, H. J. & Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde* (12. Aufl.). Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.37738&site=eds-live&scope=site>

LEKTION 3

Bargel, H. J. & Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde*. Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.37738&site=eds-live&scope=site>

Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., Wall, W. A. & Rajapakse, N. (2013). *Engineering Mechanics 1. Statics* (2. Aufl.). Springer. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2541083&site=eds-live&scope=site>

Rösler, J., Harders, H. & Bäker, M. (2019). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe* (6. Aufl.). Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.036407322&site=eds-live&scope=site>

LEKTION 4

Langbein, S. & Czechowicz, A. (2021). *Formgedächtnistechnik: Entwickeln, Testen und Anwenden* (2. Aufl.). Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.037333087&site=eds-live&scope=site>

LEKTION 5

Bauer, F. (2021). *Tribologie: Prägnant und praxisrelevant*. Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.037001995&site=eds-live&scope=site>

Cabrini, M. (2021). *Corrosion and Protection of Materials*. MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edsdob&AN=edsdob.20.500.12854.68548&site=eds-live&scope=site>

LEKTION 6

Bargel, H. J. & Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde*. Springer Vieweg. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.37738&site=eds-live&scope=site>

Schiebold, K. (2021). *Schweiß- und Lötverbindungen und ihre Prüfung: Lehr- und Arbeitsbuch für Ausbildung und Praxis*. Springer Vieweg, S. 5–43. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.037376425&site=eds-live&scope=site>

LEKTION 7

Ayanoğlu, H. & Duarte, E. (2019). *Human-computer interaction series*. In H. Ayanoğlu & J. S. Sequeira (Hrsg.), *Emotional design in human-robot interaction: Theory, methods and applications* (S. 39–55). Springer. (Im Internet verfügbar).

Bendel, O. (Hrsg). (2022). *Soziale Roboter: Technikwissenschaftliche, wirtschaftswissenschaftliche, philosophische, psychologische und soziologische Grundlagen*. Springer Gabler. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=edshbz&AN=edshbz.DE.605.HBZ01.037341517&site=eds-live&scope=site>

Wintermantel, E. & Ha, S.-W. (2009). *Medizintechnik: Life science engineering. Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologien, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business* (5. Aufl.). Springer. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.47685&site=eds-live&scope=site>

ÜBERGEORDNETE

LERNZIELE

Der Kurs **Grundlagen der Werkstoffkunde** vermittelt Ihnen zunächst einen Überblick über die wichtigsten technischen Werkstoffgruppen Metalle, Keramiken, Polymere und Verbundwerkstoffe. Dabei werden Sie die grundlegenden Zusammenhänge im Atomaufbau und der chemischen Bindung von mikroskopischen bis hin zu makroskopischen Vorgängen und Eigenschaften nachvollziehen.

Um für die Lebensdauer eines Produktes die geeignete Werkstoffauswahl treffen zu können, werden Sie für die unterschiedlichen Werkstoffgruppen die wichtigsten Charakteristika und Eigenschaften kennenlernen. Insbesondere werden die mechanischen, die nicht-mechanischen physikalischen, die chemischen und die tribologischen Eigenschaften und Kennzahlen analysiert. Somit können wesentliche Unterschiede von Metallen, Keramiken, Polymeren und Verbundwerkstoffen dargestellt und ausgearbeitet werden. Außerdem können wichtige und häufige Mechanismen, welche zum Versagen von Werkstoffen führen, berücksichtigt werden.

Darauf aufbauend wird die ingenieurtechnische Nutzung der Werkstoffe vom Einfluss der Herstellung auf die Werkstoffeigenschaften bis hin zur Prüfung und Verwendung diskutiert. Hierbei wird das Recycling auch eine wichtige Rolle spielen.

Im letzten Schritt werden für folgende Branchen allgemeine Ergänzungen und Anwendungsbeispiele untersucht: Medizintechnik, Maschinenbau, Elektrotechnik, Mechatronik und Robotik.

LEKTION 1

EINFÜHRUNG IN DIE WERKSTOFFKUNDE

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- die Bedeutung der Werkstoffe für die technische Anwendung zu verstehen.
- die Wichtigkeit der richtigen Werkstoffauswahl zu erkennen.
- die Anforderung an Werkstoffe einzuordnen.

1. EINFÜHRUNG IN DIE WERKSTOFFKUNDE

Aus der Praxis

Die Konstruktionsabteilung der Firma Respiratorix GmbH wurde mit der Aufgabe beauftragt, ein neues Beatmungsgerät, oder auch Respirator genannt, zu entwickeln. Ein Beatmungsgerät ist ein Medizinprodukt, welches meistens in Kliniken und selten auch zu Hause bei Patient:innen eingesetzt wird, um deren Atmung zu unterstützen.

Ein Respirator ist ein komplexes Gerät, da es aus vielen Bauteilen besteht und auch diverse Technologien beinhaltet. Mobile Geräte haben einen fahrbaren Rahmen, ein Gehäuse, in dem die komplexe Elektronik mit den Prozessoren und den Controllern verborgen ist und einen elektromagnetischen oder pneumatischen Antrieb, um die Patient:innen mit Sauerstoff zu versorgen.

Zum Start ergeben sich folgende Fragen:

- Welche Anforderungen ergeben sich für die einzelnen Bauteile?
- Welche wichtigen Begriffe gibt es in der Werkstoffkunde?
- Welche übergeordneten Werkstoffgruppen stehen ihr zur Verfügung?
- Wie können Anforderungen und Eigenschaften priorisiert werden?

1.1 Gegenstand und Bedeutung

Definition von Werkstoffen

Zuerst werden wir uns mit der Frage beschäftigen, was ein Werkstoff eigentlich ist. Eine gängige Definition von Werkstoffen, und somit eine deutliche Abgrenzung zu **Fluiden**, lautet nach Hornbogen et al. (2019): „Alle Werkstoffe sind feste Stoffe, die den Menschen für den Bau von Maschinen, Gebäuden, aber auch zum Ersatz von Körperteilen als Implantate, oder zur Realisierung künstlerischer Visionen nützlich sind“ (Hornbogen et al., 2019, S. 1–2).

Fluid

Unter Fluiden werden Substanzen und Medien bezeichnet, die keine starre Form besitzen und sich ständig unter Kräften verformen können.

Die Fachgebiete, die sich mit Werkstoffen beschäftigen sind (Weißbach et al., 2018, S. 1–2):

- die Werkstoffkunde sowie
- die Material- oder Werkstoffwissenschaft und
- die Werkstofftechnik.

Die Werkstoffkunde befasst sich generell mit allen Aspekten der Werkstoffe basierend auf den Erkenntnissen der Material- oder Werkstoffwissenschaft (Weißbach et al., 2018, S. 1–2). Im Fokus steht bei der Werkstofftechnik die technische Anwendung von Werkstoffen mit vier Hauptaufgaben, (i) die Verbesserung der Eigenschaften vorhandener Werkstoffe,

(ii) die Ermittlung von Werkstoffeigenschaften und **Werkstoffkennzahlen** (oder Kennwerte) für die Konstruktion, (iii) die Entwicklung neuer Werkstoffe und (iv) die Optimierung der zugehörigen Fertigungsverfahren.

Weiterhin agieren die Festkörperphysik, die physikalische Chemie und damit verwandte Wissenschaften, wie die Metallografie und Kristallografie, mit Werkstoffen (Hornbogen et al., 2019, S. 3–4). Festkörperphysik und physikalische Chemie befassen sich dabei mit dem Ursprung und der Mikrostruktur der Werkstoffe. Die Kristallografie und Metallografie untersuchen den atomaren Aufbau und die Gitterstruktur der Werkstoffe bzw. der Metalle.

Ein Fachgebiet, welches sehr stark von der Werkstofftechnik abhängt, ist die Fertigungstechnik, bzw. die Prozesstechnologien. Darunter werden der Prozess oder die Prozessschritte verstanden, die in der Herstellung eines Bauteils vom Rohstoff her involviert sind. Zum einen werden Werkstoffe sehr unterschiedlich produziert und verarbeitet, zum anderen sind aber auch die Werkstoffeigenschaften abhängig von diesen beiden Schritten.

Die einfachste Einteilung von Werkstoffen gliedert sich in folgende Gruppen, worin Werkstoffe mit ähnlichem Aufbau und ähnlichen Eigenschaften geclustert werden (Hornbogen et al., 2019, S. 7–8):

- metallische Werkstoffe,
- nichtmetallische anorganische Werkstoffe (Keramiken),
- Polymere (Kunststoffe) sowie
- Verbundwerkstoffe (Kompositwerkstoffe).

Verbundwerkstoffe sind zwar in der Regel aus zwei der drei anderen Gruppen zusammengestellt, sie werden aber häufig separat betrachtet, da sie, aufgrund ihrer Kombination von zwei oder mehreren Materialien, spezielle Werkstoffeigenschaften besitzen. Durch die Zusammensetzung sehr unterschiedlicher Materialien können sie deutlich bessere Eigenschaften aufweisen als ihre einzelnen Komponenten.

Kurzer Exkurs aus der Geschichte

Archäologische Funde zeigen immer wieder, dass die Menschheit seit jeher Werkstoffe zur Gewinnung von technischen Hilfsmitteln benutzt (Hornbogen et al., 2019, S. 18–20). Die natürlichen Werkstoffe, Holz und Stein, wurden schon in der Steinzeit verwendet und sind somit die ältesten Naturwerkstoffe. Im 10. Jahrtausend vor Christus wurden bereits Keramiken hergestellt und im 8. Jahrtausend vor Christus die ersten Metalle verarbeitet. Es gibt auch Beweise für frühe Implantate und Prothesen von Ausgrabungen aus ägyptischen Gräbern. Archäologische Funde zeigen künstliche Holz-Zehen mit Lederriemen in einem ägyptischen Grab sowie weitere ursprüngliche Prothesen. Aus der römischen Antike wurden diverse Zahnimplantate und -prothesen, darunter auch kunstvoll verzierte Zahnbrücken aus Gold, gefunden.

Werkstoffkennzahlen
Mit Werkstoffkennzahlen oder Werkstoffkennwerten sind quantitative Werte der Werkstoffeigenschaften gemeint, die zum Vergleich und zur Auswahl von unterschiedlichen Werkstoffen dienen.

Je fortschrittlicher die benutzten Technologien der Menschheit bei z. B. Gewinnung und Verarbeitung wurden, desto mehr Werkstoffe kamen insgesamt zum Einsatz. Frühere Ären wurden sogar nach den vorherrschenden Werkstoffen benannt, z. B. die Steinzeit, die Bronzezeit etc. Polymere und Verbundwerkstoffe werden erst seit dem 19. Jahrhundert eingesetzt.

1.2 Grundlegende Betrachtung der Werkstoffeigenschaften

Eigenschaftsgruppen
Damit sind Gruppen von Eigenschaften der Werkstoffe gemeint. Hier gibt es drei verschiedene Kategorien: die fertigungstechnischen, die wirtschaftlichen sowie die Gebrauchseigenschaften.

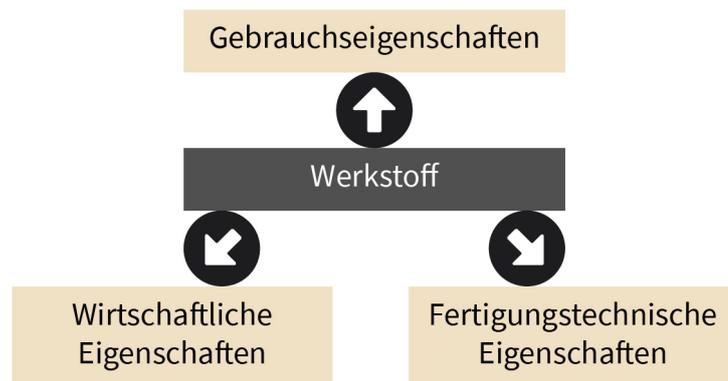
Neben der Einteilung von Werkstoffen aus dem vorhergehenden Lernzyklus kann auch eine Beurteilung nach **Eigenschaftsgruppen** von Werkstoffen geschehen (Hornbogen et al., 2019, S. 12–16):

- Fertigungstechnische Eigenschaften,
- wirtschaftliche Eigenschaften wie Verfügbarkeit und Preis sowie
- Gebrauchseigenschaften.

Alle drei dieser Eigenschaften sind bei der Auswahl eines Werkstoffes für ein Bauteil wichtig. Wenn ein Werkstoff nur schwierig zu verarbeiten ist, kann es zu einem langwierigen Prozess führen, welches sich im Preis des Bauteils widerspiegeln kann. Ebenso kann es zu hohen Ausschusszahlen bei der Fertigung kommen, wodurch es womöglich unattraktiv für Kund:innen werden kann. Werkstoffe, die nur schwer verfügbar sind, sind in der Regel auch teuer. Dadurch wird der Preis des gesamten Bauteils in die Höhe getrieben.

Die Gebrauchseigenschaften von Werkstoffen kann man weiterhin in zwei Gruppen unterteilen: die Strukturwerkstoffe, bei denen es sich vorrangig um mechanische Eigenschaften handelt, und die Funktionswerkstoffe, bei denen es sich um nichtmechanische physikalische Eigenschaften handelt (Hornbogen et al., 2019, S. 12–16).

Abbildung 1: Eigenschaftsgruppen von Werkstoffen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Die Gebrauchseigenschaften sind essenziell für die Verwendung der Werkstoffe. Strukturwerkstoffe, die für die Aufrechterhaltung der Struktur des Bauteils zuständig sind, liefern die Grundlage für deren Lebensdauer. Funktionswerkstoffe werden eingesetzt, um die weiteren gewünschten Funktionen zu erreichen.

Gebrauchseigenschaften werden auch oft in primäre, sekundäre und tertiäre Eigenschaften, je nach Priorität, unterteilt. In der Werkstoffkunde sind tausende von Werkstoffen mit respektiven Eigenschaften bekannt. Durch die Kombination von Werkstoffen können auch Eigenschaften kombiniert werden.

Die Kombination der spezifischen Werkstoffeigenschaften eines einzelnen Werkstoffs wird **Eigenschaftsprofil** genannt. Einen Überblick von Werkstoffen samt ihrer Eigenschaftsprofile findet man in einer Literaturrecherche oder auch mit einer Software und in Datenbanken. Viele Datenbanken werden von Werkstofflieferant:innen angeboten. Trotz Normierungen gibt es immer noch unterschiedliche Namensgebungen. Einige Werkstoffe sind auch nur bei speziellen Händlern und unter Händlernamen zu beziehen. Dies führt zu Herausforderungen beim Vergleich von Werkstoffen in unterschiedlichen Datenbanken oder von unterschiedlichen Herstellenden. Zum Beispiel gibt es viele Lieferant:innen oder Herstellende, die sich auf einzelne Werkstoffgruppen spezialisiert haben. Lieferant:innen von Metallen haben somit viele Metalle im Sortiment und bieten dazu Datenbanken mit Eigenschaften und Kennwerten an. Für ein Bauteil kann jedoch ein Metall oder ein Polymer infrage kommen. Hierzu müssen Datenbanken verschiedener Anbieter:innen verglichen werden. Die spezifischen Eigenschaften der Werkstoffe werden im Folgenden ausgearbeitet. Eine Übersicht einiger Werkstoffeigenschaften ist in folgender Tabelle einzusehen:

Eigenschaftsprofil
Das Eigenschaftsprofil eines Werkstoffes ist die Summe aller Eigenschaften dieses Werkstoffes.

Tabelle 1: Übersicht zu Werkstoffeigenschaften

Art der Eigenschaft	Auswirkung	Beispiele zugehöriger Eigenschaftskennwerte
mechanisch	Widerstand gegen Bruch oder gegen Verformung	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²], E-Modul E [GPa]
chemisch	Beständigkeit gegen Medien	Korrosionsgeschwindigkeit [mm]
tribologisch	Reibungsverhalten	Reibungszahl μ
thermisch	Verhalten bei tiefer, bzw. hoher Temperatur	Glastemperatur T_G [°C], Schmelztemperatur T_m [°C], Wärmeleitfähigkeit
technologisch	Verhalten beim Gießen, Schweißen, Härten	Gießbarkeit, Schwindmaß in Prozent

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Weißbach et al., 2018, S. 24.

1.3 Anforderungen an Werkstoffe

Jedes Bauteil wird gewissen Einflüssen und Beanspruchungen ausgesetzt. Diese werden „fachspezifische Anforderungen“ an Werkstoffe genannt. Zur Umsetzung der Anforderungen können Computersysteme, sogenannte CAx-Systeme benutzt werden. So kann man z. B. beim Konstruieren ein Computer Aided Design (CAD) Programm benutzen und mittels Simulation mit der Finite Elemente Methode (FEM) überprüfen. Es gibt diverse Ansatzpunkte um mechanische, tribologische, thermische und weitere Einflüsse zu ermitteln und zu berechnen, um eine Überbeanspruchung, die zum Bauteilversagen führen kann, zu vermeiden (Weißbach et al., 2018, S. 22–24).

Abbildung 2: Fachspezifische Anforderungen an Werkstoffe

Anforderungen an ein Bauteil in Funktion	
Festigkeitslehre:	Kerbwirkung, innere Spannung, Flächenpressung
Mechanik:	Kräfte, Momente
Physik:	Wärme, Kälte, Reibung
Chemie:	umgebende Medien und Stoffe

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Als Anforderungsprofil bezeichnet man die Summe aller Einflüsse, die auf das Bauteil und somit den Werkstoff einwirken und die dieser ertragen muss (Weißbach et al., 2018, S. 23). Es wird entsprechend der vorherigen Abbildung aus den Anforderungen der vier Bereiche Mechanik, Chemie, Festigkeitslehre und Physik zusammengestellt. Am Anfang einer Entwicklung eines Bauteils steht in der Regel die Ausarbeitung einer Anforderungsliste. In vielen Wirtschaftsbranchen, insbesondere der Medizintechnik, der Automobilbranche und Feldern mit strikten Qualitätsvorgaben gibt es dafür geregelte Vorgaben und Prozesse. Dabei werden die Anforderungen der Kund:innen an ein Produkt ermittelt und auf einzelne Bauteile heruntergebrochen. Die allgemeinen Anforderungen an die Bauteile werden dann auf Werkstoffanforderungen transferiert. Solche Anforderungslisten können in einem sogenannten **Lastenheft** erstellt werden. Das grundlegende Verfahren dieses Prozesses wird auch Anforderungsmanagement genannt (Schuh et al., 2022, S. 250–294). Dieser Vorgang richtet sich häufig an den Anwender:innen bzw. nach deren Wünschen aus, um die grundlegenden Anforderungen an das Bauteil zu bestimmen (kundenorientierte Entwicklung). Diese Anforderungen werden dann in einer Risikoanalyse untersucht (risikobasierte Entwicklung).

Lastenheft

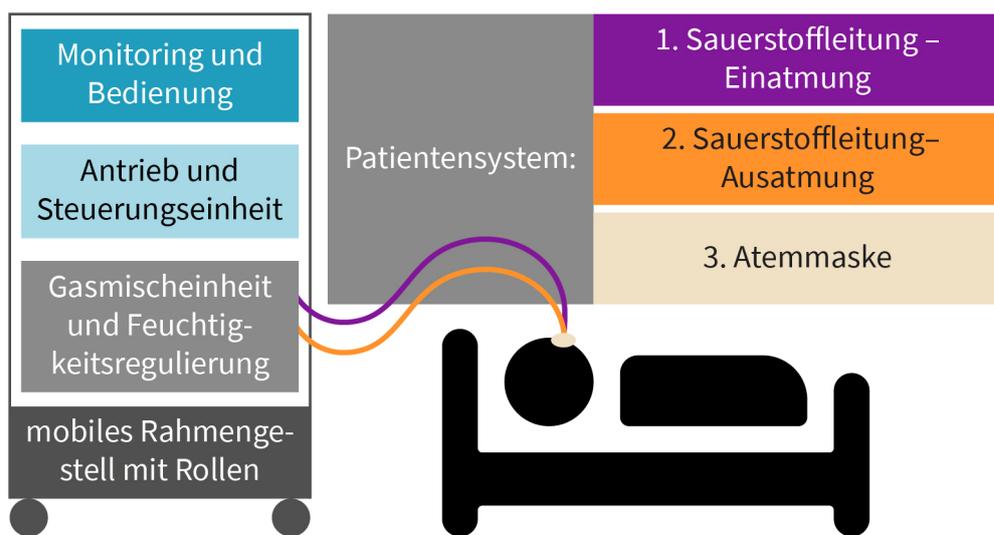
Das Lastenheft beschreibt die Summe aller Anforderungen der Kund:innen an die Entwicklung eines Produktes.

Ein zentraler Punkt des Vorgehens ist die Auflistung der funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen. Hieraus ergeben sich in der Praxis wichtige Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe. Bei der Betrachtung von einzelnen Komponenten muss auch die Wechselwirkung mit anderen Bauteilen berücksichtigt werden. Aus mechanischer Sicht wären die Zugfestigkeit, die Streckgrenze und die Schwingfestigkeit Anforderungen, aus chemisch-tribologischer Sicht die Korrosionsbeständigkeit und das Reibungsverhalten.

Man benutzt bei den Anforderungen eine Gewichtung oder Untergliederung in Pflicht- und Wunschanforderung, oder auch in Muss-, Soll- und Wunschanforderungen, die dann priorisiert werden. Diese Einteilung erfolgt nach Priorisierung der Anforderungen für die Gesamtfunktion des zu entwickelnden Produktes. Beispielsweise muss bei der Entwicklung eines **Beatmungsgerätes** das Gerät in Bauteilgruppen aufgeteilt werden. Es gibt einen (i) Rahmen mit einem (ii) Gehäuse, an diesem sollen der (iii) Motor und die (iv) Schläuche mit Gesichtsmaske für die Patient:innen befestigt sein. Um die Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe zu ermitteln, müssen die allgemeinen Anforderungen an das Gerät und an die einzelnen Komponenten aufgeteilt werden.

Beatmungsgerät
Ein Beatmungsgerät ist ein Medizinprodukt bzw. medizinisches Gerät, welches mobil in Kliniken und Praxen eingesetzt werden kann. Ein elektrischer Motor betreibt dabei eine Pumpe, die die Patient:innen mit Atemluft versorgt, wenn deren eigene Atemleistung nicht ausreicht.

Abbildung 3: Beatmungsgerät



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Die allgemeine Anforderung an das Beatmungsgerät ist die Unterstützung der Atmung der Patient:innen. Die allgemeine Anforderung an das Gestell ist das Tragen der Last der Komponenten wie Motor und Schläuche ohne Verformung und Versagen. Das Übertragen auf Werkstoffanforderungen bedeutet, dass das Gestell aus einem Werkstoff gefertigt werden muss, welcher einen hohen **Elastizitätsmodul** und eine hohe Festigkeit besitzen muss. Bei einem mobilen Gerät ergibt sich weiterhin die Anforderung, dass der verwendete Werkstoff nicht zu schwer sein soll, um von den Anwender:innen transportiert werden zu können. Neben der hohen Festigkeit besteht eine niedrige Dichte und somit ein niedriges Gewicht als Anforderung für den Werkstoff. Viele Werkstoffe haben entweder eine hohe Festigkeit oder eine niedrige Dichte. Wenn beide Anforderungen eine gleiche Priorisierung

Elastizitätsmodul
Unter dem Elastizitätsmodul versteht man den Kennwert, der die Steifigkeit und Elastizität eines Werkstoffes beschreibt.

haben, schränken sich die Auswahlmöglichkeiten stark ein. Insofern eine Anforderung eine Muss- bzw. Pflichtanforderung, die andere jedoch nur eine Wunschanforderung ist, kann die Muss- bzw. Pflichtanforderung bevorzugt werden. Ein kurzes Beispiel von allgemeinen und werkstoffspezifischen Anforderungen an ein Beatmungsgerät ist in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 2: Anforderungen an ein Beatmungsgerät

Bauteilgruppe	Allgemeine Anforderungen	Werkstoffanforderung
Rahmen	stabil – muss komplettes Gewicht tragen leicht – muss im Krankenhaus verfahrbar sein	Mechanik: hohe Festigkeit, hoher Elastizitätsmodul Physik: niedrige Dichte
Gehäuse	stabil – Belastung durch Bedienung	Mechanik: hohe Festigkeit, hoher Elastizitätsmodul
Motor/Antriebseinheit	„langlebig“ und leise	Physik: geringe Reibung
Schläuche und Atemmaske	elastisch und passend für unterschiedliche Patient:innen	Mechanik: niedriger Elastizitätsmodul, hohe elastische Verformbarkeit
allgemeine Anforderungen	Möglichkeit zur Reinigung und Desinfizierung mit Reinigern und Alkohol Kontakt zu Körperflüssigkeiten und Patient:innen	Chemie: hohe chemische Beständigkeit, UV-Beständigkeit Chemie: Biokompatibilität und Beständigkeit, Verhinderung einer Verkeimung

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.



ZUSAMMENFASSUNG

Werkstoffe sind feste Stoffe, die schon seit tausenden von Jahren als Hilfsmittel zum einfacheren und schnelleren Arbeiten eingesetzt werden. Werkstoffe werden in vier Werkstoffgruppen mit jeweils ähnlichem Aufbau und Eigenschaften aufgeteilt. Metallische und nichtmetallische anorganische Werkstoffe (Keramiken), Polymere und Verbundwerkstoffe haben jeweils spezielle Eigenschaften. Man unterscheidet dabei Gebrauchseigenschaften, fertigungstechnische und wirtschaftliche Eigenschaften. Die Summe aller Eigenschaften wird Eigenschaftsprofil eines Werkstoffes genannt. Zur Werkstoffauswahl werden die werkstofflichen Anforderungen eines Bauteils in einem Anforderungsprofil aufgelistet und priorisiert.

LEKTION 2

AUFBAU UND GRUPPEN DER WERKSTOFFE

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- den atomaren und chemischen Aufbau von Werkstoffen zu verstehen.
- die verschiedenen Werkstoffgruppen zu beschreiben.
- Werkstoffe anhand ihres Aufbaus und ihrer Eigenschaften zu gruppieren.

2. AUFBAU UND GRUPPEN DER WERKSTOFFE

Aus der Praxis

Bei der Entwicklung eines neuen Beatmungsgerätes wurden in einem ersten Schritt bereits die wichtigsten allgemeinen und werkstoffspezifischen Anforderungen ausgearbeitet. Es wurden Bauteilgruppen und Komponenten identifiziert, die wie das Gestell des Apparates die Last tragen müssen, aber dennoch leicht sein sollen, damit das Gerät mobil eingesetzt werden kann. Für die Luftschläuche und die Gesichtsmaske wurde ein elastischer Werkstoff bevorzugt, der sich an den Einsatz und die Patient:innen anpassen kann. Es stellt sich also die Frage, welche Werkstoffgruppen dazu eingesetzt werden können.

Zum Verständnis der Werkstoffgruppen ergeben sich folgende Fragen:

- Nach welchen physikalischen und chemischen Grundlagen unterscheiden sich Werkstoffe?
- Wie unterteilen sich die einzelnen Werkstoffgruppen im Detail?
- Für welche Anforderungen können spezielle Werkstoffeigenschaften verwendet werden?

2.1 Atomaufbau und chemische Bindung

Die Grundlagen für jeden Stoff oder jedes Material sind die Atome. Diese bestehen aus einem Atomkern, der den Großteil der Masse eines Atoms ausmacht. Er setzt sich je nach Element aus einem oder mehreren Protonen, Neutronen und anderen **Nukleonen** zusammen. Um den positiv geladenen Atomkern gibt es negative Ladungsträger, sogenannte Elektronen. Man spricht hier von der Atomhülle, einer „Wolke“ mit Elektronen um den Atomkern. Da nahezu die gesamte Masse eines Atoms im Kern vorliegt, ist die Dichte im Kern sehr hoch und außerhalb, im Bereich der Elektronen, sehr niedrig. Die Dichte in der Hülle ist ebenso wie die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron an einer definierten Position zu finden, sehr gering (Hornbogen et al., 2019, S. 28–33). Entsprechend dem Atommodell nach Bohr und Sommerfeld sind die Elektronen in sogenannten Schalen um den Atomkern zu finden. Die Menge der Elektronen z_e pro Schale n ist dabei abhängig vom Abstand der Schale zum Atomkern. Je näher die Elektronenschale zum Kern ist, desto weniger Elektronen sind dort zu finden (Hornbogen et al., 2019, S. 28–33).

$$z_e = 2n^2$$

Das **Periodensystem** gibt eine Übersicht der Atomarten in Reihenfolge der positiven Kernladung, d. h. nach der Anzahl der Protonen, die der Atomkern enthält (Hornbogen et al., 2019, S. 28–33). Die Werkstoffeigenschaften werden über die Anzahl der Protonen und somit das Atomgewicht definiert. Die Anzahl und das Verhalten der Elektronen wiederum

Nukleonen

Die Bestandteile eines Atomkerns werden Nukleonen genannt.

ist ausschlaggebend für die Bindung der Atome zueinander. Die Atombindung wirkt sich auf die chemische Reaktion sowie die mechanischen, elektrischen, ferromagnetischen und optischen Eigenschaften aus (Hornbogen et al., 2019, S. 28–33).

Wenn ein Atom mehrere Schalen besitzt, werden immer zuerst die inneren Schalen befüllt. Die innerste Schale wird K-Schale genannt, die nächste L, dann M usw. Die äußerste Schale muss im Gegensatz zu den inneren jedoch nicht vollständig befüllt sein. Elektronen in den äußeren Schalen, auch **Valenzelektronen** genannt, können Wechselwirkungen mit anderen Atomen aufbauen. Wenn dabei die äußere Schale vollständig gefüllt ist, besitzt das Atom eine geringe Neigung zur Wechselwirkung. Ein solches Atom wird auch chemisch stabil genannt. Atome mit wenigen Elektronen in der äußersten Schale neigen jedoch stark zu Wechselwirkungen mit anderen Atomen (Hornbogen et al., 2019, S. 28–33).

Atome können sich miteinander verbinden. Dies können entweder gleiche oder unterschiedliche Atome sein. Die Bindung wird durch die oben beschriebenen **Wechselwirkungen** aufgrund der äußeren Elektronen, den sogenannten Bindungselektronen, hervorgerufen. Die Wechselwirkung beeinflusst die Bindungsstärke, was sich wiederum auf die Materialeigenschaften, wie die mechanischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften auswirkt (Hornbogen et al., 2019, S. 28–33). In der Werkstoffkunde spricht man von drei verschiedenen primären Bindungsvarianten, die im Folgenden genauer erläutert werden.

Ionenbindung

Bei der Ionenbindung kommt es zu einer Bildung eines negativ und eines positiv geladenen Ions durch ihre elektrostatische Anziehung. Bei positiven Ionen spricht man von Kationen, bei negativen von Anionen. Ein Atom mit wenigen Elektronen in der äußersten Schale gibt diese an ein Atom mit nahezu vollständig gefüllter Außenschale ab. Zusammen wird somit eine volle äußere Elektronenschale erreicht. Durch die Abgabe von negativen Elektronen ergibt sich ein positives Ion, mittels Aufnahme von Elektronen auf der anderen Seite ein negativ geladenes Ion. Es handelt sich dabei meist um Verbindungen von Metallen, wie Natrium (Na) oder Magnesium (Mg) und einem Nichtmetall wie Sauerstoff (O) oder Stickstoff (N) (Hornbogen et al., 2019, S. 36–37).

Bei der abwechselnden Aneinanderreihung von positiven und negativen Ionen spricht man auch von einem Ionengitter. Am Beispiel Natriumchlorid kann man sehen, wie ein Metall (Natrium) ein Elektron abgibt und somit zu Na^+ wird und das Nichtmetall (Chlor) ein Elektron aufnimmt und somit als Cl^- eine negative Ladung besitzt (Hornbogen et al., 2019, S. 36–37).

Elektronenpaarbindung

Bei der Elektronenpaarbindung oder kovalenten Bindung kommt es zu einer Verbindung von Atomen, bei der sich beide Atome bestimmte Elektronen teilen. Hierbei handelt es sich vorrangig um Nichtmetalle. Die Bindung findet ausschließlich in der Atomhülle durch die geteilte Nutzung der Elektronen statt. Bei zwei oder mehreren Atomen, die sich mittels

Periodensystem

Unter dem Periodensystem versteht man eine Übersicht aller chemischen Elemente mit den wichtigsten Kennzahlen, die zur Beschreibung und Charakterisierung der Elemente wichtig sind.

Valenzelektronen

Damit sind die Elektronen eines Atoms in der äußersten Schale gemeint. Je nach Anordnung im Periodensystem haben Elemente eine unterschiedliche Anzahl von Valenzelektronen.

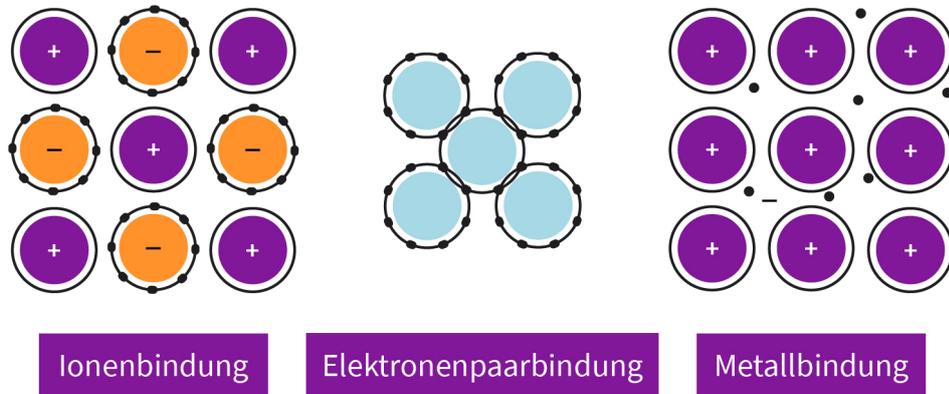
Wechselwirkung

Unter Wechselwirkung versteht man in der Werkstoffkunde die gegenseitige Beeinflussung von Atomen oder anderen Körpern aufeinander. Die Einflüsse können dabei physischer oder chemischer Natur sein.

Molekülkette
Eine Molekülkette ist die Aneinanderreihung vieler über die Elektronenpaarbindung verbundenen Atome eines Polymers.

einer kovalenten Bindung zusammenschließen, spricht man von Molekülen. Eine Aneinanderreihung von mehreren wiederkehrenden Atomgebilden nennt man **Molekülkette** (Hornbogen et al., 2019, S. 33–45).

Abbildung 4: Die drei Bindungsarten



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Metallbindung

Bei der Metallbindung findet eine Aneinanderreihung von Atomen zu einem Gitter statt. Metalle besitzen keine Bindungselektronen, die eine Bindung mit anderen Atomen eingehen, die Valenzelektronen der Metallatome werden dabei nicht an einen Nachbarn, sondern in den Raum zwischen den Atomen abgegeben. Hier spricht man von einem **Elektronengas** zwischen den Metallatomen. Diese freien Elektronen sind die Grundlage für die wichtigsten Eigenschaften von Metallen, wie der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, sowie der plastischen Verformbarkeit. Diese Form von Bindung ist schwächer als die anderen Bindungsvarianten.

Elektronengas
Unter dem Elektronengas versteht man die freien Elektronen bei Metallen, die in das Zwischengitter abgegeben werden.

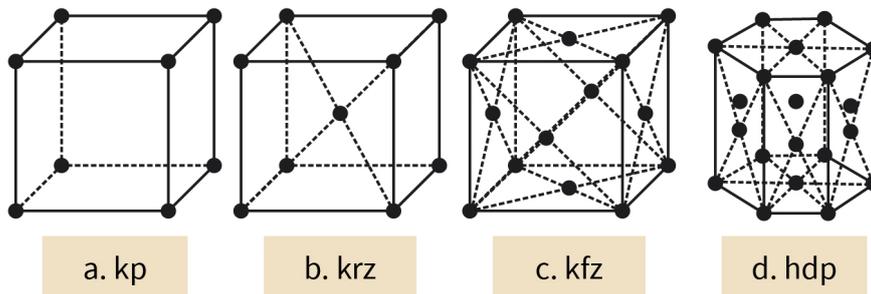
Elementarzelle

Es kommt wie bei der Ionenbindung zu einer Art Gitter, dieses ist aufgebaut durch **Elementarzellen** und kann unterschiedliche räumliche Formen aufweisen. Da sich die Atome mit möglichst vielen Nachbarn umgeben wollen, kommt es bei Metallen selten zu einer a.) kubisch primitiven (kp) Anordnung. Die dichtesten Packungen sind aufsteigend b.) kubisch raumzentriert (krz), c.) kubisch flächenzentriert (kfz) oder d.) hexagonale dichteste Packung (hdP) (Hornbogen et al., 2019, S. 44–52). Die Elementarzellen sind also die kleinsten Gitteranordnungen und bilden dann, streng geordnet und periodisch wiederkehrend, in einem dreidimensionalen Raumgitter einen sogenannten Kristall. Diese Struktur nennt man auch **Idealkristall**.

Elementarzelle
Eine Elementarzelle ist die kleinste Form eines Gitters oder eines Kristalls bei Metallen. Jede Form von Elementarzellen hat eine unterschiedliche Anzahl von eigenen Atomen.

Idealkristall
Eine perfekte Anordnung von Elementarzellen neben- und übereinander wird Idealkristall genannt.

Abbildung 5: Formen der Elementarzellen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Wie viele Atome hat eine Elementarzelle? Jede Elementarzelle teilt sich die Atome mit anderen Elementarzellen, somit haben die unterschiedlichen Elementarzellen jeweils unterschiedlich viele Atome. Eine kubisch flächenzentrierte Elementarzelle beinhaltet z. B. acht Eckatome, die mit acht anderen Zellen geteilt werden. Dazu kommen noch sechs Atome pro Fläche, die sich zwei Elementarzellen teilen. Eine Übersicht hierzu ist in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 3: Atome einer Elementarzelle

Typ	kp	krz	kfz	hdp
Eckatome	8	8	8	12
geteilt mit	8	8	8	6
Flächenatome oder Zentrumsatom	-	1	6	8
geteilt mit	-	1	2	2
Summe	$8/8 = 1$	$8/8 + 1/1 = 2$	$8/8 + 6/2 = 4$	$12/6 + 8/2 = 6$

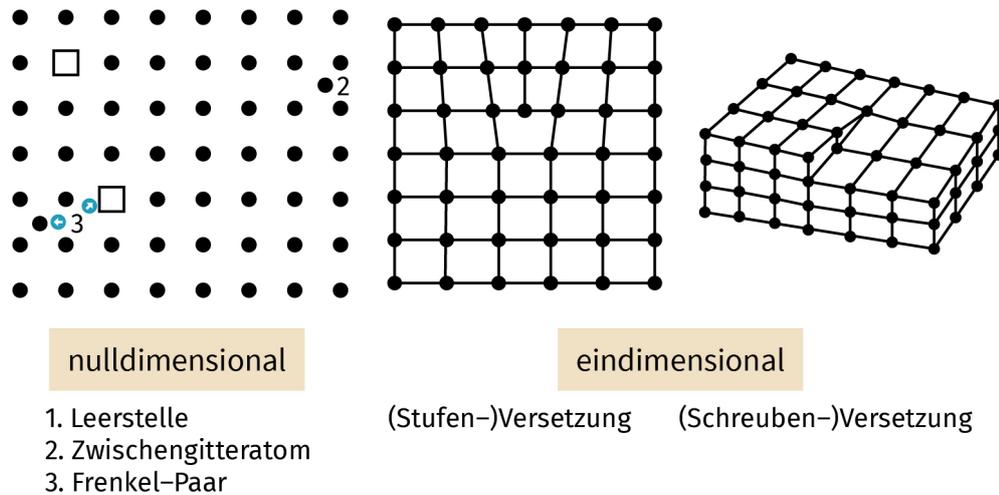
Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Gitterbaufehler

In der Realität kommen Idealkristalle selten vor, da meist Baufehler in Kristallen auftreten, sogenannte **Gitterbaufehler** oder Gitterfehler. Die Struktur mit den Baufehlern ist maßgeblich an den Eigenschaften des Werkstoffes beteiligt. Die Baufehler haben meistens eine äußere Ursache als Entstehung. Es werden verschiedene Varianten von Fehlern unterschieden, je nachdem, in wie vielen Dimensionen sie auftreten. Man spricht dabei von nulldimensionalen Punktfehlern, eindimensionalen Linienfehlern und zweidimensionalen Flächenfehlern (Hornbogen et al., 2019, S. 53–61).

Gitterbaufehler
 Unter dem Begriff Gitterbaufehler, oder nur Gitterfehler, versteht man Fehler im Aufbau von Kristallen wie bei Metallen. Sie sind verantwortlich für viele Eigenschaften und Verhaltensweisen der Metalle.

Abbildung 6: Gitterbaufehler



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Das Fehlen eines Atoms im Gitter wird Leerstelle, ein zusätzliches Atom zwischen dem eigentlichen Gitter im Zwischengitterraum wird Zwischengitteratom genannt (Bargel & Schulze, 2018, S. 6–8). Wenn beide nebeneinander auftreten, spricht man von einem Frenkel-Paar. Ein Atom im Zwischengitter aus einem Fremdelement wird als Einlagerungsatom bezeichnet. Außerdem gibt es Fremdatome, wenn ein anderes Element den Platz im Gitter einnimmt.

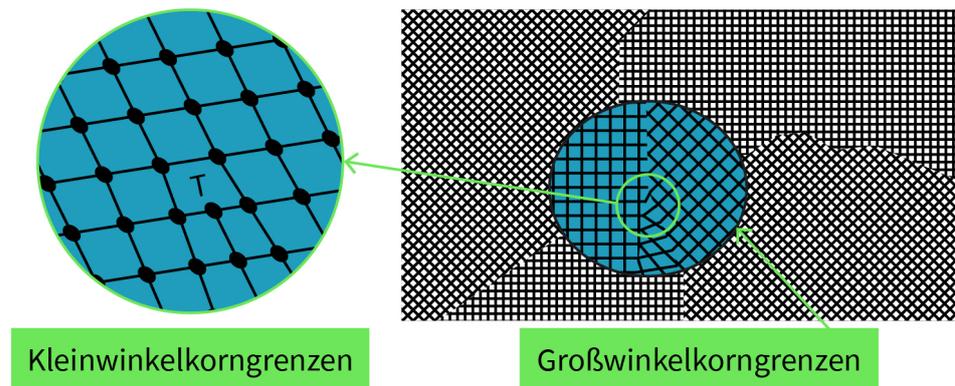
Bei den eindimensionalen Gitterbaufehlern spricht man von Versetzungen, dabei werden Stufenversetzungen und Schraubenversetzungen unterschieden. Bei vielen Versetzungen in einem kleinen Gebiet spricht man von einer hohen Versetzungsdichte.

Wenn Metalle von der Schmelze abkühlen, bilden sich zuerst Elementarzellen, dann Kristalle. Diese entstehen an mehreren Stellen gleichzeitig und werden auch Kristallite, oder **Körner** genannt. Diese wachsen so lange, bis sie an ein umliegendes Korn stoßen. Ein Metall besteht somit aus vielen Körnern mit Korngrenzen dazwischen. Je nach Winkel, in dem die Körner aufeinandertreffen, spricht man von Klein- (unter 15°) oder Großwinkelkorngrenzen (über 15°). Diese zählen zu den zweidimensionalen Gitterbaufehlern. Die Ausrichtung kann dabei komplett regellos oder auch strukturiert sein. Bei mehreren Körnern spricht man von einem (Korn-)Gefüge oder auch Materialgefüge (Hornbogen et al., 2019, S. 61–65). Gitterbaufehler beeinflussen die Eigenschaften eines Werkstoffes, je nach Typ des Fehlers kann eine Eigenschaftsverbesserung oder auch eine Verschlechterung erreicht werden. Sie müssen somit nicht immer als Fehler betrachtet werden, da sie auch als nützliches Instrument zur gezielten Manipulation von Werkstoffen eingesetzt und für einen speziellen Einsatz optimierbar sind.

Korn

Ein Korn ist ein Kristallgitter, welches beim Abkühlen aus der Schmelze entstanden ist. Zwischen mehreren Körnern befinden sich Korngrenzen.

Abbildung 7: Korngrenzen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

2.2 Metalle

Allgemeine Eigenschaften

Die wohl wichtigsten und weitesten verbreiteten technischen Werkstoffe sind Metalle. Durch ihre eigene Bindung mit frei verfügbaren Elektronen im Elektronengas ergeben sich ihre wichtigen Eigenschaften, wie die gute thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie die gute Plastizität. Metalle sind, wegen ihren mechanischen Eigenschaften, essenziell in der Gruppe der Strukturwerkstoffe, die Werkstoffe, die für die Aufrechterhaltung einer Struktur verwendet werden. Reine Metalle werden meist nur in speziellen Fällen eingesetzt, häufiger werden Legierungen (Mischungen) verwendet (Bargel & Schulze, 2018; Hornbogen et al., 2019).

Bei reinen Metallen sind die Elektronen im Elektronengas sehr frei verfügbar, was zu einer sehr guten thermischen, magnetischen und elektrischen Leitfähigkeit dieser Metalle führt. Daraus erschließen sich folgende Anwendungen:

- elektrische Leitungsdrähte aus reinem Kupfer, Aluminium oder Silber (Hornbogen et al., 2019, S. 321–322),
- Einsatz von reinem Eisen in der Elektrotechnik wegen seiner guten magnetischen Eigenschaften (Bargel & Schulze, 2018, S. 175) sowie
- Hochtemperatur-Metalle wie Wolfram und Molybdän im Turbinenbau aufgrund thermischer Eigenschaften (Hornbogen et al., 2019, S. 321–322).

Die Verarbeitung dieser reinen Metalle ist oft hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften (z. B. Kupfer mit einer sehr niedrigen Steifigkeit), aber auch aufgrund der teils hohen Schmelzpunkte eine Herausforderung (z. B. Wolfram). Weiterhin ist ein reinstes Material im Vorkommen und der Verfügbarkeit limitiert (z. B. Silber), sodass diese preislich hoch angesiedelt sind. Beim Abbau und Recycling dieser Materialien muss streng auf eine Vermeidung

dung von Kontamination mit anderen Materialien geachtet werden. Eine Unterteilung von Metallen ist in Eisen- und Nichteisenwerkstoffe möglich (Bargel & Schulze, 2018; Hornbogen et al., 2019).

Eisenwerkstoffe

Ein Großteil der verwendeten Metalle basiert auf dem chemischen Element Eisen (Fe). Reines Eisen wird als Konstruktionswerkstoff sehr selten verwendet, da es sehr weich ist. Es findet in seiner reinen Form meist nur wegen seiner magnetischen Eigenschaften Einsatz. Eine Übersicht der mechanischen und physikalischen Eigenschaften ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 4: Mechanische und physikalische Eigenschaften von Eisen

Kennzahl	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	7,85
Elastizitätsmodul	MPa	206.000
Elektrische Leitfähigkeit	S/m	9,93
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$	80,2

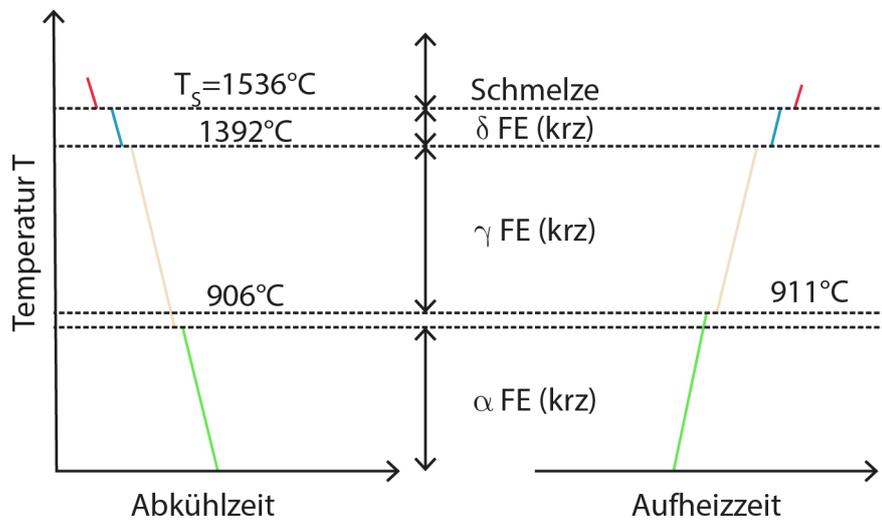
Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Je nach Temperatur kommt Eisen in verschiedenen Phasen/Gitterstrukturen der Atome vor. Dies wird durch die Abkühl- und Aufheizkurve von reinem Eisen veranschaulicht.

Schmelztemperatur
Oberhalb der Schmelztemperatur befindet sich Eisen in Schmelze, darunter erstarrt das Eisen. Die Schmelztemperatur von reinem Eisen liegt bei 1536 °C, bei Zugabe von Kohlenstoff, oder anderen Legierungselemente verringert sich die Temperatur.

- Über 1536 °C (**Schmelztemperatur**) ist Eisen in Schmelze.
- Zwischen 1536 °C und 1392 °C befindet sich Eisen in einer kubisch-raum-zentrierten (krz) Gitterstruktur und wird δ -Eisen genannt.
- Zwischen 1392 °C und 906 °C beim Abkühlen, bzw. 911 °C beim Aufheizen (richtungsabhängig) kommt Eisen in einer kubisch-flächenzentriert (kfz) Gitterstruktur vor und wird γ -Eisen oder auch Austenit genannt (Bargel & Schulze, 2018, S. 176).
- Unter 906 °C bzw. 911 °C ist Eisen wieder krz und wird α -Eisen oder auch Ferrit genannt.

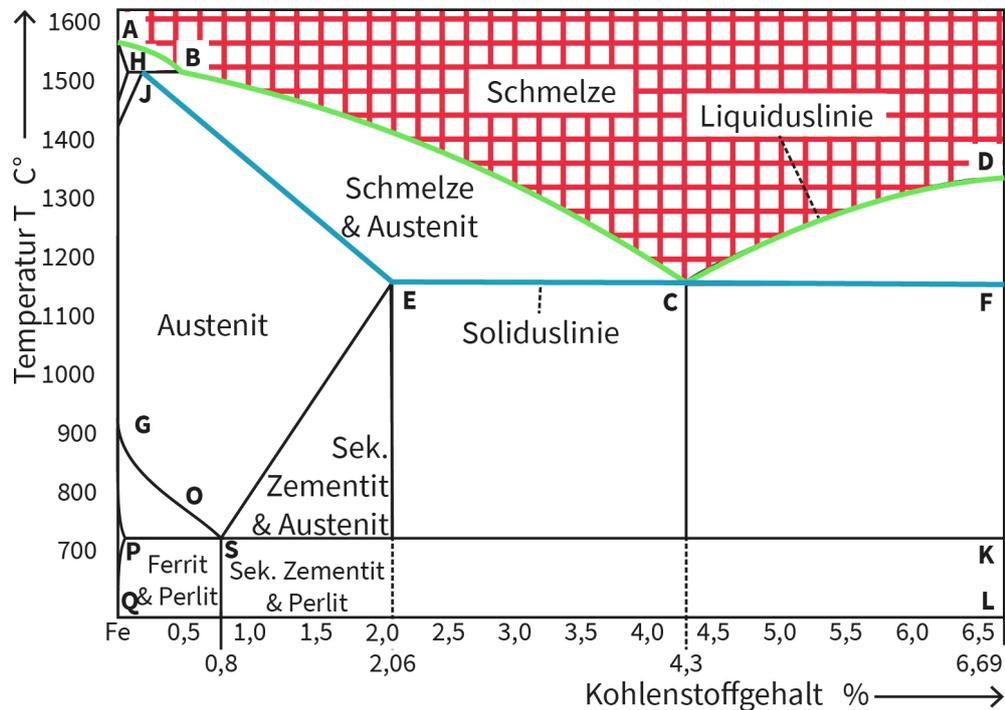
Abbildung 8: Abkühl- und Aufheizkurve von reinem Eisen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Eisen kommt in der Regel mit anderen Elementen zum Einsatz, um die mechanischen und physikalischen Eigenschaften zu optimieren. Man spricht dann von Eisen mit Legierungselementen bzw. Legierungen. Ein zentrales Element für Eisen-Legierungen ist dabei Kohlenstoff. Es kommt in sehr geringen Mengen in der Legierung vor, kann die Werkstoffeigenschaften jedoch gravierend verändern. Dies hängt davon ab, wo und wie das Kohlenstoffatom in die Gitterstruktur eingebettet ist, im α -, γ - oder δ -Eisen, d. h. in der krz- oder kfz-Variante des Eisens (Bargel & Schulze, 2018, S. 175). Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) ist deutlich komplexer als die einfache Abkühl- und Aufheizkurve von reinem Eisen. Die Schmelztemperatur sinkt durch die Zugabe von Kohlenstoff. Weitere Temperaturen, das Gefüge und die Gitterstrukturen verändern sich ebenfalls deutlich. Im EKS ist auf der x-Achse der Anteil des Kohlenstoffs aufgetragen, während auf der y-Achse die Temperatur steht. Die Linien zeigen die Übergangstemperaturen zwischen den unterschiedlichen Phasen (Bargel & Schulze, 2018, S. 177). Die Zustände sind abhängig davon, wie schnell das Metall abgekühlt wird. Gewisse Zustände sind nur durch sehr langsames Abkühlen erreichbar (Hornbogen et al., 2019, S. 104).

Abbildung 9: Vereinfachtes Eisen-Kohlenstoff-Schaubild



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Oberhalb der Liquiduslinie (Punkte A, B, C und D) kommt nur Schmelze vor, unterhalb der Soliduslinie (Punkte J, E, C und F) nur reiner Feststoff (Bargel & Schulze, 2018, S. 177). Zwischen beiden liegt eine Mischung aus Feststoffen und Schmelze vor. Weiterhin ergeben sich Bereiche, in denen Eisen als Mischkristalle in unterschiedlichen Formen (z. B. Ferrit = krz oder Austenit = kfz) und Kohlenstoffverbindungen auftritt.

Stahl
Dieser ist einer der wichtigsten Baustoffe. Er besteht aus den Elementen Eisen, Kohlenstoff, sowie möglichen anderen Legierungselementen. Bei einem Kohlenstoffgehalt unter 0,8 Prozent spricht man von untereutktoidem, zwischen 0,8 Prozent und 2,06 Prozent von übereutktoidem Stahl.

Bis zu einem Kohlenstoffgehalt von 2,06 Prozent spricht man von **Stahl** (unter 0,8 Prozent: untereutktoid, zwischen 0,8 Prozent und 2 Prozent: übereutktoid). Eisen-Kohlenstoff-Legierungen über 2,06 Prozent Kohlenstoffanteil sind so spröde, dass sie nur per Guss hergestellt werden können, hier spricht man dann von Gusseisen. Generell kommen technische Eisen-Kohlenstoff-Legierungen nur bis zu einem Kohlenstoffgehalt von circa 6,67 Prozent vor (Bargel & Schulze, 2018, S. 177).

Am häufigsten wird Eisen im technischen Bereich in Verbindung mit weiteren Elementen verwendet. Hier muss man unterscheiden, ob es sich um Legierungselemente, oder um Begleitelemente (auch Spurenelemente) handelt. Legierungselemente werden bewusst hinzugefügt, um spezielle Eigenschaften zu erzielen. Begleitelemente sind Kontaminationen aus Abbau, Recycling oder Herstellung und können bis zu geringen Mengen toleriert werden. Begleitelemente führen eher zu negativen Eigenschaften im Werkstoff und sind z. B. Schwefel, Phosphor, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff. Kohlenstoff kann als Begleitelement aber auch als Legierungselement gesehen werden. Bei weiteren Begleit-

oder Legierungselementen spricht man anstatt eines Eisen-Kohlenstoff-Diagramms von Zustandsdiagrammen. Die genauen Temperaturangaben, Prozentanteile und Gefügearten aus dem EKS sind dann nicht mehr aussagekräftig (Bargel & Schulze, 2018, S. 176).

Bei **Stahllegierungen** bis zu einem Anteil von 5 Prozent spricht man von niedriglegierten Stählen, diese haben ähnliche Eigenschaften wie unlegierte. Durch die geringe Zugabe der Legierungselemente wird vorrangig die Härte verbessert, um die mechanischen Eigenschaften zu beeinflussen. Dies geschieht durch die veränderte Phasenumwandlung bei der Abkühlung und der Mischkristallbildung durch die verschiedenen Elemente. Die mechanischen Eigenschaften wie die Festigkeit werden beeinflusst, da sich die Atome durch die unterschiedlichen Atomgrößen schlechter gegeneinander verschieben können oder es kommt zu Einlagerungsmischkristallen. Einige Legierungselemente bilden auch Carbide mit Kohlenstoff, was eine starke chemische Bindung ist und einen teilweise nicht-metallischen Charakter wie eine Keramik hat.

Stahllegierung

Die Stahllegierungen sind Kombinationen von Eisen, Kohlenstoff und anderen Legierungselementen. Bis 5 Prozent Anteil der Legierungselemente spricht man von niedrig-, ab 5 Prozent von hochlegierten Stahlsorten.

Bei einem Anteil von über 5 Prozent eines Legierungselementes spricht man von hochlegierten Stählen. Die Zugabe führt hier gezielt zu speziellen Eigenschaften der Werkstoffe. Hans-Jürgen Bargel nennt hier eine „verbesserte Korrosionsbeständigkeit, Zunderbeständigkeit, Schneidfähigkeit bei Rotglut oder besondere elektrische oder magnetische Eigenschaften“ (Bargel & Schulze, 2018, S. 228). Einige Legierungselemente sind:

- Chrom (Cr): verbessert Vergütbarkeit und Zugfestigkeit;
- Nickel (Ni): erhöht Kerbschlagzähigkeit;
- Molybdän (Mo): verbessert Härte, Schweißbarkeit, Streckgrenze und Festigkeit;
- Kobalt (Co): verbessert Wärmebeständigkeit, magnetische Eigenschaften sowie
- Mangan (Mn): erhöht Härte, Streckgrenze & Festigkeit (über 4 Prozent spröde).

Nichteisenwerkstoffe

Nichteisenwerkstoffe werden in Leichtmetalle (Elemente mit Dichte unter 5 g/cm^3 : Al, Ti, Mg) und Schwermetalle (Elemente mit Dichte über 5 g/cm^3 : Pb, Cu) eingeteilt (Bargel & Schulze, 2018, S. 309). Neben den 40 Mio. Tonnen Verbrauch an Eisen und Stählen werden in Deutschland circa 3 Mio. Tonnen Nichteisenmetalle wie Kupfer, Aluminium, Blei, Zink und Titan verarbeitet. Die einzelnen Metalle sind sehr stark mit Branchen verknüpft, so wird Kupfer in der Elektroindustrie, Aluminium im Leichtbau und Titan z. B. in der Medizintechnik verwendet (Bargel & Schulze, 2018, S. 309). Sämtliche Metalle gibt es in reiner Form oder als Legierungselemente ähnlich zu Stählen und Stahllegierungen.

Kupfer

Das Schwermetall Kupfer ist eines der ältesten Nichteisenmetalle und wird schon Jahrtausende eingesetzt. Mittlerweile ist der größte Absatzmarkt von Kupfer wegen der guten elektrischen Leitfähigkeit die Elektroindustrie. Kupfer ist kubisch flächenzentriert und besitzt nach Silber die zweithöchste elektrische Leitfähigkeit (Bargel & Schulze, 2018, S. 312–313).

Kupfer wird auch oft in Verbindung mit anderen Metallen oder Halbmetallen verwendet. Kupferlegierungen zeichnen sich durch hohe Festigkeit, Verformbarkeit, Kaltverfestigung, Korrosionsbeständigkeit und gute Gleiteigenschaften aus (Bargel & Schulze, 2018, S. 312–323). Typische Kupferlegierungen sind:

- Kupfer-Zinn-Nickel-Legierungen: Bronze,
- Kupfer-Zink-Legierungen: Messing sowie
- Kupfer-Nickel-Werkstoffe: Kupfernickel.

Nickel

Das Schwermetall Nickel kommt in der Natur häufig mit Kobalt vor. Beides sind Schwermetalle, wobei Kobalt allein wenige und sehr selektive Anwendungen findet. Nickel ist sehr korrosionsbeständig und wird meistens in Form von Nickellegierungen eingesetzt (Bargel & Schulze, 2018, S. 323).

Durch seine hohe Korrosionsbeständigkeit wird es oft in Verbindung mit chemischen Medien eingesetzt, so in der chemischen Industrie, Öl- und Gasförderung, Abfallwirtschaft und in der Automobilindustrie als Katalysator. Aufgrund einer weitverbreiteten **Nickelallergie** bei Hautkontakt sollen Nickel und Nickellegierungen bei Gegenständen, die bei Anwendenden in Hautkontakt kommen, nicht mehr eingesetzt werden (Bargel & Schulze, 2018, S. 323–332).

Aluminium

Das Leichtmetall **Aluminium** ist nach Sauerstoff und Silicium das dritthäufigste Element der Erdkruste. Aluminium oxidiert sofort als Al_2O_3 . Dieses Oxid zählt zu den stabilsten chemischen Verbindungen. Eine Reduzierung zu Metall benötigt sehr viel Energie. Deswegen findet es trotz seiner Häufigkeit im Vergleich zu Stahl oder anderen Metallen weniger Einsatz. Es besitzt bei sehr niedriger Dichte gute mechanische Eigenschaften und wird deswegen gerne im Leichtbau eingesetzt, vorrangig hier in der Fahrzeug- und Luftfahrttechnologie. Es wird aber auch als Verpackung in der Lebensmittel- und Behälterindustrie benutzt. Zudem findet es in speziellen Fällen auch in der Elektronik und Elektrotechnik Anwendung (Bargel & Schulze, 2018, S. 332–333).

Auch bei Aluminium gibt es viele Anwendungen von Legierungen. Hierbei unterscheidet man Aluminiumknet- und Gusslegierungen (Bargel & Schulze, 2018, S. 332–340):

- Aluminiumknetlegierungen werden durch Umformen hergestellt und können durch die Elemente Magnesium, Silicium, Kupfer, Zink, Nickel und Mangan verschleißfest für diverse Anwendungen im Maschinenbau eingestellt werden. Sie sind außerdem sehr **duktil**.
- Aluminiumgusslegierungen, wie die Aluminium-Silizium-Legierungen, werden häufig für Motoregehäuse und Getriebegehäuse im Fahrzeug- und Flugzeugbau verwendet.

Nickelallergie

Der Werkstoff Nickel kann bei Hautkontakt zu Allergien führen und wird deswegen nicht für Komponenten eingesetzt, die für den Kontakt zum Menschen konzipiert werden.

Aluminium

Das ist ein Leichtmetall mit niedriger Dichte. Es ist nach Sauerstoff und Silicium das dritthäufigste Element der Erdkruste und wird in vielen Industriebereichen eingesetzt.

Duktilität

Duktile Werkstoffe sind sehr weich und lassen sich deswegen sehr gut verformen, bis es zu einem Bruch des Werkstoffes kommt.

Magnesium

Der Einsatz von Magnesium (Leichtmetall) ist in der Technik noch nicht voll entfaltet, obwohl es die geringste Dichte aller Metalle und dabei eine mittlere Festigkeit besitzt. Da es eine hohe chemische Reaktionsfähigkeit besitzt, ist die Verarbeitung komplexer. Der Einsatz ist ebenfalls im Leichtbau und wird ähnlich zum Aluminium im Guss für z. B. Motorblöcke verwendet (Bargel & Schulze, 2018, S. 340–341).

Titan

Das Leichtmetall Titan wird trotz des hohen Preises aufgrund der geringen Dichte und seiner Korrosionsbeständigkeit in vielen speziellen Bereichen eingesetzt (chemischer Apparatebau und Galvanotechnik). Durch eine geringe Anzahl von Legierungselementen verbessert es die mechanischen Eigenschaften auch deutlich und so wird es in vielen Anwendungsgebieten, bei denen es auf hohe Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit und geringes Gewicht ankommt, eingesetzt. Dies ist z. B. im Flugzeugbau und bei Hochleistungsmotoren der Fall. Titan und Titanlegierungen haben noch weitere besondere Eigenschaften, so bildet es an der Luft eine schützende Oxidschicht und ist sehr biokompatibel, d. h., es ist im Körper gut verträglich. Aus diesem Grund findet es auch in der Medizintechnik, als **Implantatwerkstoff** z. B. für Hüftimplantate einen Einsatz (Hornbogen et al., 2019, S. 327; Wintermantel & Ha, 2002).

Implantatwerkstoff

Dies sind Werkstoffe, die für den Einsatz im Körper vorgesehen sind. Sie benötigen je nach Einsatz, Invasivität, d. h. wie weit sie in den Körper gelangen, und Verweildauer im Körper eine besonders gute Verträglichkeit.

Silber

Silber zählt zu den Schwer- und Edelmetallen. Es ist wegen der vielen freien Elektronen der beste elektrische Leiter unter den Metallen. Außerdem besitzt es eine biozide oder antimikrobielle Wirkung. Das heißt, es wirkt toxisch (tödlich) auf Mikroben wie Keime und Bakterien. Neben der Elektrotechnik findet es somit auch in der Medizintechnik Anwendung.

Weitere Nichteisenmetalle, auf die hier in diesem Lernzyklus nicht weiter eingegangen wird, sind Zirkonium, Zinn, Zink, Blei sowie das Edelmetall Gold.

2.3 Keramiken

Allgemeine Kennzeichen, Definition, Bedeutung

Keramiken sind nichtmetallische, anorganische Werkstoffe mit einer hohen Druckfestigkeit, Temperaturbeständigkeit und chemischen Beständigkeit (Hornbogen et al., 2019, S. 291).

Ein guter Weg, die Eigenschaften von Keramiken darzustellen, ist eine Gegenüberstellung zu Metallen. Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Keramik zu Stahl zeigt deutliche Unterschiede. Keramiken werden von Metallen durch den Temperaturkoeffizienten abgegrenzt. Metalle haben dabei einen positiven, Keramiken einen negativen Koeffizienten.

Aus folgender Tabelle ergibt sich für Keramiken im Vergleich zu Metallen, dass sie (Hornbogen et al., 2019, S. 292–294) ...

- ... deutlich leichter sind,
- deutlich steifer sind,
- unterschiedlich auf Zug und Druck reagieren,
- eine sehr hohe Druckfestigkeit haben und
- eine hohe Schmelztemperatur besitzen.

Tabelle 5: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Keramik zu Stahl

Eigenschaft	Einheit	Keramik Al_2O_3	Stahl S235
Dichte	g/cm^3	3,9	7,85
Elastizitätsmodul	GPa	390	210
Streckgrenze	MPa	–	235
Zugfestigkeit	MPa	400	400
zulässige Druckspannung	MPa	3.000	235
Bruchdehnung	%	~0	30
Härte	–	1.700	140
Schmelzpunkt	°C	2.040	1.500

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Das niedrige Gewicht liegt bei Keramiken an der Verbindung von Metallen mit nichtmetallischen Elementen, wie Oxide und Silizium, die eine niedrige Dichte besitzen. Die mechanischen Eigenschaften können hingegen durch die andere Bindung der Atome erklärt werden. Während Metalle eine metallische Bindung mit freien Elektronen bilden, nutzen Keramiken die Ionenbindung. Diese Bindungsform zeichnet sich durch eine äußerst starke Bindungsform aus (Hornbogen et al., 2019, S. 292–294).

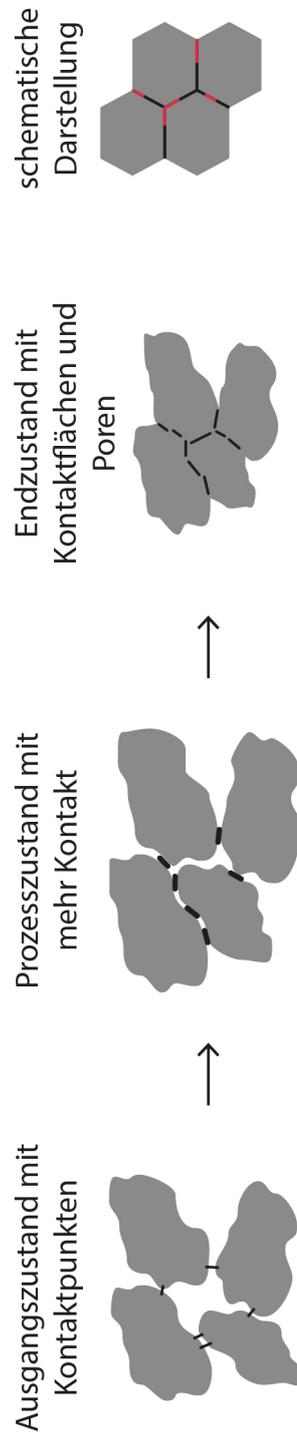
Die hohe Schmelztemperatur bedeutet für Keramiken, dass die Herstellung komplexer ist als bei Metallen. Metalle werden bis zur Schmelze erhitzt und in einer Rohteilform wieder abgekühlt. Das Erhitzen für Keramiken ist schwierig, da für so hohe Temperaturen enorme Energien notwendig sind und auch nahezu keine Formen vorhanden sind, die diese Temperaturen aushalten. Stattdessen gibt es einen Drei-Schritt-Prozess von Keramik-Bauteilen. Zuerst wird ein Pulver mit Korngrößen meist unter 0,1 mm hergestellt. Daraus wird ein Grünkörper oder auch Grünling, Rohteil oder Rohling genannt, geformt. Das kann zähflüssig, mit Bindemitteln oder trocken erfolgen. Für eine Fertigung von hohen Stückzahlen gibt es auch das Verfahren des Trockenpressens, des Schlickergusses und des Spritzgießens. Zuletzt wird im Ofen bei hohen Temperaturen, jedoch unterhalb der Schmelztemperatur, und gegebenenfalls unter Druck der Sinterprozess durchgeführt. Über die Zeit hinweg kommt es durch **Diffusion** zu einer energetisch begünstigten Umordnung der Körner. Die Oberflächen der Körner bewegen sich bei erhöhter Temperatur so, bis sie energetisch

günstiger und näher aneinander liegen (Bargel & Schulze, 2018, S. 96). Die anfangs geringen Berührungspunkte werden so über die Zeit zu Berührungsflächen. Je länger der Vorgang dauert, umso besser liegen die Körner aneinander an, das Volumen des Grünkörpers verkleinert sich und die Dichte erhöht sich dabei. Durch die lange Zeit im Sinterofen kommt es schließlich zu nahezu komplett anliegenden Körnern, wobei kleine Poren verbleiben können. Die Volumenänderung führt zu einem Schrumpfen des Bauteils, welches in der Auslegung berücksichtigt werden muss. Um die finalen Abmessungen des Bauteils zu erreichen, muss der Grünkörper also größer geformt werden (Bargel & Schulze, 2018, S. 363).

Diffusion

Die Diffusion beschreibt einen Transport, ein Wandern oder die Bewegung von einzelnen Teilchen. Beim Sintern wird so die Bewegung der einzelnen Körner bis hin zu einem energetisch günstigeren Zustand genannt.

Abbildung 10: Sinterprozess bei Keramiken



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Technische Keramiken werden in vier Gruppen basierend ihrer Eigenschaften und ihres Aufbaus eingeteilt. Die einatomaren Stoffe um Kohlenstoff und Silizium finden sich im Bereich der Hartstoffe um **Diamanten** und im Bereich der Halbleiter (z. B. Silizium) wieder. Die nichtoxidischen Keramiken finden sich aufgrund der sehr guten Temperaturbeständigkeit in der Energietechnik wieder. Kristalline oxidische Keramiken finden sehr viele Anwendungen im technischen Bereich, wie auch bei Tonkeramik, Porzellan oder auch als Schneidkeramik. Anorganische Gläser bilden eine Sondergruppe, da die oben genannten Eigenschaften nicht alle zutreffen. Sie sind nicht wie die Keramiken **kristallin**, sondern **amorph**. Dadurch sind sie transparent und bekommen spezielle Anwendungen (Hornbogen et al., 2019, S. 292–294).

Einatomare keramische Stoffe

Die wichtigsten Anwendungen der technischen einatomaren Keramiken um Kohlenstoff, Silizium, Germanium (Gruppe IV im Periodensystem) und Bohr sind Halbleiter, Diamant, Graphit und Kohleglas (Hornbogen et al., 2019, S. 294).

Diamant ist wegen seiner tetraederförmigen Gitterstruktur ein sehr steifer und harter Werkstoff und wird in Verbindung mit anderen Werkstoffen als Schneid- oder auch Schleifwerkzeug für z. B. Bohrer und Trennscheiben verwendet. Da Diamant nur bei sehr hohem hydrostatischem Druck erzeugt werden kann, werden meist nur kleine Diamantkristalle produziert. Hierzu werden Stoßwellen durch Sprengstoff erzeugt, die Graphitpulver in Diamantkristalle umwandeln. Sobald die Kristalle hergestellt sind, sind sie in einem stabilen Zustand (Hornbogen et al., 2019, S. 294–296).

Graphit hat keine Tetraederform, sondern bildet flache wabenähnliche Schichten, die leicht aufeinander gleiten können. Aus diesem Grund findet Graphit oft als Schmiermittel Anwendung. Außerdem kann es wegen des hohen Schmelzpunktes im Hochtemperaturbereich und als Tiegel für Schmelzen eingesetzt werden. Graphit wird außerdem im chemischen Anlagenbau und auch in der Reaktortechnik eingesetzt (Hornbogen et al., 2019, S. 294–296).

Kohleglas wird als chemisch beständiger Hochtemperaturwerkstoff verwendet. Es wird durch Zersetzen von organischen Verbindungen (z. B. Zellulose) hergestellt und erzeugt Kohlenstoffäden, oder **Kohlefasern**, die bei Verbundwerkstoffen eingesetzt werden, werden nach einem ähnlichen Verfahren hergestellt. Sie zeigen ein sehr günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Dichte (Hornbogen et al., 2019, S. 295–296).

Nichtoxidische Verbindungen

Nichtoxidische Keramikverbindungen bestehen aus mehr als einer Atomart. Ausgangs-atome sind Kohlenstoff, Silizium und Germanium sowie Bohr, Stickstoff (N) und Wasserstoff (H). Die Verbindung findet hier untereinander oder mit einem Metallatom statt. Anwendung finden die nichtoxidischen Keramiken als Hart- und Hochtemperaturwerkstoffe im Maschinenbau. Den größten Einsatz bildet Siliziumkarbid (Si_3N_4), welches theoretisch bis zu einer Verwendungstemperatur von 1400 °C eingesetzt werden kann. Dies macht es für den Einsatz als z. B. Gasturbinenschaufel interessant (Hornbogen et al., 2019, S. 296–299).

Diamant

Ein Diamant ist ein einatomarer keramischer Werkstoff. Neben seinem Einsatz in der Schmuckindustrie kann er in technischen Anwendungen als Schneid- oder Schleifwerkzeug benutzt werden.

Kristallin

Ein fester Werkstoff mit einer Kristallstruktur oder einem stark geordneten und kristallisierten Aufbau wird kristallin genannt.

Amorph

Ein fester Werkstoff mit einer ungeordneten und regellosen Struktur wird amorph bezeichnet.

Kohlefasern

Diese Fasern, die bei Verbundwerkstoffen eingesetzt werden, zeigen ein sehr günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Dichte.

Temperaturwechselbeständigkeit

Die Temperaturwechselbeständigkeit beschreibt das Zusammenspiel zwischen Abkühlgeschwindigkeit, Temperaturgradienten, Spannungen, Ausdehnungskoeffizienten, Elastizitätsmodul und Wärmeleitfähigkeit.

Bei diesen Keramiken ist die sogenannte **Temperaturwechselbeständigkeit** (TWB) sehr wichtig. Dem guten Einsatz bei hohen Temperaturen steht ein sprödes Verhalten bei tieferen Temperaturen gegenüber, was zu Wärmespannungen und eventuellen Schäden beim Abkühlen auf Raumtemperatur führen kann. Siliziumkarbid hat eine geringe Wärmedehnung, eine gute Wärmeleitfähigkeit und somit sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit (Hornbogen et al., 2019, S. 296–299).

Kristalline Oxidkeramik

Die beiden wichtigsten technischen Keramiken sind Aluminiumoxid und Zirkonoxid. Sie finden Einsatz in allen technischen Bereichen, vom Standardmaschinenbau wegen der guten Festigkeit und Härte über die Elektrotechnik wegen des guten Isolationsvermögens bis hin zu Hüftimplantaten aufgrund der guten tribologischen Eigenschaften.

Oxidische Keramiken werden basierend auf der hohen Temperaturbeständigkeit auch als „feuerfeste“ Werkstoffe eingesetzt. Hierbei finden folgende Werkstoffe Anwendung: Silikasteine bis zum Schmelzpunkt von 1713 °C, Schamottesteine (bis 1670 °C; mit erhöhtem Al_2O_3 -Gehalt bis 1800 °C oder 1900 °C) oder Korund (Al_2O_3) bis auf 2000 °C (Hornbogen et al., 2019, S. 300–305).

Anorganische nichtmetallische Gläser

Wie oben beschrieben bilden die anorganischen nichtmetallischen Gläser eine Sondergruppe, da sie nicht wie die Keramiken kristallin, sondern amorph sind. Die Anwendungen für diese Gläser sind weit verstreut. So werden Glasfasern zur Datenübertragung und zur Isolation als Glaswolle verwendet. Außerdem wird Glas wegen der guten chemischen Beständigkeit für Apparate und Geräte in der Chemieindustrie eingesetzt. Im Gegensatz zum Sintern bei den Keramiken können technische Gläser durch ein Abkühlen aus der Silikatschmelze erzeugt werden. Dabei ist die Geschwindigkeit wichtig, um eine Umordnung zu Kristallkeimen zu verhindern. In dem Zusammenhang geschieht auch keine Phasenumwandlung, sondern eher ein Einfrieren. Typische Gläser beinhalten außer SiO_2 noch NaO_2 und CaO . Da Gläser bei Raumtemperatur ein sprödes Verhalten zeigen und nicht bearbeitet werden können, muss es im zähflüssigen Zustand ver- bzw. geformt werden. Das bedeutet, es muss im heißen Zustand geblasen oder gewalzt werden, um in die Endform zu kommen. Verfärbungen können durch Zugabe von reinen Metallionen wie Cobalt, Kupfer, Chrom und Mangan erzielt werden. Da Quarzsand, das Ausgangsmaterial, oft durch Eisen verunreinigt ist, kann es hier auch zu Verfärbungen kommen (Hornbogen et al., 2019, S. 305–311).

Je größer ein Bauteil aus Glas ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass in der Oberfläche Fehler zu Oberflächenspannungen führen. Die theoretische Bruchfestigkeit wird deswegen in Bauteilen nie erzielt. Messungen an realen Glasbauteilen zeigen stets eine deutlich niedrigere Bruchfestigkeit als den theoretisch zu erreichenden Wert. Nur bei sehr feinen und dünnen Glasfasern kann der theoretische Wert nahezu erreicht werden. Diese Fasern werden auch zur Verstärkung von Polymeren verwendet. Die Transparenz für elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Spektrum (Licht) ist sehr gut, bei anderen Wellenlängen jedoch nicht. Welche Wellenlängen durchgelassen werden, kann durch

unterschiedliche Glaszusammenstellungen variiert werden. In den letzten Jahren haben Glasfasern als Lichtleiter Kupferleitungen als elektrische Leiter bei der Datenübertragung abgelöst.

2.4 Polymere

Polymere werden auch oft Kunststoffe genannt, obwohl dies aus wissenschaftlicher Sicht keine Grundlage hat, da Polymere nicht künstlicher oder weniger künstlich als viele andere Werkstoffe sind. In einigen Begrifflichkeiten lässt sich im Deutschen der Term Kunststoff jedoch nicht ganz verhindern. So wird er auch in diesem Manuskript gelegentlich verwendet. Im Englischen wird der Begriff „plastics“ verwendet, die deutsche Übersetzung „Plastik“ wird jedoch oft abwertend assoziiert.

Im Allgemeinen haben Polymere eine geringe elektrische Leitfähigkeit, eine gute chemische Beständigkeit und eine niedrige Dichte (Hornbogen et al., 2019, S. 372). Sie reagieren jedoch sehr unterschiedlich bei veränderten Temperaturen. So sind sie eher hart und spröde bei tiefen Temperaturen und haben eine geringe Festigkeit bei hoher Einsatztemperatur.

Während Ausgrabungen und archäologische Funde zeigen, dass Metalle und Keramiken schon sehr lange als Werkstoffe für Hilfsmittel gedient haben, sind Polymere erst seit der jüngeren Vergangenheit im Einsatz. Polymere haben jedoch in dieser Zeit in vielen Bereichen andere Werkstoffe ersetzt. Dies liegt an ihren besonderen Eigenschaften und Fähigkeiten, wie der geringen Dichte, der kostengünstigen (Massen-)Herstellung und Korrosionsbeständigkeit. Im weiteren Verlauf werden wir genauer darauf eingehen (Weißbach et al., 2018, S. 367).

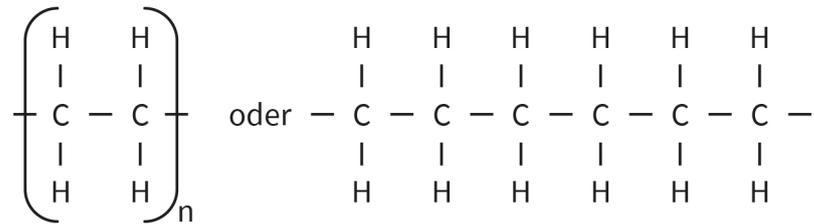
Allgemeine Kennzeichnung, Bezeichnung

Polymere bestehen aus Kohlenstoffverbindungen und sind somit ein nichtmetallischer organischer Werkstoff. Sie setzen sich aus vielen chemisch verbundenen Monomeren zusammen. Die Begriffe Polymer und Monomer kommen dabei aus dem Griechischen:

- Polymer: Poly = viele, meros = Teil und
- Monomer: Mono = ein, meros = Teil.

Folgende Abbildung zeigt am Beispiel von Polyethylen wiederkehrende C_2H_4 Gruppen, die lange Ketten bilden können:

Abbildung 11: Aufbau von Polyethylen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

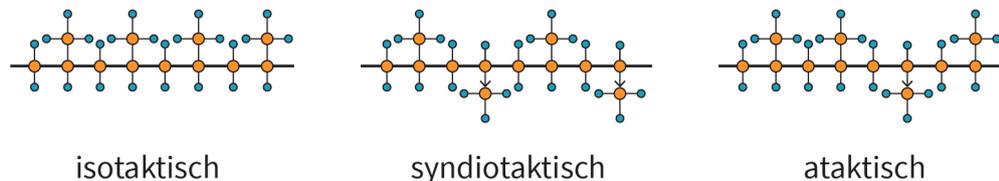
Die Begriffsdeutung erklärt auch schon den Aufbau: viele aneinandergereihte Monomere ergeben ein Polymer. Das Grundgerüst eines Monomers ist dabei ein Kohlenstoffatom und ein Wasserstoffatom, welche sich über eine Elektronenpaarbindung zu Einzelmolekülen verbinden. Diese werden in chemischen Reaktionen, der sogenannten **Polymerbildung**, ebenfalls durch Elektronenpaarbindungen zu kettenartigen (oder auch netzartigen) Makromolekülen. Man spricht hier auch von Molekül- oder Monomerketten (Weißbach et al., 2018, S. 368).

Polymerbildung
Polymere werden in synthetischen Prozessen hergestellt, bei denen sich einzelne Moleküle zu langen Molekülketten verknüpfen oder aneinanderreihen.

Viele Polymere haben entlang ihrer Kohlenstoffketten Seitengruppen. Dabei gibt es drei Arten, wie die Seitengruppen angeordnet sein können, diese Anordnung wird Taktizität genannt:

- isotaktisch: Seitengruppen sind immer auf einer Seite;
- syndiotaktisch: Seitengruppen sind regelmäßig alternierend angeordnet sowie
- ataktisch: keine regelmäßige Verteilung der Seitengruppen.

Abbildung 12: Anordnung der Seitengruppen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Da oft bei der Polymerisation (Form der Polymerbildung) die Zeit nicht ausreicht, um die syndiotaktische Konstellation zu erreichen, ordnen sich viele Moleküle ataktisch. Eine isotaktische Anordnung der Seitengruppe erfordert eine besondere Reaktionsführung bei der Polymerisation (Bargel & Schulze, 2018, S. 423–429).

Molekulare Herstellung von Polymeren – Polymerbildung

Es werden drei Verfahren, um die Grundmoleküle zu Makromolekülen in Kettenform mit Seitengruppen zu verbinden, unterschieden (Bargel & Schulze, 2018, S. 409):

- Polymerisation: Zusammenschluss gleicher Monomere (Polymerisate);
- Polykondensation: Zusammenschluss verschiedener Monomere (Polykondensate) mit Abspaltung von Nebenprodukten sowie
- Polyaddition: Verknüpfung verschiedener Monomere miteinander (Polyaddukte), ohne Nebenprodukte.

Ausschlaggebend ist bei dem Prozess nicht die Reaktion, sondern die Form der Makromoleküle (z. B. linear oder vernetzt). Unterschiedliche Ausgangsmoleküle können bei identischen Verfahren differente Formen erzeugen. Eine Kombination der Verfahren ist außerdem ein weiterer Faktor, um gezielt Eigenschaften zu beeinflussen (Bargel & Schulze, 2018, S. 409).

Übersicht über die Kunststoffsorten

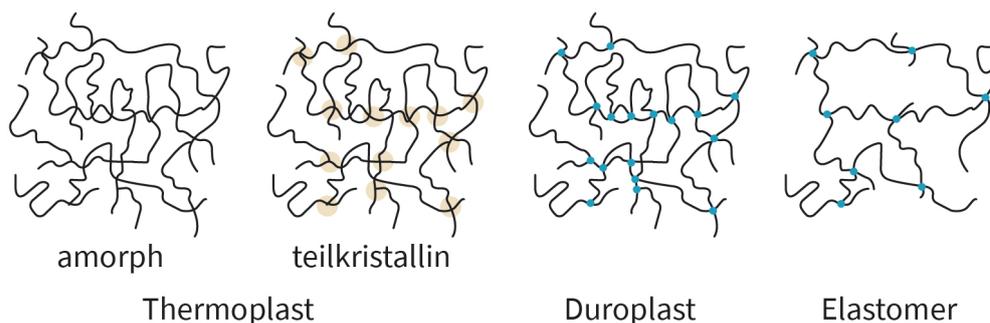
Polymere sind stark temperaturabhängig, d. h., ihre Eigenschaften verhalten sich bei unterschiedlichen Temperaturen anders. Bei Polymeren spricht man von einer Schmelz- oder Zersetzungstemperatur und einer **Glastemperatur**. Unterhalb der Glastemperatur sind Polymere in der Regel hart und eher spröde, zwischen Glastemperatur und Schmelztemperatur elastisch oder auch plastisch. Über der Schmelz- oder Zersetzungstemperatur sind Polymere, wie der Name schon sagt, entweder in einer Schmelzphase oder instabil und zersetzen sich. Das genaue Verhalten der Polymere bei diesen Temperaturen und ihr Einsatzbereich ist dabei abhängig von ihrer Kohlenstoff-Ketten-Struktur. Aus diesem Grund werden Polymere in Gruppen basierend auf ihrer Struktur eingeteilt:

Glastemperatur

Die Übergangstemperatur zwischen einer spröden und festen zu einer elastischen oder plastischen Verhalten wird bei Polymeren Glastemperatur genannt.

- unvernetzt, amorph: Thermoplaste;
- unvernetzt, teilkristallin: Thermoplaste;
- stark vernetzt: Duromere sowie
- leicht vernetzt, verknäuel: Elastomere.

Abbildung 13: Strukturen der Polymere



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Thermoplaste entstehen in einer Polymerisation und haben eine Schmelztemperatur (Hornbogen et al., 2019, S. 381–389). Sie sind nicht vernetzt und ihre Monomerketten sind dabei zu einem Knäuel gehäuft. Sind die Ketten vollkommen lose, nennt man den Thermoplast amorph. Die schwachen Anziehungskräfte zwischen den Ketten, die das Polymer zusammenhalten, können schon bei niedrigen Temperaturen ab 150 °C gelöst werden. Der

Einsatz amorpher Thermoplaste ist nur bis zur Glas-temperatur möglich, da darüber aufgrund der geringen Anziehungskraft der Ketten eine plastische Verformung einsetzt (Weißbach et al., 2018, S. 369).

Kristallisation

Die Kristallisation beschreibt die geregelte Anordnung beim Abkühlen aus der Schmelze.

Neben den amorphen Thermoplasten gibt es auch teilkristalline. Diese entstehen, wenn sich beim Abkühlen die Moleküle regelmäßig anordnen (**Kristallisation**) und einzelne Moleküle als Verbindung bilden. Aufgrund dieser höheren Bindungskraft können teilkristalline Thermoplaste bis zur Schmelztemperatur eingesetzt werden. Zwischen Glas- und Schmelztemperatur haben sie wegen eines Zweiphasengemisches ein zäh-elastisches Verhalten (Weißbach et al., 2018, S. 369).

Vernetzte Polymere, egal ob leicht (Elastomere) oder stark (Duromer) vernetzt, verfügen über feste chemische Verbindungen einzelner Moleküle, sodass es „quasi“ zu einem einzigen großen Molekül kommt. Aufgrund der starken chemischen Bindung können diese Polymere nicht mehr aufgeschmolzen werden. Hier spricht man deswegen auch nicht mehr von einer Schmelztemperatur, sondern von einer **Zersetzungstemperatur**.

Zersetzungstemperatur

Elastomere und Duro-mere haben keine Schmelztemperatur, sondern eine Zersetzungstemperatur, da diese nicht mehr in Schmelze gelöst werden können. Elastomere und Duro-mere zersetzen sich bei hohen Temperaturen.

Elastomere (Polyaddition) zeigen wegen einer sehr starken chemischen Verbindung zwischen Ihren Molekülketten nahezu keine plastische Verformung. Ihre Glas-temperatur, unter der sie spröde werden, liegt weit unter 0 °C. Ihr Einsatzbereich liegt somit weit über der Glas-temperatur. Dies und ihre sehr beweglichen Molekülketten führen zu einem deutlich elastischen Verhalten von Elastomeren.

Duroplaste sind sehr stark vernetzte Polymere. Sie werden durch die Polkondensation hergestellt. Ihre Glas-temperatur liegt sehr hoch, sodass ihr Einsatz nahezu ausschließlich unter der Glas-temperatur liegt. Dies ergibt im technischen Einsatz einen deutlich festen, harten und spröden Werkstoff.

Eine weitere Gruppe ist die der natürlichen Polymere. Im technischen Bereich kann man diese nur in speziellen Anwendungen finden. Die Verfügbarkeit und Gewinnung dieser Werkstoffe sind komplex, da natürliche Ressourcen und Prozesse beachtet werden müssen. Außerdem kann durch die vielen natürlichen Einflussfaktoren eine große Varianz vorhanden sein. Es gibt zwei große Gruppen innerhalb der natürlichen Polymere,

- die Polysaccharide, wie Stärke, Cellulose und Chitin, sowie
- die Polypeptide und Proteine, wie Seide, Collagen, Wolle und Naturkautschuk.

Die Gruppe der natürlichen Polymere ist hinsichtlich ihrer Eigenschaften sehr heterogen, da diese Gruppe nicht aufgrund ihrer Struktur, sondern ihrer Herkunft eingeteilt wurde. Die Herkunft kann von Pflanzen, Tieren und auch Menschen erfolgen (Hornbogen et al., 2019, S. 406–410).

Tabelle 6: Vergleich der Polymere

Typ	Thermoplaste	Duroplaste	Elastomere
Struktur	amorph bis teilkristallin	stark vernetzt	schwach vernetzt

Typ	Thermoplaste	Duroplaste	Elastomere
Verhalten	leicht elastisch	spröde, hart	weich, sehr elastisch,
Herstellung	Polymerisation	Polykondensation	Polyaddition
Verarbeitung	bei erhöhter Temperatur plastisch verformbar (aus Schmelze)	nach der Vernetzung nur spanabhebend formbar	nur elastisch verformbar
Schmelze oder Zersetzung	Schmelztemperatur	Zersetzungstemperatur	Zersetzungstemperatur
chemische Beständigkeit	sehr gut	sehr gut	mäßig
Beispielsanwendungen	sehr breit gestreut: Wasserflaschen, Verpackungsfolie, Gleitlager, Kabelummantelung	Steckdose, Gehäuse von Apparaten	Gummibänder, Autoreifen, Silikondichtung

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Hornbogen et al., 2019, S. 378.

Additive

Polymere werden während der Herstellung Additive zugesetzt, um z. B. besondere mechanische, chemische oder biologische Eigenschaften zu erreichen.

Die am meisten verwendeten Additive sind Weichmacher oder **Prozesshilfsmittel**, die für eine bessere Verarbeitbarkeit die Sprödigkeit reduzieren sollen. Diese optimieren auf molekularer Ebene die Beweglichkeit der Ketten zueinander. In den letzten Jahren haben Weichmacher aus Umwelt- und Gesundheitsgründen jedoch allgemein einen schlechten Ruf bekommen. Stabilisatoren werden für bessere chemische Eigenschaften und eine höhere Lebensdauer eingesetzt, da sie z. B. gegen UV-Strahlung, enorme Hitze und Oxidation schützen können.

Prozesshilfsmittel
Additive, die den Polymeren hinzugegeben werden, um die spätere Verarbeitung der Polymere zu verbessern, werden Prozesshilfsmittel genannt.

Viele Additive werden zur Farbgebung des Endproduktes beigemischt. Es kommen dabei unzählige Farbstoffe oder Pigmente zum Einsatz. Diese beeinflussen die Eigenschaften nur gering. Textilien werden mit Farbstoffen eingefärbt, ein Großteil der anderen Polymere mit Pigmenten.

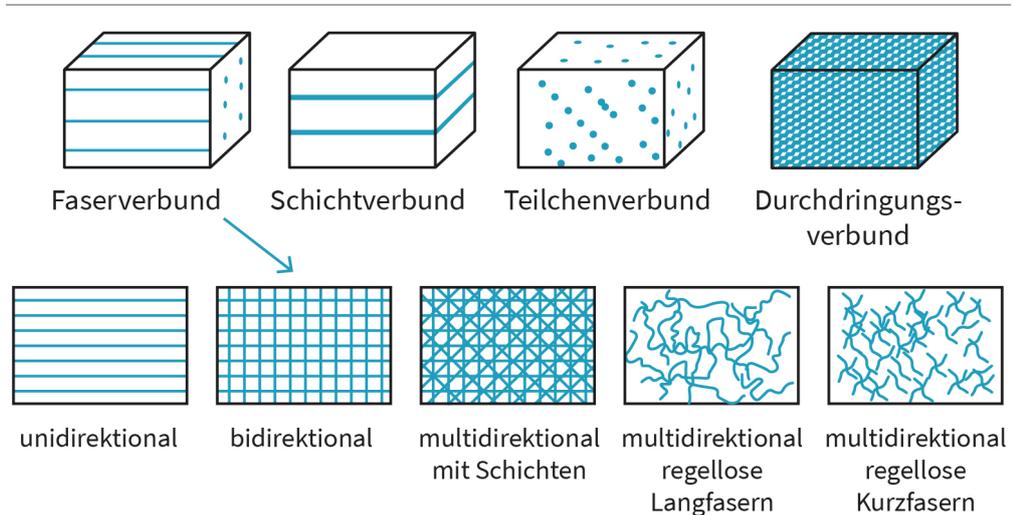
Ruß, Holz, Gesteinsmehl, Quarz, Zinkoxid, Glas(-fasern), Sand oder Kreide können als Füllstoffe Polymeren hinzugemischt werden. Wenn es sich dabei nur um Streckmittel handelt, um die Herstellung günstiger zu gestalten, nennt man dies passive Füllstoffe (Bargel & Schulze, 2018, S. 399). Insofern diese zusätzlich noch zu positiven Änderungen der Eigenschaften führen, spricht man von aktiven Füllstoffen. Additive zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften sind Verstärkungsstoffe. Hier werden oft Fasern eingesetzt, die im folgenden Lernzyklus genauer beschrieben werden.

Bioaktive Additive zeigen eine positive (stimulierende) Wirkung auf Zellen und antimikrobielle Additive führen zu einer Abtötung von Keimen auf der Bauteiloberfläche (auch biozid).

2.5 Verbundwerkstoffe

Ein Verbundwerkstoff, oder auch Komposit oder Compound genannt, besteht aus zwei oder mehr verbundenen Materialien, um andere (oder bessere) Werkstoffeigenschaften zu erlangen als die einzelnen Komponenten. Neben den stofflichen Eigenschaften der einzelnen Materialien sind auch die geometrischen Eigenschaften ausschlaggebend. Die einzelnen Komponenten können dabei aus Polymeren, Metallen und Keramiken bestehen und unterschiedliche geometrische Formen haben. Meistens ist eine Komponente von einer Matrix einer anderen Komponente umgeben. Man unterscheidet Faserverbund, Schichtverbund, Teilchenverbund und Durchdringungsverbund (Weißbach et al., 2018, S. 405–419).

Abbildung 14: Verbundarten und Faserrichtung



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Faserverbund

Ein Großteil der Faserverbundwerkstoffe sind die faserverstärkten Kunststoffe. Hier zielt der Verbund im Gegensatz zu Additiven bei Polymeren rein auf die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften ab. Man spricht hier von einem Matrixwerkstoff, welcher die Fasern umgibt und durch adhäsive Wechselwirkungen gebunden ist.

Durch eine geschickte Auswahl der Faser-Matrix-Kombination können die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe variiert werden. Außerdem gibt es weitere Parameter wie die Faserorientierung, die Faserlänge und den Faservolumenanteil. Hierdurch gibt es auch die Möglichkeit einer Richtungsabhängigkeit. Insgesamt kann durch die Fasern eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit bei niedrigem Gewicht erzielt werden (Leichtbauanwendungen). Unterschieden werden muss man dabei auch, wie die Bauteile hergestellt werden sollen. Faserverstärkte Polymere mit kurzen Fasern kann man wie Polymere mit

einem Additiv betrachten und auch ohne große Veränderungen im Spritzguss herstellen. So können Fasern auch in Thermoplaste durch kurze Fasern verstärkt werden. Lange Fasern hingegen benötigen meist mehrstufige Prozessschritte, bei denen erst die Ausrichtung der Fasern geschieht und in einem separaten Schritt die Matrix aufgebracht wird.

Dünne Fasern besitzen eine hohe Festigkeit. Folgende Tabelle zeigt eine niedrige Dichte und speziell bei Aramid und Kohlenstoff eine hohe Steifigkeit (Weißbach et al., 2018, S. 407). Fasern werden oft in der Praxis beschichtet, um eine bessere Verbindung zur Matrix zu gewährleisten (Weißbach et al., 2018, S. 408).

Tabelle 7: Typische Faserwerkstoffe und ihre Festigkeiten

Werkstoff	R_m [GPa]	E [GPa]	Bruchdehnung A [%]	ρ [g=cm ³]	T_{max} [°C]
Glas	4,6	85	5	2,5	300
Aramid	3,4	500	2	1,45	> 200
Kohlenstoff	5,0	700	1,5	1,8	600

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Weißbach et al., 2018, S. 407.

Einen zentralen Punkt bei faserverstärkten Werkstoffen spielt die Richtung der Fasern. Man unterscheidet:

- unidirektionale (UD) Fasern, die parallel in Strängen vorliegen,
- bidirektionale (BD) Gewebe mit Fasern, die 90° zueinander liegen und
- multidirektionale (MD) Fasermatten ohne feste Richtung.

UD zeigen die höchste Zugfestigkeit entlang der Fasern, aber auch die höchste Richtungsabhängigkeit. Das heißt, die Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung ist sehr niedrig und die Druckfestigkeit ist längs oder quer zur Faserrichtung niedrig. Aus den Fasern werden zur einfacheren Verarbeitung meistens Vliese, Gewebe, Gestricke oder Gewirke gefertigt, um eine flächenförmige Anordnung zu bekommen. Hierbei können die Ausrichtungen der Fasern regellos angeordnet sein, oder geregelt mit mehreren Schichten von unidirektionalen Fasern versetzt übereinander. Dadurch lassen sich die mechanischen Eigenschaften gezielt steuern und es können auch **isotrope** Eigenschaften erreicht werden. Als Matrixwerkstoff werden hauptsächlich Duromere verwendet. Für flächige Konstruktionsteile werden außerdem glasfasermattenverstärkte Thermoplaste verwendet.

Isotrop
Ein isotroper Werkstoff verhält sich in alle Richtungen gleich, d. h., es gibt keine Richtungsabhängigkeit. Das Gegenteil dazu ist anisotrop.

Schichtverbund

Einen Verbund von mehreren Werkstoffschichten nennt man Schichtverbund. So können Werkstoffe mit speziellen Eigenschaften verbunden werden, um Vorzüge beider Werkstoffe optimal ausnutzen zu können. Schichten mit hoher Zugfestigkeit können mit leichteren Zwischenschichten zu sogenannten Sandwich-Platten kombiniert werden, dadurch ergeben sich Werkstoffe mit hoher Steifigkeit bei niedrigem Gewicht (Weißbach et al., 2018, S. 405). Verbunde aus Metallen und leichten Dämmstoffen können so zu Verbundwerkstoffen kombiniert werden mit den Vorzügen eines Metalls, wie gute Leitfähigkeit,

Steifigkeit oder Festigkeit. Diese Verbundwerkstoffe können mit z. B. einem Polymer-schaum zur Gewichtsreduzierung oder für Schall- und Wärmedämmung vereint werden (Weißbach et al., 2018, S. 405). Diese Verbundwerkstoffe findet man oft im Alltag und in technischen Anwendungen mit der Bezeichnung BOND, wie den ALUCOBOND (Weißbach et al., 2018, S. 405).

Teilchenverbund

Wenn es sich nicht um Fasern, sondern um rundliche oder unbestimmte Teilchen handelt, spricht man vom Teilchenverbund. Diese Verbundwerkstoffe sind meist isotrop und zeigen keine große Richtungsabhängigkeit. Ein Beispiel ist der Polymerbeton, oder auch Mineralguss genannt. Er besteht aus 90 bis 95 Prozent Quarzkies und einem duromeren Gießharz. Dieser Verbundwerkstoff wird gerne wegen der hohen Schwingungsdämpfung in Maschinengestellen verwendet (Weißbach et al., 2018, S. 410–411).

Durchdringungsverbund

Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe haben eine zusammenhängende Metallmatrix, meist Aluminium oder Titan, mit keramischen (z. B. Siliciumcarbid) oder organischen (Schäume) Verstärkungen im Inneren. So lassen sich Werkstoffeigenschaften sehr gezielt einstellen. Anwendungen kommen in der Leistungselektronik, der Automobilindustrie (Bremsstromeln, Antriebswellen, Zylinderlaufbuchsen) und in der Luftfahrt vor.

Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe haben eine normale Keramik-Matrix mit eingebetteten Langfasern zur Verstärkung des Werkstoffes. Anwendung finden diese Werkstoffe in der Raumfahrt, da hier große Beanspruchungen und enorme Temperaturen entstehen. Ebenfalls laufen Entwicklungen von Komponenten für Gasturbinen mit solchen Werkstoffen.

2.6 Grundlagen der Wärmebehandlung

Allgemeine Bedeutung

Wärmebehandlungen sind nach DIN EN ISO 4885 Verfahren aus einem oder mehreren Schritten, die gezielt bei Werkstoffen eingesetzt werden, um eine Änderung des Gefüges, der chemischen Zusammensetzung oder allgemein der Eigenschaften zu erzeugen (Weißbach et al., 2018, S. 189). In der Regel gibt es ein Aufheizen bis zu einer gewissen Temperatur, ein Halten, um eine Durchdringung des gewünschten Werkstoffvolumens und eine Abkühlung zu erreichen (Weißbach et al., 2018, S. 190–191). Letztere kann langsam, moderat, schnell oder sehr schnell (Abschrecken) durchgeführt werden.

Bei Metallen sind hier die Zustandsdiagramme, wie das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKS), ein wichtiger Ausgangspunkt. Die angegebenen Phasen und Umwandlungstemperaturen im EKS basieren auf sehr langsamen Abkühlgeschwindigkeiten, die in Realität nicht immer erreicht werden (Hornbogen et al., 2019, S. 104). Viele Herstellverfahren führen durch schnelles Abkühlen zu inneren Spannungen, Gitterbaufehlern oder Inhomogenitäten, wie unterschiedliche Korngrößen, eine hohe Versetzungsdichte oder heterogene

Verteilungen der Spuren- und Legierungselemente. Der Werkstoff ist somit nicht im **thermodynamischen Gleichgewicht**. Zielsetzung der Behandlung sind die Veränderung der mechanischen Eigenschaften, der Abbau von inneren Spannungen und chemischen Inhomogenitäten sowie eine Verbesserung der Bearbeitbarkeit und der Oberflächeneigenschaften (Weißbach et al., 2018, S. 189–190).

Thermodynamisches Gleichgewicht

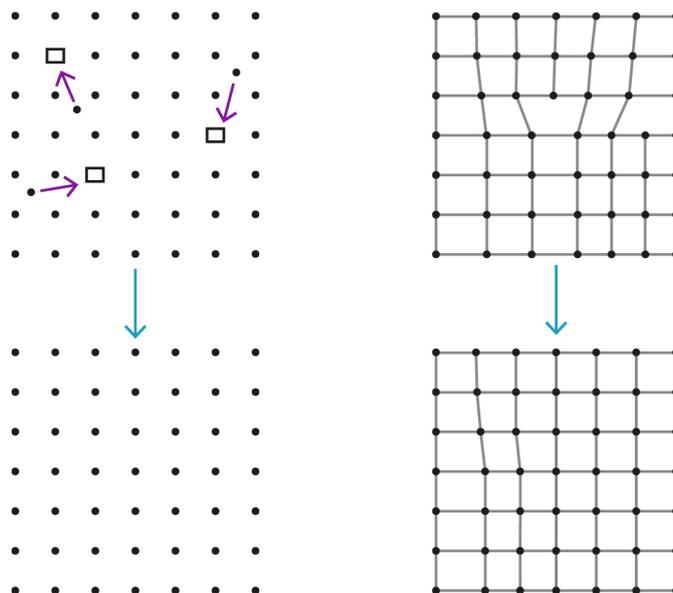
Ein Werkstoff ist im thermodynamischen Gleichgewicht, wenn er keine makroskopischen Flüsse von Materie und Energie, d. h. keinen Drang zur Veränderung hat.

Diffusion

Durch Festkörperreaktionen bei Wärmezufuhr können Kristallstruktur und Gefüge im Inneren des Werkstoffes gezielt umstrukturiert werden (Hornbogen et al., 2019, S. 105). Nahezu alle diese Reaktionen setzen voraus, dass Schwingungen im Kristallgitter durch Wärme dazu führen, dass einzelne Atome ihren Platz wechseln, damit der Werkstoff zum thermodynamischen Gleichgewicht gelangt (Hornbogen et al., 2019, S. 104–106). Dieser Vorgang wird Diffusion genannt. Je niedriger die Temperatur ist, desto geringer fällt die Amplitude der Schwingungen aus. Die Diffusion führt bei zwei Atomsorten zu einer ausgeglichenen Verteilung, d. h., nach ausreichender Zeit sind Atom A und B in einem Mischkristall gleichmäßig verteilt.

Ein Zwischengitteratom benötigt für einen Platzwechsel genug Energie durch Wärmezufuhr, um zum nächsten Zwischengitter zu gelangen. Wenn bei Metallen Gitterbaufehler, wie Leerstellen, vorkommen, kann eine Diffusion einfacher ablaufen als ohne diese (Hornbogen et al., 2019, S. 108). Hierfür wird weniger Energie durch die Wärmezufuhr benötigt, um einen Platzwechsel zu erzielen. Andere Fehler wie Korngrenzen oder Versetzungen hemmen solche Vorgänge jedoch und es wird mehr Energie benötigt. Diffusion kann über das Gesamtbauteil, aber auch nur für eine Oberflächenbehandlung mit anderen Verfahren kombiniert werden (Hornbogen et al., 2019, S. 113).

Abbildung 15: Ausheilung von Gitterbaufehlern



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Ausheilen von Gitterbaufehlern

Bei Erwärmung eines Werkstoffes auf eine Temperatur, die jedoch deutlich unter der Schmelztemperatur liegt, werden meist durch Diffusionsvorgänge innere Spannungen, Inhomogenitäten oder Gitterfehler reduziert.

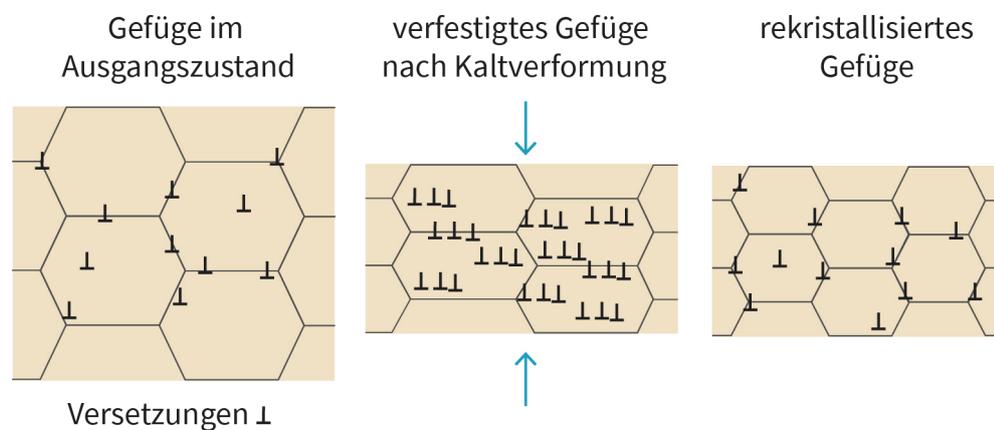
Die meisten Werkstoffe, insbesondere Metalle, die kalt verformt wurden, haben eine Vielzahl von Gitterbaufehlern. Diese sind vorrangig Versetzungen, die über den kompletten Werkstoff verteilt sind. Beim Ausheilen werden Gitterfehler abgebaut, d. h., die Anzahl der Fehler oder auch die Versetzungsdichte wird reduziert. Beim **Rekristallisationsglühen** ordnen sich die Versetzungen so neu an, dass sie neue Körner/Kristalle bilden und die verformten, ursprünglichen ersetzen (Hornbogen et al., 2019, S. 114–116). Man nennt diese neuen Körner auch Rekristallisationskeime, die ein komplett neues Gefüge bilden.

Der Ablauf und das Vorgehen wird in Rekristallisationsschaubildern dargestellt, aus denen man Temperaturen und die Dauer der einzelnen Schritte entnehmen kann. Die Rekristallisation ist dabei abhängig vom **Umformgrad**. Die Temperaturen liegen bei circa 30–50 Prozent der Schmelztemperatur. Wenn die Dauer und die Temperatur zu hoch sind, kommt es zu einer sekundären Kristallisation und die neuen Gefüge sind nicht wie gewünscht homogen, sondern heterogen mit lokalen Unterschieden in den mechanischen Eigenschaften.

Rekristallisation
Eine Neu-Bildung eines Gefüges auf Kosten eines existierenden Gefüges durch Umordnung von Versetzungen bei erhöhten Temperaturen in einem Werkstoff wird Rekristallisation genannt.

Umformgrad
Der Umformgrad beschreibt den Umfang der Verformung eines Werkstoffes durch den Herstellprozess.

Abbildung 16: Gefügeänderung durch Rekristallisation

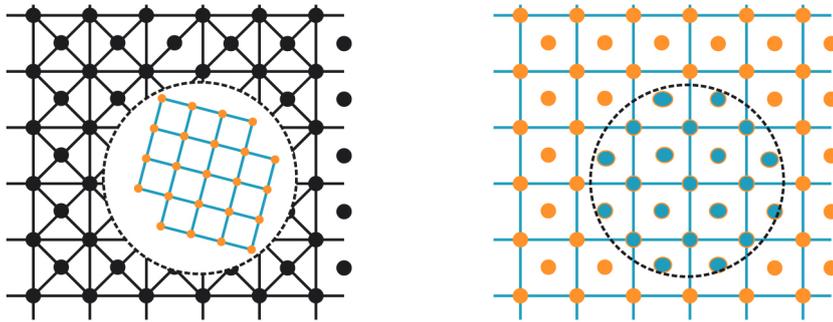


Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Ausscheidung

Die Ausscheidungshärtung basiert auf der Entstehung von neuen Kristallen aus Eisen und Legierungselementen (**Ausscheidungen**) nach einer mehrstufigen Wärmebehandlung. Die Ausscheidungen werden gezielt eingesetzt, um als Hindernisse für die Bewegungen von Versetzungen zu dienen und beeinflussen somit die Eigenschaften eines Werkstoffes. In den meisten Fällen wird dadurch die Festigkeit erhöht (Weißbach et al., 2018, S. 232).

Abbildung 17: Ausscheidungen im Grundgitter



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Martensitische Umwandlung

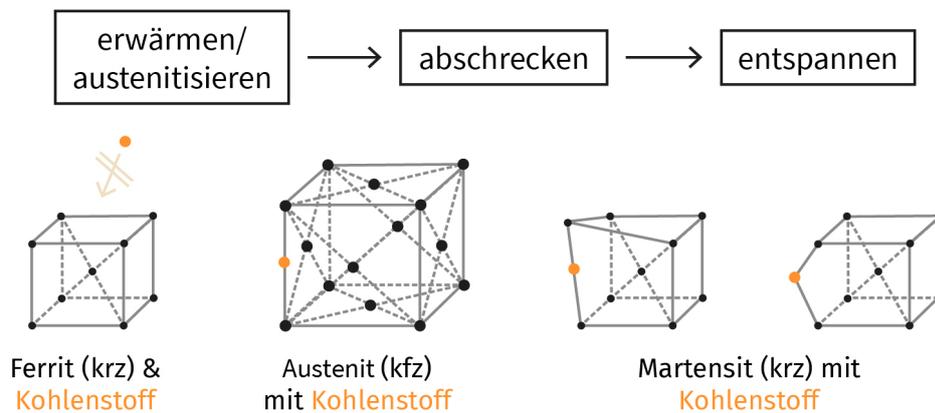
Bei Raumtemperatur kommt Eisen als Ferrit vor und Kohlenstoff kann nicht in dessen krz Form eindringen, da die Eisenatome zu nah aneinander liegen. Aus diesem Grund kommt der Kohlenstoff im Perlit vor. Wenn man das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild betrachtet, erkennt man, dass bei einer Temperaturerhöhung über mindestens 712 °C eine Umwandlung von Ferrit zum Austenit geschieht (Hornbogen et al., 2019, S. 131–135). Dieser Prozess wird auch Austenitisieren genannt. Austenit kommt in kfz Form vor, dabei sind die Abstände zwischen den Eisenatomen so groß, dass hier Kohlenstoff eindiffundieren kann.

Wenn nun langsam abgekühlt wird, wechselt es wieder in Ferrit und der Kohlenstoff diffundiert heraus. Bei einem schnellen Abkühlen, einem sogenannten Abschrecken kann der Kohlenstoff nicht ausdiffundieren und er verbleibt in der Struktur. Das krz Gitter wird durch den Kohlenstoff sehr verspannt. Dadurch besitzt das Gefüge auch eine spezielle Form und bekommt eine sehr hohe Festigkeit. Es ist aber so spröde, dass dieser Werkstoff bei leichten Schlägen sofort brechen würde. Deswegen wird ein weiterer Entspannungsschritt durchlaufen. Dabei legt sich die Festigkeit und Sprödigkeit wieder etwas, der Werkstoff ist jedoch danach deutlich besser einsetzbar. In diesem Zustand wird er Martensit, der Prozess wird Härten genannt.

Ausscheidung

Bereiche in einem Kristallgitter mit veränderten (höher oder niedriger) Konzentrationen von Legierungselementen durch spezielle Wärmebehandlungen werden Ausscheidungen genannt.

Abbildung 18: Martensitische Umwandlung durch Härten



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Die Dauer, die der Werkstoff bei der hohen Temperatur gehalten wird, entscheidet, ob der Werkstoff komplett durchdrungen wird und alles Ferrit in Austenit umgewandelt wird, oder ob dies nur für die Randschichten zutreffen soll. Dies wird Randschichthärten genannt. Je größer die Temperaturdifferenz dabei ist, desto mehr Martensit entsteht, je kleiner das Bauteil, umso größer die Durchdringung, d. h. die Einhärtetiefe. Dieser Vorgang kann auch mit anderen Elementen wie Chrom durchgeführt werden.

Wenn anstatt des Entspannungsschrittes, der Werkstoff auf eine höhere Temperatur erwärmt, d. h. ein sogenanntes Anlassen durchgeführt wird, erhält man kein Martensit, sondern Bainit. Der gesamte Prozess heißt dann auch nicht Härten, sondern Bainitisieren (Hornbogen et al., 2019, S. 351).

Fertigungs- und beanspruchungsorientierte Unterscheidung

In der Anwendung unterscheidet man fertigungsorientierte Verfahren, die Effekte der Herstellung revidieren sollen und beanspruchungsorientierte Verfahren, die gezielt Eigenschaften der Werkstoffe für eine Beanspruchung verbessern sollen.

Fertigungsorientierte Verfahren

Durch die Fertigung eingebrachte Strukturdefekte, innere Spannungen und Inhomogenitäten werden meist durch Diffusion ausgeheilt, d. h. bei Temperaturen deutlich unter der Schmelztemperatur ohne Phasenumwandlung:

- Tempern bei z. B. Glas, Stahl, Gusseisen und Kunststoff,
- Anlassen bei z. B. Stahl, Nichteisenmetalle und Glas sowie
- Ausheizen bei z. B. Halbleiter, Metalle, Beschichtungen.

Durch Ausheizen werden Verunreinigungen, unerwünschte Stoffe oder auch Kristallgitterdefekte durch Hitzezufuhr (meist im Vakuum) entfernt.

Beanspruchungsorientierte thermomechanische Wärmebehandlung

Um gezielt Eigenschaften für die Anwendung zu optimieren, werden gesamte Werkstoffe oder oft nur Randbereiche an der Oberfläche behandelt:

- Härten bei Stahl (mind. 0,2 Prozent Kohlenstoff) und Gusseisen,
- Randschichthärten: Gefügeumwandlung an der Oberfläche,
- Ausscheidungshärten bei Stahl sowie
- Vergüten bei z. B. Stahl (Kombination aus Härten und Anlassen).

Beanspruchungsorientierte thermochemische Wärmebehandlung

Unter den thermochemischen Verfahren versteht man Wärmebehandlungen, bei denen unter Wärmezufuhr Fremdatome in die Gitterstruktur des Werkstoffes eingebracht werden. Die Verfahren werden nach dem einzubringenden Werkstoff benannt:

- Nitrieren: Einbringen von Stickstoff;
- Oxidieren: Einbringen von Sauerstoff;
- Carbonitrieren bei Stahl: Einbringen von Stickstoff und Kohlenstoff;
- Aufkohlen: Einbringung von Kohlenstoff in einen Stahl unter Hitzezufuhr;
- Aluminieren: Einbringen von Aluminium;
- Silicieren: Einbringen von Silizium;
- Vanadieren: Einbringen von Vanadium sowie
- Borieren: Einbringen von Bor.



ZUSAMMENFASSUNG

Werkstoffeigenschaften werden primär durch die atomaren Bindungen der Werkstoffe beeinflusst. Dabei werden drei Bindungsvarianten unterschieden.

Die metallische Bindung führt zu einem charakteristischen Metallgitter mit freien Elektronen. Das Gitter an sich zeigt häufig Gitterbaufehler und ist verantwortlich für die gute elastische und plastische Verformbarkeit von Metallen. Auf der anderen Seite befinden sich zwischen dem Gitter freie Elektronen. Diese wiederum sind verantwortlich für die besonders gute elektrische und thermische Leitfähigkeit von Metallen.

Keramiken werden durch die Ionenbindung charakterisiert. Diese ist die stärkste Bindungsvariante und verantwortlich für die hohe Steifigkeit der Keramiken. Das Ionengitter mit abwechselnd geladenen Teilchen führt zur schlechten elastischen und plastischen Verformbarkeit. Eine Verformung würde zu gleich geladenen Ionen nebeneinander führen. Da diese sich jedoch gegenseitig abstoßen, kommt es sofort zum Bruch der Bindung und somit des keramischen Bauteils.

Polymere werden durch die Elektronenpaarbindungen zusammengehalten. Charakteristisch hierfür ist die Bindung von mehreren Atomen in langen Ketten. Der Vernetzungsgrad dieser ist maßgeblich zuständig für das Verhalten der Polymere. Thermoplaste sind dabei nicht, Elastomere leicht und Duromere stark vernetzt.

Verbundwerkstoffe aus verschiedenen Werkstoffen können die Vorteile der einzelnen Komponenten nutzen, um so im Verbund bessere Eigenschaften als die einzelnen Werkstoffe zu bekommen.

Wärmebehandlungen können durchgeführt werden, um innere Spannungen und Gitterbaufehler abzubauen. Alternativ können Wärmebehandlungen auch eingesetzt werden, um gezielt die Eigenschaften von Werkstoffen oder deren Oberflächen zu verändern.

LEKTION 3

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- die wichtigsten mechanischen Kennzahlen zu identifizieren.
- die mechanischen Eigenschaften anhand der Kennzahlen zu vergleichen.
- mechanische Eigenschaften anhand der chemischen Bindungen zu erklären.
- das Verhalten der unterschiedlichen Werkstoffe und Werkstoffgruppen zu vergleichen.
- Werkstoffe anhand ihrer mechanischen Eigenschaften für Bauteile auszuwählen.

3. MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Aus der Praxis

Bei der Entwicklung eines Beatmungsgerätes hat sich bezogen auf die Teilkomponenten Folgendes ergeben:

- Der Rahmen des Gerätes muss „stabil“ sein, da er das Gehäuse mit dem Motor und der Kontrolleinheit tragen muss. Er muss aber auch leicht sein, da das Gerät mobil eingesetzt wird. Hier bietet sich ein Metallrahmen an.
- Das Gehäuse muss den Motor „schützen“. Bei der Bedienung wird eine „geringe Belastung“ auf das Gehäuse aufgebracht. Hier bietet sich ein Polymer-Gehäuse an, eventuell auch aus einem Verbundwerkstoff.
- Die Schläuche und die Gesichtsmaske müssen „flexibel“ und „bequem“ sein, um vom Gerät zu den Patient:innen zu gelangen und angelegt werden zu können. Hier bieten sich Elastomere an.

Zu diesem Zeitpunkt stellen sich folgende Fragen:

- Was bedeuten Begriffe wie „stabil“ und „flexibel“ in der Technik?
- Welche Werkstoffkennwerte gibt es in der Werkstoffkunde, um die mechanischen Eigenschaften zu beschreiben und zu quantifizieren?
- Wie hängen Beanspruchung, Verformung und Werkstoffversagen durch Bruch zusammen?

3.1 Mechanische Beanspruchung

Im Volksmund herrschen viele Begriffe zu Werkstoffen und deren mechanischen Eigenschaften. Die Begriffe wie „fest“, „stabil“, „flexibel“ und „langlebig“ sind jedoch keine wissenschaftlichen Begriffe, da sie nicht eindeutig sind. Um Werkstoffe hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften korrekt einteilen und beschreiben zu können, muss zuerst geklärt werden, welche Beanspruchungen es gibt und wie diese auf Werkstoffe einwirken können, um eindeutige und quantifizierbare Kennwerte zu erhalten.

Beanspruchungen müssen nicht von einer mechanischen Belastung herrühren, es gibt auch Umwelteinflüsse, die zu Beanspruchungen führen (Hornbogen et al., 2019, S. 147–155). Umwelteinflüsse können die Eigenschaften von Werkstoffen beeinflussen und somit die mechanischen Eigenschaften verändern. Diese werden weiterhin von der Höhe der Spannung, der Belastungsgeschwindigkeit, der Dauer, der Belastung, der Anzahl und der Frequenz der zyklischen Lastwechsel, der Temperatur sowie der chemischen Umgebung des Werkstoffs beeinflusst (Hornbogen et al., 2019, S. 149–150).

Aus der technischen Mechanik ist der Begriff Belastung (oder auch Last) bekannt. Hierunter versteht man alle Kräfte, die auf ein Bauteil wirken. Jedes Bauteil ist solchen Belastungen ausgesetzt und sei es nur die der Eigenlast. Im technischen Einsatz sind jedoch die äußeren Belastungen in der Regel deutlich größer als die Eigenlast. Belastungen haben eine mechanische Beanspruchung im inneren des Bauteils zur Folge und es kommt zu einer **mechanischen Spannung** im Inneren eines Bauteils, siehe folgende Tabelle (Rösler et al., 2019, S. 33). Diese sind je nach Geometrie und Form des Bauteils unterschiedlich. Man spricht dann von lokalen Spannungen im Bauteil. In einer Simulation mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) können lokale Spannungen und Spitzen im Bauteil sichtbar gemacht werden (Eyerer et al., 2020, S. 53–54). Bei den meisten Werkstoffen tritt zuerst eine elastische Verformung auf, dann eine plastische und zuletzt kommt es zu einem Bruch und somit zum Versagen des Werkstoffs. Ob diese zu einer Verformung oder einem Versagen führen, hängt sowohl von der Bauteilstruktur, aber auch von Gefüge, Gitterstruktur, Korngrößen bis hin zu Korngröße und -form des Materials ab.

Mechanische Spannung
Diese ist definiert durch eine wirkende Kraft pro Querschnittsfläche. Man unterscheidet dabei zwischen inneren Spannungen im Bauteil oder Werkstoff und äußeren Spannungen.

Tabelle 8: Unterschied zwischen mechanischer Belastung und Beanspruchung

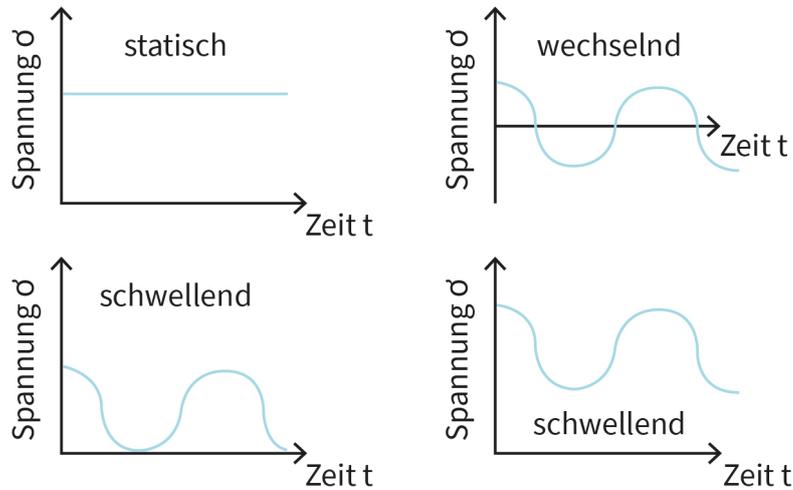
(Mechanische) Belastung	Beanspruchung
<ul style="list-style-type: none"> • Druck • Zug • Biegung • Scherung • Kompression • Torsion • etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • mechanisch (statisch/dynamisch) • Umwelteinflüsse <ul style="list-style-type: none"> ◦ chemisch ◦ thermisch ◦ Witterung ◦ Feuchtigkeit • etc.

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Bei den Beanspruchungen von Werkstoffen unterscheidet man, ob es sich um statische, also einmalige oder dynamische, also zyklische, wiederkehrende **Beanspruchungen** handelt. Bauteile verhalten sich unter zyklischen oder statischen Bedingungen anders, so sind maximal zulässige Spannungen unter statischer Last deutlich höher als unter dynamischer Last. Bei zyklischen Beanspruchungen unterscheidet man zusätzlich, ob es eine schwellende oder eine wechselnde Beanspruchung ist. Eine Schwellbeanspruchung beschreibt eine Bauteilbeanspruchung, die nur in eine Belastungsrichtung beaufschlagt wird, also nur mit einer Zug-, Biege oder einer Druckbeanspruchung. Der Betrag der Beanspruchung liegt schwankend zwischen zwei positiven (Zug), zwei negativen (Druck) Werten oder zwischen einem positiven (Zug) Wert und Null (Entlastung) und einem negativen (Druck) Wert und Null (Entlastung). Bei einer abwechselnd mit einer Zug- und Drucklast beaufschlagten Probe spricht man von einer Wechselbeanspruchung. Die Beanspruchungen sind dann abwechselnd positiv (Zug) und negativ (Druck). Dies ist auch bei rotierenden Wellen der Fall.

Zyklische Beanspruchung
Diese Art von Beanspruchungen sind wiederkehrende, meist in einem speziellen Rhythmus auftretende Beanspruchungen. Man unterscheidet zwischen Schwellbeanspruchung und Wechselbeanspruchung.

Abbildung 19: Mechanische Beanspruchungsarten



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

3.2 Elastizität

Die Spannungen in einem Werkstoff oder Bauteil können zu einer Verformung führen. Wenn sich ein Werkstoff unter Krafteinwirkung verformt, aber nach Wegfall der Krafteinwirkung wieder in den Ausgangszustand, d. h. in seine anfängliche Form zurückkehrt, spricht man von einem elastischen Verhalten, oder auch Elastizität. Alle Werkstoffe besitzen eine Elastizität, diese kann jedoch mehr oder weniger ausgeprägt sein. Außerdem gibt es unterschiedliche Arten von Elastizität:

- **Linear elastisches Verhalten (Hookesches Gesetz):** Die Verformung verhält sich proportional zur Spannung.
- **Nicht lineares elastisches Verhalten:** Die Verformung verhält sich nicht proportional zur Spannung (Beispiel Gummiband).

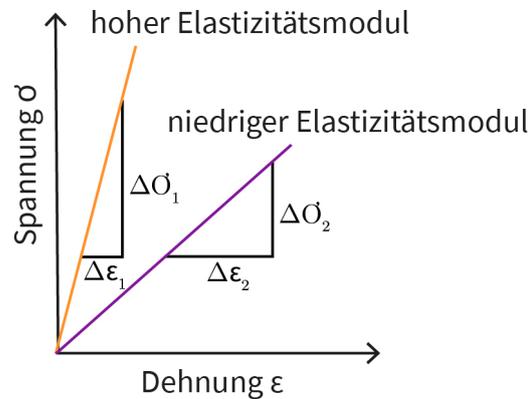
Für jeden Werkstoff kann ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erzeugt werden, d. h., es wird die Verformung unter einer Zugspannung in einem Diagramm aufgetragen. In diesem Lernzyklus wird nur der anfängliche Bereich eines Zugversuches besprochen, in dem sich die meisten Werkstoffe elastisch verhalten. Der Elastizitätsmodul, auch E-Modul oder Young's Modulus genannt, ist dabei das Verhältnis der angelegten Spannung σ zur resultierenden Dehnung ε . Im Diagramm ist das durch die Anfangssteigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve $\Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ ersichtlich. Eine steilere Kurve deutet auf einen steiferen Werkstoff hin. Die maximale elastische Spannung (ohne plastische Verformung) wird R_{eH} oder obere Streckgrenze genannt. Der Elastizitätsmodul wird wie folgend berechnet:

$$\text{Elastizitätsmodul } E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Hookesches Gesetz
Das Hookesche Gesetz beschreibt die linear-elastische Verformung von Werkstoffen, die proportional zur Belastung ist. Dieses Verhalten ist typisch für Metalle.

Nicht lineares elastisches Verhalten
Ein Gummiband zeigt eine Verformung, die jedoch nicht proportional zur einwirkenden Kraft ist. Hier spricht man von einem nicht linearem elastischen Verhalten.

Abbildung 20: Anfangsbereich eines Spannungs-Dehnungs-Diagrammes bei unterschiedlichen Elastizitätsmodulen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

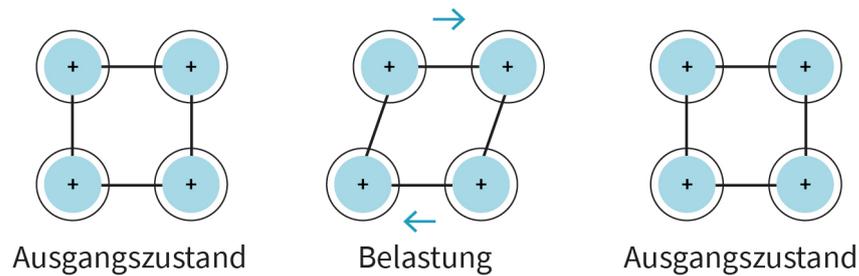
Wenn man einen Werkstoff auf seine elementaren Bausteine reduziert, kommt man auf Atome oder Moleküle, die in verschiedenen Strukturen und durch verschiedene Weisen miteinander verbunden sind. Wenn keine äußere Kraft anliegt, insofern keine Energie in das System gesteckt wird, verbleiben die elementaren Bausteine in ihrer Struktur. Beim Anlegen einer Kraft, kommt jedoch eine mechanische Energie in das System. Zur Veranschaulichung betrachten wir in diesem Lernzyklus nur das anfängliche elastische Verhalten eines Werkstoffes. Die Abstände zwischen den Bausteinen verändern sich und der Werkstoff verändert seine Form, er verformt sich. Bei Wegfall der angelegten Kraft wird die Energie wieder abgegeben und die Bausteine (Atome oder Moleküle) kehren wieder zu ihrem ursprünglichen Platz zurück, da dieser das günstigste Energieniveau bedeutet. Dieser Vorgang wird Elastizität genannt und ist typisch für Metalle bei kleineren Spannungen.

In der Praxis bedeutet das, dass es beim Anlegen einer Zugkraft an ein großes Bauteil, zu Verschiebungen zwischen den Atomen oder Molekülen kommt. Durch die Vergrößerung der Abstände auf elementarem Level kommt es somit zu einer Dehnung, unter Zug zu einer Dehnung in Richtung der angelegten Kraft des gesamten Bauteils.

Elastizität von Metallen

Bei Metallen wird das Metallgitter bei einer mechanischen Belastung verformt (z. B. gestaucht oder gedehnt). Die Atome bewegen sich bei kleineren Spannungen jedoch wieder in ihre ursprüngliche Position zurück, wenn die Belastung weggenommen wird. Nahezu alle Metalle zeigen ein elastisches Verhalten.

Abbildung 21: Elastische Verformung eines Metallgitters



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Bei Metallen hat der Typ der Elementarzellenform einen Einfluss auf die Elastizität und Steifigkeit, da hier unterschiedlich viele Atome auf kleinstem Raum sind. Weiterhin beeinflussen Gitterbaufehler die mechanischen Eigenschaften, so auch die Elastizität.

Elastizität von Polymeren

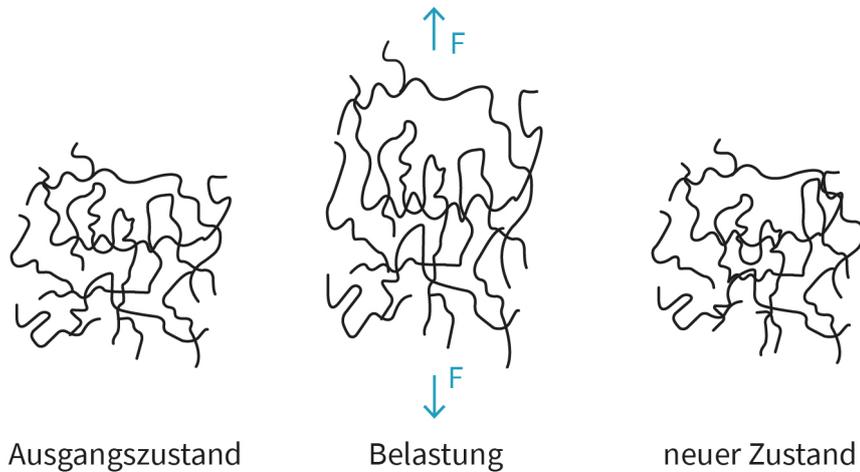
Es gibt drei sehr unterschiedliche Arten von Polymeren. Dies spiegelt sich auch im elastischen Verhalten der Polymere wider. Bei Polymeren spielt auch die Zeit der Belastung eine Rolle, d. h. wie lange und wie schnell wird die Belastung aufgebracht. Weiterhin verhalten sich Polymere bei hohen oder niedrigen Temperaturen unterschiedlich bezüglich der Elastizität.

Thermoplaste haben zwar einen Elastizitätsmodul, streng genommen haben sie jedoch kein elastisches oder plastisches Verhalten. Eine Belastung führt hier sofort zu einer Verschiebung der Molekülketten untereinander. Wenn, nach Wegnahme der Kraft, die Verformung des Bauteils wieder zurückgeht, kann auf molekularer Ebene jedoch eine Veränderung im Zustand des Knäuels der Molekülketten zurückbleiben. Man spricht hier deswegen nicht von einem elastischen, sondern von einem **visko-elastischen Verhalten**. Dieses Verhalten ist neben der einwirkenden Belastung auch von der Zeit und der Temperatur abhängig.

Visko-elastisches Verhalten

Bei einer reversiblen äußeren Verformung spricht man von Viskoelastizität, wenn im Inneren eine irreversible Verformung stattfindet, die jedoch von außen nicht sichtbar ist. Diese ist sehr typisch für Thermoplaste, tritt jedoch auch bei einzelnen Metallen auf.

Abbildung 22: Viskoelastische Verformung von Thermoplasten

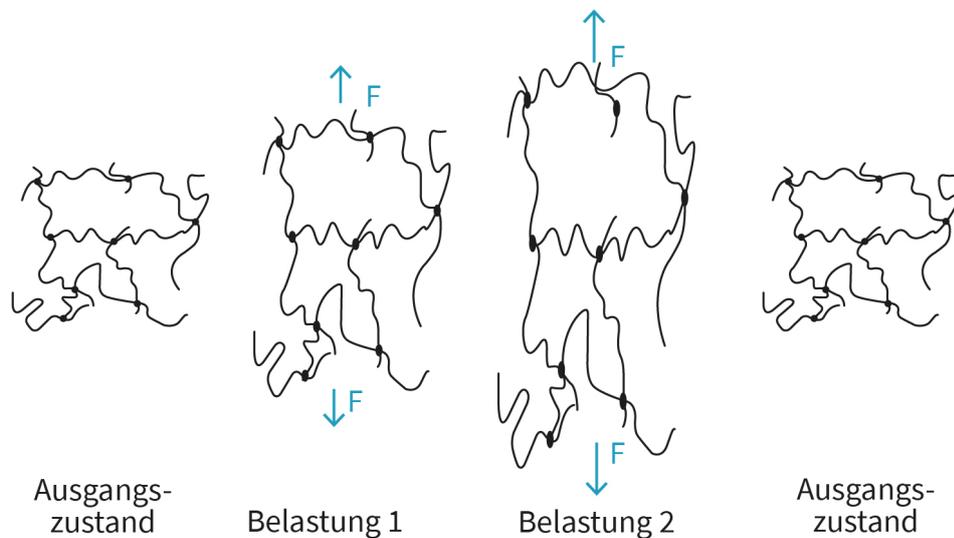


Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Im Vergleich zu Thermoplasten haben Duromere vernetzte Molekülketten mit einer engmaschigen und starken chemischen Vernetzung. Hierdurch ist ihr elastisches Verhalten deutlich steifer und spröder. Durch die vielen chemischen Bindungen gibt es nahezu kein Gleiten der Molekülketten zueinander und somit nur einen kleinen elastischen Bereich.

Elastomere haben zwar auch vernetzte Molekülketten, diese Vernetzung ist jedoch deutlich weitmaschiger. Somit haben die Ketten bei Belastung die Möglichkeit einer Streckung. Elastomere haben, wie ihr Name schon sagt, ein sehr ausgeprägtes elastisches Verhalten. Am Beispiel des Gummibandes ist aber auch ersichtlich, dass es bei Anlegen einer Zugspannung anfangs eine starke Dehnung bei kleiner Kraft und später eine kleine Dehnung bei großer Kraft gibt. Dieses Verhalten folgt somit nicht dem Hookeschen Gesetz, sondern ist nicht linear.

Abbildung 23: Elastische Verformung von Elastomeren



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Elastizität von Keramiken

Der atomare Aufbau von Keramiken mit der sehr starken chemischen Bindung (Ionenbindung) bewirkt, dass diese nahezu keine Elastizität aufweisen. Ihr Verhalten ist sehr steif und führt bei höheren Kräften direkt zu einem Bruch.

3.3 Plastizität

Im vorherigen Lernzyklus wurde die Elastizität besprochen, die reversible Verformung eines Werkstoffes auf eine einwirkende Belastung. Wenn die entstehende Verformung im Werkstoff und somit im Bauteil jedoch nicht in die Ausgangsform zurückgeht, insofern die äußere Kraft entfällt, spricht man von einer plastischen Verformung. Es kommt demnach zu einer bleibenden Formänderung.

Duktile (oder zähe) Werkstoffe haben eine ausgeprägte plastische Verformungsphase, spröde eine sehr geringe (Hornbogen et al., 2019, S. 159).

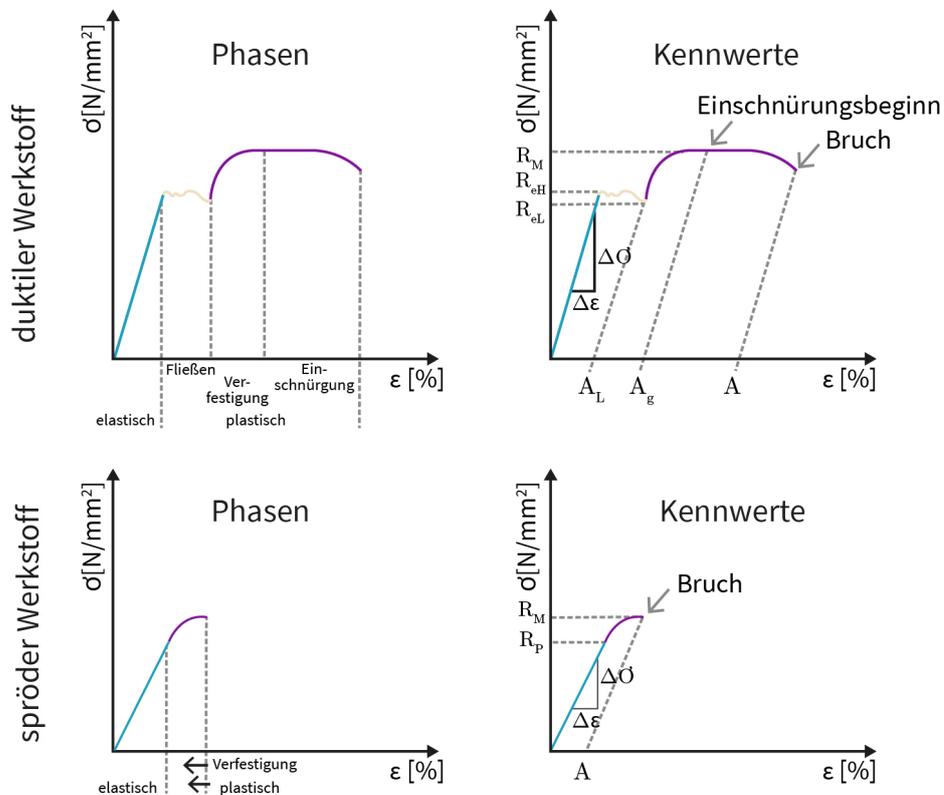
Plastizität bei Metallen

Die plastische Phase wird bei Metallen sehr gut durch das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Zugversuchs beschrieben. Duktile Werkstoffe zeigen eine plastische Verformung mit drei Phasen, einem Fließen der Versetzungen, einer **(Kalt-)Verfestigung** und einer Einschnürung um den Bruch. Die einzelnen Phasen können bei gewissen Werkstoffen sehr ausgeprägt, aber auch nahezu nicht sichtbar sein. Spröde Werkstoffe gehen nach der elastischen Verformung direkt in einen Bruch über, ohne eine Plastizität zu zeigen. Folgende Werkstoffkennwerte werden dabei benutzt, um die Plastizität zu beschreiben:

- E : Elastizitätsmodul – Steigung der Kurve im anfänglichen elastischen Bereich,
- Elastizitätsgrenze – bis zu dieser Spannung verhält sich der Werkstoff elastisch:
 - E_{eH} : obere Streckgrenze – max. Spannung ohne plastische Verformung,
 - R_{eL} : untere Streckgrenze – niedrigste Spannung nach Fließen des Werkstoffes,
 - R_p : Dehngrenze – $R_{p0,2}$ bei einer Dehnung von 0,2 Prozent, falls obere und untere Streckgrenze nicht ausgeprägt sind (Rechenwert),
- R_m : Zugfestigkeit – maximale Spannung, hier beginnt der Bruch der Probe durch die Einschnürung,
- A_L : Lüdersdehnung – Übergang von Fließen zur Verfestigung,
- A_g : Gleichmaßdehnung – Dehnung bei der höchsten Spannung, Übergang von Verfestigung zur Einschnürung sowie
- A : Bruchdehnung – maximale Dehnung der Zugprobe.

Kaltverfestigung
 Wenn sich durch plastische Verformung bei Metallen die Versetzungsanzahl so sehr erhöht, dass sich diese gegenseitig hindern und sich die Festigkeit dadurch steigert, spricht man von einer Kaltverfestigung.

Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit Phasen und Kennwerten

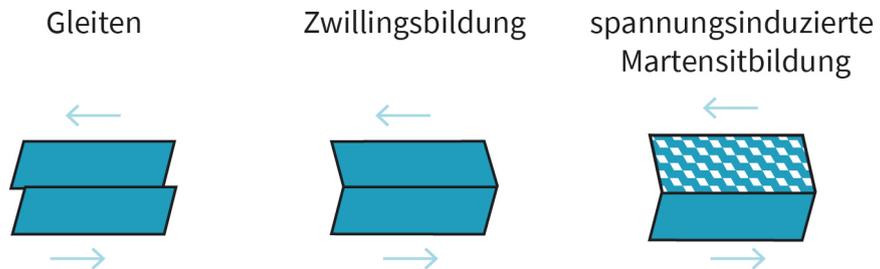


Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Auf molekularer Ebene bedeutet eine plastische Verformung die Lösung einer Verbindung und eine neue Verbindung an einer anderen Stelle. Bei metallischen Gitterbauelementen kann dies z. B. auch ein Wandern der Versetzungen bedeuten. Je nach Werkstoffgruppe und Bindungsvariante fällt dies sehr unterschiedlich aus. Übersteigt die Belastung eines Metalls den elastischen Bereich, so wird in der molekularen Ebene die Gitterstruktur nicht nur auseinandergeschoben, es kommt auch zu einer Verschiebung der Gitterstruktur. Man

differenziert bei Metallen neben dem Gleiten (oder auch Fließen) noch zwei weitere Formen der Plastizität, die der Zwillingsbildung und der spannungsinduzierten Martensitbildung, wie in folgender Abbildung dargestellt (Hornbogen et al., 2019, S. 161).

Abbildung 25: Plastizität bei Metallen

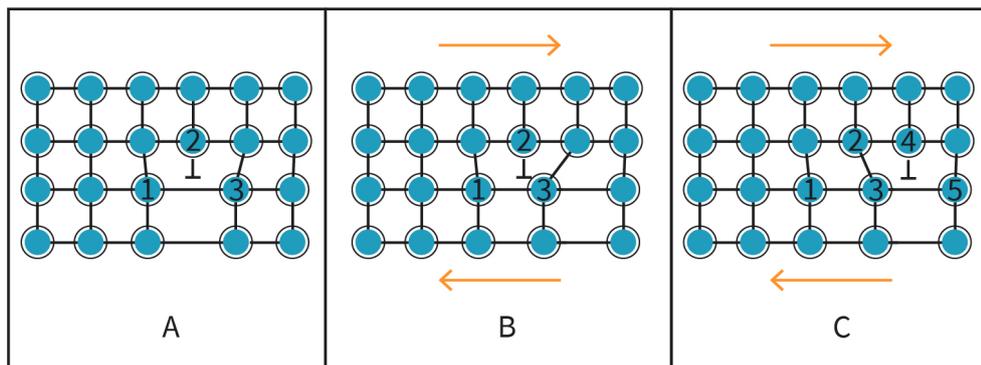


Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Gleitebenen
Die Gleitebenen bilden in einem Kristall die Ebenen zwischen Atomlagen, in der die Verformung (Versetzungsbewegung) stattfindet, da hierfür die geringste Energie benötigt wird.

Das Gleiten findet dabei in sogenannten **Gleitebenen** statt. Hierzu hat die Art der Elementarzelle, wie z. B. krz oder kfz, durch die das Metallgitter zusammengestellt ist, einen Einfluss. Beeinflusst wird der Prozess durch die vielen unterschiedlichen Gitterfehler von Metallen. Fremdatome, Ausscheidungen und Korngrenzen hemmen eine plastische Verformung. Versetzungen und Leerstellen können jedoch leichter durch das Gitter wandern und so eine plastische Verformung begünstigen. Es wird somit keine große Energie benötigt, um eine ganze Reihe von Atomen zu verschieben (Lösen vieler Verbindungen und Entstehung einer neuen Bindung), sondern nur eine einzige Bindung, die sich durch das Metall durchzieht. Man vergleicht dies oft mit dem Verrutschen eines Teppichs. Wenn man einen großen Teppich auf dem Boden zieht, benötigt man eine große Kraft. Insofern jedoch eine kleine Welle durch den Teppich läuft, kann der Teppich mit einer sehr kleinen Kraft bewegt werden.

Abbildung 26: Wandern von Versetzungen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Durch das Wandern der Versetzungen während des Fließens oder Gleitens im Metallgitter kommt es dazu, dass sich die Versetzungen gegenseitig blockieren (Hornbogen et al., 2019, S. 164–166). Die plastische Verformung wird somit gehemmt und die Kurve im Spannungs-Dehnungs-Diagramm steigt wieder, bis es letztendlich zur Einschnürung und zum Bruch kommt.

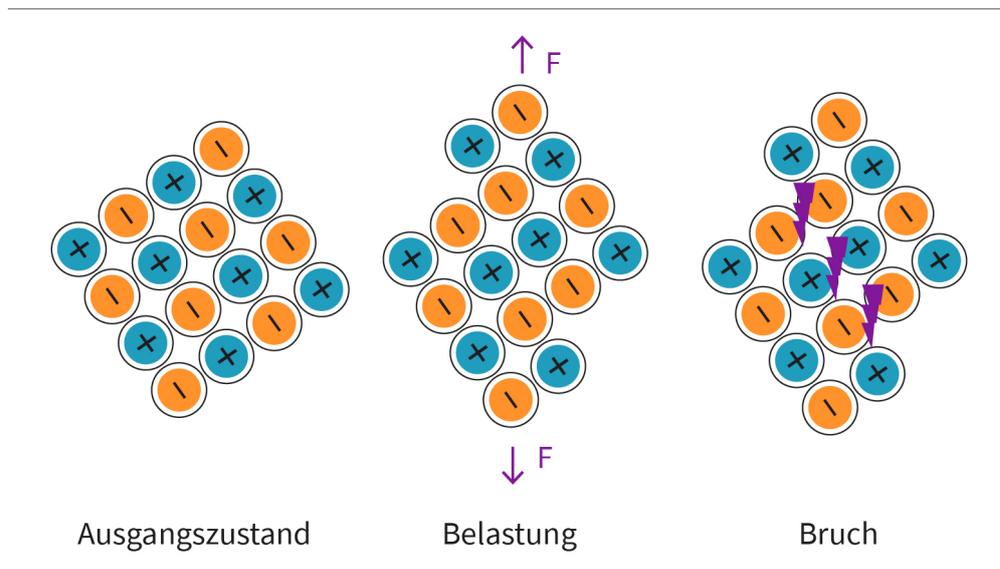
Plastizität bei Polymeren

Viele Polymere zeigen anstatt eines elastischen und plastischen Verhaltens ein viskoelastisches Verhalten (Hornbogen et al., 2019, S. 148). Auf molekularer Ebene bedeutet Elastizität, Viskoelastizität und Plastizität bei Polymeren eine Verschiebung und Streckung der Molekülketten im Knäuel. Im elastischen Bereich gehen die Molekülketten in ihren Ausgangszustand zurück, bei den anderen beiden nicht, es bleibt entweder eine molekulare (Viskoelastizität) oder eine makroskopische (Plastizität) Restverformung.

Plastizität bei Keramiken

Keramiken sind aufgrund der starken chemischen Bindung sehr spröde Werkstoffe. Es gibt nahezu kein elastisches Verhalten und auch keine Plastizität. Der Grund hierfür ist die genaue Lokalisierbarkeit der Bindung der Ionen. Wenn man die Atome zueinander verschiebt, brechen die Bindungen auf, denn gleiche Ladungen nebeneinander stoßen sich ab.

Abbildung 27: Überbeanspruchung bei Keramiken



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

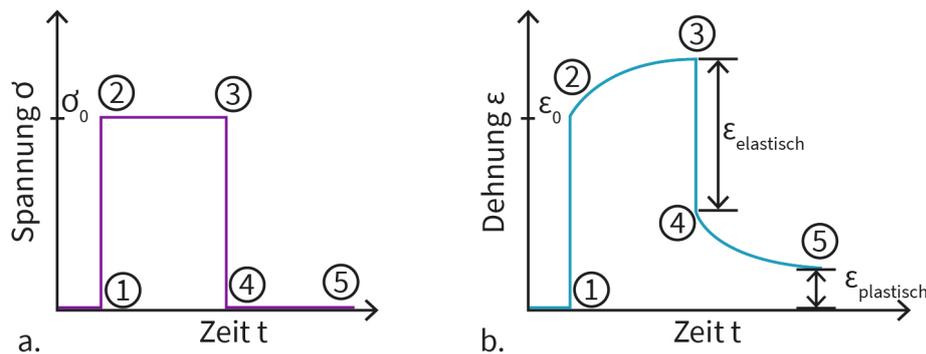
3.4 Kriechen

Kommt es bei Werkstoffen zu einer zeit- und temperaturabhängigen Verformung unter einer konstanten Spannung, so spricht man von Kriechen. Die Verformung kann plastisch oder viskoelastisch sein und tritt bei nahezu allen Metallen, Polymeren und einer sehr geringen Zahl von Keramiken auf (Hornbogen et al., 2019, S. 167–174).

Beim Kriechversuch muss zwischen einer „physikalischen“ und einer „technischen“ Versuchsführung unterschieden werden (Hornbogen et al., 2019, S. 168), da sich bei den Proben der Querschnitt durch die Verformung ändern kann. Bei einer konstanten Last ändert sich also die Spannung, oder wenn mit einer konstanten Spannung getestet wird, muss die Last auf eine Querschnittsänderung hin nachjustiert werden. Für die Beschreibung in diesem Lernzyklus wird diese Querschnittsänderung vernachlässigt, was der technischen Versuchsführung entspricht.

Die Abbildung Zustandsdiagramme des Kriechens zeigt das Beispiel eines unter Zug belasteten Bauteils über die Zeit t in einem Spannungs-Zeit- und einem Dehnungs-Zeit-Diagramm:

Abbildung 28: Zustandsdiagramme des Kriechens



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

- Punkt 1: Ausgangszustand vor der Belastung;
- Punkt 2: Aufbringung einer Spannung σ_0 bei Zeit $t = 0$ und die damit verbundene Verformung ϵ_0 des Bauteils;
- Punkt 3: Verformung des Bauteils nimmt durch Kriechen bei konstanter Spannung weiter zu;
- Punkt 4: Spannung geht nach Wegnahme der Last auf null zurück, elastischer Anteil der Verformung geht zurück sowie
- Punkt 5: Nach einiger Zeit geht durch Kriechen (Relaxation) die Verformung wieder etwas zurück. Die ursprüngliche Last hat jedoch eine plastische Verformung mit sich gebracht.

Kriechen bei Metallen

Das Kriechen verhält sich ähnlich zur plastischen Verformung bei Metallen. Gitterbaufehler wie Fremdatome, Ausscheidungen und Korngrenzen hemmen ein Kriechen, Leerstellen und Versetzungen begünstigen bei Metallen, dass bei höheren Temperaturen und konstanter Spannung eine plastische Verformung stattfinden kann. Höhere Temperatur bedeutet in diesem Fall, dass die Einsatztemperatur typischerweise bei 30 Prozent der Schmelztemperatur sein muss, um ein Kriechen bei Metallen festzustellen. Bei einfachen Stählen kann dies bei 200 °C bis 350 °C schon beginnen, wenn hochschmelzende Legierungen wie mit Molybdän verwendet werden, kann dies bis über 550 °C steigen (Hornbogen et al., 2019, S. 172). Kriechen ist deswegen bei sämtlichen Anwendungen, die bei hohen Temperaturen stattfinden, kritisch. Bei Hochtemperaturanwendungen kommt man sogar noch deutlich näher an die Schmelztemperatur.

Kriechen führt meist zu irreversiblen Schädigungen des Metalls und kann bis zum Bruch führen. Wenn jedoch begünstigende Gitterbaufehler wie Versetzungen parallel zu den hemmenden wie Ausscheidungen auftreten, bzw. auf diese treffen, kann es zu einem Erliegen des Kriechens kommen. Andererseits kann auch die Kaltverfestigung, d. h. das gegenseitige Blockieren der Versetzungen, zu einem Stopp des Kriechens führen.

Kriechen bei Polymeren

Polymere zeigen ein deutliches Kriechverhalten, dies ist abhängig von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur. Wenn eine Belastung sehr schnell aufgebracht wird, erfolgt eine Verformung oft zeitversetzt. Insgesamt haben Polymere eine deutlich niedrigere Schmelztemperatur als Metalle. Da diese von Polymer zu Polymer sehr unterschiedlich sein kann, führt das bei einigen Anwendungen bei Raumtemperatur schon zu einem Kriech-Effekt. In der Praxis kann das bedeuten, dass sich viele Polymere im Einsatz verformen und somit die Bauteilfunktion beeinflussen (Hornbogen et al., 2019, S. 174).

Das Kriechverhalten eines Polymers kann man sich so vorstellen: Bei der Belastung durch eine Spannung σ_0 erfolgt eine Verformung ε_0 . Während die Spannung konstant bleibt, verformt sich das Polymer dennoch weiter. Somit ist die Verformung eine Funktion der Zeit $\varepsilon(t)$. Da die Molekülketten der Polymere zusammengeknäuel sind, kommt es auf molekularem Level zuerst zu einer Dehnung des Knäuels und einem Strecken der Molekülketten. Kriechen kommt speziell bei Thermoplasten vor, da diese keine Vernetzung besitzen. Durch die Spannung gleiten die Molekülketten weiter aneinander vorbei bis sich die Molekülketten längs der Belastungsrichtung befinden. Dabei spricht man von einer Kriechverfestigung (Hornbogen et al., 2019, S. 174). Eine solche Verformung bei Thermoplasten ist immer viskoelastisch oder plastisch.

3.5 Bruch

Allgemeines Bruchverhalten

Bei einer Belastung, die die Elastizität und Plastizität überschreitet, erfolgt im Werkstoff ein submikroskopischer Anriss. Dieser wächst dann bei zunehmender Last zu einem makroskopischen Riss bis hin zum Bruch. Die maximale Spannung oder Zugfestigkeit R_m wird bei der **Gleichmaßdehnung** A_g erreicht. Beim Bruch fällt die Kurve wieder ab und die Probe bricht oder reißt bei der **Bruchdehnung** A . Hierbei muss zwischen dem technischen und dem wahren Spannungsverlauf unterschieden werden, da sich der Querschnitt der Probe verkleinert, dies aber nicht in den Kurvenverlauf mit einfließt.

Gleichmaßdehnung

Die Gleichmaßdehnung bezeichnet die Dehnung, bei der die Einschnürung einer Zugprobe beginnt.

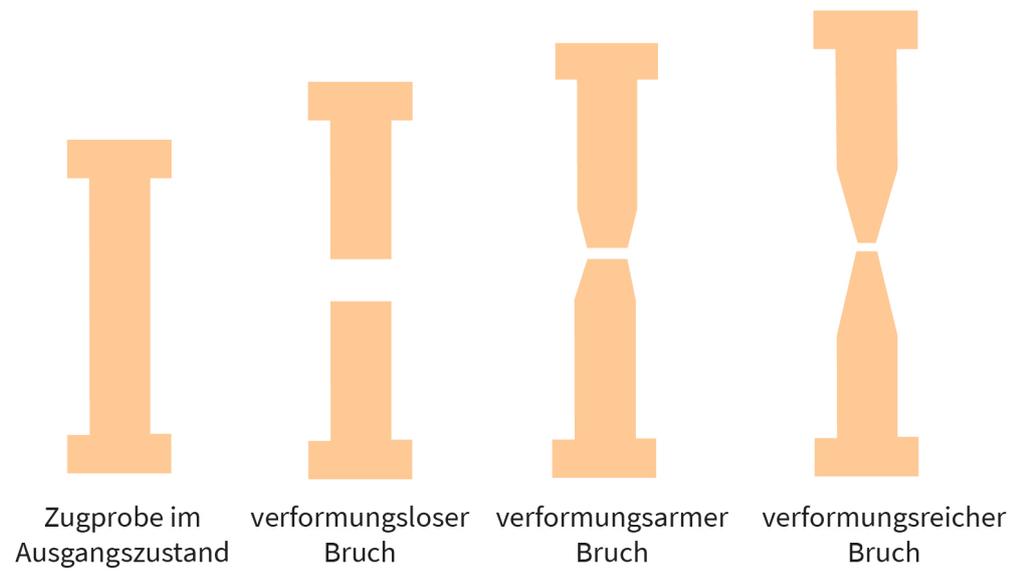
Bruchdehnung

Die Bruchdehnung ist die Dehnung, bei der eine Zugprobe reißt.

Man kann Werkstoffbrüche makroskopisch nach ihrem Aussehen unterteilen:

- Sehr spröde Werkstoffe zeigen verformungslose Brüche, das bedeutet, dass keine plastische Verformung zu erkennen ist.
- Zähle Werkstoffe zeigen verformungsarme Brüche, hierbei schnürt sich der Werkstoff zuerst leicht ein (Einschnürung von 45° bei Bruchstelle).
- Sehr duktile Werkstoffe neigen verformungsreiche Brüchen mit langen und kompletten Einschnürungen vor dem Abriss.

Abbildung 29: Makroskopische Bruchformen



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Man kann Werkstoffbrüche auch mikroskopisch unterteilen. Anhand der Bruchfläche gibt es:

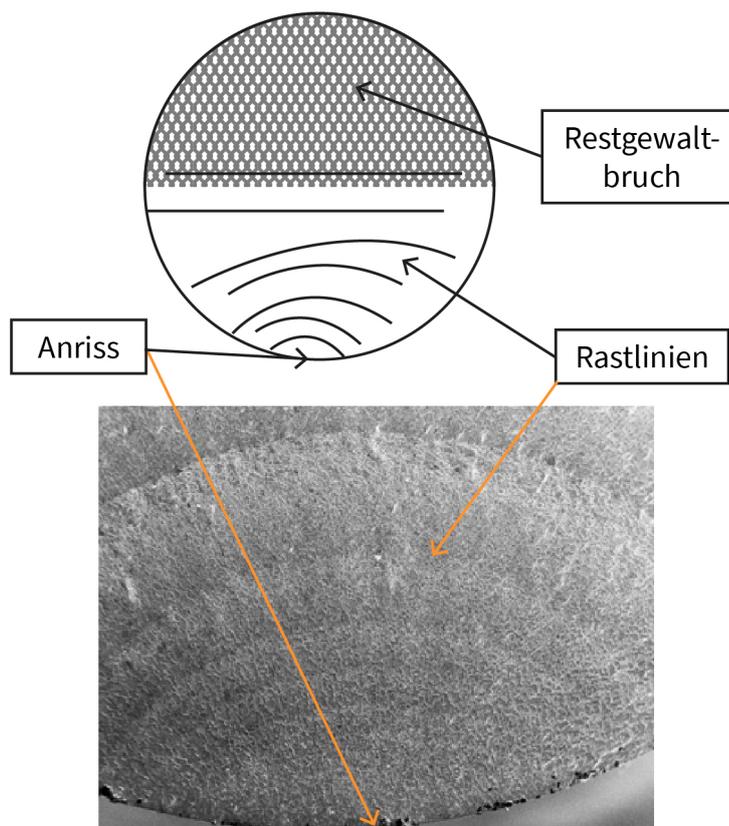
- Gleitbrüche (Verformungen unter Schubspannungseinwirkung) und
- Spaltbrüche (Trennung unter Normalspannungseinwirkung).

Das **Bruchbild**, die Bruchfläche bei einer einmaligen Überlast (Gewaltbruch), kann von der einer zyklischen Last unterschieden werden. Bei einer einmaligen Überlast kommt es zu einem zerklüfteten Bruch über die gesamte Fläche. Bei einer zyklischen Last kommt es zu einem Schwing- oder auch Ermüdungsbruch. Mikro- oder makroskopisch sieht man meistens Rastlinien, die von einem Anriss aus über die Bruchfläche gehen bis es zu einem Rest(gewalt-)bruch kommt. Bei hohen Lasten kann der Bereich des Restbruches sehr groß sein, bei kleinen Lasten kann dieser Bereich sehr klein sein und die Fläche mit den Rastlinien deutlich ausgeprägt.

Bruchbild

Das Bruchbild beschreibt die Bruch(ober-)fläche eines Werkstoffes. Es gibt unterschiedliche Merkmale eines Bruchbildes, welche auf die Belastung hindeuten können, die zum Bruch geführt hat.

Abbildung 30: Bruchbild eines Ermüdungsbruches



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

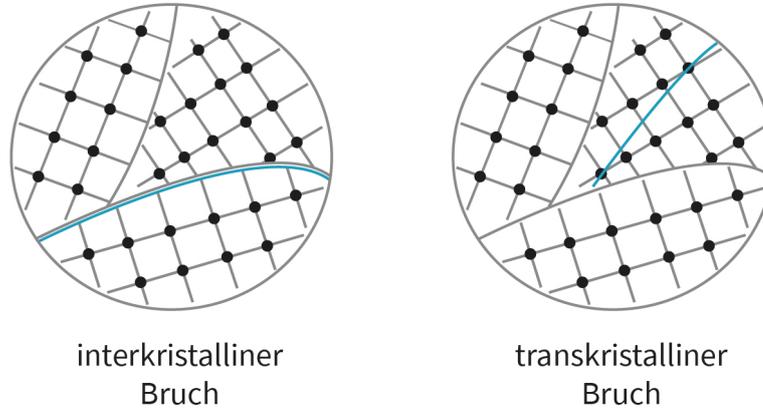
Bruch bei Metallen

Eine plastische Verformung bedeutet auf molekularem Level, dass eine Bindung im Metallgitter gelöst wird und dafür eine neue entsteht. Wenn nun keine neue Bindung entsteht, da die Verformung zu groß ist, bildet sich hier ein Anriss. Dieser wächst dann bei zunehmender Last zu einem makroskopischen Riss, bis hin zum Bruch. Inwieweit Metalle dabei ein sprödes oder duktiler Bruchverhalten zeigen, ist abhängig vom plastischen Verformungsverhalten des Metalls.

Aufgrund des kristallografischen Bruchverlaufes gibt es bei Metallen auch die mikroskopische Unterscheidung in:

- interkristalline Brüche (Riss entlang Korngrenze) und
- transkristalline Brüche (Riss durch Korn).

Abbildung 31: Inter- und transkristallines Bruchbild



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Bruch bei Polymeren

Wenn die Belastung der Polymere zu groß wird, können die Molekülketten der Polymere die Last nicht mehr tragen und es kommt zu molekularen Rissen, die dann zum Bruch des Bauteils führen. Brüche bei Polymeren kommen entweder durch eine Überlast zustande oder durch eine Dauerlast. Bei Polymeren spielen hier wieder Zeit und Temperatur der Belastung eine Rolle. Duroplaste zeigen spröde Brüche ohne große Verformung der Bauteile, Elastomere hingegen eine enorme Bruchdehnung, bis es zum Versagen kommt. Thermoplaste zeigen in vielen Fällen ebenfalls eine deutliche Bruchdehnung.

Bruch bei Keramiken

Wie bereits vorgehend besprochen, besitzen Keramiken eine starke chemische Bindung, die Ionenbindungen. Diese feste Bindung der Moleküle wirkt sich auch auf die mechanischen Materialeigenschaften aus. So haben Keramiken nahezu keine elastische Verformung und ein deutlich höheres Elastizitätsmodul als Polymere und auch als Metalle. Wegen der nahezu nicht vorhandenen elastischen und plastischen Verformung brechen die Ionenbindungen bei einer Überlast sofort auf und es kommt zu einem meist spröden Bruch.

Der Aufbau von Keramiken kann einige Poren zwischen den Keramikkörnern nach dem Sintern aufweisen. Die Poren zeigen bei einer Druckbelastung keine sichtbare Wirkung, bei einer Zugbelastung sind diese jedoch Schwachstellen in der Festigkeit. Der Kraftfluss muss um den Riss herumgeleitet werden. Somit kommt es zu Stellen mit sehr hoher Beanspruchung um die Risse herum. Die Risse können sich dadurch ausweiten, man spricht auch von einem Rissfortschritt. Dieser führt dann zu einem Bruch des gesamten Bauteils. Keramiken besitzen durch diesen Mechanismus auch eine deutlich höhere Druckfestigkeit als Zugfestigkeit. Ob und wo das Bauteil versagt, hängt somit nicht nur von dem eingesetzten

Werkstoff ab, sondern auch vom Herstellungsprozess. Je weniger Poren vorhanden sind, umso weniger Schwachstellen gibt es. Eine Übersicht hinsichtlich des Elastizitätsmoduls und der Dichte von verschiedenen Werkstoffen ist in folgender Tabelle dargestellt:

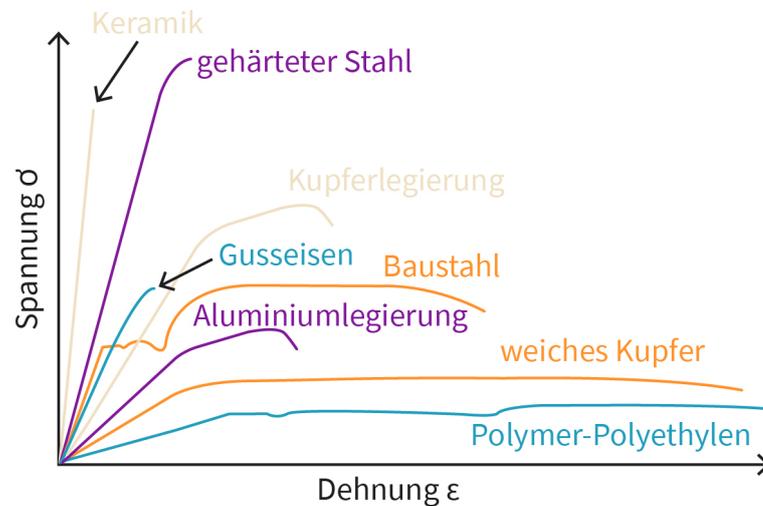
Tabelle 9: Übersicht Werkstoffe hinsichtlich Elastizitätsmoduls und Dichte

Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Elastizitätsmodul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
Metalle			
Eisen	7,85	206	200
Stahl S235	7,85	190–214	360–510
Aluminium	2,7	72	200–360
Titan (Ti4)	4,5	110	540–740
Keramiken			
Glas	1,5–1,6	200	7–70
Diamant	2,3–3,5	1.000–1.200	gering (Druck bis 6.000)
Aluminiumoxid Al ₂ O ₃	3,9–3,97	390	gering (Druck bis 4.000)
Polymere			
Polyethylen	0,92–0,96	0,2–1,2	8–37
Polyvinylchlorid, PVC	1,38	3,0	500–600
Epoxidharz	1,2	2,1–5,5	15–50
Gummi	1,5	0,1	8–30
Verbundwerkstoffe			
glasfaserverstärkte UP-Harz	1,5–2,0	11–33	120–750

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Hornbogen et al., 2019 und Bargel & Schulze, 2018.

Zum weiteren Vergleich einzelner Werkstoffe und Werkstoffgruppen sind die mechanischen Eigenschaften qualitativ in folgender Abbildung dargestellt. Man sieht die steifen Keramiken mit hohem Elastizitätsmodul und keiner sichtbaren plastischen Verformung bis zum Bruch. Spröde Metalle wie gehärteter Stahl oder auch Gusseisen zeigen ebenfalls nahezu keine plastische Verformung, während Baustahl, Kupfer- und Aluminiumlegierungen eine sichtbare plastische Verformung aufweisen. Weiches Kupfer und Polyethylen besitzen eine niedrige Festigkeit und eine enorme Bruchdehnung.

Abbildung 32: Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher Werkstoffe



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.



ZUSAMMENFASSUNG

Werkstoffe erfahren im Einsatz durch verschiedene Belastungen unterschiedliche Formen von Beanspruchungen. Man unterscheidet dabei statische und dynamische Beanspruchungen. Die mechanischen Belastungsarten variieren zwischen Druck, Zug, Biegung, Scherung und Torsion.

In der Regel hat jeder Werkstoff ein elastisches Verhalten, welches sich im Bereich der atomaren Bindungen bewegt. Dies kann jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Keramiken haben nahezu keine messbare elastische Verformung, während Polymere und Metalle eine ausgeprägte Elastizität aufweisen. Einige Polymere haben außerdem ein viskoelastisches Verhalten, während Metalle eine gute Plastizität besitzen.

Eine zeit- und temperaturabhängige Verformung, die besonders bei Metallen und Polymeren auftritt, wird Kriechen genannt. Wenn die Beanspruchung zu groß wird, kommt es zu einem Werkstoffversagen und einem Bruch. Hier gibt es unterschiedliche Varianten. Von verformungsreichen Brüchen bei duktilen Werkstoffen, bis hin zu verformungslosen Brüchen bei spröden Werkstoffen.

LEKTION 4

NICHTMECHANISCHE PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- die unterschiedlichen nichtmechanischen physikalischen Eigenschaften zu benennen.
- Werkstoffe basierend auf den nichtmechanischen physikalischen Eigenschaften zu unterscheiden.
- Werkstoffe und Werkstoffgruppen anhand der nichtmechanischen physikalischen Eigenschaften zu beurteilen und auszuwählen.

4. NICHTMECHANISCHE PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Aus der Praxis

Bei der Entwicklung eines elektrischen Antriebs, wie dem Motor eines Beatmungsgerätes, gibt es für die Werkstoffauswahl besondere Herausforderungen.

- Für die elektrischen Leiter werden Werkstoffe benötigt, die einen geringen elektrischen Widerstand und somit eine gute Leitfähigkeit besitzen, um möglichst wenig Verlust in Form von Erwärmung des Gerätes zu erzeugen.
- Damit hängt zusammen, dass die Antriebseinheit von Werkstoffen umgeben werden muss, die hinsichtlich der Ausbreitung der Wärme eine isolierende Wirkung besitzen, damit die Bedienenden und Anwendenden, hier medizinisches Personal und Patient:innen, nicht in Kontakt mit heißen Komponenten kommen können.
- Die Erwärmung von einzelnen Komponenten darf auch nicht zu einer Verformung führen, die die Funktion des Gerätes beeinflusst und somit die Patient:innen gefährdet.
- Weiterhin muss in die Werkstoffauswahl einfließen, dass die gewünschten Funktionen der Werkstoffe keine Wechselwirkungen hervorrufen. Das bedeutet, dass z. B. magnetische Spulen im Elektromotor so abgeschirmt sein müssen, dass die magnetische Wirkung keinen Einfluss auf andere Komponenten im Gerät erzielt.

Es stellt sich also die Frage, wie sich die physikalischen Eigenschaften von Werkstoffen verhalten und wie diese charakterisiert werden, um sie möglichst effektiv einsetzen zu können.

4.1 Elektrische Eigenschaften

Allgemein

Die elektrische Eigenschaft beschreibt, wie gut elektrischer Strom in einem Material geleitet wird (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Der elektrische Widerstand R eines Leiters kann im Ohmschen Gesetz über die Spannung U und Stromstärke I berechnet werden, er kann jedoch auch über die Leitergeometrie (Länge l und Querschnitt q) und seine werkstoffspezifischen Kennwerte, die **elektrische Leitfähigkeit** σ (SI-Einheit S/m [Siemens pro Meter]) und den **spezifischen Widerstand** ρ (Kehrwert) berechnet werden:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{q} = \rho \cdot \frac{l}{q}$$

Es gibt isotrope (richtungsunabhängige), wie Metalle und Legierungen, sowie anisotrope (richtungsabhängige) Materialien, wie Graphit, Kristalle und Hochtemperatursupraleiter.

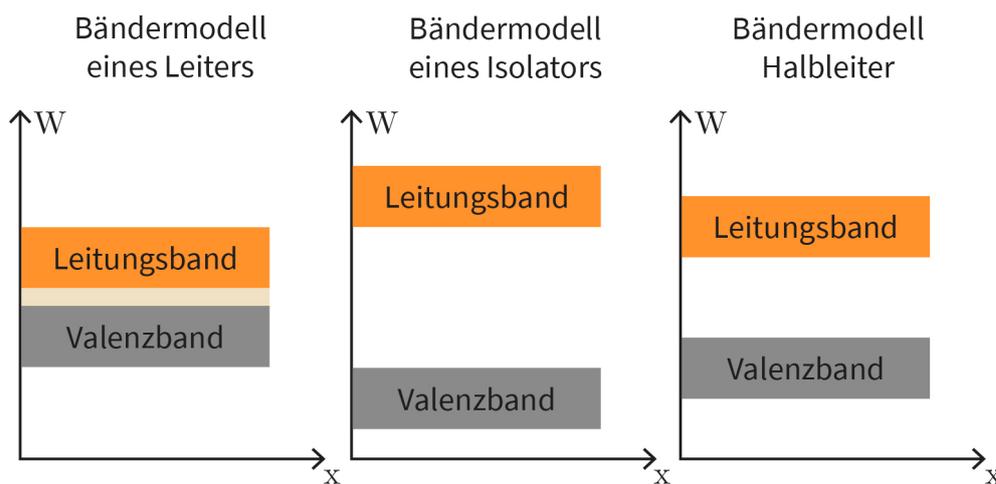
Elektrische Leitfähigkeit
Die elektrische Leitfähigkeit gibt an, wie gut ein Werkstoff elektrischen Strom leiten kann.

Grundvoraussetzung für die elektrische Leitfähigkeit ist die Bewegung von freien geladenen Teilchen (Hornbogen et al., 2019, S. 221). Es handelt sich dabei in der Regel um freie Elektronen, die durch das Material transportiert werden, ohne dabei das Material zu verändern. Wenn viele Elektronen frei verfügbar und somit beweglich sind, besitzt ein Werkstoff eine gute Leitfähigkeit. Man unterteilt diese Werkstoffe abhängig von der Verfügbarkeit und Dichte beweglicher Ladungsträger in Supraleiter, Leiter, Halbleiter und Nichtleiter.

Spezifischer Widerstand
Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit wird spezifischer Widerstand genannt und gibt den Widerstand eines Werkstoffes gegen Stromfluss an.

Bei Metallen beruht dies auf der freien Beweglichkeit der Valenzelektronen im Elektronen- nebel. Elektronen bleiben von sich aus auf Distanz zueinander und in diskreten Energieniveaus. Man spricht meistens von Energiebändern, in denen sich zwei Elektronen aufhalten können. Für die elektrische Leitfähigkeit sind die äußeren beiden Energiebänder, das Valenzband und das darüber befindliche Leitungsband, wichtig. Für die Leitfähigkeit müssen die Elektronen das Valenzband verlassen und das Leitungsband erreichen, dafür benötigen sie eine Energiezufuhr. Nach dem Bändermodell definiert der Abstand dabei, ob ein Werkstoff Leiter, Halbleiter oder Isolator ist. Ein sehr großer Abstand kann nicht überwunden werden und wirkt somit isolierend.

Abbildung 33: Bändermodell eines Leiters, Isolators und Halbleiters



Quelle: Moritz Venschott, 2017.

Gitterfehler beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit eines Werkstoffes (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Leerstellen erhöhen die Leitfähigkeit, indem sie die Abstände reduzieren, die Elektronen überwinden müssen. Andere Gitterfehler und Störungen, wie Versetzungen oder gelöste Atome hindern die freien Elektronen am Durchfluss und erhöhen somit den elektrischen Widerstand. Dies ist gleichbedeutend mit einer Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit (Hornbogen et al., 2019, S. 225). Dies wirkt sich auch auf die Herstellung von Metallen aus, insbesondere durch Kaltverformung hergestellte Metalle haben eine hohe Versetzungs- und Gitterfehlerdichte.

Ein zweiter Punkt ist die bessere Leitfähigkeit von reinen Metallen im Vergleich zu Legierungen. Der Einschluss von Legierungselementen dient meist den besseren mechanischen Eigenschaften eines Metalls, die Gefügeänderung bewirkt aber eine Reduktion der elektrischen Eigenschaften, da die Elektronen weniger leicht durch den Werkstoff fließen können.

Supraleiter und Leiter

Die Temperaturabhängigkeit wurde bereits erwähnt, aber hier soll genauer darauf eingegangen werden (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Für die meisten Werkstoffe, insbesondere die Metalle, gilt, dass je größer der Strom ist, der durch den Leiter durchfließt, die Temperatur umso mehr steigt (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Dadurch kommen die Atome in Bewegung und hindern Elektronen am freien Fluss. Hierdurch steigt der elektrische Widerstand und die Leitfähigkeit sinkt stark ab. Je niedriger die Temperatur ist, desto geringer ist dort die thermische Bewegung. Im absoluten Nullpunkt liegt diese theoretisch bei null. Somit geht der Widerstand auch gegen Null und die Leitfähigkeit wäre theoretisch unendlich.

Bei Supraleitern springt der elektrische Widerstand beim Unterschreiten der sogenannten **Sprungtemperatur** abrupt gegen nahezu null und ist nicht mehr messbar (Hornbogen et al., 2019, S. 244–245). Hierbei wird das magnetische Feld aus dem Leitermaterial verdrängt. Supraleiter sind mit den Ausnahmen der Alkali- und Erdalkalimetalle sowie Kupfer, Silber und Gold die meisten Metalle, Legierungen und einige wenige Keramiken, wie Wolfram, Gallium, Aluminium, Quecksilber und Tantal.

Eine praktische Anwendung von Supraleitern ist aufgrund der niedrigen Temperaturen sehr komplex. Erste Supraleiter zeigten Sprungtemperaturen von unter 25 Kelvin, Hochtemperatur-Supraleiter können mittlerweile bei höheren Temperaturen eingesetzt werden, die jedoch immer noch unter 77 Kelvin liegen (Hornbogen et al., 2019, S. 245–246). Anstatt flüssigem Helium kann hier mit flüssigem Stickstoff zur Kühlung gearbeitet werden. Dies macht den Einsatz einfacher, ist jedoch für breitere Anwendungen immer noch aufwendig. Aktuelle Forschung zur Anwendung von Supraleitern bei Raumtemperatur in Verbindung mit hohem Druck sind noch umstritten und es ist fraglich, ob dies praktisch umsetzbar ist.

Supraleiter werden neben der guten elektrischen Leitfähigkeit auch wegen den magnetischen Eigenschaften eingesetzt, da Supraleiter Magnete abstoßen:

- Magnetresonanztomografie (MRI/Kernspintomografie),
- Magnetschwebebahn,
- starke Elektromagnete sowie
- Teilchenbeschleuniger.

Die Alkali- und Erdalkalimetalle sowie Kupfer, Silber und Gold sind sehr gute elektrische Leiter. Da sie die Sprungtemperatur bei niedrigen Temperaturen nicht aufweisen, sind sie jedoch keine Supraleiter, sondern nur Leiter.

Sprungtemperatur

Bei Supraleitern springt der spezifische Widerstand sprunghaft gegen Null und die elektrische Leitfähigkeit somit theoretisch gegen unendlich, wenn die Sprungtemperatur unterschritten wird.

Halbleiter

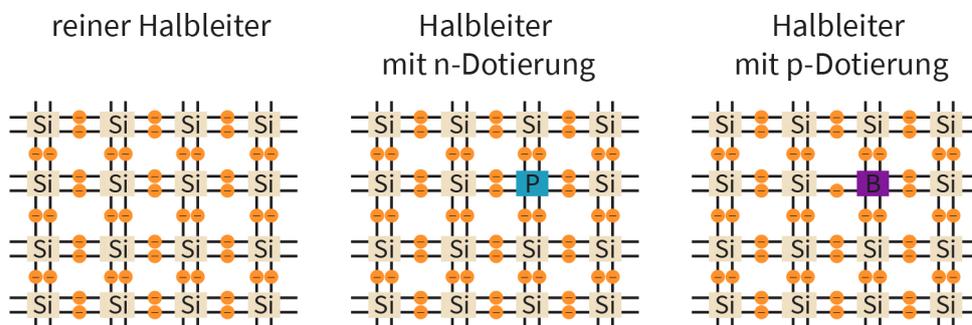
Der Name **Halbleiter** impliziert eine elektrische Leitfähigkeit zwischen Leitern und Nichtleitern (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Dies stimmt auch für reine Halbleiterwerkstoffe wie Silizium, da dies im reinen Zustand keine freien Elektronen zur Verfügung hat, die für die Leitfähigkeit notwendig sind. Mittlerweile gibt es aber eine ganze Industrie, die sich mit Halbleitern beschäftigt, da man hier leitfähige Werkstoffe erzeugen kann, indem man gezielt Ladungsträger in das reine Material einbringen kann. Die Halbleiterwerkstoffe Germanium und Silizium sowie einige organische Materialien können die elektrische Leitfähigkeit um den Faktor 100 durch eine gezielte Einlagerung von Ladungsträgern, die Dotierung, erwirken. Man unterscheidet zwei Arten der Dotierung (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Bei der n-Dotierung werden Elektronendonatoren zugegeben. Hierbei handelt es sich um Elemente mit mehr Außenelektronen als das Grundmaterial (z. B. Phosphor oder Arsen mit fünf Außenelektronen). Somit erzeugt man mehr negative Ladungsträger, also eine Überzahl von Elektronen. Die p-Dotierung hingegen funktioniert durch einen Zusatz von Elektronenakzeptoren. Diese sind Elemente mit weniger Elektronen als das Grundmaterial (z. B. Bor oder Indium mit drei Außenelektronen). Man erzeugt also mehr positive Ladungsträger und es entstehen Elektronenfehlstellen, auch Löcher oder Defektelektronen genannt.

Halbleiter sind stark abhängig vom Reinheitsgrad, von den verwendeten Temperaturen und vom herrschenden Druck. Wenn man n- und p-dotierte Halbleiter kombiniert, erhält man Dioden für die Elektronik.

Halbleiter

Die Industrie Halbleiterfertigung ist sehr stark gewachsen, da die Manipulation von Halbleitern, die Dotierung, die elektrische Leitfähigkeit sehr stark beeinflusst und somit sehr nützliche Werkstoffe für z. B. Dioden hergestellt werden können.

Abbildung 34: Halbleiter



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Nichtleiter

Theoretisch hat jeder Werkstoff eine gewisse Leitfähigkeit, diese kann jedoch so klein sein, dass man sie nicht messen kann oder dass sie vernachlässigbar ist (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235). Die Grenze ist somit fließend. Dies ist der Fall bei den meisten Nichtmetallen, Kohlenwasserstoffen und organischen Verbindungen (Polymeren). Man spricht von Nichtleitern oder Isolatoren bei einer Leitfähigkeit typischerweise von unter $< 10^{-6}$ S/m (Hornbogen et al., 2019, S. 221–222). Bei diesen Werkstoffen ist der Abstand der Elektronenbänder von Band zu Band zu groß, sodass Elektronen nicht oder nur sehr schwer wechseln können.

Ein Überblick zur elektrischen Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffe ist in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 10: Elektrische Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffe und Medien

Material	Einordnung	σ [S/m]
Silber	Metall	$6,1 \cdot 10^7$
Kupfer	Metall	$5,8 \cdot 10^7$
Reines Eisen	Metall	10^7
Graphit parallel	Nichtmetall	10^6
Graphit quer	Nichtmetall	10^2
Silizium dotiert	Halbleiter	$10^0 \dots 10^6$
Silizium rein	Halbleiter	10^{-4}
Glas	Glas	10^{-12}
Polyvinylchlorid PVC	Polymer	10^{-12}
Polystyrol PS	Polymer	10^{-15}
Meerwasser/Leitungswasser	Elektrolyt	$5 \cdot 10^{-3} \dots 10^0$
Reinstwasser	Elektrolyt	$5,5 \cdot 10^{-6}$

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Bargel & Schulze, 2018, S. 176, S. 376; Hornbogen et al., 2019, S. 221–222, S. 226; Weißbach et al., 2018, S. 33.

4.2 Magnetische Eigenschaften

Der Magnetismus ist eine physikalische Kraftwirkung zwischen (i) Dauermagneten, (ii) temporär magnetisierten Objekten und (iii) bewegten elektrischen Ladungen. Magnetische Werkstoffe werden in der Elektrotechnik und im Maschinenbau eingesetzt (Hornbogen et al., 2019, S. 237). So sind z. B. Spulenkern in Transformatoren, Generatoren und Elektromagneten, sowie reibungsfreie Transportsysteme und Gleitlager **ferromagnetisch**.

Ferromagnete
Als Ferromagnete werden die bekanntesten magnetischen Werkstoffe bezeichnet. Sie werden durch die Ausrichtung der Atome (Dipolrichtung) geprägt.

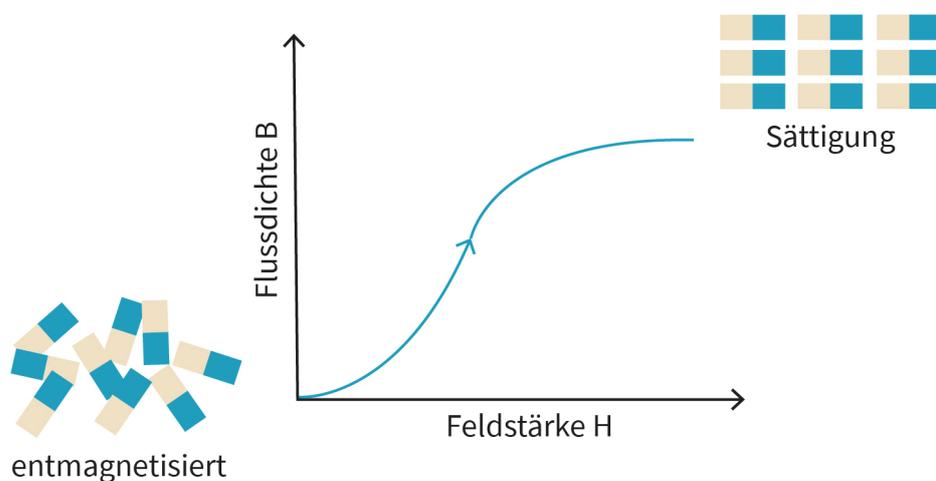
Metalle sind die häufigsten Magnetwerkstoffe (Ferromagnete), es kommen jedoch auch metallische Gläser und keramische Werkstoffe als Magnete zum Einsatz (Hornbogen et al., 2019, S. 237). Polymere entwickeln nur magnetische Eigenschaften, wenn ihnen andere Stoffe als Additive beigemischt werden.

Die wichtigste Gruppe der ferromagnetischen Werkstoffe sind die Übergangsmetalle mit unaufgefüllten Elektronenschalen – Chrom (Cr), Mangan (Mn), Kobalt (Co), Nickel (Ni) und Eisen (Fe). Diese treten sowohl in metallischen als auch keramischen Verbindungen auf (Hornbogen et al., 2019, S. 237). Eine weitere wichtige Gruppe von Elementen für magnet-

ische Werkstoffe sind die seltenen Erden Samarium (Sm), Europium (Eu) und Gadolinium (Gd). Dies deutet daraufhin, dass die Atome viele Elektronen besitzen müssen, um ferromagnetische Eigenschaften zu zeigen. Ein Grund für diese Eigenschaft ist die Ausrichtung des Spins der Elektronen. Wenn die Elektronen eine bevorzugte Ausrichtung des Spins besitzen, ist eine magnetische Wirkung zu sehen, bei entgegengesetzter Ausrichtung nicht.

Bei der Magnetisierung eines Werkstoffes werden die regellosen Ausrichtungen in gleichgerichtete polare Ausrichtungen umgewandelt (Hornbogen et al., 2019, S. 237–244). Dies passiert durch die Erhöhung der Feldstärke H und zeigt sich in der Erhöhung der Flussdichte B des Werkstoffes. Der Vorgang erfolgt nicht linear, sondern mit einer kontinuierlichen Sättigung, siehe folgende Abbildung:

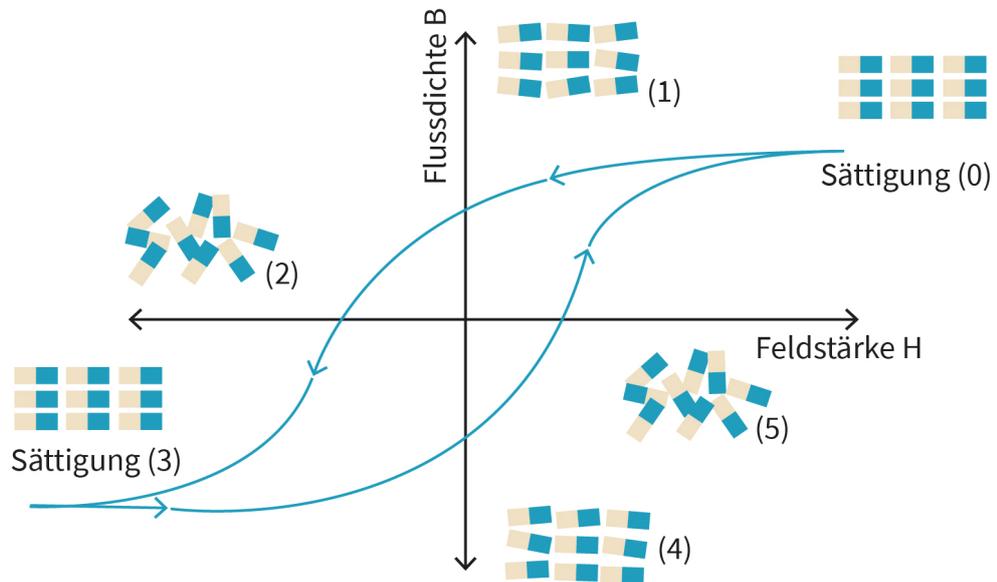
Abbildung 35: Magnetisierung eines Werkstoffes bis zur Sättigung



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Die Umpolung wird in einer Magnetisierungskurve dargestellt (Hornbogen et al., 2019, S. 237–244). Da der Verlauf nicht linear ist, wird diese auch oft als Hysteresekurve bezeichnet. Folgende Abbildung zeigt dabei, dass es in beiden polaren Ausrichtung, (0) und (3) einen Sättigungszustand gibt. Die Punkte (1) und (4) veranschaulichen, dass bei Entfall der äußeren Feldstärke weiterhin eine Flussdichte bestehen bleibt. In den Punkten (2) und (5) zeigt sich kein entmagnetisierter Zustand, da die regellosen Ausrichtungen durch eine Feldstärke erzwungen sind. Bei Wegnahme dieser würden sich die Ausrichtungen wieder ändern und in die Punkte (1) und (4) zurückkehren.

Abbildung 36: Magnetisierungskurve



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Ferromagnetische Werkstoffe werden dabei nach ihrer Magnetisierungseigenschaft in hartmagnetische und weichmagnetische Werkstoffe aufgeteilt (Hornbogen et al., 2019, S. 237–244). Weichmagnete lassen sich leicht magnetisieren, Hartmagnete hingegen nur mit großen magnetischen Feldern (Hornbogen et al., 2019, S. 238).

Hartmagnetische Werkstoffe werden in einem starken Magnetfeld magnetisiert und halten den Magnetismus vergleichbar lang (Hornbogen et al., 2019, S. 237–244). Sie haben eine breite Hystereseschleife in der Magnetisierungskurve. Wegen der langanhaltenden Magnetisierung werden Dauermagnete, Tonband- und Speicherzellenwerkstoffe aus hartmagnetischen Werkstoffen erstellt.

Weichmagnetische Werkstoffe können bei geringen Verlusten leicht magnetisiert werden (Hornbogen et al., 2019, S. 237–244). Diese eignen sich für Anwendungen, bei denen eine ständige Ummagnetisierung gefordert wird, wie in elektrischen Maschinen und Spulen, bei denen sich die Flussrichtung und auch das Magnetfeld zyklisch ändern. Sie besitzen eine enge Hystereseschleife. Durch die Erwärmung treten Ummagnetisierungsverluste auf (Hystereseverluste und Wirbelstromverluste).

4.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Metallen basiert, vergleichbar zur elektrischen Leitfähigkeit, auf der Gitterstruktur mit den freien Elektronen im Leitungsband. Die elektrische Leitfähigkeit σ (indirekt proportional zum elektrischen Widerstand ρ) und die Wärmeleitfähigkeit λ von Metallen sind direkt proportional zueinander (Hornbogen et al., 2019, S. 236).

Ein zweiter wichtiger Punkt, der sich vergleichbar zur elektrischen Leitfähigkeit bei Metallen verhält, ist die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur (Bargel & Schulze, 2018, S. 14–15).

Bei Nichtmetallen verhält sich die Proportionalität nicht vergleichbar (Hornbogen et al., 2019, S. 236). Bei Isolatoren verbessert sich mit hoher Temperatur theoretisch die elektrische Leitfähigkeit, während die Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen abnimmt. Hier wird die Wärmeübertragung rein durch Gitterschwingungen übertragen, da keine freien Elektronen vorhanden sind. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit werden vermehrt Polymere und Keramiken eingesetzt, wenn Wärmeisolation die Hauptaufgabe ist. Folgende Tabelle beschreibt die spezifische Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen Werkstoffen bei einer Temperatur von 20 °C.

Tabelle 11: Spezifische Wärmeleitfähigkeit einiger Werkstoffe bei 20 °C

Werkstoff	$\lambda \left[\frac{J}{m \cdot s \cdot K} \right]$
Silber (Ag)	400
Kupfer (Cu)	390
Aluminium (Al)	228
Eisen (Fe)	76
Aluminiumoxid	30
Siliziumnitrit (Si ₃ N ₄)	15
Zirkonoxid	2,0
Quarzglas (SiO ₂ -Glas)	1,15
Polyethylen (PE)	0,5
Polyvinylchlorid (PVC)	0,16

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Hornbogen et al., 2019, S. 236, 298, 368, 370; Weißbach et al., 2018, S. 364.

4.4 Optische Eigenschaften

Der Begriff „Farbe“ hat eine physikalische und eine physiologische Bedeutung. Das physikalische Phänomen wird durch die Absorption und Reflexion von Licht und seinen Wellenlängen bestimmt (Hornbogen et al., 2019, S. 247). Die Wahrnehmung durch den Sehnerv im menschlichen Auge, die von Mensch zu Mensch variieren kann, ist wiederum ein physiologisches Phänomen.

Wellenlänge
Licht ist eine Form von Strahlung einzelner Lichtquanten in Lichtwellen. Sichtbares Licht tritt dabei in einem Spektrum von kürzeren violetten bis längeren roten Lichtwellen auf.

Die meisten optischen Eigenschaften eines Werkstoffes sind schnell und mit dem menschlichen Auge festzustellen. Es gibt durchsichtige Werkstoffe, wie Silikatgläser (Fensterglas: Na_2SiO_4), organische Gläser (Plexiglas) oder auch keramische Einkristalle (Hornbogen et al., 2019, S. 247–249). Diese sind für das menschliche Auge durchsichtig und können komplett farblos oder leicht gefärbt sein. Weiterhin gibt es undurchsichtige Werkstoffe, wie alle Metalle, sowie die meisten Polymere und Keramiken. Die Farbe kommt durch die **Wellenlängen** des Lichts zustande, die entweder absorbiert, reflektiert oder transmittiert werden. Rote Werkstoffe absorbieren oder lassen z. B. alle Wellenlängen außer die des roten Lichtes durch. Durchsichtige Gläser können z. B. rot, blau oder grün erscheinen, da nur Teile des sichtbaren Lichts reflektiert und andere durchgelassen werden.

Wie auch andere Werkstoffeigenschaften hängt das optische Verhalten von der Art der Elektronenbindung und den äußersten Elektronenbändern ab (Hornbogen et al., 2019, S. 248–250). Werkstoffe, die durch Energie Elektronen in eine höhere Elektronenschale heben können, können Lichtquanten mit ihrer Energie aufnehmen. Je nach Wellenlänge und somit Energie erfahren die Elektronen dabei einen Anregungszustand. Wenn die Elektronen in ihre ursprünglichen niedrigeren Energiezustände zurückkehren, emittieren sie die absorbierte Energie wieder in Form von Lichtquanten. Da die Richtung der neuen Lichtquanten unbestimmt ist, wird sie nicht unbedingt wahrgenommen. Viele Metallsorten reflektieren stark, haben jedoch auch eine typische Farbe, die von der Reflexion der Wellenlängen des sichtbaren Lichtes abhängt (Hornbogen et al., 2019, S. 247). Silber reflektiert alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts gleich stark und erscheint somit weiß. Kupfer hingegen erscheint rotbraun.

Werkstoffe, die wie Isolatoren wirken, haben keine Möglichkeit, die freien Elektronen auf ein nächstes Band zu heben, um das Licht zu absorbieren. Die benötigte Energie, um ein Elektron auf das nächste Band zu heben, wäre zu groß. In der Literatur wird dieser große Abstand auch „verbotene“ Zone genannt. Dies ist bei durchsichtigen Werkstoffen, wie den oben genannten Silikat- oder auch Plexigläsern der Fall. Nur ungewollte oder gewollte Verunreinigungen anderer Atomarten können zur Absorption bestimmter Wellenlängen führen und so wird das Glas (oder der Kristall) farbig. Saphirkristalle aus reinem Al_2O_3 sind Isolatoren und durchsichtig. Bei Zumischung von etwas Chrom anstelle von Aluminium im Gitter führen die Cr_3^+ -Ionen zu einer Absorption des blauen Lichts (Hornbogen et al., 2019, S. 248). Dies führt zu einer roten Erscheinung des Kristalls, der als Rubin bezeichnet wird. Ähnlich dazu funktioniert die grüne oder braune Färbung von Weinflaschen durch geringe Beimischung von Fe_3^+ -Ionen. Defekte können das Licht in alle Richtungen reflektieren. Wenn Gläser oder Kristalle viele solcher Defekte enthalten, werden sie makroskopisch undurchsichtig, und erscheinen „milchig“.

Bei Polymeren ist die optische Erscheinung hauptsächlich vom Beimischen der Additive abhängig. Pigmente gibt es in sehr vielen Typen und Variationen (Hornbogen et al., 2019, S. 249).

4.5 Thermische Ausdehnung

Die geometrische Veränderung eines Werkstoffes durch einen Temperaturunterschied nennt man thermische Ausdehnung oder auch Wärmeausdehnung (Hornbogen et al., 2019, S. 249). Jeder Werkstoff reagiert anders auf Wärmezu- oder abfuhr. Der Eiffelturm in Paris ist durch diesen Effekt im Winter messbar kleiner als im Sommer. Der Kennwert, der diese individuelle Neigung beschreibt, ist der **Ausdehnungskoeffizient**. Die Ursache für die Ausdehnung liegt im atomaren Aufbau der Werkstoffe und den Schwingungen der Atome durch Wärmezufuhr. Der Ausdehnungskoeffizient ist selbst temperaturabhängig und kann zur Berechnung der Ausdehnung nur bei isotropen Werkstoffen und auch nur für gewisse Temperaturbereiche verwendet werden (Hornbogen et al., 2019, S. 249–250). Bei dünnen Stäben wird der lineare Ausdehnungskoeffizient α verwendet, bei dreidimensionalen Körpern muss auf den kubischen Ausdehnungskoeffizient β ($= 3x\alpha$) gewechselt werden.

Ausdehnungskoeffizient
Wärmezuführung kann bei Werkstoffen zu thermischen Bewegungen der Atome und somit zu einer Ausdehnung des Werkstoffes führen. Der Ausdehnungskoeffizient ist dabei der Kennwert.

Der Ausdehnungskoeffizient α ist umso kleiner, je höher die Schmelztemperatur eines Werkstoffes ist (Hornbogen et al., 2019, S. 249–250). Wenn diese niedrig ist, hat der Werkstoff eine schwächere Bindung und schwingt mit größerer Amplitude bei Wärmezufuhr. Dies führt zu einer größeren Ausdehnung. Kristalline Stoffe zeigen in der Regel circa 7 Prozent Ausdehnung zwischen 0 K und ihrer Schmelztemperatur. Bei Werkstoffen führt die Ausdehnung zu inneren Spannungen im Bauteil (Hornbogen et al., 2019, S. 250–252). Dies wird Temperaturwechselbeständigkeit genannt. In größeren Keramiken und Glasstrukturen ist α isotrop, während α in amorphen und kristallinen Fasern anisotrop ist. Gemäß der Schmelzpunktregel ist der Ausdehnungskoeffizient bei thermoplastischen Polymeren sehr hoch (Hornbogen et al., 2019, S. 250–252). Hier muss man auch zwischen Ausdehnung längs der Molekülketten und parallel dazu unterschieden werden.

Besonderheiten durch andere, parallel auftretende Phänomene (Hornbogen et al., 2019, S. 250–252):

- Phasenumwandlungen können dazu führen, dass trotz Erwärmung von α -Eisen auf das dichter gepackte Gitter des γ -Eisens keine Ausdehnung, sondern eine Kontraktion stattfindet (negatives α).
- Ausdehnung durch Wärme und Kontraktion durch Entmagnetisierung heben sich bei Eisenlegierungen mit speziellem Nickelanteil wieder auf. Dieser „Invar“-Werkstoff wird für präzise Messinstrumente verwendet ($\alpha = 0$ bei Raumtemperatur).
- SiO_2 -Glas hat aufgrund der festen Bindung im amorphen Netzwerk ein sehr niedriges α , da es kaum Wechselwirkung zwischen den schwingenden Atomen zeigt. Im Vergleich dazu hat kristallines SiO_2 , wie kristalline Silikasteine, eine hohe Volumenänderung (großes α).

4.6 Überblick über weitere physikalische Eigenschaften

Radioaktivität

Die meisten bisher beschriebenen Eigenschaften sind unabhängig vom Atomkern, jedoch abhängig davon, wie die einzelnen Atome miteinander verbunden sind (Hornbogen et al., 2019, S. 212–220). Das heißt, die Bindungsform und Energie ist ausschlaggebend. Bei der Radioaktivität sind die kernphysikalischen Eigenschaften jedoch sehr wichtig, hier spielt die Bindung eine sekundäre Rolle. Die Stabilität eines Atomkerns ist von zwei Aspekten abhängig (Hornbogen et al., 2019, S. 212–220):

- Zum einen werden die Atomkerne durch Kräfte zusammengehalten. Diese sind nur über sehr kleine Entfernungen wirksam. Daraus folgt, dass große Atomkerne durch ihre größeren Abstände weniger stabil als kleinere sind.
- Zum anderen spielt auch das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen eine Rolle. Daraus folgt, dass kleinere Atomkerne weniger stabil sind als große.

Insgesamt ergibt sich daraus folglich, dass Atomkerne mit mittlerer Ordnungszahl um das Element Eisen am stabilsten sind.

Es gibt verschiedene kernphysikalische Reaktionen, die wichtigsten sind (Hornbogen et al., 2019, S. 212–220):

- Kernspaltung: Ein großer Kern kann gespalten werden.
- Kernfusion: Kleinere Kerne können verschmelzen.
- Einfangen von Neutronen führt zu neuen **Isotopen**.

Bei Radioaktivität spricht man von der Eigenschaft instabiler Atomkerne, spontan Strahlung auszusetzen (Hornbogen et al., 2019, S. 212–220). Es werden Teilchen aus dem Atomkern ausgesendet (radioaktive Strahlung), dabei bildet sich ein neues Isotop oder der Atomkern ändert seinen Zustand (radioaktiver Zerfall). Elemente mit instabilem Kern nennt man Radionuklide. Die abgegebene Strahlung ist für den Menschen nicht direkt wahrnehmbar, **Strahlung** kann aber eine schädliche Auswirkung auf gesunde Zellen im Körper haben. Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften können ebenfalls auf eventuelle Strahlenschäden reagieren und Änderungen, wie Versprödungen, aufweisen.

Je nach Nuklid reduziert sich die Aktivität mit der Zeit (Hornbogen et al., 2019, S. 212–220). Die sogenannte Halbwertszeit beschreibt die Zeit, in der sich die Aktivität halbiert. Es gibt Halbwertszeiten von (Milli-)Sekunden bis tausenden von Jahren. Ihre Entstehung ist natürlich, solche Werkstoffe können also in der Natur abgebaut werden. Sie können aber auch gezielt hergestellt werden.

Trotz der gefährlichen und gesundheitsschädlichen Effekte wird Radioaktivität aber auch in einigen Domänen zu positiven Zwecken genutzt. So findet es bspw. in der Energietechnik zur Energiegewinnung Anwendung. Zudem werden radioaktive Werkstoffe in der Medi-

Isotop

Atomarten, die gleich viele Protonen haben, aber eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen besitzen, nennt man Isotope. Sie werden derselben Ordnungszahl zugeordnet, haben aber unterschiedliche Massen.

Strahlung

Der Mechanismus von Strahlenschäden kann gezielt zur Abtötung von schädlichen Organismen bei der Strahlensterilisation, und bei nekrotischem oder karzinogenem Gewebe (Tumor, Krebsgewebe) zur Radionuklidtherapie oder Brachytherapie eingesetzt werden.

zintechnik verwendet, um schädliches Gewebe abzutöten. Hier können radioaktive Implantate Krebsgewebe abtöten oder radioaktive Strahlung zur Desinfektion und Abtötung von Keimen eingesetzt werden.

Formgedächtnislegierungen, Sensor- und Aktor-Werkstoffe

Metalle, die in zwei unterschiedlichen Phasen vorkommen können und sich dabei an die Form vor einer Verformung erinnern können, nennt man **Formgedächtnislegierungen** (Langbein & Czechowicz, 2021, S. 5–18). In der Hochtemperaturphase besitzen sie in der Regel eine Austenit-Phase und die Martensit-Phase im Niedertemperaturbereich (Hornbogen et al., 2019, S. 252–258). Es findet also zwischen den beiden Phasen und Temperaturen eine Volumenänderung statt. Dies kann bspw. durch eine Gitterumwandlung von krz zu kfz geschehen. Die Verformung kann neben der Temperatur auch durch eine mechanische Spannung herbeigeführt werden. Man unterscheidet zwischen:

- **Einweg-(Memory-)Effekt:** Die Formänderung kann nur einmal durchgeführt werden. Um in die Ausgangsform zurückzukommen, muss dem Bauteil eine separate mechanische Belastung zugefügt werden (z. B. durch Federkraft).
- **Zweiweg-(Memory-)Effekt:** Die Formgedächtnislegierungen haben zwei Formen, eine Hochtemperaturform und eine Niedertemperaturform im Gedächtnis. Äußere Kräfte beeinflussen die Umwandlung, aber theoretisch ist ein Wechsel zwischen zwei Formen somit möglich.
- **Pseudoelastisches Verhalten („Superelastizität“):** Es erfolgt eine elastische Verformung durch äußere Belastung ohne Temperaturänderung. Die Verformung kann deutlich ausgeprägter als das normale elastische Verhalten des Werkstoffes sein. Im Gegensatz zur Elastizität ist dabei nicht die Bindung der Atome, sondern die Gitterstruktur zuständig, die durch Belastung eine krz zu kfz Umwandlung und somit ein elastisches Verhalten zeigt.

In medizintechnischen Bereichen finden Formgedächtnislegierungen bereits Anwendung (Hornbogen et al., 2019, S. 258). Derzeit wird auch an Formgedächtnispolymeren und -keramiken geforscht.

Formgedächtnislegierungen

Diese Legierungen werden häufig bei Sensoren und Aktoren eingesetzt. Hier kann ein Impuls zu einer physikalischen Antwort, wie eine Verformung, umgewandelt werden.



ZUSAMMENFASSUNG

Werkstoffe haben unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich ihrer nichtmechanischen physikalischen Eigenschaften. Viele dieser Eigenschaften basieren auf der chemischen Bindungsvariante und den freien Elektronen des Werkstoffes.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit unterscheidet man Werkstoffe, die freie Elektronen zur Verfügung haben und somit leitfähig sind, von solchen, die keine zur Verfügung haben. Werkstoffe, bei denen der elektrische Widerstand bei sehr niedrigen Temperaturen gegen Null geht, nennt man Supraleiter. Halbleiter sind Werkstoffe, die von Natur aus

keine freien Elektronen zur Verfügung haben und schlechte Leiter sind, deren Leitfähigkeit jedoch durch eine Dotierung künstlich beeinflusst werden kann.

Bei den Metallen ist die Wärmeleitfähigkeit proportional zur elektrischen Leitfähigkeit, da sie ebenfalls auf den freien Elektronen basiert. Bei den Nichtmetallen basiert sie auf der Schwingung der Atome und verhält sich nicht proportional zur elektrischen Leitfähigkeit.

Die optischen Eigenschaften eines Werkstoffes werden durch die Reflexion, Absorption und Transmission von Quanten der Lichtquellen durch den Werkstoff bestimmt. Wenn alle sichtbaren Lichtwellen absorbiert werden, erscheint ein Werkstoff schwarz, wenn gewisse Wellenlängen reflektiert werden, erscheint der Werkstoff in dieser Farbe.

Werkstoffe haben die Neigung, in Wärme ihre Form zu verändern. Aufgrund von atomarer Schwingung durch Wärmeeinwirkung kommt es zu einer Ausdehnung der Werkstoffe. Dies wird thermische Ausdehnung genannt.

Weitere nichtmechanische physikalische Eigenschaften sind die Radioaktivität, d. h. der zeitabhängige Zerfall der Atome von Werkstoffen, oder auch das Formgedächtnis von bestimmten Werkstoffen, d. h. die Annahme einer speziellen Form durch äußere Einflüsse.

LEKTION 5

CHEMISCHE UND TRIBOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- den Vorgang von Korrosion bei Eisenwerkstoffen zu beschreiben.
- Schutz- und Vorbeugemöglichkeiten für Werkstoffe gegen Korrosion zu entwickeln.
- die verschiedenen Korrosionstypen von technischen Werkstoffen zu identifizieren.
- den Unterschied zwischen Reibung und Verschleiß zu verstehen.
- die Ursachen, die zur Spannungsrisskorrosion führen, nachvollziehen zu können.

5. CHEMISCHE UND TRIBOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN

Aus der Praxis

Bei der Entwicklung und Konstruktion eines Beatmungsgerätes mit Einsatz in einer Klinik zur Unterstützung der Atemfunktion von Patient:innen müssen die Anforderungen und äußeren Einflüsse genau beachtet werden. Wichtig dabei ist, wie sich die Werkstoffauswahl auf den späteren Einsatz und die Umgebung auswirkt.

- Durch die strengen Hygienevorschriften werden Geräte intensiv gereinigt, desinfiziert und sterilisiert. Hierzu kommen aggressive Medien zum Einsatz. Die Verwendung dieser darf zu keiner chemischen Reaktion, wie Korrosion führen, oder die mechanischen Eigenschaften durch z. B. Versprödung beeinträchtigen.
- Bei akuten Fällen und Einsatz im Operationsaal können Körperflüssigkeiten, wie Blut, auf das Gerät gelangen. Auch hier darf es zu keinen ungünstigen Kombinationen von Einflüssen kommen, die die Funktion gefährden oder durch chemische Reaktionen gesundheitsschädliche Stoffe freigegeben.
- Die Langlebigkeit solcher Apparate ist essenziell für die Sicherheit der Patient:innen, so darf es zu keiner hohen Reibung oder Verschleiß kommen.

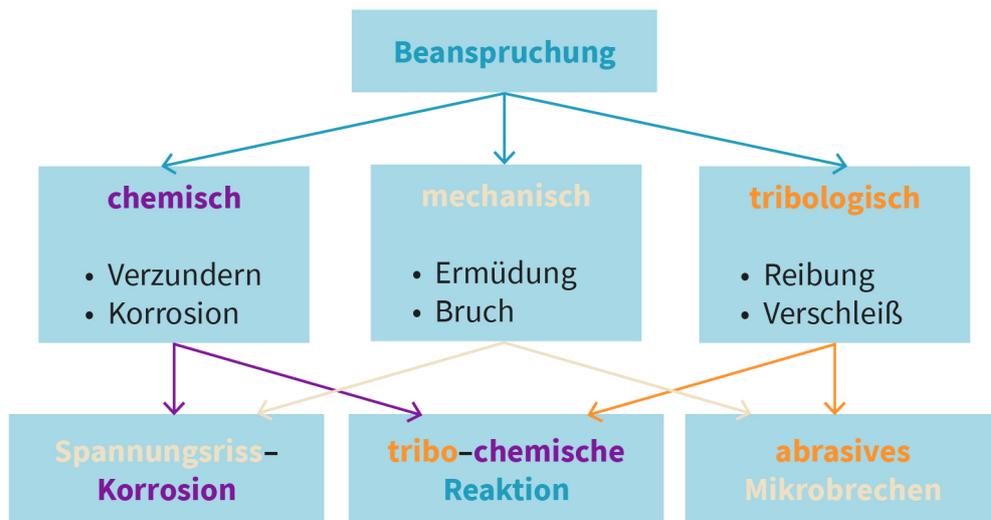
Es stellen sich folgende Fragen:

- Was passiert mit Werkstoffen beim Einwirken chemischer Medien oder Umgebungseinflüsse?
- Was bedeutet Korrosion und wie kann sie verhindert werden?
- Was beeinflusst Reibung und somit Verschleiß der Werkstoffe?

5.1 Oberflächen und Versagen der Werkstoffe

In der Konstruktion wird viel Aufmerksamkeit auf die physikalischen Eigenschaften und dabei insbesondere auf die mechanischen Eigenschaften gelegt. Die chemischen Eigenschaften eines Werkstoffes spielen jedoch eine ebenso wichtige Rolle. Chemische Medien erzeugen meist eine Reaktion auf der Werkstoffoberfläche – sie werden daher oft Oberflächenreaktionen genannt, auch wenn dabei neben chemischen auch physikalischen Faktoren eine Rolle spielen. Die Beanspruchungen werden in mechanisch, chemisch und tribologisch aufgeteilt. Dazu zeigt folgende Abbildung die korrespondierenden Versagensarten der Werkstoffe – wie Bruch, Verschleiß und Korrosion und die zusammenhängenden Versagensarten (Hornbogen et al., 2019, S. 261–263):

Abbildung 37: Einflussfaktoren durch Beanspruchung



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Sowohl die Versagenstypen als auch die Beanspruchung treten oft gemeinsam oder in Kombinationen auf. So geht Korrosion oft mit Verschleiß oder einem Bruch einher. Bei einem Bruch handelt es sich auf atomarer Ebene um eine Trennung der Atom- oder Molekülbindungen. Dies kann durch eine mechanische Beanspruchung erfolgen, in vielen Fällen wird es jedoch durch chemische Faktoren und Einflüsse deutlich erleichtert. In einigen Fällen lösen nur chemische Reaktionen einen Bruch aus. In der Regel wird ein Bruch an der Oberfläche initiiert und setzt sich in einem Bauteil fort. Verschleiß tritt ausschließlich, Korrosion in den meisten Fällen, auf der Bauteiloberfläche auf – speziell bei Schnittstellen, d. h., wenn Oberflächen verschiedener Bauteile in Kontakt sind und dabei einen Spalt bilden, oder es Bewegungen zwischen den Bauteilen gibt. Beispiele für kombinierte Beanspruchungen sind:

- Spannungsriss- oder Spaltkorrosion,
- Verschleiß durch Mikrobrechen,
- tribologisch-chemische Reaktion sowie
- Reibermüdungskorrosion.

Um solche komplexen Vorgänge zu betrachten, müssen mehrere Einflussfaktoren zusammengefasst und gemeinsam in einem System analysiert werden. Man spricht z. B. von einem **Korrosionssystem**, wenn ein Werkstoff in einer chemisch aggressiven Umgebung mit weiteren Einflussgrößen, wie hoher Luftfeuchtigkeit, Temperatur, etc. analysiert wird (Hornbogen et al., 2019, S. 262–263). Ein **tribologisches System** untersucht die Reibung von zwei oder mehreren Werkstoffen in Relativbewegung zueinander und in einer Umgebung (bspw. Verwendung eines Schmiermittels) unter bestimmten Bedingungen (bspw. Geschwindigkeit, Druck, Temperatur im System). Die Veränderung einer einzelnen Variablen kann schon zu gänzlich anderen Eigenschaften im System führen.

Korrosionssystem
Ein Korrosionssystem besteht aus einem oder mehreren Metallen und einem chemischen Medium, welches zur Korrosion führt.

Tribologisches System

Ein tribologisches System untersucht die Reibung und den Verschleiß zweier oder mehrerer Werkstoffe, die in Wechselwirkung zueinander stehen.

Oberflächenrauheit

Die Rauheit oder Oberflächenrauheit beschreibt die Unebenheit der Oberflächenhöhe.

Oxidation

Die Oxidation beschreibt eine chemische Reaktion, bei der ein Ion oder ein Atom Elektronen abgibt und dadurch seinen Zustand verändert.

Thermodynamisches Gleichgewicht

Ein System ist im thermodynamischen Gleichgewicht, wenn alle thermischen, mechanischen und chemischen Flüsse von Materie und Energie innerhalb des Systems verschwinden.

Da die meisten Versagenstypen an der Oberfläche ihren Ursprung haben, hat die Oberflächengüte einen großen Einfluss auf die Werkstofffestigkeit und das Risiko für ein Versagen. Eine Kerbe mit damit verbundener Kerbwirkung verursacht an der Oberfläche einen kleinen Anriss, der zu lokal erhöhten Spannungen führt. Hierdurch besteht die Möglichkeit, dass sich der Anriss der Kerbe im Werkstoff fortsetzt und zum Versagen des Werkstoffes und somit auch des Bauteils führt.

Eine Kerbe kann sowohl durch das Design eines Bauteils als auch durch die Fertigung des Werkstoffes entstehen (bei einer rauen Oberfläche kann gar es zu vielen kleinen Kerben kommen). Dadurch beeinflusst eine hohe **Oberflächenrauheit** nicht nur Abrieb und Verschleiß, sondern mindert möglicherweise auch die Dauerfestigkeit.

5.2 Elektrochemische Korrosion

Oxidation

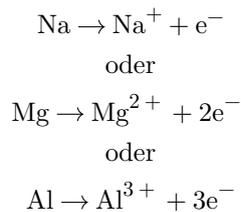
Unter dem Begriff Elektrochemische Korrosion werden sowohl die mit Diffusion verbundenen **Oxidationsvorgänge**, einfache Auflösungsvorgänge als auch die Vorgänge Ätzen, Korrosion und Spannungsrisskorrosion verstanden (Hornbogen et al., 2019, S. 263). Die Eigenschaft der chemischen Beständigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Werkstoffes, einer chemischen Reaktion zwischen Oberfläche und Umgebung zu widerstehen. Ein Fehlen dieser Eigenschaft führt zu einer verringerten Lebensdauer oder einem schnellen Versagen des Bauteils.

Korrosion beschreibt eine Reaktion der Werkstoffoberfläche mit Atomen oder Molekülen aus der gasförmigen, flüssigen oder festen Umgebung (Hornbogen et al., 2019, S. 263). Korrosion tritt fast ausschließlich bei metallischen Werkstoffen auf, weil die Grundvoraussetzung ein System, welches sich nicht im **thermodynamischen Gleichgewicht** befindet, ist. Die meisten Metalle haben bereits in feuchter Luft kein thermodynamisches Gleichgewicht mehr und oxidieren. Außerdem erleichtert die hohe elektrische Leitfähigkeit eine schnelle Reaktionsgeschwindigkeit der elektrochemischen Vorgänge. Keramiken wie Al_2O_3 sind bereits vollständig oxidiert und zeigen deshalb keine Neigung zur Korrosion. Kunststoffe sind „relativ“ korrosionsbeständig. Einzig die Eindiffusion von H_2O -Molekülen über die Oberfläche beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von gewissen Polymeren, keramischen und polymeren Gläsern (Hornbogen et al., 2019, S. 264):

- **Korrosion:** ist eine unerwünschte Reaktion zur Entfernung von Atomen von der Werkstoffoberfläche;
- **keine Korrosion:** erwünschte Abtragung von Atomen wie beim elektrolytischen Polieren;
- **häufiger Sonderfall der Korrosion:** Wasserstoffversprödung:
 - atomarer Wasserstoff diffundiert von der Oberfläche in den Werkstoff;
 - Mikrorisse durch Reaktion des Wasserstoffes zu H_2 oder H_2O ;
 - Versprödung und Schwächung des Werkstoffes durch Anlagerung an Korngrenzen, Versetzungen oder im Gitter;
- **Spannungsrisskorrosion:** zusätzliche äußere oder innere Zugspannung;

- **Kombination von Korrosion:** mit weiteren Vorgängen, z. B. Korrosionsermüdung, Reibkorrosion, Korrosion mit Erosion;
- **Verzunderung:**
 - Reaktion der Werkstoffoberfläche mit Sauerstoff bei erhöhter Temperatur ohne H₂O;
 - „Hitzebeständigkeit“ bedeutet geringere Neigung zur Verzunderung und zum Kriechen sowie
 - Heißgaskorrosion beschreibt lokalen Zundervorgang.

Bei Berührung mit einem **Elektrolyten** hat ein Metall das Bestreben, sich aufzulösen, indem es Ionen abgibt, diese Ionenabgabe nennt man Oxidation. Es entsteht somit ein positiv geladenes Ion, wie bei Natrium, Magnesium oder Aluminium:



Metalle haben eine unterschiedlich ausgeprägte Neigung zur Oxidation, edlere Metalle haben eine geringere Neigung und unedlere eine größere Neigung. Wenn sie Ionen bilden und Elektronen abgeben, gibt es aufgrund der Wechselwirkung (positive Ionen und negative Elektronen) ein Bestreben, diese an der Oberfläche zu sammeln und zu halten (Hornbogen et al., 2019, S. 265). Metalle mit einer größeren Neigung zur Ionenbildung haben eine größere Ladung an der Oberfläche. Eine Metalloberfläche in Kontakt mit einer leitenden Flüssigkeit hat somit ein **Elektrodenpotential**.

Tabelle 12: Elektrodenpotential der Metallionen

Verhalten	Ionen	V
Anodisch	Li ⁺	+2,96
	Al ³⁺	+1,70
	Zn ²⁺	+0,76
	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	+0,44/+0,045
	Ni ²⁺	+0,23
0	H ⁺	±0,000
Kathodisch	Cu ²⁺ /Cu ⁺	-0,34/-0,47
	Ag ⁺	-0,80
	Au ⁺	-1,50

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Hornbogen et al., 2019, S. 267.

Elektrolyt

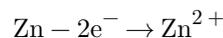
Ein Elektrolyt ist eine chemische Verbindung, die im festen, flüssigen oder im gelösten Zustand vorkommt und in wässriger Lösung elektrischen Strom leiten kann.

Elektrodenpotential

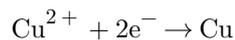
Das Elektrodenpotential beschreibt den Unterschied des elektrischen Potentials zwischen zwei Werkstoffen, meist einer Elektrode und einem Elektrolyt.

Zwei Metalle mit unterschiedlicher Neigung zur Oxidation in leitender Flüssigkeit zeigen entweder, wenn sie voneinander isoliert sind, einen Potentialunterschied oder es ergibt sich ein elektrischer Stromfluss, wenn sie zusammen verbunden sind (Hornbogen et al., 2019, S. 265). Der Vorgang wird nachfolgend am Beispiel von Kupfer und Zink in einer Flüssigkeit erläutert.

Zink ist in diesem Fall das unedlere Metall mit einer höheren Neigung, Elektronen abzugeben und dient deswegen als Anode. Das Bauteil aus Zink funktioniert als Elektrode und gibt Elektronen ab. Diese wandern in der Flüssigkeit über zum Kupfer. Die Elektrode muss daraufhin weiteres Zink auflösen und Ionen generieren, um den Gleichgewichtszustand wieder zu erreichen. Dieser Prozess wird Oxidation genannt, auch wenn kein Sauerstoff beteiligt ist, und durch folgende Formel beschrieben (Hornbogen et al., 2019, S. 264):



Kupfer ist in diesem Beispiel das edlere Metall mit einer geringeren Neigung, Elektronen abzugeben und dient deswegen als Kathode. Die Kupferelektrode gewinnt Elektronen vom Zink (Hornbogen et al., 2019, S. 265) und scheidet Kupfer ab. Diese Reaktion wird Reduktion genannt und wird durch folgende Formel beschrieben:



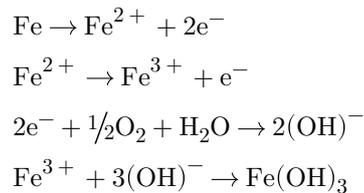
Dieses Beispiel zeigt auch den Grundmechanismus der Korrosion. Es muss dabei nicht zwingend eine Flüssigkeit vorliegen, bereits die Luftfeuchtigkeit kann als leitende Verbindung zwischen Metallen dienen. Feuchte Umgebungen sind deswegen besonders herausfordernd für Metalle. Die Oxidation muss nicht über das gesamte Bauteil verteilt sein, es kann auch zu lokalen Angriffen führen. Ebenfalls müssen nicht zwingend verschiedene Metalle beteiligt sein, bereits Orte mit unterschiedlichen Potentialen in einem Metall führen zum gleichen Effekt. Dies kann durch die Zusammensetzung des Metalls, die Korngrenzen oder auch Versetzungen zusammenkommen. Daraus ergibt sich (Hornbogen et al., 2019, S. 266):

- Die Stärke des örtlichen Korrosionsstroms hängt von der Spannung und dem elektrischen Widerstand ab.
- Die abgetragene Menge ist am Ort der größten Spannung und Leitfähigkeit (z. B. Phasengrenzen, Korngrenzen und feuchte Stellen) am größten.

Ein solches Abtragen, das gewollt und erwünscht ist, ist das elektrolytische Polieren von Werkstoffoberflächen (Hornbogen et al., 2019, S. 266). Ein Strom wird über eine äußere Quelle angelegt. Umgekehrt gepolt, kann man auch metallische Abscheidungen erzeugen, dies wird bei der elektrolytischen Versilberung, Verchromung oder Vernickelung angewendet.

Korrosion am Beispiel „Rost auf Eisen“

Eines der wichtigsten und häufigsten Vorkommnisse von Korrosion ist die Bildung von Rost auf Eisen. Hierzu liegt die Oxidation von Eisen zugrunde, wobei die Elektronen an der Oberfläche in feuchter Luft Hydroxylionen ($(\text{OH})^-$) bilden. Diese bilden zusammen mit den Eisenionen (Fe^{3+}) Eisenhydroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ oder auch als Eisenhydroxyl bekannt), welches auch Rost genannt wird:



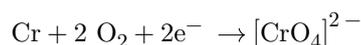
Maßnahmen gegen Korrosion

Prinzipiell gibt es drei verschiedene Maßnahmen gegen Korrosion:

- Lackierung mit nichtmetallischen Lacken,
- Metalle schützen sich selbst – Oxidschicht sowie
- Kombination/Beschichtung mit edleren oder unedleren Metallen.

Eine Lackierung schirmt das Metall vom Kontakt mit Flüssigkeit ab. Somit wird der chemische Prozess der Korrosion erst gar nicht gestartet. Bei Lackbeschädigungen oder auch schon kleinen Kratzern des Lackes ist das Eisen jedoch ungeschützt und korrodiert an dieser lokalen Stelle.

Gewisse Metalle, wie Chrom, sind in Gegenwart von Sauerstoff kathodischer als ihre Stellung in der Spannungsreihe vermuten lassen würde. Dies liegt an der Bildung einer dünnen Oberflächenschichten und wird in der Oxidationsreaktion beschrieben:

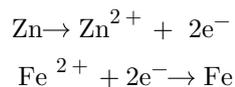


Durch diese Oxidationsreaktion bildet sich eine **Oxidschicht** auf der Oberfläche des Werkstoffes, die vor Kontakt mit einem Elektrolyten und somit vor einer weiteren Bildung von Ionen und einer Abgabe von Elektronen schützt (Hornbogen et al., 2019, S. 268–269). Dieser Prozess findet in der Praxis viele Anwendungen und wird Passivieren oder Passivierung genannt. Dies kommt bei Aluminium, Magnesium, rostfreien Stählen, Chrom, Cobalt, Nickel, Titan und ihren Legierungen vor. Bei einer Beschädigung der Passivschicht kann es durch den umgebenden Sauerstoff zu einer sofortigen Repassivierung kommen, d. h., die Oxidschicht bildet sich erneut von sich aus.

Eine Beschichtung mit einem edleren Metall, wie eine Kupferbeschichtung von Eisen, bewirkt, dass die Eisenoberfläche keine Korrosion zeigt, da sie selbst nicht mit einem Elektrolyten in Kontakt kommt. Kupfer bildet wie bereits oben erläutert eine Oxid- oder

Passivschicht, um sich zu schützen. Bei Rissen oder auch schon kleinen Kratzern der Kupferschicht ist das Eisen jedoch sofort wieder ungeschützt und korrodiert an dieser lokalen Stelle.

Im Fall von Rost auf Eisen, also bei der Bildung von Eisenhydroxid oder Eisenhydroxyl ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) kann auch eine Schicht aus einem unedleren Metall mit höherem Elektrodenpotential schützen, wie Zink (Hornbogen et al., 2019, S. 269). Das Zink dient bei diesem verzinkten Eisen als (Opfer-)Anode, es löst sich bevorzugt auf und führt dazu, dass sich die gelösten Elektronen mit den Eisenionen verbinden und wieder abscheiden. Einer Korrosion des Eisens wird also entgegengewirkt:



5.3 Spannungsrissskorrosion

Die Spannungsrissskorrosion ist ein Versagensmechanismus durch eine Rissbildung, der, wie der Name schon andeutet, durch eine Kombination aus einer mechanischen (Zug-)Spannung und einer Korrosion entsteht (Bargel & Schulze, 2018, S. 74–75; Hornbogen et al., 2019, S. 273–275). Diese Art von Mechanismus kommt bei wenigen Polymeren und hauptsächlich bei Metallen vor. Die Rissbildung kann dabei durch ein Gefügekorn, also transkristallin, oder entlang der Korngrenze eines Gefüges, also interkristallin, verlaufen. Als mechanische Spannungsquelle können statische Zugspannungen, dynamische Zugschwellschwingungen oder auch Eigenspannungen dienen.

Drei Bedingungen müssen erfüllt sein, sodass Spannungsrissskorrosion auftritt (Bargel & Schulze, 2018, S. 74):

- Eine Quelle für eine Zugspannung muss vorliegen, z. B. Eigenspannung oder mechanische Belastung des Werkstoffes.
- Ein spezifischer Elektrolyt muss involviert sein, z. B. Salzwasser, Körperflüssigkeiten etc.
- Im Werkstoff muss ein Anriss entstehen oder vorliegen.

Spannungsrissskorrosion tritt häufig bei Werkstoffen auf, die als korrosionsbeständig gelten, da sie eine Passivschicht zum Eigenschutz generieren (Bargel & Schulze, 2018, S. 74). Dies gilt für **rostfreie Stähle** ebenso wie Kupferlegierungen. Die Spannungen im Werkstoff führen zur Bewegung von Versetzungen und somit zu einer Gleitstufe an der Oberfläche. Diese führt zu einer Unterbrechung der korrosionshemmenden Deckschicht, wie einer Oxidschicht. Wenn der Werkstoff nun in einem spezifischen Medium (Elektrolyt) vorliegt, kann dieses verhindern, dass sich die Deckschicht neu bildet. In diesem lokalen Bereich, auch Tunnel genannt, kann es nun zur Korrosion kommen. Durch das Zusammenspiel einer mechanischen Spannung und Korrosion entsteht ein Anriss. Die Spannungskonzentration um den Anriss löst daraufhin eine erhöhte mechanische Belastung aus. Die vermehrten Fehlstellen in diesem Bereich führen aber auch zu einem chemischen Effekt, der Werkstoff gibt in diesem Bereich bevorzugt Ionen ab, was ein lokales Auflösen bedingt. Der Riss kann sich somit einfach fortsetzen.

Rostfreier Stahl

Ein Stahl aus Eisen und höchstens 1,2 Prozent Kohlenstoff, der außerdem die Legierungselemente Chrom (mind. 10,5 Prozent) und Nickel besitzt, um die Oxidation zu verhindern, wird rostfreier Stahl genannt.

Die Zeit bis zum Versagen kann von wenigen Sekunden oder Minuten bis hin zu Jahren variieren. Folgende Punkte spielen bei der Rissinitiierungszeit und der Rissfortschrittsge-
schwindigkeit eine wichtige Rolle (Hornbogen et al., 2019, S. 273–275):

- **Chemisch:** Der Elektrolyt oder das Medium können den Werkstoff unterschiedlich angreifen und eine Re-Passivierung verhindern oder sogar selbst initiieren.
- **Mechanisch:** Die Beanspruchung und somit die anliegenden Zugspannungen können innerhalb der Magnitude, aber auch des Typs (statisch vs. dynamisch) einen Einfluss haben.
- **Werkstoffherstellung:** Gitterstrukturen mit mehr Fehlstellen durch Kaltverfestigung beeinflussen den Rissfortschritt.



EXKURS

Eine Schwierigkeit bei der Erkennung von Spannungsrisskorrosion ist, dass es wegen fehlender Korrosionsprodukte (z. B. im Vergleich zu Rost bei Eisen) und einer geringen Verformung nur schwer vor dem eigentlichen Versagen zu erkennen ist. Dies führte in der Vergangenheit zu katastrophalen Unfällen. So ist am 9. Mai 1985 in der Schweiz durch chloridhaltige Feuchtigkeit die Betondecke mit austenitischen Ankeraufhängern eines Hallenbades mit mehreren Todesopfern eingestürzt. Am 1. November 2011, ebenfalls in einer Schwimmhalle, stürzten in den Niederlanden durch Spannungsrisskorrosion an einer Edelstahlbefestigung zwei Lautsprecherboxen auf ein Baby und dessen Mutter.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick darüber, welche Kombinationen von Werkstoffen (Metalle und Polymere) und Medien besonders gegenüber Spannungsrisskorrosionen gefährdet sind.

Tabelle 13: Übersicht von gefährdeten Werkstoffen und korrespondierenden Medien

Werkstoffe	Medium
un- & niedriglegierte Stähle	Nitrate und Alkalihydroxide
rost- und säurebeständige austenitische Stähle	Chloride
Aluminium	Chloride (z. B. in Meerwasser)
Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	Ammoniak, Amine, Ammoniumsalze, Schwefeldioxid, Stickoxide, Nitrit, Nitrat, Quecksilbersalze etc.
Goldlegierungen mit Zink- oder Nickelanteilen	
Polyethylen (z. B. Kunststoffdübel)	Alkalität (z. B. in Betonuntergründen)

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Um Abhilfe gegen Spannungsrissskorrosion zu erlangen, muss mindestens eine der drei oben genannten Bedingungen vermieden werden. Die Umgebungsbedingungen und somit das Medium oder der Elektrolyt können selten beeinflusst werden. Luft in Hallenbädern ist chlorhaltig und Ammoniak gelangt bei einigen biologischen Prozessen als Abfallprodukt leicht in die Umgebungsluft. Die mechanischen Belastungen hängen stark vom Einsatz des Bauteils ab und können auch nur selten beeinflusst werden. So bleibt in der Entwicklung lediglich bei der Auswahl des geeigneten Werkstoffes Möglichkeit zur Prävention.

5.4 Reibung und Verschleiß

In der Umgangssprache werden Reibung und Verschleiß gerne gemeinsam verwendet, oder sogar vermischt. Beides sind Teile der Tribologie, also der Wissenschaft von Oberflächen zweier Objekte, die sich in Relativbewegung zueinander befinden. Die Tribologie beschäftigt sich mit:

- a) Reibung (Beschreibung, Berechnung und Messung von Reibung und Reibungskoeffizienten),
- b) Verschleiß (Beschreibung, Wirkung und Auswirkung) und
- c) der erforderlichen Schmierung.

In diesem Lernzyklus wird auf Reibung und Verschleiß genauer eingegangen. Reibung ist dabei die Dissipation oder der Verlust von Energie (Hornbogen et al., 2019, S. 279). Beim Verlust geht die Energie in andere Formen, meist eine Erwärmung, über. Verschleiß hingegen ist der Verlust von Materie zweier aufeinander gleitender Oberflächen.

Reibung

Die Reibung ist eine Kraft zwischen zwei berührenden Objekten in Relativbewegung, die dazu führt, dass ein Teil der kinetischen Energie durch Dissipation in Reibungsenergie (thermische Energie bzw. Wärme) umgewandelt wird (Hornbogen et al., 2019, S. 279–291). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen innerer und äußerer Reibung. Die innere tritt zwischen Teilchen innerhalb eines Mediums (flüssig, zäh oder auch fest) auf. Die äußere Reibung tritt an den Ober- oder Außenflächen zweier berührender Festkörper auf und wird meistens in Haft- und Gleitreibung unterteilt.

Haftreibung ist ein besonderer Fall von Reibung, da er in den meisten Fällen erwünscht ist und er zwischen Objekten auftritt, die nicht in Bewegung sind. Ein Objekt, wie ein Schrank, steht an einem Ort und gleitet nicht weg, da Haftreibung zwischen Schrank und Untergrund herrscht. Dies gilt auch für einen Schrank auf einem schrägen Untergrund, wenn die Haftreibung groß genug ist. Die Haftreibungskraft wirkt immer parallel zur Oberfläche und entgegengesetzt der Parallelkomponente der äußeren Kraft, wie die Erdanziehungskraft. In Ruhe treten dabei weder Verschleiß noch Energieverluste auf. Zum Bewegen eines Objektes aus dem Ruhezustand muss die Haftreibungskraft überwunden werden.

Gleitreibung tritt an der Kontaktflächen zweier Objekte auf, von denen mindestens eines in Bewegung sein muss, d. h., es wird eine relative Bewegung zueinander benötigt. Die Gleitreibungskraft ist meist geringer als die Haftreibungskraft und wirkt entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung. In der Theorie ist die Gleitreibung unabhängig von der Geschwindigkeit, dies wird in den beiden Amontonschen Gesetzen beschrieben.

$$F_R = F_N \cdot \mu$$

Beide Reibungskräfte, egal ob beim Haften oder Gleiten, nehmen linear mit der Normalkraft F_N zu, die zwischen Objekt und Unterlage herrscht. Woher die Normalkraft stammt, ist in diesem Fall egal. Es kann auf dem Eigengewicht und der Erdanziehung basieren, durch eine mechanische Feder oder einen hydraulischen Kolben ausgelöst sein. Das Amontonsche Gesetz beschreibt auch, dass die Reibungskraft unabhängig von der Größe der Kontaktfläche ist. Viel wichtiger ist die Beschaffenheit der Oberfläche, die den Reibungskoeffizienten μ definiert.

Je nach Anwendung gibt es zudem Rollreibung, Wälzreibung, Bohrreibung und Seilreibung, die jedoch hier nicht genauer erläutert werden.

Verschleiß

Verschleiß beschreibt den Materialverlust, verbunden mit einem Masseverlust aus einer Oberfläche eines Objektes durch mechanischen Kontakt und Relativbewegungen zu einem weiteren Objekt. Dieser fortschreitende Oberflächenabtrag kommt durch schleifende, rollende, schlagende, kratzende, chemische und thermische Beanspruchung zustande. Durch diesen Materialverlust kommt eine Veränderung der Geometrie des Bauteils zustande, der auch die Funktion beeinflussen kann. Eine Verringerung des Verschleißes kann somit die Funktion und auch die Lebensdauer von Bauteilen verlängern. Beispiele für stark von Verschleiß betroffene Anwendungen sind Autoreifen, Lager, Kupplungen, Getriebe, Zerspanungswerkzeuge und Bremsen.

Der Verschleiß wird beeinflusst von Werkstoff, Form und Oberfläche der beiden involvierten Körper sowie eines möglichen Zwischenstoffes wie Schmiermittel. Außerdem spielen die mechanische Belastung und die Art der Bewegung eine Rolle. Zuletzt sind noch die Umgebungsbedingungen, wie Atmosphäre, Temperatur, Luftfeuchte etc. zu beachten. Somit kann Verschleiß nicht einem Werkstoff zugewiesen werden, sondern immer nur einem vollständigen System. Es sind vier verschiedene Mechanismen bekannt, die zu Verschleiß führen:

Adhäsiiver Verschleiß

Unter meist trockenen Bedingungen und bei mangelnder Schmierung kommt es beim Berühren der beiden Objekte zu einer hohen Flächenpressung und die Berührungsflächen adhären aneinander (haften aneinander). Bei einer Gleitbewegung werden Materialteilchen meist von der Oberfläche des weicheren Werkstoffes abgelöst und haften am härteren Werkstoff an. Diesen Mechanismus nennt man adhäsiven Verschleiß oder auch Haftverschleiß. Abhilfe hierfür sind Schmierstoffe, die diesen Mechanismus verhindern.

Abrasiver Verschleiß (Abrasion)

Wenn kleine Partikel zwischen die beiden artikulierenden Flächen gelangen, führen diese zu einem Mikrozerspanen, das wie Schleifpapier wirkt. Die Partikel können dabei externe Fremdpartikel oder auch im Schmierstoff gelöste Partikel aus der Gleitpaarung sein. Dieser Mechanismus wird abrasiver Verschleiß (Abrasion) genannt und der dabei entstandene Materialverlust Abrieb. Abhilfe hierfür ist ein regelmäßiger Austausch des Schmierstoffes oder eine Filterung der Partikel. Außerdem können Gleitpaarungen so gewählt werden, dass nur ein Werkstoff Abrieb erzeugt und dieser keine abrasive Wirkung zeigt. Zum Beispiel führt bei Hüftimplantaten aus Metall-Metall-Verbindungen eine **Gleitpaarung** zu metallischen Abriebpartikeln, die abrasiven Verschleiß beschleunigt. Aus diesem Grund werden Keramik-Keramik-Gleitpaarungen bevorzugt, die nahezu keine messbaren Abriebpartikel erzeugen. Alternativ werden einfacher zu implantierende Metall-Polyethylen Gleitpaarungen verwendet, bei denen nur das Polyethylen Abriebpartikel erzeugt, die jedoch keinen abrasiven Verschleiß hervorrufen.

Gleitpaarung

Eine Gleitpaarung beschreibt die beiden Werkstoffkomponenten, die sich gegeneinander bewegen.

Oberflächenzerrüttung

Wechselnde oder **schwellende** mechanische Spannungen führen zu einer Oberflächenzerrüttung mit wachsenden (Mikro-)Rissen von der Oberfläche aus. Durch das ständige Überrollen in Wälzlagern tritt dort häufig eine Oberflächenzerrüttung auf. Abhilfe können das Einbringen von Druckspannungen durch Nitrieren, Oxidieren oder Kugelstrahlen sein.

Wechselnde mechanische Spannung

Wechselnde Spannungen ändern die Richtung der auftretenden Spannung, d. h. sie sind alternierend positiv oder negativ.

Schwellende mechanische Spannung

Schwellende Spannungen ändern die Magnitude der Spannung, nicht jedoch die Richtung.

Tribooxidation (oder Reaktionsschichtverschleiß)

Metalle bilden durch chemische Reaktionen Oxid- oder Passivschichten. Die Zerstörung dieser Schichten auf einem Werkstoff durch eine Bewegung und den Kontakt mit einem anderen Werkstoff wird Tribooxidation (oder Reaktionsschichtverschleiß) genannt. Dieser Mechanismus tritt häufig mit adhäsivem Verschleiß auf. Ein Beispiel hierfür ist Passungsrost auf Eisenwellen im Bereich einer Passung.



ZUSAMMENFASSUNG

Werkstoffe sind im Einsatz verschiedenen Umgebungseinflüssen ausgesetzt. Diese können über die Oberfläche der Bauteile die Werkstoffe angreifen.

Jedes Metall hat die Neigung sich aufzulösen, wenn es in Kontakt mit einem Elektrolyten gerät. Das Metall will dabei Elektronen abgeben und Ionen bilden. Dieser Vorgang wird Oxidation genannt und jedes Metall hat eine unterschiedliche Neigung zur Oxidation. Bei Kontakt zweier Metalle mit unterschiedlicher Neigung ergibt sich in leitender Flüssigkeit ein Elektrodenpotential und es kann zu einer elektrochemischen Korrosion kommen. Am Beispiel von Kupfer und Zink lässt sich dies nachvollziehen. Kupfer ist in diesem Beispiel das edlere Metall mit einer geringeren Neigung, Elektronen abzugeben und dient deswegen als Kathode. Zink ist das unedlere Metall mit einer höheren Neigung, Elektronen

abzugeben und dient daher als Anode. Das unedlere Metall gibt Elektronen ab und löst sich auf (Oxidation), das edlere Metall gewinnt Elektronen und kann somit weiteres Metall abscheiden (Reduktion).

Es gibt spezielle Paarungen von Metallen und chemischen Umgebungen, die für Spannungsrissskorrosion gefährdet sind, wenn zusätzlich noch eine mechanische Spannung anliegt. In der Praxis handelt es sich dabei um Metalle, wie rostfreie Stähle, Aluminium oder auch Kupfer-Zink-Legierungen (Messing), die eine Oxid- oder Passivschicht bilden. Durch die chemische Umgebung wird jedoch verhindert, dass bei einer Beschädigung der Passivschicht durch die anliegende Spannung Sauerstoff in der Umgebung eine Repassivierung initiiert. Stattdessen kommt es an dieser Stelle ohne die Passivschicht zu einer lokalen Korrosion, die auch Tunnel genannt wird. Hier kann ein Anriss entstehen, der sich ausbreitet und zu einem Bruch der Probe führt. Spannungsrissskorrosionen sind schwer zu detektieren, da es keine offensichtlichen Anzeichen gibt.

Tribologie ist die Wissenschaft, die sich mit Reibung und Verschleiß beschäftigt. Reibung ist dabei die Dissipation, oder der Verlust von Energie, die meist in Form von Wärme abgegeben wird. Hier unterscheidet man zwischen der meist gewünschten Haftreibung bei ruhenden Objekten und der oftmals unerwünschten Gleitreibung bei Objekten mit Relativbewegung zueinander. Verschleiß hingegen ist der Verlust von Materie zweier aufeinander gleitender Oberflächen, d. h. Abrieb von Partikeln. Die wichtigsten Verschleißformen sind dabei der adhäsive Verschleiß durch ein Anhaften aufgrund von fehlender oder zu weniger Schmierung und der abrasive Verschleiß durch (Abrieb-)Partikel in der Gleitfläche.

LEKTION 6

INGENIEURTECHNISCHE NUTZUNG DER WERKSTOFFE

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- die Anforderungen und Eigenschaften zur Werkstoffauswahl identifizieren zu können.
- Werkstoffe anhand ihrer Eigenschaften und der Anforderungen auszuwählen.
- die gängigsten Prüfmethoden zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften zu kennen.
- die Nomenklatur und Kennzeichnung der Werkstoffe anwenden zu können.
- den Produktlebenszyklus von Rohstoff bis Recycling und Verschrottung zu verstehen.

6. INGENIEURTECHNISCHE NUTZUNG DER WERKSTOFFE

Aus der Praxis

Bei der Entwicklung eines Beatmungsgerätes werden unterschiedliche Werkstoffe für die einzelnen Komponenten benötigt. Hierzu hat jede Komponente eine spezielle Funktion, die eine Anforderung an den Werkstoff mit sich bringt und dessen Eigenschaften erfüllt werden müssen. Vor der finalen Werkstoffauswahl und Konstruktion der Einzelkomponenten ergeben sich noch folgende Fragen:

- Ist Werkstoff gleich Werkstoff oder kann dieser durch unterschiedliche Herstellungsarten andere Eigenschaften entwickeln?
- Wie kann man sicherstellen, dass der Werkstoff auch das liefert, was er verspricht?
- Wie geht man bei der finalen Werkstoffauswahl vor?
- Das Thema Nachhaltigkeit und Recycling ist für die Entwicklung ein wichtiger Faktor. Was passiert mit dem Beatmungsgerät am Ende des Produktlebenszyklus?

6.1 Einfluss der Herstellung auf die Werkstoffeigenschaften

Jeder Werkstoff existiert in vielen verschiedenen Variationen und Formen von einem Rohstoff in der Natur bis hin zum fertigen Bauteil. Dieser gesamte Prozess wird Herstellung genannt und ist in viele Einzelschritte unterteilt. Während der Einzelschritte spricht man von einem Halbzeug – der Werkstoff ist „auf halbem Wege“ zur finalen Form (Hornbogen et al., 2019, S. 450). Da sich die Struktur dabei deutlich ändern kann, stellt sich also die Frage, welchen Einfluss die einzelnen Schritte des Herstellungsprozesses vom Rohstoff zur finalen Geometrie auf die Werkstoffeigenschaften haben können. Im Folgenden werden einzelne Herstellungsprozesse von Werkstoffen genauer betrachtet.

Urformen

Fertigungsverfahren, die aus einem formlosen Stoff einen festen Körper herstellen, werden unter dem Begriff **Urformen** zusammengefasst. Sehr häufig wird dieses Verfahren genutzt, um aus einer Schmelze einen ersten Formkörper/ein erstes Halbzeug herzustellen. Dieses Verfahren wird **Gießen** genannt. Weitere Formen des Urformens sind z. B. Sintern, Aufdampfen und galvanisches Formen – dabei wird keine Schmelze, sondern Pulver, Gas oder in Flüssigkeit gelöstes Material verwendet (Hornbogen et al., 2019, S. 452).

Urformen

Unter diesem Begriff versteht man einen Herstellungsprozess, bei dem Werkstoffe aus einer Schmelze in eine feste Form gebracht werden.

Metalle, wie Eisen und seine Legierungen, treten beim Abkühlen in verschiedenen Phasen auf und diese haben einen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Dies muss somit beim Erstellen von metallischen Gussteilen beachtet werden. Die Abkühlge-

schwindigkeit ähnlich wie bei Wärmebehandlungen hat einen Einfluss auf die Struktur und die vorhandenen Gitterfehler wie Versetzungen, Ausscheidungen etc. Polymere besitzen zwar keine unterschiedlichen Phasen wie Metalle, aber auch hier spielt die Geschwindigkeit der Abkühlung eine wichtige Rolle, da sich hier die Molekülketten unterschiedlich zusammenknäueln können. Dies hat auch hier eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Bei beiden Werkstoffgruppen kommt es zu einer Volumenänderung beim Abkühlen, was zu inneren Spannungen führen kann. Unterschiedliche Volumina der Bauteile können auch zu einem Verzug und Verformungen beim Abkühlen führen. Im Guss gefertigte Bauteile müssen deswegen oft durch verschiedene Verfahren nachbehandelt werden (Hornbogen et al., 2019, S. 457).

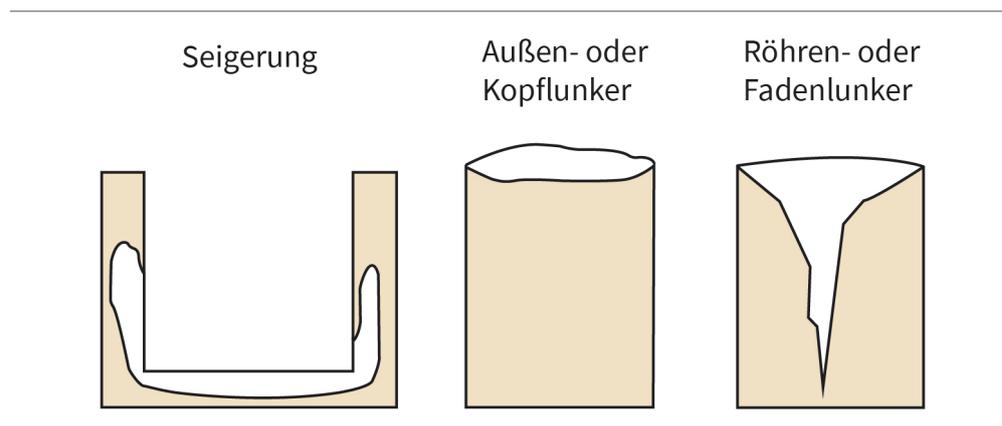
Gießen

Ein wichtiger Herstellungsprozess des Urformens ist das Gießen, bei dem ein Werkstoff in Schmelze in eine Form gegossen wird, um dort abzukühlen.

Typische Defekte beim Gießen sind (Bargel & Schulze, 2018, S. 87–90):

- Seigerung: ungleichmäßige Konzentration des Werkstoffes beim Erstarren;
- Lunker: Poren oder „Löcher“ durch Volumenänderung beim Abkühlen;
- Spannungen beim Schrumpfen/Abkühlen mit Verzug und Formänderung;
- Kaltschweißen: Schmelzströme treffen aufeinander, aber verschmelzen nicht sowie
- Sandstellen: bei Sandguss wird Sand in die Schmelze mitgerissen.

Abbildung 38: Gießdefekte



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Umformen

Eine Formänderung eines Werkstoffes ohne Materialabtrag, d. h. von einem festen in einen festen Zustand wird **Umformen** genannt. Es wird durch den Umformgrad, die Umformtemperatur und die Umformgeschwindigkeit bestimmt (Bargel & Schulze, 2018, S. 90). Umformen wird hauptsächlich bei Metallen angewendet und kann zu einer Veränderung der Gitterstruktur und der Gitterbaufehler führen. Man unterscheidet zwischen Warmumformen und Kaltumformen.

Umformen

Ein Herstellungsprozess, bei dem ein Werkstoff von einer festen Form in eine andere feste Form umgeformt wird, ohne dabei Material abzutragen, wird Umformen genannt.

Beim Warmumformen, d. h. über der Rekristallisationstemperatur, hat der Werkstoff durch die erhöhte Temperatur genug Energie, um durch Diffusion auszuheilen (Bargel & Schulze, 2018, S. 36–37). Diese liegt meist zwischen 40 und 60 Prozent der Schmelztemperatur. Zum Warmumformen zählt das Schmieden und Walzen. Beim Kaltumformen tritt durch

Kaltverfestigung immer eine Verfestigung des Werkstoffes auf, die Versetzungsdichte nimmt dabei deutlich zu (Hornbogen et al., 2019, S. 465). Beispiele hierfür sind das Pressen, Prägen und Tiefziehen.

Weitere Einflussfaktoren

Fügen

Schweißen ist bei Metallen neben Löten ein beliebtes Füge-Verfahren um zwei Bauteile miteinander zu verbinden. Beim Schweißen werden die Grenzflächen beider Bauteile aufgeschmolzen, sodass sie dauerhaft verbunden werden (Bargel & Schulze, 2018, S. 97–98; Schiebold, 2021, S. 5–10). Durch das Einbringen von Hitze kann es aber auch zur Veränderung der Gefüge in den angrenzenden Bereichen kommen, welche auch die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Außerdem können somit auch Eigenspannungen in das Bauteil eingebracht werden und auch geometrische Veränderungen hervorgerufen werden (Bargel & Schulze, 2018, S. 98). Beim Löten werden die zu verbindenden Werkstoffe nicht aufgeschmolzen, hier wird nur ein Zusatzmetall (Lot) aufgeschmolzen, um die beiden Werkstoffe zu benetzen (Bargel & Schulze, 2018, S. 104–105).

Trennen und spanende Bearbeitung

Spanende Bearbeitung
Ein Abtragen von Material durch Spanbildung wird spanende Bearbeitung (oder Fertigung) genannt.

Bei der **spanenden Bearbeitung** wird Material in Form von Spänen vom Werkstoff abgetragen, um die Geometrie zu verändern. Die wichtigsten Bearbeitungsformen hierzu sind das Trennen, Fräsen, Drehen, Schleifen und Polieren. Diese Herstellungsschritte kommen hauptsächlich bei Polymeren und Metallen vor, hierbei wird ein Werkzeug aus einem härteren Werkstoff als der zu bearbeitende Werkstoff benutzt. Der Prozess ist dem abrasiven Verschleiß ähnlich. Zudem entsteht durch die Reibung eine große Hitze, die meist durch Kühlmedien abgetragen wird.

Generell sind sämtliche Herstell- und Bearbeitungsschritte unter der Prämisse von Veränderungen der (mechanischen) Eigenschaften zu bewerten. Prozesse, die Wärme erzeugen oder einbringen, können zu einer Beeinflussung führen. Bei Metallen kann es zu Gefüge- oder Strukturänderungen kommen. Bei Polymeren sind molekulare Änderungen in den Knäueln möglich. Auch Keramiken mit einer sehr hohen Schmelztemperatur sind beeinflussbar.

Laser-Signierung zählt zwar nicht zur spanenden Bearbeitung, aber bei der Aufbringung der Typenbezeichnung auf einem Bauteil kann es zu Komplikationen kommen. Die eingebrachte Energie kann zu Veränderungen der Struktur im Werkstoff führen. Auch auf der Oberfläche der Passivschicht sind Verletzungen möglich.

Herstellung von Probekörpern

Um Werkstoffeigenschaften experimentell zu ermitteln, werden in der Regel Proben angefertigt, die eine spezifische Geometrie für den Versuch haben (Hornbogen et al., 2019, S. 449). Der spätere Einsatz des Werkstoffes ist jedoch nicht in der Geometrie der Probe, sondern in einer anderen Geometrie. Es stellt sich also die Frage, ob der Herstellungsprozess der Probe vom Rohstoff zur finalen Geometrie vergleichbar zum Herstellungsprozess

des gewünschten Bauteils ist. Genauer gesagt: Werden die Werkstoffeigenschaften bei Erstellung der Probe und Erstellung des finalen Bauteils verändert, sodass die angegebenen Eigenschaften des Rohstoffes nicht mehr von der Probe auf das Bauteil übertragbar sind? Aus diesem Grund muss eine Probenerstellung möglichst identisch zum finalen Bauteil sein.

Logistik

In der Praxis gibt es zumeist mehrere Prozesse hintereinander, die auch oft bei diversen Anbietenden an unterschiedlichen Orten durchgeführt werden. Bei jedem der Herstellungsschritte kann der Werkstoff so verändert werden, dass sich Zusammensetzung, Struktur und auch die Werkstoffeigenschaften ändern können. Bei einigen Werkstoffen müssen aber auch die Zwischenschritte wie der Transport oder die zwischenzeitliche Lagerung berücksichtigt werden.

Insbesondere Polymere zeigen hier eine größere Anfälligkeit im Vergleich zu Metallen und Keramiken, da hier UV-Strahlung durch die Sonne, Eindiffusion von Wasser aus der Umgebungsluft oder eine Erwärmung während des Transports unter der Eigenlast zum Kriechen führen kann.

6.2 Prüfung, Normung und Bezeichnung

Um Werkstoffe und Bauteile eindeutig identifizieren und charakterisieren zu können, benötigen diese eine eindeutige Bezeichnung und die Eigenschaften müssen in normierten Versuchen ermittelt werden.

Werkstoffprüfung

Eine erste Unterteilung der verfügbaren Prüfverfahren ist in zerstörende und zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen vorzunehmen (Bargel & Schulze, 2018, S. 117–172). An fertigen Bauteilen, die zum Einsatz kommen, kann nur zerstörungsfrei geprüft werden. Bei zerstörenden Analysen muss an Werkstoffproben getestet werden, die möglichst ähnlich zu den finalen Bauteilen sind, um keine Herstellereinflüsse zu vernachlässigen. Alternativ müssen Serienteile für zerstörende Prüfungen geopfert werden.

Viele Analysemethoden sind komplex und es gibt diverse Varianten, Einstellmöglichkeiten und Randbedingungen. Ein standardisiertes Vorgehen nach normierten Tests ist dabei essenziell, damit die Ergebnisse später vergleichbar sind. Normen geben dabei ein Vorgehen und Einstellmöglichkeiten der zu verwendenden Apparaturen vor.

Prüfung von Materialzusammensetzung und -struktur

Eine zerstörerische Form, die Struktur und die Gefüge von Metallen zu untersuchen, ist die Metallografie (Bargel & Schulze, 2018, S. 167–170). Dazu wird ein metallischer Werkstoff oder ein Bauteil so präpariert (einbetten, Oberfläche schleifen, polieren und anätzen), dass am Mikroskop das Gefüge und die Korngrenzen sichtbar sind. Unter dem Mikroskop

kann dann der Wärmebehandlungszustand untersucht werden, sowie die Korngrößen und Porosität bestimmt werden. Da hier keine Normierung der Bewertung möglich ist, erfordert diese Prüfung viel Erfahrung.

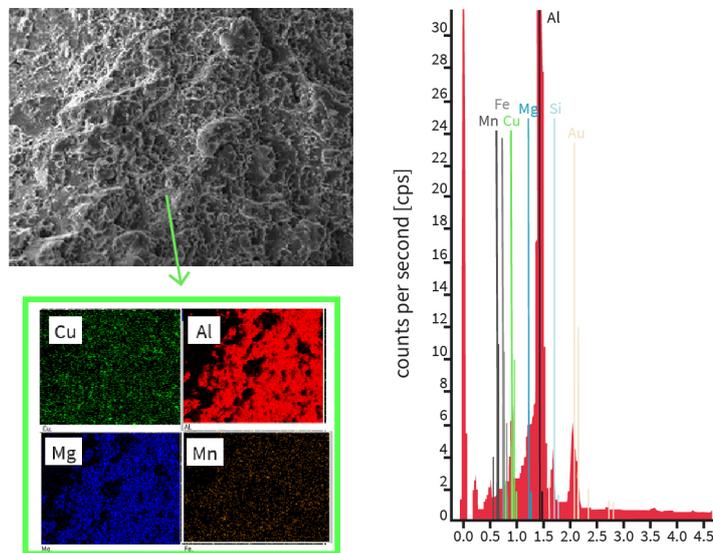
Ein akustisches und zerstörungsfreies Verfahren zum Auffinden von Materialfehlern an Bauteilen im eingebauten Zustand ist die Ultraschallprüfung. Sie basiert auf Schallwellen und deren unterschiedlicher Ausbreitung, Reflexion oder Ablenkung in Medien und an Grenzflächen. Zu den Anwendungsbereichen gehören die Detektion von Poren und Rissen, die Schweißnahtprüfung, Waddickenmessung, Blechprüfung und Reinheitsgradprüfung.

Es gibt diverse spektroskopische Analysen, wie die Funkenspektrometrie, die Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR) am Rasterelektronenmikroskop, die Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) oder die am weitesten verbreitete Methode, die **Röntgenfluoreszenzanalyse** (RFA) (Bargel & Schulze, 2018, S. 171–172). Die Proben werden bei der RFA nicht zerstört und es können Metalle, Glas, Keramik und Baustoffe untersucht werden. Die RFA ist sehr genau und die Nachweisgrenze liegt bei einem Mikrogramm pro Gramm (ppm). Die Probe wird mit Strahlen angeregt, die freiwerdende Energie wird in Form von Fluoreszenzstrahlung wieder abgegeben. Durch die Identifizierung dieser Strahlung können Aussagen über die Zusammensetzung des Werkstoffes getroffen sowie z. B. Schweißnähte nach DIN EN ISO 10675–1 überprüft werden. Folgende Abbildung zeigt die Oberfläche einer Aluminiumlegierung in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit qualitativer Analyse der Bestandteile mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX).

Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Röntgenfluoreszenzanalyse ist eine weit verbreitete spektroskopische Analyse, die die Bestandteile und Zusammensetzung von Werkstoffen untersucht.

Abbildung 39: Rasterelektronenmikroskop mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie



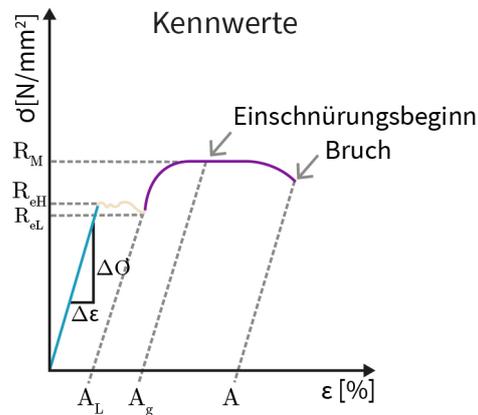
Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Mechanische Prüfungen: Zugversuch

Einer der wichtigsten Versuche zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften ist der Zugversuch, da viele Kennwerte dadurch ermittelt werden (Bargel & Schulze 2001, S. 117–148). Es werden standardisierte Proben bis zum Bruch mit einer gleichmäßigen niedrigen Geschwindigkeit gedehnt, deswegen gilt der Versuch als quasistatisch. Aus Kraft und Querschnitt der Probe wird die Spannung und aus der Verformung und der Gesamtlänge der Probe die Dehnung ermittelt. Man muss zwischen einer physikalischen und einer technischen Versuchsdurchführung unterscheiden. In der technischen Versuchsdurchführung wird mit dem konstanten Ursprungsquerschnitt der Probe gerechnet. Da sich der Querschnitt der Probe während des Versuchs jedoch ändert, verändert sich dadurch auch kontinuierlich die Spannung. Durch die Einschnürung der Probe vor dem Bruch wird der Querschnitt deutlich kleiner, die Spannung würde also bei gleicher Kraft steigen. Da dieser Effekt der Reduzierung des Querschnitts nicht berücksichtigt wird, fällt die Spannung jedoch. Die physikalische Versuchsdurchführung ist deutlich komplexer, da zu jedem Zeitpunkt des Versuches neben der Kraft und der Dehnung auch der tatsächliche Querschnitt gemessen werden muss. In vielen Anwendungen wird deswegen die technische Versuchsdurchführung gewählt (Hornbogen et al., 2019, S. 168). Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt zu Beginn die elastische, im weiteren Verlauf die plastische Verformung der Probe. Die einzelnen Phasen können bei gewissen Werkstoffen sehr ausgeprägt, aber auch nahezu nicht sichtbar sein. Folgende Werkstoffkennwerte können je nach Werkstoff aus dem Zugversuch ermittelt werden:

- E : Elastizitätsmodul (E-Modul) – Steigung der Kurve im anfänglichen elastischen Bereich;
- Elastizitätsgrenze – bis zu dieser Spannung verhält sich der Werkstoff elastisch:
 - R_{eL} : untere Streckgrenze – niedrigste Spannung nach Ende der Elastizität, Fließen des Werkstoffes;
 - R_{eH} : obere Streckgrenze – max. Spannung ohne plastische Verformung;
 - R_p : Dehngrenze – $R_{p0,2}$ bei Dehnung von 0,2 Prozent, falls obere und untere Streckgrenze nicht ausgeprägt sind (Rechenwert);
- R_m : Zugfestigkeit – maximale Spannung, hier beginnt der Bruch der Probe durch die Einschnürung;
- A_L : Lüdersdehnung – Übergang von Fließen zur Verfestigung;
- A_g : Gleichmaßdehnung – Dehnung bei der höchsten Spannung, Übergang von Verfestigung zur Einschnürung sowie
- A : Bruchdehnung – maximale Dehnung der Zugprobe.

Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Kennwerten

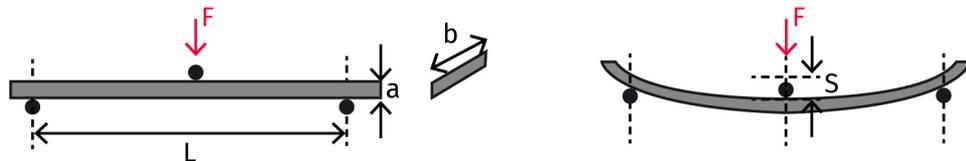


Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Mechanische Prüfungen: Biegeversuch

Der Biegeversuch kann über den 2-Punkt-Biegeversuch, 3-Punkt-Biegeversuch oder 4-Punkt-Biegeversuch durchgeführt werden. Beim 3-Punkt-Biegeversuch liegt die Probe mit der Wanddicke a und der Breite b auf zwei Auflagern mit dem Abstand L . In der Mitte erzeugt eine definierte Kraft F eine Durchbiegung s . Folgende Abbildung zeigt den schematischen Ablauf. Der Biegemodul E_B [kN/mm^2] kann mit der wirkenden Kraft F [kN], dem Abstand der Auflagern L [mm], der Probendicke a [mm], der Probenbreite b [mm] und der Durchbiegung s [mm] wie folgt berechnet werden.

Abbildung 41: 3-Punkt-Biegeversuch



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

$$\text{Biegemodul } E_B = \frac{L^3 \cdot F}{4b \cdot a \cdot s}$$

Es gibt zur Beschreibung der Tests allgemeine Prüfnormen für die Werkstoffe, aber auch für spezifische Bauteile speziell abgeleitete Tests.

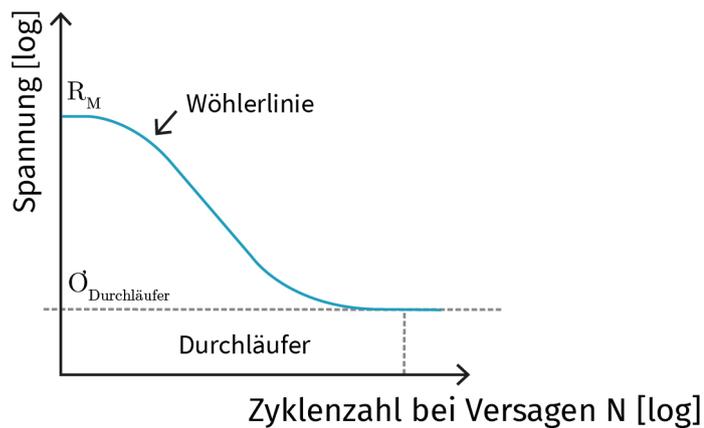
Mechanische Prüfungen: Härteprüfung

Bei der bedingt zerstörungsfreien Härteprüfung wird die Eindringhärte, d. h. die Eindringtiefe eines genormten Prüfkörpers in die Werkstoffprobe bei einer definierten Belastung (statisch oder dynamisch) gemessen. Es gibt dabei unterschiedliche Verfahren und Messmöglichkeiten – die Brinell-Härte (HB), die Vickers-Härte (HV) oder die Rockwell-Härte (HRC).

Mechanische Prüfungen: Dauerschwingversuch oder Wöhlerversuch

Während die meisten Prüfungen quasistatisch sind, wird beim Dauerschwingversuch die Schwingfestigkeit eines Werkstoffes oder Bauteils untersucht. Mehrere Tests mit unterschiedlichen Lastniveaus werden dann in einer Wöhlerkurve zusammengetragen, die dann eine Aussage zur Dauerfestigkeit und Betriebsfestigkeit gibt. Bei diesem Versuch werden normierte Probekörper zyklisch belastet. In der Regel findet dies in einem Zugversuch statt, es kann aber auch unter einer Druck-, Biege- oder Torsionskraft geschehen. Die Probekörper werden unter verschiedenen Lastniveaus bis zum Versagen (oftmals Bruch) getestet, falls in einer definierten Zeit kein Versagen eintritt, wird diese Probe ein Durchläufer genannt. Die Spannung bei diesem Durchläufer wird Dauerfestigkeit genannt.

Abbildung 42: Wöhlerkurve



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Prüfungen hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, die jedoch hier nicht genauer beschrieben werden, sind der Ausziehversuch, Berstversuch, Faltversuch von Blechen, Blaubruchversuch, Scherversuch, Druckversuch, Kerbschlagbiegeversuch und der Torsionsversuch.

Weitere physikalische und chemische Prüfungen

Zur Charakterisierung der thermischen und thermomechanischen Eigenschaften von Thermoplasten gibt es drei Verfahren:

- **Thermo-Gravimetrie-Analyse (TGA) nach DIN EN ISO 11358:** Beobachtung der Massenänderung bei konstanter Heizrate;
- **die Differential Scanning Calorimetry (DSC):** Messung der Wärme im Vergleich zur Normprobe während des Aufheizens sowie
- **Dynamisch Mechanische Analyse (DMA):** Messung des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit zur Temperatur (zyklische Belastung und Temperaturerhöhung)

Zur Bestimmung der Tribologischen Eigenschaften, in Bezug auf die Reibung und den Verschleiß gibt es unterschiedliche Tests.

Pin-on-Disk-Versuch

Mit einem Tribometer kann in einem Pin-on-Disk-Versuch das Reibungs- und Verschleißverhalten von Werkstoffgleitpaarungen untersucht werden. Ein Pin (Stift) wird dabei mit definierter Kraft auf eine Scheibe (Disk) mit einer Kreisbahn bewegt.

Korrosionstests

Die Gruppe von Tests, die unter verschiedenen Bedingungen eine korrosive Umgebung schaffen und somit das Korrosionsverhalten von Werkstoffen untersucht, wird Korrosionstests genannt.

Pin-on-Disk-Versuche in einem Tribometer ermitteln den Verschleiß zwischen einer Werkstoffpaarung (Bauer, 2021, S. 175–180). Es können dazu verschiedene Profile abgefahren werden, um dann nach einer definierten Anzahl von Zyklen den gravimetrischen Verschleiß (Abnahme des Gewichtes) zu messen und den Reibwert zu ermitteln.

In Umweltsimulationen können **Korrosionstests** für Metall- und Elektronikprodukte mit diversen Medien (Luftfeuchte, hohe Temperatur, Salzwasser, Säuren, UV-Licht) untersucht werden. Die DIN EN ISO 4892–2 „Künstliches Bestrahlen oder Bewittern von Kunststoffen“ untersucht dies bei Polymeren.

Bezeichnung von Werkstoffen

Zur Konstruktion von Bauteilen und Auswahl der geeigneten Werkstoffe ist eine eindeutige Bezeichnung der Werkstoffe nötig. Einige Eigennamen von Herstellenden (wie Teflon oder Nirosta) haben sich zwar etabliert, sie erschweren einen Vergleich und die Auswahl der Werkstoffe jedoch enorm. Deshalb wurden Normen eingeführt, um die Werkstoffe nach Gruppen einzuteilen. Hierzu muss man jedoch nach Ländern und Regionen unterscheiden, da Verbände oft eigene Normen und Kennzeichnungen erstellt haben.

Bezeichnung von Stahl nach Kurznamen – DIN EN 10027–1

Bei Stählen beschreibt die Bezeichnung mit Kurznamen die Art des Stahls mit einem mechanischen Kennwert und einer zusätzlichen Eigenschaft. Ein Beispiel hierfür wäre S235JR mit dem Einsatzgebiet: Stahl für Stahlbau, Mindest-Streckgrenze: 235 N/mm² und Kerbschlagzähigkeit: 27 J (bei 20 °C). Es gibt weitere Zusatzsymbole, die anstelle der Kerbschlagzähigkeit verwendet werden können.

Tabelle 14: Bezeichnung von Stählen nach DIN EN 10027-1

Art des Stahls	Kennzeichnung	Eigenschaft	Gütegruppe
Stahlbau	S	Mindeststreckgrenze Re [N/mm ²]	Kerbschlagzähigkeit in Joule z. B. bei 20 °C JR = 27 J KR = 40 J LR = 60 J
Druckbehälterbau	P		
Rohrleitungen	L		
Maschinenbau	E		
Betonstahl	B		
Schienenstähle	R		

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Unlegierte Stähle werden mit C und einer Zahl für den Kohlenstoffgehalt gekennzeichnet (Faktor 100), ein Beispiel hierfür ist C15, ein unlegierter Stahl mit 0,15 Prozent Kohlenstoffgehalt.

Legierte Stähle verwenden keinen Buchstaben, sondern beginnen mit dem Kohlenstoffgehalt mit dem Faktor 100, darauf folgen die weiteren Elemente (Hornbogen et al., 2019, S. 528). Das erste Element wird auf die erste Zahl bezogen, das zweite auf die zweite Zahl. Es gibt dabei Multiplikatoren, um die zugehörige Größenordnung zu erhalten (Hornbogen et al., 2019, S. 528). Elemente, deren Werte innerhalb der Norm liegen, werden zuletzt und ohne Mengenzahl genannt:

- Faktor 4: Chrom, Cobalt, Magnesium, Nickel, Silizium und Wolfram;
- Faktor 10: u. a. Aluminium, Beryllium, Kupfer und Molybdän sowie
- Faktor 100: Bohr.

Der niedrig legierte Stahl „25CrMo4“ besitzt somit $25/100 = 0,25$ Prozent Kohlenstoff, Chrom mit einem Anteil $4/4 = 1$ Prozent und Molybdän nach Norm (Weißbach et al., 2018).

Hochlegierte Stähle (Legierungselement > 5 Prozent) werden mit einem X gekennzeichnet, gefolgt von Kohlenstoff (mit Faktor 100) und den weiteren Legierungselementen mit dem Multiplizierungsfaktor 1 (Hornbogen et al., 2019, S. 528). Der hochlegierte Stahl „X6CrNiMo18-9“ besitzt somit Kohlenstoff, mit $6/100 = 0,06$ Prozent C, Chrom mit 18 Prozent Cr, Nickel mit 9 Prozent und Molybdän nach Norm (Weißbach et al., 2018, S. 577).

Bezeichnung nach Nummernsystem – DIN EN 10027-2

Das Nummernsystem vergibt jeder Sorte eine eindeutige Nummer, beginnend mit der Werkstoffhauptgruppennummer, gefolgt von der zweistelligen Gruppennummer und einer fortlaufenden Zählnummer. Bei Stählen wird die Gruppennummer nach weiteren Merkmalen untergliedert (unlegiert, legiert, Grundstahl, Edelstahl). Folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Werkstoffhauptgruppen und deren Bezeichnungen. Ein Beispiel für die Werkstoffnummer ist 1.0037 => Kurzname: S235JR.

Tabelle 15: Übersicht über die Werkstoffhauptgruppen und Nummern nach DIN EN 10027-2

Gruppe	Nummer
Roheisen, Ferrolegierungen, Gusseisen	0
Stahl, Stahlguss	1
Schwermetalle außer Fe (Eisen)	2
Leichtmetalle	3
nichtmetallische Werkstoffe	4-8

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Bezeichnung von Nichteisenmetallen nach anderen Normen

Für spezielle Nichteisenmetalle und Legierungen gibt es zusätzlich zur oben erwähnten DIN EN 10027-2 eigene Normen zur Bezeichnung und Unterscheidung. Diese inkludieren meistens die chemische Zusammensetzung und den Reinheitsgrad oder ein anderes zusätzliches Kriterium. Bezeichnungen für einen identischen Werkstoff, wie Aluminium können regional unterschiedlich sein. Der meistverwendete Titan-Werkstoff, die Legierung 3.7165, bestehend aus Titan, 6 Massenprozent Aluminium und 4 Prozent Vanadium, wird in Deutschland gelegentlich TiAl6V4, in Nordamerika jedoch Ti6Al4V oder Grade 5 genannt.

Tabelle 16: Bezeichnungen für 99,5 Prozent reines Aluminium nach verschiedenen Normen und Vereinigungen

Vereinigung/Norm	Bezeichnung
DIN (Deutschland)	3.0255
EN (Europa)	EN AW-1050A
ISO (International)	Al99,5
AA (USA: Aluminum Association)	AA1050A

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Bezeichnung von Keramiken (DIN EN 60 672 und DIN ENV 14 232)

Keramiken werden oft im Gebrauch durch ihre chemischen Inhaltsstoffe gekennzeichnet, wie Al_2O_3 , SiO_2 oder TiO_2 . Diese sagen aber nichts über Reinheit und Herstellung aus. Zur Klassifizierung und Kennzeichnung von technischen Keramiken gibt es deswegen mehrere Normen. In der DIN EN 60 672 werden die technischen Keramiken klassifiziert und ihnen werden Kürzel, wie C799, vergeben. Die europäische Norm DIN EN 14 232 gibt in einer formelhaften Kurzbezeichnung auch Angaben zur Herstellung.

Tabelle 17: Keramikgruppen und deren Bezeichnung nach DIN EN 60 672* und DIN EN 14 232**

Typ	Gruppe	Kennzeichnung
Silikatkeramik	Alkali-Aluminiumsilikate (z. B. Porzellane)	C 100 (C 101 ... C 199)*
	Magnesiumsilikate (z. B. Steatite)	C 200*
Oxidkeramik	hohe Permittivität (z. B. Titanate)	C 300*
	aluminiumoxidhaltige Keramiken • Aluminiumoxid Al ₂ O ₃	C 700* • RBAO**
	andere Oxidkeramiken • Titanoxid	C 800* • TiO ₂ **
Nichtoxidkeramik	Carbide • Siliciumcarbid • Rekristallisiertes Siliciumcarbid • Borcarbid (B ₄ C)	SiC** RSiC** BC**
	Nitride und nichtoxide Keramiken • Aluminiumnitrid • Siliciumnitrid	C 900* C 910* oder ALN** C 930* oder SN**

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

Bezeichnung von Kunststoffen und Polymeren (ISO 1043–1, 1629 und 18064)

Die in diesem Skript verwendeten Bezeichnungen für Polymere, wie PE für Polyethylen, PS für Polystyrol und PVC für Polyvinylchlorid basieren bereits auf den gängigen Normen zur Kennzeichnung von Polymeren.

Verbundwerkstoffe werden zumeist nach ihrer Matrix eingeteilt und besitzen keine allgemeine Kennzeichnungsnorm. Verbundwerkstoffe, die als Matrix z. B. ein Polymer besitzen, werden nach den Polymeren eingeteilt und zusätzlich mit „faserverstärkt“ oder mit GMT für „Glas-(Faser-)Mattenverstärkte“ Thermoplaste gekennzeichnet. So handelt es sich bei PP-GMT um den glasmattenverstärkten Thermoplasten Polypropylen (Weißbach et al., 2018, S. 410).

6.3 Werkstoffauswahl

Die Auswahl eines passenden Werkstoffes in der Entwicklung eines Produktes ist ein wichtiger und komplexer Prozess. In der Praxis sind oft schon Werkstoffgruppen (Metall, Keramik, Polymer) vorgegeben. Wenn dies nicht der Fall ist, sollten alle Gruppen in die Auswahlmöglichkeit einbezogen werden. In den seltensten Fällen werden Produkte komplett neu, ohne Vorgänger- oder Konkurrenzprodukte, entwickelt. Anstatt einer Werkstoffneueinführung geschieht somit zumeist eine **Werkstoffsubstitution** (Austausch des vorherigen Werkstoffes) oder es wird eine Werkstoffalternative gesucht, mithilfe derer negative Eigenschaften eines Werkstoffes durch einen anderen Werkstoff wegfallen. In anderen Fällen kommt es auch zu einer externen Werkstoffvorgabe, da hier etwas regulatorisch, gesetzlich oder durch den Kund:innen gefordert wird.

Werkstoffsubstitution
Der Austausch eines Werkstoffes in einem bestehenden Bauteil wird Werkstoffsubstitution genannt.

Bei der Konstruktion eines Bauteils kann die Umsetzung durch die Werkstoffauswahl oder eine Geometrieänderung des Bauteils erfolgen (Weißbach et al., 2018, S. 491–492). Diese beiden Faktoren hängen dabei zusammen, da Bauteile z. B. kleiner gestaltet werden können, wenn der Werkstoff bessere mechanische Eigenschaften aufweist, was wiederum zu niedrigerem Gewicht und kompakteren Bauformen führen kann.

Anforderungslisten

Zur Werkstoffauswahl wird gemäß den Anforderungen sowie den Beanspruchungen an das Bauteil und den Werkstoff ein Anforderungsprofil erstellt. Dies geschieht über Anforderungslisten, in denen die Beanspruchungen, wie (Weißbach et al., 2018, S. 489–491)

- mechanische Beanspruchung (z. B. statische, dynamische, wechselnde, schwellende oder stoßförmige Belastung),
- Medienbelastung (z. B. Luftfeuchte, Elektrolyt, Körperflüssigkeiten, Chemikalien in Umgebung),
- Verschleißbeanspruchung (z. B. Relativbewegungen oder Kontaktflächen) oder
- thermische Beanspruchung (z. B. hohe Einsatztemperatur oder freiwerdende Abwärme)

abgefragt werden.

In der Regel werden diese Anforderungen priorisiert, da nicht alle erfüllbar sind, bzw. Anforderungen auch im Gegensatz zueinanderstehen können. So können Werkstoffe mit guter elektrischer Leitfähigkeit wie Silber und Kupfer keine gute thermische Isolierung aufweisen. Viele leichte Werkstoffe wie Aluminium haben oft eine geringe Festigkeit, hingegen sind Stähle mit guter Festigkeit durch ein höheres Gewicht gekennzeichnet. Zudem müssen Anforderungen an einzelne Bauteilkomponenten auf Wechselwirkungen miteinander abgeglichen werden. Wechselwirkung bedeutet hierbei, dass sich z. B. eine elektrische oder magnetische Wirkung ohne Isolierung auch auf eine andere Komponente ausbreiten kann.

Vergleich Anforderung und Eigenschaft eines Werkstoffes

Nach Erstellung eines Anforderungsprofils und einer Anforderungsliste müssen Werkstoffe mit ihren Eigenschaftsprofilen gegenübergestellt werden. Neben Gebrauchseigenschaften sind die wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Eigenschaften zu betrachten. Die Auswahl kann quantitativ über Berechnungen erfolgen, wenn Kennwerte oder Kennzahlen für die Anforderungen bestehen (Weißbach et al., 2018, S. 492). Für gewisse Anforderungen gibt es Überschlagswerte mit einfachen Faktoren, man kann jedoch auch komplexe Simulationen am Computer mit z. B. Finite-Elemente-Methoden durchführen. Für Anforderungen ohne direkte Kennzahlen, wie die optischen Eigenschaften, ist eine qualitative Umsetzung möglich.

Die Steifigkeit eines Werkstoffes, d. h., die Verformung bei Belastung kann durch Belastung und Elastizitätsmodul berechnet werden (Weißbach et al., 2018, S. 492). Für die Festigkeit gibt es mehrere Kennwerte. Hier ist ausschlaggebend, was als Versagen des Bauteils definiert wird. In vielen Fällen führt eine elastische Verformung bereits zu einer Beeinträchtigung, wie erhöhtem Abrieb. In anderen Fällen ist erst eine plastische Verformung ein Versagen des Bauteils. Die Zugfestigkeit wird selten als Grenze genutzt, da hier nach einer deutlichen plastischen Verformung der Bruch bereits eingeleitet wird und eine Einschnürung beginnt (Weißbach et al., 2018, S. 492). Vielmehr wird mit der Dehngrenze oder der Streckgrenze gearbeitet. Da viele Bauteile dynamisch belastet werden, nutzt man auch die Dauerfestigkeit aus dem Wöhlerversuch.

Andere Kennwerte, wie das Gewicht, können einfach über Dichte und Volumen; die Wärmeausdehnung bei isotropen Werkstoffen über den Wärmeausdehnungskoeffizient berechnet werden (Weißbach et al., 2018, S. 492–493). Weiterhin gibt es Formeln zum Ermitteln der elektrischen Leitfähigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und der magnetischen Eigenschaften.

Die Einsatztemperatur kann bei Polymeren oder Verbundwerkstoffen, die eine Polymer-Matrix aufweisen, mit der Glas- oder Schmelztemperatur (Zersetzungstemperatur) abgeglichen werden (Weißbach et al., 2018, S. 492–493). Bei Metallen stehen hier die Temperaturen der Gefügeumwandlung gegenüber. Die Medienbeständigkeit, wie das Korrosionsverhalten bei Metallen oder die Veränderung der molekularen Bindungen bei Polymeren, durch Öle, Fette oder Säuren werden durch Eigenschaftsbeschreibungen in den Profilen der Werkstoffe verglichen. Optische Eigenschaften, wie Transparenz und Glanz eines Werkstoffes, können ebenfalls nicht berechnet werden. Darüber hinaus sind der Preis und die Verfügbarkeit über Herstellende und Anbietende zu erfragen. Eigenschaften zur Fertigung können zudem speziellen Kennwerten und Merkmalen der Eigenschaftsprofile der jeweiligen Werkstoffe entnommen werden.

Bei der Werkstoffauswahl ist die Anwendung eines Filterprinzips basierend geeigneten Abfragen realisierbar (Weißbach et al., 2018, S. 489–490). Ausgehend von jeglichen möglichen Werkstoffen können so zügig Werkstoffe oder gesamte Werkstoffgruppen ausgeschlossen werden. Die Reihenfolge der Filter und Abfragen kann an die Priorisierung der Anforderungen angelehnt werden, um so auf die wichtigsten Funktionen einzugehen.

Datenbanken und Literatur

Um Anforderungsprofile mit Eigenschaftsprofilen von Werkstoffen vergleichen zu können, werden umfangreiche Übersichten von Werkstoffen benötigt. Tabellen mit Werkstoffen und Kennwerten können dabei in der Literatur gefunden werden. Es gibt allgemeine Werkstoffbücher mit Kennwerten zu Werkstoffen, Tabellenbücher mit Übersichten und Fachartikel von neu entwickelten Werkstoffen mit Kennwerten.

Eindimensionale Übersichten machen es schwierig, mehrere Werkstoffe zu vergleichen. Außerdem können solche Literaturangaben unvollständig oder auch veraltet sein. Neben Tabellenwerken gibt es auch Übersichten mit Blasendiagrammen (sog. Bubble-Charts) (Weißbach et al., 2018, S. 493). Hier werden Werkstoffgruppen zusammengefasst und Unterschiede farblich kenntlich gemacht. So ist ein Vergleich zweier Kennwerte mit Verknüpfungen und Wechselwirkungen zwischen den Werkstoffen besser zu erkennen. Gute Übersichten und Auswahlmöglichkeiten liefern darüber hinaus digitale Datenbanken. Diese haben oft Filter- und eingebaute Berechnungsmöglichkeiten. Datenbanken werden von unterschiedlichen Quellen angeboten. Fachverbände, Prüflabore und auch Herstellende und Anbieter:innen von Werkstoffen verfügen über Online-Datenbanken von Werkstoffen. Ein limitierender Faktor ist dabei, dass es keine umfassenden Datenbanken gibt. Einige sind entweder auf einzelne Werkstoffgruppen, fachspezifische Anwendungen oder auf die Werkstoffe, die Herstellende und Anbieter:innen im Angebot haben, reduziert. Wenn z. B. sowohl Polymere als auch Metalle für eine Anwendung infrage kommen, müssen zumeist mehrere Datenbanken durchsucht werden. Kennwerte aus normierten Versuchen sind dabei einfach zu vergleichen, bei speziellen Anwendungen und Merkmalen ist dies nicht der Fall.

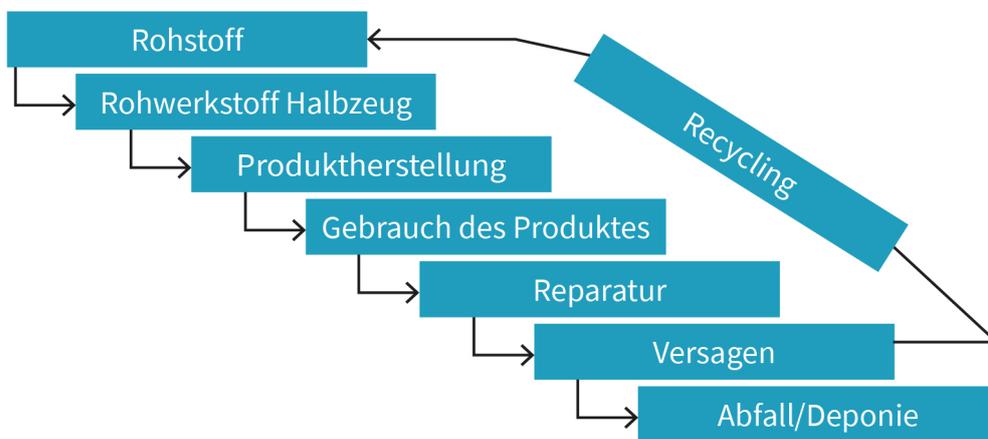
Bevor man die finale Auswahl durchführt, sollte man eine Liste mit den möglichen Werkstoffen erstellen und Probekörper mit mehreren Werkstoffen erstellen. Hier kann man in Vortests die Eignung feststellen und evtl. auch Prototypen generieren. Auf jeden Fall ist ein methodisches Vorgehen sinnvoll und erleichtert den internen Prozess. Je früher Änderungen in der Entwicklung vorgenommen werden, desto kleiner ist die finanzielle Belastung; je später, desto teurer gestaltet sich der Herstellungsprozess und desto komplexer die Konsequenzen, da viele Prozesse bereits auf den ersten Auslegungen basieren und nun viele Aspekte wieder geändert werden müssen. In vielen Firmen und Branchen, die mit einem Qualitätsmanagement in der Entwicklung oder einem Anforderungsmanagement arbeiten, ist ein solches Vorgehen strikt gefordert. Hiervon kann auch die Zertifizierung der Firma (z. B. Medizintechnik: ISO 13485) und Vereinbarungen mit Kund:innen (Zulieferervertrag in Automobilbranche) abhängen.

6.4 Recycling

Die Auswahl von Werkstoffen hängt nicht nur von den mechanischen oder chemischen Eigenschaften ab. Darüber hinaus spielen auch weitere Faktoren – wie Fertigbarkeit, Verfügbarkeit und Preis – eine Rolle (Hornbogen et al., 2019, S. 487–514). Diesen Aspekten

kommt noch ein weiterer hinzu: Bei der Entwicklung neuer Produkte wird nicht mehr nur auf Fertigung und Funktion eines Produktes geachtet, sondern auf den gesamten Produktlebenszyklus, vom Rohstoff bis zur Verschrottung oder zum Recycling.

Abbildung 43: Produktlebenszyklus mit Recycling



Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023.

In vielen Fällen war in der Vergangenheit eine Neuproduktion günstiger als die Reparatur oder das Recycling von Bauteilen. Einige Produkte wurden zudem so entwickelt, dass eine Reparatur oder ein einfacher Austausch von Verschleißteilen nicht möglich war. Steigende Kosten und Limitationen bei der Rohstoffgewinnung erschweren diesen Prozess jedoch mittlerweile. Gesetzliche, soziale und auch umweltpolitische Vorgaben zwingen die Entwicklenden, zusätzlich auf Langlebigkeit, Nachhaltigkeit und Recycling der Produkte zu achten. In Bezug auf die Werkstoffe sind somit das Recycling und die Recyclingfähigkeit von technisch-wirtschaftlicher Relevanz.

Recyclingeigenschaften der Werkstoffgruppen

Metalle haben hinsichtlich des Recyclings einen hohen Anteil. Theoretisch besitzen speziell reine Metalle eine Möglichkeit zum „unendlich“ häufigen Recycling ohne Qualitätsverlust (Hornbogen et al., 2019, S. 487–514; Weißbach et al., 2018, S. 501). Da bei jedem Recyclingprozess, d. h. Aufschmelzen und erneutem Gießen, jedoch Spurenelemente eingebracht werden, reduziert sich in der Praxis oft die Qualität ein wenig. Reine Edelmetalle besitzen auch aufgrund des hohen Preises die höchste Recyclingquote, gefolgt von Blei. Ein weiterer Prozessschritt, der zur Recyclingquote beiträgt, sind die Energiekosten der Gewinnung im Vergleich zum Recycling. Hinsichtlich reiner Werkstoffe ist das Recycling oft deutlich günstiger als die Neugewinnung der Rohstoffe. Zum Beispiel beträgt der Energieaufwand bei Aluminium sogar nur 5 Prozent im Vergleich zur Primärgewinnung. Bei Werkstoffen mit Legierungen oder Verbundmaterialien ist es jedoch schon wieder schwieriger.

Hinsichtlich Keramiken ist die Herstellung zwar teuer, die einzelnen Rohstoffe wie Oxide oder Silikate sind im Gegensatz dazu sehr günstig (Hornbogen et al., 2019, S. 487–514). Die chemische Bindung der Keramiken und auch Gläser ist sehr hoch, sodass hohe Temperaturen zum Aufschmelzen benötigt werden. Bei Gläsern wird das sehr häufig angewendet,

auch mehrmaliges Recycling ist möglich. Hier sind nur Färbungen ein limitierender Faktor, sodass eine Farbtrennung beim Recyceln sinnvoll ist. Bei Keramiken ist ein vollständiges Trennen der Komponenten nicht wirtschaftlich, sodass Keramiken zerkleinert werden und neuen Rohlingen vor dem Sintern beigemischt werden (Partikelrecycling, kein Werkstoffrecycling). Verunreinigungen müssen vor oder während des Zerkleinerns entfernt werden. Beim oder nach dem Sintern ist dies nicht mehr möglich.

Eine Besonderheit betrifft die Polymerwerkstoffe: Sie können als Rohstoff recycelt werden, aufgrund des Kohlenstoff-Anteils jedoch auch als Brennstoff verwendet werden (Hornbogen et al., 2019, S. 487–514; Weißbach et al., 2018, S. 500). Viele Polymere (PE, PP, PVC, PS etc.) sind derart reaktionsträge, dass sie sich auf Deponien nicht zersetzen. Zusätzlich bilden sie beim Verbrennen unerwünschte und giftige Reaktionen und Reaktionsprodukte wie HCl, Cl₂, HF, H₂S, da sie auch Cl, F, N und S enthalten. Einzig natürliche Polymere auf Basis von Cellulose, Stärke oder Naturkautschuk zersetzen sich, auch unter Beihilfe von Mikroorganismen, sehr leicht. Aus diesem Grund gelten metallische Werkstoffe zurzeit als umweltverträglicher als Polymere. Auf Mikroplastik und dessen Einfluss auf die Umwelt wird in diesem Skript nicht weiter eingegangen.

Verbundwerkstoffe und -konstruktionen erschweren ein Recycling sehr, da nach der Herstellung oft keine Trennung mehr möglich ist, z. B. bei glasfaserverstärkten Kunststoffen (Hornbogen et al., 2019, S. 487–514; Weißbach et al., 2018, S. 500).

Konstruktive Merkmale

Aus konstruktiver Sicht ist bei der Entwicklung von Produkten und Bauteilen eine möglichst lange Lebensdauer anzustreben. Bei mobilen elektronischen Geräten ermöglicht ein wiederaufladbarer Akku eine längere Lebensdauer als eine einmalige Energiequelle.

Aus vielen Gründen kann ein gewisser Verschleiß und auch Verbrauch zur Beeinträchtigung der Funktion führen. Dann müssen Bauteile ersetzt oder Maßnahmen getroffen werden, die Funktion wiederherzustellen. Eine Möglichkeit hierzu bietet die Reparatur oder der Austausch einzelner Komponenten. Erforderlich ist dazu eine modulare Konstruktionsweise, sodass ein Austausch praktikabel und ein Zugang zu den defekten oder verbrauchten Komponenten gewährleistet ist. Eine nicht-wiederaufladbare Batterie kann nicht einfach ersetzt werden, ohne den Apparat entsorgen zu müssen. Auch bei wiederaufladbaren Akkus ist nach einer definierten Anzahl von Ladezyklen ein Verschleiß zu erkennen und der Akku muss getauscht werden. So kann der Apparat aber trotzdem noch weiterverwendet werden. Weitere solche austauschbaren Komponenten sind Glühbirnen oder Zündkerzen etc.

Eine bewusste Werkstoffwahl kann auch dazu führen, dass eine einfach austauschbare Komponente gezielt Verschleißanzeichen aufweist, während eine andere, die schwer zu erneuern ist, keinen Verschleiß zeigt. Hier sind Gleitpaarungen mit besonders weichen Werkstoffen, wie Polyethylen, und Komponenten aus besonders harten polierten Metallen, wie Cobalt-Chrom-Komponenten, bei einem künstlichen Gelenkersatz in Hüfte oder Knie, der Fall.

Wenn einzelne Komponenten oder gesamte Apparate nicht mehr repariert werden können, müssen diese recycelt werden. Hierzu ist wichtig, dass die Werkstoffe separiert werden können. Eine Auswahl von Werkstoffen, die sich zur Wiederverwertung eignen, ist ebenfalls vorteilhaft, da hier Rohstoffe gespart und Abfall vermieden werden kann. Diesbezüglich haben Metalle und Thermoplaste, die wieder eingeschmolzen werden können, einen Vorteil gegenüber bspw. Duromeren, die nicht eingeschmolzen werden, oder Verbundwerkstoffen, die nicht mehr getrennt werden können.

Wenn Polymere als Brennstoff recycelt werden, muss darauf geachtet werden, dass giftige und unerwünschte Reaktionsprodukte der Verbrennung nicht in die Umwelt gelangen, oder dass auf Additive verzichtet wird, die solche Reaktionsprodukte generieren. Zukunftstrends zeigen hier Polymere aus solchen (natürlichen) Rohstoffen, die einfach biologisch abgebaut werden können, ohne negative Nebenprodukte freizusetzen.



ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Herstellung von Bauteilen durchlaufen Werkstoffe vom Rohstoff bis zur finalen Geometrie unterschiedliche Formen. Hierbei ändern sich während der einzelnen Prozessschritte die Eigenschaften, insbesondere die mechanischen Eigenschaften, durch die Strukturänderung, signifikant. Bei der Entwicklung müssen dabei Herstellungs- und Nachbearbeitungsverfahren berücksichtigt werden. Werkstoffkennwerte sind anhand von Proben zu ermitteln, die vergleichbare Fertigungsschritte durchlaufen haben wie das finale Bauteil.

Die Prüfmethode zur Ermittlung der Kennwerte müssen dabei so definiert sein, dass sie mit anderen Prüfungen verglichen werden können, dazu gibt es diverse Normen. Ebenso muss die Bezeichnung der Werkstoffe so eindeutig sein, dass diese die Zusammensetzung beschreibt, die einen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften besitzt.

Um die optimalen Werkstoffe auswählen zu können, müssen die Anforderungen an die Bauteile mit den Eigenschaftsprofilen der zu verwendenden Werkstoffe verglichen werden. Hierzu sind möglichst umfangreiche Datenbanken aller Werkstoffgruppen nötig. Bei der Entwicklung muss der gesamte Lebenszyklus eines Bauteils beachtet werden. Dies umfasst sowohl die Herstellung und Anwendung, aber auch die Wiederaufbereitung, Verschrottung oder das Recycling.

LEKTION 7

DOMÄNENSPEZIFISCHE ERGÄNZUNGEN UND BEISPIELE

LERNZIELE

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie in der Lage sein, ...

- die unterschiedlichen Anwendungen von Werkstoffen zu verstehen.
- spezielle Werkstoffe für Bereiche und Industrien identifizieren zu können.
- Werkstoffe von einzelnen Anwendungsbereichen auf andere übertragen zu können.

7. DOMÄNENSPEZIFISCHE ERGÄNZUNGEN UND BEISPIELE

Aus der Praxis

Viele Produkte werden für spezielle Anwendungen in Branchen wie im Maschinenbau, in der Elektrotechnik, in der Mechatronik oder in der Robotik entwickelt. Für die besonderen Anforderungen werden regelmäßig domänenspezifische Werkstoffe verwendet. Bei komplexen Geräten überschneiden sich aber auch viele Domänen, sodass ein Blick in andere Branchen helfen kann.

Bei der Entwicklung eines Beatmungsgerätes – ein Produkt aus der Medizintechnik – haben viele Komponenten Anforderungen, die identisch zu denen von Geräten anderer Domänen sind. Aus werkstofflicher Sicht besitzen nur die Produktteile, die direkten Kontakt zu Patient:innen und anwendenden Personen haben, eine besondere Anforderung. Der Rahmen, der vorrangig für das Tragen der Last der anderen Komponenten zuständig ist, verfügt über Werkstoffe, die identisch zu denen im Maschinenbau sind. Werkstoffe für Controller und den elektrischen Antrieb sind vergleichbar zu Werkstoffen aus der Elektrotechnik. Werkstoffe einzelner Sensoren werden darüber hinaus auch in der Mechatronik oder Robotik eingesetzt.

7.1 Medizintechnik

Die Medizintechnik ist ein sehr weiträumiger Bereich, bspw. ist eine Einwegspritze, ein Röntgenapparat und eine **Hüftendoprothese** ein Medizinprodukt (Wintermantel & Ha, 2002). In diesem Kapitel wird vorrangig auf Biomaterialien eingegangen, die implantiert werden, oder bei der Implantation unterstützen und somit einen engen Kontakt zur behandelnden Person vorweisen. Auf Produkte und Apparate ohne Kontakt zum Menschen wird hier nicht eingegangen, da sich diese im Vergleich zu anderen Bereichen (z. B. Maschinenbau und Elektrotechnik) nicht unterscheiden. Die Auswahl eines Werkstoffes beinhaltet stets eine Risiko-Nutzen-Abschätzung, bei der sämtliche Faktoren zusammengetragen und berücksichtigt werden.

Allgemeine Anforderungen in der Medizintechnik

Eine besondere Anforderung an Werkstoffe ist die allgemeine und chemische Beständigkeit, da hier Prozesse angewendet werden, um Keime an und auf Bauteilen abzutöten. Dadurch wird das Risiko von Infektionen für die zu versorgenden Personen minimiert. Dies kann durch Heißdampf, Reinigungsmittel mit hohem Alkoholgehalt oder auch durch radioaktive Strahlung geschehen. Die verwendeten Temperaturen bei der Heißdampf Aufbereitung beeinflussen Keramiken und Metalle nicht, bei Polymeren muss demgegenüber auf die Glas- und Schmelztemperatur geachtet werden. Weiterhin zeigt auch die radioaktive Strahlung keine Auswirkung auf Keramiken und Metallen. Hinsichtlich der Polymere

Hüftendoprothese

Der Austausch eines natürlichen Hüftgelenks durch ein künstliches wird Hüftendoprothese genannt. Dabei werden die Komponenten der Gleitpaarung, im Oberschenkel die Kugel und die Pfanne im Becken, ausgetauscht.

kann dies jedoch eine Veränderung der Verbindungen der Molekülketten hervorrufen. Dieser Prozess kann auch bewusst genutzt werden, um die Vernetzung und somit die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Durch den Einsatz von Reinigungsmitteln besteht darüber hinaus das Risiko einer Beschädigung der Schutzschicht bei Metallen. Hinsichtlich der Polymere kann es in diesem Zusammenhang zu einer Diffusion von Molekülen kommen.

Ein wichtiger Begriff bei der Risikoanalyse ist die **Invasivität** eines Werkstoffes: Das heißt wie nahe kommt das Produkt den zu behandelnden und anwenden Personen und wie lange besteht der Kontakt? Wenn es dem menschlichen Körper sehr nahekommt oder gar implantiert wird, ist neben der Funktion des Produktes die Sicherheit vorrangig. Für den Werkstoff bedeutet das, dass er **biokompatibel** sein muss, d. h., er darf keinen negativen Einfluss auf die beteiligten Personen haben. Dies wird zumeist durch eine Verhinderung von Ionenaustausch bei Metallen durch eine Schutzschicht, wie die Oxid- oder Passivschicht bei Titan und Edelstahl, oder durch einen Austausch anderer Substanzen bei Polymeren gewährleistet.

Metalle in der Medizintechnik

Zu den meisten in der Implantattechnik verwendeten Metallen gehören rostfreie Stähle, Legierungen auf Kobaltbasis und Titan sowie Titanbasislegierungen (Wintermantel & Ha, 2002). Rostfreie Stähle werden dabei vermehrt für Instrumente oder Implantate verwendet, die nicht permanent im Körper verbleiben, da sie nur bedingt biokompatibel sind. Bei permanenten Implantaten, insbesondere Hüftendoprothesen kommen vorrangig Titan, sowie Titanlegierungen zum Einsatz. Der Vorteil von Titan als Werkstoff ist die geringe Dichte (und somit auch Gewicht) bei einer sehr guten Festigkeit. Die Eigenschaft der sofortigen Bildung einer sehr beständigen Oxidschicht verhilft dem Werkstoff auch zu einer besonders guten Biokompatibilität. Da es jedoch keine guten Abriebeigenschaften besitzt, werden Komponenten mit direkten artikulierenden Flächen aus härteren und polierbaren Kobalt-Chrom-Legierungen hergestellt (z. B. Knieendoprothesen).

Andere Metalle wie Tantal, Niob, Edelmetalle, **degradierbare** Magnesium-Legierungen sowie Memorylegierungen werden nur in Sonderfällen eingesetzt (Wintermantel & Ha, 2009). Unedlere Metalle können aufgrund von korrosiven oder elektrochemischen Reaktionen zu einer Veränderung des pH-Wertes führen, was das umliegende Gewebe beeinflussen kann. Durch Abrieb oder abgelöste Partikel sind zudem starke Fremdkörperreaktionen im Körper möglich.

Keramiken in der Medizintechnik

Zu den häufigsten keramischen Werkstoffen zählen Aluminiumoxyd (Al_2O_3), Zirkonoxid (ZrO_2), Calcium-Phosphat-Keramik (wie Hydroxylapatit) sowie Glaskeramik (Wintermantel & Ha, 2009). Al_2O_3 und ZrO_2 werden aufgrund der guten Gleiteigenschaften in der Gelenkprothetik als Gleitpartner sowie als Glaskeramik in der Dentalprothetik eingesetzt (gute mechanische Eigenschaften, geringe Korrosionsneigung und sehr biokompatibel). Hydroxylapatit besitzt zwar keine guten mechanischen Eigenschaften, verfügt aber über

Invasivität

Die Invasivität von Werkstoffen in der Medizintechnik beschreibt die Nähe zum Menschen: Hierbei spielt der Hautkontakt, das Eindringen des Werkstoffes in den Körper sowie die Kontaktdauer eine Rolle.

Biokompatibilität

Mit biokompatiblen Werkstoffen sind solche Komponenten gemeint, die zu keiner negativen Reaktion bei Kontakt zum Menschen führen. Man spricht auch von Biokompatibilität.

Degradierbar

Werkstoffe, die durch natürliche Prozesse im Körper abgebaut werden können, nennt man degradierbare oder degradable Werkstoffe. Diese können metallisch, keramisch oder polymerisch sein.

eine bioaktive Wirkung, da es zu einem beschleunigten Knochenwachstum führen kann. Aufgrund dessen findet es vermehrt als Beschichtung von metallischen Implantaten Anwendung.

Polymere in der Medizintechnik

Polymerwerkstoffe werden oft für Produkte, die nicht direkt oder nur kurz mit Patient:innen in Kontakt kommen, verwendet. Nur wenige Polymere eignen sich für einen längeren oder permanenten Einsatz im Körper. Viele Instrumente haben Griffe aus Polyoxymethylen (POM) oder anderen Polymeren. Als Implantat-Werkstoffe kommen jedoch nur wenige andere infrage. Polymethylmetacrylat (PMMA) wird bspw. als sogenannter **Knochenzement** zum Einbau von Prothesen im Knochen verwendet. Dessen Herstellung findet zumeist während Operationen statt. Dabei werden zwei Komponenten vermischt, sodass ein Produkt entsteht, welches innerhalb weniger Minuten in der gewünschten Form aushärtet.

Knochenzement
Der formbare und selbst-aushärtende polymere Werkstoff, der in Operationen zur Befestigung und Verankerung von Implantaten im Knochen benutzt wird, heißt umgangssprachlich Knochenzement.

Darüber hinaus findet Polyethylen in der speziellen Form Ultra High Molekular Weight Polyethylen (UHMW PE), welches zusätzlich durch Bestrahlung quervernetzt wird, in der Medizintechnik als Implantat-Werkstoff Einsatz (Weißbach et al., 2018, S. 390–397). Der Werkstoff besitzt eine hohe Beständigkeit gegenüber Medien, ist biokompatibel sowie nicht natürlich abbaubar und somit langlebig. Dessen Abriebpartikel sind nicht toxisch, sodass Polyethylen (PE) für artikulierende Flächen, d.h. Gleitflächen in der Hüft- und Knieprothetik, eingesetzt werden kann. Alterung und geringe mechanische Eigenschaften führen einerseits zum Verschleiß der PE-Bauteile, diese sind andererseits aber leicht modular auszutauschen. Gleitpartner, wie die Hüftkugeln, werden nicht aus Polymeren hergestellt. Diesbezüglich finden härtere Metall- oder Keramikwerkstoffe Anwendung. Polyetheretherketon (PEEK) zeigt eine gute Beständigkeit in chemischer Hinsicht sowie gegenüber radioaktiver Bestrahlung (Weißbach et al., 2018, S. 390–397). Somit findet es neben einigen technischen Anwendungen Einsatz als Implantat-Werkstoff in der Wirbelsäulenchirurgie. Polyurethan (PU) hat gummiähnliche Eigenschaften und wird neben Silikon für Katheter verwendet. PU ist hierbei vermehrt für temporär- und Silikon für permanent-verbleibende Katheter im Einsatz (Weißbach et al., 2018, S. 390–397).

Tissue Engineering
Die Wissenschaft, die aus biologischen Werkstoffen, die mit Zellen besiedelt werden, Körpergewebe generiert, wird Tissue Engineering genannt.

Eine moderne Wissenschaft, die Körpergewebe für den Austausch und die Regeneration im Körper herstellt, wird **Tissue Engineering** genannt. Hier wird ein Trägerwerkstoff benutzt, der mit Zellen besiedelt ist, die – wie im menschlichen Körper – einen Umbau des Werkstoffes und eine Generierung von neuem Körpergewebe bewirken. Die Werkstoffe bestehen zumeist aus abbaubaren Polymeren, bei Knochenwiederherstellung auch aus Keramiken wie Calcium Phosphat und bieten den Zellen eine poröse Form, um sich dort niederzulassen.

Werkstoffe mit Sonderrollen sind (Wintermantel & Ha, 2009):

- eine Silberbeschichtung für Implantate als antibakterielle Schutzschicht gegen Keime,
- radioaktive kleine Titanstifte (Seeds) in der Brachytherapie zum Abtöten von Krebsgewebe (karzinogenes Gewebe) in der Prostata (permanente Implantation, jedoch Strahlung nur für circa ein Jahr),

- Chitin, eine Abart von Zellulose (gewonnen aus Pilzen oder Insekten) mit Forschungsanwendungen im pharmazeutischen und medizintechnischen Bereich sowie
- Kollagen (aus Sehnen, Bändern, Knochen, Knorpeln und Haut von vielzelligen Tieren [und Menschen]) in kosmetischen, pharmazeutischen und medizintechnischen Anwendungen.

7.2 Maschinenbau

Der Industriebereich Maschinenbau umfasst ein sehr großes Anwendungsgebiet. Im Vergleich zur Medizintechnik ist hier neben der Funktion und der Sicherheit für die zu behandelnden und anwendenden Personen der Preis ein sehr wichtiger Faktor. Es geschieht immer ein Kosten-Nutzen-Vergleich (inklusive Recycling und Entsorgung). Während man in der Medizintechnik meist bereit ist, für den überlegenen, jedoch teureren Werkstoff mehr zu investieren, wird im Maschinenbau, speziell bei Produkten in großen Stückzahlen, also bei Massware, der preisgünstigere Werkstoff bevorzugt. Nur bei sehr speziellen Anwendungen, bei denen der:die Kund:in bereit ist, für den Mehrwert zu zahlen, werden teure Werkstoffe eingesetzt.

Da sich der Preis durch die Gewinnung und die Verarbeitung zusammensetzt, können Werkstoffe, die zwar günstig in der Rohstoffgewinnung sind, jedoch einen teuren Verarbeitungsprozess aufweisen, durch die Verwendung und das dadurch gewonnene Know-how später wieder kostengünstiger werden. Verbesserte Fertigungsprozesse haben z. B. den Werkstoff Polytetrafluorethylen (Teflon®), der für die Raumfahrt entwickelt wurde, inzwischen auch im Alltag etabliert.

Metalle im Maschinenbau

Im Maschinenbau werden sämtliche Varianten von Stahl und seine Legierungen angewendet. Legierungen werden häufig für gewisse Anwendungen speziell entwickelt und so zusammengesetzt, um die Anforderungen möglichst exakt zu erfüllen. Nichtmetalle werden ebenfalls häufig eingesetzt – speziell im Leichtbau. Im Gegensatz zur Medizintechnik wird Titan nur in speziellen Fällen wie in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Aufgrund des niedrigeren Preises findet im Leichtbau jedoch zumeist Aluminium Anwendung. Bei niedrigeren Temperaturen werden auch häufig glas- (GFK) oder kohlefaserverstärkte (CFK) Kunststoffe eingesetzt. CFK kommt insbesondere auch in der Sport- und Rüstungsindustrie zum Einsatz.

Bei Verbrennungsmotoren und Turbinen spielt die **Verbrennungstemperatur** eine wichtige Rolle: je höher die Temperatur, desto höher der Wirkungsgrad (Bargel & Schulze, 2018, S. 486). Die Forschung zielt hier auf neue Werkstoffe ab, die für Flugzeuge oder Gasturbinen zur Stromerzeugung höhere Temperaturen erlauben. Derzeit sind Nickelbasis-Superalloyen im Einsatz, die Temperaturen bis zu 1.100 °C aushalten. Man arbeitet an Legierungen mit Molybdän, das eine Schmelztemperatur von etwa 2.600 °C erreicht, oder Wolfram, dessen Schmelztemperatur bei etwa 3.400 °C liegt.

Verbrennungstemperatur

Die Verbrennungstemperatur ist die Temperatur, bei der in der Verbrennungskammer der Treibstoff verbrannt wird.

Zum Einsatz kommen hier Superlegierungen auf Basis von Nickel (50–70 Prozent) und Kobalt (50–60 Prozent) und über 15 Prozent Chrom-Anteil (Bargel & Schulze, 2018, S. 264). Diese benötigen eine sehr genaue Wärmebehandlung, um die richtigen Ausscheidungen zu erhalten. Es wird aber auch an komplexen Kristallstrukturen der Metalle durch die Zugabe von Silizium, Bor oder Chrom geforscht.

Keramiken im Maschinenbau

Keramiken finden eine weite Anwendung im Maschinenbau. Einerseits werden sie wegen der guten Temperatureigenschaften als Hochtemperaturwerkstoffe, Isolationswerkstoffe und Ventilkomponenten eingesetzt, sie finden aber auch in anderen Bereichen Anwendung – z. B. als Gleitlager oder Lagerkomponenten wegen der guten Gleiteigenschaften. Die gute chemische Beständigkeit trägt auch dazu bei, dass Keramiken als Behälter in der Chemieindustrie eingesetzt werden.

Die bekannteste Oxidkeramik, Aluminiumoxid (Al_2O_3), findet insbesondere im Maschinenbau Anwendungen – z. B. als Katalysatorwerkstoff in der chemischen Industrie. Der hohe Widerstand gegen die Rissausbreitung führt zum Einsatz von Zirkonoxid (ZrO_2) in der Verbindung zwischen Keramik und Stahl als Werkstoff für Lager und Ventile im Automobilsektor.

Polymere im Maschinenbau

Polymere werden aufgrund der einfachen und günstigen Herstellung sehr häufig im Maschinenbau eingesetzt. Polyethylenterephthalat (PET) ist ein zähhartes Polymer, das eine hohe Abriebfestigkeit und Maßhaltigkeit aufweist (Weißbach et al., 2018, S. 390–397). Aufgrund der geringen Durchlässigkeit für CO_2 wird PET für Getränkeflaschen verwendet. Außerdem findet es basierend auf den guten thermischen Eigenschaften in elektrischen Haushaltsgeräten sowie, aufgrund der guten Gleiteigenschaften, in Schrauben, Nockenscheiben und Gleitlagern Anwendung.

Polypropylen (PP) ist eines der am häufigsten verwendeten Polymere, da es ohne hohe Anforderungen gut im Spritzguss hergestellt und abhängig von der Belastung bis 100 °C eingesetzt werden kann (Weißbach et al., 2018, S. 390–397).

Naturkautschuk
Aus verschiedenen Kautschuk-Pflanzen kann eine zähe Flüssigkeit gewonnen werden, die Naturkautschuk genannt wird. Durch Vulkanisation wird eine Vernetzung erzeugt, um es als technischen Werkstoff verwendbar zu machen.

Die meisten Elastomere werden aus **Naturkautschuk** und Silikonkautschuk überführt – man spricht dabei von Vulkanisaten (Weißbach et al., 2018, S. 390–397). Es existieren dabei unzählige synthetische Varianten. In der Reinform werden beide Komponenten nicht verwendet. Zur Verwendung von Naturkautschuk-Vulkanisaten gehören zum Großteil die Reifenherstellung, diverse Latexprodukte und andere Produkte – wie Gummibänder, Gummistiefel, Radiergummi und Dichtungen. Vulkanisate aus Silikonkautschuk besitzen eine hervorragende Temperaturbeständigkeit von –100 °C bis +200 °C und haben somit eine breites Einsatzgebiet. Sie werden als industrielle Gussformen, aber auch im Haushalt als Backformen und im Baugewerbe als Dichtungsmaterial verwendet. Es gibt diverse Anwendungen in der Medizin sowie im Alltag, etwa als Babyschnuller.

Zwei wichtige Varianten von faserverstärkten Duroplasten sind glasfaserverstärkte ungesättigte Polyesterharze (UP-GF) und glasfaserverstärkte Epoxidharze (EP-GF) (Bargel & Schulze, 2018, S. 440–443). Beide werden in Form von Vorprodukten durch die Zugabe geeigneter Reaktionsmittel zu Duroplasten vernetzt. Während UP-GF eher glasklar und transparent vorkommt, ist EP-GF milchig trüb und lichtempfindlich. Glasfaserverstärkte Duroplaste können durch ihren Faseranteil gezielt eingestellt werden und halten so hohen mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen stand. Ihr Einsatzgebiet ist daher sehr umfangreich: Bauwesen; Möbelindustrie; Maschinen-, Fahrzeug- und Flugzeugbau; Haushalt und Industrie.

Polyurethane (PU) besitzen eine hohe Abriebfestigkeit, gute Elastizität, hohe Kerbfestigkeit und Dämmleistung (Bargel & Schulze, 2018, S. 440–443). Sie können sowohl als Elastomere, als auch als Duroplaste vorliegen. Aufgrund ihrer Eigenschaften finden sie im Kupplungsbau, bei Kolbenkompressoren, Verbrennungsmotoren oder Pumpen Einsatz.

Bei dem in der Natur am häufigsten vorkommenden, natürlichen Polymer handelt es sich um Zellulose. Das Polysaccharid wird aus Pflanzen gewonnen und dient als Grundbaustein für viele technische Anwendungsbereiche – wie der Papier-, Textil- und Baustoffindustrie. Zudem findet es in der Verpackungsindustrie in Form von Cellophan und als Werkstoff für Tischtennisbälle Anwendung.

7.3 Elektrotechnik

Allgemeine Anforderungen

Typische Produkte in der Elektrotechnik sind oft, aber nicht ausschließlich, elektrische Geräte. Diese haben diverse Anwendungen und auch ihre einzelnen Komponenten besitzen sehr unterschiedliche Anforderungen, die sich auf ihre Werkstoffe widerspiegeln. Je nach Einsatzbereich unterscheidet man (Hofmann & Spindler, 2018):

- Leiterwerkstoffe mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit wie z. B. Leiter, Halbleiter und Supraleiter,
- Kontaktwerkstoffe mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit sowie hoher Verschleißfestigkeit und Härte,
- dielektrische und Isolierwerkstoffe mit niedriger elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, z. B. Nichtleiter,
- Magnetwerkstoffe mit temporären oder langfristigen magnetischen Eigenschaften sowie
- Widerstandswerkstoffe.

Bei Leiterwerkstoffen muss man zwischen elektrischer und thermischer Leitung unterscheiden. Leiter haben zumeist die Aufgabe, elektrischen Strom möglichst schnell und verlustfrei zu transportieren. Zudem ist auch der Abtransport von Wärme in vielen Anwendungen ein wichtiger Faktor. Leiter sind nicht nur Kabel, sondern auch einzelne Schichten auf Oberflächen, um kompaktere Bauweisen zu ermöglichen. Bei den eingesetzten Werkstoffen unterscheidet man Leiter, Supraleiter und Halbleiter. Leiter zeigen ihre höchste

Leitfähigkeit als reines Metall ohne Gitterfehler. Supraleiter sind theoretisch unterhalb der Sprungtemperatur verlustfrei. Halbleiter in reiner Form verfügen über eine schlechte Leitfähigkeit, können jedoch durch eine Dotierung leitfähig werden (Hofmann & Spindler, 2018).

Kontakte in elektrischen Geräten haben hohe Anforderungen, da sie über den Lebenszyklus des Gerätes ihre Funktion ohne Einschränkungen erfüllen müssen. Man unterscheidet zwischen ruhenden (z. B. Steckverbindungen) und beweglichen Kontakten (z. B. Relais und Schalter) (Hofmann & Spindler, 2018). Kontaktwerkstoffe benötigen neben den Eigenschaften eines Leiters, wie einer guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeit, auch gute chemische Eigenschaften (u. a. gegen Korrosion), da die Kontakte zumeist der Umgebung ausgesetzt sind. Weiterhin werden, insbesondere bei den beweglichen Kontakten, gute mechanische Eigenschaften, wie eine hohe Verschleißfestigkeit und ein niedriger Kontaktwiderstand, gefordert (Behrens & Späth, 2005, S. 27).

Dielektrische und Isolierwerkstoffe haben keine freien Elektronen wie leitende Werkstoffe (Hofmann & Spindler, 2018). Prinzipiell basieren Isolatoren und Dielektrika auf den gleichen Werkstoffen. Sie werden jedoch unterschiedlich eingesetzt (Wellmann, 2019). Isolatoren führen rein zu einer Hemmung und einem Stopp des elektronischen Flusses, während Dielektrika bspw. bei Kondensatoren durch Erzeugung eines Gegenfeldes zu einer gezielten Reduzierung des elektrischen Feldes und somit zu einer Erhöhung der Kapazität eingesetzt werden (Wellmann, 2019). Es kommen dabei sowohl Polymere als auch Keramiken zum Einsatz (Hofmann & Spindler, 2018). Neben dem thermischen und elektrischen Ladungsfluss erzeugt eine Bewegung von Elektronen auch ein magnetisches Feld (Hofmann & Spindler, 2018). Magnetspulen erfordern dabei eine schnelle Änderung des Magnetfeldes (Umpolung), während Dauermagnete eine permanente Magnetisierung benötigen. In der Elektrotechnik werden viele Produkte in sehr großen Stückzahlen gefertigt. Dies und der hohe Konkurrenzkampf in diesem Sektor führen auch zu einer kritischen Kosten-Nutzen-Abwägung bei Massenartikeln (Hornbogen et al., 2019, S. 221–235).

Werkstoffübersicht Metalle

Die wichtigsten Leiterwerkstoffe sind wegen ihrer guten Leitfähigkeit Silber, Gold, Kupfer und Aluminium (Weißbach et al., 2018, S. 289). Von den reinen Metallen hat Silber die höchste thermische und elektrische Leitfähigkeit (Behrens & Späth, 2005, S. 27). Eine geringe Verschleißfestigkeit ist jedoch nachteilig, so kann bspw. eine Relativbewegung durch Reibung zum schnellen Verschleiß führen. Die Verwendung in Gegenwart von Schwefel und Schwefelverbindungen führt außerdem zu einer dunklen Verfärbung der Oberfläche durch Silbersulfid. Diese kann den Widerstand erhöhen und zu einer isolierenden Wirkung führen (Behrens & Späth, 2005, S. 27). Alternativ werden daher Silberlegierungen verwendet, die die oben genannten Nachteile nicht so in dieser Ausprägung aufweisen. Eingesetzt wird Feinkornsilber mit bis zu 0,15 Prozent Nickel und diverse Silber-Kupfer-Legierungen. Silberverbundwerkstoffe sind Silber-Metalloxid, Silber-Grafit oder auch Silber-Wolfram (Behrens & Späth, 2005, S. 28–29). Silber wird häufig als reines Silber oder als Beschichtung in Kontakten, Schaltern, Relais und Tastern eingesetzt. Das Edelmetall Gold reagiert im Gegensatz zu Silber nicht so leicht mit Umgebungsstoffen, wengleich dessen mechanische Eigenschaften im Vergleich zu Silber weniger optimal sind. Gold findet viel Einsatz in der Elektrotechnik, so werden qualitativ hochwertige Kabelste-

cker aus Gold gefertigt, aber auch Relais und Leiterplatten, bei denen eine dünne Goldschicht aufgetragen wird, kommen zum Einsatz. Durch die dünne Beschichtung kommen zudem nicht die mechanischen Eigenschaften von Gold, sondern die des Trägermaterials zum Tragen. Neben der Leitfähigkeit spielen natürlich auch die Kosten einen entscheidenden Faktor beim Einsatz, weswegen die teuren Edelmetalle wie Gold und Silber oft nur in kleinen Mengen und Abmessungen angewandt werden. Bei längeren Leitern und in größeren Dimensionen finden vorrangig Kupfer und Aluminium als Leiterwerkstoffe Anwendung (Hofmann & Spindler, 2018).

Auf dem Weg vom Kraftwerk zu den Verbrauchenden zeigen Stromleitungen aus z. B. Kupfer bis zu 30 Prozent Verlust (Hofmann & Spindler, 2018). Werkstoffe, deren Widerstand gegen Null geht und die somit eine theoretisch unendliche Leitfähigkeit besitzen, sind Supraleiter. Um diese Eigenschaften zu erzielen, werden hier allerdings Temperaturen unter der Sprungtemperatur benötigt. Da diese sogar bei Hochtemperatursupraleitern unter -190 °C liegt, kommen Supraleiter für Stromleitungen nicht zum Einsatz. Basierend auf der Sprungtemperatur, die sich für die meisten Supraleiter nahe dem absoluten Nullpunkt befindet, ist der Einsatz sehr aufwendig und findet nur in wenigen Fällen eine realisierbare Anwendung. Da bei dieser Temperatur auch das magnetische Feld aus dem Leiter verdrängt wird, können Supraleiter für magnetische Zwecke eingesetzt werden (Hornbogen et al., 2019, S. 244). Anwendung finden diese bei komplexen Geräten, wie Kernspintomografen (Magnetresonanztomograf) in der Medizin und Teilchenbeschleunigern in der Forschung.

Weitere Werkstoffe, die aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften eingesetzt werden, sind die Ferromagnete, die in weichmagnetische oder hartmagnetische Werkstoffe eingeteilt werden. Hartmagnete werden für Dauermagnete und z. B. für Tonbänder eingesetzt. Sie basieren u. a. auf Legierungen von Eisen, Cobalt und Nickel, Aluminium, Nickel und Cobalt (Hornbogen et al., 2019, S. 237–241). Zu den weichmagnetischen Werkstoffen zählen ebenfalls Legierungen auf der Grundlage von Eisen, Nickel und Cobalt, jedoch in anderen Zusammensetzungen (Hornbogen et al., 2019, S. 237–239).

Werkstoffübersicht Halbleiter

In der Elektrotechnik und insbesondere Elektronik besitzen Halbleiter, durch die Fähigkeit, ihre elektrische Leitfähigkeit mithilfe von n- oder p-Dotierungen zu beeinflussen, eine wichtige Rolle. Sie finden Einsatz, wenn ein gezielter Stromfluss benötigt wird (Hofmann & Spindler, 2018). Bereiche in einem Werkstoff, die unterschiedlich dotiert wurden, ermöglichen richtungsabhängige Leitfähigkeiten (**Diode**, Gleichrichter) oder eine Schalterfunktion (z. B. Transistor, Thyristor, Photodiode). Der am weitesten verbreitete Werkstoff für Halbleiter ist Silizium, gefolgt von Germanium. Bei der n-Dotierung werden Phosphor oder Arsen jeweils fünf Außenelektronen hinzugegeben, um eine Überzahl von Elektronen zu erzielen. Die p-Dotierung nutzt z. B. Bor oder Indium mit jeweils nur drei Außenelektronen. So entstehen Löcher oder sogenannte Defektelektronen (oder Elektronenleerstellen) im Grundwerkstoff.

Diode

Eine Diode ist ein elektronisches Bauelement aus Halbleiter-Werkstoffen, das Strom nur in eine Richtung durchlässt. Man spricht von einer Durchlass- und einer Sperrrichtung.

Werkstoffübersicht Polymere und Keramiken

Metalle haben eine schlechte elektrisch- und thermisch-isolierende Eigenschaft und finden zur Isolation keinen Einsatz (Hornbogen et al., 2019, S. 221–237). Polymere besitzen demgegenüber eine gute elektrische Isolierung, aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur werden sie jedoch nur selten eingesetzt. Keramiken können mit Beidem aufwarten – eine gute elektrisch- und thermisch-isolierende Eigenschaft. Inwiefern eine Keramik oder ein Polymer für eine isolierende Funktion eingesetzt wird, ist dabei sehr oft von den fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Eigenschaften abhängig, d. h. welche Herstellungsmöglichkeiten es gibt und zu welchem Preis dies führt.

Siliziumnitrid, Aluminiumnitrid, Aluminiumoxid und Zirkonoxid finden aufgrund ihrer elektrisch isolierenden Eigenschaften und ihrer magnetischen Neutralität Anwendung in der Elektrotechnik. Silikatkeramik wird häufig in der Elektronik und Elektrotechnik als elektrischer Isolator in Sicherungen, Schutzschaltern, Thermoreglern und in der Lichttechnik eingesetzt. Der geringe Verschleiß und die hohe Steifigkeit von Keramiken führen ebenfalls zu Anwendungsbereichen in der Elektrotechnik. Porzellan wird aufgrund seiner guten dielektrischen Eigenschaften im Bereich von Hochspannungsisolatoren eingesetzt (Hornbogen et al., 2019, S. 305).

Aminoplaste lassen sich aus Formaldehyd und Harnstoff (UF), bzw. Melamin (MF) und weiteren Füllstoffen erzeugen (Bargel & Schulze, 2018, S. 440–443). Sie sind farblos und dunkeln auch bei Sonneneinstrahlung nicht aus. UF wird vorrangig bei sanitären Artikeln, Haushaltsgeräten und als Isolier- und Installationsmaterial für Elektronikartikel verwendet. Polyvinylchlorid (PVC) besitzt einen hohen Chloranteil, ist amorph, glasklar und relativ spröde (Weißbach et al., 2018, S. 390–397). Es brennt schlecht, ist witterungs- und chemikalienbeständig. Dies findet häufig in der Isolierung von Niederspannungskabeln Anwendung. Polyethylen (PE) ist einfach zu verarbeiten und durch Variation innerhalb der Dichte und Quervernetzung sehr vielseitig einsetzbar (Weißbach et al., 2018, S. 390–397). Standardpolyethylen wird gerne als Ummantelung in Koaxialkabeln, Telefon- und Netzwerkkabeln eingesetzt, während vernetztes Polyethylen bei Hochspannungskabeln verwendet wird. Polyethylen (Hornbogen et al., 2019, S. 372), Polytetrafluorethylen (Teflon) und Polystyrol (Bargel & Schulze, 2018, S. 430) haben gute dielektrische Eigenschaften und werden deswegen in Kondensatoren eingesetzt.

7.4 Mechatronik

Die Mechatronik bezeichnet die Wissenschaft, in der Informatik, Elektrotechnik und Maschinenbau zusammenwirken (Czichos, 2019, S. 3). Dabei werden in mechatronischen Systemen unter anderem die Werkstoffe verwendet, die auch in den einzelnen Domänen zum Einsatz kommen. Da auf die Werkstoffe im Maschinenbau mit Fokus auf mechanischen Eigenschaften und in Elektrotechnik/Informatik mit Fokus auf elektrische und thermische Eigenschaften bereits eingegangen wurde, soll in diesem Abschnitt auf drei besondere Gruppen, die Werkstoffe in der Sensorik, Aktorik und Nanowerkstoffe, eingegangen werden.

Werkstoffe in der Sensorik

Werkstoffe, die durch eine äußere Einwirkung von Energie eine Eigenschaftsänderung im Werkstoff hervorrufen, werden häufig für Sensoren verwendet. Die Energie kann dabei in einer elektrischen, magnetischen, mechanischen oder thermischen Form auftreten. Zum Einsatz kommen für die Vielzahl an Effekten Metalle, Keramiken, Halbleiter und organische Polymere. Die Sensoren werden nach ihren Effekten benannt – wie dem **piezoelektrischen Effekt** (Hofmann & Spindler, 2019, S. 41).

Man unterscheidet auch aktive und passive Sensoren, je nachdem ob sie eine eigene Energiequelle besitzen oder nicht (Hofmann & Spindler, 2019, S. 41). Das heißt, dass aktive Sensoren die Energie selbst besitzen, die zur Weitergabe der Information benötigt wird, während passive Sensorwerkstoffe eine äußere Energiequelle zur Signalgewinnung benötigen (Hofmann & Spindler, 2019, S. 30). Man unterscheidet Sensoren nach ihren messenden Größen in (Czichos, 2019, S. 75):

- geometrische Sensoren, die z. B. Länge und Dehnung messen,
- kinematische Sensoren, die z. B. Position (Wege, Winkel), Geschwindigkeit und Beschleunigung messen,
- dynamische Sensoren, die z. B. Kraft, Drehmoment und Druck messen sowie
- Sensoren für Einflussgrößen, die z. B. Temperatur und Feuchtigkeit messen.

Die folgende Tabelle gibt einige Beispiele zu verwendeten Werkstoffen je nach Sensortyp und Einsatz.

Tabelle 18: Beispiele von Sensorwerkstoffen mit Applikationen

Sensorart	Applikation	Werkstoffbeispiele
Temperatursensor	Thermoelement	Gold-Silber Wolfram-Molybdän
	Halbleiterthermometer	dotiertes Silizium
Mechanosensoren	Dehnmessstreifen	Kupfer-Nickel-Legierung
	Beschleunigung	Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Hofmann & Spindler, 2019, S. 29–32.

Werkstoffe in der Aktorik

Aktoren oder auch Aktuatoren verwenden Werkstoffe, die auf ein externes Signal oder einen Impuls aus der Umgebung mit einer Kraftwirkung reagieren (Hofmann & Spindler, 2019, S. 41). Dabei benutzen sie unterschiedliche Effekte, wie den inversen piezoelektrischen Effekt oder ferroelektrische Effekte, und dienen somit oft als Antrieb. In der Temperaturregelung kommen Formgedächtnislegierungen zum Einsatz, da diese temperatursensitiv sind und sie ihre Form je nach Temperatur ändern. Werkstoffe, die sich in einem Magnetfeld verformen, wie die Ferromagnete um Eisen, Nickel und Kobalt, finden bei

Piezoelektrischer Effekt

Der piezoelektrische Effekt beschreibt den Vorgang, bei dem durch eine Verformung eines Werkstoffes eine elektrische Spannung auftritt.

magnetostruktiven Aktoren Anwendung (Hofmann & Spindler, 2019, S. 30–41). Weitere Einsatzgebiete von Aktoren sind in elektromechanischen, piezoelektrischen, fluidmechanischen und thermomechanischen Bereichen (Czichos, 2019, S. 157–169).

Die folgende Tabelle veranschaulicht einige Beispiele für Aktoren, deren Applikationen und Werkstoffe.

Tabelle 19: Beispiele von Aktorwerkstoffen mit Applikationen

Aktorart	Applikation	Werkstoffbeispiele
Feldwandler	Elektromotoren	Weichmagnete Hartmagnete Kupfer- und Edelmetalllegierungen
Piezowandler	Piezovenil	Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)
Thermowandler	Thermoschalter	niedrigschmelzende Metalllegierungen

Quelle: Amir Al-Munajjed, 2023 in Anlehnung an Hofmann & Spindler, 2019, S. 35.

Eine gezielte Kombination von Sensoren und Aktoren kann zu einem Wirkablauf in Form eines Regelkreises führen, der viele Applikationen in der Technik findet (Hofmann & Spindler, 2019, S. 41).

Im Folgenden wird auf einen Werkstoffeffekt genauer eingegangen, der bei einigen Anwendungen der Sensorik und Aktorik zum Wirken kommt – der piezoelektrische Effekt. Hierbei handelt es sich um eine Umwandlung einer physikalischen zu einer elektrischen Größe. Eine wirkende Kraft führt dabei zu einer Verformung des Werkstoffes, welche wiederum in eine proportionale, elektrische Spannung überführt wird (Weißbach et al., 2018, S. 457). Der inverse Vorgang, d. h., eine Verformung durch eine aufgebrachte elektrische Spannung wird inverser piezoelektrischer Effekt oder Elektrostriktion genannt (Weißbach et al., 2018). Umgesetzt wird dieser Effekt durch piezoelektrische Kristalle, wie Quarz, Galliumorthophosphat, Lithiumniobat sowie die piezoelektrischen Keramiken – Blei-Zirkonat-Titanate (PZT) und Blei-Magnesium-Niobat (PMN) (Bargel & Schulze, 2018, S. 370–372; Weißbach et al., 2018, S. 457).

Nanomaterialien

Nanomaterialien
Werkstoffe, die in einer Partikelgröße von unter 100 Nanometern bestehen, nennt man Nanomaterialien. Durch die geringe Größe haben diese oft andere Eigenschaften als die identischen Werkstoffe in größeren Dimensionen.

Eine neue Form von Werkstoffen bilden die **Nanomaterialien**, die auf den Werkstoffklassen Metalle, Keramiken, Polymere und Verbundwerkstoffe basieren (Weißbach et al., 2018, S. 7). Bei dieser Form von Werkstoff ist nicht die chemische Bindung ausschlaggebend, sondern einzig die Größe der Partikel, die von einem bis zirka 100 Nanometer variieren können.

Die Besonderheit dieser Materialgruppe liegt an den teilweise völlig veränderten physikalischen und chemischen Eigenschaften von Partikeln in dieser Größe (Weißbach et al., 2018, S. 7). So können Werkstoffe im Nanopartikelbereich transparent erscheinen, im makrosko-

pischen Bereich jedoch undurchsichtig. Außerdem existieren Stoffe, die je nach Größe flüssig oder fest vorkommen. Es gibt auch elektrische isolierende Werkstoffe, die im Nanobereich leitfähig werden und chemisch stabile Materialien, die instabil und leicht entzündlich werden. Die chemische Bindung ist hier nicht mehr dominierend für die Werkstoffeigenschaften. Einige dieser Eigenschaftsänderungen haben quantenmechanische Ursachen, die meisten basieren jedoch auf der Änderung des Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen, welches bei Nanopartikeln drastisch zunimmt.

Im technischen Alltag finden Nanopartikel bereits einige Anwendungen (Zaba, 2017, S. 25). So werden Halbleiter-Nanopartikel, Nanokristalle, Kohlenstoff-Nanotubes und auch metallische Nanopartikel verwendet. Nanokristalle werden z. B. in den Bereichen der Optoelektronik, LEDs, Solarzellen oder bei biomedizinischen Anwendungen eingesetzt (Zaba, 2017, S. 28). Kohlenstoff-Nanopartikel haben eine hohe Festigkeit bei niedrigem Gewicht und bieten auch durch eine gute und einstellbare elektrische Leitfähigkeit Vorteile im Bereich der Elektrotechnik (Sengupta, 2020). Metallische Nanopartikel werden in diversen Produkten, wie Beschichtungen, LED-Bildschirmen und Touchscreen-Oberflächen, eingesetzt.

Die Benutzung von Nanowerkstoffen bringt neben vielen Vorteilen jedoch auch deutliche Risiken mit sich (Gazsó, 2016). Das oben beschriebene große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis führt zu einer sehr hohen chemischen Reaktivität der Werkstoffe. Speziell im Kontakt mit Menschen sind in der Vergangenheit mehrfach Komplikationen aufgetreten, da eine Aufnahme der kleinen Partikel über Haut, Lunge oder Verdauungstrakt in den Körper möglich ist. Nanopartikel können sogar in Zellen eindringen und zur Schädigung der DNA oder der Entstehung von Krebs, wie in der Lunge, beitragen.

7.5 Robotik

Roboter werden in unterschiedlichsten Formen und mit unterschiedlichsten Aufgaben eingesetzt. In industriellen Fertigungen werden sie eingesetzt, um schwere, monotone und gefährliche Arbeiten von Arbeiter:innen zu nehmen. In sozialen Bereichen werden sie seit Kurzem eingesetzt, um Pfleger:innen im Umgang mit Patient:innen zu unterstützen, da hier ein großer Personalmangel besteht. So unterschiedlich wie der Einsatz ist, so unterschiedlich sind natürlich auch die Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe.

Industrieroboter

Roboter haben in der Industrie sehr unterschiedliche Aufgaben. In der Fertigung sortieren, transportieren und bearbeiten sie oft schwere Lasten, die sie mit schnellen Bewegungen bei hohen Beschleunigungen bewegen. Um hier den Energiebedarf klein zu halten, sind Leichtbauwerkstoffe für einen stabilen Rahmen mit beweglichen Gelenken gefragt. Zum Einsatz kommen hier diverse Stähle, die durch spezielle Wärmebehandlungen oder Legierungselemente eine geeignete Festigkeit bei geringem Gewicht aufweisen, auch wird hier durch konstruktive Maßnahmen versucht, Gewicht zu sparen. Alternativ werden Werk-

stoffe mit geringerer Dichte eingesetzt, dies können Aluminium oder auch faserverstärkte Verbundwerkstoffe sein. Bei faserverstärkten Kunststoffen können die Fasern optimal zur Belastungsrichtung positioniert werden.

Je nach Aufgabe des Industrieroboters arbeiten sie auch mit filigranen kleinen Bauteilen und somit ist auch ein Greifen eines kleinen Werkstücks nötig. Um dieses dabei nicht zu beschädigen, sind spezielle Werkstoffe im Kontakt nötig. Weiche und elastische Polymere, wie Silikon, können in Verbindung mit Sensoren ein filigranes Greifen der Werkstücke garantieren.

Soziale Roboter

Soziale Roboter
Roboter, die für den Zweck des sozialen Austauschs mit Menschen mittels z. B. Gestik, Kommunikation und Mimik entwickelt wurden und im direkten Umfeld mit Menschen arbeiten, werden soziale Roboter genannt.

Soziale Roboter für den Pflegebereich und das Gesundheitswesen müssen in einigen Fällen zwar auch beim Transport von Patient:innen oder zur Unterstützung des Pflegepersonals mechanische Arbeiten erfüllen, ihre Hauptaufgabe ist aber oft die Betreuung von Patient:innen (Bendel, 2021). Hierzu sind das gemeinsame Arbeiten und die Zusammenarbeit mit dem Menschen ein wichtiger Aspekt. Um auf nahem Raum mit Menschen zu kooperieren, benötigen Roboter viele Sensoren, die den Kontakt und Abstand zu Pflegepersonal und Patient:innen wahrnehmen, aber auch Möglichkeiten besitzen, auf die Menschen Einfluss zu nehmen. Hierbei kommen diverse Sensoren und deren spezielle Werkstoffe zum Einsatz. Zur Kommunikation mit den Menschen benötigt ein Roboter Lautsprecher für die Sprachausgabe, Gliedmaßen für die Gestik und auch Möglichkeiten für die Mimik. Damit Roboter mit Menschen interagieren können, ohne durch starre Arme und Hände Schaden anzurichten, wird an elastischen und weichen Materialien geforscht (Hardman et al., 2022; Kondo et al., 2020). Unter dem Begriff Soft-Sensing und taktile Schnittstellen wurden aus einem dehnbaren, gelatinebasierten Material, das biologisch abbaubar und biokompatibel ist, realitätsnahe Hände entwickelt. Durch die Zugabe von Sensoren aus Natriumchlorid erkennt das Material sogar Dehnung, Temperatur und Feuchtigkeit, ähnlich wie die Muskeln und Nerven, die dies im menschlichen Körper erkennen und an das Gehirn melden. Das Material lässt sogar eine Selbstheilung in einem gewissen Maße bei Raumtemperatur zu. Durch die Integration der Sensoren sind nun Roboterbewegungen in Menschenumgebung oder gar Umarmungen möglich, ohne dass der Roboter zu viel Kraft ausübt. Zur Darstellung einer Mimik, also einer reaktionsbedingten Bewegung der einzelnen Gesichtspartien, werden ebenfalls Werkstoffe benötigt, die ähnlich zur Haut eine große Elastizität benötigen. Roboter wie „Sophia“ von Hanson Robotics oder auch „Ameca“ von der Firma Engineered Arts Limited aus UK können dies bereits sehr gut umsetzen (Bendel, 2021; Küppers, 2018, S. 87).

Mensch-Roboter-Kollaboration oder Cobots

Ein relativ neuer Anwendungsbereich von Robotern ist eine Kombination der bereits genannten Industrieroboter und der sozialen Roboter, die der Cobots oder der Mensch-Roboter-Kollaboration. Hierbei handelt es sich um soziotechnische Roboter und Robotersysteme, die vermehrt im industriellen Bereich eingesetzt werden, jedoch mit dem Menschen kooperieren (Buxbaum & Sen, 2021, S. 379). Dazu sind sie nicht in Käfigen oder hinter Schutzzäunen positioniert, sondern agieren an der Seite der Menschen (Buxbaum & Sen, 2021, S. 379). Roboter können so in direkter Zusammenarbeit mit Menschen diverse Tätigkeiten ausführen. Ob es dabei um Logistik, Kommissionierung oder Montage geht,

spielt keine Rolle, denn der Roboter ist mit Sensoren ausgestattet, die den Menschen und seine Präsenz erkennen können, um so eine hohe Unfallsicherheit zu gewährleisten (Buxbaum & Sen, 2021, S. 380). Kollisionen wären eine große Gefahr für Menschen, da ein Roboter, der evtl. mehrere Tonnen heben und bewegen kann, den mitarbeitenden Menschen schwere Verletzungen zufügen könnte (Buxbaum & Sen, 2021, S. 380). Die Vorteile, die ein Roboter mit sich bringt, können die Arbeitenden jedoch deutlich unterstützen. Beispielsweise ist ein Cobot auf der Werkbank montiert als Hilfsmittel für diverse Tätigkeiten angedacht. Die Sicherheitsbedingungen, denen die meisten Industrieroboter unterliegen, sind hier nicht zutreffend. Die Sicherheit wird über unterschiedliche Systeme der Roboter gewährleistet, die zusätzlich zu den Standardsensoren, wie Trittmatten, Lichtschranken etc., eingesetzt werden. Einige Roboter können eine Kollision durch Kraftübertragung erkennen und andere können jegliche Berührung durch sensorische Werkstoffoberflächen erkennen. Kameras und Bildverarbeitungssysteme helfen außerdem (Buxbaum & Sen, 2021, S. 386–387).



ZUSAMMENFASSUNG

Werkstoffe werden in unterschiedlichen Branchen und Domänen eingesetzt. Meist werden sie als Hilfsmittel für spezielle Tätigkeiten und Aufgaben verwendet. Wenn man die unterschiedlichen Domänen Medizintechnik, Maschinenbau, Elektrotechnik, Mechatronik und Robotik vergleicht, so existieren übergreifend viele gemeinsame Anforderungen, es gibt jedoch auch sehr spezielle Anforderungen je Domäne.

Das Gewicht von Produkten ist branchenübergreifend bei vielen Anwendungen ein wichtiges Thema. Daher sind Werkstoffe, die eine gute Festigkeit bei geringer Dichte bieten, sehr gefragt – sei es in der Robotik, im Maschinenbau oder in der Medizintechnik. Der Energieverbrauch bei Apparaten ist ebenfalls in diversen Branchen, wie der Elektrotechnik, Robotik, Mechatronik und Medizintechnik, im Fokus. Eine effiziente Anwendung beinhaltet hier bspw. eine gute elektrische Leitfähigkeit, reibungsarme Komponenten und eine gute Wärmeabführung, die jedoch Anwendende nicht gefährdet.

Niedrige Kosten sind ebenfalls in allen Branchen eine Voraussetzung, wenngleich ein Kosten-Nutzen-Vergleich in den unterschiedlichen Bereichen differenziert ausfällt. Während man oft in der Medizintechnik bereit ist, für die Gesundheit mehr zu investieren, ist dies in anderen Branchen nur für spezielle Produkte der Fall.

Individuelle Anforderungen fordern auch in den einzelnen Domänen spezielle Werkstoffe. Der enge Kontakt mit Patient:innen oder gar die Integration in den menschlichen Körper setzt eine gute Biokompatibilität von Werkstoffen voraus. Innovative Produkte fordern Werkstoffe mit z. B. höheren Einsatztemperaturen, besserer elektrischer Leitfähigkeit und niedrigerem Gewicht. Neue Einsatzgebiete erschließen wiederum neue Anforderungen an Werkstoffe – wie der Einsatz sozialer Roboter in

Pflegebereichen. Die Entwicklung neuer Werkstoffe für spezielle Anwendungen kann aber auch später in andere Branchen und Bereiche übernommen werden, wie anfangs für Luft- und Raumfahrt entwickelte Werkstoffe, die nun weit verbreitet sind.

ANHANG

LITERATURVERZEICHNIS

- Bargel, H.-J. & Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde [electronic resource]*//*Werkstoffkunde* (12. Aufl.). Konradin Business GmbH; Springer.
- Bauer, F. (2021). *Tribologie: Prägnant und praxisrelevant*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32920-4>
- Behrens, V. & Späth, D. (2005). Kontaktwerkstoffe für Schaltkontakte in der Niederspannungs-Energietechnik. *Bulletin.ch:Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE/revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES*, 96(17), 27. <https://doi.org/10.5169/seals-857831>
- Bendel, O. (Hrsg.). (2021). *Soziale Roboter: Technikwissenschaftliche, wirtschaftswissenschaftliche, philosophische, psychologische und soziologische Grundlagen*. Springer Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-31114-8>
- Buxbaum, H.-J. & Sen, S. (2021). Soziotechnische Robotersysteme in Produktion, Pflege und Alltag – neue Wege der Mensch-Maschine-Interaktion. In O. Bendel (Hrsg.), *Soziale Roboter: Technikwissenschaftliche, wirtschaftswissenschaftliche, philosophische, psychologische und soziologische Grundlagen*. Springer Gabler Verlag.
- Czichos, H. (2019). *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme* (4. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26294-5>
- Eyerer, P., Schüle, H. & Elsner, P. (Hrsg.). (2020). *Polymer Engineering 3: Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung* (2. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59839-9>
- Gazsó, A. (2016). Nanomaterialien und Technikfolgenabschätzung – Instrumente des gesellschaftlichen Umgangs mit Nanomaterialien in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s00506-016-0355-y>
- Hardman, D., George Thuruthel, T. & Iida, F. (2022). Self-healing ionic gelatin/glycerol hydrogels for strain sensing applications. *NPG Asia Materials*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41427-022-00357-9>
- Hofmann, H. & Spindler, J. (2018). Kontaktwerkstoffe. *Werkstoffe in der Elektrotechnik*, 174–189. <https://doi.org/10.3139/9783446458635.007>
- Hofmann, H. & Spindler, J. (2019). *Aktuelle Werkstoffe: Neue Materialien für innovative Produkte*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59440-7>
- Hornbogen, E., Eggeler, G. & Werner, E. (2019). *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen* (12. Aufl.). Springer Vieweg.

- Kondo, M., Melzer, M. [Michael], Karnaushenko, D., Uemura, T., Yoshimoto, S., Aklyama, M., Noda, Y., Araki, T., Schmidt, O., Sekitani, T., Melzer, M., Akiyama, M. & Schmidt, O. G. (2020). *Imperceptible magnetic sensor matrix system integrated with organic driver and amplifier circuits* (Bd. 6). Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay6094>
- Küppers, E. U. (2018). *Die humanoide Herausforderung: Leben und Existenz in einer anthropozänen Zukunft*. Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17920-5>
- Langbein, S. & Czechowicz, A. (2021). *Formgedächtnistechnik: Entwickeln, Testen und Anwenden* (2. Aufl.). Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17904-5>
- Rösler, J., Harders, H. & Bäker, M. (2019). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe* (6. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26802-2>
- Schiebold, K. (2021). *Schweiß- und Lötverbindungen und ihre Prüfung: Lehr- und Arbeitsbuch für Ausbildung und Praxis*. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-658-31328-9_2
- Schuh, G., Zeller, V. & Stich, V. (Hrsg.). (2022). *Handbuch Produktion und Management: Bd. 9. Digitalisierungs- und Informationsmanagement*. Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63758-6_11
- Sengupta, J. (2020). Application of carbon nanomaterials in the electronic industry. *Micro and Nano Technologies*, 421–450. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821381-0.00017-X>
- Weißbach, W., Jaroschek, C. & Dahms, M. (2018). *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr* (20. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-19892-3>
- Wellmann, P. (2019). *Materialien der Elektronik und Energietechnik: Halbleiter, Graphen, Funktionale Materialien* (2. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26992-0>
- Wintermantel, E. & Ha, S.-W. (2002). *Medizintechnik mit biokompatiblen Werkstoffen und Verfahren* (3. Aufl.). Springer.
- Wintermantel, E. & Ha, S.-W. (2009). *Medizintechnik: Life Science Engineering; Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologien, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business* (5. Aufl.). Springer. <http://search.ebscohost.com.pxz.iubh.de:8080/login.aspx?direct=true&db=cat05114a&AN=ihb.47685&lang=de&site=eds-live&scope=site>
- Zaba, C. (2017). Nanomaterialien in Forschung, Industrie und Umwelt – Fallbeispiele für nanoskopische Referenzmaterialien. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 69(1–2), 25–33. <https://doi.org/10.1007/s00506-016-0365-9>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Eigenschaftsgruppen von Werkstoffen	16
Tabelle 1: Übersicht zu Werkstoffeigenschaften	17
Abbildung 2: Fachspezifische Anforderungen an Werkstoffe	18
Abbildung 3: Beatmungsgerät	19
Tabelle 2: Anforderungen an ein Beatmungsgerät	20
Abbildung 4: Die drei Bindungsarten	24
Abbildung 5: Formen der Elementarzellen	25
Tabelle 3: Atome einer Elementarzelle	25
Abbildung 6: Gitterbaufehler	26
Abbildung 7: Korngrenzen	27
Tabelle 4: Mechanische und physikalische Eigenschaften von Eisen	28
Abbildung 8: Abkühl- und Aufheizkurve von reinem Eisen	29
Abbildung 9: Vereinfachtes Eisen-Kohlenstoff-Schaubild	30
Tabelle 5: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Keramik zu Stahl	34
Abbildung 10: Sinterprozess bei Keramiken	36
Abbildung 11: Aufbau von Polyethylen	40
Abbildung 12: Anordnung der Seitengruppen	40
Abbildung 13: Strukturen der Polymere	41
Tabelle 6: Vergleich der Polymere	42
Abbildung 14: Verbundarten und Faserrichtung	44
Tabelle 7: Typische Faserwerkstoffe und ihre Festigkeiten	45

Abbildung 15: Ausheilung von Gitterbaufehlern	47
Abbildung 16: Gefügeänderung durch Rekristallisation	48
Abbildung 17: Ausscheidungen im Grundgitter	49
Abbildung 18: Martensitische Umwandlung durch Härten	50
Tabelle 8: Unterschied zwischen mechanischer Belastung und Beanspruchung	55
Abbildung 19: Mechanische Beanspruchungsarten	56
Abbildung 20: Anfangsbereich eines Spannungs-Dehnungs-Diagrammes bei unterschiedlichen Elastizitätsmodulen	57
Abbildung 21: Elastische Verformung eines Metallgitters	58
Abbildung 22: Viskoelastische Verformung von Thermoplasten	59
Abbildung 23: Elastische Verformung von Elastomeren	60
Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit Phasen und Kennwerten	61
Abbildung 25: Plastizität bei Metallen	62
Abbildung 26: Wandern von Versetzungen	62
Abbildung 27: Überbeanspruchung bei Keramiken	63
Abbildung 28: Zustandsdiagramme des Kriechens	64
Abbildung 29: Makroskopische Bruchformen	66
Abbildung 30: Bruchbild eines Ermüdungsbruches	67
Abbildung 31: Inter- und transkristallines Bruchbild	68
Tabelle 9: Übersicht Werkstoffe hinsichtlich Elastizitätsmoduls und Dichte	69
Abbildung 32: Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher Werkstoffe	70
Abbildung 33: Bändermodell eines Leiters, Isolators und Halbleiters	73
Abbildung 34: Halbleiter	75
Tabelle 10: Elektrische Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffe und Medien	76

Abbildung 35: Magnetisierung eines Werkstoffes bis zur Sättigung	77
Abbildung 36: Magnetisierungskurve	78
Tabelle 11: Spezifische Wärmeleitfähigkeit einiger Werkstoffe bei 20 °C	79
Abbildung 37: Einflussfaktoren durch Beanspruchung	87
Tabelle 12: Elektrodenpotential der Metallionen	89
Tabelle 13: Übersicht von gefährdeten Werkstoffen und korrespondierenden Medien ..	93
Abbildung 38: Gießdefekte	101
Abbildung 39: Rasterelektronenmikroskop mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie	104
Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Kennwerten	106
Abbildung 41: 3-Punkt-Biegeversuch	106
Abbildung 42: Wöhlerkurve	107
Tabelle 14: Bezeichnung von Stählen nach DIN EN 10027-1	109
Tabelle 15: Übersicht über die Werkstoffhauptgruppen und Nummern nach DIN EN 10027- 2	110
Tabelle 16: Bezeichnungen für 99,5 Prozent reines Aluminium nach verschiedenen Nor- men und Vereinigungen	110
Tabelle 17: Keramikgruppen und deren Bezeichnung nach DIN EN 60 672* und DIN EN 14 232**	111
Abbildung 43: Produktlebenszyklus mit Recycling	115
Tabelle 18: Beispiele von Sensorwerkstoffen mit Applikationen	129
Tabelle 19: Beispiele von Aktorwerkstoffen mit Applikationen	130



IU Internationale Hochschule GmbH
IU International University of Applied Sciences
Juri-Gagarin-Ring 152
D-99084 Erfurt



Postanschrift
Albert-Proeller-Straße 15-19
D-86675 Buchdorf



media@iu.org
www.iu.org



Hilfe & Kontakt (FAQ)
Antworten rund um Dein Studium findest
Du jederzeit auf myCampus.