

Werkstoffe/Fertigung – Überblick

Die Vorlesungsreihe „Werkstoffe/Fertigung“ im 2. oder 3. Studienjahr umfasst ein Semester und wird mit einer Klausur abgeschlossen. Sie ist ein Wahlpflichtangebot für ID und Interessenten. Dafür werden 2 ECTS-Punkte vergeben.

Im Zusammenhang mit der Vorlesung ist die Lehrveranstaltung „Modelle im Designprozess/ Modellbautechniken“ zu sehen, deren Bestandteil auch eine Einführung in die Möglichkeiten der Kunststoffwerkstatt ist.

Die Lehrveranstaltung „Statik“ (primär im 3. Studienjahr) greift bestimmtes hier vermitteltes Wissen auf.

Werkstoffe/Fertigung – Literaturlauswahl

Wilhelm Domke „Werkstoffe und Werkstoffprüfung“,
Cornelsen-Verlag, ISBN 3-590-81220-6,
55.- DM / 32.- -€

Bernd Klein „Leichtbau-Konstruktion“,
Vieweg, ISBN 3-528-44115-1,
31.- €

Dubbel „Taschenbuch Maschinenbau“
Springer-Verlag, ISBN 3-540-67777-1,
118.- DM / 79.95 €

Rudolf Koller „Konstruktionslehre für den Maschinenbau“,
Springer-Verlag, ISBN 3-540-57928-1,
74,- DM nicht mehr lieferbar

Werner Krause „Konstruktionselemente der Feinmechanik“,
Hanser, ISBN 3-446-16530-4,
198,- DM / 99.- €

- „Tabellenbuch Stahl“,
Beuth-Verlag, ISBN 3-410-13229-5,
96,- DM nicht mehr lieferbar

Hans Domininghaus „Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften“,
Springer-Verlag, ISBN 3-540-62659-X,
349,- DM / 175.- €

Wolfgang Ludeck „Handbuch der Kleb-, Gieß- und Laminierertechnik“
nicht mehr lieferbar

Christian Bonten „Kunststofftechnik für Designer“
Hanser-Verlag, ISBN 3-446-22158-1
29,90 €

Chris Lefteri „Kunststoff 2“
avedition, ISBN 3-89986-067-5
48 €

Werkstoffe/Fertigung – Gliederung

1. Einführung
2. Werkstoffe
 1. Glas
 2. Keramik
 3. Metalle (Stahl, Aluminium)
 4. Kunststoffe (incl. Recycling und Ökologie)
3. Urformverfahren
 1. Metalle
 2. Kunststoffe
 1. Spritzguss
 2. Pressen
 3. Extrudieren
 4. Hohlkörperblasen
 5. Schäumen

Weitere Aspekte (Umformen, Fügen, etc.) sind entsprechend den aktuellen Semesterprojekten möglich.

Werkstoffe/Fertigung – Begriffe

Technologie

„Wissenschaft von den Gesetzmäßigkeiten, Regeln, Methode und Prinzipien der materiell-technischen Seite des Produktionsprozesses und deren Gestaltung...“

1772 wurde der Begriff von Prof. Johann Beckmann eingeführt.

Werkstoffe

„Werkstoffe sind Arbeitsmittel rein stofflicher Natur, die in Produktionsprozessen als Arbeitsgegenstände weiter verarbeitet werden und in die jeweiligen Endprodukte eingehen. In der Regel handelt es sich dabei um Festkörper. Die Qualität und die Eigenschaften der Endprodukte oder auch von Halbzeugen werden durch die **Wahl** mehr oder weniger geeigneter Werkstoffe entscheidend beeinflusst.“ Aus Wikipedia. Andere Definitionen nehmen Bezug auf technisch nutzbare Eigenschaften und beziehen somit auch teilweise Flüssigkeiten und Gase mit ein.

Mit dem Begriff Werkstoffe gehen einher Werkstoffeigenschaften, Werkstoffauswahl und Werkstoffprüfung.

Fertigungstechnik

„...erzeugt Produkte, die durch stoffliche und geometrische Merkmale gekennzeichnet sind.“

Fertigungsverfahren

untergliedern sich in **sechs Hauptgruppen** (Siehe Darstellung in PDF-Datei)

Die **Wahl** des Fertigungsverfahrens richtet sich nach Grundkriterien:

- Haupttechnologie
d.h. die mit einem Fertigungsverfahren herstellbaren Größen, Formen und bearbeitbaren Werkstoffe
- Fehlertechnologie
d.h. die durch die Fertigung bedingten Fehler des Maßes, Form, Lage und Oberfläche. Qualität ist Fertigen innerhalb vorgegebener Fehlergrenzen
- Wirtschaftlichkeit
wie viel kann pro Zeiteinheit gefertigt werden (Mengenleistung), wie hoch sind die Kosten für die Vorbereitung (Vorbereitungskosten), zur Auftragswiederholung (Auftragswiederholungskosten), die Einzelkosten (dem Werkstück direkt zuordenbar) und die Folgekosten (z.B. Lagerkosten).
Damit lassen sich konkurrierende Fertigungsverfahren vergleichen. Wie flexibel ist ein Fertigungsverfahren (mengenflexibel, umstellflexibel), d.h. wie schnell kann auf veränderte Anforderungen reagiert werden.
- Anpassung der Arbeit an den Menschen
Fertigungsmittel und -verfahren dürfen Mensch und Umwelt möglichst wenig belasten. Sicherheitsnormen müssen eingehalten werden.

Werkstoffe/Fertigung – Werkstoffauswahl

Werkstoffauswahl ist ein Optimierungsprozess.

Unterschiedlichste Parameter des Werkstoffs, seiner Verarbeitung sowie ökonomische und ökologische Aspekte mit ihren jeweiligen Wichtungen sind zu berücksichtigen.

Zu letzteren gehören Energieeinsparung, Rohstoffeinsparung (Leichtbau) und Langlebigkeit. Diese wird nicht nur durch technische Randbedingungen (z.B. Korrosions- und Verschleißschutz) geprägt sondern zunehmend durch gestalterische Kompetenz. Schon im Entwurfsprozess werden Entscheidungen zur Wiederverwertbarkeit und zu Stoffkreisläufen getroffen.

Auswirkungen der Werkstoffauswahl auf...

- Das Konstruktionsprinzip und den grundsätzlichen Aufbau des Erzeugnisses
- Fertigungsverfahren, Verbindungs- und Montageverfahren
- Beständigkeit des Erzeugnisses gegenüber den zu erwartenden Beanspruchungen
- Erzeugnismasse und damit verbundene Folgekosten
- Nutzungsdauer, Recyclingfähigkeit, Reparatur- und Instandhaltungsaufwand
- Endpreis sowie Kosten für Transport und Nutzung

Zusammenhänge und enge Verzahnungen bestehen

Werkstoff – Stückzahl – Verfahren

Konstruktion (i.w.Sinne Design) – Technologie (Herstellung) - Werkstoff

Werkstoffe/Fertigung – Glas

Definition:

Glas ist ein anorganischer Werkstoff, der aus dem Schmelzfluss (1300...1500 °C, Quarzglas 1700 °C) „glasig“ erstarrt (sehr langsam zur Vermeidung von inneren Spannungen) und aus Oxiden und Silikaten gewonnen wird: Quarzsand (SiO_2), Flussmittel wie Natriumoxid (NaO) und Stabilisatoren.

Glasgruppen:

Je nach chemischer Zusammensetzung entsteht

- Quarzglas (reines geschmolzenes SiO_2)
- Silikatglas
- Borosilikatglas (Silikatglas mit Zusätzen von Borsäure)
- Bleiglas (Silikatglas mit Bleioxid)
- Aluminosilikatglas, Aluminoborosilikatglas

Glasverarbeitung bei ca. 1000 °C durch Walzen, Pressen, Ziehen und Blasen:

- Flachglas, Glashohlkörper
- Glasfäden
- Glasgespinst
- Glaswatte (durch Zerschleudern des Glassflusses)
- Glaswolle (durch Zerblasen des Glasflusses)
- Glasgewebe
- Schaumglas (Einbringen von Luft in Glasfluss, Wärme- und Schallschutz, schwimmfähig)

Glasanwendung:

- Flachmaterial: Drahtglas, Sicherheitsverbundglas, Spiegel
- Verstärkungsmaterial für GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff)
- Rohrleitungen, Laborgeräte

Glaseigenschaften:

- Korrosionsbeständig (gegen Säuren außer Flusssäure, weniger gegen Laugen)
- Nicht beständig bei langzeitigem Angriff von Säuren, Laugen und Wasser („Blind werden“) und bei bestimmten Holzschutzmitteln
- Geringe Wärmedehnung, geringe Wechseltemperaturbeständigkeit (außer Quarzglas)
- Stossempfindlich, spröde
- Druckfestigkeit 400...1300 N/mm²
- Zugfestigkeit 30...90 N/mm², also nur ein Bruchteil der Druckfestigkeit
- Erweichungstemperatur 500 °C (Quarzglas über 1200 °C)
- Gute dielektrische Eigenschaften (Isolationswirkung)
- Wärmeausdehnungskoeffizient 80...100 x 10⁻⁷ K⁻¹

Glasbearbeitung:

- In erwärmtem Zustand plastisch verformbar
- Bei Raumtemperatur mit Hartmetall-/Diamantwerkzeugen spanend bearbeitbar (drehen, bohren, fräsen, hobeln)
- polierfähig

Glasverbindungen:

- Verkitten mit Glaszement
- Fügen durch verschmelzen/verschweißen (alle Gläser deren Wärmeausdehnungskoeffizient gleichgroß/ähnlich ist)
- Umschmelzen von Metallen (Wärmeausdehnungskoeffizient beachten)
- Kleben mit Silikonkautschuk, Cyanoacrylatklebstoff, Epoxidharz

Werkstoffe/Fertigung – Keramik

Definition:

Keramiken sind nichtmetallisch-anorganische Sinterwerkstoffe. Außer der hier behandelten Technischen Keramik (Silikatkeramik, Oxidkeramik mit Aluminiumoxid und Zirkonoxid) gehören noch Porzellan, Steinzeug, feuerfeste Steine u.ä. hinzu.

Geschichte:

Starke Impulse kommen durch die Motoren- und Turbinentechnik. Je höher die Temperatur, desto besser die Energieumwandlung, z.B. 1400...1500 °C bei Gasturbinen. 1981 erste Keramikmotoren in Japan. Motoren von außen berührbar und ohne Kühlsystem, nur Abgaskühlung über Abgasturbolader.

Herstellung (stark vereinfacht):

Die aufbereiteten Ausgangsstoffe (z.B. Quarzsand, Siliziumnitrid/-karbid) werden über Zwischenschritte verdichtet (sogenannter „Grünling“, der noch bearbeitbar ist) und anschließend unter Wärme und Druck zum fertigen Bauteil gebrannt. Die Porosität ist dann nur noch sehr gering („Weißzustand“ bei dem Bearbeitung im µm-Bereich nur äußerst schwierig mit Diamantwerkzeugen möglich ist).

Keramikeigenschaften (Zusammenfassung):

- Hohe Härte; auch in der Wärme
- Festigkeitswerte bleiben auch in der Wärme erhalten
- Hohe Hitzebeständigkeit
- Niedrige Wärmeleitfähigkeit (thermische Isolationswirkung)
- Niedrige elektrische Leitfähigkeit (Isolator, auch Ausnahmen)
- Hohe Verschleißfestigkeit
- Niedrige Dichte (2,1...4,0 g/cm³, vergleichbar Aluminium mit 2,5...2,7 g/cm³ aber nur ca. 50% des für die Aluminiumgewinnung notwendigen Energieaufwandes)
- Korrosions- und Medienbeständigkeit (Laugen, Säuren, wässrige Medien)
- Oxidations- und Heißgaskorrosionsbeständigkeit

Nachteilig:

- Festigkeitswerte schwanken größer (Schwankungsbreite 40%)
- Mechanische Eigenschaften stark abhängig von Reinheit und Aufbereitung der Ausgangsmaterialien
- Bauteilprüfung schwierig
- Niedrige Bruchzähigkeit (0,5...10Mpa)
- Meist mittlere bis geringe Wärmedehnung (aber unterschiedlich zu Metallen, deswegen schwierig bei Verbunden); Nulldehnung möglich
- Schlechte Thermowechselbeständigkeit
- Rissempfindlichkeit
- Wissen und Forschung zu Keramik sind noch nicht so umfangreich wie bspw. bei Metallen und Kunststoffen. Auch bedingt durch die komplizierte Technologie

Keramik Anwendungsgebiete:

- Gleitlager (Keramik – Graphit), Wälzlagerkugeln, Gleitringdichtungen
- Hitzeschilde
- Medizin (Endoprothesen)
- Teile von Verbrennungsmotoren:
 - Kolbenbolzen, Ventile, Ventileinsätze (Masseträgheit der Ventile verantwortlich für Drehzahl; z.B. durch Gewichtsverringerung Steigerung der Drehzahl von 5000 auf 6000 min⁻¹)
 - Keramiknocken (speziell geschliffen, d.h. Ventile schließen leichter, damit Kraftstoffverbrauchssenkung)
 - Vorkammereinsätze, Brennraumauskleidungen, Lagerstellen
- Turbolader und Gasturbinenteile (Brennkammer, Leitkranz, Laufrad/Rotoren)

Werkstoffe/Fertigung – Stahl

Herstellung, Legierungselemente, Wärmebehandlung

Definition

Stahl ist im engeren Sinne eine Eisen – Kohlenstoff – Legierung mit $< 2\%$ Kohlenstoff. Weitere Legierungselemente sind üblich und beeinflussen die Eigenschaften. Stahl wird plastisch umgeformt und kann einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Bei Kohlenstoffanteilen $> 2\%$ spricht man von Gusseisen.

Stahlherstellung

Der klassische Weg nutzt Eisenerz und Koks zur Erzeugung von Roheisen unter Schlackeanfall. Das Roheisen wird im Hochofen einer Oxidation ausgesetzt, dem sogenannten Frischen. Es entsteht Stahl, der (beruhigt oder unberuhigt) vergossen wird.

Legierungen

Durch Legierungselemente kommt es zu Eigenschaftsänderungen im Stahl. Diese werden auch durch eine Wärmebehandlung erreicht bzw. ergänzt. Beispiele für Legierungselemente und damit erzielbare Veränderungen:

Chrom (Cr): Korrosionsbeständigkeit (bei $>13\%$)

Magnesium (Mg): Desoxydations- und Entschwefelungsmittel

Mangan (Mn): bindet Schwefel (P und S sind unerwünschte Stahlbegleiter)

Molybdän (Mo): Härbarkeit

Nickel (Ni): Streckgrenze, Kerbschlagzähigkeit, Korrosionsbeständigkeit

Wolfram (W): Zugfestigkeit, Streckgrenze, Zähigkeit

Vanadium (V): Verschleißwiderstand

Kobalt (Co): Warmfestigkeit

Wärmebehandlung

Mit Wärmebehandlungen werden Gefügeänderungen und somit Eigenschaftsänderungen erreicht. So kann beispielsweise die Festigkeit verändert oder die nachfolgende spanende Verarbeitung verbessert werden.

Glühen beinhaltet eine Erwärmung, das Halten der Temperatur (Durchwärmen des Werkstücks bei $500\text{...}1300^\circ\text{C}$) und das langsame Abkühlen auf Raumtemperatur.

Beim **Härten** von Stahl wird dieser erwärmt und anschließend rasch abgekühlt (Abschrecken).

Vergüten beinhaltet Härten und anschließendes Anlassen, d.h. eine geringere Erwärmung.

Werkstoffe/Fertigung – Stahl

Normgerechte Kennzeichnung

Die Kennzeichnung von Stählen ist in Normen festgelegt. Es gilt die Euronorm EN 10027-1 (Kurznamen) und EN 10027-2 (Nummernsystem). Nachfolgend eine kurze Zusammenfassung aus diesen Normen.

Kurznamen

Kurznamen beinhalten eine kurzgefasste Identifizierung von Stahl durch Kennbuchstaben und –zahlen. Sie enthalten Hinweise auf wesentliche Merkmale (z.B. Haupteinsatzgebiete/ physikalisch-mechanische Eigenschaften, wesentliche Zusammensetzung/ Legierungselemente) und werden in zwei Gruppen unterteilt.

- Kurznamen mit Hinweis auf Verwendung und mechanische Eigenschaften

Beispiel: S235JR allgemeiner Baustahl mit der Mindeststreckgrenze 235 Nmm^{-2} . Früher gekennzeichnet mit St 37-2 (Mindestzugfestigkeit 370 Nmm^{-2}), wobei beide Angaben inhaltlich gleichwertig sind. Bei manchen Stählen ist nach wie vor die Kennzeichnung auf die Mindestzugfestigkeit bezogen. Auch wenn keine Aussagen zur chemischen Zusammensetzung bzw. den Legierungselementen ablesbar sind, so sind diese aber auch genormt.

- Kurznamen mit Bezug auf chemische Zusammensetzung

Da Stahl ein Eisen-Kohlenstoff-Gemisch mit Legierungselementen ist wird genau darauf Bezug genommen: Kohlenstoffgehalt und Gehalt der wesentlichen Legierungselemente. Es gibt 4 Gruppen die hier stark vereinfacht erläutert werden. Feinheiten sind der Norm zu entnehmen, die auch mechanische Eigenschaften festlegt.

- o **Unlegierte Stähle** mit mittlerem Mangengehalt (Mn) unter 1% werden gekennzeichnet mit dem Kennbuchstaben „C“ und einer Kennzahl, die dem 100fachen Kohlenstoffgehalt entspricht.
Beispiel: C 45 (bedeutend 0,45% Kohlenstoffgehalt)
- o **Unlegierte Stähle** mit mittlerem Mangengehalt (Mn) über 1% und **legierte Stähle** mit Gehalt der einzelnen Legierungselemente $<5\%$ werden gekennzeichnet mit Kennzahl, die dem 100fachen Kohlenstoffgehalt entspricht, gefolgt von den chemischen Symbolen der wesentlichen Legierungselementen und den zugehörigen Prozentzahlen. Diese Prozentzahlen werden **nicht direkt zugeordnet** (1:1) sondern als Faktoren der realen Legierungsgehalte. Für diese Faktoren gibt es eine Zuordnungstabelle laut Norm.

Legierungselement	Faktor
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Beispiel: 13 Cr Mo 4-5 (bedeutend 0,13% Kohlenstoffgehalt, 4:4=1% Chrom und 5:10=0,5% Molybdän; weitere Legierungselemente sind vorhanden laut Norm, aber nicht aufgeführt)

- **Legierte Stähle** wenn mindestens ein Legierungselement >5% ist gekennzeichnet mit dem Kennbuchstaben „X“, gefolgt von einer Kennzahl, die dem 100fachen Kohlenstoffgehalt entspricht. Dahinter folgen die chemischen Symbole der wesentlichen Legierungselementen mit den zugehörigen Prozentzahlen (**direkte Zuordnung** 1:1).

Beispiel: X 6 Cr Ni Ti 18 10 (bedeutend legierter Stahl 0,06% Kohlenstoffgehalt, 18% Chrom, 10% Nickel und nicht näher benannte Anteile von Titan). Dies ist ein nichtrostenden austenitischer Stahl.

- **Schnellarbeitsstähle** gekennzeichnet mit „HS“ und Legierungselementangaben

Nummernsystem

Das Nummernsystem ist ein Zusatz zu den Kurznamen und stellt eine eindeutige Zuordnung von Werkstoffen (nicht nur Stahl) zu Werkstoffnummern und umgekehrt dar. Es folgt dem Schema 1.2345(67), wobei die letzten beiden Ziffern optional sind.

Vor dem Punkt wird die Werkstoffhauptgruppe angegeben:

0 = Gusseisen, Roheisen

1 = Stahl

2 = Schwermetalle außer Stahl

3 = Leichtmetalle (darunter z.B. Aluminium)

4 = Metallpulver, Sinterwerkstoffe

5...8 = Nichtmetallische Werkstoffe

Beispiel: allgemeiner Baustahl **S235JR** entspricht **1.0037**

Legierungselemente/Stahlbegleiter: Einflüsse nur als Auswahl. Bedeutend vielfältiger.

Aluminium (Al): Alterungs- und Zunderbeständigkeit

Beryllium (Be): z.B. Cu-Be-Legierungen für Uhrwerksspiralfedern

Blei (Pb):

Bor (B): hochwarmfeste Stähle, höhere Streckgrenze und Festigkeit

Cer (Ce): Schwefelbinder

Chrom (Cr): bessere Härbarkeit, ab 13% Korrosionsbeständigkeit, Zugfestigkeit 80-100 mehr je 1%

Kobalt (Co): verbesserte Warmfestigkeit, Dauermagnetstähle

Kupfer (Cu): Witterungs- und Chemikalienbeständigkeit

Mangan (Mn): Schwefelbinder

Molybdän (Mo): Schweißbarkeit, Streckgrenze, Festigkeit

Nickel (Ni): Streckgrenze, Kerbzähigkeit

Niob (Nb):

Phosphor (P): Stahlschädling

Schwefel (S): Stahlschädling

Silizium (Si): desoxidierend

Stickstoff (N):

Tantal (Ta)

Titan (Ti): desoxidierend

Vanadium (V)

Wolfram (W): Zugfestigkeit, Streckgrenze, Zähigkeit

Zirkon (Zr): desoxidierend

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Geschichte, Herstellung, Energieeffizienz von Aluminium

1801	in Alaun wird ein Metall vermutet
1821	Entdeckung Bauxit
1827/1847	Wöhler gewinnt Alu-Flitter bzw. stecknadelgroße Kügelchen
1906	Aushärtung von Alu entdeckt (Al-Cu-Mg, Duralumin)

(Rein)Aluminium wird hergestellt aus Bauxit unter hohem Energieeinsatz. Die weltweite **Bauxitförderung** betrug 2008 **190 Millionen** Tonnen. Die **Reserven** liegen bei **22 bis 25 Milliarden** Tonnen.

1 t Aluminium aus 2 t Tonerde (Aluminiumoxid)

dazu werden benötigt:

5 t Bauxit (vereinzelte Quellen gehen von 4 t aus)

500 kg Anodenkohle (für Elektrolyseverfahren)

50 kg Kryolith (Mineral, heute synthetisch)

21000 kWh elektrische Energie (früher; aktuell meist unter 18 kWh)

Anders ausgedrückt:

1 kg Aluminium erforderte früher 21 kWh Strom und heute minimal ca. 13 kWh.

Dazu kommt Energie für den Transport hinzu.

Ca. 57 - 60% des weltweit produzierten Primäraluminiums werden mit Strom aus Wasserkraft erzeugt.

40% werden aus Recyclingmaterial hergestellt. Es werden dabei **nur 5 %** der bei der Primärgewinnung notwendigen Energie benötigt.

Vergleich Aluminium – Stahl: siehe eine der nachfolgenden Seiten.

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Aluminiumlegierungen

Neben reinem Aluminium wird Aluminium meist mit Legierungselementen an die konkreten Erfordernisse angepasst. Je mehr Fremdatome (Legierungselemente) eingebracht sind, desto größer ist die Festigkeit.

Nach verwendeten Legierungselementen bzw. deren Kombination werden aushärtbare und nicht aushärtbare Legierungen unterschieden. Ferner ist eine grundlegende Unterscheidung in Knetlegierungen und Gusslegierungen möglich.

Aluminiumknetlegierungen

Gebräuchliche Legierungselemente sind **Mangan, Zink, Magnesium, Kupfer und Nickel**. Beispiele für Auswirkungen

Mg im Zusammenspiel mit **Si** erzielt die höchsten Korrosionswiderstände der Knetlegierungen.

Cu-haltige Legierungen sind korrosionsgefährdeter als kupferfreie Legierungen.

Legierungen mit **Cu, Mg und Zn** haben nach der Wärmebehandlung hohe Festigkeit (bis 520 Nmm^{-2} bzw. 650 Nmm^{-2}).

Weiterhin können der E-Modul, die Wärmeleitfähigkeit, Längenausdehnung und viele weitere Eigenschaften angepasst werden.

Aluminiumgusslegierungen

Gebräuchliche Legierungselemente sind **Silizium und Magnesium**.

Si führt zu guten mechanischen Festigkeitswerten und Korrosionsfestigkeit. Bei Zusatz von 12% werden die Gießeigenschaften nennenswert verbessert.

Mg erhöht die Warmfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit.

Mit Legierungen auf Basis **Cu** und **Titan** werden nach dem Aushärten hohe Festigkeitswerte erreicht.

Verarbeitungsverfahren sind Sandguss (28%), Kokillenguss (50%), Druckguss (17%) und Schleuder- bzw. Verbundguss (5%).

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Aluminiumlegierungen - Festigkeitssteigerung

Kaltverfestigung

Durch plastische Formänderung (z.B. Kaltwalzen) kommt es zu Verschiebungen im Kristallgitter. Die Moleküle „verhaken“ und behindern sich in ihren weiteren Bewegungsmöglichkeiten.

Aushärten (Wärmebehandlung)

Das Aushärten ist bei einigen Aluminiumlegierungen zur Festigkeitssteigerung möglich und besteht aus drei Teilschritten.

- **Lösungsglühen** bedeutet je nach Werkstoff eine Erwärmung auf ca. 410...560°C. Dabei werden viele der zur Aushärtung führenden Fremdatome im Mischkristall gelöst
- **Abschrecken** im Wasserbad kühlt den Werkstoff rasch wieder auf Raumtemperatur ab.
- **Auslagern** kann kalt (bei Raumtemperatur) erfolgen oder bei erhöhter Temperatur. Die Zeitdauer liegt im Stunden- bis Tagebereich.

Beispiele:

Nicht aushärtbare Legierungen: AlMn, AlMgMn, AlMg, AlSi, AlSiCu

Aushärtbare Legierungen: AlZnMgCu, AlZnMg, AlMgSi, AlCuMg

Duraluminium

Abgeleitet vom lateinischen „durus“ für „hart“. Handelsname z.B. Dural.

Eine ausgehärtete Aluminiumlegierung mit Kupfer unter Zusätzen von Magnesium, Mangan und weiteren.: z.B. AlCu4Mg1 bzw.

Die Zugfestigkeit erreicht 420 - 500 Nmm⁻²

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Verarbeiten von Aluminium

Umformen durch Biegen

Vorteile / Grundlagen:

- Aluminium lässt sich sehr gut umformen unter Beachtung bestimmter Grenzbedingungen;
grundsätzlich Kalt- und Warmbiegen
- Allen Verfahren gemeinsam: saubere, glatte Werkzeuge; „anreißen“ nur mit Bleistift; Oberflächen ggf. mit Folie schützen

Kaltbiegen:

- Beim Biegen und Abkanten **Mindestbiegeradius** beachten:

Je **weicher** Werkstoff und je **geringer** Querschnittsabmessung (in Biegerichtung), desto **geringer** kann innerer **Biegeradius** gewählt werden.

Halbzeuge im ausgehärteten Zustand (AlMgSi, AlCuMg, AlZnMg) sind nur begrenzt umformbar; wenn kleine Biegeradien erforderlich sind, dann im weichen Zustand biegen und erst danach Lösungsglühen und aushärten.

Durch Biegen kommt es in der Biegezone zur sogenannten Kaltverfestigung, d.h. dort höhere Härte, Festigkeit und Streckgrenze

Überbiegen wegen Rückfederung (praktisch ausprobieren)

Warmbiegen:

- Wenn **kleinere Biegeradien** als die Kaltbiegemindestradien erforderlich sind muss **warm gebogen** werden.
- Das Formänderungsvermögen steigt mit zunehmender Temperatur, aber **maximale Umformtemperatur 450°C**; im allgemeinen reichen 300-400°C; bei „hartem“ Zustand bewirkt eine Erwärmung auf 200°C die Halbierung des maximalen Kaltbiege-Mindestradius
- Kleinsten Radius durch Versuch ermitteln
- Warmbiegen vornehmlich bei nicht ausgehärteten und nicht kaltverfestigten Aluminiumsorten, da es in der Erwärmzone zu einem Abfallen der Kaltverfestigung bzw. der Festigkeit allg. kommt.

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Verarbeiten von Aluminium

Fügen durch Kleben

Vorteile / Grundlagen:

- Günstige Spannungsverteilung; kein Wärmeeintrag
- Aluminium lässt sich sehr gut Kleben.
- Kleben gleich Fügen durch Stoffvereinigern:
Adhäsion = Verbindung mit entsprechender Festigkeit des Klebstoffs mit Werkstoff (Klebfläche);
deshalb Klebfläche vorbereiten!
Kohäsion = Festigkeit des Klebstofffilms

Adhäsion größer als Kohäsion bei optimaler Verklebung; wenn nicht die Fügeteile selber brechen, dann erfolgt Bruch in der Klebschicht

- Belastung der Klebfuge nur auf Schub; Schalen vermeiden
Demzufolge sind Aluminiumklebverbindungen Überlapp- und Steckverbindungen
Die Überlapplänge ca. 10 fache Materialdicke
Die Festigkeit des Klebstoffs ist geringer, d.h. Klebfläche vergrößern damit dort nicht Schwachpunkt entsteht
- Klebstoffe sind Duroplaste oder auch Thermoplaste; auch Cyanoacrylate, PVC-Plastiole

Vorbereitung:

- Klebfläche aktivieren durch Beizen und Aufrauen und grundsätzlich Entfetten.
Kein Öl, Fett, Wasser, Wasserdampf darf noch vorhanden sein.

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Verarbeiten von Aluminium

Fügen durch Schweißen

Schweißen ist möglich, wobei bestimmte Legierungen besser dafür geeignet sind (z.B. AlMg..., AlMg...Mn..., AlMgSi...).

Von den **Schmelzschweißverfahren** werden besonders **Schutzgas**-Schweißverfahren (sichtbarer Lichtbogen brennt in einem Schutzgasmantel) verwendet:

- **WIG** (Wolfram-Inertgas-Schweißen mit Wolframanode und meist Argon als Schutzgas unter Wechselstrom bei Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen)
- **MIG** (Metall-Inertgas-Schweißen)

Widerstandsschweißverfahren erbringen in der Naht bis zu 80% des Grundwerkstoffs.

Fügen durch Löten

- **Weichlöten** (Arbeitstemperatur unter 450°C) ist möglich, jedoch wenig gebräuchlich.
- **Hartlöten** ist mit Aluminiumlot bei 540...570°C gebräuchlich.

Durch den Wärmeeintrag nimmt die Festigkeit verfestigter oder ausgehärteter Aluminiumlegierungen, d.h. die des Grundwerkstoffs wieder ab auf den Zustand „weich“.

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Verarbeiten von Aluminium

Oberflächenbehandlung von Aluminium

Chemische und anodische Oxidation:

- Beständigkeit von Aluminium hängt von Oxidschicht (0,01 µm) ab, die sich beim Kontakt mit Luftsauerstoff bildet.
- Bei der chemischen Oxidation werden auf Basis Chromsäure oder Phosphorsäure 2..5 µm starke grün/ gelbe (Grün-, Gelbchromatierung) oder graue (Phosphatierung) Schichten gebildet.
Chromatieren=stromlos, chemische Behandlung der entfetteten und gebeizten Oberfläche; bevorzugt bei Aluminium; ausgezeichneter Haftgrund für organische Beschichtungen
- Bei der anodische Oxidation (elektrolytische Oxidation, Eloxieren) wachsen durch Stromdurchgang harte und abriebfeste Schichten (100fach dicker als natürliche Oxidschicht), die transparent, opak oder farbig sind.
Eigenfärbung oder Tauchen in Farbbädern bzw. Metallsalzen; Haftgrund für Beschichtungen und Klebstoffe
Erzielbare Farben sind in einem Farbfächer definiert: (farblos), Leichtbronze, Hellbronze, Mittelbronze, Dunkelbronze, Schwarz. Mit Hartanodisation (25...150 µm): Grau bis Braun.

Beschichten auf Kunststoffbasis:

- Nach Chromatieren als Haftgrundvorbereitung lackieren (z.B. 2-K-PUR-System oder 2-K-Acrylatsysteme)
- Elektrostatisches Pulverbeschichten mit Aufsprühen und anschließendem Einbrennen bei 160...220 °C. Ohne Lösungsmittel umweltfreundlich.

Für Außenanwendung PUR- und Polyester-Pulver; für innen Epoxid- und Epoxid-Polyester-Mischpulver mit guter Chemikalienbeständigkeit.

Werkstoffe/Fertigung – Aluminium

Aluminium im direkten Vergleich mit Stahl

Aluminium konkurriert im Automobilbau nicht mit allgemeinem Stahl (bzw. Stahlblechen) sondern mit neuentwickelten höherfesten Stahlblechen.

US-Auto Jahrgang 2007 enthält 147kg Aluminium. 20% mehr als vor 4 Jahren; 4 mal mehr als 1973.

30% der Weltaluminiumproduktion für Transportwesen. Konsequenter Aluminiumleichtbau würde CO₂-Ausstoß im Transportsektor weltweit um 9% senken.

19% der CO₂-Emission für Transporte. 10% Gewichtsreduktion bedeuten 6...8% Treibstoffverbrauchsreduktion.

16 Mio. verkaufte Autos in USA jährlich. 65 Mio. weltweit 2006. Durch Aluminiumeinsatz über Gesamtlebensdauer 140Mio. Tonnen CO₂ weniger und 55Milliarden Liter Rohöl weniger als bei vergleichbarem Stahleinsatz.

In vollständige Klimabilanz/Ökobilanz muss auch Ausstoß während der Produktion einfließen.

Stahl: 2,3...2,7 kg CO₂ pro kg

Aluminium: 13,9...15,5 kg CO₂ pro kg

Leichtbau im Automobilbau auch durch Ersatz von traditionellem Stahl durch heißgepresste und hoch- und höchstfeste Stähle (Vgl. Fahrradrahmen aus Aluminium und Stahl). Aluminiumeinsatz steigt pro Jahr ca. 2...3% im Automobilbau.

Wie schon erwähnt ist der Energieeinsatz bei der **Aluminiumerzeugung** auf **13000 kWh pro Tonne** (entsprechend 13 kWh pro kg) gesenkt worden. Im Vergleich dazu wird laut Thyssen Krupp „Nachhaltigkeitsbericht 2004-2005“ im weltweit günstigsten Stahlwerk in Duisburg mit einem Energieeinsatz von 18,5 GJ (Gigajoule) eine Tonne **Stahl** produziert. Dies entspricht **5140 kWh pro Tonne** (entsprechend 5.14 kWh pro kg).

Eine vollständige Betrachtung müßte aber z.B. noch die Art der Energie berücksichtigen, die im Herstellungsprozeß zum Einsatz kommt (bei Aluminium bspw. Strom aus Wasserkraft).