

Werkstoffe	Technologische Eigenschaften		Ökologische Eigenschaften				
			bei der Gewinnung	bei der Verarbeitung	bei der Nutzung	nach der Nutzungsphase	
					Recycling	bei der Entsorgung	
Metalle	Stähle	Dichte 7,8 bis 7,9 g/cm ³ Zugfestigkeit 290 bis 830 N/mm ² S235JR (Baustahl) 620 bis 1270 N/mm ² 41Cr4 (Cr-leg. Vergütungsstahl) Schmelztemperatur bis zu 1550 °C; magnetisch; Edelstähle nicht rostend; durch die Legierungsmetalle und Kohlenstoff viele unterschiedliche Stähle mit unterschiedlichen Eigenschaften möglich; je nach Stahlsorte gut gießbar, umformbar, spanbar, Änderung der Stoffeigenschaften (Härten, Anlassen)	hohe Temperaturen mit Koks (Kohle)	Energieaufwand für Maschinen, teilweise glühende Bearbeitung (Umformen)	kann rosten (außer Edelstahl) => Korrosionsschutz notwendig	wieder gut einschmelzbar auch unterschiedliche Stähle, hohe Temperaturen notwendig bis zu 1550 °C, daher relativ hoher Energieaufwand	verrostet (außer Edelstähle), aber unnötig, da leicht vom Restmüll zu trennen und leicht recyclebar
	Aluminium	Dichte 2,7 g/cm ³ Zugfestigkeit 60 bis 600 N/mm ² Schmelzpunkt 660 °C relativ weiches und zähes Metall; Aluminium-Knetlegierungen bei niedrigen Temperaturen gut umformbar; Aluminiumlegierungen (1–3 % Magnesium oder Silizium) gut gießbar (Aluminium-Druckguss) und gut spanabhebend bearbeitbar, bedingt lebensmittelecht (Nichts Saures und Salziges in Al packen), vgl. auch www.bfr.bund.de/cm/343/fragen-und-antworten-zu-aluminium-in-lebensmitteln-und-verbraucher-nahen-produkten.pdf	umweltbelastende Rohstoffgewinnung, extrem hoher Energieaufwand (Elektrolyse), pro 1 t gewonnenem Aluminium fallen 1,6 bis 3,7 t giftiger Rotschlamm an	im Vergleich zu anderen Metallen leicht zu bearbeiten (wenig Energie notwendig)	relativ korrosionsbeständig (Al oxidiert -> Schutzschicht); leicht; keine Emissionen	sortenrein relativ gut recyclebar, sonst hoher Aufwand, aber trotzdem nur 10 % des Energiebedarfs bei der Aluminiumgewinnung, Salzschlacke fällt an und muss recycled oder entsorgt werden	unnötig, da relativ gut recyclebar; zersetzt sich in der Natur kaum, da Aluminiumoxid eine Schutzschicht ist
	Kupferlegierungen	Dichte 8,1 bis 8,7 g/cm ³ Zugfestigkeit Bronze 300 bis 900 N/mm ² Messing: 300 bis 700 N/mm ² Neusilber: 400 bis 700 N/mm ² Schmelztemperatur 900 – 1000 °C im Vergleich zu anderen Metallen leicht zu bearbeiten Bronze Kupfer-Zinn CuSn Messing Kupfer-Zink CuZn Neusilber Kupfer-Nickel-Zink CuNiZn	hohe Temperaturen; Kupferverbindungen teilweise giftig; Oxidationsschutz notwendig	im Vergleich zu anderen Metallen leicht zu bearbeiten (wenig Energie notwendig); Kupferverbindungen teilweise giftig	relativ korrosionsbeständig; relativ schwer; Kupferverbindungen teilweise giftig (Grünspan ...)	sortenrein sehr gut zu recyceln, da einfach einschmelzen, sonst gut recyclebar	unnötig, da leicht recyclebar; zersetzt sich in der Natur langsam, evtl. entstehen dabei giftige Kupfersalze
Polymere	Thermoplaste	Dichte 0,85 bis 2,2 g/cm ³ Zugfestigkeit 12 bis 85 N/mm ² einfärbbar, Isolator, dichte glatte Oberflächen z. B. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS)		Spritzguss, Tiefziehen, Trennen, Fügen; teilweise können Giftstoffe freierwerden	Giftstoffe (Weichmacher, Chloride...) können freigesetzt werden	wenn weitgehend sortenrein geschreddert und neu gespritzt -> wird aber minderwertiger (werkstoffliche Verwertung)	
	Duomere	Dichte 0,06 (Schäume) .. 1,3 .. 2,5 g/cm ³ Zugfestigkeit 35 bis 220 N/mm ² Herstellung: Polykondensation; hart, sehr bruchfest; nur spanabhebende Bearbeitung möglich z. B. Polyurethanharze (PUR), Epoxidharze (EP), Polyesterharze (PU)	Erdölprodukt (begrenzte Ressource), relativ geringer Energieaufwand; teilweise Giftstoffe (Chloride, Fluoride...)	Urformen: Polykondensation; spanabhebende Bearbeitung möglich; Beschichten; giftige (Abfall-)Stoffe möglich	Giftstoffe (Phenole ...) können freigesetzt werden	schwer recyclebar	Verbrennung – vorhandene Energie im Kunststoff direkt genutzt, kostengünstig, ersetzt dabei den Rohstoff (Erd-Öl); außer den biologisch abbaubaren Kunststoffen, nahezu unverrottbar; führt daher zu Problematik von Mikroplastik sowie Kunststoffmüll in den Ozeanen
	Elastomere	Dichte Styrol-Butadien 1,2 g/cm ³ Silikonkautschuk 0,76 bis 1,07 g/cm ³ Zugfestigkeit Styrol-Butadien 22 N/mm ² Mit geringem Kraftaufwand umformbar, nach Wegnahme der Kraft wieder Ursprungsform z. B. Naturgummi (NR), Silikon-Gummi (SIR)		Urformen, Fügen, Trennen (Schneiden, Scheren); Stoffeigenschaften ändern; giftige (Abfall-)Stoffe möglich	Giftstoffe (Weichmacher ...) können freigesetzt werden	schwer recyclebar	
Holz	Massivholz (Buche, Eiche, Ahorn, Esche, Fichte, Kiefer, Tropenhölzer ...)	Dichte 0,5 bis 1,1 g/cm ³ Zugfestigkeit 80 bis 180 N/mm ² axial	nachwachsender Rohstoff, CO ₂ neutral, Holzgewinnung - Problematik durch Abholzung, ungenügende Aufforstung, Plantagenwirtschaft (Monokulturen), Bodenverdichtung, Abaufächern für Nahrungsmittel verschwendet (weltweit), daher teilweise ökologisch bedenklich, besonders bei Tropenhölzer (Abholzung der Regenwälder)	relativ geringer Energieeinsatz für Maschinen (Sägen, Hobeln, Fräsen, Bohren, Schleifen...), bei spanender Bearbeitung Filterung notwendig, evtl. Trocknung evtl. Lösungsmittel beim Lackieren	keine evtl. Pflegemittel oder neue Schutzschichten (z. B. Lacke, Öle, Wachse...) zum Witterungsschutz	Recycling im Sinne von Wiederverwendung im privaten Bereich oder bei großen Mengen sinnvoll	Wenn nicht lackiert sondern roh, gewachst, geölt dann kompostierbar sonst thermisch verwertbar; gebundenes CO ₂ wird wieder frei
	Holzwerkstoffe – Schichtholz und Sperrholz (Multiplexplatten ...)	Dichte 0,5 bis 0,9 g/cm ³ kreuzweise übereinander gelegt und unter Wärmeeinwirkung gepresst; hohe Belastung bei dünnen Querschnitten: Möbel-, Fahrzeug- und Bootsbau sowie als Verpackungsmaterial	vgl. Massivholz Schichten werden in der Regel mit Kunstharzen verklebt		keine evtl. Pflegemittel oder neue Schutzschichten (z. B. Lacke, Öle, Wachse...) zum Witterungsschutz		
	Holzwerkstoffe – Span- und Faserplatten (Spanplatten, MDF...)	Dichte 0,55 bis 0,75 g/cm ³ Zugfestigkeit 6 bis 10 N/mm ² flach Dicke: 8, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 35 und 40 mm; unterschiedlich große beleimte Späne/Fasern in zumeist drei bis fünf Schichten verpresst; äußere Schichten fast immer aus feinerem Spanmaterial; in Richtung der Plattenebene, also Länge und Breite der Platte, nahezu die gleichen Eigenschaften; wesentlich geringere Festigkeiten als Vollholz	vgl. Massivholz Späne/Fasern werden in der Regel mit Kunstharzen verklebt	vgl. Massivholz bis auf Hobeln	keine Belastung wenn formaldehydfrei evtl. Pflegemittel oder neue Schutzschichten (z. B. Lacke, Öle, Wachse...) zum Witterungsschutz	Recycling im Sinne von Wiederverwendung im privaten Bereich sonst schwer recyclebar (Kunstharzanteile)	bedingt thermisch verwertbar (Filteranlagen notwendig wegen Kunstharzanteilen); gebundenes CO ₂ wird wieder frei
Papier und Pappe	Papier	Dichte ca. 0,8 g/cm ³ aus Zellstoff oder aus Holzstoff (aus Holzschliff) hergestellt; maschinelle Papierherstellung auf Endlossieb -> Ausrichtung der Fasern längs des Bandes; durch Aufeinanderkleben mehrerer Papierschichten abwechselnder Laufrichtung erhält man sehr starrs Papier (vergleichtbar zum Sperrholz), z. B. Bristolkarton (min. dreilagig)	Verbrauch an Holz, Wasser und Energie; Holz nachwachsender Rohstoff, der zugleich CO ₂ bindet, Holzgewinnung Problematisch weltweit, teilweise ökologisch bedenklich, ca. 20 % des weltweit eingeschlagenen Holzes werden zu Papier verarbeitet, aber häufig Sturmholz, „Durchforstungsholz“ oder Sägerestholz; früher extrem hoher Wasserverbrauch (18. Jhd. 1.200 Liter/kg Papier, um 1900 100 bis 800 Liter, heute 7 Liter; völliges Schließen des Kreislaufs ist im Regelfall nicht möglich); Energieverbrauch zur Herstellung liegt bei etwa 2,3 kWh pro Kilogramm Papier	Energie für Maschineneinsatz (Schneiden, Stanzen, Kleben...) gering, Bedruckung druckfarbenabhängig	keine, Papiere heute weitgehend säurefrei	wiederverwertetes Papier in Form von Altpapier mittlerweile eine wichtige Rohstoffquelle; wenn nur Altpapier eingesetzt wird, ist der komplette Abwasserrücklauf bei der Papierherstellung möglich	wegen Veredlung und Druckfarben nur bedingt kompostierbar; thermisch verwertbar; gebundenes CO ₂ wird wieder frei
	Karton Pappe DIN 6730	Flächengewicht 7 g/m ² bis 150 g/m ² 150 g/m ² bis 600 g/m ² ab 600 g/m ² Papier < 225g/m² < Pappe					

Tabelle Werkstoffe – technologische und ökologische Eigenschaften, TS

Werkstoffe	Technologische Eigenschaften		Ökologische Eigenschaften				
			bei der Gewinnung	bei der Verarbeitung	bei der Nutzung	nach der Nutzungsphase Recycling bei der Entsorgung	
Metalle	Stähle	Dichte Zugfestigkeit Schmelztemperatur bis zu 1550 °C; magnetisch; Edelstähle nicht rostend; durch die Legierungsmetalle und Kohlenstoff viele unterschiedliche Stähle mit unterschiedlichen Eigenschaften möglich; je nach Stahlsorte gut gießbar, umformbar, spanbar, Änderung der Stoffeigenschaften (Härten, Anlassen)	7,8–7,9 g/cm ³ 290 - 830 N/mm ² S235JR (Baustahl) 620 - 1270 N/mm ² 41Cr4 (Cr-leg. Vergütungsstahl)				
	Aluminium	Dichte Zugfestigkeit Schmelzpunkt relativ weiches und zähes Metall; Aluminium-Knetlegierungen bei niedrigen Temperaturen gut umformbar; Aluminiumlegierungen (1–3 % Magnesium oder Silizium) gut gießbar (Aluminium-Druckguss) und gut spanabhebend bearbeitbar, bedingt lebensmittelecht (Nichts Saures und Salziges in Al packen), vgl. auch www.bfr.bund.de/cm/343/fragen-und-antworten-zu-aluminium-in-lebensmitteln-und-verbraucher-nahen-produkten.pdf	2,7 g/cm ³ 60 - 600 N/mm ² 660 °C				
	Kupferlegierungen	Dichte Zugfestigkeit Schmelztemperatur im Vergleich zu anderen Metallen leicht zu bearbeiten Bronze Kupfer-Zinn CuSn Messing Kupfer-Zink CuZn Neusilber Kupfer-Nickel-Zink CuNiZn	8,1 - 8,7 g/cm ³ Bronze 300 - 900 N/mm ² Messing: 300 - 700 N/mm ² Neusilber: 400 - 700 N/mm ² 900 – 1000 °C				
Polymere	Thermoplaste	Dichte Zugfestigkeit einfärbbar, Isolator, dichte glatte Oberflächen z.B. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS)	0,85 – 2,2 g/cm ³ 12 - 85 N/mm ²				
	Duromere	Dichte Zugfestigkeit Herstellung: Polykondensation; hart, sehr bruchfest; nur spanabhebende Bearbeitung möglich z.B. Polyurethanharze (PUR), Epoxidharze (EP), Polyesterharze (PU)	0,06 (Schäume) .. 1,3 .. 2,5 g/cm ³ 35 - 220 N/mm ²				
	Elastomere	Dichte Zugfestigkeit Mit geringem Kraftaufwand umformbar, nach Wegnahme der Kraft wieder Ursprungsform z.B. Naturgummi (NR), Silikon-Gummi (SIR)	Styrol-Butadien 1,2 g/cm ³ Silikonkautschuk 0,76 bis 1,07 g/cm ³ Styrol-Butadien 22 N/mm ²				
Holz	Massivholz (Buche, Eiche, Ahorn, Esche, Fichte, Kiefer, Tropenhölzer ...)	Dichte Zugfestigkeit	0,5 - 1,1 g/cm ³ 80 - 180 N/mm ² axial				
	Holzwerkstoffe - Sperrholz (Multiplexplatten ...)	Dichte kreuzweise übereinander gelegt und unter Wärmeeinwirkung gepresst; hohe Belastung bei dünnen Querschnitten; Möbel-, Fahrzeug- und Bootsbau sowie als Verpackungsmaterial	0,5 - 0,9 g/cm ³				
	Holzwerkstoffe - Flachpressplatten (Spanplatten, MDF...)	Dichte Zugfestigkeit Dicke: 8, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 35 und 40 mm; unterschiedlich große beleimte Späne in zumeist drei bis fünf Schichten verpresst; äußere Schichten fast immer aus feinerem Spanmaterial; in Richtung der Plattenebene, also Länge und Breite der Platte, nahezu die gleichen Eigenschaften; wesentlich geringere Festigkeiten als Vollholz	0,55 - 0,75 g/cm ³ 6 - 10 N/mm ² flach				
Papier und Pappe		Dichte aus Zellstoff oder aus Holzstoff (aus Holzschliff) hergestellt; maschinellen Papierherstellung auf Endlossieb -> Ausrichtung der Fasern längs des Bandes; durch Aufeinanderkleben mehrerer Papierschichten abwechselnder Laufrichtung erhält man sehr starres Papier (vergleichbar zum Sperrholz), z.B. Bristolkarton (min. dreilagig)	ca. 0,8 g/cm ³				
	Papier	Flächengewicht	7 g/m ² bis 150 g/m ²				
	Karton Pappe DIN 6730		150 g/m ² bis 600 g/m ² ab 600 g/m ² Papier < 225g/m ² < Pappe				

Tabelle Werkstoffe – technologische und ökologische Eigenschaften, TS