

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Magnesium und Magnesiumlegierungen

Magnesium gehört zu der Gruppe der Erdalkalimetalle und hat im Periodensystem der Elemente die Ordnungszahl zwölf. Es weist eine hexagonale Kristallstruktur auf und zählt mit einer Dichte von  $1,74 \text{ g/cm}^3$  zu den Leichtmetallen und leichtesten Konstruktionswerkstoffen überhaupt. Die Schmelztemperatur von Reinformmagnesium liegt bei  $649 \text{ °C}$  und die Verdampfungstemperatur bei  $1107 \text{ °C}$  [1]. In reiner Form weist Magnesium allerdings nur eine geringe Festigkeit auf und zum anderen zählt es zu den reaktivsten Konstruktionswerkstoffen [2], was zu einer verstärkten Korrosion von Magnesiumbauteilen führen kann. Für die technische Nutzung werden daher Magnesiumlegierungen verwendet, bei denen im Vergleich zu Reinformmagnesium eine größere Festigkeit bei gleichzeitig kleinerer Korrosionsanfälligkeit erreicht wird [3].

Nach ASTM B951 werden Magnesiumlegierungen mit Buchstaben-Zahlen-Kombinationen abgekürzt, bei denen die Buchstaben Auskunft über die Legierungselemente und die Zahlen über den Massenanteil der Legierungselemente geben. Dabei sollen nur die zwei Buchstaben der Elemente mit dem größten Massenanteil und beim Runden des Massenanteils auf ganze Zahlen die nächste ganze Zahl verwendet werden. Im Falle einer Nichteindeutigkeit, wenn die erste Dezimalstelle einer fünf entspricht und weitere Dezimalstellen Nullen aufweisen, soll die nächste gerade Zahl verwendet werden. In Tabelle 1 ist für entsprechende Legierungselemente die Zuordnung der Buchstaben zu den jeweiligen Legierungselementen dargestellt. Dabei wird an dieser Stelle das X für Kalzium zugefügt, welches nicht in ASTM B951 aufgeführt ist, aber zunehmend in der Literatur Verwendung findet.

Buchstabe	Legierungselement	Buchstabe	Legierungselement	Buchstabe	Legierungselement
A	Aluminium	L	Lithium	W	Yttrium
C	Kupfer	M	Mangan	V	Gadolinium
E	Seltene Erden	Q	Silber	X	Kalzium
H	Thorium	S	Silizium	Z	Zink
K	Zirkonium	T	Zinn		

Tabelle 1: Zuordnung von Legierungselementen zu Buchstaben bei der Benennung von Magnesiumlegierungen entsprechend ASTM B951

### 2.1.1 AZ91

Aus AZ91 werden typischerweise Gehäuse für die 3C (Computer, Communication und Consumer Elektronik) Industrie und diverse Produkte für den Leichtbau in der Luft- und Raumfahrt sowie Automobilindustrie gefertigt [3, S. 145]. Daher handelt es sich bei AZ91 um die am häufigsten verwendete Magnesium-Druckgusslegierung [4], da AZ91 eine der besten Eigenschaftskombinationen aus Gießbarkeit, Festigkeit und Duktilität aufweist [5]. Die Hauptlegierungselemente sind dabei Aluminium, Zink und Mangan (s. Tabelle 2). Durch das Legieren mit Aluminium wird eine Festigkeitssteigerung im Vergleich zu Reinformmagnesium erreicht, die auf der Ausscheidung der stöchiometrischen gamma-Phase (häufig und im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als  $\beta$ -Phase bezeichnet)  $Al_{12}Mg_{17}$  beruht [3, S. 93].

Legierungselement	Anteil [Gew.-%]	Legierungselement	Anteil [Gew.-%]	Legierungselement	Anteil [Gew.-%]
Aluminium	8,3 - 9,7	Kupfer	max. 0,03	Silizium	max. 0,1
Zink	0,35 - 1,0	Eisen	max. 0,005	Andere	max. 0,02 (jedes)
Mangan	0,15 - 0,5	Nickel	max. 0,002	Magnesium	Rest

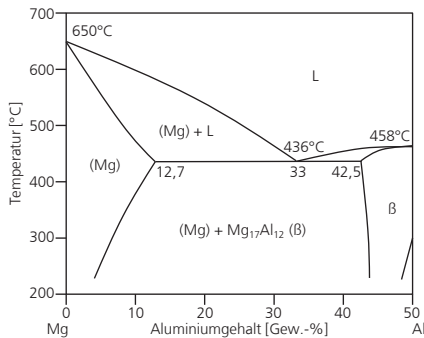
Tabelle 2: Legierungsbestandteile von AZ91D Druckgussbauteilen entsprechend ASTM B94

Die  $\beta$ -Phase weist allerdings eine kleinere Schmelztemperatur von ca. 460 °C im Vergleich zu Magnesium oder Aluminium auf (vgl. Bild 1). Gleichzeitig weicht die Phase bereits ab 110 °C - 120 °C auf, so dass die Kriechfestigkeit von aluminiumhaltigen Magnesiumlegierungen wie AZ-Legierungen ohne kongrenzenstabilisierende Legierungselemente wie Silizium typischerweise herabgesetzt ist [3, S. 93].

Bild 1:

Magnesium-Aluminium-Phasendiagramm für die magnesiumreiche Seite

adaptiert nach [3, S. 85]



Durch die Zugabe von Zink wird die Löslichkeit von Aluminium in der Magnesiummatrix verkleinert, so dass die Bildung von Ausscheidungen gefördert und dadurch die Festigkeit vergrößert werden kann [6]. Solange das Verhältnis von Aluminium zu Zink größer ist als 3:1, treten keine neuen Phasen im Vergleich zu binären Aluminium-Magnesiumlegierungen auf [5]. Aluminiumatome der  $\beta$ -Phase werden durch Zinkatome substituiert, so dass sich eine ternäre intermetallische Verbindung  $Mg_{17}(Al,Zn)_{12}$  ausbildet [7, 8]. Durch die Zugabe von Mangan bildet sich vor allem die intermetallische Phase  $Al_8Mn_5$  aus [9]. In dieser Phase können Eisenverunreinigungen gebunden werden, so dass die Korrosionsbeständigkeit von AZ91 vergrößert wird [10].

## 2.1.2 WE43

WE43 ist eine Mg-Y-Nd-Zr Hochleistungslegierung (vgl. Tabelle 3) mit hoher Kriechfestigkeit bis zu Einsatztemperaturen von 300 °C und großer Korrosionsresistenz bei gleichzeitig guten Festigkeitseigenschaften bei Raumtemperatur [3, S. 96]. Die hohe Kriechfestigkeit wird dabei durch fein verteilte, thermisch stabile Ausscheidungen erreicht [11]. Bei den Ausscheidungen handelt es sich um verschiedene (meta-)stabile, binäre oder tertiäre Phasen aus Magnesium, Yttrium und/oder Neodym wie beispielsweise  $Mg_{24}Y$ ,  $Mg_{41}Nd_5$ ,  $Mg_3Nd$ ,  $Mg_{14}Nd_2Y$ , deren Ausprägung von den Erstarrungsbedingungen und der (lokalen) Legierungszusammensetzung abhängt [12]. Die binären Phasendiagramme sind in Bild 2 abgebildet. Durch die Zugabe von Zirkon kann eine Kornfeinung erreicht werden [13], wodurch sowohl Festigkeit als auch Bruchdehnung vergrößert werden können [13, 14].

Legierungselement	Anteil [Gew.-%]	Legierungselement	Anteil [Gew.-%]	Legierungselement	Anteil [Gew.-%]
Yttrium	3,7 - 4,3	Kupfer	max. 0,02	Nickel	max. 0,005
Neodym	2,0 - 2,5	Eisen	max. 0,01	Andere	max. 0,01 (jedes)
Seltene Erden	1,9	Lithium	max. 0,2	Magnesium	Rest
Zirkon	0,4 - 1,0	Mangan	max. 0,03		

Tabelle 3: Legierungsbestandteile von WE43B Extrusionsprodukten entsprechend ASTM B107/B107M

Typische Abwendungen für WE43 sind Hochleistungsbauteile im Motorsport sowie Getriebegehäuse oder Gehäuse im Antriebssystem sowohl bei zivilen als auch militärischen Flugzeugen und Helikoptern [15–17]. Mittlerweile ist WE43 durch die FAA auch für den Innenbereich in zivilen Passagierflugzeugen zugelassen [18, 19]. Neben diesen technischen Anwendungen hat seit 2013 eine resorbierbare Kompressionschraube für die Humanmedizin eine CE-Kennzeichnung