

Georg Abts

Kunststoff-Wissen für Einsteiger

Grundlagen, Eigenschaften und
Recycling polymerer Werkstoffe



4., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

HANSER

Georg Abts

Kunststoff-Wissen für Einsteiger

Grundlagen, Eigenschaften und
Recycling polymerer Werkstoffe

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Der Autor:

Dipl.-Ing. Georg Abts

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [<http://dnb.dnb.de>](http://dnb.dnb.de) abrufbar.

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

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen in folgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

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

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Kösel Media GmbH, Krugzell

ISBN: 978-3-446-46291-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46525-1

ePub-ISBN: 978-3-446-46527-5

Der Autor

Dipl.-Ing. Georg Abts arbeitete nach seinem Studium 20 Jahre in der damaligen Abteilung Anwendungstechnik des Geschäftsbereichs Kautschuk der Bayer AG, Leverkusen. Danach wechselte er in den Geschäftsbereich Polycarbonates der Covestro AG (ehemals Bayer MaterialScience AG). Er ist Mitglied des CAMPUS-Arbeitskreises und blickt heute auf eine über 30-jährige Erfahrung mit polymeren Werkstoffen zurück.

Er ist darüber hinaus Autor des Buches: Einführung in die Kautschuktechnologie, Carl Hanser Verlag, 2019, 978-3-446-45461-3

Vorwort zur 4. Auflage

Synthetische Polymerwerkstoffe sind im Vergleich zu Metallen und Keramik eine relativ junge Werkstoffklasse, die mittlerweile aber einen Spitzenplatz unter den modernen Werkstoffen erobert hat. Kunststoffe besetzen nicht nur die Lücke zwischen natürlichen Werkstoffen wie Holz oder Keramiken einerseits und hochfesten metallischen Werkstoffen andererseits. Sie haben sich in vielen Fällen auch als günstige Alternativen für diese Materialien durchgesetzt.

Ein wesentlicher Vorteil von Kunststoffen ist ihre geringe Dichte. Verpackungen aus Kunststoff sind leichter und bruchfester als Glas. Gebäude werden durch Kunststoffe vor Wärmeverlusten geschützt, Fahrzeuge werden leichter, elektrische Geräte sicherer. Zudem erfordert die Herstellung von Kunststoffen einen geringeren Bedarf an Primärenergie als die Produktion von Metallen oder keramischen Werkstoffen. Damit tragen Kunststoffe auch zu einem verminderten Ausstoß an Kohlendioxid bei. Weiterhin ermöglichen Kunststoffe eine einfache und effiziente Herstellung geometrisch komplexer Produkte mit weitaus mehr Gestaltungsfreiheit als Metalle oder keramische Werkstoffe.

Somit haben Kunststoffe sich aus der ursprünglich zugedachten Rolle als Ersatzprodukte für edle Naturstoffe wie Elfenbein oder für knapper werdende Rohstoffe wie Naturkautschuk längst zu einer eigenständigen Werkstoffklasse weiterentwickelt. Durch immer weiter steigende Anforderungen und neue Anwendungsgebiete hat sich auch das Spektrum der verfügbaren Kunststoffe erheblich erweitert. Kunststoffe bieten oft maßgeschneiderte Lösungen für moderne technische Herausforderungen.

→ Daher sind Kunststoffe für viele Einsatzgebiete unverzichtbar.

Waren Kunststoffe vor einigen Jahren durchweg mit einem positiven Image belegt, hat sich dieses Bild aufgrund der zunehmenden Wahrnehmung der Bevölkerung für die Belastung der Umwelt mit Kunststoffabfällen inzwischen gewandelt. Die durch Kunststoffabfälle verursachte Vermüllung unseres Planeten, insbesondere der Meere (Marine-Litter), stellt vermutlich eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Zwar stammt der überwiegende Anteil des in die Meere eingetragenen Kunststoffmülls aus Ländern ohne ausgeprägtes Abfallmanagement, es ist jedoch zu einfach, mit dem Finger auf die Länder zu zeigen, die bis vor kurzem bereitwillig einen Teil des Kunststoffabfalls der Industriestaaten importiert haben, oder die nun die Schwelle zur Industrienation überschritten haben, was mit einem erhöhten Bedarf an Konsumgütern und individueller Mobilität einher geht.

Allerdings lassen auch die in den Industriestaaten etablierten Systeme zur Verwertung von Abfällen keine sortenreine Trennung von Kunststoffen zu. Selbst dann stellt sich noch die Problematik des Recyclings, da auch sortenreine Kunststoffe noch vielfältige Variationen ihrer Zusammensetzung aufweisen.

Zudem führt die wiederholte thermische Behandlung zu einem immer weiter fortschreitenden Abbau der Polymerketten und damit zum Verlust mechanischer und thermischer Eigenschaften. Kunststoffmüll lässt sich aber schon dadurch reduzieren, indem bereits vor der geplanten Verwendung über den späteren Verbleib in der Umwelt nachgedacht wird. Beispielsweise ist eine übertriebene Verpackung preiswerter Konsumgüter ebenso vermeidbar wie die Verwendung von winzigen Kunststoffteilchen (Mikroplastik) als Reibkörper in Kosmetikartikeln.

Allerdings ist ein vollständiger Ersatz von Kunststoffen auf Basis fossiler Rohstoffe wie Erdöl oder Erdgas schlichtweg nicht realisierbar. Der Weg zurück zu Metallen, Glas oder keramischen Werkstoffen ist aufgrund des deutlich höheren Energieverbrauchs bei der Herstellung und beim Transport nicht gangbar. Auch Papier, selbst mit sehr hohem Anteil Altpapier, zeigt eine schlechtere Ökobilanz als Kunststoff. Zwar lassen sich Kunststoffe für Verpackungen, die das größte Anwendungsgebiet ausmachen, teilweise durch Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe ersetzen. Diese wiederum beanspruchen aber ebenfalls Anbauflächen und Wasser und stehen damit in Konkurrenz zur Produktion von Lebens- und Futtermitteln für die wachsende Weltbevölkerung und deren Nutztiere. Zudem lassen sich hochwertige Kunststoffe allein auf diese Weise nicht gewinnen. Auf der anderen Seite erfüllen kompostierbare Produkte bei weitem nicht die Anforderungen anspruchsvoller technischer Produkte hinsichtlich mechanischer und insbesondere thermischer Beständigkeit sowie der geforderten Langlebigkeit. Außerdem verführen sogenannte „Biokunststoffe“ wiederum zu einem Anstieg von Einwegartikeln, die womöglich achtlos weggeworfen werden.

Ein absoluter Verzicht auf Kunststoffe würde unausweichlich mit einem Verzicht auf individuelle Mobilität, Verzicht auf moderne Konsumgüter, Verzicht auf Lebensqualität, aber dafür mit deutlich ansteigenden Emissionen einhergehen. Gleichwohl bleibt festzustellen, dass es Anwendungen gibt, bei denen der Kunststoffanteil reduziert werden kann, oder der Einsatz recycelter Kunststoffe möglich ist.

Dieses Buch soll dazu beitragen, die komplexe Vielfalt der Kunststoffe besser zu verstehen und auf ihre positiven Eigenschaften aufmerksam zu machen.

Nach einem historischen Rückblick auf die Entwicklung der Werkstoffe werden die verschiedenen Arten synthetischer Werkstoffe von den traditionellen Werkstoffen auf metallischer und keramischer Basis abgegrenzt und ihre Vor- und Nachteile erläutert. Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung liegt der Schwerpunkt auf den Thermoplasten, deren wichtigste Vertreter mit einem kurzen Eigenschaftsprofil vorgestellt werden. Daneben werden aber auch die Werkstoffklassen der Elastomere und Duroplaste charakterisiert, um das Spektrum der synthetischen Werkstoffe vollständig aufzuzeigen. (Zur detaillierteren Beschreibung der Elastomere sei auf mein Buch „Einführung in die Kautschuktechnologie“ verwiesen).

Zudem werden auch Verbundwerkstoffe beschrieben, die insbesondere im Leichtbau eine immer größere Bedeutung gewinnen. Ein weiteres Kapitel befasst sich mit den am meisten verbreiteten Verarbeitungsverfahren, dieses enthält auch einen kurzen Abriss über die Möglichkeiten der additiven Fertigung. Einige Prüfverfahren und Werkstoffkenngrößen werden vorgestellt, um einen Bezug zu den in den Werkstoffbeschreibungen der Hersteller gegebenen Daten zu

bieten. Die noch relativ neuen Biokunststoffe werden vorgestellt und die Thematik des Kunststoffmülls sowie die Problematik des Recyclings ausführlich besprochen.

→ Insofern hoffe ich, dass dieses Buch eine möglichst neutrale Grundlage für eine sachliche Diskussion bieten kann.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hanser Verlags, insbesondere bei Ulrike Wittmann für ihre Unterstützung als Lektorin sowie Jörg Strohbach für die Umsetzung und Produktion dieses Buches.

Georg Abts, April 2020

Inhaltsverzeichnis

Titelei

Impressum

Der Autor

Vorwort zur 4. Auflage

Inhaltsverzeichnis

1 Natürliche und synthetische Werkstoffe

1.1 Definitionen

1.2 Historische Entwicklung

1.3 Abgrenzung der Kunststoffe von Metallen und keramischen Werkstoffen

1.3.1 Aufbau

1.3.2 Dichte

1.3.3 Mechanische Eigenschaften

1.3.3.1 Allgemeine Betrachtungen

1.3.3.2 Metalle

1.3.3.3 Keramische Werkstoffe

1.3.3.4 Spezifisches Verhalten von Thermoplasten

1.3.3.5 Spezifisches Verhalten von Elastomeren

1.3.3.6 Spezifisches Verhalten von Duroplasten

1.3.3.7 Betrachtung weiterer mechanischer Kennwerte

1.3.3.8 Verhalten unter dynamischer Belastung

1.3.4 Gebrauchstemperatur

1.3.5 Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit

1.3.6 Elektrische Leitfähigkeit

1.3.7 Optische Eigenschaften

1.3.8 Akustische Eigenschaften

1.3.9 Verhalten gegenüber Chemikalien und Umwelteinflüssen

1.3.10 Prinzipielle Unterschiede bei der Verarbeitung

1.3.11 Zusammenfassender Vergleich

1.4 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe

2 Polymere Werkstoffe

2.1 Chemische Grundlagen

2.2 Grundlagen polymerer Werkstoffe

2.3 Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation

2.4 Arten polymerer Werkstoffe

2.4.1 Klassifizierung

2.4.2 Temperaturabhängige Charakteristik

2.4.3 Thermoplaste

2.4.4 Elastomere

2.4.5 Thermoplastische Elastomere

2.4.6 Duroplaste

2.4.7 Faserverstärkte Kunststoff-Verbundwerkstoffe
(Composites)

3 Thermoplaste

3.1 Herstellung

3.2 Einteilung

3.3 Standardkunststoffe: Eigenschaften, Charakteristik, Anwendungen

3.3.1 Polyethylen (PE)

3.3.2 Polypropylen (PP)

3.3.3 Polyvinylchlorid (PVC)

3.3.4 Polystyrol (PS)

3.4 Technische Thermoplaste

3.4.1 Styrol-Acrylnitril-Kunststoff (SAN)

3.4.2 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoff (ABS)

3.4.3 Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Kunststoff (ASA)

3.4.4 Polyamide (PA)

3.4.5 Polymethylmethacrylat (PMMA)

3.4.6 Polyethylenterephthalat (PET)

3.4.7 Polybutylenterephthalat (PBT)

3.4.8 Polycarbonat (PC)

3.4.9 Polyoxymethylen (POM)

3.4.10 Polyphenylenether (PPE)

3.4.11 Polymerblends

3.5 Hochleistungskunststoffe

3.5.1 Fluorkunststoffe

3.5.2 Polyarylsulfone (PSU), Polyethersulfone (PES),
Polyphenylensulfone (PPSU)

3.5.3 Polyphenylensulfid (PPS)

3.5.4 Polyaryletherketone (PAEK)

3.5.5 Polyimide (PI)

3.5.6 Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP)

3.6 Elektrisch leitfähige Polymere

3.7 Thermoplastische Elastomere (TPE)

3.7.1 Übersicht und Nomenklatur

3.7.2 Spezifisches Eigenschaftsprofil

3.7.2.1 Thermoplastische Elastomere auf Basis von Polyetheramiden (TPA)

3.7.2.2 Thermoplastische Elastomere auf Basis Polyetherester (TPC)

3.7.2.3 Unvernetzte (TPO) und vernetzte (TPV) thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis

3.7.2.4 Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis (TPS)

3.7.2.5 Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU)

3.8 Biopolymere/Biokunststoffe

4 Kunststoffadditive

4.1 Füllstoffe

4.2 Faserwerkstoffe

4.3 Weichmacher

4.4 Flammschutzmittel

4.5 Stabilisatoren

4.6 Farbmittel

4.7 Weitere Additive

5 Die Verarbeitung von Thermoplasten

5.1 Aufbereiten

5.2 Urformen

5.2.1 Spritzgießen

5.2.2 Extrusion

5.2.3 Blasformen

5.2.4 Kalandrieren

5.2.5 Rotationsformen (Rotomolding)

5.2.6 Wirbelsintern

5.2.7 Schäumen

5.2.8 Tempern

5.2.9 Additive Fertigung

5.3 Umformen

5.4 Fügen

5.4.1 Schweißen

5.4.2 Kleben

5.4.3 Nieten

5.4.4 Schrauben

5.4.5 Schnappverbindungen

5.5 Veredelung

6 Kennwerte von Thermoplasten

6.1 Rheologische Eigenschaften

6.1.1 Schmelzindex (MVR, MFR), ISO 1133

6.1.2 Schwindung, ISO 294

6.2 Mechanische Eigenschaften

6.2.1 Zugversuch, ISO 527

6.2.2 Schlag- und Kerbschlagbiegeversuch, ISO 179
(Charpy)/ISO 180 (Izod)

6.3 Thermische Kennwerte

6.4 Brandverhalten

6.5 Elektrische Prüfungen

6.6 Sonstige Kennwerte

6.6.1 Härte

6.6.2 Druckverformungsrest (ISO 815)

6.6.3 Dynamische Prüfungen

7 Kunststoffe und Umwelt

7.1 Aktuelle Situation im Jahr 2019

7.2 Recycling von Werkstoffen

7.3 Recycling von Metall, Glas, Keramik und Papier

7.3.1 Recycling von Stahl

7.3.2 Recycling von Aluminium

7.3.3 Recycling von Glas

7.3.4 Recycling von Keramik

7.3.5 Recycling von Papier

7.4 Recycling von Kunststoffen

7.4.1 Kunststoffabfall in Zahlen und Fakten

7.4.2 Generelle Probleme beim Recyceln von Kunststoffen

7.4.3 Einteilung und Kennzeichnung von Kunststoffabfällen

7.4.4 Verwertung von Kunststoffabfällen

7.4.4.1 Produktionsabfälle

7.4.4.2 Verarbeitungsabfälle

7.4.4.3 Sortenreine Kunststoffabfälle

7.4.4.4 Verbundteile aus mehreren Kunststoffen

7.4.4.5 Faserverstärkte Kunststoffe

7.4.4.5 Elastomere und Duroplaste

7.4.4.6 Gemischte Kunststoffabfälle

7.4.4.7 Chemisches Recycling

7.4.4.8 Zusammenfassung

7.5 Fazit

8 Übersichtstabellen

9 Glossar

10 Weiterführende Literatur

1 **Natürliche und synthetische Werkstoffe**

Erdgeschichtlich betrachtet, sind synthetische Polymere eine recht junge Werkstoffklasse. Die meisten wurden erstmalig Anfang bis Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts hergestellt. Einige Kunststoffe gab es auch schon im auslaufenden neunzehnten Jahrhundert, ohne dass ihre genaue Zusammensetzung jedoch bekannt war. Im Vergleich dazu sind metallische und keramische Werkstoffe bereits seit Jahrtausenden in Gebrauch.

Definiert man Kunststoffe als nicht natürlich vorkommende, künstlich hergestellte Stoffe, muss man aber auch solche Materialien dazu zählen, die durch Umwandlung aus natürlichen Stoffen hergestellt werden. Dann allerdings reicht die Geschichte der Kunststoffe viele tausend Jahre zurück. Bevor näher auf die Geschichte der polymeren Werkstoffe eingegangen wird, sollen daher zuerst natürliche und synthetische Werkstoffe voneinander abgegrenzt werden.

1.1 **Definitionen**

Nach Brockhaus sind Werkstoffe „alle Materialien mit technisch nutzbaren Eigenschaften (...). Der Zustand eines Werkstoffes wird durch seinen Aufbau und seine Eigenschaften charakterisiert (...). Der Aufbau eines Werkstoffes ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung (...). Entsprechend der technischen Anwendung werden Werkstoffe nach ihren mechanischen (z. B. Zugfestigkeit, Elastizität, Härte), chemisch-physikalischen (z. B. Schmelzpunkt, Dichte, Korrosionsbeständigkeit), Feld- (magnetischen, elektrischen, elektromagnetischen) oder verarbeitungstechnischen Eigenschaften ausgewählt.

Die Werkstoffe lassen sich in die drei Hauptgruppen Metalle, nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe und organische Stoffe unterteilen. Zur Herstellung von Verbundwerkstoffen werden verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert.“ [8]. Eine Einteilung der Werkstoffe nach Zusammensetzung zeigt [Bild 1.1](#).

Natürliche Werkstoffe sind beispielsweise Holz, Pflanzenfasern (Baumwolle, Flachs und Hanf), Metalle, Minerale, Erdöl, Erdgas, Kohle, Asphalt, Harze und Naturkautschuk. Metalle zählen aufgrund ihres Vorkommens (fast ausschließlich Erze) auch zu den Mineralien. Als mineralische Werkstoffe im engeren Sinne sollen hier natürlich vorkommende anorganische (meist silikatische) Verbindungen oder deren chemische Umwandlungsprodukte betrachtet werden. Für ihre weitere Verwendung werden natürliche Werkstoffe mechanisch oder chemisch-thermisch umgewandelt, wobei letzteres oft mit einer deutlichen Änderung von Eigenschaften einhergeht.

Ausgehend von den bekannten Eigenschaften der Rohmaterialien lassen sich die entsprechenden Anwendungsgebiete relativ leicht erschließen. Die aus Eisenerzen gewonnenen Stähle sind wichtige

Konstruktionswerkstoffe. Edelmetalle sind neben ihrer Verwendung als Schmuck und Zahlungsmittel unverzichtbare Rohstoffe für die Elektro- und Elektronikindustrie. Holz wird als Bauwerkstoff und Rohstoff für die Papierherstellung verwendet. Pflanzenfasern sind wichtige Rohstoffe für die Textilindustrie. Erdöl, Erdgas und Kohle dienen in überwiegendem Maß als fossile Brennstoffe, daneben bilden sie die Rohstoffbasis der gesamten organischen Chemie. Asphalt, ein Gemisch aus hochmolekularen Kohlenwasserstoffen (Bitumen) und Mineralstoffen, dient als Straßenbelag. Asphalt wird heute zwar meist synthetisch hergestellt, es gibt jedoch noch bedeutende natürliche Vorkommen. Das verwendete Bitumen kann wiederum sowohl aus natürlichen als auch synthetischen Quellen, wie etwa der Erdöldestillation, stammen.

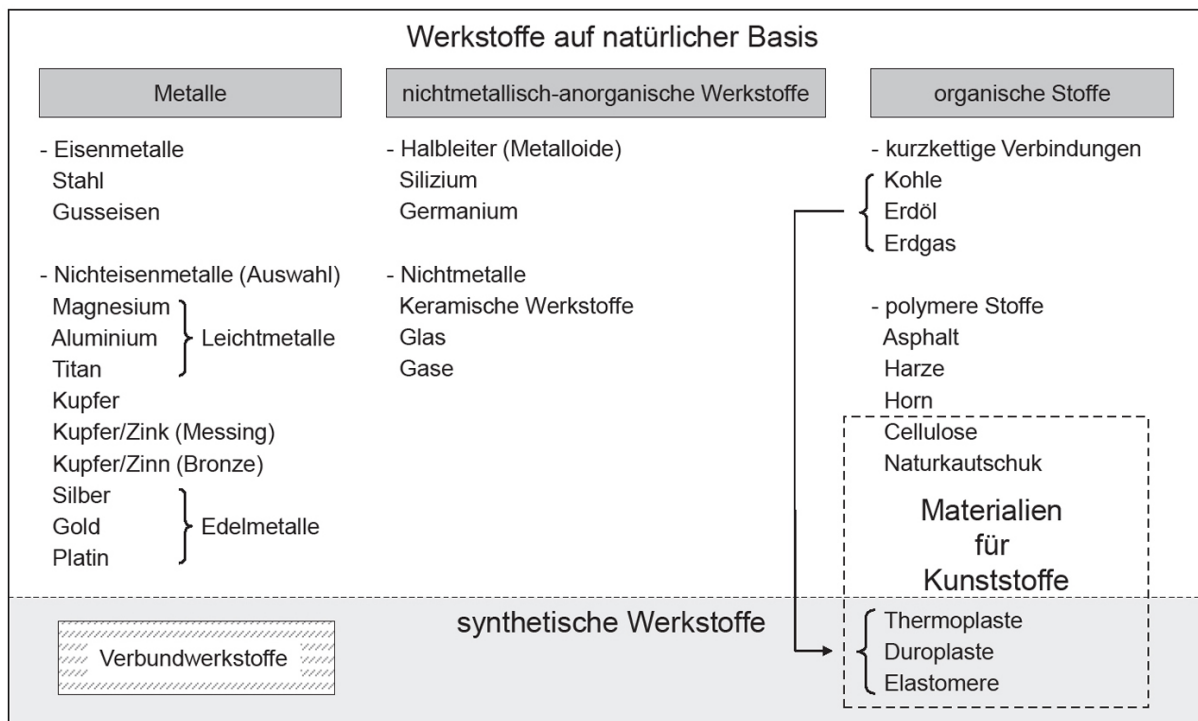


Bild 1.1 Einteilung der Werkstoffe aufgrund ihrer Zusammensetzung

Naturkautschuk, der in riesigen Plantagen angebaut wird, ist ein unverzichtbarer Werkstoff für hoch beanspruchte Elastomererzeugnisse wie beispielsweise Autoreifen. Dagegen haben Harze wie Schellack, Kolophonium oder Bernstein heute nur noch untergeordnete wirtschaftliche Bedeutung und werden hauptsächlich zur Fertigung von Schmuck oder als Pflegemittel für Musikinstrumente (Streichbögen) verwendet.

Die Eigenschaften natürlicher Werkstoffe sind zunächst festgelegt, lassen sich aber in vielen Fällen durch chemisch-thermische Umwandlungen ändern. Dagegen werden synthetische Werkstoffe gezielt hergestellt, um ein bestimmtes Eigenschaftsprofil zu erzielen. Allerdings haben die Bausteine synthetischer Werkstoffe wiederum eine natürliche Basis (Erdöl, Erdgas, Kohle, Minerale), wenn auch oft über den Umweg einer oder mehrerer chemischer Reaktionen.

Die Grenze zwischen natürlichen und synthetischen Werkstoffen verläuft also fließend. Holz ist unbestritten ein natürlicher Werkstoff, die Anwendung als Konstruktionswerkstoff erfordert lediglich mechanische Verfahren, bei denen die grundlegenden Eigenschaften nicht weiter verändert werden. Dagegen erfordert die industrielle Herstellung von Papier aus Holz bereits den Einsatz von Chemikalien. Papier ist demnach also ein umgewandelter Naturstoff.

Naturkautschuk, der feste Bestandteil im Latex des Kautschukbaums, wird erst durch chemische Umwandlung (Vulkanisation in Anwesenheit von Schwefel und Metalloxiden) zu einem technisch wertvollen Material, Gummi. Da dessen Eigenschaften durch geeignete Auswahl der Chemikalien sowie der Reaktionsbedingungen innerhalb bestimmter Grenzen beeinflusst werden, kann man die auf diese Weise erhaltenen

Produkte entweder als umgewandelte Naturstoffe oder auch bereits als synthetische Werkstoffe bezeichnen. Auch die Erzeugung von Stahl aus Eisenerz lässt sich sowohl als Umwandlung eines natürlichen Rohstoffs (Eisenerz) als auch zur Herstellung eines synthetischen Werkstoffs (Stahl) mit gewünschten Eigenschaften definieren. Durch Zumischen anderer chemischer Elemente in bestimmten Anteilen (legieren) sowie durch Nachbehandlungen (Glühen, Härten, Anlassen) lassen sich spezielle Eigenschaften, wie etwa höhere Festigkeit, erzielen. So sind Stähle Legierungen aus Eisen mit bis zu 2 % Kohlenstoff sowie weiteren Elementen wie Chrom, Nickel und Vanadium mit bis zu über 5 % Gesamtanteil. Dabei treten zwischen Eisen und den Legierungselementen keine chemischen Reaktionen auf. Lediglich die Entfernung von überschüssigem Kohlenstoff sowie von Begleitelementen des Eisens (Schwefel, Silizium, Phosphor und Mangan) erfolgt über Oxidation (Reaktion mit Sauerstoff).

Thermoplaste (z. B. Polyethylen) oder Duroplaste (z. B. Epoxidharze) wird man zunächst aber kaum als umgewandelte natürliche Werkstoffe bezeichnen, obwohl die zu ihrer Herstellung erforderlichen Rohstoffe durch verschiedene chemische Reaktionen aus Erdöl gewonnen werden. Erdöl ist aber nichts anderes als ein Verrottungsprodukt von Pflanzen. Man kann also die modernen synthetischen polymeren Werkstoffe (Kunststoffe) auch als umgewandelte Naturprodukte betrachten. Da man das Zusammenfügen einzelner Teile zu einem Ganzen allgemein als Synthese bezeichnet, und die Chemie sich im Wesentlichen mit der Herstellung von Produkten aus bestimmten Ausgangsstoffen befasst, kann man alle Produkte, die aus chemischen Reaktionen hervorgehen, als synthetische (künstliche) Stoffe bezeichnen, unabhängig davon,

ob die Ausgangsstoffe natürlichen oder künstlichen Ursprungs sind. Hierzu zählen auch alle durch Transformationsprozesse aus natürlichen Stoffen hervorgegangenen Werkstoffe, also auch die durch das Brennen von Ton erhaltenen frühzeitlichen Keramiken.

Im Allgemeinen Sprachgebrauch werden jedoch lediglich synthetische Polymerwerkstoffe als Kunststoffe bezeichnet. Oft wird auch zwischen Kunststoff und Gummi unterschieden, obwohl – wie zuvor beschrieben – selbst Gummi aus Naturkautschuk ein synthetisches Produkt, also ein Kunststoff, ist. Dies gilt dann natürlich besonders für Gummi auf Basis von Synthesekautschuken. Weiterhin wird bei Kunststoffen oft auch nicht zwischen Thermoplasten und Duroplasten unterschieden. Es sollen im Folgenden alle gezielt, also zur Erlangung bestimmter Eigenschaften, hergestellten polymeren Werkstoffe als Kunststoffe definiert werden, unabhängig davon, ob sie auf natürliche oder synthetische Basis zurückgehen.

1.2 Historische Entwicklung

Keramische Materialien galten für lange Zeit als die ältesten künstlich hergestellten Werkstoffe überhaupt. Nur mineralische und biologische Materialien (Steine, Knochen, Elfenbein) waren bereits länger in Gebrauch. Gebrannter Ton war zwar seit etwa 26.000 v. Chr. bekannt, wurde in Gefäßform jedoch schätzungsweise erst gegen 10.000 v. Chr. benutzt. Seit der Erfindung des Porzellans (etwa 700 bis 800 n. Chr. in China, 1694 in Europa) haben keramische Gefäße bis heute ihren festen Platz unter den Gebrauchsgegenständen. Neue keramische Hochleistungswerkstoffe finden heute in der Automobilindustrie

sowie in der Luft- und Raumfahrt Verwendung. Das im Gegensatz zu keramischen Werkstoffen transparente Glas ist seit ca. 1.500 v. Chr. bekannt.

Archäologische Funde deuten darauf hin, dass schon bereits etwa 9.000 Jahre vor der Zeitenwende elementares Kupfer bekannt war. Die gezielte Gewinnung durch Reduktion und Schmelzen von Kupfererzen erfolgte vermutlich schon ca. 6.000 v. Chr. in Vorderasien. Aus dieser Region stammen auch die ältesten Nachweise für eine bewusste Legierung von Kupfer zu Bronze (4.000 v. Chr.) sowie der frühen Verarbeitung von Eisen (um 1.400 v. Chr.). Dabei war man in Europa bis zum 14. Jahrhundert A.D. nicht in der Lage, die zum Gießen erforderliche Temperatur zu erzeugen und musste Werkzeuge durch wiederholtes Erweichen und Hämmern (Schmieden) formen. Das seitdem hergestellte Gusseisen (das in China bereits seit 600 v. Chr. bekannt war) wurde erst ab etwa Mitte des 19. Jahrhunderts in den meisten Anwendungen mehr und mehr von Stahl verdrängt, nachdem neue Verfahren die zum Schmelzen des Eisens erforderlichen Temperaturen ermöglichten. Mit Gusseisen bezeichnet man Eisenlegierungen mit Kohlenstoffanteilen oberhalb von etwa 2 %. Durch den gegenüber Stahl verringerten Schmelzpunkt kann es in einfachen Öfen geschmolzen und in Formen gegossen werden. Die meisten Gusseisensorten zeigen im Gegensatz zu Stahl ein sprödes Bruchverhalten, weisen jedoch eine höhere Verschleißfestigkeit auf. Dies wird auch heute noch im Maschinenbau ausgenutzt. Die Leichtmetalle Aluminium und Titan wurden bereits im Jahr 1825 erstmalig und stark verunreinigt gewonnen. Die industrielle Verwendung in hochreiner Form wurde jedoch erst ab 1854 (Aluminium) und 1938 (Titan) durch verbesserte Verfahren ermöglicht.

Als maßgeblicher Grund für die Suche nach neuen Werkstoffen kann zunächst – leider – die fortschreitende Entwicklung der Waffentechnik gelten. Man kann davon ausgehen, dass neue und bessere Materialien zunächst dem Militär und einer kleinen, begüterten Oberschicht zur Verfügung standen. Später fanden diese Werkstoffe auch zur Herstellung von Gebrauchsartikeln (Kochgeschirr, Schmuck) oder zur Verstärkung hölzerner Gegenstände Verwendung. Damit einher ging auch die Entwicklung geeigneter Verarbeitungsverfahren. So waren bereits in der Römerzeit klassische Schmiedetechniken wie Feuerschweißen und Härten bekannt.

Auch die Suche der Alchimisten nach dem Stein der Weisen und Versuche, Gold herzustellen, mögen ebenso wie aus Neugier durchgeführte Experimente zu neuen Werkstoffen geführt haben. Systematische Forschungen wurden jedoch erst mit der Einführung des Periodensystems und die durch den französischen Chemiker Antoine Laurent Lavoisier Ende des 18. Jahrhunderts beschriebenen Grundlagen ermöglicht. Durch die zunehmende Industrialisierung – insbesondere Westeuropas ab Ende des 18. Jahrhunderts – stieg der Bedarf an Rohstoffen kontinuierlich. Mit höherem Lebensstandard wuchs auch die Nachfrage nach hochwertigeren Kleidungsstücken oder Bedarfsgegenständen. Der rapide steigende Verbrauch an Naturfarben, Kautschuk oder Seide sowie an Luxusgütern wie Elfenbein, Schildpatt und Perlmutter ließ deren Preise beständig steigen. Gleichzeitig befand man sich in der Abhängigkeit der Erzeugerländer oder deren Kolonialherren. Sogar der in großen Mengen in Europa vorhandene Marmor war vor der Erfindung der Eisenbahn im 19. Jahrhundert aufgrund seines hohen Gewichts und dem dadurch bedingten kostspieligen Transport ein Luxusgut.

Die Suche nach entsprechenden Ersatzstoffen (Surrogate), zunächst durch Umwandlung von Naturprodukten, wurde daher zum maßgeblichen Treiber der neu entstandenen chemischen Industrie. Diese hatte sich ab etwa Mitte des 19. Jahrhunderts überwiegend mit der Entwicklung von Farbstoffen befasst, um immer teurer werdende Naturprodukte (wie Indigo) zu ersetzen. Dabei bildeten zufällige Entdeckungen bei der Suche nach neuen Farbstoffen die Grundlagen der heutigen pharmazeutischen Chemie. Anfang des 20. Jahrhunderts begann außerdem die gezielte Entwicklung von Synthesekautschuken mit dem Ziel, den immer knapper und gleichzeitig teurer werdenden Naturkautschuk zu ersetzen. Thermoplaste und Duroplaste spielten bis in die ersten Jahrzehnte des zwanzigsten Jahrhunderts nur eine untergeordnete Rolle. Aufbau und Struktur polymerer Werkstoffe wurden erstmals 1920 durch Hermann Staudinger erklärt. Seine Arbeiten wurden aber erst einige Jahre später nach Vorliegen entsprechender Röntgenstrukturuntersuchungen allgemein anerkannt, was die systematische Entwicklung neuer polymerer Werkstoffe erst ermöglichte. Die bis dahin entwickelten synthetischen Polymere basierten im Grunde genommen auf Vermutungen und experimentellen Erfahrungen. In einigen Fällen führte auch der Zufall zur Entwicklung neuer Polymere ([Bild 1.2](#)).

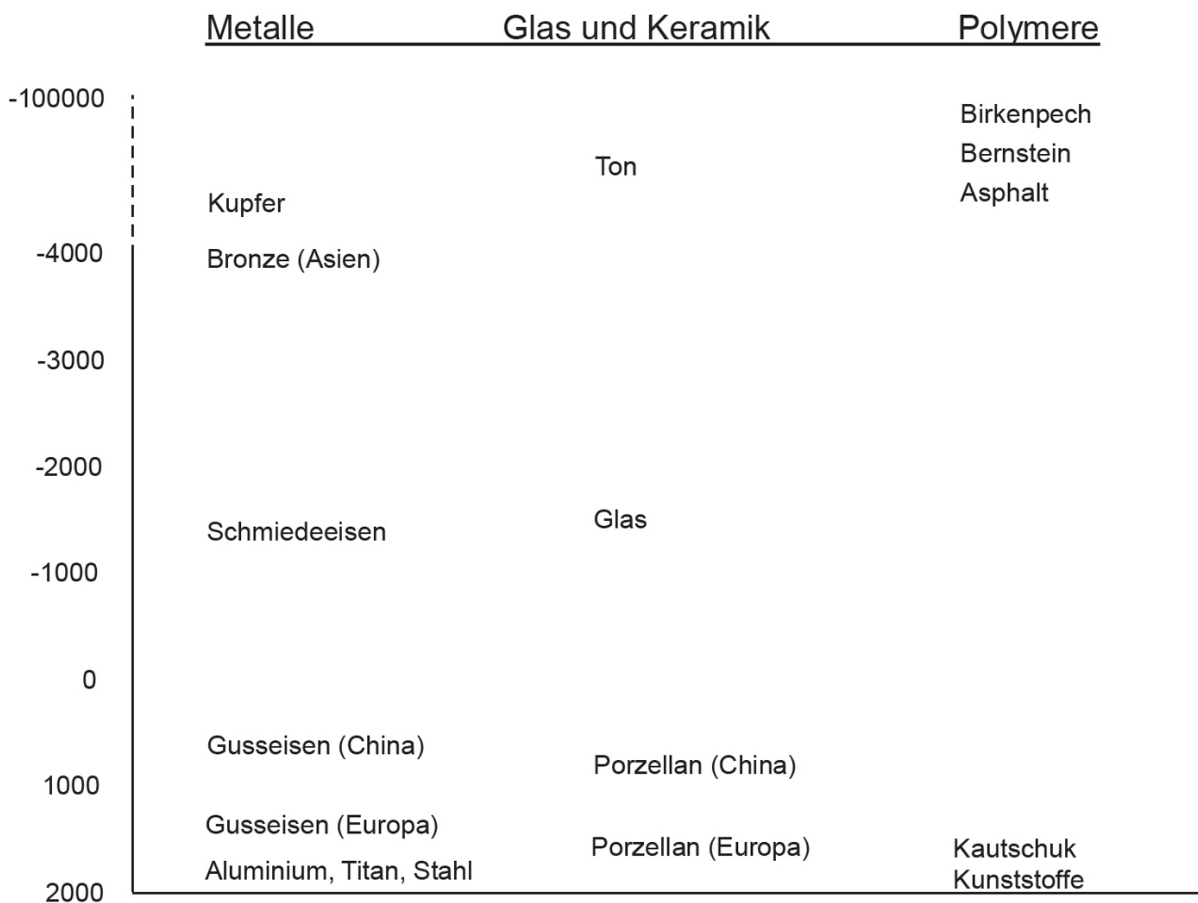


Bild 1.2 Historische Entwicklung der Werkstoffe

Polymere der Steinzeit – Natur pur?

Natürliche Polymere, wie Asphalt und Bernstein, waren schon seit Jahrtausenden in Gebrauch. Im vorderen Orient wurde Asphalt bereits um 6.500 v. Chr. zum Straßenbau und zur Abdichtung von Gefäßen verwendet. Neuere archäologische Funde zeigten, dass bereits vor mindestens 80.000 Jahren eine thermoplastische Substanz gezielt hergestellt wurde, die damit als ältester Kunststoff der Welt bezeichnet werden kann. Aus der Rinde der Birke wurde durch einen anaeroben Verschmelungsprozess Birkenpech gewonnen, eine schwarze,

schwach aromatisch riechende Substanz, die vielfältige Funktionen erfüllte. So wurden damit Pfeilspitzen aus Knochen oder Stein an den Schäften befestigt, aber auch Federn, die den Flug stabilisierten. Daher muss diese Substanz relativ dünnflüssig verarbeitet worden sein. Auch Feuersteine, die damals als Messerklingen fungierten, wurden mittels Birkenpech in Griffen aus Holz befestigt. Weiter liegen auch Hinweise über das Kleben zerbrochener keramischer Gefäße (etwa 5.090 v. Chr.) vor. Birkenpech wurde bis in die Römerzeit verwendet und später durch Holzteer abgelöst.

Aktuelle Versuche zeigten, dass die Herstellung offenbar eine gewisse Erfahrung voraussetzte. Es ist bis heute strittig, wie Birkenpech unter den damaligen Verhältnissen gewonnen wurde. Fest steht jedoch, dass Birkenpech bereits in der Steinzeit häufig verwendet wurde und anscheinend relativ leicht herzustellen war.

Gummi – Von Meuterern, Macs und Monopolen

Der Entdecker Christoph Kolumbus und der Konquistador Hernán Cortez stießen während ihrer Reisen nach Südamerika (1495/1519) erstmals auf elastische Bälle, die bei den dortigen Einwohnern in Verwendung waren, maßen aber ihrer Entdeckung keine weitere Bedeutung bei. In Europa wurde das Interesse an Kautschuk im Jahr 1751 aufgrund von Berichten des Astronomen und Geographen Charles-Marie de La Condamine und des Ingenieurs C. F. Fresneau geweckt. Sie hatten sich mehrere Jahre zur Vermessung von Meridianen in Südamerika aufgehalten und dabei das Zapfen von Kautschukbäumen beobachtet. Aus der Rinde des später von Botanikern *Hevea brasiliensis* genannten