

---

# 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

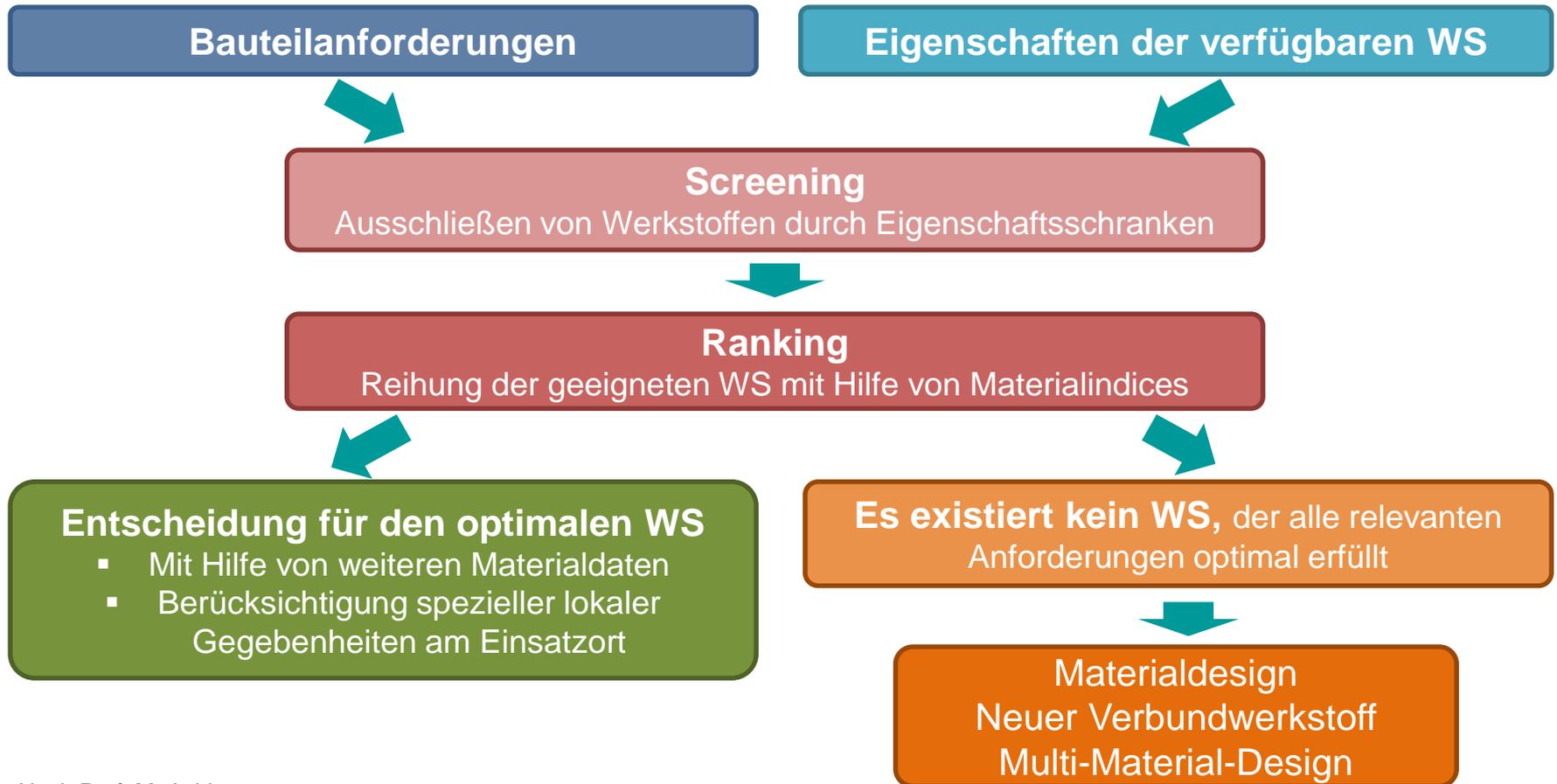
- Dichte/ Preis
- Festigkeit / Steifigkeit
- Therm. Beständigkeit
- Schwing- / Kriechfestigkeit
- Risszähigkeit
- Energieaufnahmevermögen
- El. Leitfähigkeit
- Therm. Ausdehnungskoeff.
- Chem. Beständigkeit
- Magn. Verhalten
- Umformbarkeit
- Schweißbarkeit
- Recyclierbarkeit
- ...



## Eigenschaften der verfügbaren Werkstoffe

# Allgemeines - Systematische Werkstoffauswahl

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



Nach Prof. M. Ashby

# Allgemeines - Systematische Werkstoffauswahl

## ➤ Wichtige **Materialkennwerte**

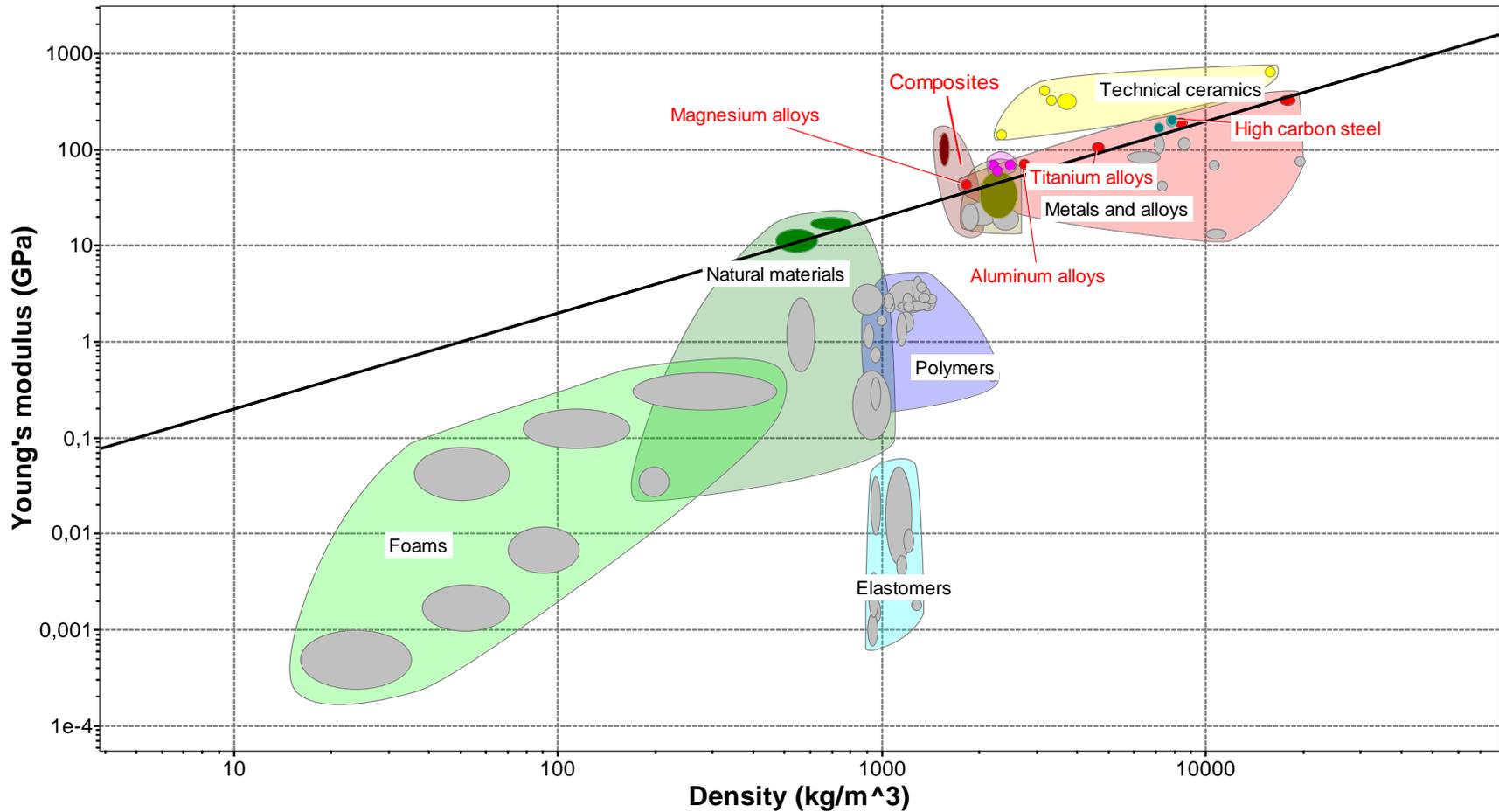
- Dichte  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]
- Elastizitätsmodul  $E$  [MPa oder GPa]
- Zugfestigkeit  $R_m$  [MPa]
- Spezifischer Materialkennwert  $X/\rho$  [MPa/(g/cm<sup>3</sup>)]

## ➤ 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

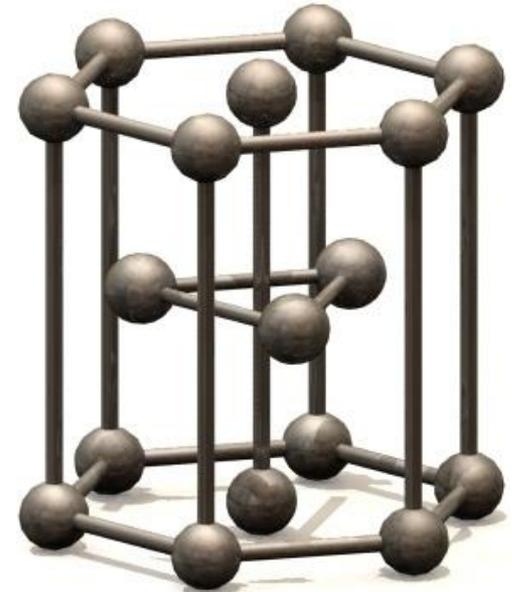
# Einführung in die Vorlesung



# Metalle - Magnesium

## Kennwerte von Mg

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



## 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
- Sehr gute Vibrations- / Dämpfungseigenschaften
- Elektromagnetische Abschirmung
- Gute Schweißbarkeit unter Schutzgas
- Vollständige Recyclierbarkeit
- Gute elektrische und thermische Leitfähigkeit
- Hauptverwendung als Legierungszusatz
- Hauptsächlich Gussbauteile in der Anwendung
- Hohe Verfügbarkeit

# Magnesium - Vorteile

---

## Produkt – Vorteile

Mg 1.8 g/ cm<sup>3</sup> → Gewichtseinsparungen → Stahl > 55% & Aluminium > 25%

- Exzellente Vergießbarkeit
  - große, dünnwandige Bauteile mit Funktionsintegration
  - Reduzierung zusätzlicher Fügeoperationen
  - geringe Lagerungskosten
- Sehr gute spanende Verarbeitbarkeit
  - gute Oberflächen, kurzer Span, weniger Energie
- Geringerer Wärmeinhalt als Aluminium → schnellere Taktzeiten
- → geringere thermo-zyklische Belastung der Druckgussform  
(> 1.5 fache Standzeiten vs. Al)

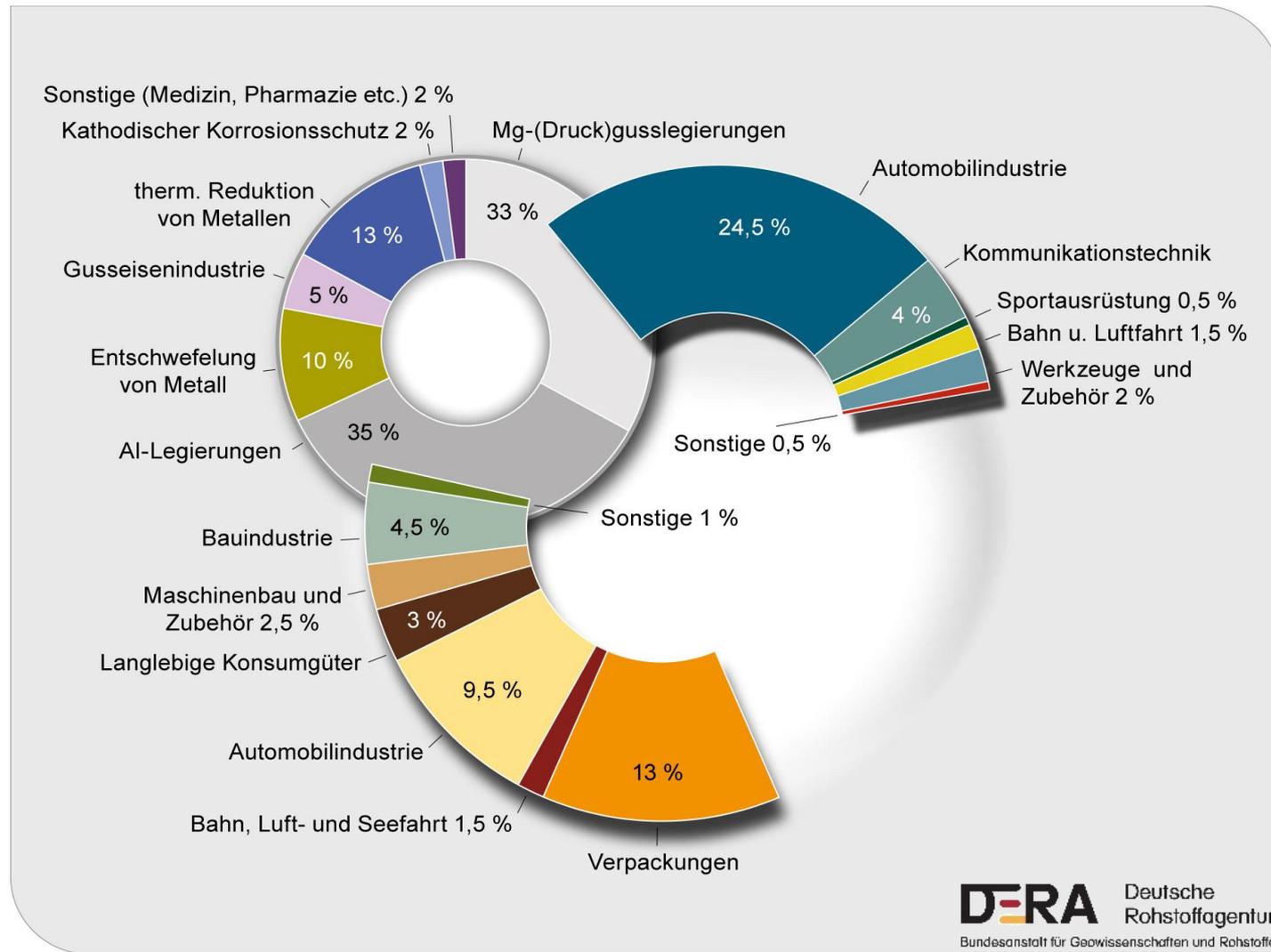
## Nachteile:

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

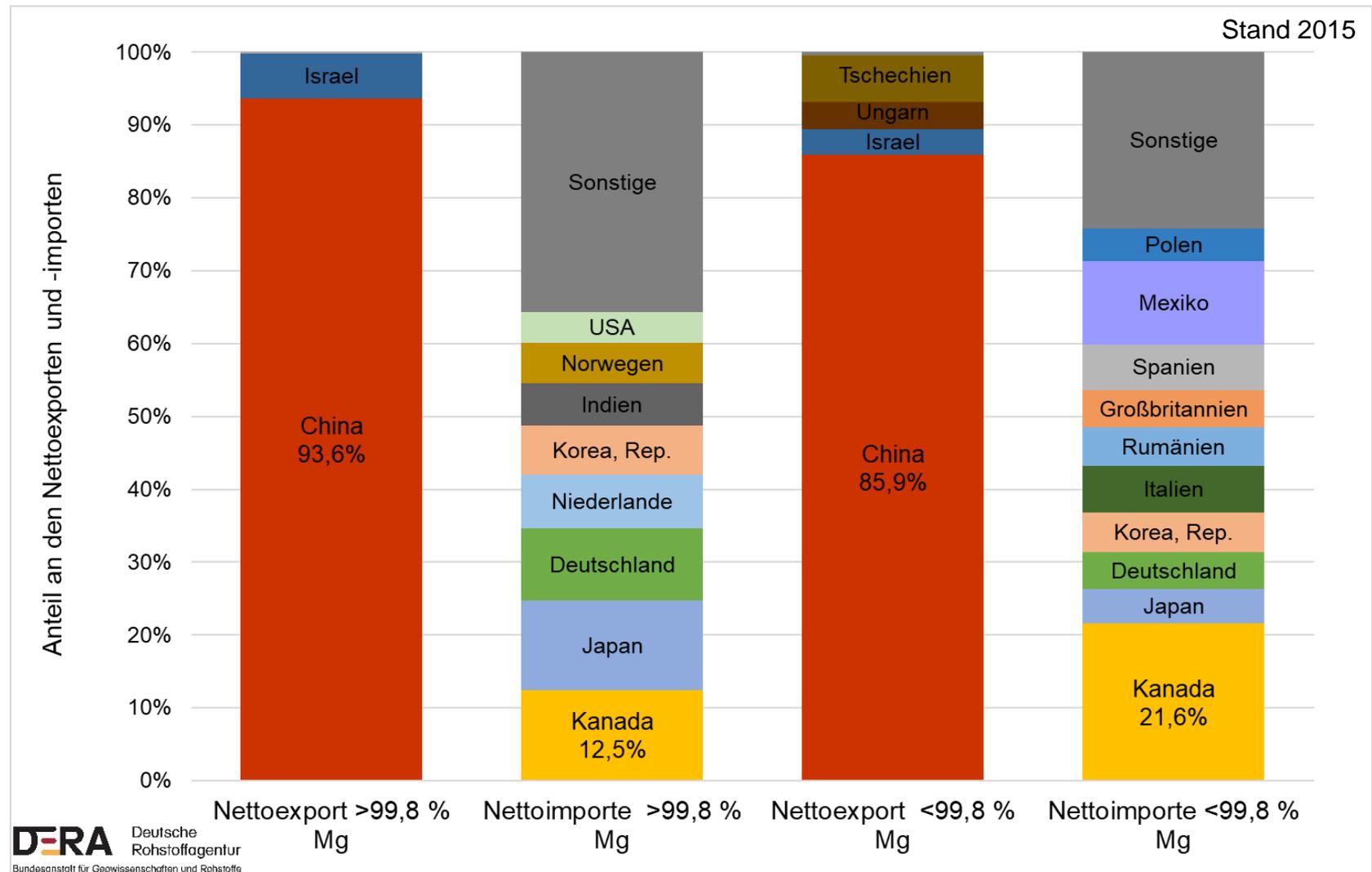


• Abbildung 1: <https://www.teachersupplysource.com/images/D/XZ7-807-12.jpg>

# Metalle - Magnesium



# Metalle - Magnesium



## 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

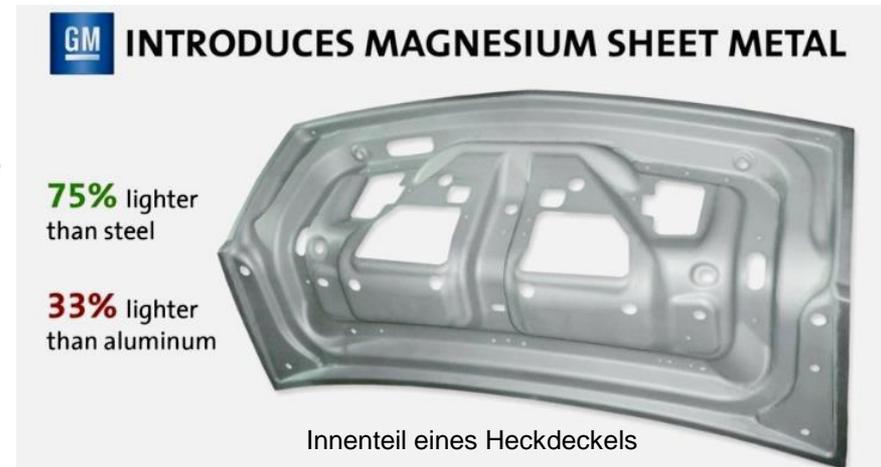
## Bezeichnungssystem

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

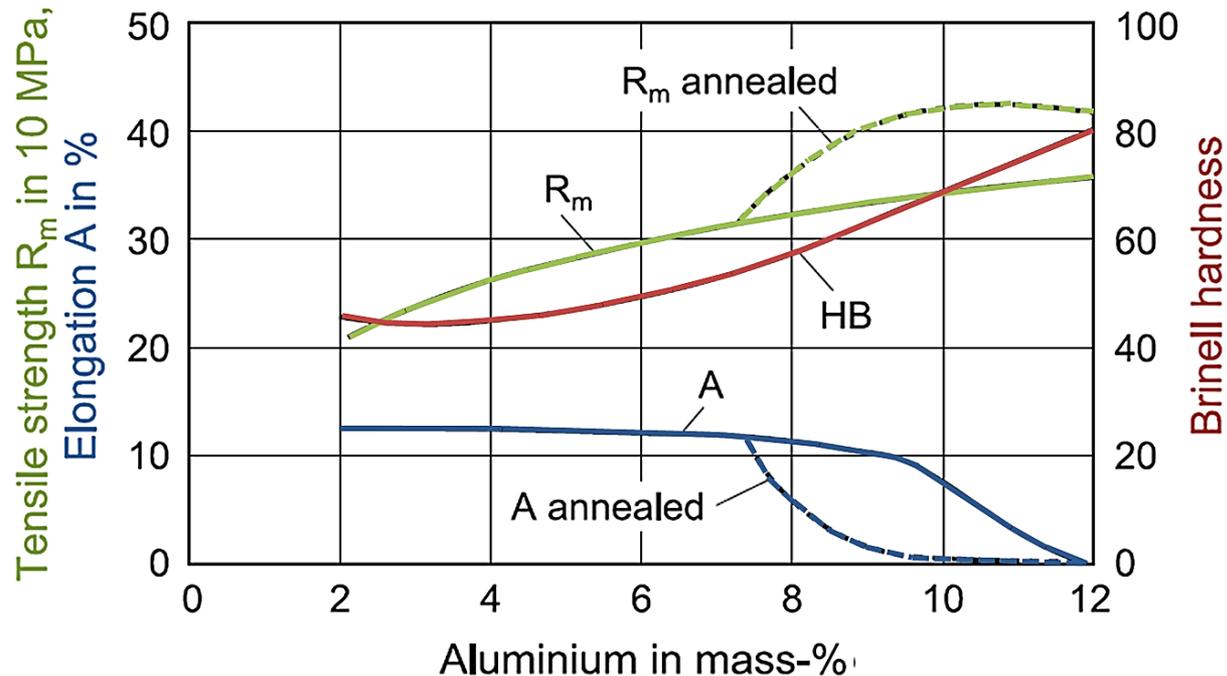
- Bieten ein hohes Potential für ultraleichte Karosseriebleche mit dennoch guten mechanischen Eigenschaften



Quelle: GM

## Knetlegierungen

- Einfluss von Aluminium auf die mechanischen Eigenschaften

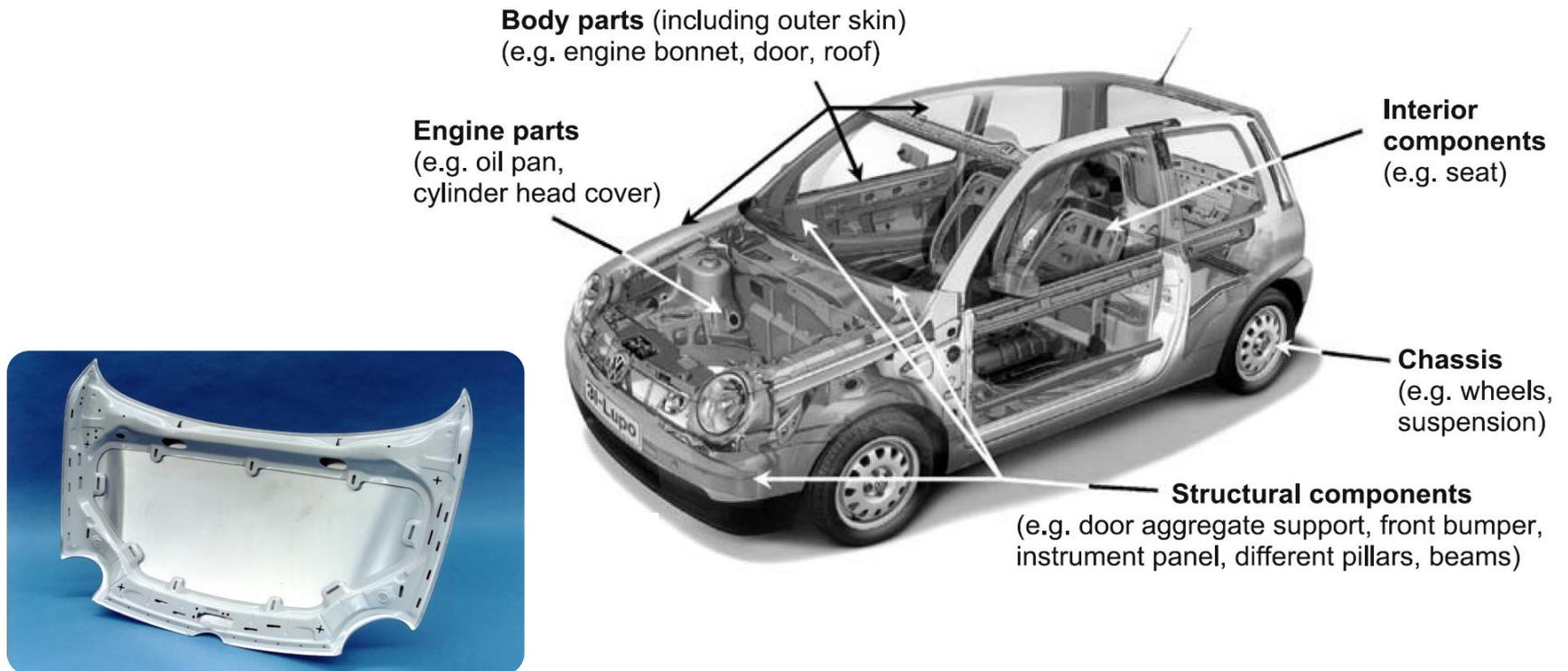


Extrudiert, Lösungsgeglüht (420 °C/2 h), Angelassen (200 °C/12 h)

Quelle: Magnesium Technology / Friedrich

## 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



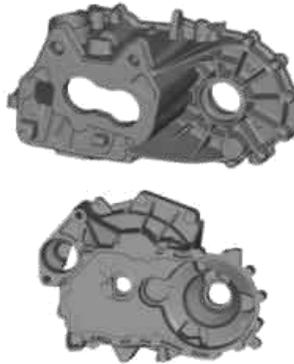
[www.isf.de](http://www.isf.de)

# 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%**

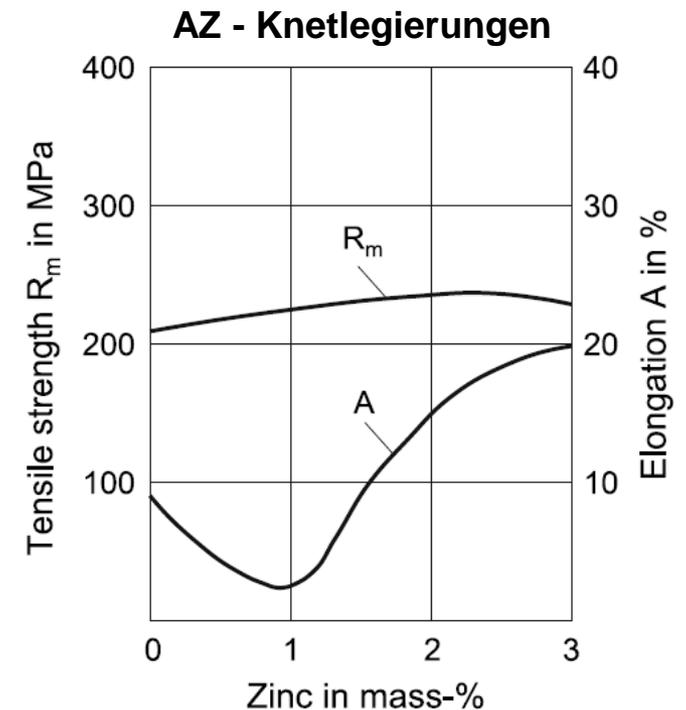
## Gebräuchlichsten Legierungssysteme

### ➤ 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

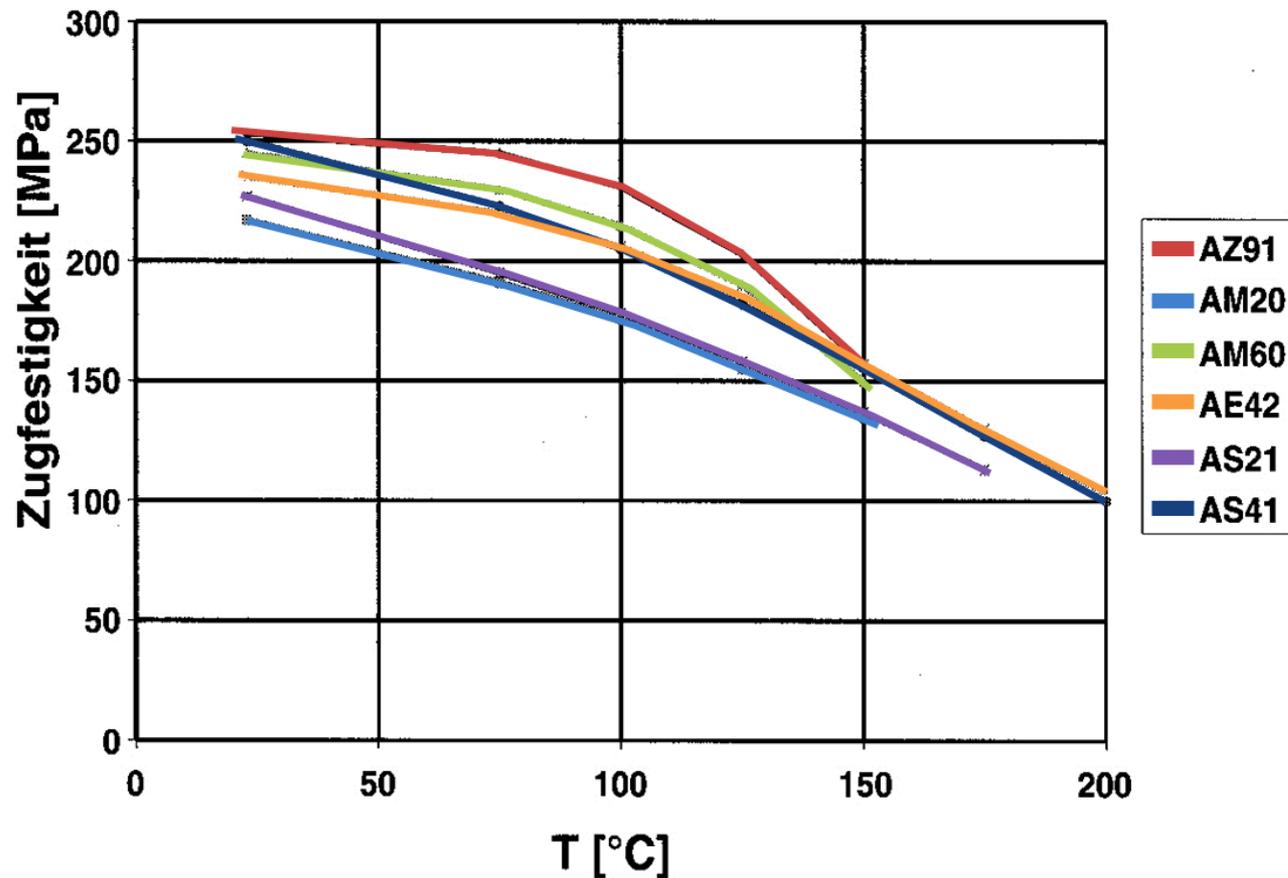
- Deutlich höhere Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit durch Mg-RE-Ausscheidungen
- Eingeschränkte Gießbarkeit
  - └ Nur im Druckguss verarbeitbar

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

## Gebräuchlichsten Legierungssysteme

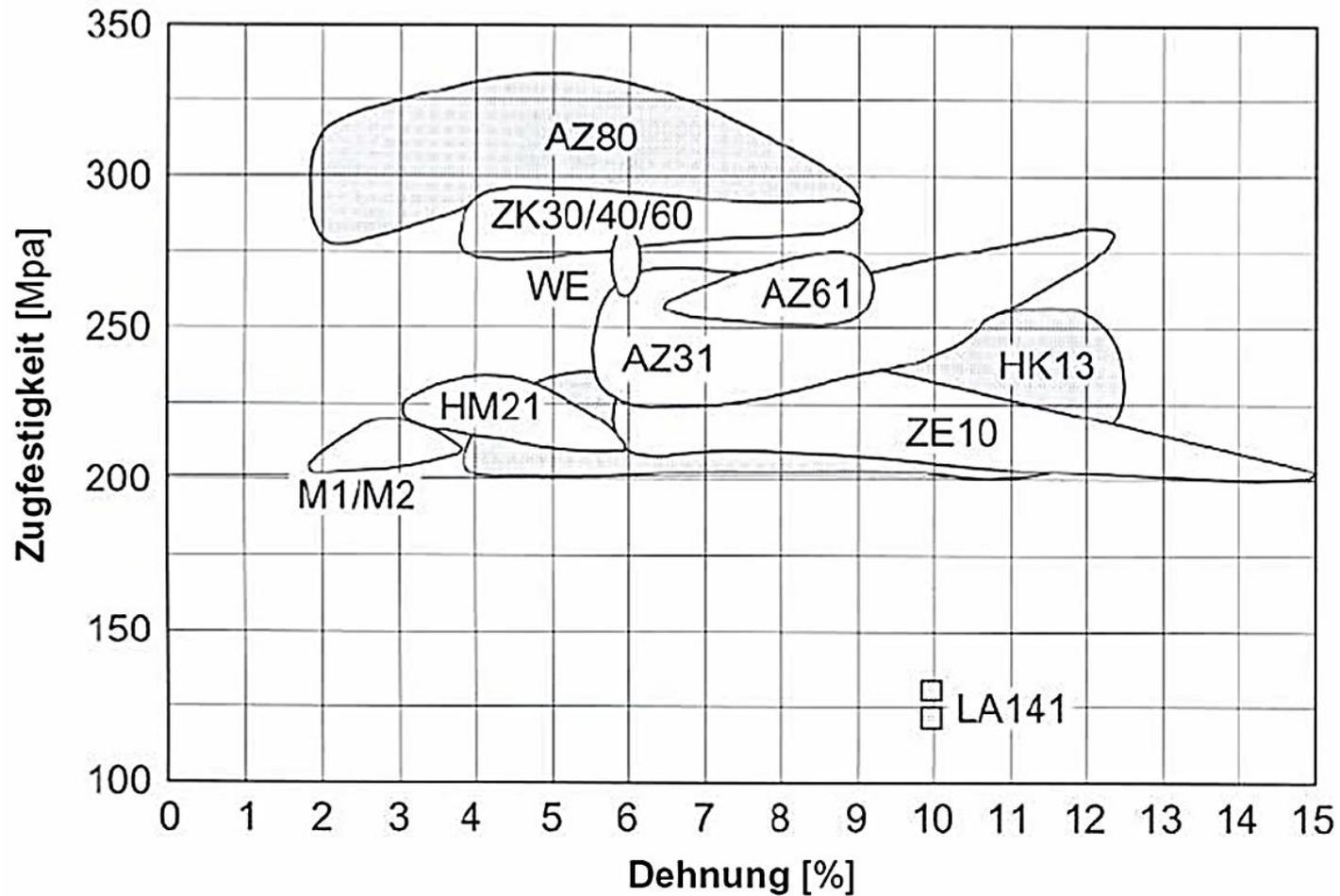
Eigenschaft	AZ91	AM61	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
Zugfestigkeit $R_m$ [MPa]	250	240	230	210	240	220	230
Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	160	130	125	90	140	120	145
Druckfestigkeit [MPa]	148	k.A.	113	74	k.A.	106	103
Bruchdehnung [%]	7	13	15	20	15	13	11
E-Modul [GPa]	45	45	45	45	45	45	45
Schubmodul [GPa]	17	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

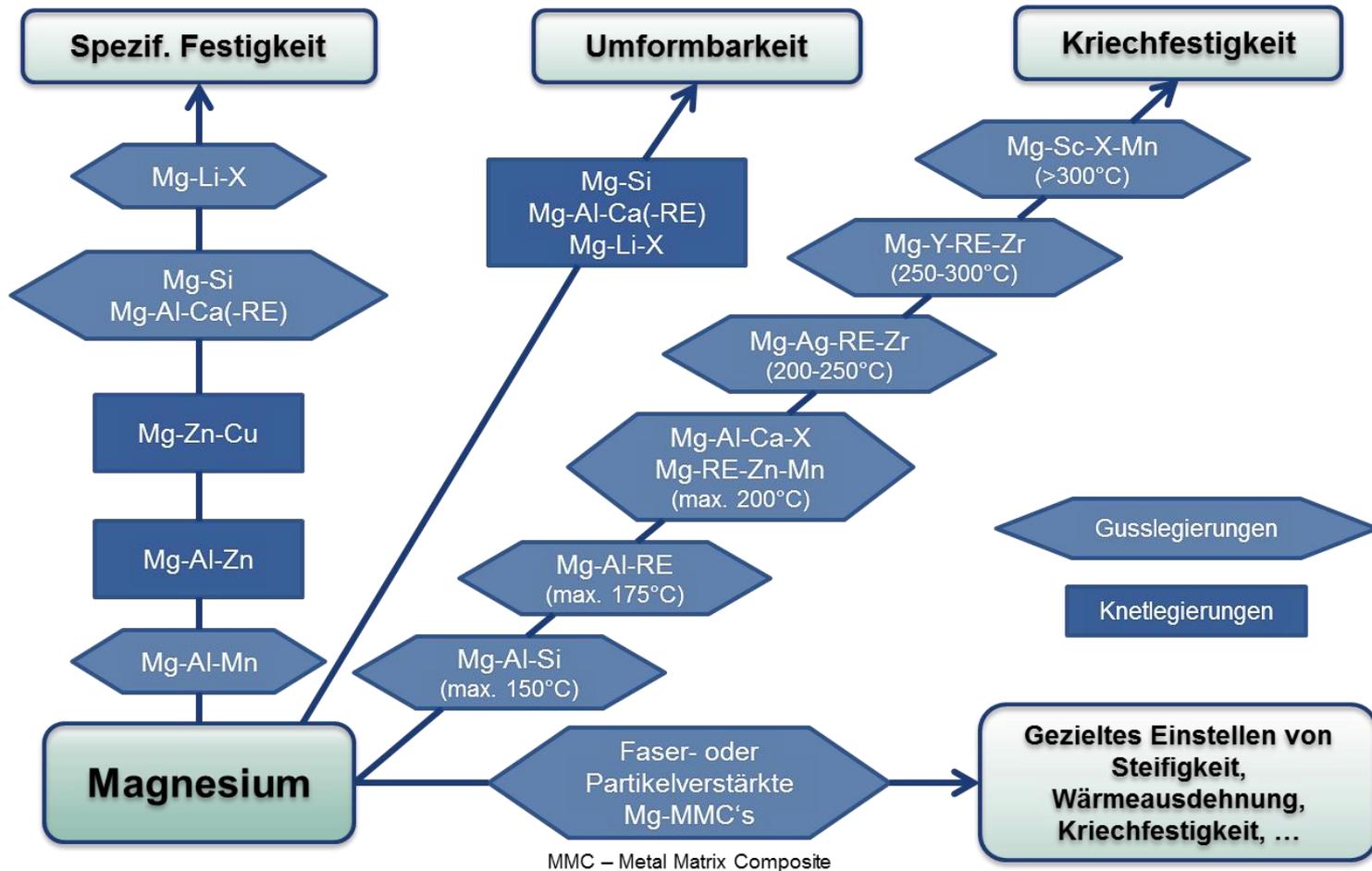


Quelle: K.U. Kainer, F.von Buch, Wiley, Weinheim, 2000 und H. Friedrich, S. Schumann, F. von Buch, Osaka, 2003

## Weitere Legierungssysteme



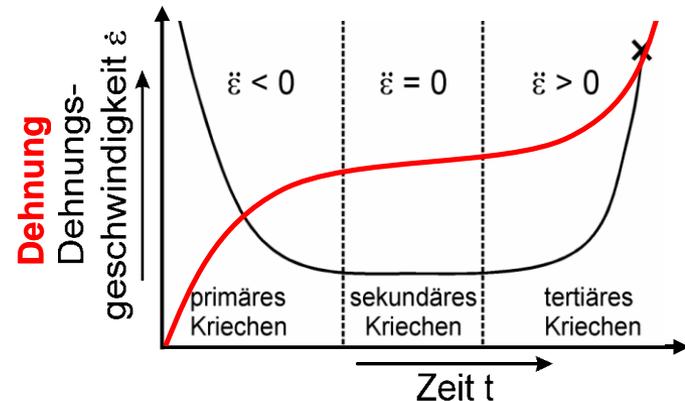
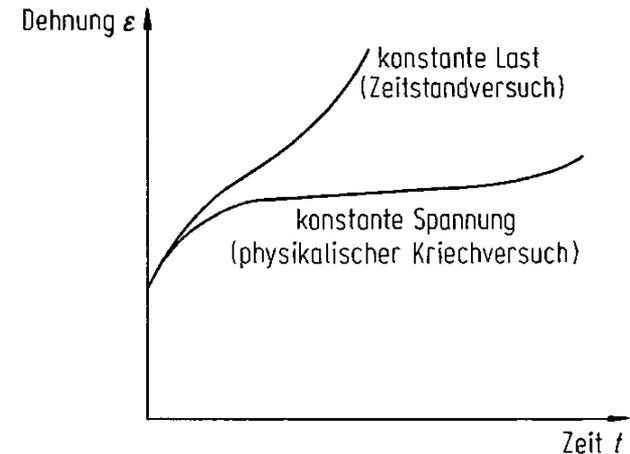
## Entwicklungen und Potentiale der Mg-Legierungen



Nach: Magnesium Technology / Friedrich

# Metalle - Magnesium - Kriechen

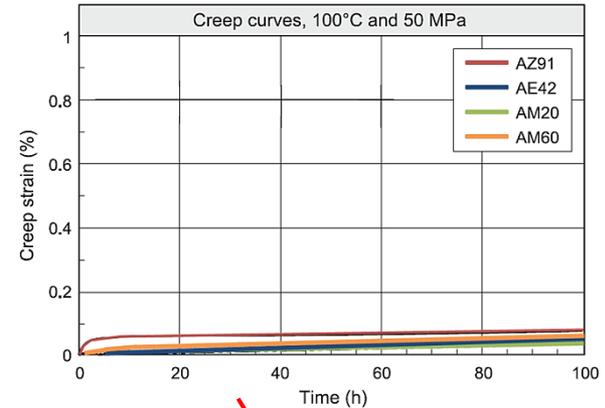
- Ist die Zunahme der plastischen Verformung unter konstanter Last oder konstanter Spannung
  - Das Verformungsverhalten ist zeit- und temperaturabhängig
- Kann in drei Bereiche unterteilt werden:
  - Primäres Kriechen
    - ↳ Verfestigungsmechanismen überwiegen
  - Sekundäres Kriechen
  - Tertiäres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



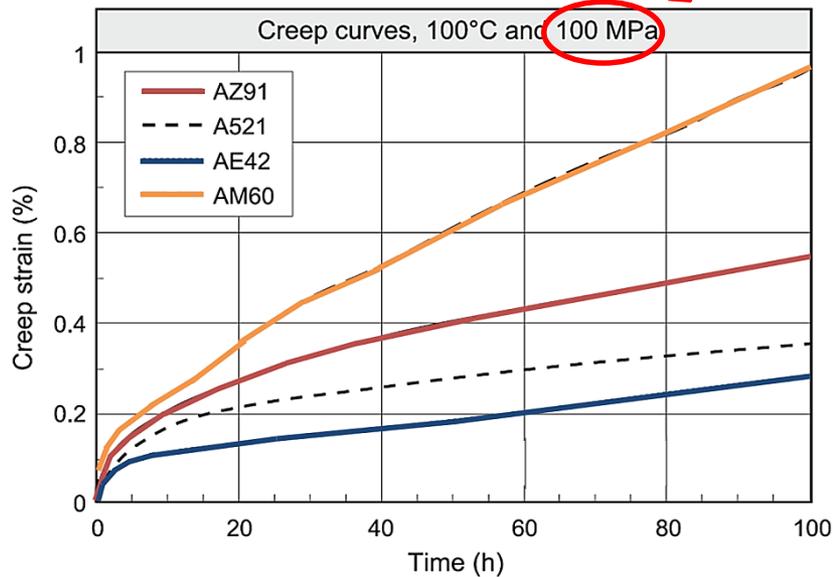
Quelle: Metalle - Strukturen und Eigenschaften der Metalle und Legierungen/ Hornbogen

# Metalle - Magnesium - Kriechen

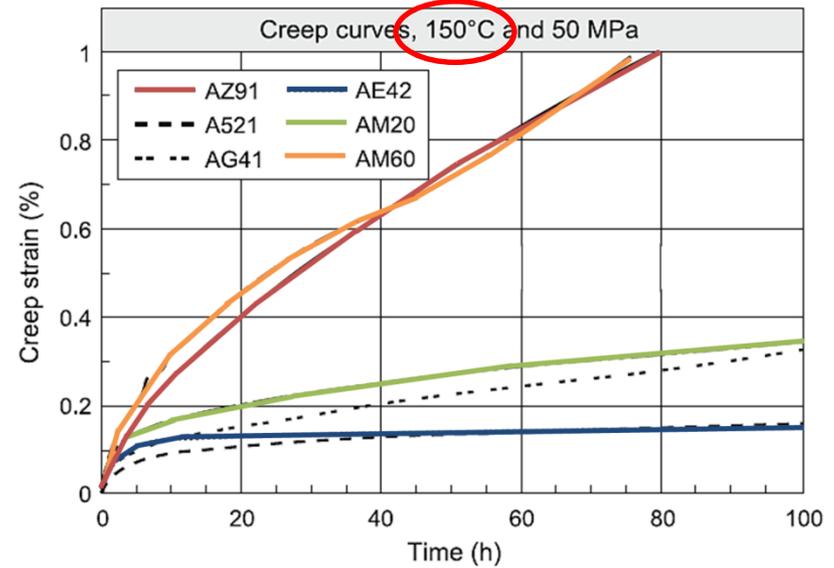
## ➤ Kriechverhalten typischer Gusslegierungen



Erhöhung der Spannung



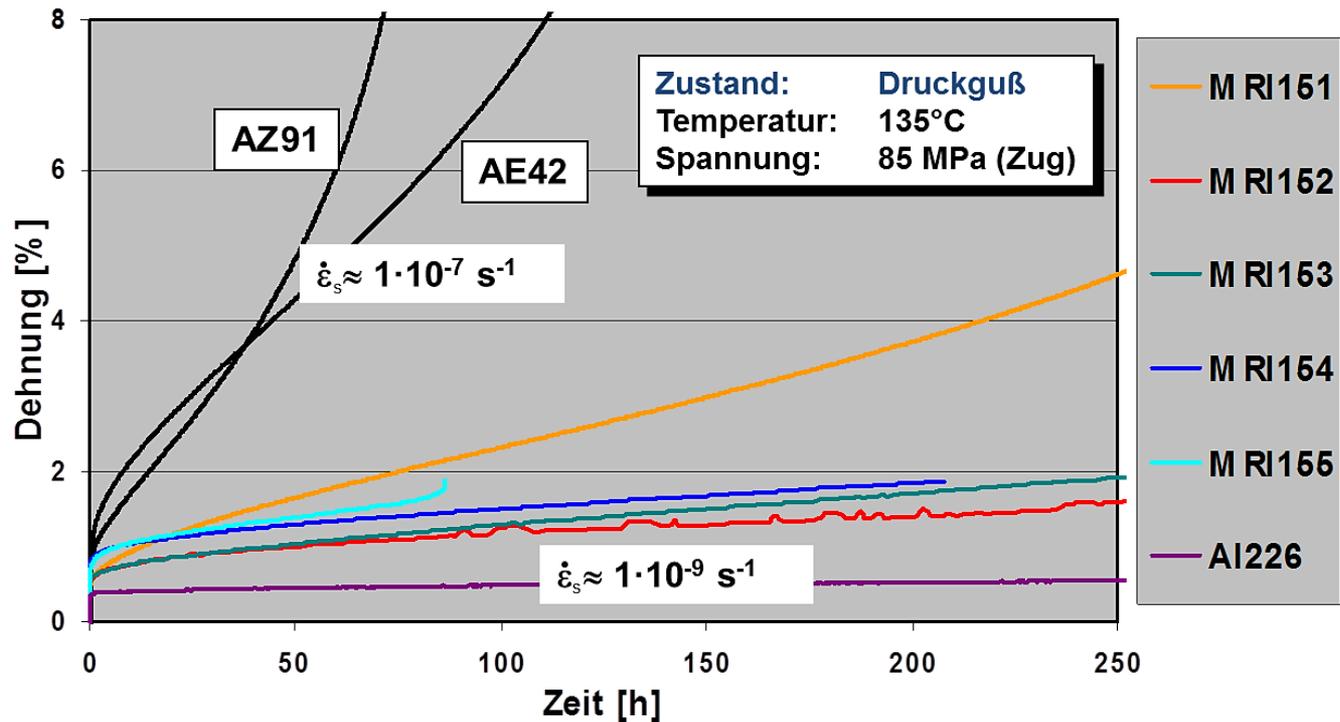
Erhöhung der Temperatur



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] <sup>1</sup>	120	110	100	90	90
Korrosionsrate [mg/cm <sup>2</sup> pro Tag] <sup>2</sup>	0,09	0,1	0,11	0,12	0,34

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

<sup>2</sup> 200h Salzsprühwasserversuch (ASTM B-117)

# Metalle - Magnesium - Korrosion

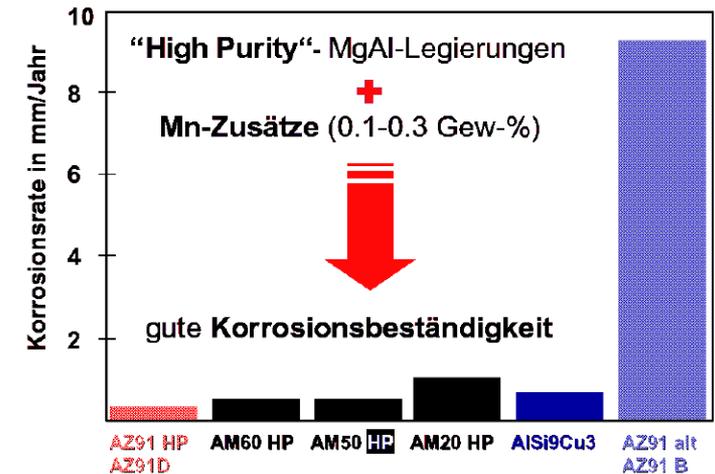
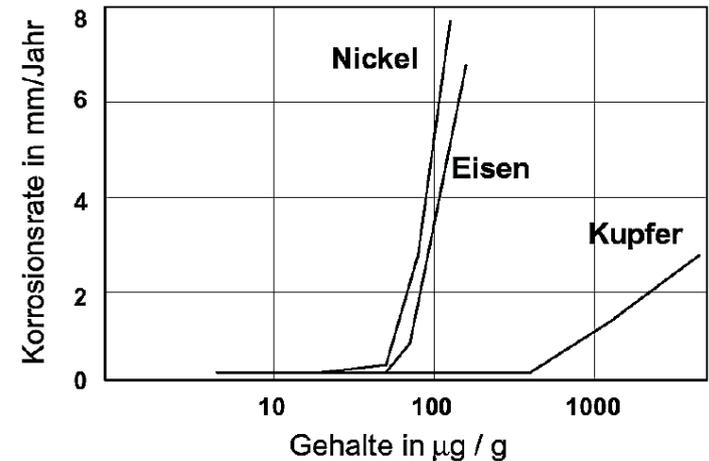
---

- 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

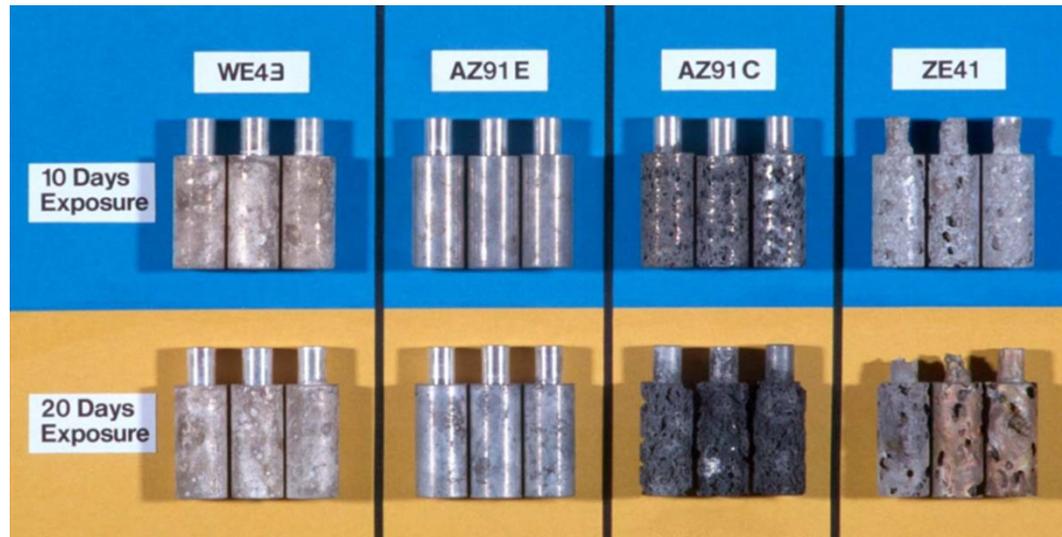
Einfluss der Gehalte an Fe, Cu, Ni auf die Korrosionsbeständigkeit von AZ91 (Druckguss)



Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidenmann

# Metalle - Magnesium - Korrosion

- Salzwassersprühtest an verschiedenen Magnesiumlegierungen



Quelle: The Principles of Magnesium Corrosion Protection, Magnesium Elektron

# Metalle - Magnesium - Korrosion

- Salzwassersprühtest an einem Kupplungsgehäuse

**MRI153**



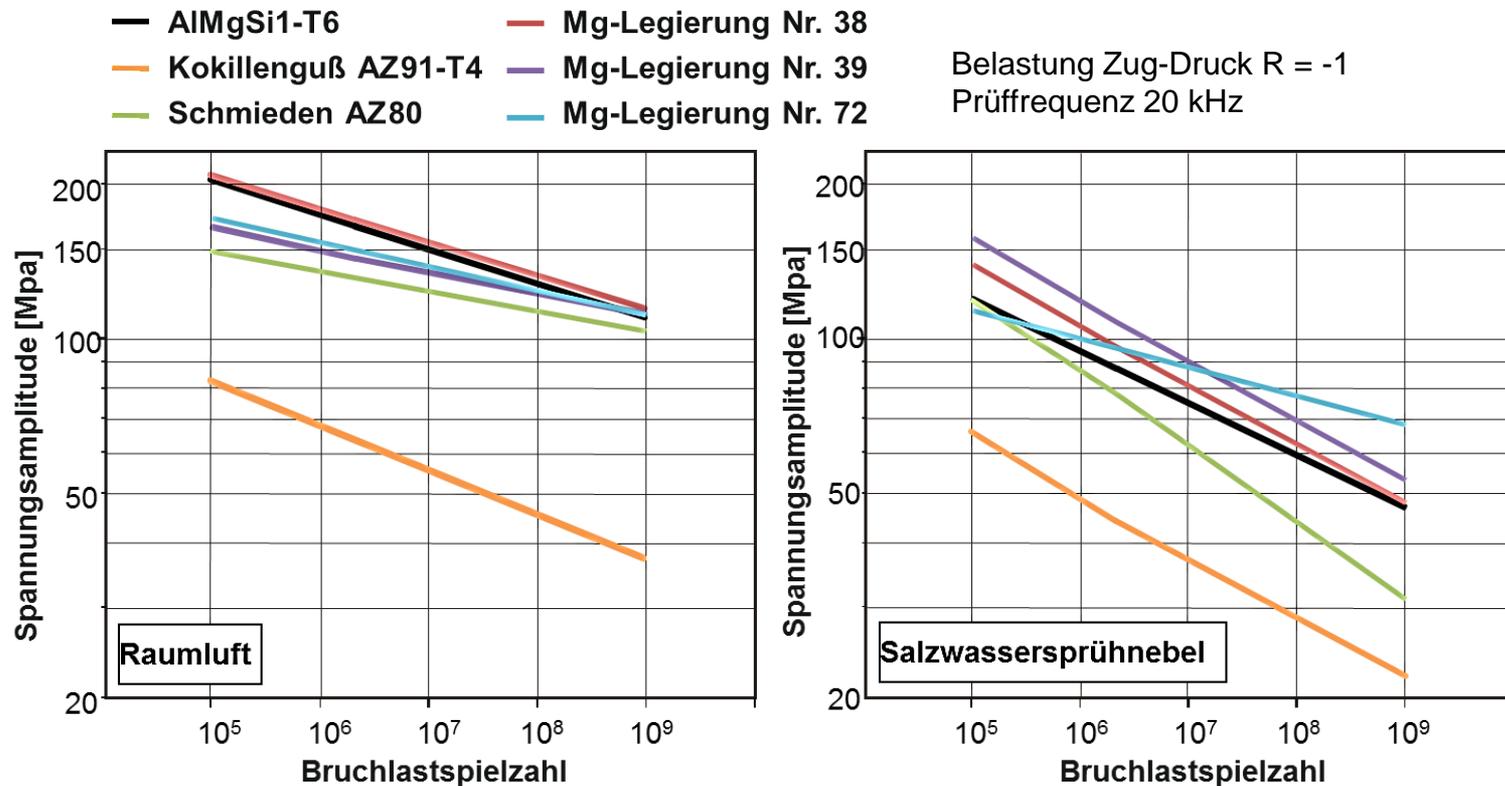
**AZ91**



Jeweils nach 240h

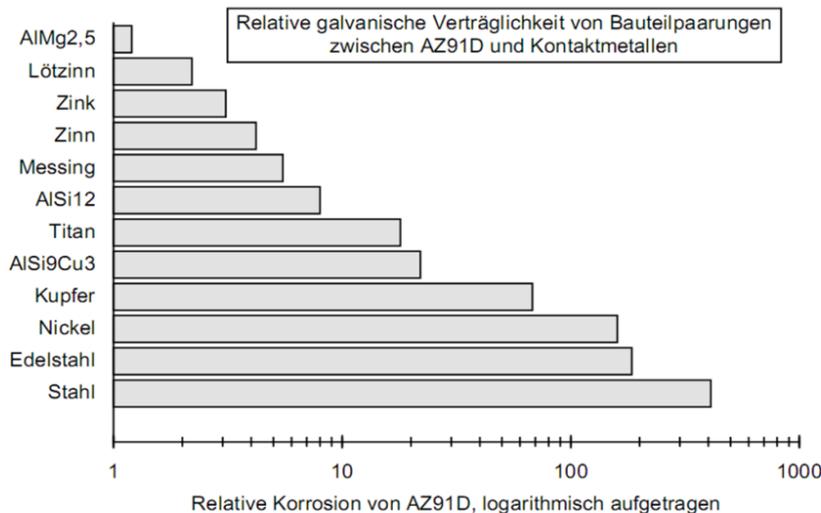
# Metalle - Magnesium - Korrosion

- 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>
<b>Magnesium</b>	<b>-2.38</b>	
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

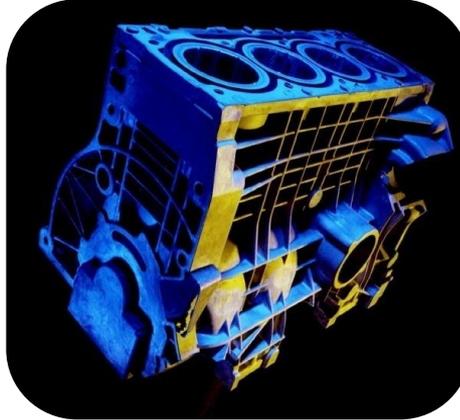
## Urformen

- Sandguss
- Kokillenguss
- Druckguss

## Umformen

- Warmwalzen
- Strangpressen
- Schlechte Kaltumformbarkeit

# Metalle - Magnesium - Anwendungen



[www.volkswagen.de](http://www.volkswagen.de)



[www.husky.ca](http://www.husky.ca)



[www.canon.de](http://www.canon.de)

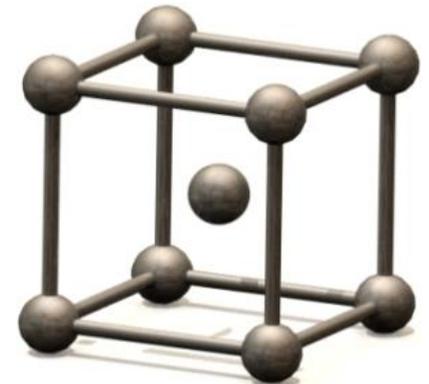
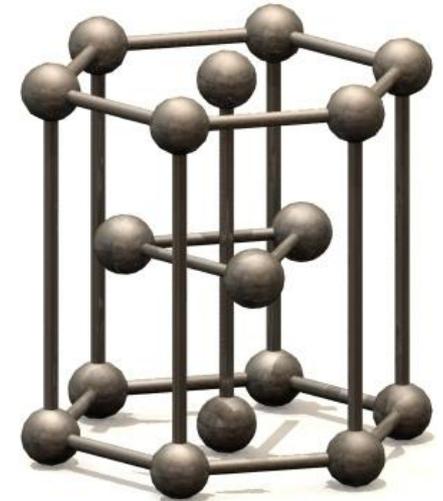


<http://microsoft.com>

# Metalle - Titan

## Kennwerte von Ti

- Dichte: 4,5 g/cm<sup>3</sup>
- Elastizitätsmodul: 106 GPa (isotrop)
- Gitterstruktur: hcg ( $\alpha$ ), krz ( $\beta$ )
- Schmelztemperatur: 1670°C
- Wärmeausdehnung:  $9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Wärmeleitfähigkeit: 17 W/mK

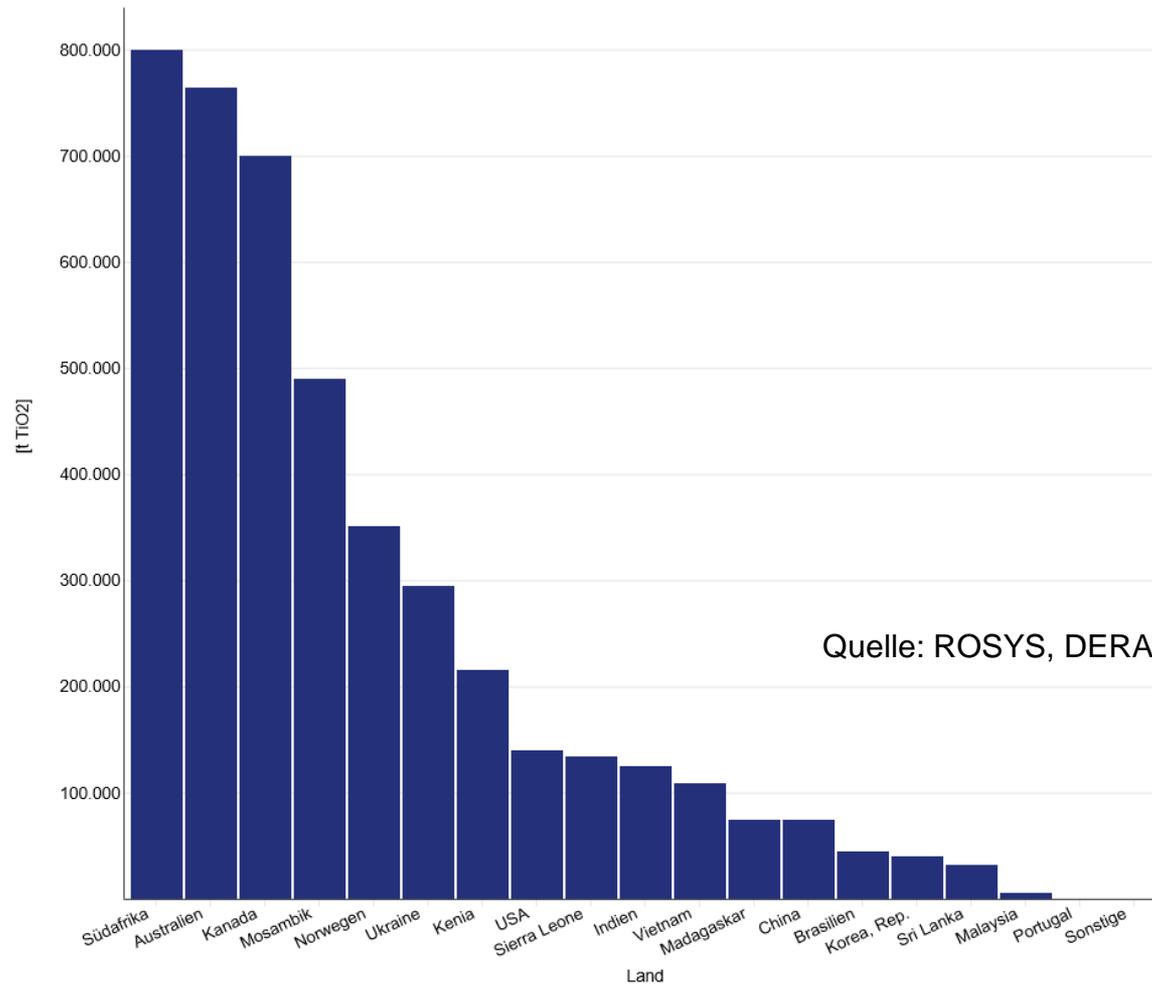


[www.maschinenbau-student.de](http://www.maschinenbau-student.de)

## Wichtiger Hochleistungswerkstoff

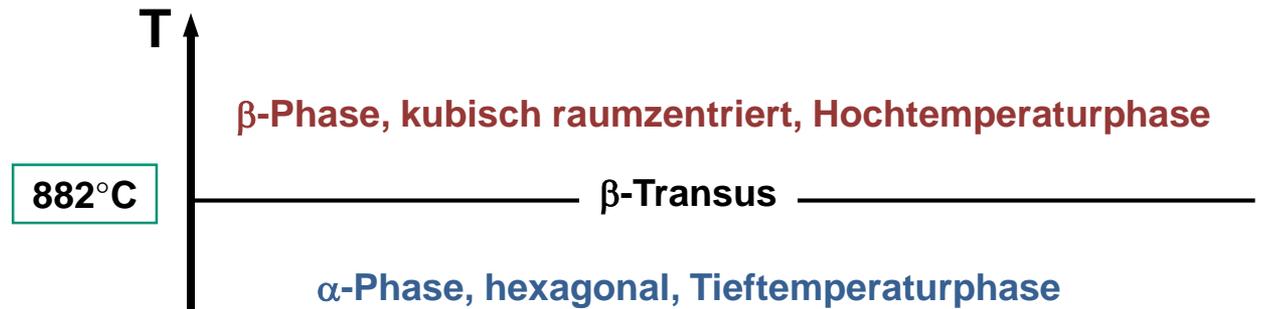
- 50% des Titanverbrauchs geht in die Luft- und Raumfahrt
- Höchste Dichte der Leichtmetalle
  - Dennoch 57% leichter als Stahl
- Sehr hohe spezifische Festigkeiten
- Geringe Wärmedehnung
- Sehr gute Korrosionsbeständigkeit
  - Titan bildet eine stabile, dichthaftende Oxidschicht
- Hohe Kosten
  - Wird nur da eingesetzt, wo hohe Festigkeiten benötigt werden
  
- Anwendungen:
  - Komponenten in Verbrennungsmotoren und Gasturbinen
  - Implantate (sehr gute Biokompatibilität)
  - Chemischer Anlagenbau

## Bergwerksförderung von Titan (TiO<sub>2</sub>)



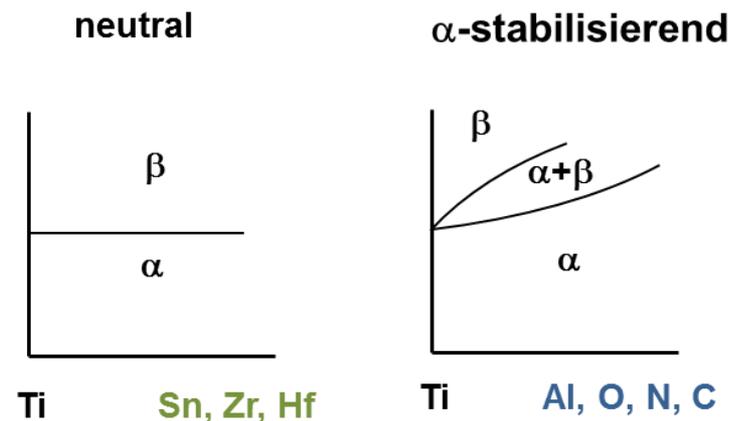
## Legierungssysteme

### ➤ 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 / Weidenmann

## Legierungssysteme

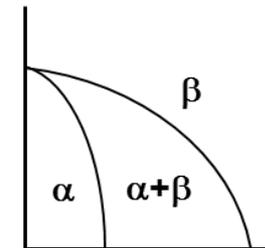
### ➤ $\alpha+\beta$ – Legierungen

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

### ➤ $\beta$ – Legierungen

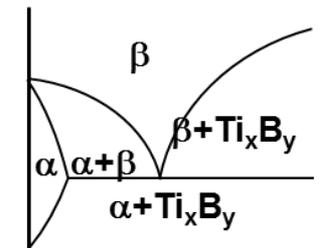
- Sehr gut umformbar
- Sehr gut aushärtbar
- Bessere Risszähigkeit und Festigkeit als  $\alpha$  Legierungen
- $\beta$  - Stabilisierer erhöhen die Dichte
  - ↳ Schwere Nebengruppenelemente

$\beta$ -stab. (isomorph)



Ti      Mo, V, Ta, Nb

$\beta$ -stab. (eutektoid)



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

Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidenmann

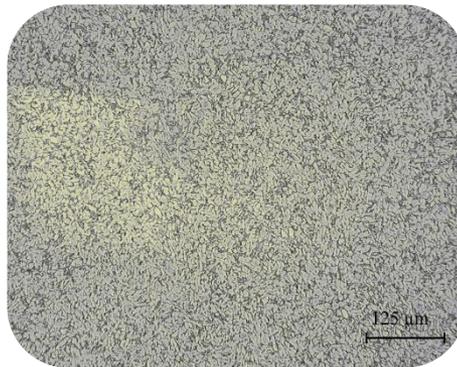
# Metalle - Titan

## Legierungssysteme

- Gefügestruktur von Ti-6Al-4V

### globular

Glühung (800°C)  
deutlich unterhalb  
des  $\beta$ -Transus



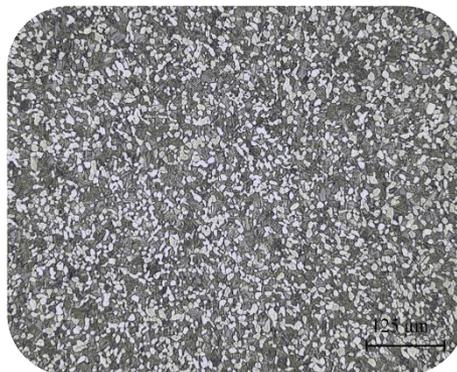
### lamellar

Glühung oberhalb  
des  $\beta$ -Transus



### duplex

Glühung (980°C)  
dicht unterhalb  
des  $\beta$ -Transus



### martensitisch

Glühung oberhalb  
des  $\beta$ -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  $\mu\text{m}$  - Bereich
- Sehr gute Eigenschaftskombinationen möglich
  - ↳ Abhängig von Dichte und Gefügestruktur
- PM-Legierungen sind heute den Knet- und Gusslegierungen in ihren Eigenschaften
- ebenbürtig

**DERA** Deutsche Rohstoffagentur  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe



## 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]
<b>Near <math>\alpha</math> - Legierungen</b>		
Ti-5Al-2,5Sn	760	790
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	830	900
<b><math>\alpha/\beta</math> - Legierungen</b>		
Ti-6Al-4V, geglüht	830	900
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, ausgeh.	1100	1170
<b><math>\beta</math> - Legierungen</b>		
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr, geglüht	830	900
Ti-10V-2Fe-3Al	1100	1170

Quelle: Skript Werkstoffe für den Leichtbau / Weidenmann

# Metalle - Titan

## Anwendungen



[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)



Volkswagen AG



[www.prothesensprechstunde.de](http://www.prothesensprechstunde.de)



[www.pankl.com](http://www.pankl.com)



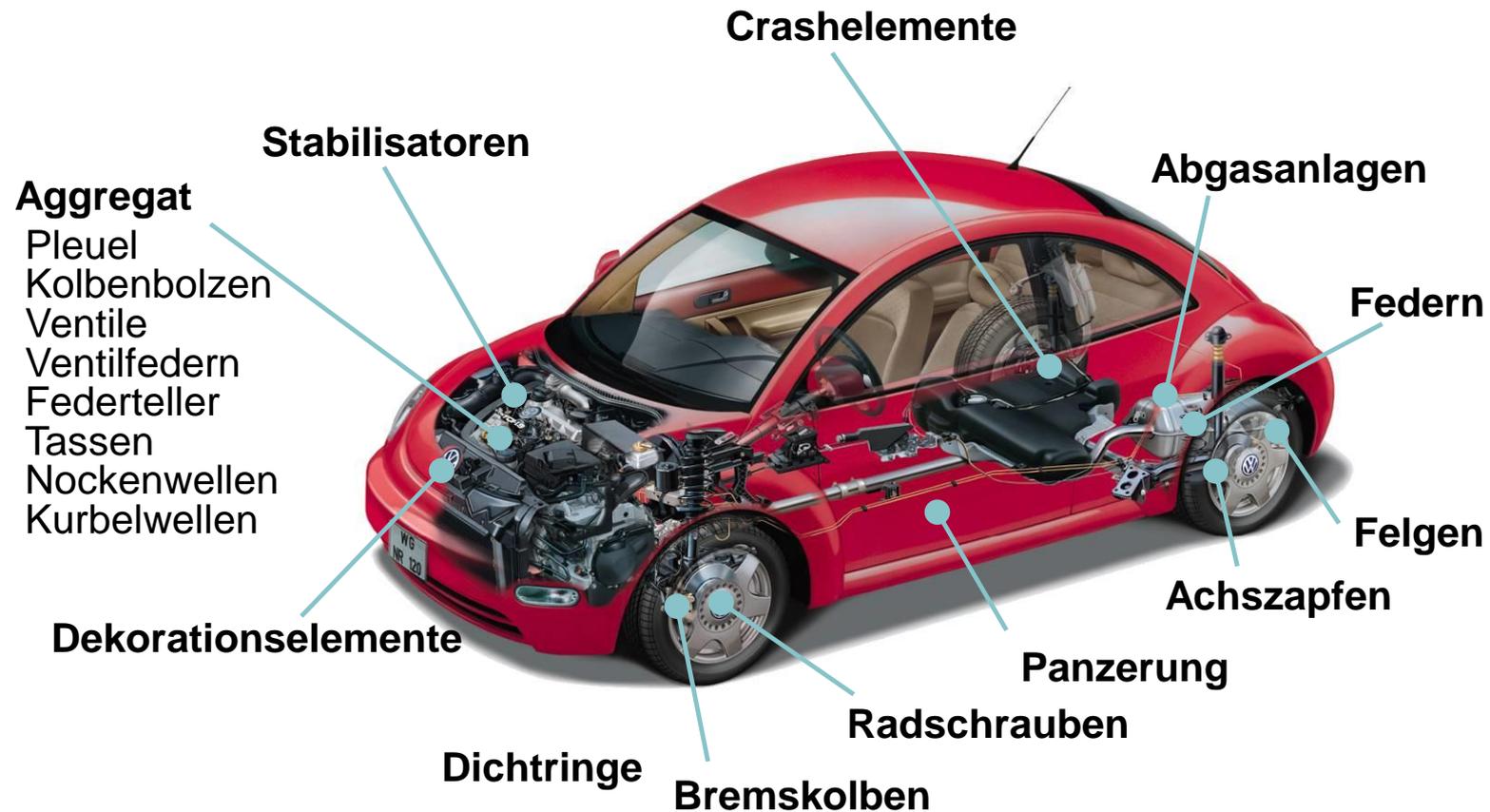
[www.dlr.de](http://www.dlr.de)



[www.zahnarzt-peterke.de](http://www.zahnarzt-peterke.de)

# Metalle - Titan

## Anwendungen und Potentiale im Automobilbau



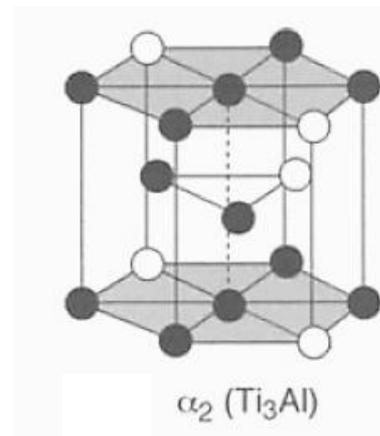
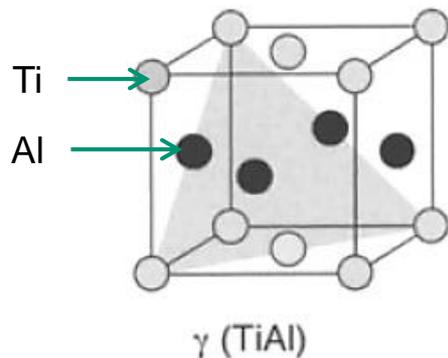
## Anwendungen und Potentiale im Automobilbau

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 <sup>a</sup> -Ti	Toyota	Altezza 6 Zyl. <sup>a</sup> 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	$\beta$ -Titanlegierungen	Mitsubishi	alle 1.8l-4 Zyl.
2000	Turbolader	$\gamma$ -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

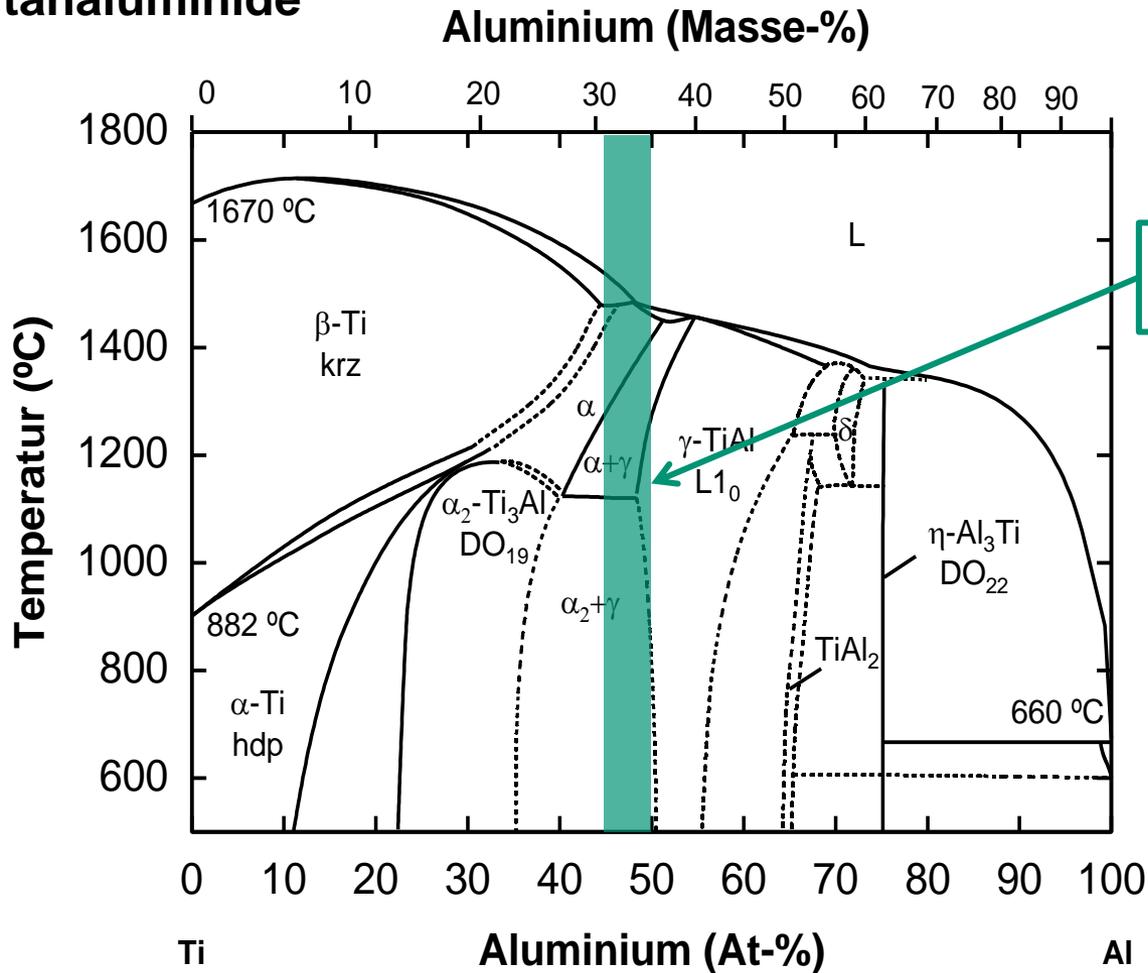
- Titan und Aluminium sind entgegen konventionellen Legierungen streng geordnet in einem gemeinsamen Kristallgitter eingebaut
- Die wichtigsten Verbindungen sind das  $\gamma$  (TiAl) und das  $\alpha_2$  (Ti<sub>3</sub>Al)
- Titanaluminide bestehen aus einer Mischung dieser beiden Phasen, dabei können sich unterschiedliche Gefügestrukturen ausbilden



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

# Metalle - Titan

## Titanaluminide



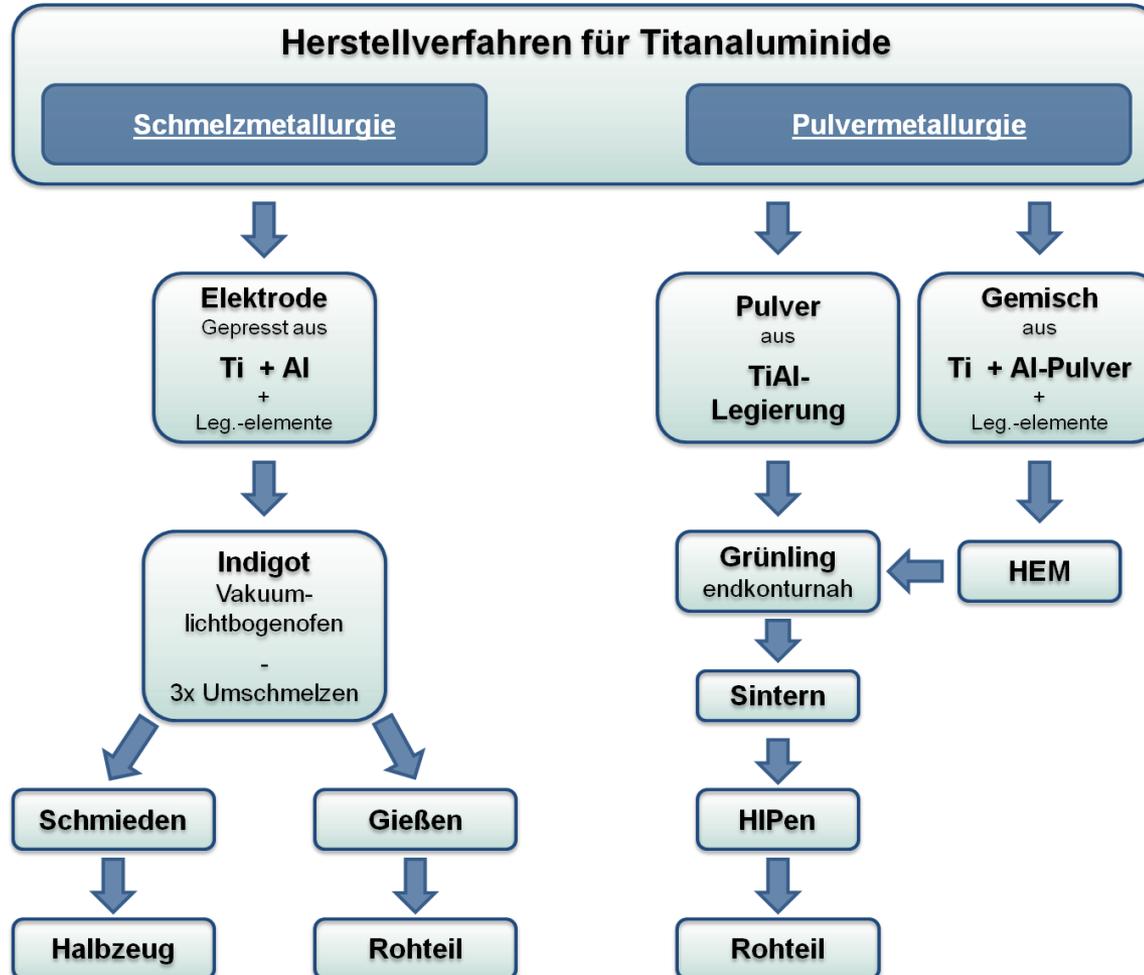
Technisch am meisten genutzte  
Legierungszusammensetzungen

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

## Titanaluminide

- Sehr gute Hochtemperaturfestigkeit
- Niedrige Dichte: 3,8 - 4,1 g/cm<sup>3</sup>
- 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/cm<sup>3</sup>)

## Titanaluminide



## Titanaluminide - Herstellungsbeispiel: Ventile für Pkw-Motoren

### ➤ Gießen

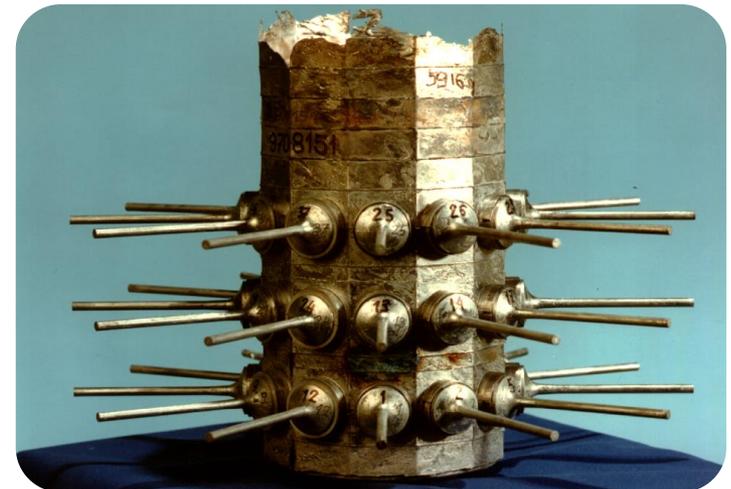
- Feinguss, Schleuderguss
- Vergleichsweise einfaches Verfahren
- Geringe Materialausbringung
- Geringere Festigkeit

### ➤ Schmieden

- Aufwendiger, mehrstufiger Prozess
- Hohe Festigkeit

### ➤ Pulvermetallurgie

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

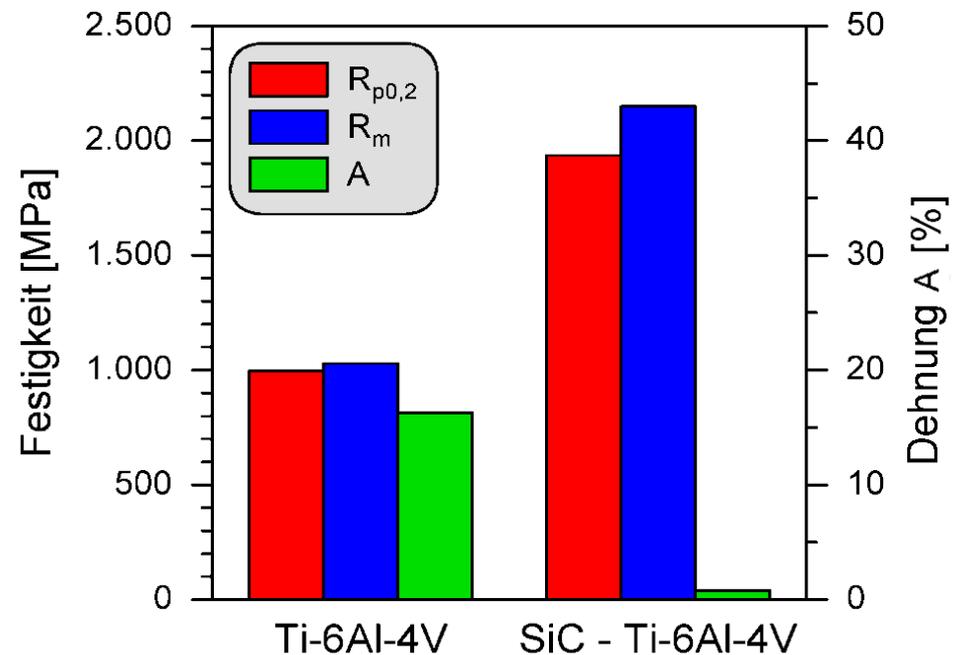
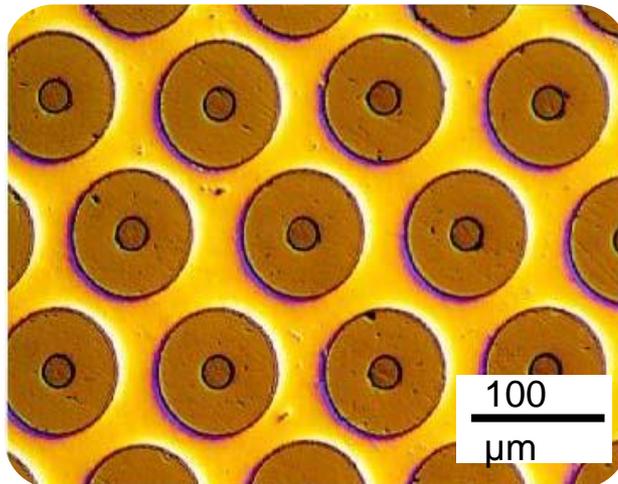


TiAl-Ventile, Schleuderguss

## 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 $\beta$ - Legierungen : Timetal LCB

- Konventionelle  $\beta$  - Legierungen enthalten größere Anteile an teuren Legierungselementen
- Die amerikanische Firma Timet<sup>®</sup> 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 $\beta$ - 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 <span>­</span> masse [g]	650	1100



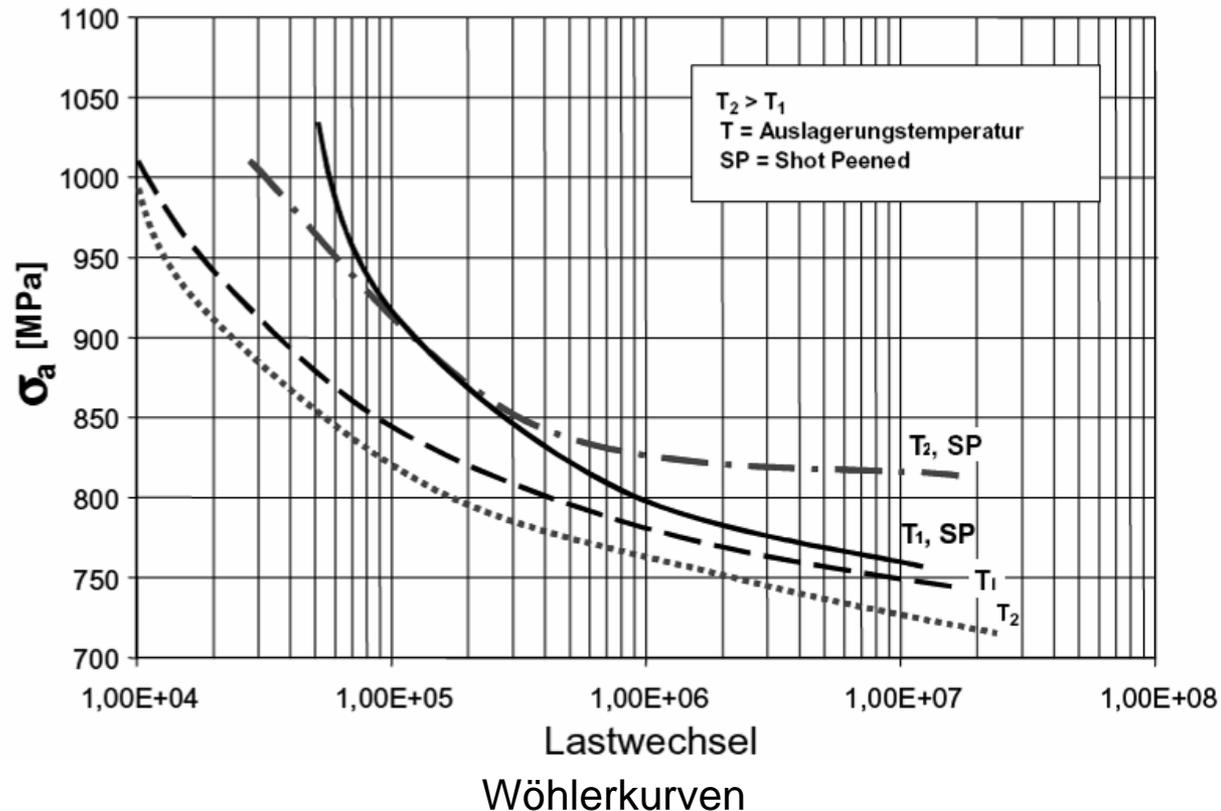
Lupo  
Stahl  
1040g

Lupo FSI  
Titan  
625g

**Massereduzierung durch Einsatz einer Titanfeder liegt bei 40 %**

## Entwicklung neuer Legierungen

### ➤ Metastabile $\beta$ - Legierungen : Timetal LCB



# Metalle - Vergleich der Eigenschaften

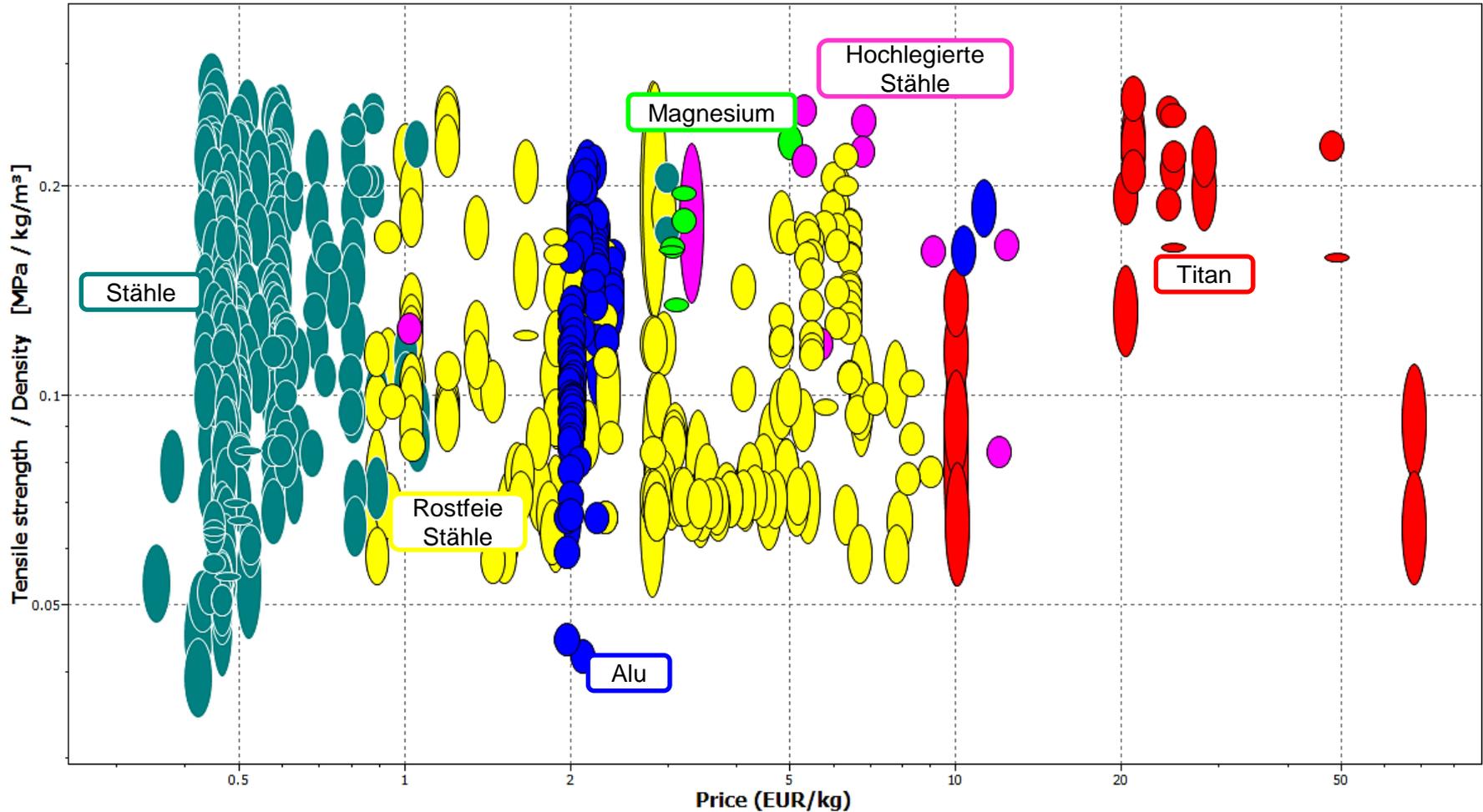
Werkstoff	Typ	Dichte [g / cm <sup>3</sup> ]	E-Modul [GPa]	Spez. E-Modul [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [MPa]	Spez. Zugfestigkeit [MPa / g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Stahl</b>						
St-37	Standard	7,85	206	26	400	51
42CrMo4	Hochfest	7,81	208	26	1150	148
54SiCr6	Ultrahochf.	7,8	206	26	2150	275
<b>Aluminium</b>						
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
<b>Magnesium</b>						
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
<b>Titan</b>						
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