

# 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines deutlich gestiegenen  $\text{CO}_2$ -Ausstosses in den letzten Jahrzehnten (Bild 1.1) und der dadurch verursachten Klimaveränderung, wie sie im kürzlich veröffentlichten UN-Klimabericht [IPC07] beschrieben werden, geraten die Automobil- und Luftfahrtindustrie als Mitverursacher des  $\text{CO}_2$ -Ausstosses immer mehr unter Druck, den Treibstoffverbrauch ihrer Verkehrsmittel zu senken. Auch durch die erhöhten Sicherheits- und Komfortanforderungen an ein Automobil wird der innovative Leichtbau ein immer wichtigerer Wettbewerbsfaktor.

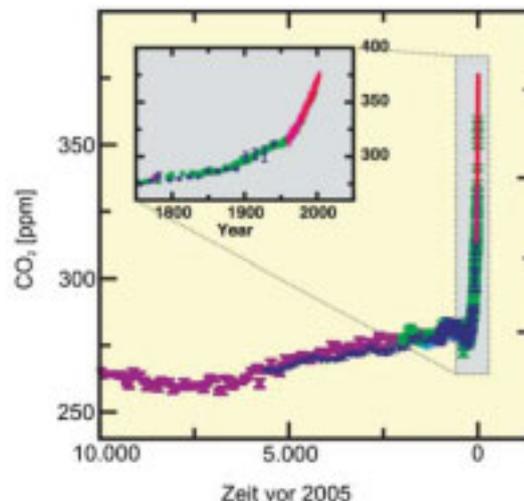


Bild 1.1: Veränderung des  $\text{CO}_2$ -Ausstosses über die letzten 10.000 Jahre [IPC07]

Die ökologische Bilanz eines Autos über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg - von der Fertigung über den Betrieb bis zur Verschrottung bzw. dem Recycling - zeigt, dass 80% der Energie während der Phase des Gebrauchs des Fahrzeugs verbraucht werden. Auf diesen Energieverbrauch hat das Fahrzeuggewicht über den Rollwiderstand sowie den Widerstand an Steigungen und beim Beschleunigen einen erheblichen Einfluss.

Vor diesem Hintergrund hat das Magnesium als leichtestes als Konstruktionswerkstoff einsetzbares Metall in den letzten 10 Jahren wieder an Bedeutung gewonnen. So hat der Anteil an Magnesium pro Auto in den letzten 10 Jahren von 1,2 kg auf nahezu 4 kg zugenommen [COL03]. Jedoch werden Magnesiumlegierungen im Automobilbau fast ausschließlich als Gussbauteile verwendet. Der Einsatz von Profilen oder Blechen findet im Automobilbau so gut wie nicht statt [BRU00]. Als stranggepresste Bauteile werden im automobilen Leichtbau lediglich Bauteile aus Aluminiumlegierungen eingesetzt.

Magnesiumlegierungen sind grundsätzlich strangpressbar [BEC97]. Aufgrund der hexagonalen Gitterstruktur weisen Magnesiumlegierungen jedoch deutliche Nachteile sowohl bei der Umformung als auch bei den Eigenschaften der

stranggepressten Profile im Vergleich zu dem kubisch-flächenzentrierten Gitter des Aluminiums auf.

Bedingt durch die hexagonale Gitterstruktur und dem Fehlen ausreichender Gleitsysteme bei niedrigen Temperaturen sind Magnesiumlegierungen bei Raumtemperatur nahezu nicht umformbar. Dies bedeutet, dass eine Formgebung wie durch das Strangpressen nur bei erhöhten Temperaturen erfolgen kann [KAI06]. Dann jedoch ähneln sie bezüglich des Umformverhaltens den Aluminiumlegierungen.

Die Kombination einer, aufgrund des Strangpressens induzierten, ausgeprägten Textur und der Richtungsabhängigkeit des für die Verformung bei niedrigen Temperaturen notwendigen Zwillingsystems führt zu einer starken Asymmetrie der mechanischen Eigenschaften der stranggepressten Magnesiumlegierungen. Diese Asymmetrie drückt sich in einer deutlich niedrigeren 0,2 % Stauchgrenze im Druckversuch im Vergleich zu der 0,2 % Dehngrenze im Zugversuch aus. Aufgrund des niedrigen Wertes für die 0,2 % Stauchgrenze geht der Dichtevorteil des Magnesiums durch eine notwendige Erhöhung der Wandstärken der Bauteile in vielen Fällen verloren, so dass Magnesium-Profile für einen Einsatz im automobilen Leichtbau derzeit noch nicht die erforderlichen Vorteile gegenüber Aluminiumprofilen aufweisen.

## 2 Stand der Erkenntnisse

### 2.1 Magnesium als Konstruktionswerkstoff

Die Dichte des Magnesiums liegt mit  $\rho_{\text{Mg}} = 1,74 \text{ g cm}^{-3}$  nicht nur deutlich unterhalb der des Stahls mit  $\rho_{\text{St}} = 7,8 \text{ g cm}^{-3}$ , sondern sie ist auch geringer als die Dichte anderer Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium oder Titan ( $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\rho_{\text{Ti}} = 4,5 \text{ g cm}^{-3}$ ). Somit ist Magnesium das leichteste als Konstruktionswerkstoff einsetzbare Metall. Wie bei anderen Metallen wird auch Magnesium industriell aber nicht als reines Metall, sondern als Legierung eingesetzt. Je nach Legierungszusammensetzung ergeben sich somit für die verschiedenen Legierungen unterschiedliche Eigenschaften und damit auch Anwendungsfelder. Eine erste Unterscheidung der Magnesiumlegierungen erfolgt in Guss- und Knetlegierungen (Bild 2.1) [BEC97].

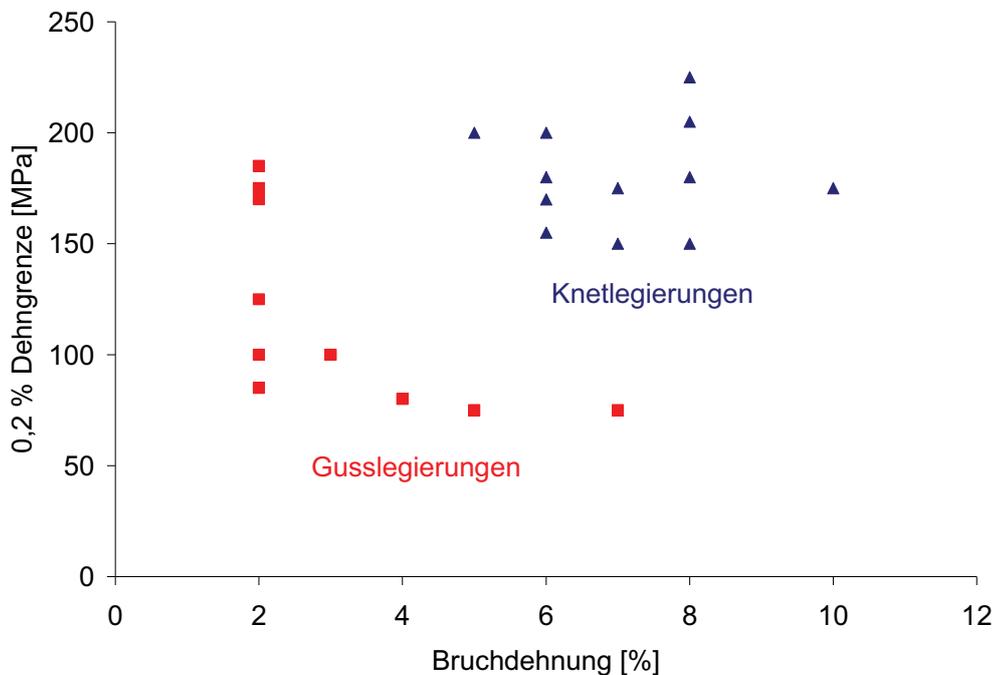


Bild 2.1: Einteilung der Magnesiumlegierungen in Guss- und Knetlegierungen [BEC97]

Als Nomenklatur für die Bezeichnung von Magnesiumlegierungen hat sich im Laufe der Jahre die Nomenklatur gemäß der American Society for Testing and Materials (ASTM) durchgesetzt. Dabei werden die Legierungen nach ihren Hauptelementen sowie deren Legierungsanteil in Gewichtsprozent bezeichnet. Die Bezeichnung der Hauptelemente erfolgt durch einen Kennbuchstaben, der gemäß Tabelle 2.1 festgelegt ist [KAM00]. So steht beispielsweise die Bezeichnung AZ31 für eine Magnesiumlegierung mit Legierungsanteilen von 3 Gew.% Aluminium und 1 Gew.% Zink.

Tabelle 2.1: Bezeichnung der Hauptlegierungselemente von  
Magnesiumlegierungen gemäß ASTM B275 [KAM00]

Kennbuchstabe	Element	Kennbuchstabe	Element
A	Aluminium	N	Nickel
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	Zirkon	Y	Antimon
L	Lithium	Z	Zink
M	Mangan		

Die in dieser Arbeit untersuchten Legierungen gehören sämtlich zu den AZ-Magnesiumlegierungen, d.h. die beiden Hauptlegierungselemente sind Aluminium und Zink. Beide Elemente tragen dabei zu einer Steigerung der Festigkeit und der Härte bei (Bild 2.2, Bild 2.3). Die Festigkeitssteigerung durch das Aluminium ist dabei vor allem auf die Bildung der intermetallischen  $\gamma$ -Phase  $Mg_{17}Al_{12}$  zurückzuführen. Allerdings ist die festigkeitssteigernde Wirkung des Aluminiums nur bis maximal 120 °C vorhanden, da es bei höheren Temperaturen zu einer Erweichung der  $\gamma$ -Phase  $Mg_{17}Al_{12}$  kommt. Ebenfalls verbessern die beiden Legierungselemente Aluminium und Zink die Giessbarkeit von Magnesiumlegierungen. Nachteilig an beiden Legierungselementen ist die erhöhte Neigung zur Mikroporosität. Da Zink ab einem Legierungsanteil von 1,5 Gew.% zu einer deutlichen Erhöhung der Tendenz zur Heißrissbildung führt, wird es bei Magnesiumknetlegierungen, die bei erhöhten Temperaturen umgeformt werden, nur bis zu einem Anteil von maximal 1 Gew.% hinzulegiert [MOR97]. Neben Aluminium und Zink enthalten Magnesiumlegierungen des Typs AZ auch noch Zusätze von Mangan in Anteilen zwischen 0,12 Gew.% bis 1,0 Gew.%. Über eine durch das Mangan verursachte Herabsetzung der Löslichkeit kann während des Abgießens der Eisengehalt der Legierungen kontrolliert werden [NIE01].

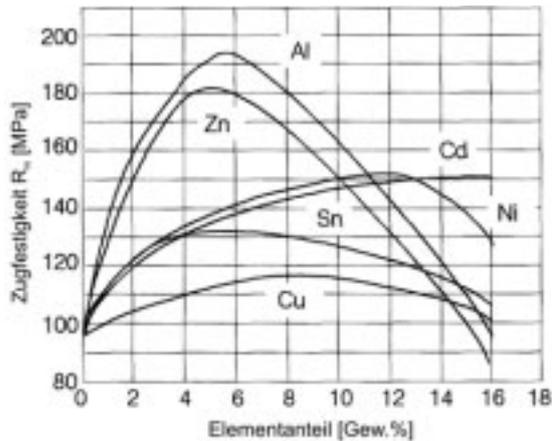


Bild 2.2: Zugfestigkeit von Magnesium in Abhängigkeit des Legierungsanteils verschiedener Metalle [SCH54]

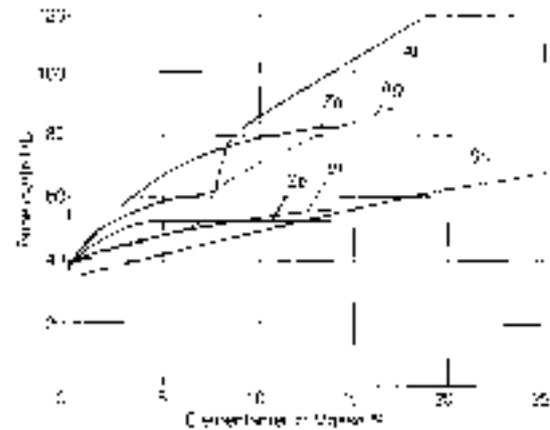


Bild 2.3: Brinell Härte von Magnesium in Abhängigkeit des Legierungsanteils verschiedener Metalle [BEC39]

Aus dem Magnesium-Aluminium-Phasendiagramm wird deutlich, dass die Magnesiumlegierungen aus dem Magnesiummischkristall  $\alpha$  (hdp) und der kongruent schmelzenden intermetallischen Phase  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  bzw.  $\gamma$  (krz) bestehen (Bild 2.4) [LIA98a]. Im Gusszustand bildet sich die intermetallische Phase in kompakter Form an den Korngrenzen des Magnesiummischkristalls  $\alpha$  als entartetes Eutektikum bei 436 °C aus [ASM85], [ASM99]. Bei dieser Temperatur ist auch die maximale Löslichkeit des Aluminiums von 12,7 Gew.% in Magnesium erreicht. Mit sinkender Temperatur nimmt die Löslichkeit von Aluminium in Magnesium ab, d.h. die intermetallische Phase  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  wird bei einem Aluminiumgehalt von 3 Gew.% bis 8 Gew.% und einer langsamen Abkühlungsgeschwindigkeit mit sinkender Temperatur aus dem Magnesiummischkristall ausgeschieden, da bei Raumtemperatur nur ca. 2 Gew.% Aluminium in Magnesium gelöst werden können [BEC39].

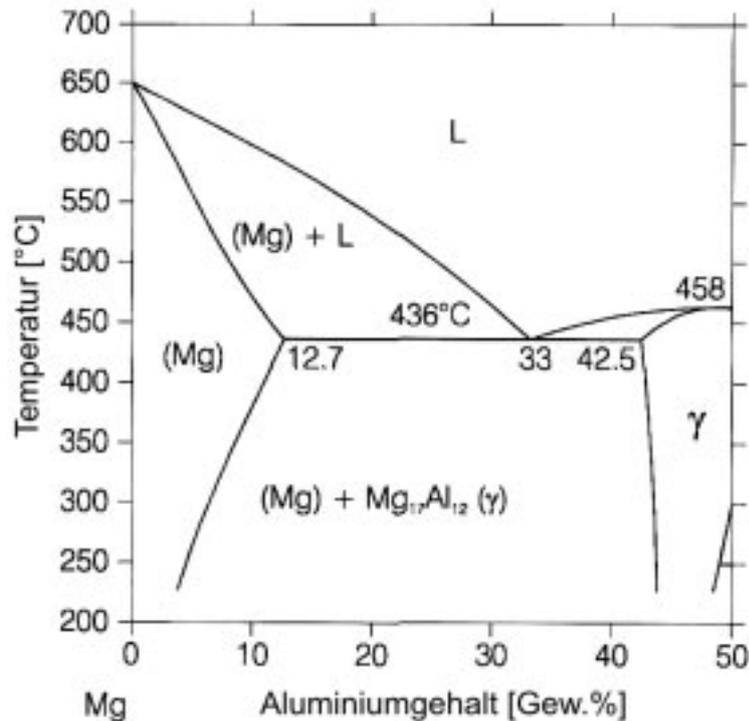


Bild 2.4: Phasendiagramm bis 50 Gew.% Aluminium [LIA98a]

Im sogenannten Vertikalschnitt oder T-x-Schnitt des ternären Phasendiagramms bei einem konstanten Zinkanteil von 1 Gew.%, wird deutlich, dass bei der Erstarrung eine kleine Menge der ternären Phase  $\phi$  auftreten kann. Diese Phase wird vor allem bei einer hohen Seigerung während der Erstarrung gebildet (Bild 2.5) [LIA98b]. Da der Anteil der  $\phi$ -Phase mit zunehmendem Aluminiumgehalt abnimmt und der Anteil an intermetallischer  $\gamma$ -Phase zunimmt, eignen sich AZ Magnesiumlegierungen mit höheren Aluminiumgehalten für die Wärmebehandlung. Weiterhin wird aus dem Phasendiagramm bei einem konstanten Zinkgehalt deutlich, dass mit steigendem Aluminiumgehalt die Soliduslinie abfällt. Während die Solidustemperatur für die Legierung AZ31 noch bei nahezu 550 °C liegt, ist die Solidustemperatur der Legierung AZ80 schon deutlich unter 500 °C gefallen.

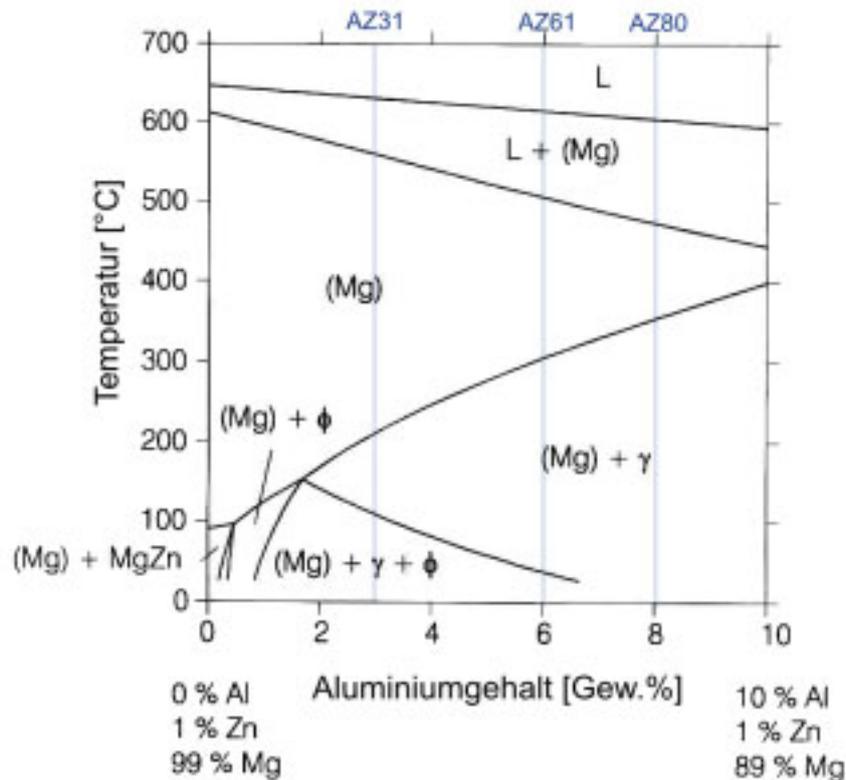


Bild 2.5: MgAlZn System, T-x-Schnitt bei einem konstanten Zinkgehalt von 1 Gew.% [LIA98b]

## 2.2 Verformungsmechanismen bei der Kalt- und Warmumformung von Magnesiumlegierungen

Nach dem Überschreiten der Fließgrenze eines Werkstoffes setzt die plastische Verformung ein. Im Wesentlichen basiert die plastische Verformung bei den meisten metallischen Werkstoffen auf dem Versetzungsgleiten.

Zu Beginn der Verformung eines Polykristalls findet zunächst eine mikroplastische Verformung statt. Dabei werden zunächst, gemäß dem Schmid'schen Schubspannungsgesetz, die Gleitsysteme in den Kristalliten aktiviert, die bezüglich der äußeren Lastachse günstig orientiert sind. Aufgrund des dadurch entstehenden Versetzungsaufstaus werden in den benachbarten, ungünstig orientierten Körnern elastische Spannungen induziert.

Erreichen die induzierten elastischen Spannungen nun die lokale Fließgrenze, setzt auch in den übrigen Körnern die plastische Verformung ein. Erstreckt sich diese über den gesamten Polykristall, ist die Streckgrenze des Polykristalls erreicht.

Mit zunehmender plastischer Verformung werden weitere Versetzungen im Werkstoff aktiviert. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Versetzungen durch Aufstau, Bildung von Lomer-Cottrell-Locks, Kinks usw. werden