
Fahrzeugleichtbau – Strategien, Konzepte, Werkstoffe

-
2. Leichtbaustrategien und Bauweisen
 3. Werkstoffe für den Leichtbau
 4. Grundlagen der Faserverbundwerkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

- Am Anfang steht ein Bauteil mit **Anforderungsprofil**

Anforderungen

- Dichte/ Preis
- Festigkeit / Steifigkeit
- Therm. Beständigkeit
- Schwing- / Kriechfestigkeit
- Risszähigkeit
- Energieaufnahmevermögen
- El. Leitfähigkeit
- Therm. Ausdehnungskoeff.
- Chem. Beständigkeit
- Magn. Verhalten
- Umformbarkeit
- Schweißbarkeit
- Recyclierbarkeit
-

Allgemeines - Systematische Werkstoffauswahl

- Entgegen stehen die **Eigenschaftsprofile der Werkstoffe**

Anforderungen

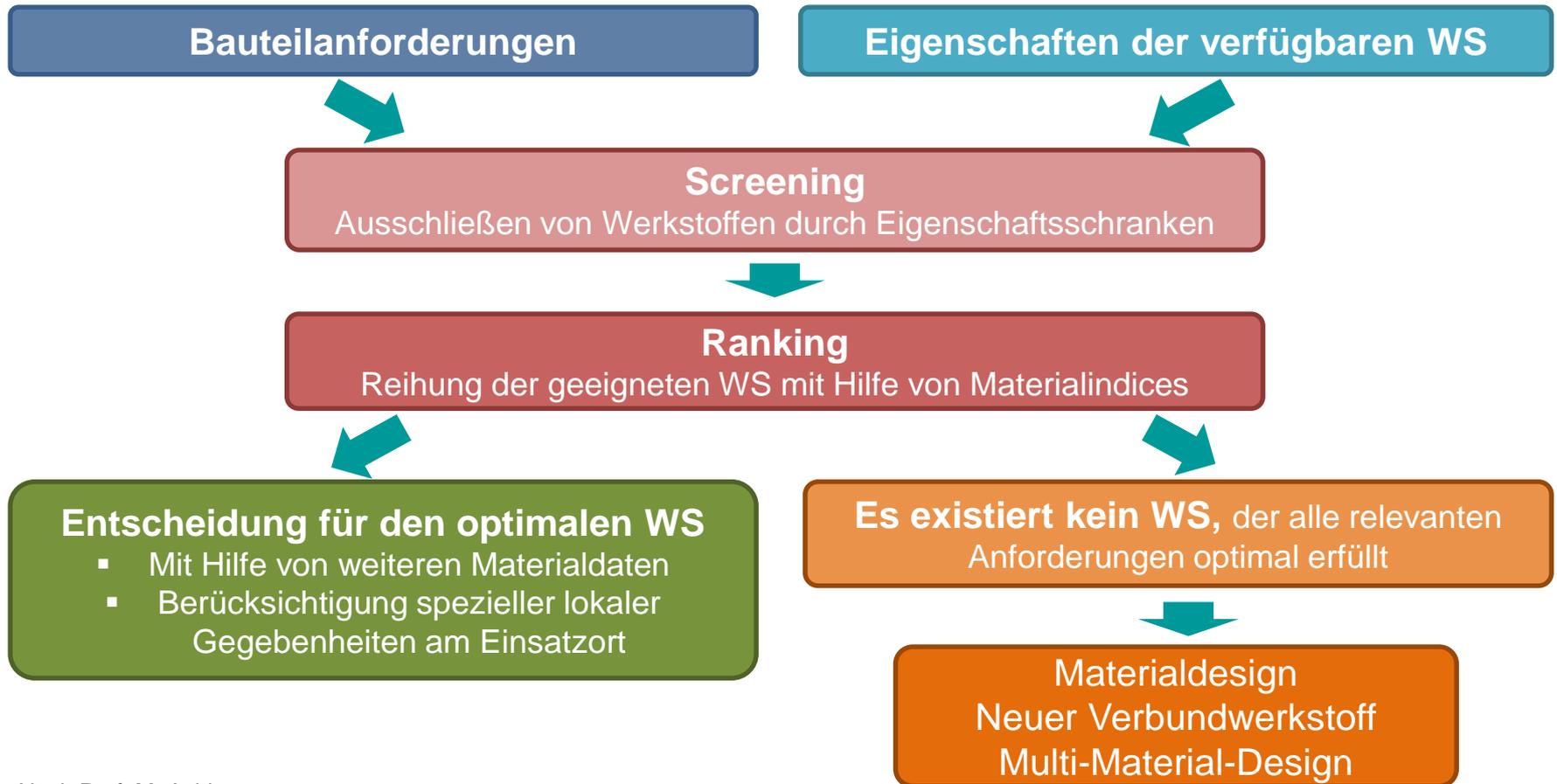
- Dichte/ Preis
- Festigkeit / Steifigkeit
- Therm. Beständigkeit
- Schwing- / Kriechfestigkeit
- Risszähigkeit
- Energieaufnahmevermögen
- El. Leitfähigkeit
- Therm. Ausdehnungskoeff.
- Chem. Beständigkeit
- Magn. Verhalten
- Umformbarkeit
- Schweißbarkeit
- Recyclierbarkeit
- ...



Eigenschaften der verfügbaren Werkstoffe

Allgemeines - Systematische Werkstoffauswahl

- Auswahl des optimalen Werkstoffs durch **Screening** und **Ranking**



Nach Prof. M. Ashby

Allgemeines - Systematische Werkstoffauswahl

➤ Wichtige **Materialkennwerte**

- Dichte ρ [g/cm³]
- Elastizitätsmodul E [MPa oder GPa]
- Zugfestigkeit R_m [MPa]
- Spezifischer Materialkennwert X/ρ [MPa/(g/cm³)]

➤ Wichtige **Materialindizes**

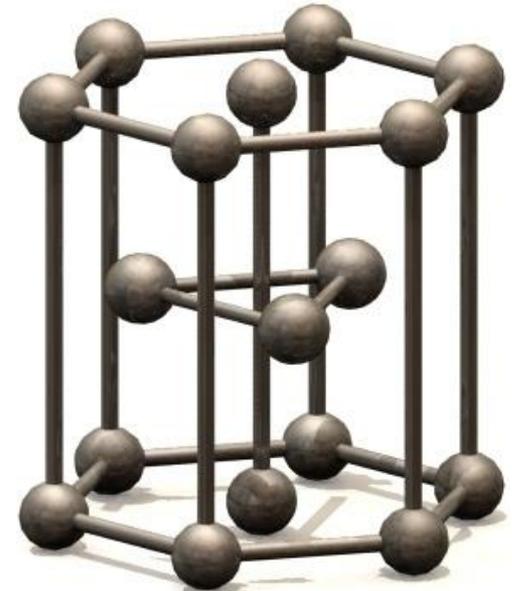
	Zug/Druck	Balkenbiegung	Plattenbiegung
Steifigkeit	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$
Festigkeit	$\frac{R_{eS}}{\rho}$	$\frac{R_{eS}^{2/3}}{\rho}$	$\frac{R_{eS}^{1/2}}{\rho}$

Nach Prof. M. Ashby

Metalle - Magnesium

Kennwerte von Mg

- Dichte: $1,75 \text{ g/cm}^3$
- Elastizitätsmodul: 44 GPa
- Gitterstruktur: hcp
- Schmelztemperatur: 650 °C
- Wärmeausdehnung: $26,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Wärmeleitfähigkeit: 156 W/mK



Das leichteste anwendungsrelevante Metall

Vorteile:

- Hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit, teilweise auf Niveau von Aluminiumlegierungen und hochfesten Stählen
- Vor allem im Bereich Biegung und Beulen überlegen (Im Vergleich zu Stahl)
- Sehr gute Gießbarkeit
- Gute Schweißbarkeit unter Schutzgas
- Vollständige Recyclierbarkeit
- Gute elektrische und thermische Leitfähigkeit
- Hauptverwendung als Legierungszusatz
- Hauptsächlich Gussbauteile in der Anwendung

Nachteile:

- Schlechte Kaltverformbarkeit
- Geringe Zähigkeit
- Hohe Kerbempfindlichkeit
- Mikroporosität
- Korrosionsanfälligkeit
- Verhältnismäßig spröde
- Kriechanfällig

Bezeichnungssystem

- Besteht aus
 - 2 Kennbuchstaben für die Hauptlegierungselementen
 - ↳ An wichtigsten sind **A** = Al, **M** = Mangan und **Z** = Zink
 - 2 Kennziffern für deren Konzentration

- Beispiel
 - AZ91 = Mg, 9 % Al, 1 % Zn

- Weitere Kennbuchstaben für den Herstellungszustand und die Wärmebehandlung
 - Wie bei Aluminiumlegierungen

Metalle - Magnesium

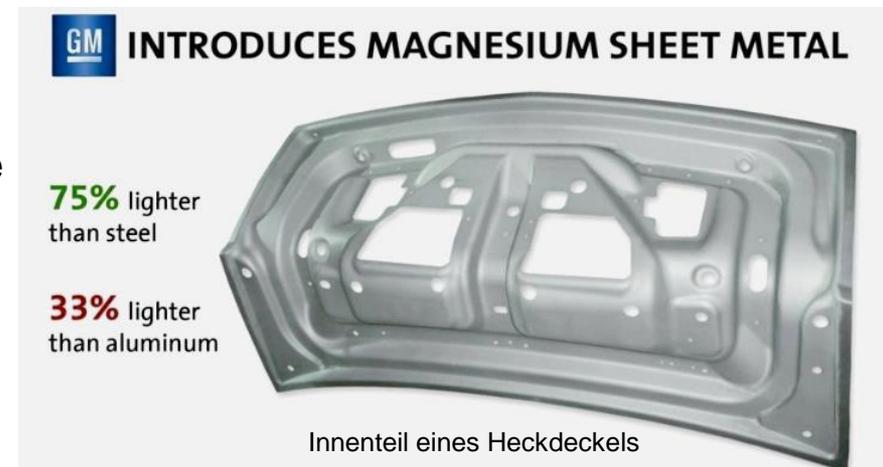
Bezeichnungssystem

Kurzbuchstabe	Legierungselemente	Kurzbuchstabe	Legierungselemente
A	Aluminium	M	Mangan
B	Wismut	P	Blei
C	Kupfer	Q	Silber
D	Cadmium	R	Chrom
E	Seltene Erden	S	Silizium
F	Eisen	T	Zinn
H	Thorium	W	Yttrium
K	Zirkonium	Y	Antomin
L	Mangan-Lithium	Z	Zink

Knetlegierungen

- Bevorzugte Verwendung von Mg-Al-Zn Legierung
 - Festigkeit steigt mit Aluminiumanteil
- Wichtigster Typ ist AZ31
 - Gute Umformbarkeit und Festigkeit
- Gutes Dämpfungs- und Energieabsorptionsverhalten

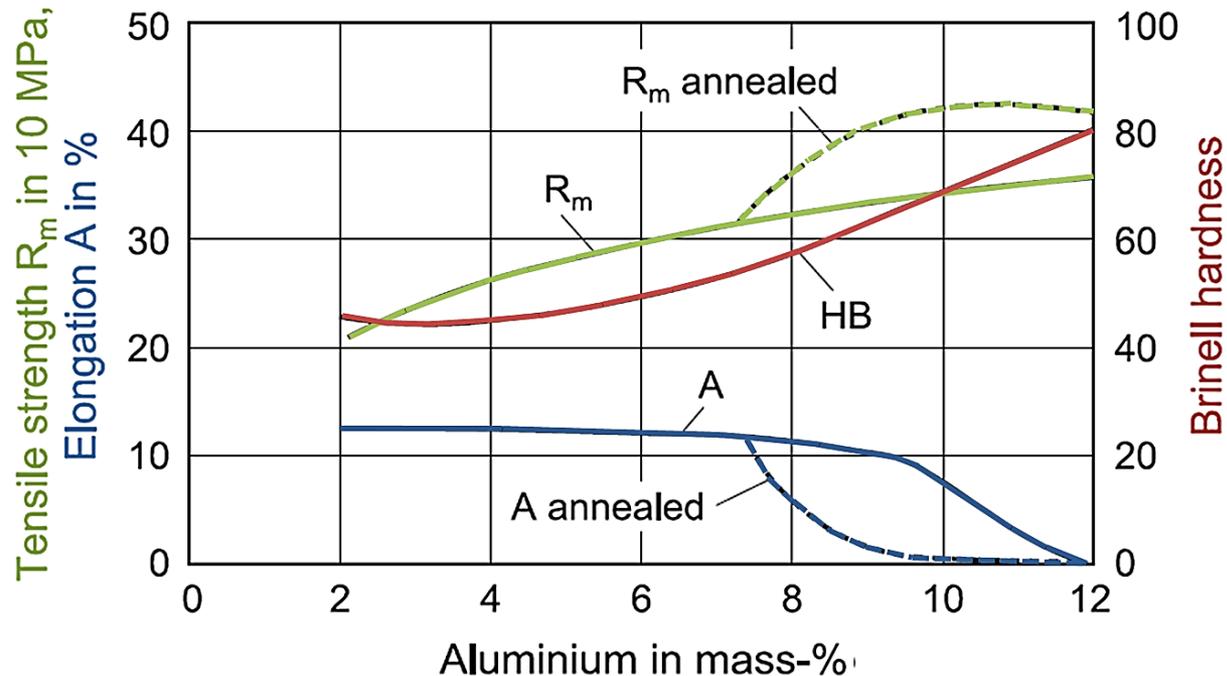
- Bieten ein hohes Potential für ultraleichte Karosseriebleche mit dennoch guten mechanischen Eigenschaften



Quelle: GM

Knetlegierungen

- Einfluss von Aluminium auf die mechanischen Eigenschaften



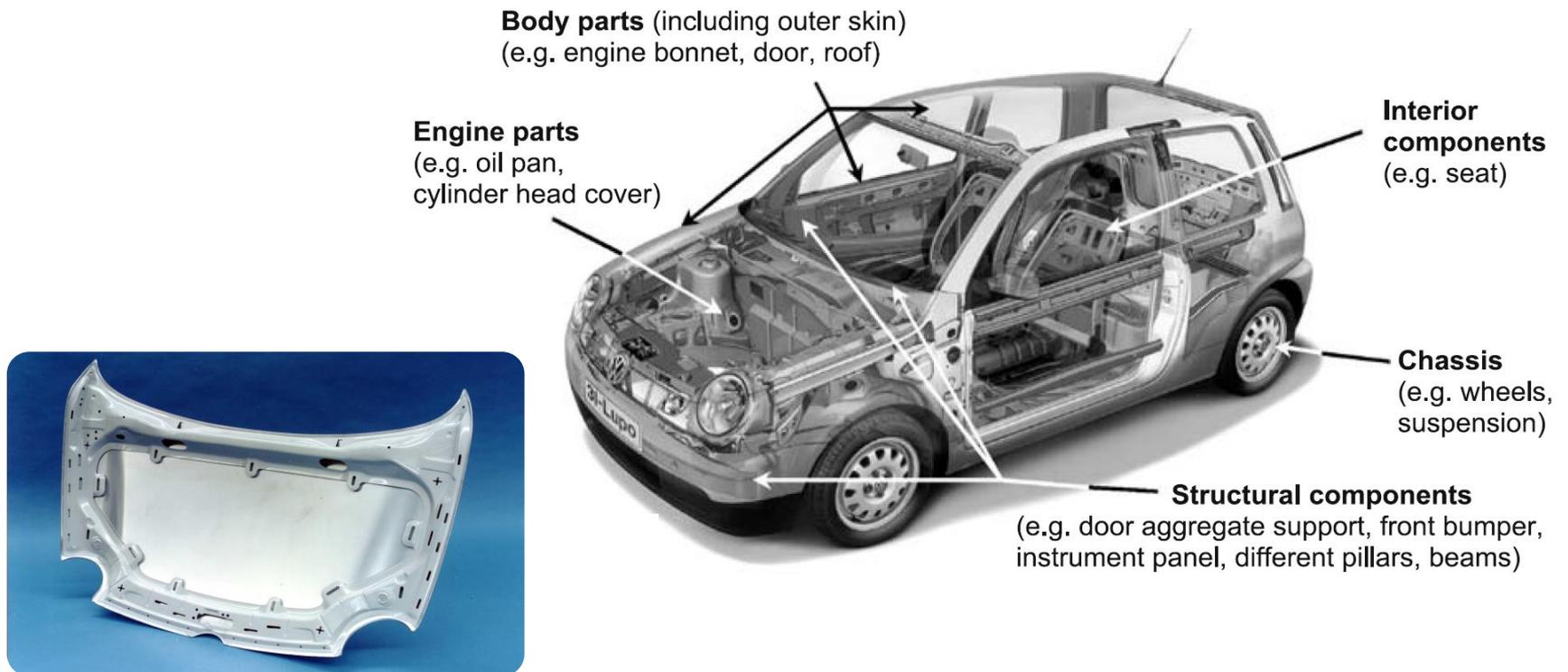
Extrudiert, Lösungsgeglüht (420 °C/2 h), Angelassen (200 °C/12 h)

Quelle: Magnesium Technology / Friedrich

Metalle - Magnesium

Knetlegierungen

- Anwendung im VW Lupo



Quelle: VW

Quelle: Magnesium Technology / Friedrich

Gusslegierungen

- Hauptgruppen sind:
 - Mg-Al-Zn-Mn, Mg-Al-Mn, Mg-Al-Si-Mn
- Produktionsvolumen im Vergleich zu Knetlegierungen 5 mal höher
- Wichtigster Typ ist AZ91
 - Gute Festigkeit, Gießbarkeit und Beständigkeit
 - Sehr guter Widerstand gegen Salzwasserkorrosion
 - Macht 80% des Produktionsvolumens aus

- Anwendungen in den Bereichen
 - Fahrzeugtechnik
 - Gehäuse von Elektronik- und Elektrogeräten



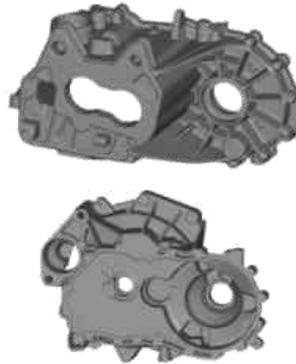
www.isf.de

Metalle - Magnesium

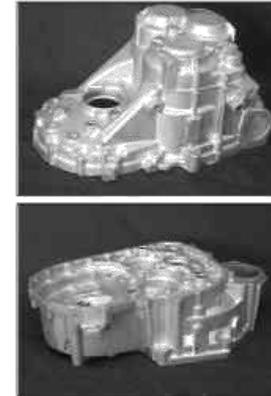
Gusslegierungen



B 80 m=12,7 kg



MQ 200 m=6,6 kg



MQ 350 m=11,6 kg



VL 300



m=19,5 kg

Gewichtseinsparpotenzial gegenüber Aluminium: ca. 20-26%

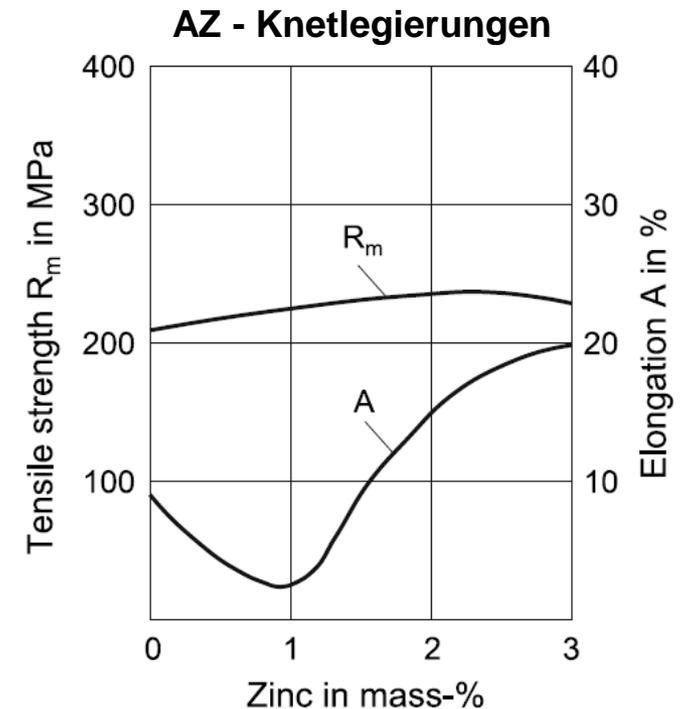
Gebräuchlichsten Legierungssysteme

➤ AZ - Legierung

- Gute Raumtemperatureigenschaften
- Geringe Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit
- Gute Korrosionsbeständigkeit

➤ AM - Legierungen

- Durch verringerten Al-Gehalt und Eliminierung von Zink deutlich gesteigerte Duktilität
- Eingeschränkte Raumtemperatureigenschaften und Gießbarkeit
- Sehr gutes Energieabsorptionsvermögen



Quelle: Magnesium Technology / Friedrich

Gebräuchlichsten Legierungssysteme

➤ AS - Legierungen

- Deutlich höhere Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit durch Mg_2Si -Ausscheidungen
- Eingeschränkte Gießbarkeit

➤ AE - Legierungen

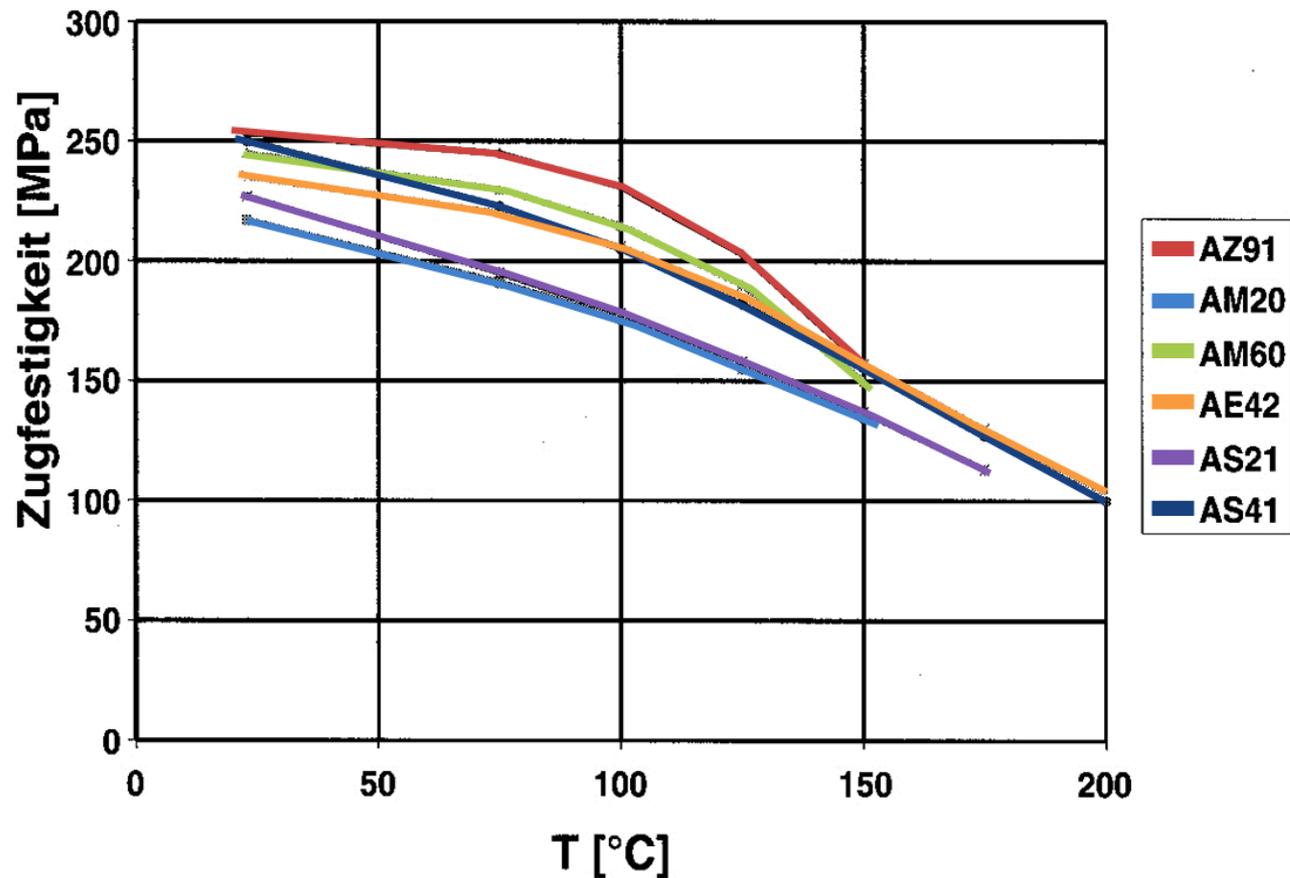
- Deutlich höhere Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit durch Mg-RE-Ausscheidungen
- Nur im Druckguß verarbeitbar
- Eingeschränkte Gießbarkeit

Quelle: K.U. Kainer, F.von Buch, Wiley, Weinheim, 2000 und H. Friedrich, S. Schumann, F. von Buch, Osaka, 2003

Gebräuchlichsten Legierungssysteme

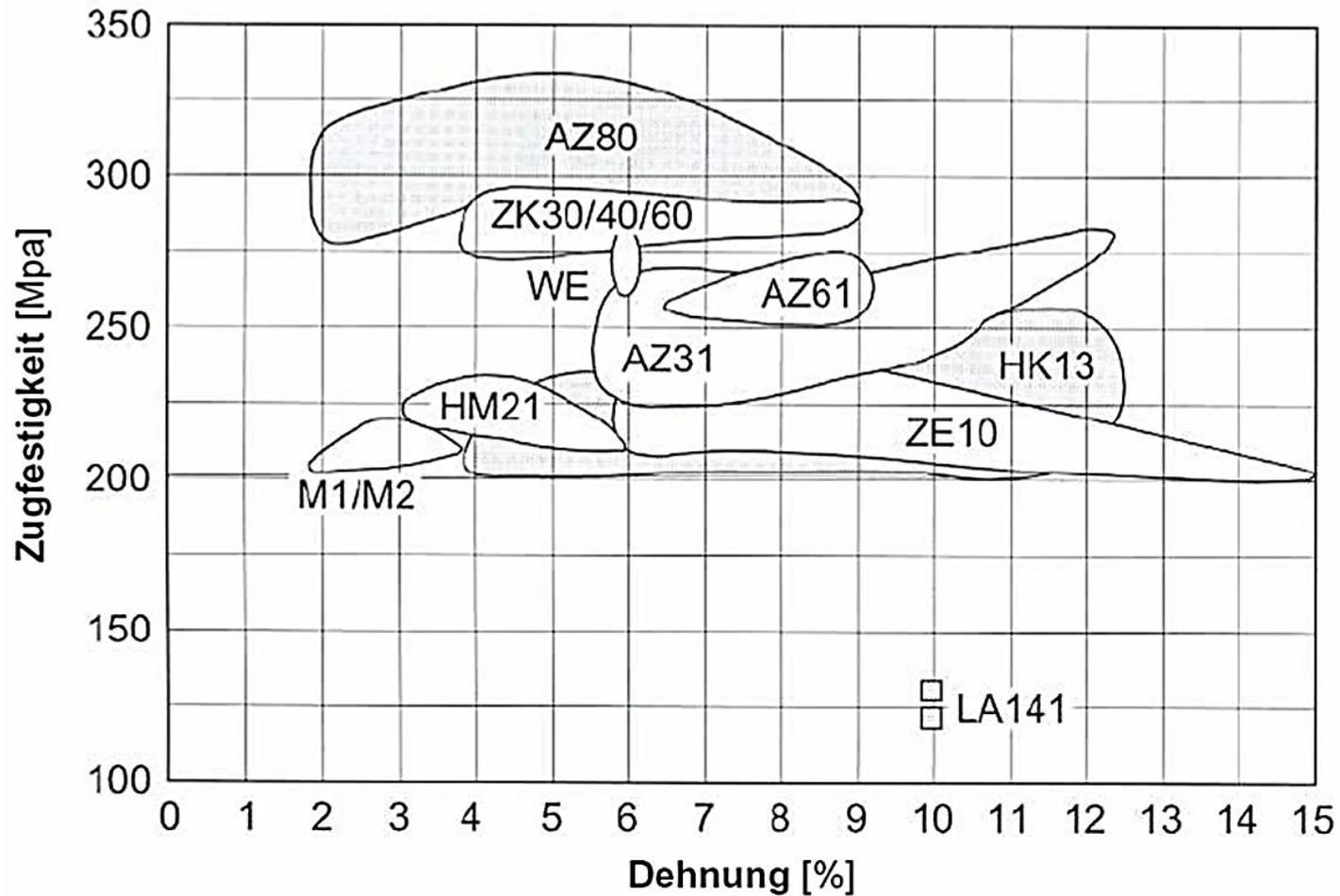
Eigenschaft	AZ91	AM61	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
Zugfestigkeit R_m [MPa]	250	240	230	210	240	220	230
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	160	130	125	90	140	120	145
Druckfestigkeit [MPa]	148	k.A.	113	74	k.A.	106	103
Bruchdehnung [%]	7	13	15	20	15	13	11
E-Modul [GPa]	45	45	45	45	45	45	45
Schubmodul [GPa]	17	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Brinellhärte [HBS 1/5]	70	65	60	45	60	55	60
Kerbschlagzähigkeit [J]	9	18	18	18	16	12	12

Gebräuchlichsten Legierungssysteme

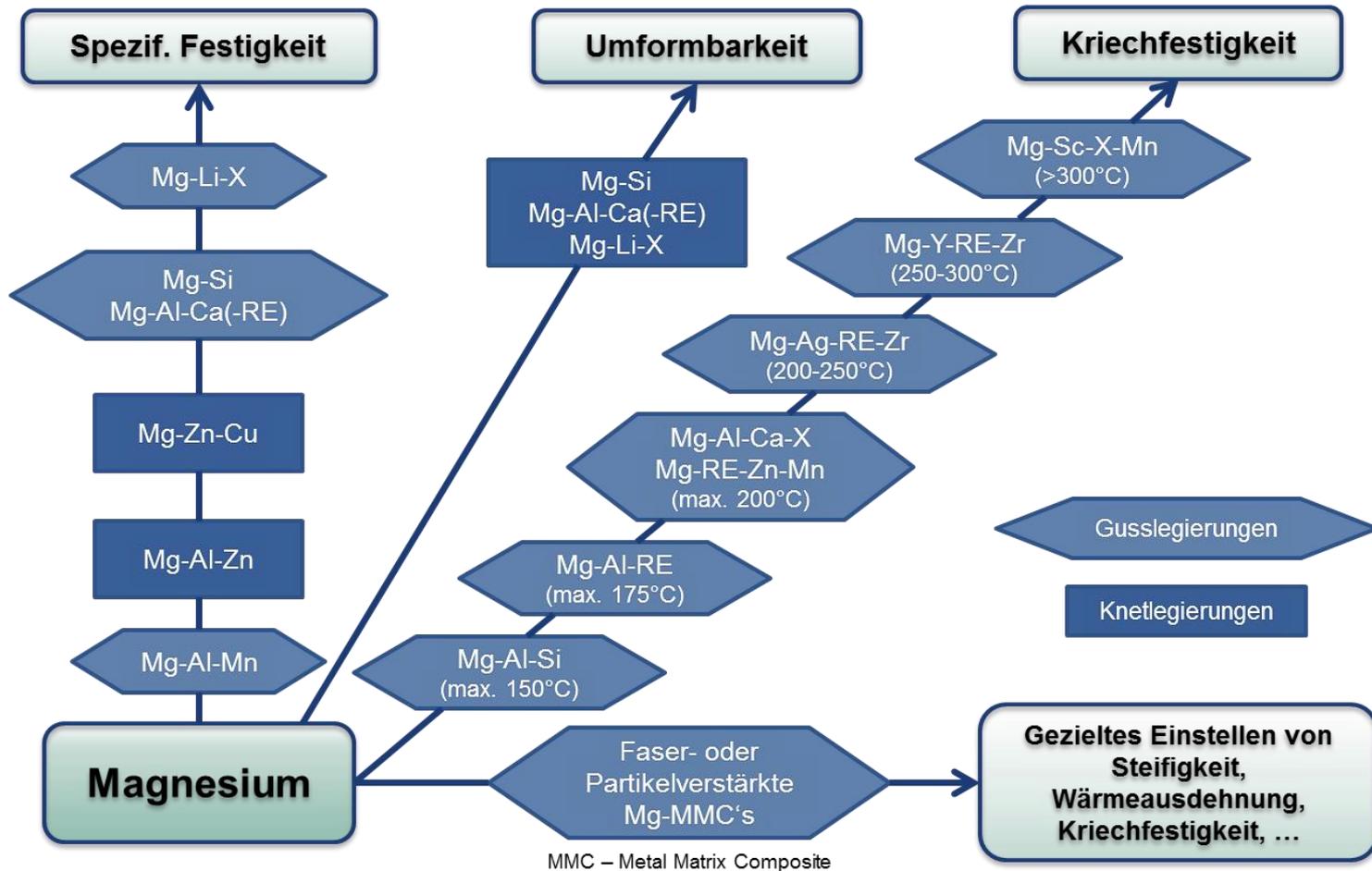


Quelle: K.U. Kainer, F.von Buch, Wiley, Weinheim, 2000 und H. Friedrich, S. Schumann, F. von Buch, Osaka, 2003

Weitere Legierungssysteme



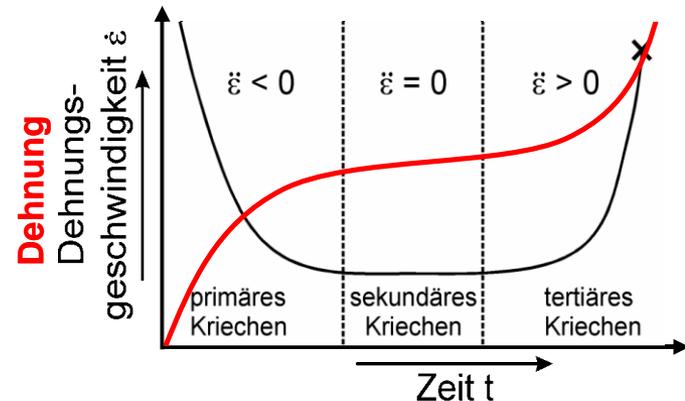
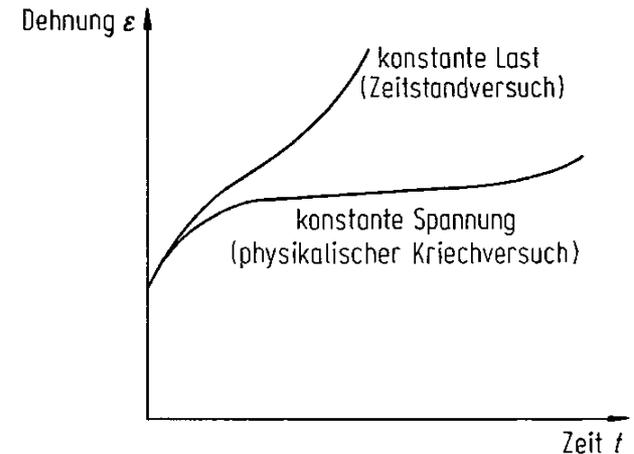
Entwicklungen und Potentiale der Mg-Legierungen



Nach: Magnesium Technology / Friedrich

Metalle - Magnesium - Kriechen

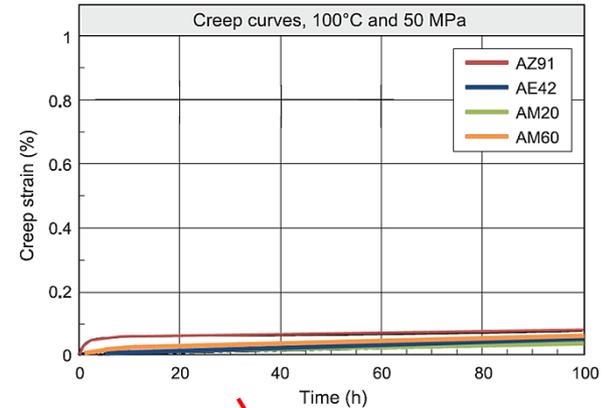
- Ist die Zunahme der plastischen Verformung unter konstanter Last oder konstanter Spannung
 - Das Verformungsverhalten ist zeit- und temperaturabhängig
- Kann in drei Bereiche unterteilt werden:
 - Primäres Kriechen
 - ↳ Verfestigungsmechanismen überwiegen
 - Sekundäres Kriechen
 - Tertiäres Kriechen
 - ↳ Thermisch aktivierte Verformungsvorgänge überwiegen



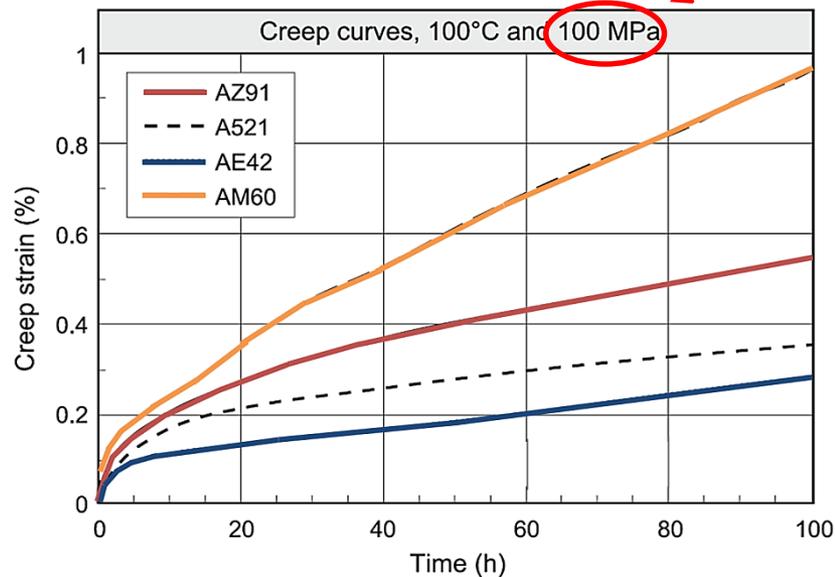
Quelle: Metalle - Strukturen und Eigenschaften der Metalle und Legierungen/ Hornbogen

Metalle - Magnesium - Kriechen

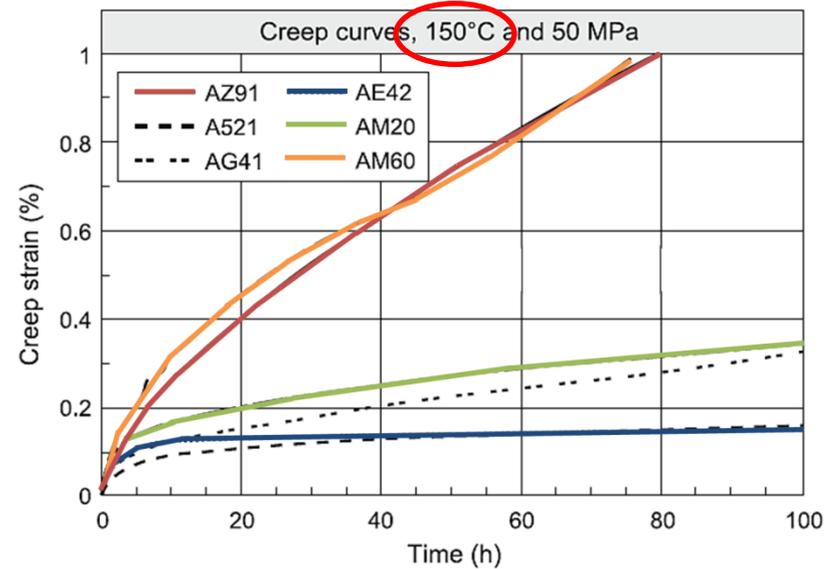
➤ Kriechverhalten typischer Gusslegierungen



Erhöhung der Spannung



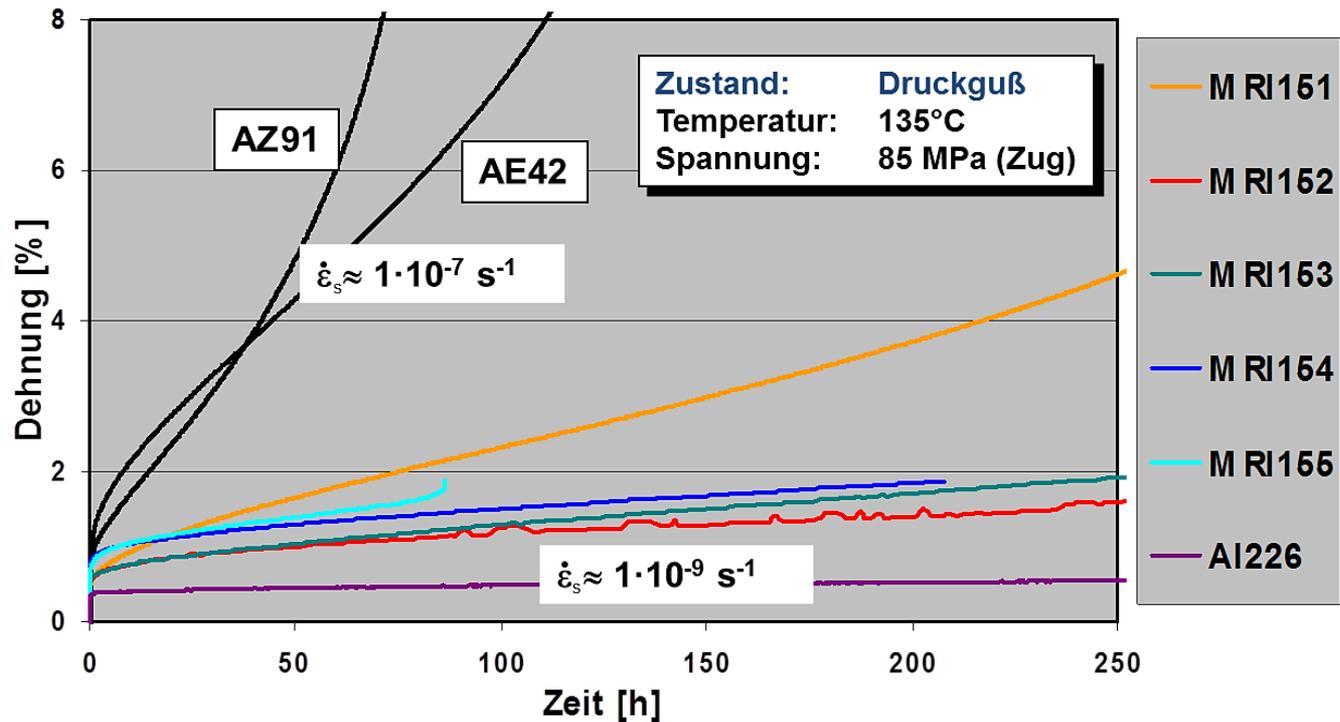
Erhöhung der Temperatur



Quelle: Magnesium Technology / Friedrich

Metalle - Magnesium - Kriechen

- Entwicklung kriechfester Gusslegierungen



Quelle: von Buch, F. et al. Neue Mg-Drucklegierungen MRI-153 für Anwendungen im Antriebsstrang. Aalen, 2001.

Metalle - Magnesium - Kriechen

➤ Entwicklung kriechfester Gusslegierungen

Eigenschaft	MRI 153M	MRI 230D	AZ91	AE42	AS21
Zugfestigkeit R_m [MPa] @ 20°C	250	235	260	240	230
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa] @ 20°C	170	180	160	135	125
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa] @ 150°C	135	150	105	100	87
Bruchdehnung [%]	6	5	6	12	16
E-Modul [GPa]	45	45	45	45	45
Kerbschlagzähigkeit [J]	8	6	8	12	14
Dauerfestigkeit [MPa] ¹	120	110	100	90	90
Korrosionsrate [mg/cm ² pro Tag] ²	0,09	0,1	0,11	0,12	0,34

¹ Umlaufbiegeversuch mit 10^8 Umläufen und $R = -1$ (keine Mittelspannung → rein wechselnd)

² 200h Salzsprühwasserversuch (ASTM B-117)

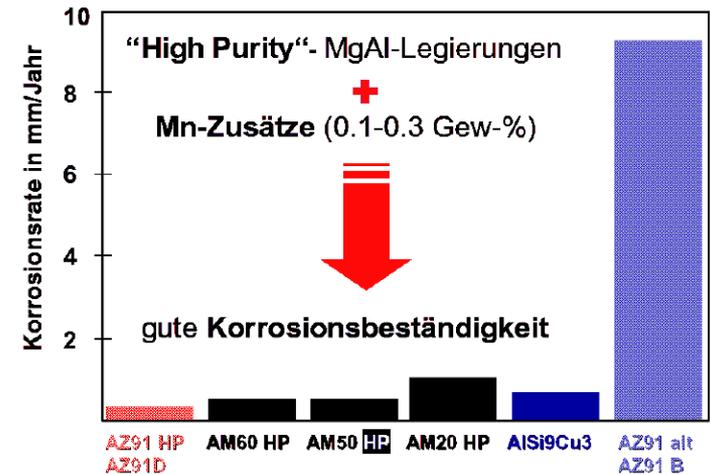
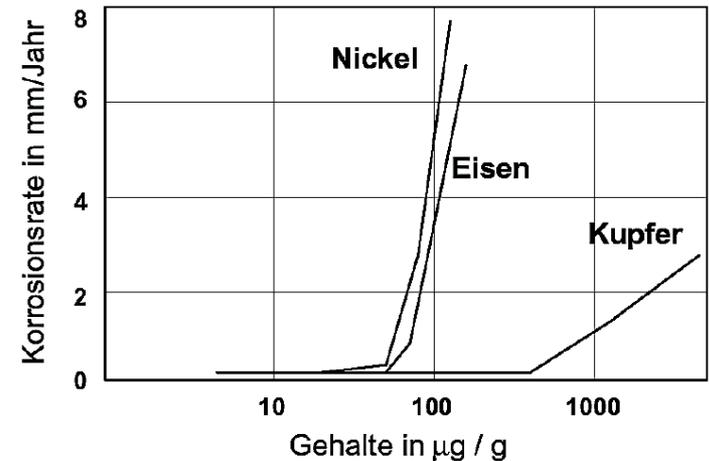
Metalle - Magnesium - Korrosion

- Magnesium bildet zwar auch eine passivierende Schicht, aber:
 - Dicke: $< 1 \mu\text{m}$
 - Das sog. Pilling-Bedworth-Verhältnis (PBV) ist < 1
 - └ Bezeichnet das Verhältnis aus Volumen der Elementarzelle des Metalloxids zum Volumen der EZ des Metalls
 - └ Dient zur Beurteilung, ob ein Metall an trockener Luft eine dauerhaft schützende Oxidschicht bildet (PBV = 1 ... 3)
 - └ Zum Vergleich: $\text{PBV}_{\text{Alu}} = 1,28$
 - Das bedeutet, die Oxidschicht ist nicht flüssigkeitsdicht, es können gelöste Ionen eindringen und mit dem Metall reagieren
 - Korrosion
- Magnesium ist das unedelste technisch genutzte Metall
 - Wird in einer Galvanischen Zelle immer oxidiert (abgebaut)
 - Kontaktkorrosion

Metalle - Magnesium - Korrosion

- Das Korrosionsverhalten ist auch stark abhängig von der Konzentration von Ni, Cu und Fe
 - Erfordert hohe Sorgfalt in der gesamten Prozesskette, um Verunreinigungen und Oberflächenbeschädigungen zu verhindern
- Es wurden sogenannte High-Purity-Legierungen entwickelt
- Ebenso führt eine geringe Zugabe von Mn (0,1 ... 0,3 Gew. %) zu einer Verbesserung der Korrosionsrate

Einfluss der Gehalte an Fe, Cu, Ni auf die Korrosionsbeständigkeit von AZ91 (Druckguss)



Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidemann

Metalle - Magnesium - Korrosion

- Salzwassersprühtest an verschiedenen Magnesiumlegierungen



Quelle: The Principles of Magnesium Corrosion Protection, Magnesium Elektron

Metalle - Magnesium - Korrosion

- Salzwassersprühtest an einem Kupplungsgehäuse

MRI153



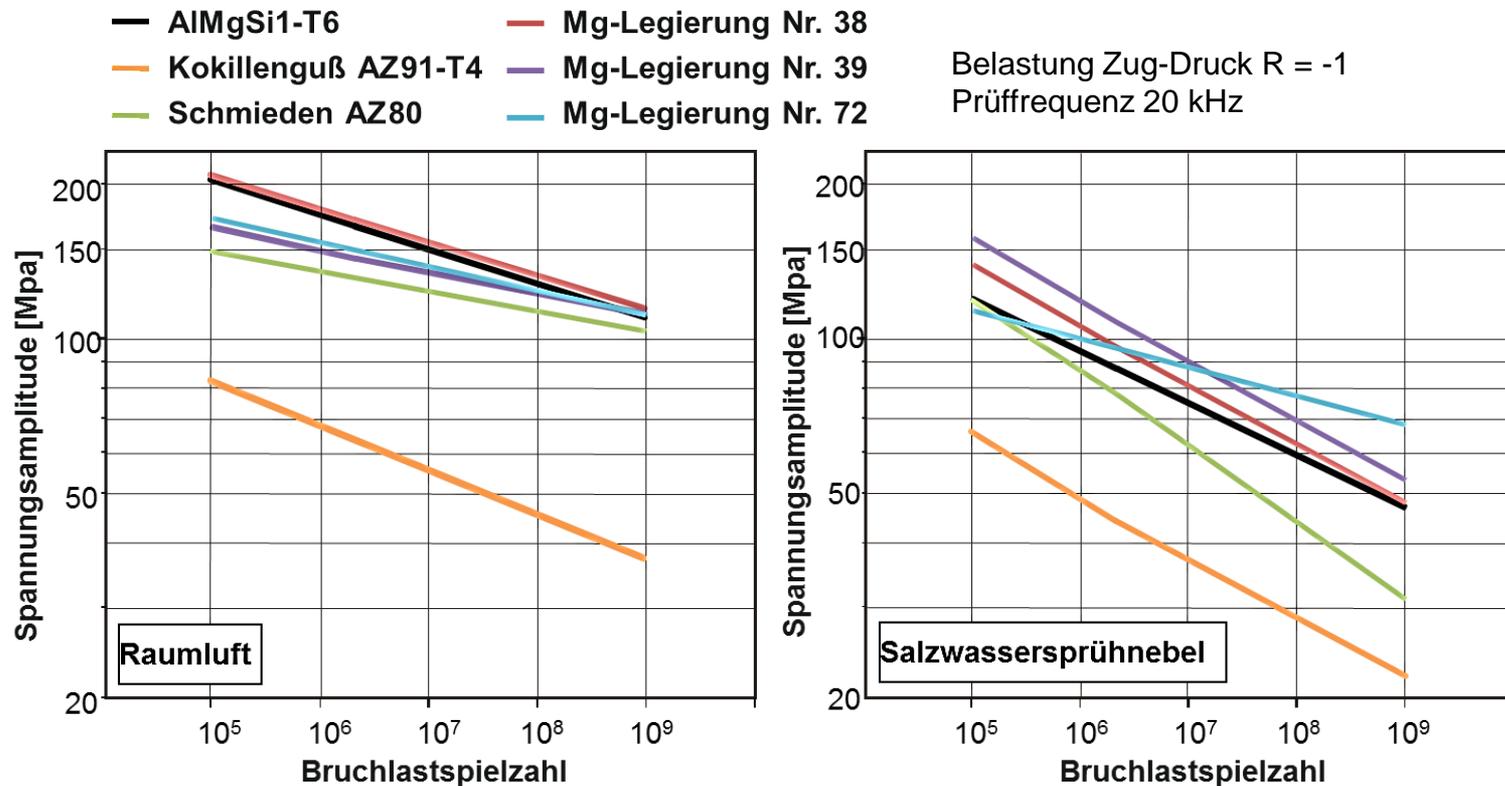
AZ91



Jeweils nach 240h

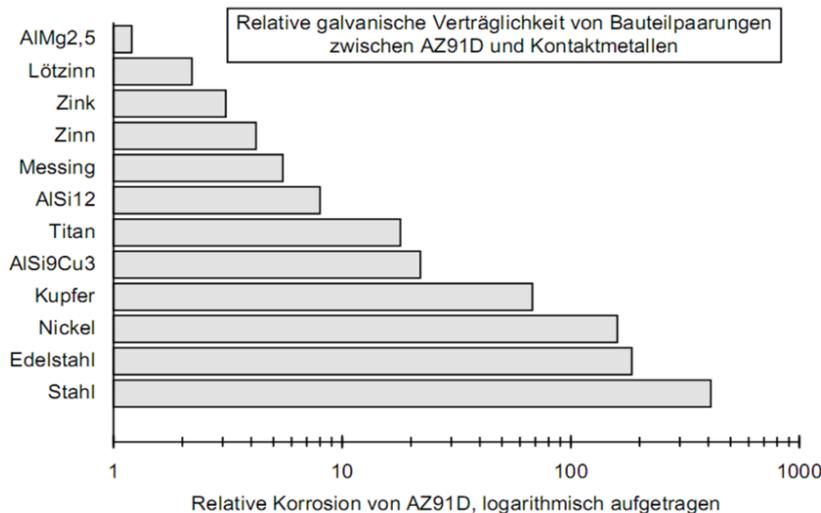
Metalle - Magnesium - Korrosion

- Einfluss auf die Betriebsfestigkeit / Spannungsrissskorsion



Metalle - Magnesium - Korrosion

Element	Potential, volts	Relative activity
Lithium	-3.04	<div style="text-align: center;"> Most active ↑ ↓ inert </div>
Magnesium	-2.38	
Aluminium	-1.66	
Manganese	-1.03	
Zinc	-0.76	
Iron	-0.44	
Cadmium	-0.42	
Nickel	-0.23	
Tin	-0.14	
Hydrogen	-0.0	
Copper	0.34	
Silver	0.80	
Gold	1.42	



Magnesium ist das für Kontaktkorrosion empfindlichste technische Metall

Quelle: Dissertation Harald Schreckenberger, TU Darmstadt

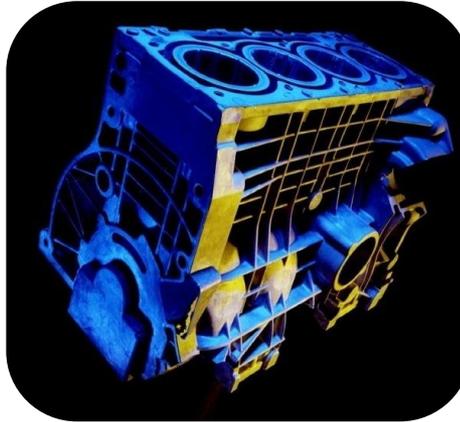
Urformen

- Sandguss
- Kokillenguss
- Druckguss

Umformen

- Warmwalzen
- Strangpressen
- Schlechte Kaltumformbarkeit

Metalle - Magnesium - Anwendungen



www.volkswagen.de



www.husky.ca



www.canon.de



<http://microsoft.com>



Robert Bunsen (1811-1899), deutscher Chemiker, forschte an der Elektrolyse von Salzschnmelzen und konnte so Chrom, **Magnesium (1852)**, Aluminium, Mangan, Natrium, Barium, Calcium & Lithium in Elementarform gewinnen.

Der Bunsenbrenner ist nach ihm benannt (Erfindung allerdings durch Michael Faraday, entscheidende Verbesserung 1855 im Labor von Bunsen durch Peter Desaga).

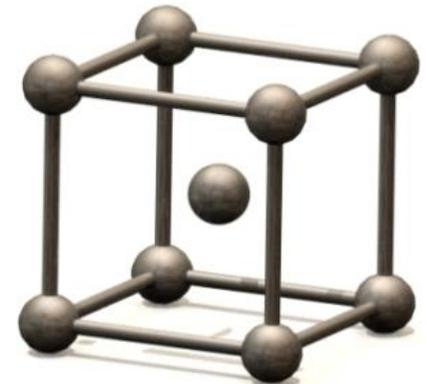
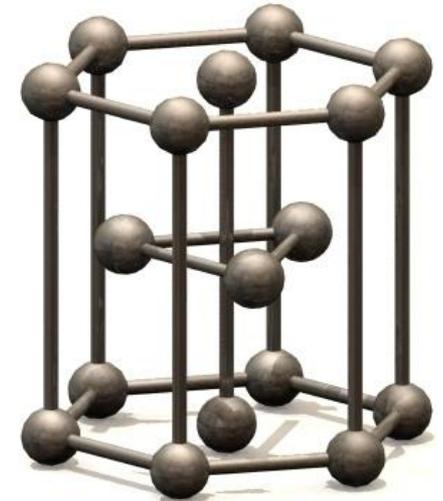
Quelle: <http://wikipedia.org>

5min Pause ...

Metalle - Titan

Kennwerte von Ti

- Dichte: 4,5 g/cm³
- Elastizitätsmodul: 106 GPa (isotrop)
- Gitterstruktur: hcg (α), krz (β)
- Schmelztemperatur: 1670°C
- Wärmeausdehnung: $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Wärmeleitfähigkeit: 17 W/mK



Wichtiger Hochleistungswerkstoff

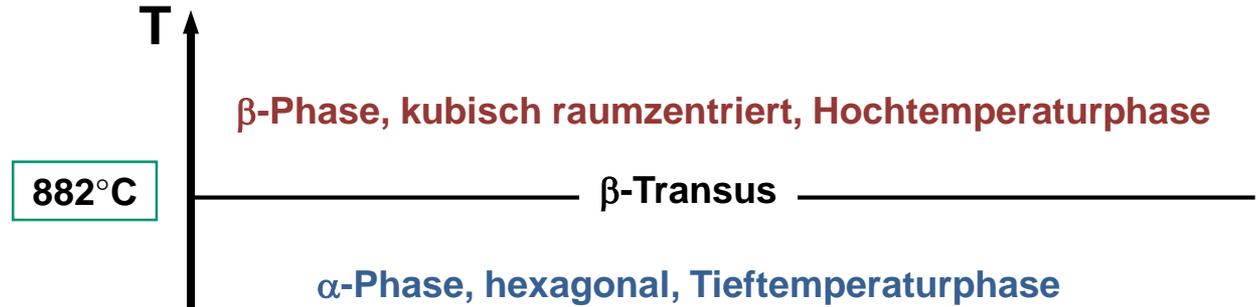
- 50% des Titanverbrauchs geht in die Luft- und Raumfahrt
- Höchste Dichte der Leichtmetalle
 - Dennoch 57% leichter als Stahl
- Sehr hohe spezifische Festigkeiten
- Geringe Wärmedehnung
- Sehr gute Korrosionsbeständigkeit
 - Titan bildet eine stabile, dichthaftende Oxidschicht
- Hohe Kosten
 - Wird nur da eingesetzt, wo hohen Festigkeiten benötigt werden

- Anwendungen:
 - Komponenten in Verbrennungsmotoren und Gasturbinen
 - Implantate (sehr gute Biokompatibilität)
 - Chemischer Anlagenbau

Metalle - Titan

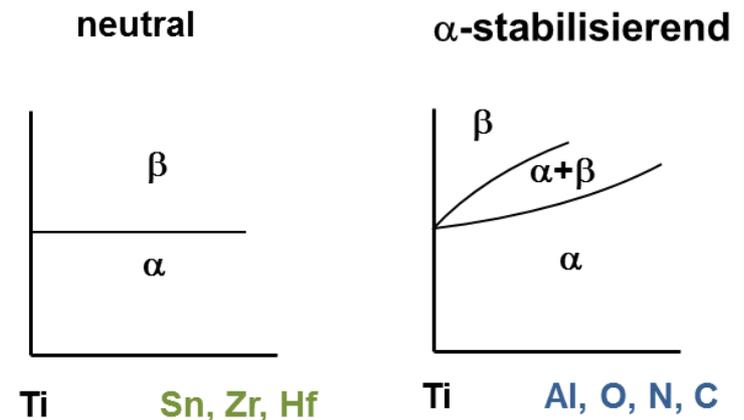
Legierungssysteme

➤ Reines Titan



➤ α – Legierungen

- Bessere Kriechfestigkeit als β - Legierungen
 - ↳ Bevorzugt bei höheren Temperaturen eingesetzt
- Gute Festigkeit und Risszähigkeit
- Höherer Aufwand bei Formgebungsprozess
- Können nicht ausgehärtet werden



Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidemann

Legierungssysteme

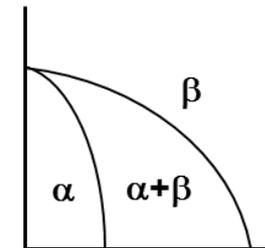
➤ $\alpha+\beta$ – Legierungen

- 2-phasiges Gefüge bei RT
 - ↳ 10 - 50 % β -Anteil
- Eigenschaften durch Wärmebehandlung gut einstellbar
- Wichtigster Vertreter aller Titanlegierungen ist **Ti-6Al-4V**

➤ β – Legierungen

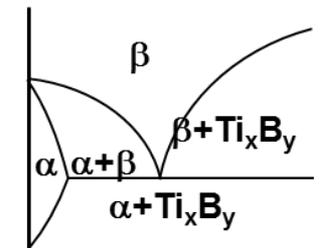
- Sehr gut umformbar
- Sehr gut aushärtbar
- Bessere Risszähigkeit und Festigkeit als α Legierungen
- β - Stabilisierer erhöhen die Dichte
 - ↳ Schwere Nebengruppenelemente

β -stab. (isomorph)



Ti Mo, V, Ta, Nb

β -stab. (eutektoid)



Ti Fe, Cu, Mn, Cr,
Co, Ni, Si, H

Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidemann

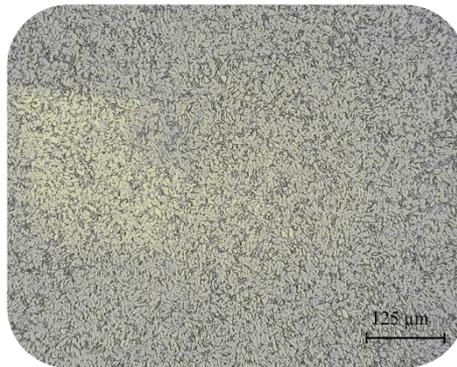
Metalle - Titan

Legierungssysteme

- Gefügestruktur von Ti-6Al-4V

globular

Glühung (800°C)
deutlich unterhalb
des β -Transus



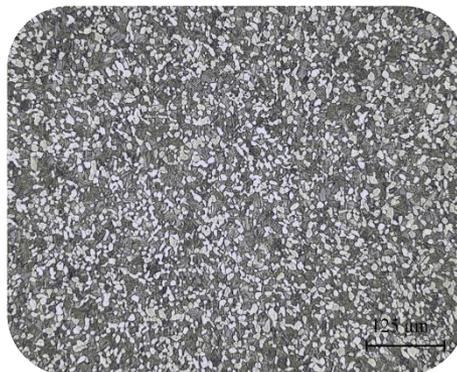
lamellar

Glühung oberhalb
des β -Transus



duplex

Glühung (980°C)
dicht unterhalb
des β -Transus



martensitisch

Glühung oberhalb
des β -Transus,
rasche Abkühlung



Legierungssysteme

➤ Pulvermetallurgische Legierungen

- Probleme mit den Schmelzverfahren führten zu deren Entwicklung
- Herstellung erfolgt durch Vakuumsintern u./o. Vakuumheißpressen
- Es werden Pulvermischungen aus Elementpulvern oder vorlegierte Pulver verwendet
- Für hochbeanspruchte Bauteile sind Dichten >99% nötig
 - └ Enthalten nur noch Poren im μm - Bereich
- Sehr gute Eigenschaftskombinationen möglich
 - └ Abhängig von Dichte und Gefügestruktur
- PM-Legierungen sind heute den Knet- und Gusslegierungen in ihren Eigenschaften ebenbürtig

Bezeichnungssystem

- Im Gegensatz zu Al- und Mg-Legierungen, werden bei den Titanlegierungen die direkten Angaben von Legierungselement und deren Zusammensetzung verwendet

Legierungen	Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	Zugfestigkeit R_m [MPa]
Near α - Legierungen		
Ti-5Al-2,5Sn	760	790
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	830	900
α/β - Legierungen		
Ti-6Al-4V, geglüht	830	900
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, ausgeh.	1100	1170
β - Legierungen		
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr, geglüht	830	900
Ti-10V-2Fe-3Al	1100	1170

Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidemann

Metalle - Titan

Anwendungen



www.wikipedia.org



Volkswagen AG



www.prothesensprechstunde.de



www.pankl.com



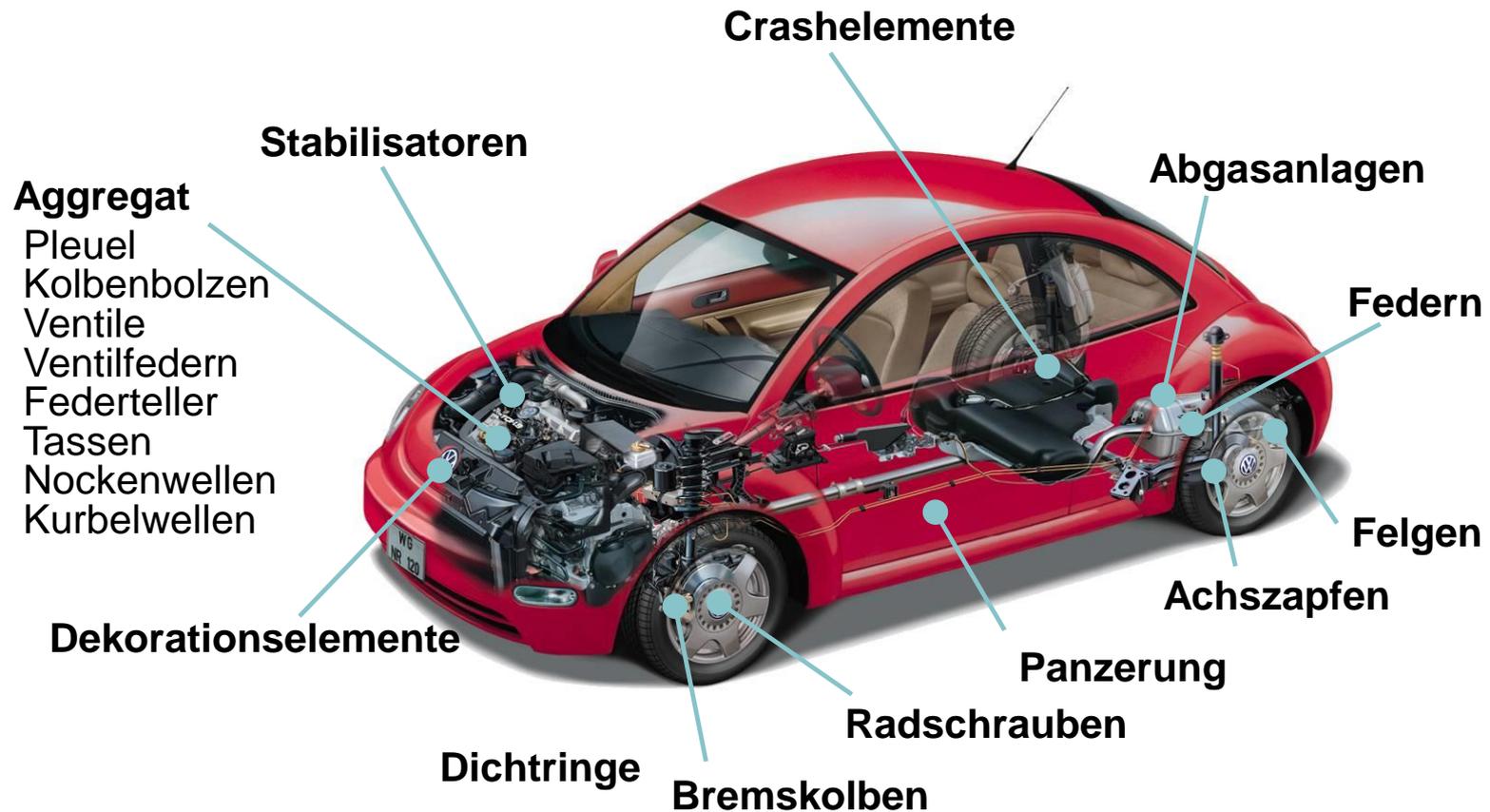
www.dlr.de



www.zahnarzt-peterke.de

Metalle - Titan

Anwendungen und Potentiale im Automobilbau



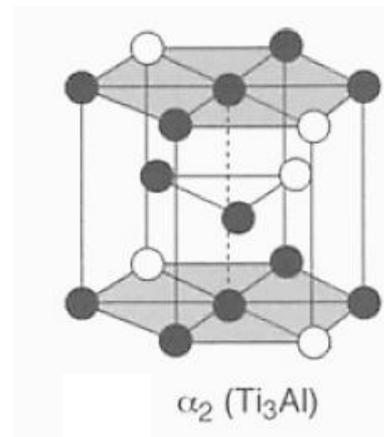
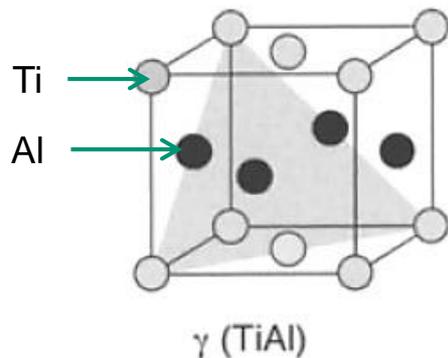
Anwendungen und Potentiale im Automobilbau

Jahr	Komponente	Material	Hersteller	Fahrzeugtyp
1992	Verbindungsstreben	Ti-3Al-2V-seltene Erden	Honda	Acura NSX
1994	Verbindungsstreben	Ti-6Al-4V	Ferrari	In allen 12 Zyl.
1996	Radschrauben	Ti-6Al-4V	Porsche	Sportlenkrad
1998	Bremsbelagführungs-schienen	Ti Güteklasse 2	Daimler	S-Klasse
1998	Dichtungsringe (Bremsanlage)	Ti Güteklasse 1	Volkswagen	In allen Modellen
1998	Schaltknöpfe	Ti Güteklasse 1	Honda	S 2000 Roadster
1999	Verbindungsstreben	Ti-6Al-4V	Porsche	GT 3
1999	Ventile	Ti-6Al-4V & P/M ^a -Ti	Toyota	Altezza 6 Zyl. ^a P/M = powder metallurgy
1999	Turbolader	Ti-6Al-4V	Daimler	LKWs
2000	Federaufhängung	Timetal LCB	Volkswagen	Lupo FSI
2000	Radschrauben	Ti-6Al-4V	BMW	M-Klasse
2000	Ventilfedern	β -Titanlegierungen	Mitsubishi	alle 1.8l-4 Zyl.
2000	Turbolader	γ -TiAl	Mitsubishi	Lancer
2001	Abgasanlage	Ti Güteklasse 2	General Motors	Corvette Z06
2001	Radschrauben	Ti-6Al-4V	Volkswagen	Sportausstattung
2002	Ventile	Ti-6Al-4V & P/M-Ti	Nissan	Infiniti Q45
2003	Federaufhängung	Timetal LCB	Ferrari	360 Stradale

Titanaluminide

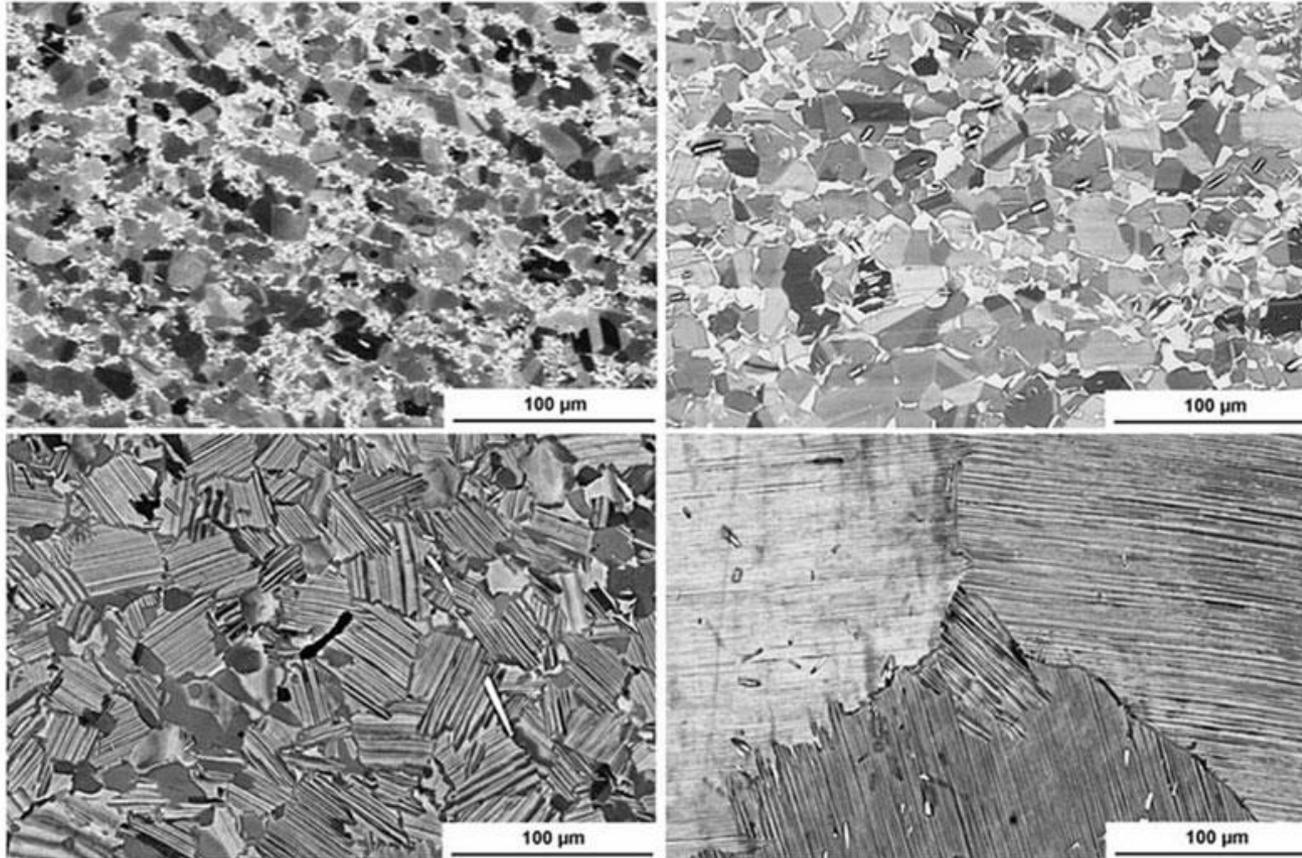
➤ Intermetallische Phasen im Ti-Al-System

- Titan und Aluminium sind entgegen konventionellen Legierungen streng geordnet in einem gemeinsamen Kristallgitter eingebaut
- Die wichtigsten Verbindungen sind das γ (TiAl) und das α_2 (Ti₃Al)
- Titanaluminide bestehen aus einer Mischung dieser beiden Phasen, dabei können sich unterschiedliche Gefügestrukturen ausbilden



Quelle: Intermetallische Titanaluminide: WS für hohe Temperaturen/ Appel, Clemens, BHM, 2006, Heft 5

Titanaluminide

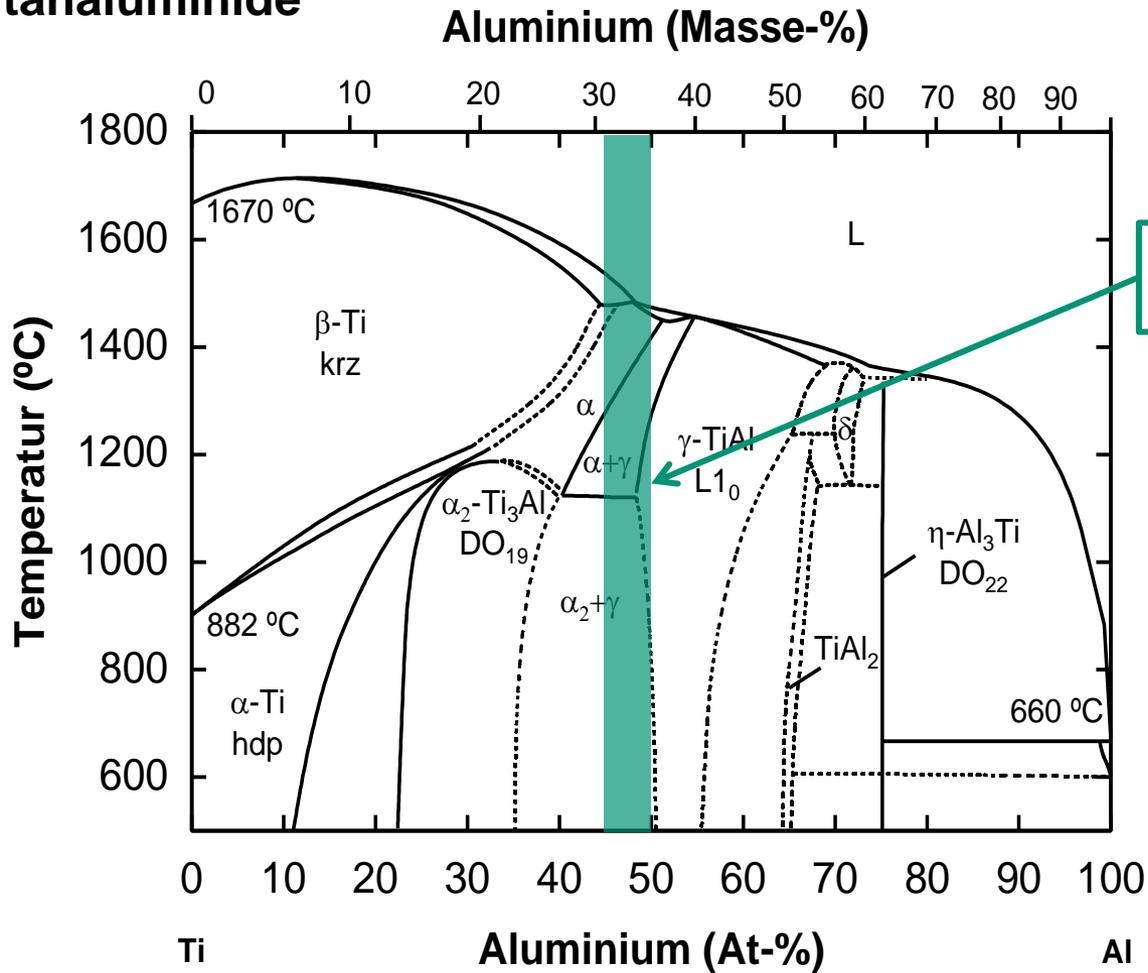


Verschiedene Gefügestände einer TiAl-Legierung

Quelle: DLR

Metalle - Titan

Titanaluminide



Technisch am meisten genutzte Legierungszusammensetzungen

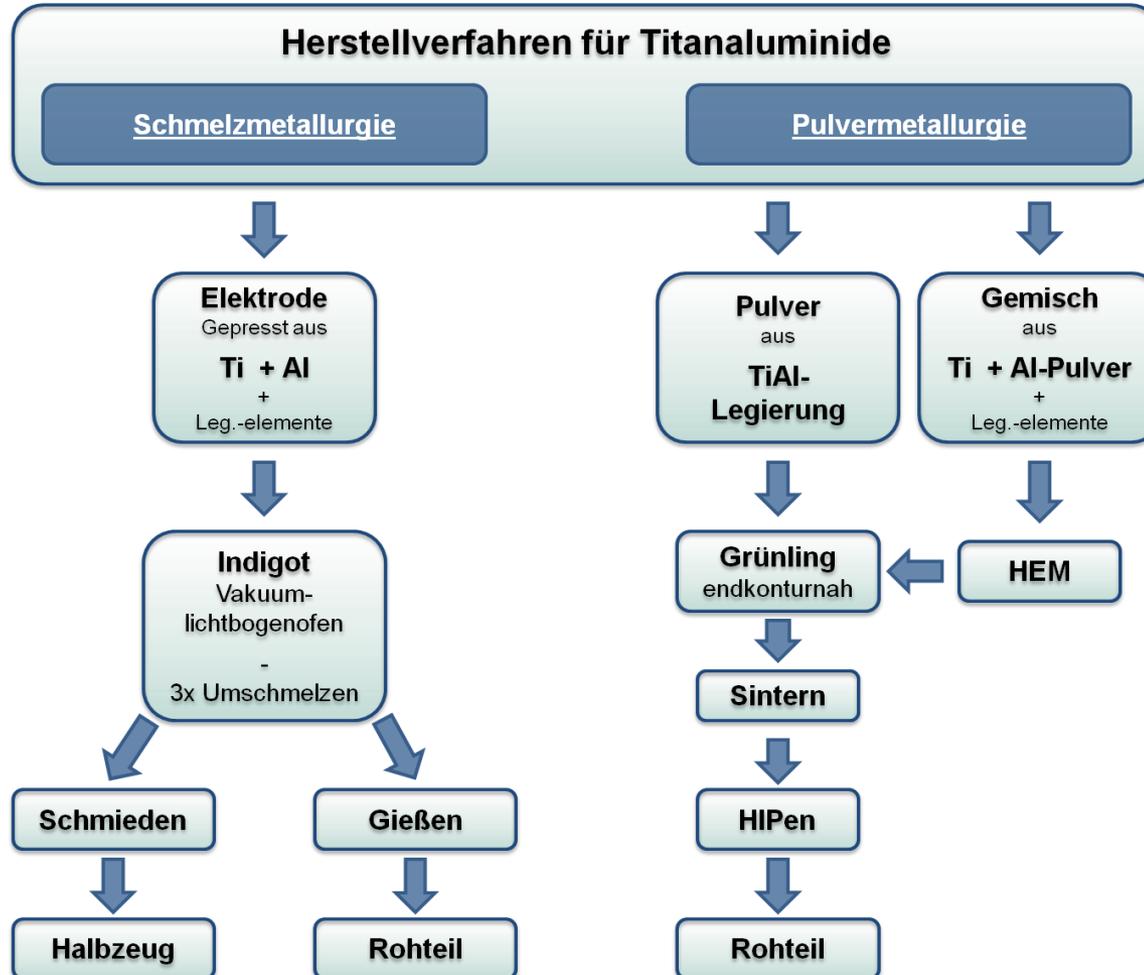
Quelle: Dr.-Ing. Siegfried Brüdgam, Volkswagen AG

Titanaluminide

- Sehr gute Hochtemperaturfestigkeit
- Niedrige Dichte: 3,8 - 4,1 g/cm³
- Einsatztemperaturen von ca. 700 °C möglich
 - Bei guter Beschichtung auch höher

- **Anwendung**
 - vor allem in Gas- und Flugzeugturbinen
 - └ Ersetzen die schweren Nickellegierungen (Dichte von 9 g/cm³)

Titanaluminide



Titanaluminide - Herstellungsbeispiel: Ventile für Pkw-Motoren

➤ Gießen

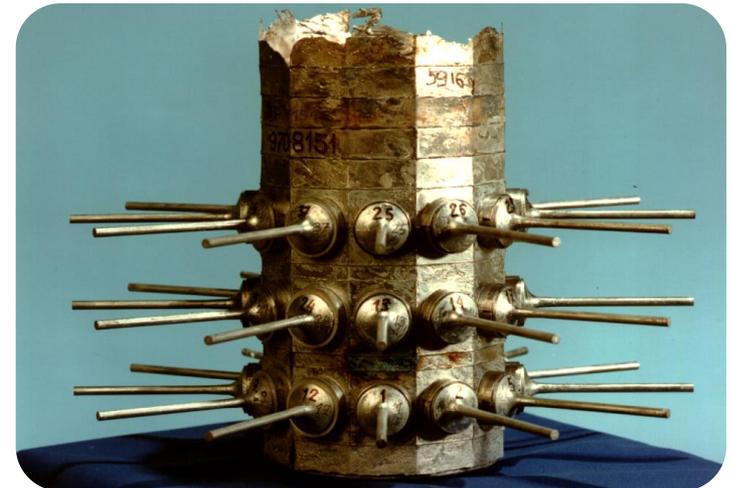
- Feinguss, Schleuderguss
- Vergleichsweise einfaches Verfahren
- Geringe Materialausbringung
- Geringere Festigkeit

➤ Schmieden

- Aufwendiger, mehrstufiger Prozess
- Hohe Festigkeit

➤ Pulvermetallurgie

- Aufwendiger, mehrstufiger Prozess
- Gefahr von Verunreinigungen
- Hohe Materialausbringung
- Geringe Dauerfestigkeit

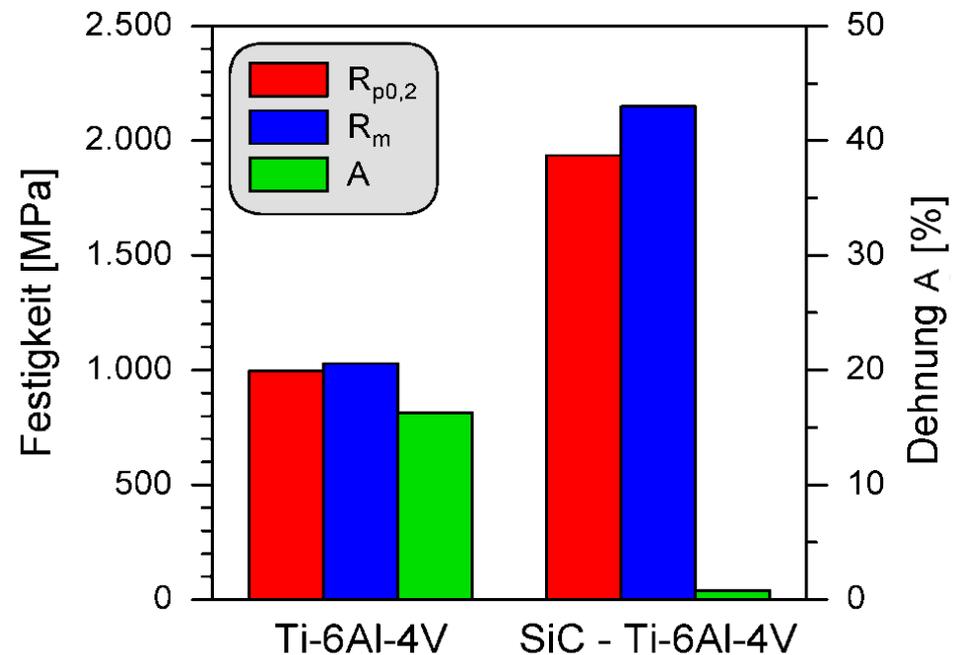
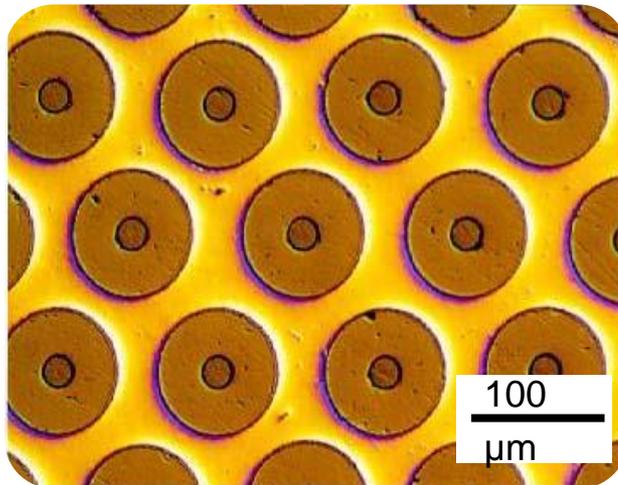


TiAl-Ventile, Schleuderguss

Titanverbundwerkstoffe

➤ Titan Matrix Composite

- mit SiC-Fasern (SiC-SCS 6, beschichtete Fasern)
- $E = 420 \text{ GPa}$
- $R_m \approx 3500 \text{ MPa}$
- $\rho = 3,5 \text{ g/cm}^3$



Entwicklung neuer Legierungen

➤ Metastabile β - Legierungen : Timetal LCB

- Konventionelle β - Legierungen enthalten größere Anteile an teuren Legierungselementen
- Die amerikanische Firma Timet[®] entwickelte eine „Low Cost Beta“ - Legierung für den Automobilbau
- Zusammensetzung: Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al
- Sehr schwer gieß- und schmiedbar
- Hauptsächlich werden gewalzte oder gerollte Halbzeuge verwendet
- Anwendungen:
 - └ Fahrwerksfedern im VW Lupo FSi sowie im Bugatti Veyron

Entwicklung neuer Legierungen

➤ Metastabile β - Legierungen : Timetal LCB

Kennwerte	Titan LCB® Feder	Stahlfeder
Federrate	15	15
Windungsanzahl	6,3	7,4
Drahtdurchmesser [mm]	10	9,35
Lebensdauer bei Prüfung mit und ohne Korrosionsbeaufschlagung	100 %	100 %
Feder ­ masse [g]	650	1100



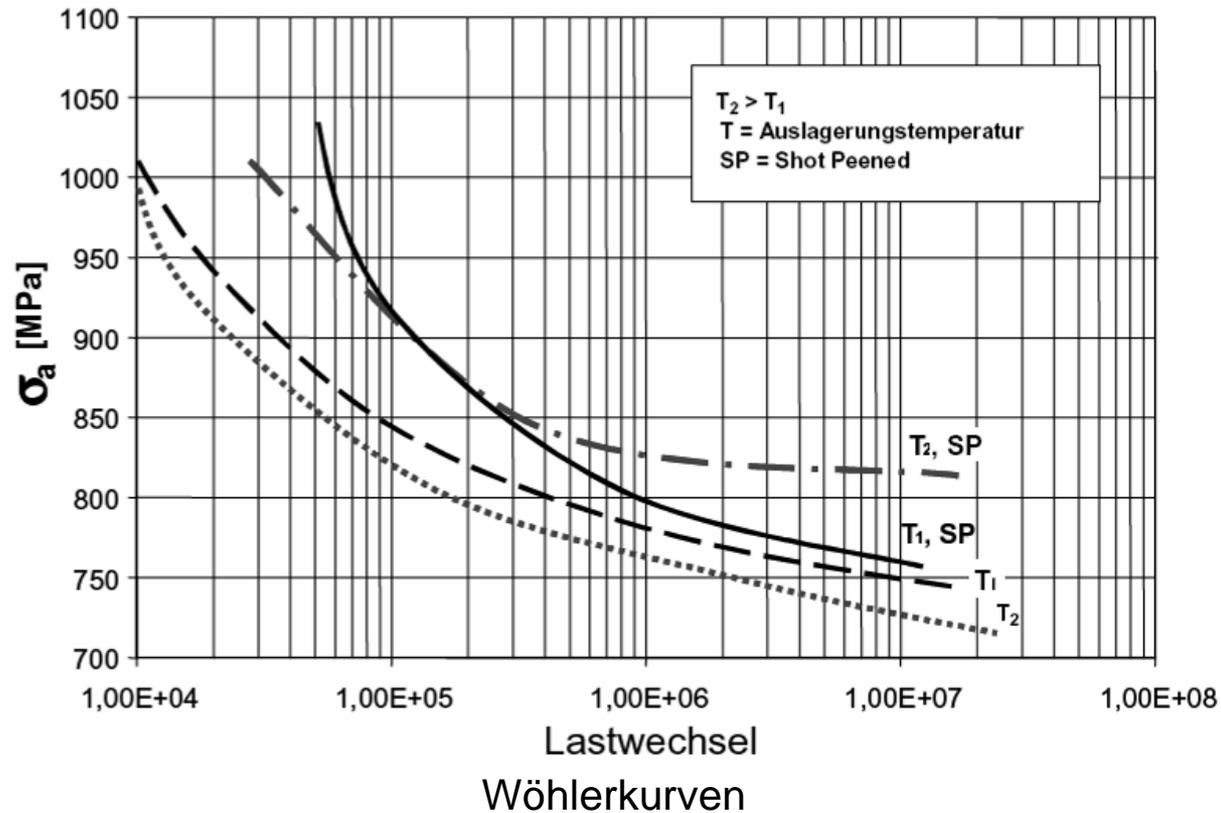
Lupo
Stahl
1040g

Lupo FSI
Titan
625g

Massereduzierung durch Einsatz einer Titanfeder liegt bei 40 %

Entwicklung neuer Legierungen

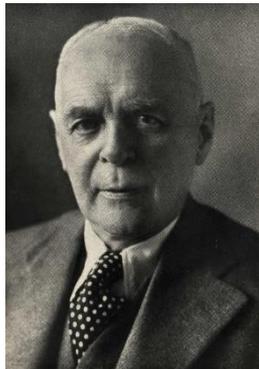
➤ Metastabile β - Legierungen : Timetal LCB



One more thing ...



Justus von Liebig (1803-1873), deutscher Chemiker, Forschung begründete moderne Mineraldüngung & entwickelte Herstellungsverfahren für Rindfleisch-Extrakte; gewann 1831 zum ersten Mal metallisches Titan aus Erz



William Kroll (1889-1973), luxemburgischer Forscher, Metallurge und Erfinder, entwickelte Ende der 1930er Jahre den Kroll-Prozess (1940 patentiert) mit dem technisch reines Titan gewonnen werden kann.

Quelle: <http://wikipedia.org>

Metalle - Vergleich der Eigenschaften

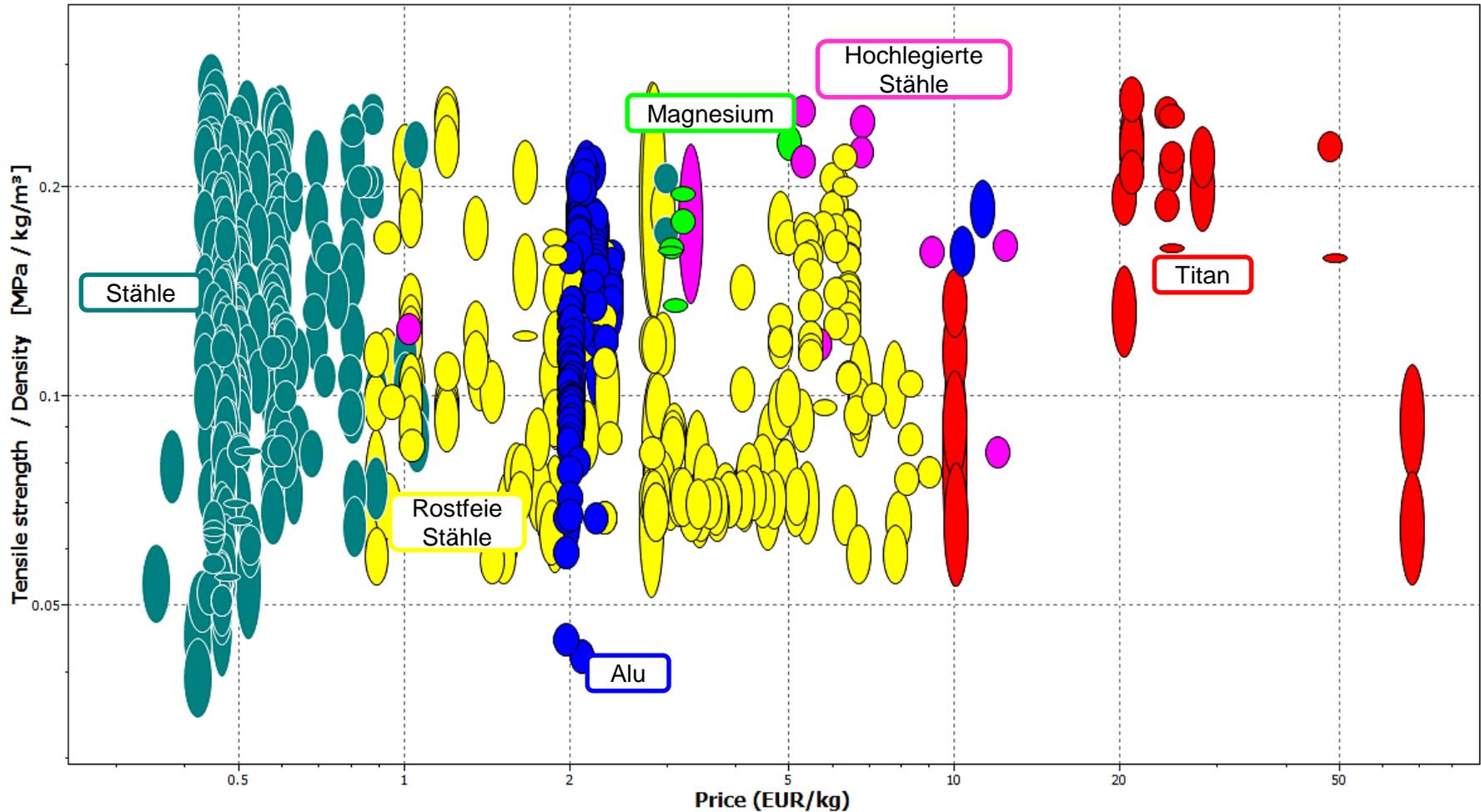
Werkstoff	Typ	Dichte [g / cm ³]	E-Modul [GPa]	Spez. E-Modul [GPa/g/cm ³]	Zugfestigkeit [MPa]	Spez. Zugfestigkeit [MPa / g/cm ³]
Stahl						
St-37	Standard	7,85	206	26	400	51
42CrMo4	Hochfest	7,81	208	26	1150	148
54SiCr6	Ultrahochf.	7,8	206	26	2150	275
Aluminium						
Al-A5083	Mittelfest	2,68	71	26	260	97
Al-2024	Hochfest	2,84	74	26	440	115
Al-7068	Ultrahochf.	2,88	76	26	712	247
Magnesium						
AZ31B	Standard	1,78	45	25	240	135
ZK60A-T5	Hochfest	1,83	45	25	360	197
EA55RS-T4	Ultrahochf.	1,94	46	24	450	323
Titan						
Ti-Grade 2	Standard	4,51	115	26	500	111
Ti-6Al-4V	Hochfest	4,42	115	26	1050	260
TiAl	Hochtemp.	3,74	190	51	700	187

Quelle Stahl/Al/Ti: Einsatzmöglichkeiten und Produktion von Titan / Lightweight Design/ Springer / 2013-6

Quelle Mg: CES Edupack 2014, Granta Design

Metalle - Vergleich der Eigenschaften

Knetlegierungen - spez. Zugfestigkeit vs. Preis



Quelle Mg: CES Edupack 2014, Granta Design

Literaturempfehlungen:

- *Berns, H., Theisen, W.:* Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen; 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- *Ostermann, F.:* Anwendungstechnology Aluminium; 2007, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- *Friedrich, H.E., Mordike, B.L.:* Magnesium Technology – Metallurgy, Design Data, Applications; 2006, Springer-Verlag Berlin Heidelberg