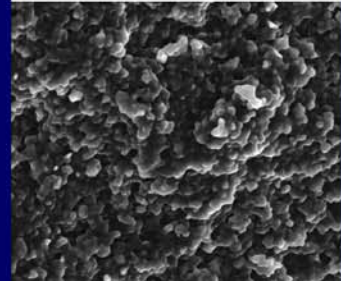
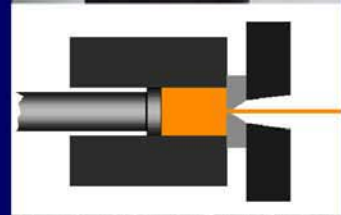
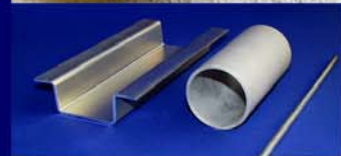
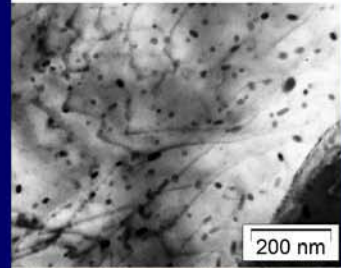
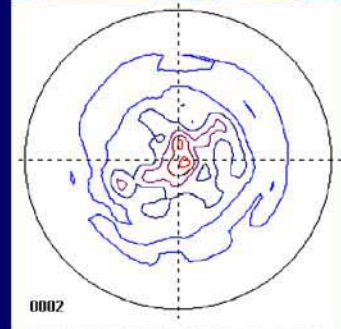
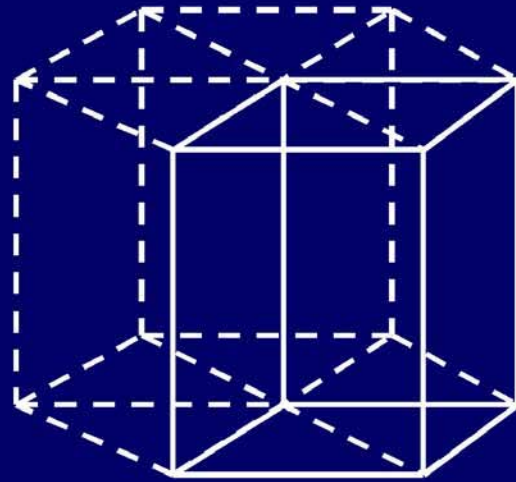


# Untersuchungen zur Entwicklung einer magnesiumgerechten Strangpresstechnologie

Jan-F. Lass



Untersuchungen zur Entwicklung einer  
magnesiumgerechten Strangpresstechnologie

Dipl.-Ing. Jan-F. Lass

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© Jan-F. Lass, 2005  
Am Angelkamp 87  
D-48167 Münster

ISBN 3-8334-3428-7

Herstellung und Verlag:  
Books on Demand GmbH, Norderstedt

2005

## Kurzzusammenfassung

Magnesium ist der leichteste aller metallischen Konstruktionswerkstoffe und annähernd unbegrenzt verfügbar. Insbesondere Knetlegierungen aus Magnesium besitzen zum Teil sehr gute mechanische Eigenschaften, wobei die Kennwerte durch den Umformprozess erheblich beeinflusst werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden die werkstoffspezifischen Eigenschaften von Magnesium insbesondere für den umgeformten Zustand, mit Schwerpunkt auf dem Strangpressen, dargestellt. Zudem wird das Strangpressen als eines der wichtigsten Umformverfahren für Aluminiumwerkstoffe mit seinen Möglichkeiten und Grenzen beschrieben. Darüber hinaus wird das ECAP-Verfahren (Equal Channel Angular Pressing) als Sonderverfahren zur Einstellung sehr homogener und feinkörniger Gefügestrukturen vorgestellt.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden die verschiedenen Einflussparameter des Strangpressens von Magnesiumlegierungen in drei Gruppen unterteilt: Ausgangsmaterial, Strangpressprozess und mögliche Nachbehandlungen. Die Bewertung der Parameter erfolgt dabei auf der Grundlage von zwei generellen Kriterien: Mechanische Eigenschaften des Strangpressproduktes und Wirtschaftlichkeit des Prozesses.

Auf dieser Grundlage werden die verschiedenen Aspekte untersucht und bewertet. Dabei zeichnen sich komplexe und zum Teil auch sehr konträre Zusammenhänge zwischen den variierbaren Parametern ab. Sollte z.B. zur Reduzierung der Press- und Anfahrkräfte die Prozesstemperatur angehoben werden, so erfordert dem gegenüber die Einstellung guter mechanischer Kennwerte eine Senkung der Prozesstemperatur und die Einstellung niedriger Pressgeschwindigkeiten.

Die vorliegende Arbeit schafft eine grundlegende Basis für zukünftige Entwicklungen und zeigt dabei sehr deutlich die Potenziale von stranggepressten Magnesiumlegierungen. Darüber hinaus werden zahlreiche Wechselwirkungen zwischen den Strangpressparametern und den Profileigenschaften dargestellt, was zu einer wesentlichen Erweiterung des Verständnisses der magnesiumspezifischen Zusammenhänge beim Strangpressen führt.

Schlagworte: Strangpressen, Magnesium, Zweiwuchs, ECAP, ECAE,  $\text{Al}_3\text{Mn}_4\text{Si}_5$

## Abstract

Magnesium is the lightest metallic construction material and offers a nearly unlimited availability. Especially magnesium wrought alloys show very good mechanical properties and furthermore the characteristic values can be influenced considerably by the forming process.

In this thesis the peculiarities of the material magnesium especially in the deformed condition and with main emphasis on the extrusion process, will be shown. Furthermore extrusion will be described as one of the most important forming processes for aluminium materials with its possibilities and limits. In addition the ECAP-process (Equal Channel Angular Pressing) as a special treatment for the adjustment of homogenous and fine-grained structures will be presented.

The different process parameters of the extrusion of magnesium alloys are divided into three groups within this thesis: feedstock, extrusion process and possible subsequential treatment. The evaluation of the parameters is carried out on basis of two fundamental criterions: mechanical properties of the extruded product and economic efficiency of the process.

On this basis the different aspects are tested and evaluated. Complex correlations can be seen between the different parameters which partly are very contrary. For example the process temperature can be increased in order to reduce the pressing- and starting forces. On the other hand the adjustment of high mechanical properties requires a decrease of the process temperature and low pressing speeds.

This thesis may serve as a fundamental basis for future survey and clearly shows the potentials of extruded magnesium alloys. Furthermore several correlations between the extrusion process and the profile properties are clearly shown. This leads to an essential expansion of the understanding for magnesium specific behavior during the extrusion process.

Keywords: extrusion, magnesium, ECAP, ECAE,  $\text{Al}_3\text{Mn}_4\text{Si}_5$

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Strangpressen	4
2.1.1 Verfahrensprinzipien	5
2.1.2 Werkzeugsysteme	11
2.1.3 Kontrolle des Materialflusses	13
2.1.4 Prozesssteuerung und Gefügeausbildung	18
2.2 Magnesium	24
2.2.1 Werkstoffphysikalische und -metallurgische Grundlagen	24
2.2.2 Legierungen des Magnesiums	31
2.2.3 Gießtechnische Verarbeitung	33
2.2.4 Stranggepresste Magnesiumhalbzeuge	34
2.2.4.1 Einfluss des Umformgrades	35
2.2.4.2 Einfluss der Umformgeschwindigkeit und der Umformtemperatur	36
2.2.4.3 Anisotropie und Asymmetrie umgeformter Magnesiumwerkstoffe	37
<b>3 Ausgangssituation, Zielsetzung und Arbeitsprogramm</b>	<b>41</b>
<b>4 Anlagen und Verfahren</b>	<b>44</b>
4.1 Strangpressen	44
4.2 ECAE/ ECAP	47
<b>5 Versuchsmethodik</b>	<b>48</b>
5.1 Ausgangsmaterial	49
5.2 Bewertung der Pressprozesse	50
5.2.1 Strangpressprozess	50
5.2.2 ECAE-Prozess	51
5.3 Experimentelle Analysemethoden	51
5.3.1 Strukturanalytik	51
5.3.2 Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften	55
5.3.3 Charakterisierung des Umformvermögens	56

---

<b>6</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>58</b>
6.1	Einfluss verschiedener Prozessparameter beim Strangpressen	58
6.1.1	Legierungszusammensetzung	58
6.1.2	Qualität der Pressblöcke	71
6.1.2.1	Gießtechnische Herstellung	71
6.1.2.2	Korngröße	75
6.1.3	Prozesstemperatur	78
6.1.4	Pressgeschwindigkeit	83
6.1.5	Werkzeuggeometrie	93
6.1.6	Vorkammer	96
6.1.7	Strangabkühlung	111
6.2	Einfluss verschiedener Prozessparameter beim ECAE/ ECAP	116
6.2.1	Verfahrensrouten	116
6.2.2	Prozesstemperatur	120
6.2.3	Schmierstoff	122
6.2.4	Werkzeuggeometrie	127
6.2.5	Wärmebehandlung	128
6.2.6	Ergebnisbetrachtung	130
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick</b>	<b>134</b>
7.1	Zusammenfassung	134
7.2	Diskussion und Ausblick	139
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>141</b>

## Abkürzungen und Formelzeichen

### Lateinische Buchstaben

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A	[%]	Bruchdehnung
a	[s/mm]	Empirisch ermittelter Faktor
$A_{OVK}$	[mm <sup>2</sup> ]	Durchbruchquerschnittsfläche des Werkzeuges ohne Vorkammer
ASTM		American Society for Testing and Materials
a(T)	[cm <sup>2</sup> s]	Temperaturleitfähigkeit
$A_{VK}$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche der Vorkammer
$A_I$	[mm <sup>2</sup> ]	Eingangsquerschnittsfläche des Blockes
$A_{II}$	[mm <sup>2</sup> ]	Ausgangsquerschnittsfläche des Strangpressprofils
b	[mm]	Profilbreite
c/a	[ - ]	Achsenverhältnis der hexagonalen Elementarzelle
$c_1$	[N/K]	Erweichungskoeffizient
$c_2$	[N]	Linear extrapolierte Presskraft für eine Profiltemperatur von 0°C (legierungsabhängig)
$c_p$	[J/cm <sup>-3</sup> K]	Spezifische Wärmekapazität
d	[mm]	Vorkammerbreite
D	[mm]	Prüfkugel-Durchmesser
$d_B$	[mm]	Blockdurchmesser
$d_m$	[mm]	Mittlerer quadratischer Korndurchmesser
$d_0$	[mm]	Probendurchmesser
$d_I$	[mm]	Eingangsdurchmesser des Blockes
$d_{II}$	[mm]	Ausgangsdurchmesser des Strangpressprofils
E	[J]	Über den Presstempel eingebrachte Energie
ECAE/ ECAP		Equal Channel Angular Extrusion/ Pressing (Querschnittskonstante Winkelpressung)
EDX		Energiedispersive Röntgenanalyse
F	[N]	Kraft
$F_M$	[N]	Matrizenkraft
$F_R$	[N]	Reibkraft = Rezipientenkraft
$F_{St}$	[N]	Stempelkraft
$F_{St 100}$	[N]	Stempelkraft bei einem Stempelweg von 100 mm

<b>Abkürzung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$F_{St\ max}$	[N]	Maximale Stempelkraft
G	[ - ]	Korngrößen-Kennzahl
h	[mm]	Augenblickliche Probenhöhe
hex		Hexagonale Gitterstruktur
hdp		Hexagonal dichteste Packung
$h_0$	[mm]	Ausgangs-Probenhöhe
l	[ $\mu$ m]	Korndurchmesser
IHU		Innen-Hochdruck-Umformung
K	[%]	Kraftüberhöhung im Anfahrprozess
k	[MPa $\sqrt{m}$ ]	Widerstand der Korngrenze gegen plastische Verformung im polykristallinen Haufwerk
$k_f$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Fließspannung
m	[ - ]	Anzahl der Körner auf einer Fläche von 1 mm <sup>2</sup>
mas%	[%]	Massenprozent
$m_B$	[g]	Masse eines Pressblockes
mrd		Multiples of the Random Distribution
NE-Metalle		Nichteisen-Metalle
ODF		Orientierungs-Dichte-Funktion
oLga		Optimierte Leichtmetallgießanlage
OVK		Ohne Vorkammer
PSN		Particle Stimulated Nucleation
r	[MPa]	Absoluter Asymmetriekennwert
$R_a$	[mm]	Außenradius
RD		Bezugsachse bei der Texturbestimmung und -darstellung
REM		Rasterelektronenmikroskop
$R_i$	[mm]	Innenradius
$R_m$	[MPa]	Mindestzugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	Dehngrenze
$r_{90}$	[ - ]	Asymmetriequotient der Zugfestigkeiten
$s_B$	[cm]	Pressblocklänge
T	[°C]	Temperatur
t	[mm]	Vorkammertiefe



<b>Abkürzung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
TD		Bezugsachse bei der Texturbestimmung und -darstellung
TEM		Transmissionselektronenmikroskop
$T_0$	[K]	Ausgangstemperatur des Pressblocks
$T_{\max}$	[K]	Maximale Temperatur
$\Delta T_{\max}$	[K]	Maximale Temperaturerhöhung des Pressblockes
$T_B$	[°C]	Blocktemperatur
$T_R$	[°C]	Rezipiententemperatur
$T_{\text{Rekr.}}$	[K]	Rekristallisationstemperatur
$T_S$	[°C]	Schmelztemperatur
$T_{WZ}$	[°C]	Werkzeugtemperatur
UPEX		Pressverfahren (upsetting + extruding)
$V_{\text{ges}}$	[-]	Gesamtstrangpressverhältnis
$V_{\text{OVK}}$	[-]	Strangpressverhältnis des Werkzeuges ohne Vorkammer
$V_{\text{VK}}$	[-]	Strangpressverhältnis des Werkzeuges mit Vorkammer
VK		Mit Vorkammer
$v_{\text{St}}$	[mm/s]	Stempelgeschwindigkeit
$v_{\text{Wz}}$	[mm/s]	Werkzeuggeschwindigkeit
x		Variabler Legierungsanteil
XRD		Röntgendiffraktometrie

**Griechische Buchstaben**

<b>Abkürzung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\varphi$	[ - ]	Logarithmischer Umformgrad
$\dot{\varphi}$	[1/s]	Umformgeschwindigkeit
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte
$\rho_{Mg}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte der Magnesiumlegierung
$\Lambda$	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
$\sigma_C$	[MPa]	Verformungsbeginn (Dehn- oder Streckgrenze)
$\sigma_{dB}$	[MPa]	Mindeststauchfestigkeit
$\sigma_{0d0,2}$	[MPa]	Stauchgrenze
$\sigma_0$	[MPa]	Notwendige Spannung zur Einleitung der Versetzungsbewegung im Korn
$\varepsilon_{dB}$	[%]	Bruchstauchung

**Magnesiumkomponenten und -legierungen****Legierungskomponenten nach ASTM**

(die Angaben in dieser Arbeit sind in mas%)

A	Aluminium (Al)
E	Seltene Erden im chemischen Sinne, d.h. ohne Yttrium oder Scandium
K	Zirkon (Zr)
M	Mangan (Mn)
W	Yttrium (Y)
Z	Zink (Zn)



# 1 Einleitung

Das Strangpressen ist neben dem Schmieden und Walzen eines der wichtigsten Verfahren zur Umformung von Metallen. Dabei findet dieses Verfahren bei Kupfer- und insbesondere bei Aluminiumwerkstoffen Anwendung, doch auch Werkstoffe wie Titan und Stahl lassen sich durch Strangpressen umformen.

Das Verfahrensprinzip des Strangpressens geht auf eine Konstruktion des Engländer Joseph Bramah aus dem Jahr 1795 zurück. Aufbauend auf dieser Erfindung wurde 1820 eine erste hydraulische Presse entwickelt. Eine so genannte Strangpresse wurde jedoch erst von Alexander Dicks im Jahr 1894 entwickelt und zum Patent angemeldet. Aus diesem Grund wurde bis spät in die 30er Jahre vom Strangpressen nach dem Dick'schen Verfahren gesprochen [Wei91].

Bis heute hat sich die Anlagentechnik des Strangpressens stark gewandelt. Die anfangs verwendeten wasserhydraulischen Pressen sind heute nahezu vollständig durch ölhydraulische Pressen verdrängt worden. Darüber hinaus haben sich einige Sonderverfahren wie das hydrostatische Pressen oder das Conform-Verfahren entwickelt, die sich jedoch nur für Spezialanwendungen durchgesetzt haben und eher eine untergeordnete Rolle spielen. Lediglich das indirekte Strangpressen hat sich für schwer verpressbare Legierungen durchgesetzt.

Auf den meisten Strangpressanlagen werden Aluminiumlegierungen verpresst. Neben Schmiedehalbzeugen und Strukturprofilen für die Luftfahrt- und die Fahrzeugindustrie werden aufgrund der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit Kühlprofile und Wärmetauscher aus Aluminium stranggepresst. Aber auch für dekorative Anwendungen und tragende Strukturen im Maschinenbau haben sich Aluminiumprofile etabliert. Dabei sind äußerst komplexe Geometrien mit sehr geringen Wandstärken möglich.

Magnesium wurde im Gegensatz zu Aluminium bereits früh in Form von Legierung eingesetzt. Es ist als Rohstoff annähernd unbegrenzt verfügbar. So enthält beispielsweise 1 m<sup>3</sup> Meerwasser bis zu 1,3 kg Magnesium. Aus diesem Grund wurde insbesondere in den Jahren des zweiten Weltkrieges in Deutschland sehr intensiv an Magnesium und seinen Legierungen geforscht. Doch auch nach 1945 wurde Magnesium in zunehmendem Maße eingesetzt. Das Haupteinsatzgebiet beschränkte sich jedoch auf Gussanwendungen. Dabei nahm der Fahrzeugbau mit dem Einsatz von Getriebegehäusen im VW-Käfer eine Führungsstellung ein. Zum Ende der 70er Jahre sank der Einsatz von Magnesium mit der Einführung wassergekühlter Motoren aus Aluminium sehr stark ab.

In den letzten Jahren erfuhr Magnesium eine Renaissance. Die Weltproduktion

von Magnesium liegt heute bei etwa 410.000 t pro Jahr. Von dieser Menge werden ca. 42% als Legierungszusatz für Aluminium eingesetzt. 36% des geförderten Magnesiums werden für die Herstellung von Gussteilen, fast ausschließlich Druckguss, verwendet [Buc86, Kai02, Mgt00].

Begründet ist der erneute Zuwachs der Verwendung von Magnesium durch die stark steigenden Energiekosten und die gesetzlichen Vorgaben zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes [ADAC03, Wal00]. Nach US-Angaben werden in der Automobilindustrie für eine Gewichtsreduzierung von einem Kilogramm Mehrkosten bis maximal drei Dollar akzeptiert. In der Luftfahrtindustrie hingegen ist man bereit, bis zu 300 Dollar und in der Raumfahrtindustrie sogar bis zu 30.000 Dollar zu zahlen [Sch94]. Hierdurch nimmt die Fokussierung auf den Stoff- und Strukturleichtbau in den letzten Jahren einen immer größeren Raum ein [Bro00, Jam99]. Der Leichtbau führt jedoch letztendlich nicht zu einer tatsächlichen Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge, da die gesteigerten Anforderungen an den Fahrkomfort sowie an die passive und aktive Sicherheit in der Summe eine stetige Gewichtszunahme verursachen.

Die Firma Audi gilt aufgrund der Entwicklung des Aluminium-Space-Frames beim A8 und A2 als Vorreiter des stofflichen Leichtbaus. Neben Strangpressprofilen setzt sich der Aluminium-Space-Frame aus Druckgussknoten und Blechen zusammen [Lei00]. Im Jahre 2002 stellte VW das 1-Liter-Versuchsfahrzeug vor, welches eine Rahmenstruktur aus Magnesiumprofilen und -druckgussknoten besitzt. Im Jahre 2004 stellte die Firma Michelin zusammen mit dem Paul Scherrer Institut ein 2-Liter-Auto mit 4 Sitzplätzen vor, welches neben einem Brennstoffzellen-System ebenfalls einen konsequenten Leichtbau verfolgt [Pau04].

Grundsätzlich beschränkt sich momentan der Einsatz von Magnesium im Fahrzeugbau fast ausschließlich auf nicht crashrelevante Druckgussbauteile. In Bereichen von sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Crashabsorbern in Pkw-Türen, bei denen eine hohe Duktilität, eine hohe Kerbschlagzähigkeit sowie eine hohe Streckgrenze gefordert ist, stehen Bauteile aus Magnesium den anderen Leichtmetallen bis heute nach [Ben03]. In solchen Anwendungsbereichen können gegossene Magnesiumlegierungen den gestellten Ansprüchen aufgrund ihrer eingeschränkten Festigkeit und Duktilität, die auf das grobe Gussgefüge und die Porosität zurückzuführen sind, nur bedingt gerecht werden [Poll00].

Durch die Verwendung von stranggepressten, geschmiedeten oder gewalzten Bauteilen aus Magnesium-Knetlegierungen können diese Probleme umgangen und das geringe spezifische Gewicht des Werkstoffes ausgenutzt werden. Die umformtechnischen Verfahren sind prädestiniert, die Gebrauchseigenschaften von Magnesiumbauteilen positiv zu beeinflussen. So zeichnen sich die auf diese

Weise hergestellten Werkstücke gegenüber den Gussbauteilen durch ein feinkörnigeres Gefüge und daraus resultierende bessere mechanische Eigenschaften aus. Das Strangpressen bietet für die Herstellung von Profilen aus Magnesium ein großes Potenzial. Durch dieses Verfahren ist es möglich, endkonturnahe Bauteile mit engen Maß- und Formtoleranzen in nur einem Produktionsschritt herzustellen. Insbesondere das Verfahren des 3-D-Pressens und das IHU-Verfahren (Innen-Hochdruck-Umformung) ermöglichen die kostengünstige Herstellung verschiedener Geometrien [Bet95, Boh03, Kla02].

Das Strangpressen von Magnesium ist mit verschiedenen Nachteilen verbunden, welche einer breiten industriellen Anwendung dieses Herstellungsprozesses entgegen stehen:

- Hohe Presskräfte und hohe Anfahrkräfte
- Geringe maximale Pressgeschwindigkeiten
- Niedrige Umformgrade
- Keine dünnen Wandstärken

Zusätzlich zeigen die stranggepressten Halbzeuge aus Magnesium negative Werkstoffeigenschaften:

- Ausgeprägte Asymmetrie bzgl. mechanischen Kennwerte in Hinblick auf die Lage der Belastungsrichtung zur Strangpressrichtung
- Deutliche Zug-/ Druck-Anisotropie => verminderte mechanische Eigenschaften bei Druckbeanspruchung
- Inhomogene Korngrößenverteilung
- Oberflächenverfärbungen

Obwohl bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts Magnesiumlegierungen stranggepresst wurden und vermutlich ein hoher Erfahrungsschatz vorlag, sind aus dieser Zeit mit wenigen Ausnahmen annähernd keine Veröffentlichungen hierzu bekannt [BIO44]. Insbesondere gibt es bezüglich des Einflusses verschiedener Strangpressparameter auf den Prozess selber sowie auf die mechanischen Eigenschaften des Profils bis heute nur sehr wenige Untersuchungen.

Auf Basis dieser Rahmenbedingungen beschäftigt sich diese Arbeit daher mit verschiedenen Strangpressparametern und deren Einfluss auf den Prozess sowie die resultierenden Werkstoffeigenschaften. Dabei werden neben der Umformtechnik die werkstoffphysikalischen Mechanismen analysiert und bewertet. Die Kenntnis der daraus entwickelten Zusammenhänge eröffnet Möglichkeiten zur gezielten anforderungsspezifischen Beeinflussung des Prozesses und zur reproduzierbaren Einstellung gewünschter Werkstoffeigenschaften. Dies lässt eine deutliche Erweiterung des Einsatzspektrums von stranggepressten Magnesiumprofilen – insbesondere im Fahrzeugbau – erwarten.

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

### 2.1 Strangpressen

Strangpressen wird innerhalb der Druckumformverfahren den Durchdrückverfahren zugeordnet. Nach DIN 8583 gehören zu den Durchdrückverfahren die Umformverfahren Verjüngen, Strangpressen und Fließpressen. Eine kurze Beschreibung des Strangpressens gibt Fritz in [Fri01]:

*„Beim Strangpressen wird ein aufgeheizter Block in einem Presszylinder (Rezipient) durch einen Stempel unter hohen Druck gesetzt. Der Werkstoff beginnt zu fließen und tritt durch die Matrizenöffnung als Strang mit einer konstanten Austrittsgeschwindigkeit aus. So entstehen endkonturnahe Halbzeuge in nur einem Produktionsschritt.“*

Zu den wichtigsten industriellen Verfahren gehören das direkte Strangpressen, das indirekte und bedingt auch das hydrostatische Strangpressen [Bau01, Leh96, Mue03a, Mue04 Ost98].

Das neben dem Strangpressen eingesetzte Durchdrückverfahren ist das Fließpressen. Strangpressen und Fließpressen sind im Umformmechanismus sehr ähnlich, unterscheiden sich aber in Bezug auf das Werkzeug und die Anlagentechnik, als auch in Bezug auf das Erzeugnis. Während das Strangpressen vornehmlich bei der Herstellung von Voll- und Hohlsträngen (Stangen, Bändern, Stäben, Rohren, Profilen), also bei der Fertigung von Halbzeugen angewandt wird, hat das Fließpressen die Herstellung einzelner Werkstücke zum Ziel. Verbreitet ist das Kaltfließpressen von Stahl oder das Kaltfließpressen von Hülsen, Bechern, Tuben z.B. aus Aluminium oder Zink [Lan02, Lan88a].

Das Strangpressen ist im Gegensatz zu anderen Druckumformverfahren der Halbzeugherstellung ein Umformverfahren mit reinen Druckkräften in allen drei Belastungsrichtungen. Entsprechend hoch sind die im Umformbereich wirkenden mittleren Druckspannungen [Bau01]. Diese Druckspannungen lassen auch die Umformung von Presswerkstoffen zu, die sich wegen ihres eingeschränkten Umformvermögens nicht mit Hilfe anderer Warmumformverfahren, beispielsweise dem Walzen, zu Halbzeugen verarbeiten lassen. Das Durchdrücken des Werkstoffes durch den formgebenden Bereich der Matrize ermöglicht die Erzeugung von Pressstrangquerschnittsgeometrien, die mit keinem anderen Verfahren der Warmumformung hergestellt werden können. Die günstigen Umformbedingungen gestatten darüber hinaus bei Nichteisen-Metallen (NE-Metallen) mit guten Schweiß Eigenschaften und Werkzeug verträglichen Umformtemperaturen wie beispielsweise Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen das Aufteilen des Press-

blocks in mehrere Metallströme und deren Wiederverschweißen im Form gebenden Bereich des Presswerkzeuges zur Rohr- und Hohlprofilherstellung. Die Hohlprofilherstellung wurde damit zu einem Schwerpunkt des Strangpressens. Durch das Block-auf-Block-Pressen wird des Weiteren die Herstellung von Ringrohren mit großen Längen wie beispielsweise Wärmeaustauscher-Rohre aus Aluminium möglich [Bau01].

### **2.1.1 Verfahrensprinzipien**



## 8 Literatur

- [ADAC03] ADAC03: Mobilität im Jahr 2020, Trends, Herausforderungen und Lösungsstrategien. Artikel-Nr.: 283112.1, ADAC, 2003
- [Agn01] Agnew, S.R.: Measurement and simulation of plastic anisotropy in magnesium alloy AZ31B sheet. Modelling the Performance of Engineering Structural Materials II, Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., Indianapolis, USA, S. 289-294, 2001
- [Ake88] Akeret, R.: Control of metal flow in extrusion dies. Light Met. Age, Bd. 46, (7,8), S. 5-14, 1988
- [Ame71] Ames, A.; Bielen, I.; Sauer, G.: Vorschlag zur Normung von Werkzeugen für Leichtmetall-Strangpressen in Abhängigkeit der Presskräfte. Metallkunde, Bd. 62, S. 716-720, 1971
- [Aoy03] Aoyagi, N.; Kamado, S.; Kojima, Y.: Temperature dependence on impact failure behaviour in extruded pure magnesium and Mg-Al-Zn system alloys. Materials Science Forum, Bd. 419-422, S. 129-134, 2003
- [Arm97] Armstrong, R.W.: Strength and ductility of metals. Transactions of the Indian Institute of Metals, Bd. 50, India, S. 521-531, 1997
- [Bac01] Bach, Fr.-W.; Haferkamp, H.; Niemeyer, M.; Lass, J.-F.: Magnesium alloys and process developments for space-frame-concepts; International Body Engineering Conference & Exposition, SAE Technical Papers, Detroit, USA, 2001
- [Bac02] Bach, Fr.-W.; Lass, J.-F.: Influence of alloys and extrusion parameters on the mechanical properties of magnesium profiles. Materials Week 2002, Internat. Congress on Adv. Materials, their Processes and Applications, München, D, 2002
- [Bac97] Bacroix, B.; Duarte, J.F.; Barata da Rocha, A.; Chauveau, T.; Gracio, J.J.: The influence of texture on the mechanical behaviour of aluminum sheets. Proc. of the 5th Internat. Conf., Sheet Metal, Ulster, GB, S. 191-198, 1997
- [Bak01] Baker, P.W.; McGlade, P.T.: Magnesium direct chill casting. A comparison with aluminum. Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., New Orleans, USA, S. 855-862, 2001

- [Bal94] Ball, A.; Prangnell, B.: Tensile-compressive yield asymmetries in high strength wrought magnesium alloys. *Scripta Metallurgica of Materialia* Bd. 31 (2), S. 111-116, 1994
- [Bar03] Barnett, M.R.; Yao, J.-Y.; Davies, Ch.: Influence of Al content (<3%) on the extrusion limit diagram. *Magnesium Alloys and Their Applications, 6<sup>th</sup> International Conference, Wolfsburg, D*, S. 272-277, 2003
- [Bau01] Bauser, M.; Sauer, G.; Siegert, K.: *Strangpressen*. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [Bec39] Beck, A.: *Magnesium und seine Legierungen*. Verlag Julius Springer, Berlin, 1939
- [Bei03] Beigelsiemer, A.E.; Varjuchin, W.N.; Orlov, D.W.; Suinkov, S.G.: *Twist Extrusion - Ein Umformverfahren*. ISBN: 966-7507-16-5, Ukraine, 2003
- [Ben03] Ben-Atzy, A.; Shtechman, A.; Bussiba, A.; Salah, Y.; Ifergan, S.; Kupiec, M.; Grinfeld, R.: Low temperature super-plasticity response of AZ31B magnesium alloy with severe plastic deformation. *Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., San Diego, USA*, S. 259-263, 2003
- [Bet95] Bettin, M.; Findeisen, V.; Hermans, J.: *Gebogene Aluminium-Profile und Rohre im PKW-Bau. Neuere Entwicklungen in der Massivumformung*, Fellbach, 1995, S. 49-82, 1995
- [BIO44] BIOS/ CIOS. Unveröffentlichte Geheimdienstberichte des amerikanischen und britischen Militärs, 1944-1947
- [Boe05] Boehm, R.: *Entwicklung anwendungsoptimierter Magnesiumknetlegierungen und ihre Verarbeitung*. Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [Boh03] Bohlen, J.; Kaiser, F.; Letzig, D.; Kainer, K.U.; Styczynski, A.; Hartig, Ch.: Correlation of microstructure and mechanical properties of rolled magnesium sheet AZ31. *Magnesium Alloys and Their Applications, 6<sup>th</sup> International Conference, Wolfsburg, D*, S. 456-462, 2003

- [Bra03] Braszczyńska, K. N.: Possibilities of ECAP of magnesium alloy. Magnesium Alloys and Their Applications, 6<sup>th</sup> International Conference, Wolfsburg, D, S. 236-241; 2003
- [Bro00] Broge, J. L.: The battle of the metals. Automotive Engineering International, Bd. 108 (8), S. 36-53, 2000
- [Buc86] Buckeley, A.: Magnesium - Rückblick und Ausblick. Aluminium, Bd. 62 (11), S. 855-858, 1986
- [Cha55] Chaudhuri, A.R.; Chang, H.C.; Grant, N.J.: Creep deformation of magnesium at elevated temperatures by nonbasal slip. Trans. AIME, S. 682-688, 1955
- [Chi01] Chino, Y.; Mabuchi, M.; Influences of grain size on mechanical properties of extruded AZ91 Mg alloy after different extrusion processes. Advanced Engineering Materials, Bd. 3 (12), S. 981-983, 2001
- [Clo00] Closset, B.: Mechanical properties of extruded magnesium alloys. Magnesium Alloys and Their Applications, International Conference, München, D, S. 274-279, 2000
- [Clo98] Closset, B.; Perey, J.; Bonjour, C.; Moos, P.: Microstructures and properties of wrought magnesium alloys. Magnesium Alloys and Their Applications, International Conference, Wolfsburg, D, S. 195-200, 1998
- [Con02] Conrad, H.; Narajan, J.: Mechanisms for grain size hardening and softening in Zn. Acta Materialia, Bd. 50 (20), S. 5067-5078, 2002
- [Con03] Conrad, H.; Narajan, J.: Grain size hardening and softening in tungsten carbide at low homologous temperatures, Electron Microscopy: Its Role in Materials Science, Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., San Diego, California, USA, S. 141-148, 2003
- [Con87] Anonym: Springfields Laboratories seeks to advance Conform technology. Metal Powder Report, Bd. 42 (9), S. 648-649, 1987

- [Dic95] Dicks, N.: Physikalische Simulation des Strangpressens zur Analyse verschiedener Problemstellungen, Untersuchungen des Schalefehlers, Stoffflussuntersuchungen in Kammermatrizen., Umformtechnische Schriften, Bd. 57, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1995
- [Die77] Diegritz, O.: Pressfehlerkatalog – Fehlererscheinungen beim direkten Strangpressen. DGM, 1977
- [Dra02] Draugelates, U.; Poss, R.: Eigenschaften und Blechherstellung feinkörniger Magnesiumlegierungen. 3. Industriekolloquium „Fertigen in Feinblech“, Leichtbau durch innovativen Werkstoffeinsatz, Clausthal-Zellerfeld, D, S. 70-80, 2002
- [Due68] Dürrschnabel, W.: Der Materialfluss beim Strangpressen von NE-Metallen Teil I: Metall, 22 (5), S. 426-437; Teil II: Metall, (10), S. 995-998; Teil III: Metall, (12), S. 1215-1219, 1968
- [Dup00] Duplancic, I.; Mioc, M.; Bracic, Z.: Case studies on control of metal flow in pre-chamber dies. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Aluminium Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Bd. 2, S. 177-186, 2000
- [Dzw02] Dzwonczyk, J.; Bohlen, J.; Hort, N.; Kainer, K.U.: Influence of extrusion ratio on microstructure and mechanical properties of hot extruded AZ31. Materials Week, Internat. Congress on Adv. Materials, their Processes and Applications, München, D, 2002
- [Eis31] Eisbein, W.; Sachs, G.: Mitteilung der deutschen Materialprüfanstalt. Sonderheft XVI, S. 67-96, 1931
- [Eis32] Eisbein, W.: Kraftbedarf und Fließvorgänge beim Strangpressen. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 24 (4), S. 79-84, 1932
- [Eml66] Emley, E.F.: Principles of magnesium technology. Pergamon Press, 1966
- [Fio72] Fiorentino, R.-J.; Meyer, G. E.; Byrer, T.G.: The thick-film hydrostatic extrusion process. Metallurgie and Metal Forming, S. 200-205, 1972

- [Fis99] Fischer, G.; Becker, J.: Leistungsstarkes Halbzeug für Leichtbauzwecke. Strangpress- und Schmiedeprodukte aus Magnesium, Industrieanzeiger, Bd. 121 (22), S. 32-33, 1999
- [For04] Forschungszentrum Strangpressen, Technische Universität Berlin, Sekr. TIB 4/1-2, Gebäude 17a, Gustav-Meyer-Allee 25, D-13355 Berlin: <http://www.fzs.tu-berlin.de/>
- [Fri01] Fritz, H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [Fur96] Furukawa, M.; Horita, Z.; Nemoto, M.; Langdon, T.: The significance of the Hall-Petch relationship in ultra-fine grained materials. Annales de Chemie, Science des Materiaux (France), Bd. 21 (6-7), S. 493-502, 1996
- [Fur97] Furukawa, M.; Yoshinori, I.; Horita, Z.; Nemoto, M.; Tsenev, N.; Valiev, R.; Langdon, T.: Structural evolution and the Hall-Petch relationship in an Al-Li-Zr Alloy with ultra-fine grain size. Acta Metallurgica, Bd. 45 (11), S. 4751-4757, 1997
- [Fur98] Fururi, M.; Sanada, M.; Saji, S.: Hall-Petch relationship in 3004 aluminum alloy with fine grain. Journal of Japan Institute of Light Metals, Bd. 48 (8), S. 405-406, 1998
- [Got01] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde. Springer Verlag, Berlin, 2001
- [Gra03] Gradinger, R.; Stolfig, P.: Magnesium wrought alloys for automotive applications. Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., San Diego, USA S. 231-236, 2003
- [Hal51] Hall, E.O.: The deformation and aging of mild steel: III Discussion and Results. Proceedings of the Physical Society, Nr. 381, Vol. 64, 1951, S. 747-753, 1951
- [Har47] Harris, C.S.: Extrusion of magnesium. Machinery, Bd. 53 (7), 1947
- [Hau56] Hauser, F.E.; Landon, P.R.; Dorn, J.E.: Deformation and fracture mechanisms of polycrystalline magnesium at low temperatures. Trans. ASM, 48, S. 856-883, 1956

- [Her36] Herenguel, J.; Lacombe, P.: De l'influence de la grosseur du grain sur la proprietes mecaniques du Mg extra pur. Metaux, Bd. 11 (133), S. 185-186, 1936
- [Hoe02] Höppel, H.W.; Valiev, R.Z.: On the possibilities to enhance the fatigue properties of ultrafine-grained metals. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 93 (7), 2002
- [Hol02] Holzkamp, U.: Entwicklung einer magnesiumgerechten Stranggießtechnologie. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 623, Dissertation, Universität Hannover, 2002
- [Hor00] Horita, Z.; Furukawa, M.; Nemoto, M.; Valiev, R.Z.; Langdon, T.G.: Characterization of ultrafine-grained structures produced by severe plastic deformation. Investigations and applications of severe plastic deformation, NATO Advanced Research Workshop, Moskow, Russland, S. 173-178, 2000
- [Jam99] Jambor, A.: Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Karosseriebau. Tag der Karosserie, Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen, S.1-20, 1999
- [Jas04] Jaschik, Ch.: Eigenschaftserweiterung von Magnesiumlegierungen durch Lithium. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe/ Kunststoffe, Nr. 696, Dissertation, Universität Hannover, 2004
- [Kai02] Kainer, K.U.; Göken, J.; Letzig, D.: Potentiale des Magnesiumeinsatzes im Automobil. 3. Industriekolloquium „Fertigen in Feinblech“, Leichtbau durch innovativen Werkstoffeinsatz, Clausthal-Zellerfeld, D, S. 59-69, 2002
- [Kam01] Kammer, C.: Magnesium: metal of the future with an excellent potential for lightweight construction. EMC 2001, European Metallurgical Conf., Friedrichshafen, D, Bd. 3, S. 33-47, 2001
- [Ked00] Kedenburg, C.: Untersuchungen zur Einstellung superplastischer Eigenschaften in Magnesiumbasis-Legierungen. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2000

- [Kla02] Klaus, A.: Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit und der Prozesssicherheit des Rundens beim Strangpressen. Reihe: Dortmund-er Umformtechnik, Dissertation, Universität Dortmund, 2002
- [Kum00] Kumar, N.V.R.; Blandin, J.J.; Suery, M.: Effect of thermomechanical treatments on the microstructure of AZ91 alloy. Magnesium Alloys and their Applications, München, D, S.161-167, 2000
- [Lan00] Langdon, T.G.; Furukawa, M.; Nemoto, M.; Horita, Z.: Using Equal-Channel-Angular-Pressing for refining grain size. The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Bd. 52 (4), S. 30-33, 2000
- [Lan02] Lange, K.: Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Umformtechnik. Springer Verlag, Berlin, 2002
- [Lan03] Lanzerath, H.; Wesemann, J.; Gese, H.; Oberhofer, G.; Dell, H.; Hombergsmeier, E.: Crash simulation on body structural components made out of extruded magnesium. Modeling of Materials and Structures for Crash Applications, SAE, Detroit, USA, Bd. 1765, S. 11-17, 2003
- [Lan88a] Lange, K.: Umformtechnik. Bd. 2: Massivumformung, Springer Verlag, Berlin, 1988
- [Lan88b] Langerweger, I.; Maddock, B.: Recent developments in conform and castex continuous extrusion technology. Aluminium Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Bd. 2, S. 533-538, 1988
- [Leh96] Lehnert, W.: Aluminium-Taschenbuch. Bd. 2: Umformen, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling und Ökologie. Aluminiumzentrale Düsseldorf, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1996
- [Lei00] Leitermann, W.; Wätzold, P.; Zengen, K.-H. v.: Der Aluminium-Space-Frame des Audi A2. Motortechnische Zeitschrift, Bd. 61, Heft Special: Der neue Audi A2, S. 68-79, 2000
- [Li03] Li, Q.; Smith, C.J.; Harris, C.; Jolly, M.R.: Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminum extrusion. Part 1: effect of pocket angle and volume on metal flow. Journal of Materials Processing Technology, Bd. 135 (2/3), S.189-196, 2003

- [Lin02] Lin, H.-K.; Huang, J.-C.: High strain rate and/or low temperature superplasticity in AZ31 Mg alloys processed by simple high-ratio extrusion methods. *Materials Transactions*, Bd. 43 (10), S. 2424-2432, 2002
- [Mad87] Maddock, B.; Eng, B.: Aluminium rod and other products by Conform. *Wire Industry, The British Wire Journal*, Bd. 54 (12), S. 728-731, 1987
- [Mai97] Maier, B.: Simulation der Fließvorgänge im Kammerwerkzeug beim Pressen von Aluminium. *Symp. Strangpressen, Garmisch-Partenkirchen*, S. 85-97, 1997
- [Mat03] Matsubara, K.; Miyahara, Y.; Horita, Z.; Langdon, T.G.: Developing superplasticity in a magnesium alloy through a combination of extrusion and ECAP. *Acta Materialia*, Bd. 51 (11), S. 3073-3084, 2003
- [Mer02] Mertz, A.; Baumgart, P.; Cordini, P.; Hombergsmeier, E.; Lanzetrath, H.; Lass, J.-F.: InMaK - magnesium structures in the car body. *Materials Week 2002, Internat. Congress on Adv. Materials, their Processes and Applications, München, D*, 2002
- [Mgt00] *Magnesium Taschenbuch*. Aluminium Verlag, Düsseldorf, 2000
- [Molyd] Molyduval GmbH, Herstellerangaben, Halskestr. 6, D-40880 Gatingen
- [Mue02] Müller, K.B.: Direct and indirect extrusion of AZ31. *Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., Seattle, Washington, USA*, 2002
- [Mue03a] Müller, K.; Ames, A.; Diegritz, O.; Johnen, W.; Kortmann, W.; Rupp, D.; Siegert, K.; Steinmetz, A.: *Grundlagen des Strangpressens*. Kontakt & Studium, expert-Verlag, Renningen, 2003
- [Mue03b] Müller, K.B.: Indirect extrusion of AZ31 and AZ61. *Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., San Diego, California*, S. 247-252, 2003
- [Mue04] Müller, K.: *Fundamentals of extrusion technology*. Giesel Verlag, Hannover-Isernhagen, 2004



- [Mug00] Mughrabi, H.: On the grain-size dependence of metals fatigue: outlook on the fatigue of ultrafine-grained metals. Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation, S. 241-253, 2000
- [Muk01] Mukai, T.; Yamanoi, M.; Watanabe, H.; Higashi, K.: Ductility enhancement in AZ31 magnesium alloy by controlling its grain structure. Scripta Materialia, Bd. 45 (1), S. 89-94, 2001
- [Nak99] Nakanishi, K.; Koba, H.; Kamitani, S.: Metal flow control in hot extrusion of aluminum alloy using the pocket hole dies - Die design aided by physical simulation system. Advanced Technology of Plasticity, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, Nuremberg, D, Bd. III, S. 1833-1838, 1999
- [Ost98] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Springer Verlag, Berlin, 1998
- [Pan00] Pandit, M.; Baquè, S.; Deis, W.; Müller, K.: Implementation of temperature measurement and control in aluminum extruders. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Bd. 1, S. 387-395, 2000
- [Pap96] Papke, M.: Pulver- und Präzisionsschmieden von Superleichtlegierungen auf Magnesium-Lithium-Basis. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik. Bd. 404, Dissertation, Universität Hannover, 1996
- [Pau04} Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen, <http://www.psi.ch>
- [Peh82] Pehlke, R.D.; Jeyarajan, A.; Wada, H.: Summary of thermal properties for casting and mold materials. University of Michigan, Grant. No. DAR78-26171, 1982
- [Pet53] Petch, N.J.; Met, B.: The cleavage strength of polycrystals. Journal of Iron and Steel Institute, Bd. 174, S. 25-28, 1953
- [Poll00] Pollmann, W.: Leichtbauwerkstoffe – Einsatzschwerpunkte im Fahrzeugbau. 7. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Leichtbau durch Umformtechnik, Chemnitz, D, Verlag Wissenschaftliche Skripten, Zwickau, S. 29-42, 2000

- [Pra96] Prats, A.; Misiolek, W.: Profiles of change. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, S. 75-78, 1996
- [Ray59] Raynor, G.V.: The physical metallurgy of magnesium and its alloys. Pergamon Press, 1959
- [Ree57a] Reed-Hill, R.E.; Robertson, W.D.: Deformation of magnesium single crystals by nonbasal slip. Trans. AIME, S. 496-502, 1957
- [Ree57b] Reed-Hill, R.E.; Robertson, W.D.: Additional modes of deformation twinning in magnesium. Acta Metallurgica; Bd. 5, S. 717-727, 1957
- [Ree57c] Reed-Hill, R.E.; Robertson, W.D.: The crystallographic characteristics of fracture in magnesium single crystals. Acta Metallurgica, Bd. 5, S. 728-737; 1957
- [Ree58] Reed-Hill, R.E.; Robertson, W.D.: Pyramidal slip in magnesium. Trans. AIME, S. 256-259, 1958
- [Rod96] Rodriguez, A.; Rodriguez, P.: System to calculate chambers and feeds to obtain an extrusion die designed, manufactured and produced with one single minimum bearing. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Extrusion Technology Seminar, Vol.II, Chicago, USA, S. 155-159, 1996
- [Ros56] Rosenkranz, W.: Das Schmieden und Gesenkpressen von Magnesiumlegierungen vom Mg-Al-Zn-Typ. Metallkunde, Bd. 47 (2), S. 107-117, 1956
- [Sah00] Saha, P.: Aluminum Extrusion Technology. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2000
- [Sav00] Savage, K.; King, J.-F.; Kooij, A.: Hydrostatic extrusion of magnesium. Magnesium Alloys and their Applications, München, D, S. 609-614, 2000
- [Sch04] Schulz, M.: Corrus Aluminium, Bitterfeld, Persönliche Mitteilung. Hannover, 3.5.2004
- [Sch04b] Schwarzer, R.: Texture in hot extruded, hot rolled and laser welded magnesium base alloys. Proc. 2nd Intern. Conf. on Texture and Anisotropy of Polycrystals, Metz, 2004

- [Sch54] Schichtel, G.: Magnesium-Taschenbuch. VEB Verlag Technik, Berlin, 1954
- [Sch94] Scharf, G.: Späte Entdeckung – Aluminium, Magnesium und Titan haben als Leichtmetalle die Werkstoffpalette bereichert. Der Maschinenmarkt, Bd. 100, S. 81-86, 1994
- [Sch99] Schiotz, J.; Vegge, T.; Jacobsen, K.W.: Atomic-scale modeling of the deformation of nanocrystalline metals. Materials Research Society Symposium 1998, Boston, USA, Bd. 538, S. 299-308, 1999
- [Ste00] Steinert, B.: Advanced process temperature monitoring and control system (APTMC System). Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Bd. 1, S. 541-547, 2000
- [Sto01] Stoica, G.M.; Liaw, P.K.: Progress in equal-channel-angular-processing, The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Bd. 35 (3), S. 36-40, 2001
- [Sto03] Stolyarov, V.V.; Lapovok, R.; Brodova, I.G.; Thomson, P.F.: Ultrafine-grained Al-5wt.% Fe alloy processed by ECAP with back-pressure. Materials Science and Engineering, (A375), S. 159-167, 2003
- [Str00] Strehmel, W.; Vanhoutte, J.: High-performance cooling for large aluminum sections - industrial application of a compact combined air-water in-line quench. 7<sup>th</sup> Internat. Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, USA, Bd. 1, S. 409-416, 2000
- [The04] Thedja, W.W.; Müller, K.: Experimentelle Untersuchungen zum indirekten Strangpressen mit aktiver Reibung. Aluminium, Teil I: Bd. 79 (11), S. 972-976; Teil II: Bd. 79 (12), S. 1072-1077; Teil III: Bd. 80 (1/2), S. 36-38, 2003/ 2004
- [Thi00] Thiele E.; Bretschneider J.; Hollang L.; Schnell N.; Holste C.: Influence of thermal treatment on the defect structure in ultrafine-grained nickel. Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation, NATO Advanced Research Workshop, Moskow, Russland, S. 173-178, 2000

- [Tsu00] Tsuji, N.; Saito, Y.; Utsunomiya, H.; Sakai, T.: Ultra-fine grained ferrous and aluminum alloys produced by accumulative roll-bonding. *Ultrafine Grained Materials*, Nashville, Tennessee, USA, S. 215-225, 2000
- [Val00a] Valiev, R.Z.: SPD processing and enhanced properties in metallic materials. *Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation*, NATO Advanced Research Workshop, Moskow, Russland, S. 173-178, 2000
- [Val00b] Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V.: Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Material Science*, Bd. 45, S. 103-189, 2000
- [Val93] Valiev, R.Z.; Korzinkov, A.K.; Mulyukov, R.R.: Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering, Part A*, Bd. 168 (2), S. 141-148, 1993
- [Van92] Van Hue Pham: Heat transfer model for temperature profile of extruded sections at the extrusion press exit. *5<sup>th</sup> International Aluminum Extrusion Technology Seminar*, Chicago, Illinois, Bd. II, S. 341-352, 1992
- [VDI32] Fließkurven metallischer Werkstoffe. VDI 3200, Blatt 1
- [Wal00] Wallentowitz, H.; Biermann, J.W.; Renner, C.; Gossen, F.: Untersuchung des Zusammenhanges zwischen PKW-Gewicht und Kraftstoffverbrauch - Messungen an 11 Fahrzeugen auf dem dynamischen Rollenprüfstand. *Forschung für die Praxis*, Projekt der Studiengesellschaft Stahlanwendung, Bd. P 374, S. 1-38, 2000
- [Was62] Wassermann, G.; Grewen, J.: *Texturen metallischer Werkstoffe*. Springer Verlag, Berlin, 1962
- [Wei91] Weitzel, F.: Aus der Geschichte des Strangpressens. *Aluminium*, Bd. 67 (4), S. 337-340, 1991
- [Wei92] Weitzel, F.: Gestaltung und Konstruktion von Strangpresswerkzeugen. *Aluminium*, Bd. 68, Teil I: (9), S. 776-779; Teil II: (10), S. 867-870; Teil III: (11), S. 959-964; Teil IV: (12), S. 1040-1041, 1992

- 
- [Wib95] Wiberg, N.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 101. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 1995
- [Wil63] Wilson, D.V.; Chapman, J.A.: Effects of preferred orientation on the grain size dependence of yield strength in metals. *J. Inst. Met.*, S. 1543-1551, 1963
- [Zha02] Zhang, J.; Wagner, L.: Influence of prior deformation on microstructure, mechanical properties and rollability of magnesium alloys. *Materials Week 2002, Internat. Congress on Adv. Materials, their Processes and Applications, München, D, 2002*
- [Zhu02] Zhu, Y.T.; Langdon, T.G.; Mishra, R.S.; Semiatin, S.L.; Saran, M.J.; Lowe, T.C.: Ultrafine grained materials. *Magnesium Technology, TMS Annual Meeting, Proc., Seattle, Washington, USA, S. 297-304, 2002*
- [Zoq98] Zoqui, E.J.; Robert, M.H.: Structural modifications in rheocast Al-Cu alloys by heat treatment and implications on mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 78 (1-3), S. 198-203, 1998