

ÖKOLOGISCHER VERFAHRENSVERGLEICH IM MAGNESIUM-RECYCLING MITTELS ENERGIE- UND STOFFSTROMANALYSEN

Diplomarbeit

von

Frowin Weissensteiner

eingereicht am

Institut für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften

der

Montanuniversität Leoben

Leoben, im Jänner 2004

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	4
1.1	Zielsetzung und Problemstellung	5
1.2	Aufbau der Arbeit	5
2	GESCHICHTE UND ANWENDUNGSBEREICHE VON MAGNESIUM	7
2.1	Vorkommen und Gewinnung	7
2.2	Anwendungsbereiche von Magnesium	7
2.2.1	Magnesiumlegierungen	8
2.2.2	Magnesium in der Automobilindustrie	10
3	NICHTMONETÄRE BEWERTUNGSMETHODEN	13
3.1	Stoff- und Energiebilanzierung	15
3.2	Ökobilanz nach DIN 14040	17
3.3	Der Sustainable Process Index (SPI)	18
3.3.1	Berechnung der Teilflächen	20
3.3.2	Die retropagatorische Methode	20
3.4	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	21
3.5	Material-Input pro Service-unit MIPS	23
4	MAGNESIUMRECYCLING – BESCHREIBUNG DER VERFAHREN	26
4.1	Betriebsmittel für das Rückschmelzen	28
4.1.1	Schutz- und Spülgase	28
4.1.2	Abdeck- und Reinigungssalze	30
4.1.3	Schichten	31
4.2	Kontinuierliches Verfahren (salzfreies Rückschmelzen)	33
4.3	Diskontinuierliches Verfahren (Rückschmelzen mit Salz)	34
5	DATENAUFNAHME UND –RECHERCHE	36
5.1	Methodik zur Messung der Stoff- und Energieströme	36

5.1.1	Wägung.....	36
5.1.2	Temperaturmessung.....	37
5.1.3	Elektrische Leistungsmessung.....	38
5.1.4	Messung des Erdgasverbrauchs.....	39
5.1.5	Erfassung des Schutz- und Spülgasverbrauches	40
5.2	Datenqualität.....	40
5.3	Ergebnisse der Messungen und Recherche	42
5.3.1	Kontinuierliches Verfahren	42
5.3.2	Batch-Verfahren	48
6	BEWERTUNG DER RÜCKSCHMELZVERFAHREN	51
6.1	Auswahl der Bewertungsmethoden	51
6.2	Systemgrenzen.....	53
6.3	Software zur Bilanzierung/ Bewertung.....	54
6.4	Bewertung des Rückschmelzens mit dem kumulierten Energieaufwand	56
6.5	Bewertung mit dem SPI	58
6.6	Modellierung und Bewertung des Lebenszyklus eines Mg-Bauteils	63
6.6.1	KEA für den Lebenszyklus eines Querlenkers.....	64
6.6.2	Vergleich des KEA für ein Bauteil aus Magnesium bzw. Stahl	68
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	70
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	72
9	TABELLENVERZEICHNIS.....	74
10	LITERATUR.....	76
11	ANHANG	80
11.1	Berechnung des Wärmeverlustes am Masselgießband:.....	80

1 Einleitung

Leichte Werkstoffe finden in vielen Bereichen ein immer breiteres Anwendungsgebiet. So bietet sich auch Magnesium wegen seiner geringen Dichte und trotzdem hervorragenden Materialeigenschaften zur Gewichtsreduktion von Fahrzeugen und damit einhergehenden Treibstoffeinsparung an.

Obwohl der Rohstoff für die Magnesium-Primärproduktion beinahe unbegrenzt erscheint, macht es doch Sinn Magnesium-Schrott zu recyceln. Und dies nicht nur in wirtschaftlicher, sondern vor allem auch in ökologischer Hinsicht, da der Energieverbrauch für die Herstellung auf ca. 10% reduziert werden kann.

Mit den Verfahren zum Magnesium-Recycling und ihren Auswirkungen auf die Umwelt beschäftigt sich diese Arbeit. Dazu müssen aus einer Reihe von nichtmonetären Bewertungsmethoden geeignete ausgewählt werden, um einerseits die Umweltauswirkungen der Recyclingverfahren zu bewerten, und andererseits den Lebenszyklus eines Magnesium-Bauteils zu analysieren.

Durch das steigende Interesse von Öffentlichkeit, Medien, Politik und Wirtschaft an umweltrelevanten Themen wurde es notwendig, ein Instrumentarium zur qualitativen und quantitativen Bewertung von Produkten und Prozessen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu schaffen. Verschiedene Wissenschaftler und Institute schufen ein breites Spektrum an unterschiedlichen Bewertungsmethoden, die von unterschiedlichen Ansätzen ausgehen, sei es nun, dass das Hauptaugenmerk auf Schadstoffen liegt, die schon in kleinsten Konzentrationen schwerwiegende Schäden hervorrufen können, oder dass die Bewegung großer Massen bei der Rohstoff- und Energiegewinnung im Vordergrund der Betrachtungen liegt. Jedenfalls ist die ökologische Bewertung mittlerweile ein wesentlicher Bestandteil in der strategischen Planung vieler Unternehmen geworden, um zwischen unterschiedlichen Alternativen auswählen zu können oder um Verbesserungspotentiale zu erkennen.

Magnesium, das in dieser Arbeit mit nichtmonetären Bewertungsmethoden näher analysiert werden soll, wird größtenteils in Form von Legierungen verarbeitet, wobei Aluminium den wichtigsten Legierungspartner darstellt. Magnesiumlegierungen zeichnen sich durch hohe Korrosionsbeständigkeit und ihre geringe Dichte aus, weshalb sie vor allem im Fahrzeug- und Flugzeugbau Verwendung finden wo sie zur Reduktion des Gewichts und damit Treibstoffverbrauchs wesentlich beitragen.

1.1 Zielsetzung und Problemstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, für zwei unterschiedliche Magnesiumrecyclingverfahren vollständige Stoff- und Energiebilanzen zu erstellen. Das eine Recyclingverfahren ist ein kontinuierlicher Rückschmelzprozess, der ohne den Einsatz von Salzen (Flux) arbeitet. Die dazugehörige Anlage wird zurzeit im Versuchsbetrieb im Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen erprobt. Das zweite Verfahren wird diskontinuierlich unter dem Einsatz von Abdeck- und Reinigungssalzen bei der Firma Eckart Granules – non ferrum in St. Georgen bei Salzburg betrieben.

Die Bilanzierung soll den Input an Magnesiumschrott, Legierungsmetallen, Betriebs-, Reinigungs- und Wartungsmitteln, sowie den Energiebedarf in Form von Elektrizität und Erdgas umfassen. Weiters soll der Output an Mg-Masse, Krätze, Abfallstoffen, Abgasen samt Spezifikation und die Wärmeabstrahlung quantifiziert werden.

Basierend auf der Bilanzierung wird eine Bewertung der beiden Recyclingprozesse mit unterschiedlichen nichtmonetären Methoden durchgeführt. Dies soll einerseits einen Vergleich der beiden Recyclingverfahren in Hinsicht auf ihre Umweltauswirkungen ermöglichen und als strategische Entscheidungshilfe dienen. Andererseits können hiermit auch die einzelnen Bewertungsmethoden miteinander verglichen und Rückschlüsse über ihre Aussagekraft bzw. Anwendungsmöglichkeiten gezogen werden.

Weiters soll ein Magnesiumbauteil (z.B. Getriebegehäuse) über seinen gesamten Lebensweg betrachtet und ökologisch bewertet werden, um beurteilen zu können, wie sich eine neue Recyclingtechnologie und auch die Leichtmetallbauweise auf die Umwelt (Flächenbedarf, Rohstoffintensität, Energieverbrauch, Treibhauspotential, etc.) auswirken. Die ökologische Bewertung sollte einen Vergleich von Magnesium mit anderen Werkstoffen wie Aluminium, Stahl oder auch Kunststoffen ermöglichen und ökologisch sinnvolle Einsatzmöglichkeiten bzw. Optionen zur Substitution von Werkstoffen aufzeigen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Theorieteil wird zuerst ein Überblick über die Geschichte des Magnesiums in der Technik gegeben und die unterschiedlichen Recyclingverfahren beschrieben, gefolgt von einer Darstellung der nichtmonetären Bewertungsmethoden.

Der praktische Teil befasst sich mit der Messung und Recherche der für die Recyclingverfahren energetisch und stofflich relevanten Daten, die dann in weiterer Folge zur Bewertung herangezogen werden.

Im Schlussteil werden die Recyclingverfahren, aber auch die nichtmonetären Bewertungsmethoden untereinander verglichen und ihre Vor- und Nachteile bzw. ihre Grenzen bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten herausgearbeitet.

2 Geschichte und Anwendungsbereiche von Magnesium

2.1 Vorkommen und Gewinnung

Magnesium ist nach Calcium das zweithäufigste Erdalkalimetall. Es ist allgemein verbreitet. Am Aufbau der Erdkruste ist es zu ca. zwei Gewichtsprozenten beteiligt und ist somit das achthäufigste Element der Erdkruste. Elementar kommt es in der Natur nicht vor, sondern nur in Verbindungen wie Carbonaten, Silicaten und Sulfaten. In Form von Dolomit, einem Calcium- und Magnesiumcarbonat ($\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$), bildet es ganze Gebirgszüge. Wichtige Magnesium-Mineralien sind:

- Magnesiumcarbonate wie Magnesit oder Dolomit
- Silikate wie Olivin, Serpentin, Enstatit, Talk, Meerschaum und Asbest
- Magnesiumsulfate wie Kieserit, Kainit, Schönit und Bittersalz
- Chloride wie Carnallit

Große Mengen von Magnesiumsalzen befinden sich auch in den Weltmeeren, wo es als Chlorid auftritt. In einem Kubikmeter Meereswasser sind im Durchschnitt 1,27 Kilogramm Magnesium gelöst.¹

Die Gewinnung von Magnesium erfolgt entweder durch die silikothermische Reduktion von Magnesium-Mineralien wie z.B. gebranntem Dolomit, oder durch die Schmelzflusselektrolyse von Magnesiumchlorid.

2.2 Anwendungsbereiche von Magnesium

Ungefähr die Hälfte des gewonnenen Magnesiums wird zum Legieren von Aluminium eingesetzt. In etwa ein Viertel wird im Druckguss verwendet, vor allem um Bauteile für Fahrzeuge oder Gehäuse für Elektronikgeräte herzustellen. Knapp ein Fünftel des produzierten Magnesiums geht zum Zweck der Entschwefelung in die Stahlindustrie. (siehe

¹ Uni-Terra, Kindler & Glied, 1999

Tabelle 2-1)

Tabelle 2-1: Verwendung von Magnesium²

Legierungsmetall für Aluminium	50%
Druckguss	24%
Gusseisen- u. Stahllentschwefelung	19%
Korrosionsschutz	3%
Metallthermie	2%
Sonstiges	2%

Magnesium-Legierungen werden heute in nahezu allen Branchen eingesetzt, wo Gewichtersparnis mit hoher Festigkeit kombiniert werden muss, u.a. in der Luft- und Raumfahrt, im Fahrzeugbau, in der Büro- und Datentechnik, bei Haushaltsgeräten, im Maschinenbau und in der Energietechnik.

Ein Anwendungsschwerpunkt ist dabei die Fahrzeugtechnik. Das Einsatzspektrum reicht bereits von Getriebegehäusen, Lenkrädern und Cockpit-Modulen über Rennsport-Räder bis zu neuentwickelten Ölwanne-Konstruktionen und Doppelprofilrahmen für Motorräder.³

2.2.1 Magnesiumlegierungen

Mittels Legieren mit anderen Metallen kann man das Magnesium in seinen Eigenschaften an den spezifischen Verwendungszweck anpassen, da erst durch das Legieren spezielle Eigenschaften, wie erhöhte Festigkeit oder Korrosionsbeständigkeit erreicht werden. Es gibt eine große Anzahl verschiedener Magnesiumlegierungen mit unterschiedlichsten Legierungsmetallen, angefangen bei den am meisten verwendeten, nämlich Aluminium und Zink. Aber es wird auch mit Legierungen mit den seltenen Erden wie Cer, Neodym oder Ytterbium experimentiert, die sich durch besondere Zähigkeit oder auch Hochtemperatur- und Kriechbeständigkeit auszeichnen.

Verstärkt zum Einsatz kommen werden in Zukunft wohl auch Verbundwerkstoffe, die so genannten Metal Matrix Composites (MMC), bei denen durch Inkorporation keramischer

² Ditze, Scharf, Schwerdtfeger, 1998, S. 1

³ AHC-Oberflächentechnik, 2001

Partikel oder Fasern maßgeschneiderte Eigenschaften erreicht werden.⁴ Gerade im Bereich der MMCs betreibt auch das Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen anwendungsorientierte Forschung.

Für diese Arbeit ist in erster Linie die seit Jahrzehnten in Verwendung stehende Magnesium-Legierung AZ91 von Interesse, da diese Legierung für den Rückschmelzbetrieb beim Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen verwendet wurde und als Vergleichsbasis für die beiden Rückschmelzverfahren dient. Aus diesem Grund wird diese Legierung in den folgenden Absätzen näher vorgestellt.

Die Legierung AZ91 (siehe Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3) ist die mit Abstand meistverbreitete Magnesium-Druckgusslegierung. Sie zeichnet sich durch hervorragende Gieß Eigenschaften und sehr hohe Zugfestigkeit aus. Die hohe Zugfestigkeit geht jedoch auf Kosten einer bescheidenen Bruchdehnung. Der Bruch des Materials tritt bereits ab einer Dehnung von 3% ein.

Für Legierungen mit einer höheren Bruchdehnung muss man den Aluminiumgehalt senken, was allerdings eine niedrigere Zugfestigkeit bewirkt. Für Sicherheitsbauteile wie Lenkräder, Armaturenbrett-Träger oder Sitzschalen werden z.B. Magnesium-Legierungen mit einem Aluminiumgehalt von 2 bzw. 5 Prozent verwendet.⁵

Tabelle 2-2: Chemische Zusammensetzung der Magnesiumlegierung AZ91⁶

Kurzzeichen	Bezeichnung	Chem. Zusammensetzung (Massen%)
G-MgAl9Zn1	AZ91	Al 8,0 - 9,5
		Zn 0,3 - 1,0
		Mn 0,1 - 0,3
		Mg Rest

Aufgrund des Bestrebens, eine höhere Korrosionsbeständigkeit zu erreichen, kamen um 1980 die AZ91 hp (high purity) Legierungen auf den Markt, die sich durch niedrige Eisen-, Kupfer- und Nickelgehalte auszeichnen.

⁴ Vgl.: Beffort, Hausmann, 2001

⁵ Vgl.: Beffort, Hausmann, 2001

⁶Vgl.: Büro für angewandte Mineralogie, 2000

Tabelle 2-3: Eigenschaften der Magnesiumlegierung AZ91⁷

Eigenschaften	Magnesium AZ91
E-Modul	45 GPa
Zugfestigkeit	200 - 250 MPa
Bruchdehnung	3 %
Härte	80 HV
Dauerschwingfestigkeit (Lastwechsel)	97 MPa (bei $50 \cdot 10^6$)
Schmelzpunkt	470 - 595 °C
spezifische Wärme	1050 J/(kg·K)
Schmelzenergie	368 J/g
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	$26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

2.2.2 Magnesium in der Automobilindustrie

Bereits in den dreißiger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurden rund 20 Kilogramm Magnesium für den damals entworfenen VW-Käfer, in erster Linie für Motorblock und Getriebegehäuse, verwendet. Auf dem Höhepunkt der Käferproduktion, im Jahre 1971, wurden für den VW-Käfer insgesamt 42 000 Tonnen Magnesium per annum verbaut.

In den folgenden Jahren verlor Magnesium im Automobilbau kontinuierlich an Bedeutung. Dies ist einerseits auf die steigenden Materialkosten und andererseits auf die ungenügende Korrosionsbeständigkeit und die eingeschränkte Tauglichkeit bei höheren Temperaturen (Kriechverhalten) zurückzuführen.

Nachdem man die korrosive Wirkung der Spurenelemente Eisen, Kupfer und Nickel erkannte und deren zulässige Gehaltsgrenzen entsprechend eingeschränkte und Fortschritte in der Produktionstechnik machte, stieg der Magnesiumverbrauch in den 90er Jahren wieder stark an.

Strukturmagnesium wird auch heute in erster Linie in der Automobilindustrie eingesetzt um durch Gewichtsreduktion einen geringeren Treibstoffverbrauch und damit geringere Emissionen und eine höhere Wirtschaftlichkeit für den Betreiber zu erreichen (Stichwort 3 Liter Auto).

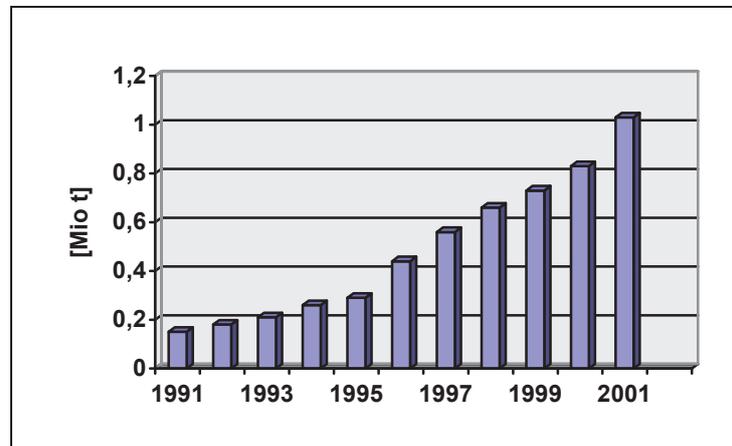


Abbildung 2-1: Entwicklung des Bedarfs an Druckgussteilen aus Magnesium in der Automobilindustrie ⁸

In heutigen Autos werden im Schnitt 3 kg Magnesium verbaut, wobei einzelne Fahrzeuge führender europäischer Hersteller bereits die fünf- bis siebenfache Menge enthalten. Gemäß einer Studie aus den USA wollen einige Automobilhersteller unter der Zielvorgabe, das Gesamtgewicht der Fahrzeuge um zehn Prozent zu senken, in den nächsten Jahren sogar bis zu 100 kg Magnesium in ihren Automobilen einsetzen. Bei einer Zahl von 55 Mio. PKW pro Jahr weltweit lässt sich erahnen, welches Wachstumspotential Magnesium besitzt.⁹

⁷ AHC-Oberflächentechnik, 2001

⁸ Antrekowitsch, 2000, S. 178 ff.

⁹ Beffort, Hausmann, 2001

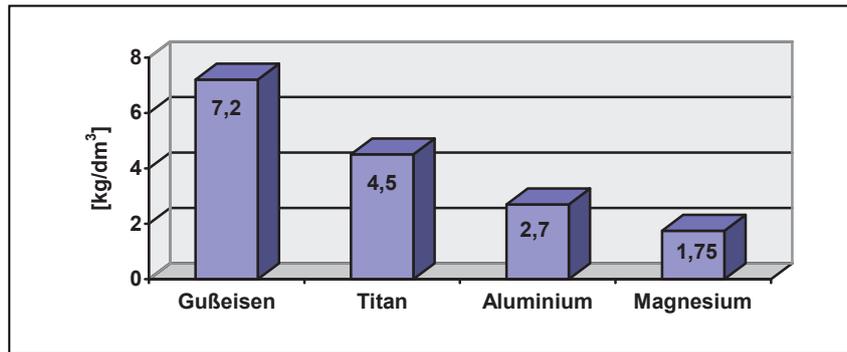


Abbildung 2-2: Dichtevergleich verschiedener Werkstoffe¹⁰

Da Magnesium zur Zeit auf das Gewicht bezogen ca. doppelt so teuer ist als Aluminium (das heißt, dass Magnesium auf das Volumen bezogen um ca. 23% teurer als Al ist), ist ein werkstoffgerechtes Konstruieren der Bauteile vonnöten, um Konkurrenzfähigkeit zu gewährleisten. Als Beispiel dafür seien zwei Meter breite Armaturenbretter angeführt, die einerseits zur Stabilisierung der Karosserie, zur Sicherung der Insassen im Crash-Fall, andererseits zur Aufnahme diverser Instrumente, der Klimaanlage, Airbags und des Handschuhfaches dienen. Frühere Konstruktionen mussten aus 40 bis 60 Stahlblech- und Kunststoffkomponenten zusammengefügt werden. Armaturenbretter aus Magnesium bestehen hingegen aus einem einzigen Teil, sind bis zu 50 % leichter, voll recycelbar und als Gesamtkonzept betrachtet auch billiger.

Gegenwärtig gibt es über 20 verschiedene Komponenten aus Magnesium, die in modernen Automobilen eingesetzt werden. Dazu zählen neben Armaturenbrettern Getriebegehäuse (Audi-A4, VW-Passat), Schaltgehäuse, Ansaugsysteme, Zylinderkopfdeckel (Opel-Corsa-Ecotec-Motor, Sitzrahmen und -schalen, Lenkräder (z.B.: Opel Corsa und Astra), Lenksäulen (Astra) oder Felgen, bis hin zu Cabrio-Dachkonstruktionen.¹¹

¹⁰ Europäische Forschungsgemeinschaft Magnesiumguss e.V., Juni 2000

¹¹ Vgl.: Beffort, Hausmann, 2001

3 Nichtmonetäre Bewertungsmethoden

Zur ökologischen Bewertung von Produkten oder Prozessen existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Ansätzen, die sich noch nicht abschließend in ein in sich konsistentes Methodenschema einteilen lassen. In diesem Kapitel soll ein Überblick und über die gebräuchlichsten Bewertungsmethoden gegeben werden und eine grobe Einteilung derselben erfolgen.

Eine quantitative ökologische Bewertung lässt sich grundsätzlich mit monetären oder nichtmonetären Verfahren durchführen.

Monetäre Bewertungsmethoden beschäftigen sich mit dem Geldwert den unterschiedliche Person zu zahlen bereit sind, um eine Alternative mit einem größeren Nutzen anstatt einer weniger günstigen Alternative zu erhalten (Willingness to Pay), bzw. mit der Entschädigung in Geldeinheiten, die verschiedene Personen fordern, um eine Alternative mit geringerem subjektiven Nutzen zu akzeptieren und auf eine bessere Alternative zu verzichten (Willingness to Accept).

Beispiele monetärer Bewertungsverfahren¹²:

- Substitutionskosten
- Potentieller Preis
- Kompensatorischer Preis
- EPS-Methode

Eine Möglichkeit der Einteilung monetärer Bewertungsmethoden ist die in direkte und indirekte Methoden.

Bei den direkten Methoden wird entweder per Experiment festgestellt, welchen Preis Personen für ein Umweltgut zu zahlen bereit sind (z.B. für den Besuch einer Freizeiteinrichtung wie einen See), oder die Zahlungsbereitschaft wird durch eine

¹² Baumgartner, 2001

Befragung mit Hilfe eines Fragebogens ermittelt. Als Beispiel für eine direkte monetäre Bewertungsmethode sei hier die Contingent Valuation Methode angeführt.

Indirekte Methoden beruhen auf einer Beobachtung des Marktes, wobei tatsächlich durchgeführte Handlungen zu einem Umweltgut in Beziehung gebracht werden. Zum Beispiel drückt sich in einem Grundstückspreis auch der Wert für saubere Luft oder eine schöne Aussicht aus. Beispiele für indirekte monetäre Bewertungsmethoden sind das Hedonic Price Modell und das Travel Cost Modell.¹³

Der Wert der Umwelt oder Ökosphäre lässt sich jedoch nur unzureichend mit Geldeinheiten oder monetären Bewertungsmethoden erfassen, daher wird in den nun folgenden Abschnitten näher auf nicht-monetäre Bewertungsmethoden eingegangen, die versuchen den Verbrauch an Energie, Ressourcen, Fläche, sauberer Luft, Wasser und Boden, etc. abzubilden. Einige der gebräuchlichsten nicht-monetären Bewertungsmethoden sind hier angeführt¹⁴:

- Kritische Volumina
- Umweltbelastungspunkte
- Eco-Indicator 95
- Auswirkungsorientierte Klassifikation CML
- Ökobilanz nach DIN 14040
- Material-Input per Service-unit (MIPS)
- Sustainable Process Index (SPI)
- Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- Graue Energie

¹³ Vgl.: Wichmann, 2002

¹⁴ Baumgartner, 2001

In den nun folgenden Abschnitten werden zuerst die Grundlagen der Stoff und Energiebilanzierung erläutert, da diese die Basis für alle nicht-monetären Bewertungsmethoden darstellt. Dann erfolgt eine Beschreibung der Ökobilanz, die für sich keine eigene Bewertungsmethode darstellt, sondern ein sehr umfassendes Schema zur Durchführung einer Bewertung, angefangen von der Systemabgrenzung über die Sach- zur Wirkungsbilanz, ist.

In den Abschnitten 3.3 bis 3.5 werden jene Methoden detailliert beschrieben, die in die engere Auswahl für die Bewertung der Magnesiumrecyclingprozesse herangezogen wurden (Vgl.: Absatz 6.1 Auswahl der Bewertungsmethoden). Es handelt sich hierbei um den SPI, KEA und MIPS. Die Bewertung mit SPI und KEA konnte dann auch tatsächlich durchgeführt werden, die vorerst geplante Bewertung mit dem MIPS scheiterte an einer unzureichenden Datenlage.

3.1 Stoff- und Energiebilanzierung

Die Stoff- und Energiebilanzierung stellt die Basis für alle nicht-monetären Bewertungsmethoden dar, darum folgen hier einige grundlegende Erklärungen zu diesem Thema.

Eine Stoff- oder Energiebilanzierung bedeutet die Erfassung sämtlicher In- und Outputs, die über die Systemgrenzen gehen. Dazu ist es zuallererst notwendig die Systemgrenzen festzulegen. Sofern die Stoff- und Energiebilanzierung als Grundlage für eine ökologische Bewertung dient, sollten die Systemgrenzen mit der Grenze Technosphäre – Ökosphäre, bzw. Anthroposphäre – Ökosphäre zusammenfallen, soweit dies möglich ist und der Aufwand in einem vertretbaren Verhältnis zum Ergebnis steht.

Alle ökologischen Bewertungsmethoden fußen auf Stoff- und Energiebilanzen, die nach Festlegung der Systemgrenzen über den betrachteten Bilanzraum erstellt werden. Diese Bilanz wird als Sachbilanz bezeichnet.

Die Sachbilanz umfasst die Sammlung der Daten und ist eine Bestandsaufnahme der Input- und Outputströme sowohl in stofflicher als auch in energetischer Hinsicht. Die Daten können durch Messung, Berechnung oder Schätzung gewonnen werden und umfassen auf der Inputseite Energie, Rohstoffe, Betriebsstoffe und andere physikalische Inputs, und auf der Outputseite Produkte, Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie weitere Umweltgesichtspunkte.

Die Daten aus der Sachbilanz werden hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen mit Faktoren bewertet und in die so genannte Wirkungsbilanz überführt. Eine Möglichkeit die Sachbilanzdaten in die Wirkungsbilanz zu überführen wäre, so wie in der derzeitigen Wirtschaft üblich, die Daten mit der Maßzahl „Geld“ zu bewerten, womit eine Vergleichsbasis zwischen Produkten bzw. Dienstleistungen geschaffen wird.

Die Wirkungsbilanz kann in aggregierter oder nicht aggregierter Form durchgeführt werden. Die aggregierte Form bietet den Vorteil einer direkten Vergleichbarkeit von Prozessen oder Dienstleistungen, da hierbei mehrere Auswirkungen des betrachteten Objektes in einer Maßzahl abgebildet werden. Die Wirkungsbilanz kann somit als Entscheidungshilfe zwischen mehreren Varianten dienen. Die Aggregation bedeutet allerdings den Verlust an Einzelinformationen und an Transparenz.

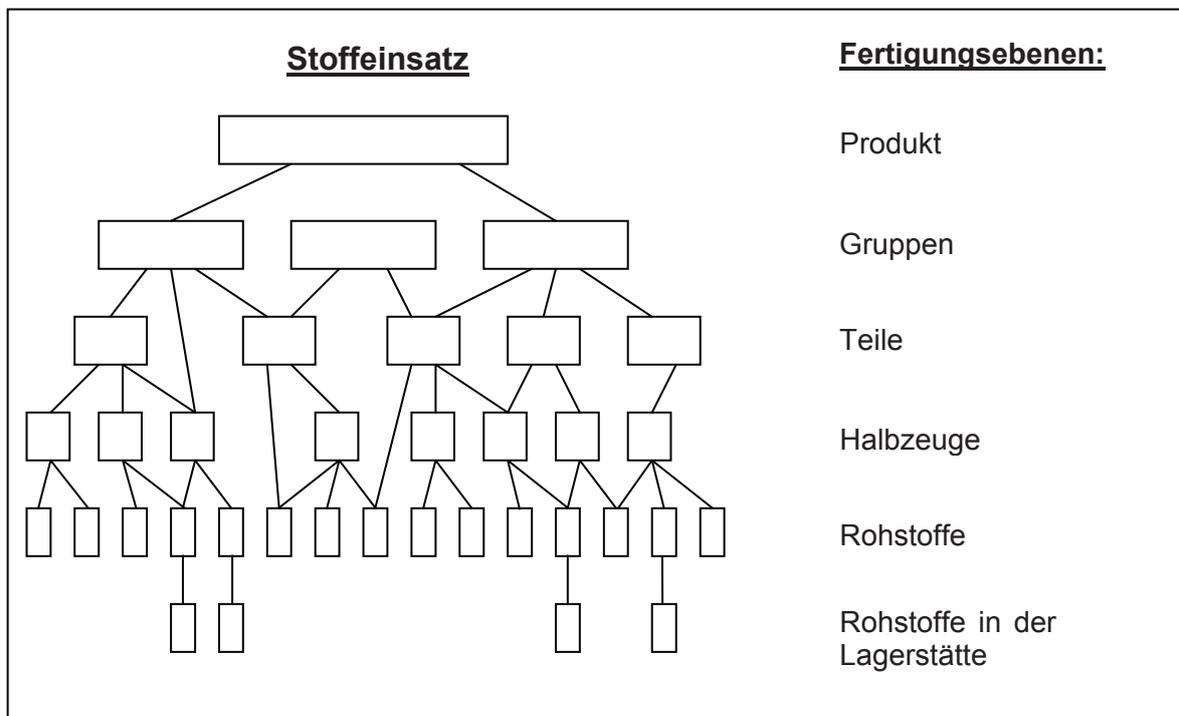


Abbildung 3-1: Schema eines Materialstammbaums für die Herstellung¹⁵

In der Bilanzbewertung wird eine Schwachstellen- und Sensitivitätsanalyse durchgeführt, und eine Reihung bzw. Auswahl von Alternativen getroffen. Des Weiteren können soziale, politische, ethische und ästhetische Randbedingungen einbezogen werden.¹⁶

¹⁵ VDI 4600, 1997, S. 13

¹⁶ Vgl.: Krottschek, 1995, S. 36 ff

3.2 Ökobilanz nach DIN 14040

Die Ökobilanz ist eine vom Europäischen Komitee für Normung vorgeschlagene Methode zur Abschätzung der Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen, die im gesamten Lebensweg (von der Wiege bis zur Bahre) eines Produktes oder einer Dienstleistung auftreten. Eine Ökobilanz wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Zielsetzung, Festlegung der Tiefe und Breite des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz, wobei alle relevanten Input- und Outputflüsse eines Produktsystems erfasst werden
- Beurteilung der potentiellen Umweltwirkungen der In- und Outputs; Umweltwirkungen umfassen die Nutzung von Ressourcen, die menschliche Gesundheit und ökologische Wirkungen
- Auswertung und Wirkungsabschätzung in Hinsicht auf die Zielstellung

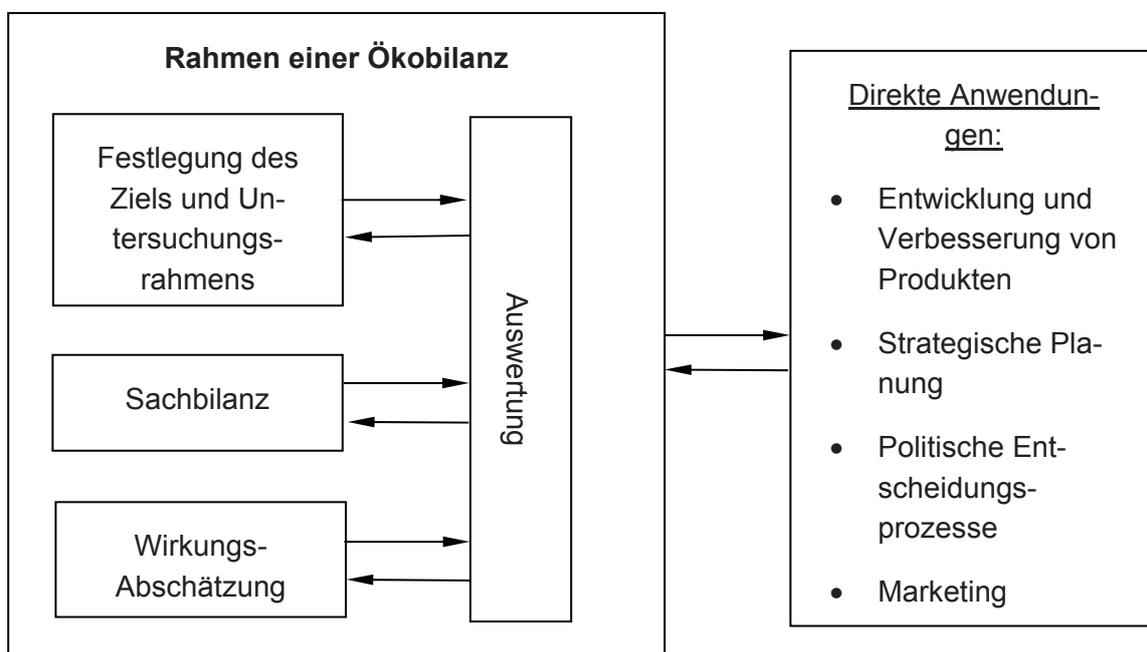


Abbildung 3-2: Bestandteile einer Ökobilanz¹⁷

¹⁷ Europäisches Institut für Normung, EN ISO 14040, S. 7

3.3 Der Sustainable Process Index (SPI)

Der Sustainable Process Index ist eine hochaggregierte Maßzahl, die den Aufwand eines Prozesses in einer nachhaltigen Wirtschaftsweise charakterisiert. Auf der Basis der Sachbilanz von Stoff- und Energieströmen (und eventuell Strukturgütern und Personal), wird die Fläche ermittelt, die vonnöten ist, um den Prozess nachhaltig in die umgebenden Systeme einzubetten. Die Erdoberfläche wird zur Basisdimension der Bewertung gewählt.

Der SPI ist das Verhältnis zweier Flächen: Die eine ist die Fläche, die ein Prozess (eine Dienstleistung) zu seiner Einbettung in die Ökosphäre benötigt, die andere ist jene Fläche, die jedem Menschen auf statistischer Ebene zur Verfügung steht.¹⁸

Der SPI trifft eine Aussage darüber wie nachhaltig ein Prozess ist. Wenn der SPI eines Prozesses einen Wert, der sehr viel kleiner als 1 ist, annimmt so ist der Prozess für eine nachhaltige Wirtschaftsweise geeignet. Ein SPI, der größer als 1 ist, ist für eine nachhaltige Wirtschaftsweise zu ineffizient. Nachhaltigkeit ist definiert als eine Art der menschlichen Bedürfnisbefriedigung, die die Entwicklungschancen zukünftiger Generationen nicht beeinträchtigt. Das heißt, eine nachhaltige Wirtschaftsweise muss die Erhaltung der Lebensqualität und den Zugang zu natürlichen Ressourcen garantieren, ohne langfristige ökologische Schäden zuzulassen.¹⁹

Für den SPI werden zuerst jene Teilflächen ermittelt, die bestimmten Aufwendungen für Rohstoffe, Energien, Infrastruktur, Personal und Produkte benötigen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Abkürzungen der Teilflächen²⁰

Erneuerbare Rohstofffläche	A_{RR}	Fläche für die Prozessinstallation	A_{II}
Nicht-erneuerbare Rohstofffläche	A_{RN}	Standfläche der Prozessinstallation	A_{ID}
Energiebereitstellungsfläche	A_E	Produkt dissipationsfläche	A_P
Fläche für das Personal	A_S	Gesamtprozessfläche	A_{tot}

¹⁸ Krotscheck, 1995, S 63 ff

¹⁹ Krotscheck, 1995, S 18

²⁰ Krotscheck, 1995, S. 90

Dabei gilt für die Rohstoffversorgungsfläche A_R :

$$A_R = A_{RR} + A_{RN} \quad [m^2]$$

und die Fläche für Prozessinstallationen A_I :

$$A_I = A_{II} + A_{ID} \quad [m^2]$$

Die Gesamtprozessfläche A_{tot} ist die Summe aller Teilflächen für Rohstoffe, Energie, Installationen, Personal und Produkte:

$$A_{tot} = A_R + A_E + A_I + A_S + A_P \quad [m^2]$$

Alle diese Teilflächen werden für eine bestimmte Referenzperiode berechnet, die üblicherweise ein Jahr ist. In dieser Periode wird vom Prozess eine bestimmte Anzahl von Dienstleistungen (Produkten) zur Verfügung gestellt. Diese Zahl wird als S_{tot} (service) bezeichnet und hat die Einheit [unit]. Das Verhältnis der Gesamtprozessfläche zur Anzahl der Dienstleistungen (Produkte) ergibt die spezifische Fläche a_{tot} :

$$a_{tot} = \frac{A_{tot}}{S_{tot}} \quad [m^2 \cdot a / unit]$$

Die spezifische Fläche a_{tot} ist per Definitionem der inverse Ertrag y_{tot} der Dienstleistung und gleichzusetzen mit dem ökologischen Fußabdruck (ÖFA) und stellt bereits eine aussagekräftige Vergleichsbasis für Dienstleistungssysteme dar.

Setzt man die spezifische Fläche a_{tot} (den ÖFA) in Beziehung zu der Fläche, die einem Einwohner pro Jahr zur Verfügung steht, so erhält man den SPI:

$$SPI = \frac{a_{tot}}{a_{in}} \quad [cap/unit]$$

a_{in} mit der Einheit $[m^2 \cdot a / cap]$ stellt die Fläche dar, die einem Einwohner pro Jahr zur Verfügung steht. Durch diese Fläche fließen regionale Gegebenheiten in den SPI ein. a_{in} kann in erster Näherung als jene Fläche angenommen werden, welche bei der Division der Fläche einer Region durch die Anzahl der Einwohner erhalten wird. Für die gesamte Welt ist diese Fläche ungefähr 24000, für Europa 19000 und für Österreich 11000 $[m^2 \cdot a / cap]$.²¹

²¹ Krotscheck, 1995, S. 90

3.3.1 Berechnung der Teilflächen²²

Jede Teilfläche A_n (siehe Tabelle 3-1) kann aus verschiedenen Aufwendungen bestehen, wobei die Erträge der m -ten Aufwendung auch von den standörtlichen Bedingungen abhängen, weshalb auch der Index l für die l -te Örtlichkeit (location) mitgeführt wird.

Die Teilflächen lassen sich allgemein nach folgender Formel berechnen:

$$A_{n,m,l} = \frac{F_{n,m,l}}{y_{n,m,l}} \quad [\text{m}^2]$$

A	... Fläche	$[\text{m}^2]$
F	... Einsatz (Input, Feed) oder Produkt (Output)	$[\#/a]$
y	... Ertrag (yield)	$[\#/m^2a]$

Beispielsweise beinhaltet die Energiebereitstellungsfläche A_E die Aufwendung für Erdgas $A_{E,\text{Erdgas}}$. Beim diskontinuierlichen Rückschmelzverfahren ergibt sich für einen Input von $F_{E,\text{Erdgas}}=1.676.345$ [kWh/a] und einem Ertrag $y_{E,\text{Erdgas}}=0,0245$ [kWh/m²a]²³ eine Teilfläche von $A_{E,\text{Erdgas}}=68.394.876$ [m²].

Bei einer Produktion von $S_{\text{tot}}=581.814$ [kg/a] (jährlicher Output an Mg-Masse) erhält man eine spezifische Fläche (ÖFA) von $a_{E,\text{Erdgas}}=117,56$ [m²a/kg] für den Erdgasverbrauch (Vgl.: Tabelle 6-4).

3.3.2 Die retropagatorische Methode

Wenn keinerlei andere Daten zur Berechnung des Flächengebrauchs von nicht-erneuerbaren Ressourcen oder Installationen zugänglich sind, so gibt es die Möglichkeit, mittels der retropagatorischen Methode aus dem Nettopreis der Ressource oder Installation, ohne Mehrwertssteuer und Gewinnspannen, den Flächengebrauch zu ermitteln.

Dazu wird dieser Preis $C_{N,l}$ [€/#] (Energiekosten für nicht-erneuerbare Rohstoffe oder Installationen) mit dem dimensionslosen Faktor P_{TC} [€/€] multipliziert, der den Energiekostenanteil am Gesamtproduktpreis darstellt. Danach werden die Energiekosten

²² Vgl.: Krottschek, 1995, S. 92 ff

²³ Vgl.: Koschuh, 2000

des Produktes zum Energiepreis C_E [€/kWh] relativiert, um den Energieeinsatz während der Produktion E_D zu erhalten.²⁴

$$E_D = \frac{C_{N,I} \times P_{TC}}{C_E} \quad [\text{kWh/\#}]$$

Danach wird der Energieeinsatz E_D zum industriellen Energieertrag y_{EI} [kWh/m²a] relativiert. Der industrielle Energieertrag ist jene Energiemenge, welche in angenommenen oder vorhandenen Energiewandelsystemen durchschnittlich in einem Jahr von einem Quadratmeter gewonnen werden kann.²⁵

$$a_{RN,II} = \frac{E_D}{y_{EI}} \quad [\text{m}^2\text{a/\#}]$$

Daraus ergibt sich die spezifische Fläche $a_{RN,II}$ pro Stück Infrastruktur oder nichterneuerbarer Ressource.²⁶

Die retropropagatorische Methode ist in ihrer Genauigkeit beschränkt und dient in erster Linie zur Abschätzung von Teilflächen, für die keine anderwärtigen Daten zur Verfügung stehen.

3.4 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Die Methodik des KEA ist detailliert in der VDI-Richtlinie 4600 beschrieben. In weiterer Folge werden in diesem Abschnitt die wesentlichen Definitionen und Vorgehensweisen dargestellt.

Der KEA stellt den primärenergetisch bewerteten Aufwand dar, der für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung anfällt. Er setzt sich zusammen aus dem Energieaufwand für die Herstellung (KEA_H), die Nutzung (KEA_N) und die Entsorgung (KEA_E) des ökonomischen Gutes.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

²⁴ Vgl.: Krotscheck, 1995, S. 78 ff

²⁵ Krotscheck, 1995, S. 74 f

²⁶ Vgl.: Krotscheck, 1995, S. 78 ff

Primärenergetisch bewertet bedeutet, dass der Wirkungsgrad von der Gewinnung der Rohenergieträger bis zur Bereitstellung der Endenergie, die der Verbraucher bezieht, berücksichtigt wird. Dies wird mit den so genannten Bereitstellungsnutzungsgraden verwirklicht. Zur Quantifizierung der Bereitstellungsnutzungsgrade sind die Aufwendungen für die Endenergiebereitstellung aus allen Stufen der Prozesskette von der Exploration über die Förderung, die Aufbereitung und Umwandlung und den Transport bis zum Verbraucher zu bilanzieren.

Prinzipiell wird zwischen Bereitstellungsnutzungsgraden für alle Stoffe die einen Heizwert haben und Bereitstellungsnutzungsgraden für elektrische Energie unterschieden.

Der Bereitstellungsnutzungsgrad für Brennstoffe, nichtenergetisch genutzte Energieträger und andere Stoffe, die einen Heizwert haben, ist definiert als das Verhältnis des Heizwertes des Stoffes am Einsatzort zum kumulierten Energieaufwand für die Bereitstellung, der auf die funktionale Einheit des Energieträgers bezogen ist.

$$g_{Br} = \frac{H_U}{KEA_{Be}}$$

g_{Br} ... Bereitstellungsnutzungsgrad für Brennstoffe

H_U ... Unterer Heizwert des Brennstoffs

KEA_{Be} ... Kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung

Unter der funktionalen Einheit wird das jeweils betrachtete Produkt, dessen Masse, Volumen, Energie oder die Dienstleistung verstanden.

Der Bereitstellungsnutzungsgrad für elektrische Energie setzt sich zusammen aus den Bereitstellungsnutzungsgraden der Stromerzeugung aus Wasser- und Windkraft, Solarenergie, Kernenergie und Brennstoffen, die jeweils anteilmäßig berücksichtigt werden.²⁷

$$g_{el} = \frac{W_{el}}{KEA_{Be}}$$

g_{el} ... Bereitstellungsnutzungsgrad für elektrische Energie

W_{el} ... Elektrisches Arbeitsvermögen

KEA_{Be} ... Kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung

Der Kumulierte Energieaufwand ermöglicht die energetische Beurteilung und den Vergleich von Produkten und Dienstleistungen. Der KEA ist geeignet Energieeinsparpotentiale aufzuzeigen und komplexe Zusammenhänge des Energieverbrauchs in den einzelnen Phasen eines Produktlebenszyklus (Erzeugung, Nutzung, Entsorgung) darzustellen.

Bei der Ermittlung des KEA erhält man Hinweise auf Materialaufwendungen und Emissionen, die mit der Energiebereitstellung verbunden sind. Des Weiteren werden Rückschlüsse auf die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Werkstoffwahl, Prozesstechnik, Stoffrückführungen, thermischen Verwertung von Abfallstoffen oder der Dauer der Nutzungsphase ermöglicht.²⁸

3.5 Material-Input pro Service-unit MIPS

Die Zielvorgabe bei der Entwicklung des MIPS als neues ökologisches Bewertungsinstrument, war ein möglichst einfaches, verständliches Maß zu finden, das wissenschaftlich vertretbar ist und internationale Akzeptanz findet.

Der MIPS ist ein Maß für die Rohstoffintensität einer Dienstleistung. Es wird der gesamte Materialverbrauch innerhalb des Produktlebens von der Wiege bis zur Wiege addiert und

²⁷ VDI-Richtlinie 4600, 1997, S. 4 ff

²⁸ VDI-Richtlinie 4600, 1997, S2

auf eine Dienstleistungseinheit bezogen. Es werden auch die Materialbewegungen für den Energiebedarf während des gesamten Lebenszyklus berücksichtigt.

MIPS ist für dienstleistungsfähige Endprodukte definiert und nicht für Halbzeuge bzw. Zwischenprodukte, die in der Endfertigung eines Produktes verwendet werden.

Der Lebensweg des dienstleistungsfähigen Endproduktes wird unterteilt in die Abschnitte Herstellung, Gebrauchen (Betreiben, Warten, Reinigen), Wieder- und Weiterverwenden, Sammeln/Sortieren und Entsorgen, wobei zwischen den einzelnen Abschnitten noch die Transportwege zu berücksichtigen sind.

In Abbildung 3-3 ist der Verlauf der MIPS für ein typisches Produkt dargestellt. Im linken Bereich des Diagramms werden die Materialinputs für die Herstellung festgestellt. In der Gebrauchsphase werden die Material Inputs (MI) für die Herstellung auf die Dienstleistungseinheiten bezogen, das heißt, je öfter ein Produkt verwendet wird, desto kleiner wird der MIPS. In der Gebrauchsphase werden auch die Material-Inputs für Betriebsmittel und Energie berücksichtigt. Mit dem Alter eines Produktes steigt häufig der Bedarf an Betriebsmitteln. Aus diesem Diagramm lässt sich herauslesen, ob die Material-Inputs für eine Reparatur oder ein Recycling die MI für die Herstellung übersteigen, also ob eine Reparatur oder Recycling ökologisch sinnvoll ist.

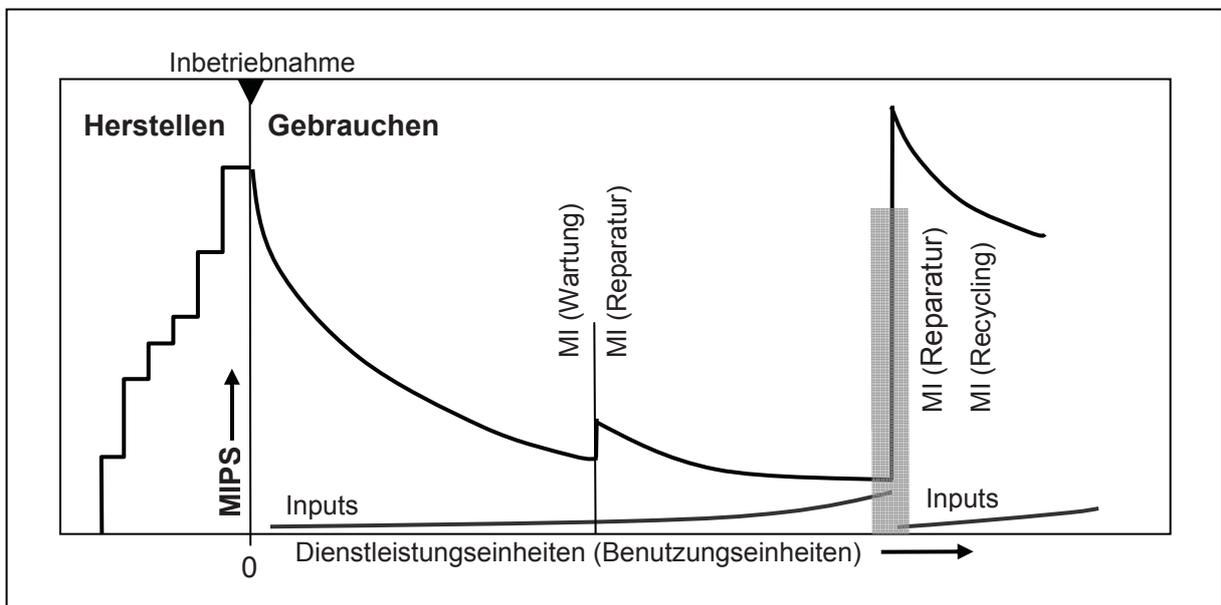


Abbildung 3-3: Zeitlicher Verlauf der MIPS über den Lebensweg²⁹

²⁹ Schmidt-Bleek, 1994, S 112

Die Materialintensitäten MI_i geben an, wie viel Masse in [kg] bewegt werden muss, um 1 [kg] eines benötigten Rohstoffs zu erhalten. Die Materialintensitäten, die für die Bereitstellung eines Produkts benötigt werden, werden summiert und auf die Serviceeinheit, also die Dienstleistung die durch das Produkt erbracht wird, bezogen:

$$MI = \sum P_i * MI_i$$

MI ... Materialintensität

P_i ... Masse Stoff i

$$S = n * p$$

S ... Serviceeinheit

n ... Nutzungsanzahl

$$MIPS = \frac{MI}{S}$$

p ... Anzahl der Personen, die das Produkt gleichzeitig nutzen

MIPS ... Material Input per Service

4 Magnesiumrecycling – Beschreibung der Verfahren

Obwohl die Rohstoffquellen für Magnesium (Meerwasser, Dolomit, etc.) nicht verknappen werden, erscheint das Recycling von Magnesium vor allem wegen des reduzierten Energieverbrauches (ca. 10% der Primärproduktion) sinnvoll. Recycling bedeutet immer eine Verringerung des benötigten Deponievolumens und der damit verbundenen Kosten. Des Weiteren sprechen verkürzte Transportwege, Treibstoffeinsparungen und ein geringerer logistischer Aufwand vor allem für das In-house-Recycling.

Trotzdem ist das Recycling von Magnesium im Vergleich zu anderen Metallen wie z.B. Aluminium noch nicht sehr verbreitet. Dies hat mehrere Gründe:

- Die hohe Reaktivität von Magnesium in Gegenwart von Sauerstoff und Stickstoff bedingt einen höheren technologischen Aufwand
- Verunreinigungen im Altschrott, wie z.B. Kupfer und Nickel, verringern drastisch die Korrosionsbeständigkeit des Magnesiums.
- Magnesium, das als Entschwefelungsmittel für Eisen und Stahl, in der Produktion von Gusseisen, für metallothermische Reduktion oder als Opferanode eingesetzt wird, ist der direkten Wiedergewinnung nicht mehr zugänglich.
- Magnesium, das mit Aluminium legiert wird, wird größtenteils mit diesem recycelt.³⁰

Zurzeit geht ein Großteil des Magnesiumschrottes in die Aluminium-, Gusseisen- und Stahlindustrie. Nach einer Aufbereitung (Handsortieren, automatisches Sortieren nach einer Zerkleinerung, Eisenentfernung durch Magnetscheidung und Flotation) werden die Magnesiumteile zu Pulver vermahlen. Für Salz, Schlacken und Dross kann durch Mahlen und Sieben direkt eine Magnesiumfraktion erhalten werden, die ohne Schmelzen zum Verkauf gelangt. Auch Klasse 1 Schrott (siehe Tabelle 4-1: Schrottklassen für Magnesium) kann direkt als Legierungsmaterial ins Aluminium gehen oder zur Stahlentschwefelung verwendet werden.

³⁰ Kammer, 2000, S. 49

Die unterschiedlichen Klassen von Sekundärmagnesium können wie in Tabelle 4-1 eingeteilt werden.

Tabelle 4-1: Schrottklassen für Magnesium³¹

Neuschrott	Klasse 1	Angüsse, Überläufe, Pressreste, Guss-Ausschüsse	trocken, sauber, kompakt, kleinstückig, unbeschichtet
	Klasse 2	Ausschussteile	grundiert, organische Anhaftungen, teilweise Stahl- / Al-Eingüsse, ohne Cu- und Ni-Verunreinigungen
Neu-/ Altschrott	Klasse 3	kompakter Schrott	ölig, nass, verunreinigt mit Sand, Cu, Ni, Ferrosilicium
Schrotte großer Oberfläche	Klasse 4	Späne	sauber, trocken ölig, nass
	Klasse 5	Dross (Abzug von der Schmelzeoberfläche)	
	Klasse 6	Tiegelschlamm	
	Klasse 7	flussmittelhaltiger Schrott verbraucht Schmelzsalz	
	Klasse 8	nichtmetallischer Rückstand	
	Klasse 9	Intermetallisches	

Für das Recycling zu Strukturmagnesium wird vor allem Klasse 1 Schrott verwendet. Strukturmagnesium stellt ein hochwertiges Material dar, aus dem Bauteile erzeugt werden können, die spezielle Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften, wie hohe Reinheit, stellen. Der Hauptanreiz für das Magnesiumrecycling ist die Energieeinsparung. Statt mindestens 35 kWh/kg bei der Primärmagnesiumproduktion sind beim Umschmelzen von Neuschrott unter 3kWh/kg erforderlich. Außerdem fallen größere Transportwege weg, weil der Neuschrott direkt beim Druckgießer recycelt werden kann.

³¹ Vgl.: Kammer, 2000, S. 51; Ditze, Scharf, Schwerdtfeger, 1998, S. 3; Rauch Schmelztechnik, 2002

Durch einen starken Anstieg des Bedarfes an Strukturmagnesium kann es in Zukunft ökonomisch und ökologisch sinnvoll werden, auch Klasse 2 Schrott und höher zu Strukturmagnesium umzuschmelzen. Nur ca. ein Drittel des Altschrotts wird den Anforderungen für Strukturmagnesium genügen. Das Recycling von Klasse 2 Schrott und höher zu Strukturmagnesium verlangt eine sortenreine Erfassung. Erforderlich ist hierzu ein demontagefreundliches Konstruieren, möglichst ein Verzicht auf Beschichtungen, ein einheitliches Kennzeichnungssystem der Werkstücke und die Anwendung automatischer Analysemethoden und damit verbundene Sortiertechniken.³²

In dieser Arbeit werden zwei Rückschmelzverfahren zum Magnesiumrecycling behandelt:

Beim einen Verfahren handelt es sich um eine diskontinuierlich betriebene Anlage (Batch-Verfahren) bei der Abdeck- und Reinigungssalzen verwendet werden. Durch den starken Oxidationsschutz und Reinigungseffekt der Salze ist auch ein Rückschmelzen von minderwertigern Schrottklassen möglich.

Das zweite Verfahren wird kontinuierlich und ohne Salze betrieben. Der Schutz der Schmelze vor Oxidation wird hier von Schutzgasen übernommen. Das kontinuierliche Rückschmelzen ist vor allem für das In-house-Recycling von Schrott der Klasse 1 entwickelt worden.

4.1 Betriebsmittel für das Rückschmelzen

4.1.1 Schutz- und Spülgase

Damit flüssiges Magnesium bei erhöhten Temperaturen nicht zu brennen beginnt, wird die Schmelze mit einer Schutzgasatmosphäre beaufschlagt. Dazu finden vor allem folgende Gase Verwendung:

- N₂
- SO₂
- SF₆
- HFC-134a

³² Vgl.: Kammer, 2000, S. 49 ff

Im Konti-Rückschmelzversuch in Ranshofen wird eine N₂-Schutzgasatmosphäre mit HFC-134a verwendet. Zusätzlich wird noch Stickstoff durch einen Impeller in die Schmelze eingeblasen, was einen Reinigungseffekt bewirkt.

Die Magnesiumschmelze im Warmhalteofen beim Batch-Betrieb bei non ferrum wird mit SO₂ geschützt.

HFC-134a ist ein Gas mit einem relativ hohen Treibhauspotential, das in einer ökologische Bewertung berücksichtigt werden soll.

1,1,1,2- Tetrafluoroethan (HFC-134a) wurde das erste Mal 1959 von Dow Chemical Co hergestellt und dokumentiert. Die Einsatzmöglichkeiten als Schutzgas für Magnesiumschmelzen wurden in den vergangenen Jahren von CSIRO Australia in Zusammenarbeit mit der University of Queensland erforscht.

HFC-134a ist ein im Montreal Protokoll empfohlenes Substitut für FCKWs (CFC's), da es das stratosphärische Ozon nicht abbaut. Das Treibhauspotential (GWP, global warming potential) von HFC ist mit 1.300 signifikant niedriger als das von SF₆ (GWP = 23.900). Das GWP gibt an, das wie viel fache Treibhauspotential ein Gas im Verhältnis zu Kohlendioxid hat.³³

Tabelle 4-2: Physikalische Eigenschaften und ökotoxikologische Auswirkungen von HFC-134a³⁴

	Chemische Formel	CAS Registrier Nr.	Farbe und Geruch	Anwendungsbereiche
Allgemeine Information	CH ₂ FCF ₃	811-97-2	Farbloses Flüssiggas mit einem Ether-ähnlichen Geruch	Ersatzstoff für R-12 als Kühl- bzw. Kältemittel in Klimaanlage
Toxizität und Treibhauspotential	TLV-TWA	Durchschnittliche Lebensdauer in der Atmosphäre in Jahren	Ozon Abbau Potential	Treibhaus Potential
	1,000	13.6	0.000	1300

³³ Department of Science and Technology of India, 2001

³⁴ Vgl.: Refrigerant Supply Inc., 1999

Bei einem niedrigen Preis (ca. 1/3 von SF₆) bietet das HFC-Gas einen hervorragenden Schutz der Magnesiumschmelze. Es hat, im Gegensatz zu SF₆, die Fähigkeit ein einmal begonnenes Magnesiumfeuer zu löschen. Der Nachteil von HFC-134a liegt in der Umwandlung zu Flusssäure (HF) und anderen Fluorverbindungen bei erhöhten Temperaturen, wie sie an der Schmelzenoberfläche vorliegen. HF kann ein Sicherheitsrisiko für das Personal darstellen und beschleunigt außerdem die Korrosion der Anlage.³⁵

4.1.2 Abdeck- und Reinigungssalze

Zum Schutz der Magnesiumschmelze vor Oxidation und um Abbrandverluste zu unterbinden werden beim diskontinuierlichen Verfahren Schmelzsätze aufgebracht. Der kontinuierliche Prozess wird aufgrund der höherwertigen Schrottklassen und der speziellen Schutzgasatmosphäre ohne Salz betrieben.

Die Schmelzsätze sind in ihrer Zusammensetzung zum Teil den in der Schmelzflusselektrolyse verwendeten Elektrolyten ähnlich (Tabelle 4-3). Sie sind meist schwerer als Magnesium, bilden jedoch wegen der Oberflächenspannung eine Schutzschicht auf der Schmelze und sinken erst nach unten, wenn diese Schicht zerrissen ist. Für Flussmittel wird ein Dichteunterschied von 0,15 – 0,20g/cm³ angestrebt.

Eindickmittel (Raffinationssätze) enthalten MgO, CaF₂ und MgF₂. Sie sollen Partikel abbinden und diese durch Absetzen auf den Tiegelboden entfernen. Für Raffinationssätze gilt ein gewünschter Dichteunterschied von 0,5 – 0,8 g/cm³. Die Schmelztemperatur liegt unter der der Metallschmelze.³⁶

Abdecksätze werden im Magnesium-Schmelzofen (MSO) auf die Schmelze gestreut damit keine Luft mit der Schmelzenoberfläche in Kontakt kommt und so ein Brennen bzw. eine Oxidation des Magnesiums unterbunden wird. Für den diskontinuierlichen Rückschmelzprozess bei der untersuchten Anlage wird hierzu das Salz Flux 0, hergestellt von der Firma Reinkalk (ehemals Harzer Dolomitwerke) verwendet.

Als Reinigungssatz wird Flux 18 eingesetzt. Von beiden Sätzen wird in etwa die gleiche Menge verbraucht.

³⁵ US Environmental Protection Agency, 2001; CSIRO Australia, 2000

³⁶ Kammer, 2000, S. 59

Tabelle 4-3: Übliche Schmelz und Raffinerieszalze³⁷

	%Ca Cl ₂	%NaCl	%KCl	%Mg Cl ₂	%CaF ₂	%MgO	%Ba Cl ₂
Schmelzen	40	30	20	10			
Schmelzen und Raffinieren	20	10	10	35	15	10	
Schmelzen und Raffinieren	55	30	5	3,5	3,5		
Schmelzen und Raffinieren		10-15	50	25		5	5-10
Raffinieren	15	10	10	35	20	10	
Natriumfrei			50	45		5	
Natriumfrei			40	30	20	10	
Natriumfrei			40	60			

4.1.3 Schlichten

Schlichten sind Hochtemperaturbeschichtungsstoffe, die beim Vergießen von Nichteisenmetallen zur Verwendung kommen und ein Anhaften des Metalls an der Gussform verhindern sollen.

Schlichten zeichnen sich durch eine sehr schlechte Benetzung durch Metallschmelzen, durch gute Hochtemperatur-Gleiteigenschaften und eine hohe thermische Stabilität aus.

Bei den untersuchten Magnesium-Rückschmelzanlagen der Fa. Rauch Fertigungstechnik wird zuerst eine Schicht der „ALU-STOP LC25 Bornitrid-Schlichte“³⁸, hergestellt von der Fa. „Büro für angewandte Mineralogie Dr. Stephan Rudolph“, auf die Masselformen aufgesprüht. Darüber wird noch eine Schicht Terracote EP 7667, hergestellt von der Firma

³⁷ Kammer, 2000, S. 59

³⁸ Vgl.: Büro für Angewandte Mineralogie, 2000

Foseco aufgetragen. Durch die Verwendung dieser Schichten wird die Bildung von Oxiden auf den Masseln unterdrückt und die Qualität der Gussoberfläche verbessert.

Von beiden Schichten wird in etwa die gleiche Menge benötigt. Im Schnitt wird für jedes produzierte Kilogramm Magnesium 0,4 Gramm an Schichten verbraucht. Dieser Wert gilt sowohl für das diskontinuierliche als auch das kontinuierliche Verfahren.

Die Schichte wird auf die vorgewärmten (100°C) und gereinigten Masselformen durch Streichen oder Sprühen aufgetragen, worauf die Formen sorgfältig getrocknet werden. Danach kann eine weitere Schicht aufgetragen werden.

Tabelle 4-4: Technische Daten der Alu-Stop LC25 Bornitrid-Schichte³⁹

Farbe	weiß
Feststoff	Bornitrid
Binder	Aluminiumoxid
Feststoffgehalt (Bornitrid)	25%
Dichte (g/cm ³)	1,20
pH-Wert	2,5-3,5
Max. Anwendungstemperatur	1000°C (an Luft)
	1800°C (unter Inertgas)

Die Alu-Stop LC Bornitrid-Schichte besteht aus Bornitrid, Aluminiumoxid, Wasser und Salpetersäure (BTA-Nr.0276).

Laut EG-Sicherheitsdatenblatt liegen durch diese Schichte keine besonderen Gefahren für Mensch und Umwelt vor. Die Schichte kann, unter Beachtung der örtlichen behördlichen Vorschriften, nach physikalisch-chemischer Vorbehandlung zusammen mit Hausmüll abgelagert werden.⁴⁰

³⁹ Büro für Angewandte Mineralogie, 2000

⁴⁰ Büro für Angewandte Mineralogie, 2000

4.2 Kontinuierliches Verfahren (salzfreies Rückschmelzen)

Das salzfreie Recyclingverfahren wird für Schrott der Klasse 1 verwendet. Die Reinigung der Schmelze erfolgt durch Spülgase, Oxidation an der Schmelzenoberfläche wird durch eine Schutzgasatmosphäre unterbunden.

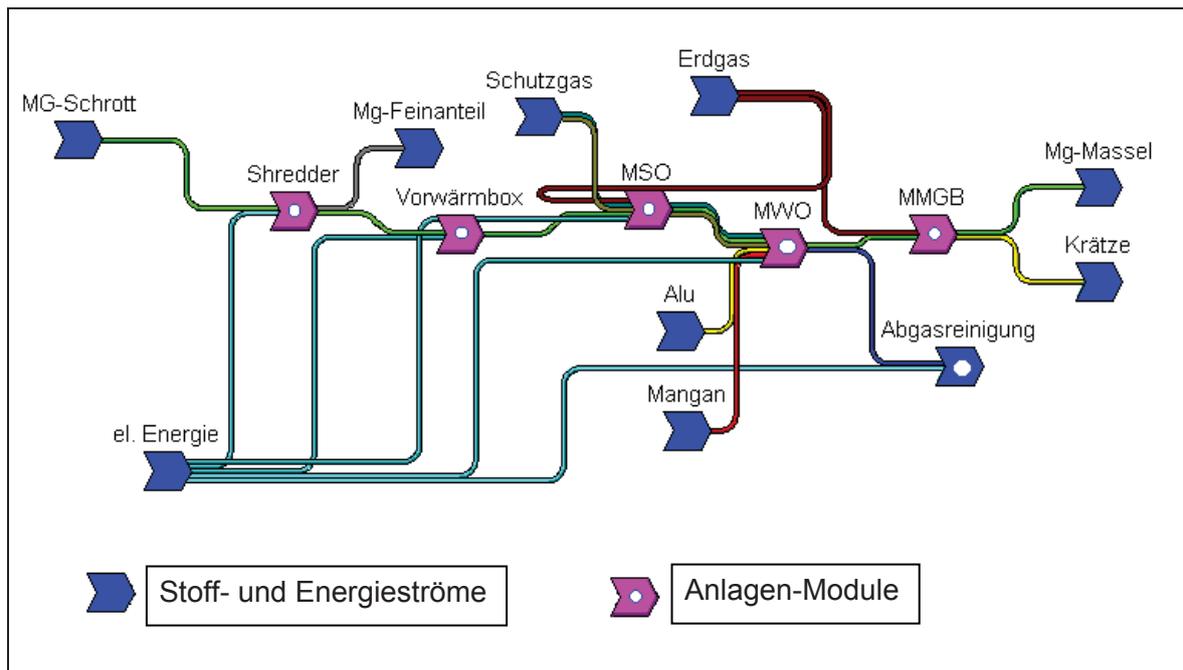


Abbildung 4-1: Blockschaftbild des kontinuierlichen Rückschmelzverfahrens

Im Shredder wird der Schrott zerkleinert und in drei Fraktionen aufgeteilt, wobei der Feinanteil (ca. 4 - 5%) abgetrennt wird, da er einen zu hohen Oxidgehalt hat. In der Vorwärmbox werden die beiden größeren Schrottfractionen bei ca. 150°C getrocknet, um eine spätere Reaktion zwischen Magnesium und Wasser zu verhindern.

Anschließend wird der Schrott über eine Schleuse, die ein Entweichen der Schutzgasatmosphäre unterbinden soll, in den Magnesiumschmelzofen (MSO) chargiert. Im MSO wird der Schrott mit Hilfe von Erdgasbrennern (ca. 460 kW Anschlussleistung) aufgeschmolzen und über einen Rührer, den so genannten Impeller, wird Stickstoff in die Schmelze eingeblasen, was einen Reinigungseffekt hervorruft.

Im Warmhalteofen (MWO) erfolgt ein weiterer Reinigungsschritt und es werden Legierungsmetalle (Al, Mn, Zn, Be) in den benötigten Mengen hinzugegeben. Je nach

Bedarf wird sowohl am MSO als auch am MWO Krätze von der Schmelzoberfläche per Hand abgeschöpft.

Vom MWO wird die Schmelze mit einer Pumpe in die Gussformen des Masselgießbandes (MMGB) gepumpt. In den mittels Erdgasbrennern vorgewärmten Formen (ca. 110 – 150°C) erstarrt die Schmelze unter einer Schutzgasatmosphäre zum Endprodukt, den Masseln.

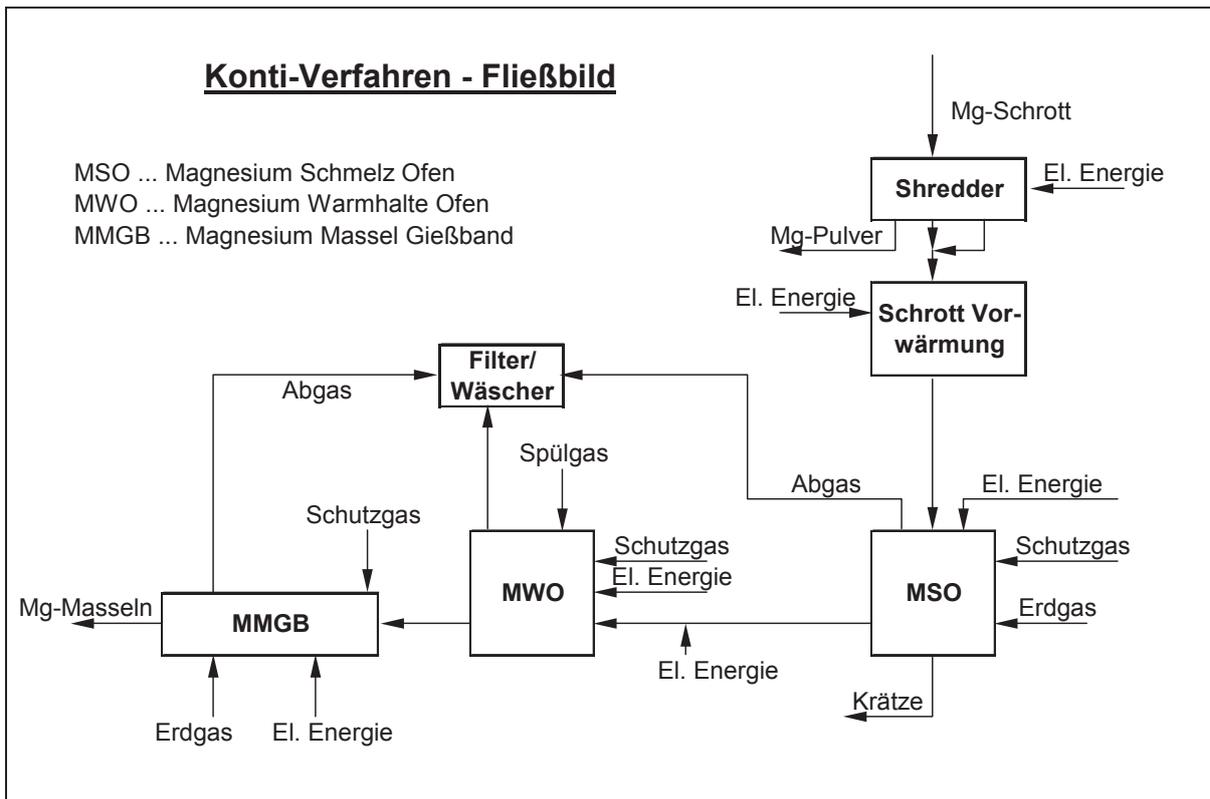


Abbildung 4-2: Stoff- und Energieströme im salzlosen Rückschmelzverfahren

4.3 Diskontinuierliches Verfahren (Rückschmelzen mit Salz)

Beim diskontinuierlichen- oder Batch-Verfahren wird der Schrott nach dem Shreddern ohne Vorwärmung abwechselnd in einen der beiden Tiegelöfen (MTO) chargiert. Es werden zwei Tiegelöfen verwendet, da im einen MTO Schrott eingeschmolzen wird, während der andere MTO befüllt und für den Schmelzvorgang vorbereitet wird. Die Tiegelöfen besitzen im Gegensatz zum Schmelzofen, wie er im Konti-Verfahren verwendet wird, keine Abdeckung, weil beim Batch-Prozess anstatt von Schutzgasen mit Abdecksalz gearbeitet wird. Das Salz verhindert die Oxidation der Schmelze. Zusätzlich wird dem Schrott noch Reinigungssalz beigemischt um Verunreinigungen zu entfernen.

Nach dem Aufschmelzen im MTO wird zuerst die Krätze abgegossen und dann die Magnesiumschmelze in den Warmhalteofen (MWO) gekippt. Im MWO wird die Schmelze durch eine Schutzgasatmosphäre (N_2 und SO_2) vor Oxidation geschützt.

Je nach Bedarf werden im MTO bzw. im MWO die Metalle Aluminium, Mangan, Zink und Beryllium hinzu gegeben, um die erwünschte Legierungszusammensetzung zu erhalten. Mangan erhöht die Korrosionsbeständigkeit der Legierung. Das Beryllium vermindert die Oxidationsneigung des schmelzflüssigen Metalls.

Beryllium ist jedoch stark toxisch und krebserregend. Beryllium und seine Verbindungen führen in Form von Staub und Dämpfen zu schweren irreversiblen Lungenschäden (so genannte Berylliosis), häufig mit tödlichem Ausgang. Haut und Schleimhäute werden stark angegriffen, chronische Exposition verursacht Leberschäden und Milzvergrößerung.⁴¹

Das Abmasseln am MMGB erfolgt analog zum Konti-Verfahren. Die Abgase werden durch eine Absaugung erfasst und in einem Kalkfilter gereinigt. Hier erfolgen in erster Linie ein Abbinden des SO_2 und eine Entstickung. Im Gegensatz zum kontinuierlichen Verfahren ist das Batch-Verfahren nicht nur für Schrott der Klasse 1, sondern auch für minderwertigere Schrotte geeignet.

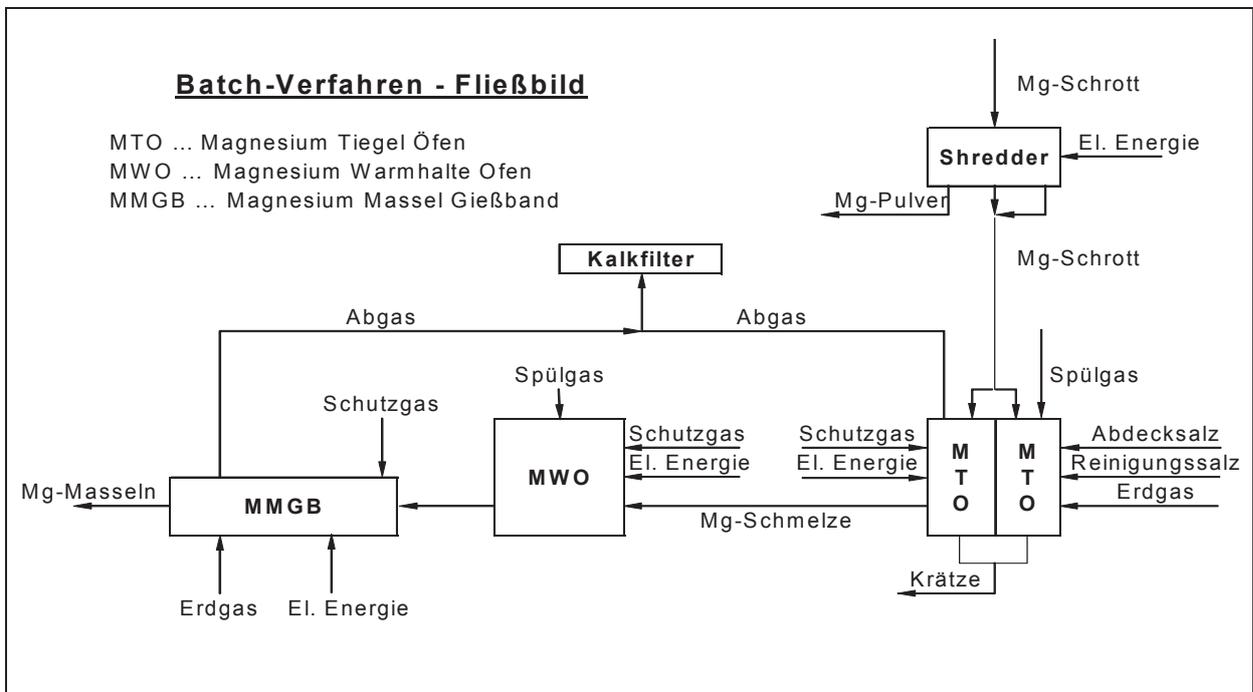


Abbildung 4-3: Stoff- und Energieströme beim diskontinuierlichen Rückschmelzen

⁴¹ Amt der Oö. Landesregierung Abteilung Umweltschutz/Abfallwirtschaft, 2001

5 Datenaufnahme und –recherche

Die Stoff- und Energieströme des kontinuierlichen Rückschmelz-Verfahrens wurden in einem einwöchigen Versuchsbetrieb gemessen. Für das diskontinuierliche Verfahren waren bereits Daten über ein halbes Jahr bei der Firma non ferrum vorhanden. Die Daten für die beiden Verfahren stammen also aus Quellen unterschiedlicher Qualität. Beim kontinuierlichen Prozess wurden Primärdaten erfasst, beim diskontinuierlichen handelt es sich um Sekundärdaten aus der Buchhaltung.

5.1 Methodik zur Messung der Stoff- und Energieströme

5.1.1 Wägung

Zur Bilanzierung des Rückschmelzprozesses wurden folgende Massen ermittelt:



Abbildung 5-1: Wägung des Mg-Schrotts

- Masse des eingesetzten Mg-Schrotts
- Masse der eingesetzten Legierungsmetalle
- Masse der produzierten Mg-Massel
- Masse der Krätze

Der Mg-Schrott wurde, wie im nebenstehenden Foto dargestellt, gewogen, indem die

Schrottcontainer mittels zweier Gurte an eine Waage angehängt, und selbige mit einem Gabelstapler angehoben wurde. Die Genauigkeit von $\pm 0,5$ kg entspricht weniger als 1 Promille des durchschnittlichen Containergewichtes.

Die Masse des produzierten Magnesiums wurde ermittelt, indem 20 Massel gewogen und die Durchschnittsmasse mit der Gesamtzahl der Massel multipliziert wurde.

5.1.2 Temperaturmessung

Da der Rückschmelzprozess bei relativ hohen Temperaturen (bis zu 700°C) abläuft besteht die Möglichkeit die Abwärme nutzbar zu machen. Es wurde die Wärmemenge ermittelt, die am Masselgießband abgegeben wird. Dazu wurden sowohl die Temperaturen der Schmelze, bzw. der Mg-Massel, als auch der Gussformen an beiden Enden des MMGB bei kontinuierlichem Betrieb gemessen. Die Temperatur der Formen steigt von durchschnittlich ca. 140°C vor dem Befüllen mit der Schmelze auf ca. 220°C am Masselabwurf an. Die Schmelztemperatur sinkt von anfänglich ~600°C auf ~300°C am Masselabwurf.

Die Gussformen, die aus Grauguss gefertigt sind, haben ein Gewicht von ca. 21 kg. Das durchschnittliche Gewicht der Massel (AZ91) beläuft sich auf ca. 7 kg. Die Werte für die Wärmekapazitäten und die Schmelzwärme von AZ91 bzw. von Gusseisen sind Funktionen der Temperatur und wurden aus der Literatur entnommen.⁴²

Bei einer Produktionsrate von 1,3 Massel pro Minute ergibt sich eine Wärmeleistung von ~90 kW über das gesamte Masselgießband mit einer Länge von ca. 10m und einer Breite von ca. 1m (siehe Berechnung im Anhang).

Eine weitere Überlegung besteht darin, die Abwärme des Brennerabgases des Magnesiumschmelzofens nutzbar zu machen. Die Wärme könnte über einen Wärmetauscher für die Vorwärmung des Mg-Schrottes verwendet werden und somit die elektrische Heizung ersetzen.

Zur Temperaturmessung wurde das Messgerät RS 206-3744 mit einem Jumbo NiCr-NiK Thermoelement verwendet.

⁴² Aune, Westengen, 1996, S. 398 ff; Jahrbuch Stahl, 1995

5.1.3 Elektrische Leistungsmessung

Der Verlauf der elektrischen Leistung vom Magnesiumschmelzofen (MSO) und vom

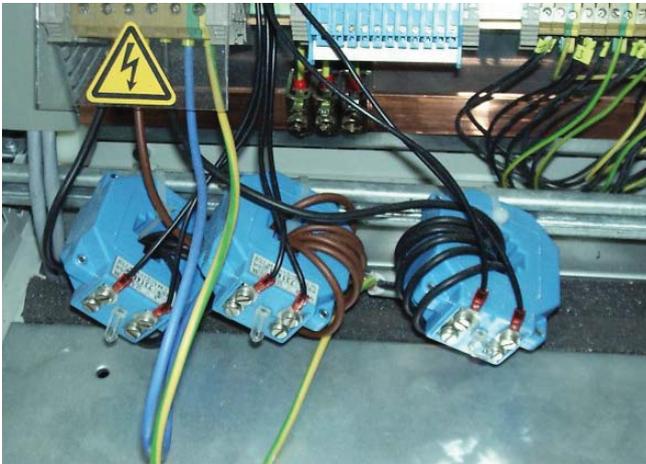


Abbildung 5-2: Stromwandler MSO

Magnesiumwarmhalteofen (MWO) wurde kontinuierlich über den gesamten Versuchsbetrieb aufgezeichnet, wobei jede Sekunde ein aktueller Wert ermittelt wurde.

Der Entscheidungsgrund, ein derartiges Monitoring durchzuführen, lag darin, dass auf diese Weise den verschiedenen Betriebszuständen (Anfahren, Schmelzbetrieb, Warmhaltebetrieb) ein eindeutiger Energieverbrauch zugeordnet werden

kann. Dies stellt auch eine notwendige Grundlage für eine Hochrechnung auf den Jahres-Energieverbrauch dar.

Durch eine Variation der zeitlichen Dauer der verschiedenen Betriebszustände können unterschiedliche Auslastungsgrade der Anlage simuliert werden. Für die Ermittlung des Jahresenergieverbrauchs wurde, um die Vergleichbarkeit der beiden Verfahren gewährleisten zu können, davon ausgegangen, dass sich die Anlagen 56% der Betriebszeit im Schmelzbetrieb, 40% im Warmhaltebetrieb und 4% im Anfahrzustand befindet. Die benötigte Leistung für die unterschiedlichen Betriebszustände lässt sich aus der Kurvensteigung von Abbildung 5-9 ermitteln.

Die Ermittlung der elektrischen Leistung von MWO und MSO erfolgte, indem die Ströme des Dreiphasenwechselstroms über Stromwandler (Abbildung 5-2) in ein Spannungssignal, und in weiterer Folge in ein normiertes 0 – 10 Volt Messsignal umgesetzt wurden.



Abbildung 5-3: Stromzange Fluke 31

Das 0 – 10 V Signal wurde über ein DAQ-Board am PC aufgezeichnet und mit DasyLab bzw. Simatic WinCC verarbeitet.

Für die Berechnung der Leistung bzw. des Energieverbrauchs wurde die Spannung zu unterschiedlichen Zeiten mit einem Multimeter gemessen und ein Mittelwert errechnet.

Für den elektrischen Energieverbrauch der Vorwärmbox wurde der Strom mit einer Stromzange (Abbildung 5-3) und die Spannung mit einem Vielfachmessgerät, mehrmals über den gesamten Versuchsbetrieb verteilt, gemessen und mit der tatsächlichen Betriebsdauer multipliziert. Da Strom und Spannung der Vorwärmbox nur minimal schwanken ($\pm 3\%$), kann von einem sehr genauen Ergebnis bei der Leistungsberechnung ausgegangen werden.

5.1.4 Messung des Erdgasverbrauchs

Sowohl beim Konti- als auch beim Batch-Verfahren gibt es zwei Erdgasverbraucher, und zwar die Brenner am MSO bzw. an den Tiegelöfen und die Brennerleisten zum Vorwärmen des Masselgießbandes.

Um beide Verbraucher getrennt erfassen zu können, sind zwei Gaszähler notwendig. Mit dem ersten Zähler wird der Gesamterdgasverbrauch gemessen. An diesen Zähler ist ein Volumenkorrektor angeschlossen, der mit Hilfe von Druck- und Temperatursensoren von Betriebs- auf Normkubikmeter umrechnet. Der zweite Zähler misst den Gasvolumenstrom zum Brenner am Magnesiumschmelzofen.

Der aktuelle Zählerstand wurde alle 30 Minuten aufgezeichnet um einen zeitlichen Verlauf zu erhalten, und um den Erdgasverbrauch beim Hochfahren, im kontinuierlichen Betrieb und im Warmhaltebetrieb vergleichen zu können.



Abbildung 5-4: Gaszähler und Volumenkorrektor

5.1.5 Erfassung des Schutz- und Spülgasverbrauches

Die Schutzgasatmosphäre beim Konti-Verfahren besteht aus einem Gemisch von Stickstoff und HFC (R134a).

Der Stickstoffverbrauch wird über den Druckabfall an den Stickstoffbündeln errechnet, wobei das Volumen der Bündel aus dem Datenblatt der Firma Linde, und die Temperatur durch Messung bestimmt wird.

Die Messung des HFC-Bedarfs ist über den Druck nicht möglich, weil es sich um ein kondensierbares Gas handelt. Da eine Volumenstrommessung mit zu hohem Aufwand verbunden ist, wird der HFC-Verbrauch mittels Differenzwägung der HFC-Flasche ermittelt. Eine gefüllte HFC-Flasche wiegt in etwa 20 kg. Während des Versuchsbetriebes wurden insgesamt 7,2 kg HFC verbraucht. Die verwendete Waage weist eine Genauigkeit von $\pm 0,01$ g auf.

5.2 Datenqualität

Die Daten für das kontinuierliche Verfahren wurden durch Messungen erfasst. Dabei ergibt sich das Problem, dass die Anlage im Versuchsbetrieb nur für eine Woche durchgehend betrieben wurde und dabei unterschiedliche Parameter zu Versuchszwecken variiert wurden, um den Prozess zu optimieren. Eine Hochrechnung auf den durchschnittlichen Jahresverbrauch, bzw. die durchschnittlichen Emissionen pro Jahr ist daher prinzipiell mit einem Fehler behaftet. Dieser Fehler wurde allerdings dadurch minimiert, dass die Energieströme bei verschiedenen Betriebszuständen gemessen wurden (siehe Abbildung 5-7, Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9), und man somit einen Jahresenergieverbrauch für unterschiedliche Auslastungsgrade errechnen kann.

Tabelle 5-1: Energiebedarf Konti-Verfahren bei verschiedenen Betriebszuständen

	Erdgas MSO [Nm ³ /h]	Erdgas MMGB [Nm ³ /h]	El. Energie MSO+MWO [kW]
Aufheizen	10	0	14
Schmelzen	21,7	6,9	14

Warmhalten	10	0	14
------------	----	---	----

Nm³ ... Normkubikmeter

Im Gegensatz zum kontinuierlichen Verfahren sind für das diskontinuierliche Verfahren bereits Daten aus der Buchhaltung (Einkaufskontrolle,...) über ein halbes Jahr vorhanden, da diese Anlage bereits in Betrieb ist. Es besteht die Möglichkeit, dass bei den gebuchten Einsatzmengen Fehler unterlaufen sind, jedoch sind die vorhandenen Daten in sich schlüssig.

Die Vergleichbarkeit der Daten von Conti- und Batch-Verfahren ist auf Grund ihrer unterschiedlichen Herkunft (Messung, Buchhaltung) zu hinterfragen. Die Verhältnismäßigkeit von Aufwand zu Ergebnis (bzw. Genauigkeit), hat in diesem Fall den Ausschlag dafür gegeben, die bereits vorhandenen Daten für das Batch-Verfahren zu übernehmen.

Die Möglichkeit eines direkten Vergleichs der beiden Verfahren und damit der unterschiedlichen Datensätze wurde durch das Hochrechnen auf den Jahresenergieverbrauch aus den verschiedenen Betriebszuständen erreicht.

Aus der Buchhaltung von non ferrum ist eine Jahresproduktionszeit von 3012 Stunden bekannt. Für das kontinuierliche Verfahren wird auf dieselbe Jahresproduktionszeit hochgerechnet.

5.3 Ergebnisse der Messungen und Recherche

5.3.1 Kontinuierliches Verfahren

5.3.1.1 Energieverbrauch

Beim kontinuierlichen Rückschmelzprozess werden insgesamt 2,05 kWh Energie in Form von Elektrizität und Erdgas benötigt um 1 kg Magnesium zu produzieren. Oder anders ausgedrückt: für ein kg Magnesium Output werden 0,84 kWh elektrische Energie und 0,14 Nm³ Erdgas verbraucht. Zur Umrechnung von Nm³ Erdgas auf kWh wurde der untere Heizwert von 8,816 kWh/Nm³ verwendet⁴³.

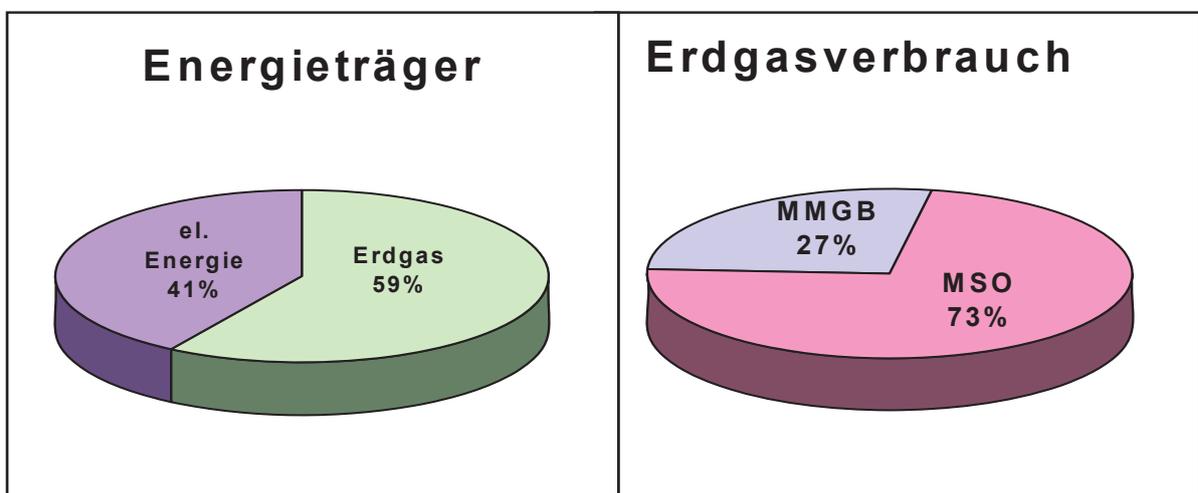


Abbildung 5-5: Anteil der Elektrizität bzw. des Erdgases am Gesamtenergiebedarf (links) und Anteile der einzelnen Verbraucher am Erdgasvolumen (rechts)

Erdgas ist mit knapp 60% Anteil am Gesamtenergiebedarf der Hauptenergieträger beim kontinuierlichen Rückschmelzverfahren. Das meiste Erdgas (73%) wird zum Aufschmelzen des Mg-Schrotts im Magnesium-Schmelzofen verwendet. Die restlichen 27% der Erdgasmenge werden bei den Brennern am MMGB zum Vorwärmen der Masselformen eingesetzt.

⁴³ Hausladen, 1998

Der größte Verbrauch an elektrischer Energie fällt bei der Absaugung bzw. Abgasbehandlung an. Beim Batch-Verfahren ist eine Abgasbehandlungsanlage (Kalkfilter) in Betrieb, während im Versuchsbetrieb des kontinuierlichen Verfahrens nur eine Absauganlage verwendet wurde. Es ist jedoch davon auszugehen, dass beide Anlagen im Normalbetrieb eine Abgasbehandlungsanlage mit ähnlichem Energieverbrauch benötigen. Daher wurde der Energieverbrauch aus den technischen Daten der Abgasbehandlungsanlage, wie sie im Batch-Verfahren verwendet wird, ermittelt, und wurde für beide Verfahren als gleich hoch angenommen. Dasselbe gilt für den Shredder, der mit 26% den zweitgrößten Elektroenergieverbraucher darstellt.

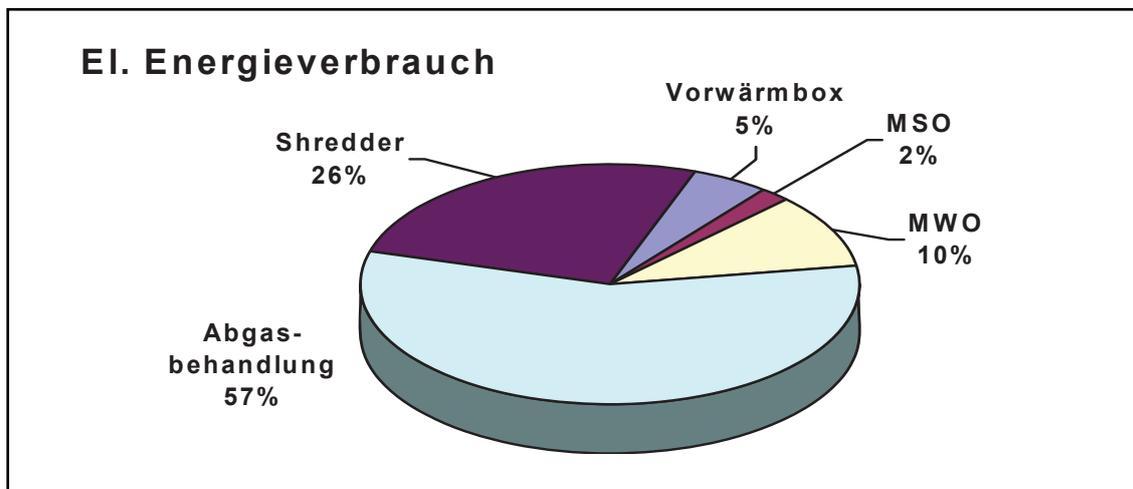


Abbildung 5-6: Elektrischer Energie-Verbrauch des kontinuierlichen Rückschmelzens

MWO, Vorwärmbox und MSO fallen mit insgesamt 17% des elektrischen Energieverbrauches im Gegensatz zur Filteranlage und zum Shredder nur wenig ins Gewicht.

In Tabelle 5-2 sind die einzelnen Elektroenergieverbraucher aufgeschlüsselt und sowohl die Absolutwerte als auch die prozentualen Anteile angegeben.

Tabelle 5-2: Anteil der einzelnen Anlagenteile am elektrischen Energieverbrauch beim Konti-Verfahren

Verbraucher	[KWh/kg Mg _{Output}]	Anteil [%]
Abgasbehandlung	0,48	57
Shredder	0,22	26
MWO	0,08	10
Vorwärmbox	0,04	5
MSO	0,02	2
Summe	0,84	100

Während des gesamten Versuchsbetriebs der kontinuierlichen Rückschmelzanlage wurden in regelmäßigen Zeitintervallen Messwerte aufgenommen. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf den Energieverbrauch bei unterschiedlichen Betriebszuständen bzw. Auslastungsgraden, und somit eine näherungsweise Hochrechnung auf den Jahresverbrauch.

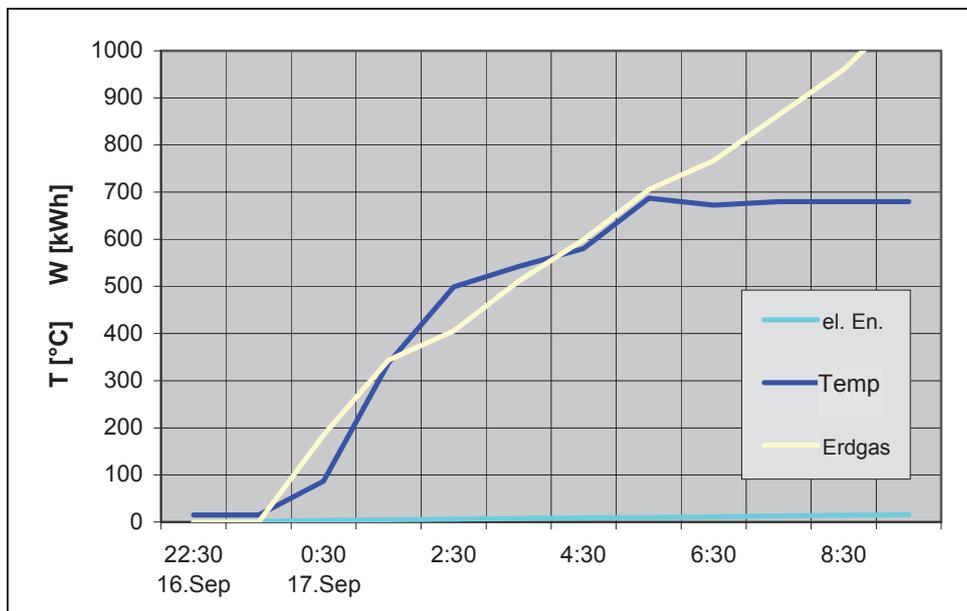


Abbildung 5-7: Energieverbrauch des Magnesium-Schmelzofens beim Hochfahren

In Abbildung 5-7 ist der Vorgang des Hochfahrens dargestellt, wobei die beiden Öfen von Raumtemperatur auf ca. 700°C aufgeheizt werden. Die Temp-Linie stellen die Temperatur im der Schmelzofen dar. Die „el. En.“-Linie repräsentiert den elektrischen Energieverbrauch von MSO (Magnesium-Schmelzofen) und MWO (Magnesium-Warmhalteofen) ohne den Verbrauch von Abgasbehandlung, Shredder und Vorwärmung.

Der gesamte Aufheizvorgang nimmt in etwa sechs Stunden in Anspruch. Auffällig in diesem Diagramm ist, dass sowohl der Erdgas, als auch der Elektroenergieverbrauch auch nach Erreichen der konstanten Temperatur weiterhin linear ansteigen.

In Abbildung 5-8 ist der Erdgasverbrauch während des gesamten Versuchsbetriebs dargestellt. Man kann das Erreichen der konstanten Temperatur von ca. 700°C im Schmelzofen am 17.9. um ungefähr 7:00 erkennen - diese Zeit markiert das Ende des Aufheizvorgangs. Der Erdgasverbrauch ist bis zum 18.9. um 12:00 in etwa gleich bleibend, da die Anlage in diesem Zeitraum in erster Linie im Warmhaltebetrieb gefahren wird.

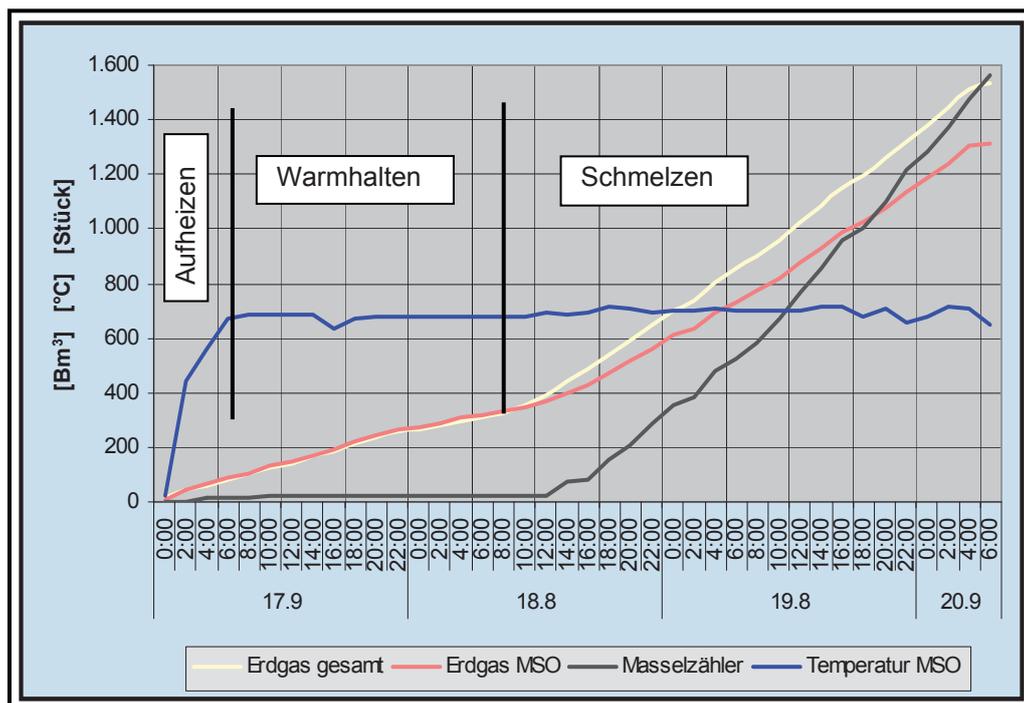


Abbildung 5-8: Erdgasverbrauch beim kontinuierlichen Rückschmelzen

In Abbildung 5-8 ist der Erdgasverbrauch in Betriebskubikmeter [Bm³], die Temperatur in Grad Celsius [°C] und die Anzahl der Masse in Stück angegeben.

Ab 13:00 wird, wie aus der Kurve des Masselzählers erkennbar, mit dem Abmasseln begonnen. Dies bedeutet, dass einerseits Erdgas für die Beheizung des Masselgießbandes aufgewendet, und andererseits der Brenner im MSO auf höherer Leistung betrieben werden muss um zusätzlichen Schrott einzuschmelzen. Beide Effekte kann man durch den Knick in der Erdgas-Linie und dem Auseinandergehen der Schere zwischen Erdgas-gesamt und Erdgas-MSO beobachten.

Aus der Steigung der Kurven ist der gemessene Erdgasverbrauch des Schmelzofens im Warmhaltebetrieb von ca. 10 Nm³/h (Normkubikmeter pro Stunde) und im Rückschmelzbetrieb von ca. 21,7 Nm³/h ersichtlich. Das Vorheizen der Formen des Masselgießbandes benötigt ca. 6,9 Nm³/h.

In Abbildung 5-9 ist der Verbrauch an elektrischer Energie des Magnesium-Schmelzofens (MSO) und des Warmhalteofens (MWO) über die Zeit dargestellt. Da der MWO den wichtigsten Verbraucher an elektrischer Energie darstellt, ist auch der Temperaturverlauf im MWO aufgetragen. Die konstante Temperatur von in etwa 680°C wird am 17.9. um ca. 13:00 erreicht.

Der Verbrauch an elektrischer Energie, sowohl von MWO als auch MSO, bleibt über den gesamten Versuchsbetrieb, unabhängig davon, ob sich die Anlage im Warmhalte- oder Rückschmelzbetrieb befindet, konstant.

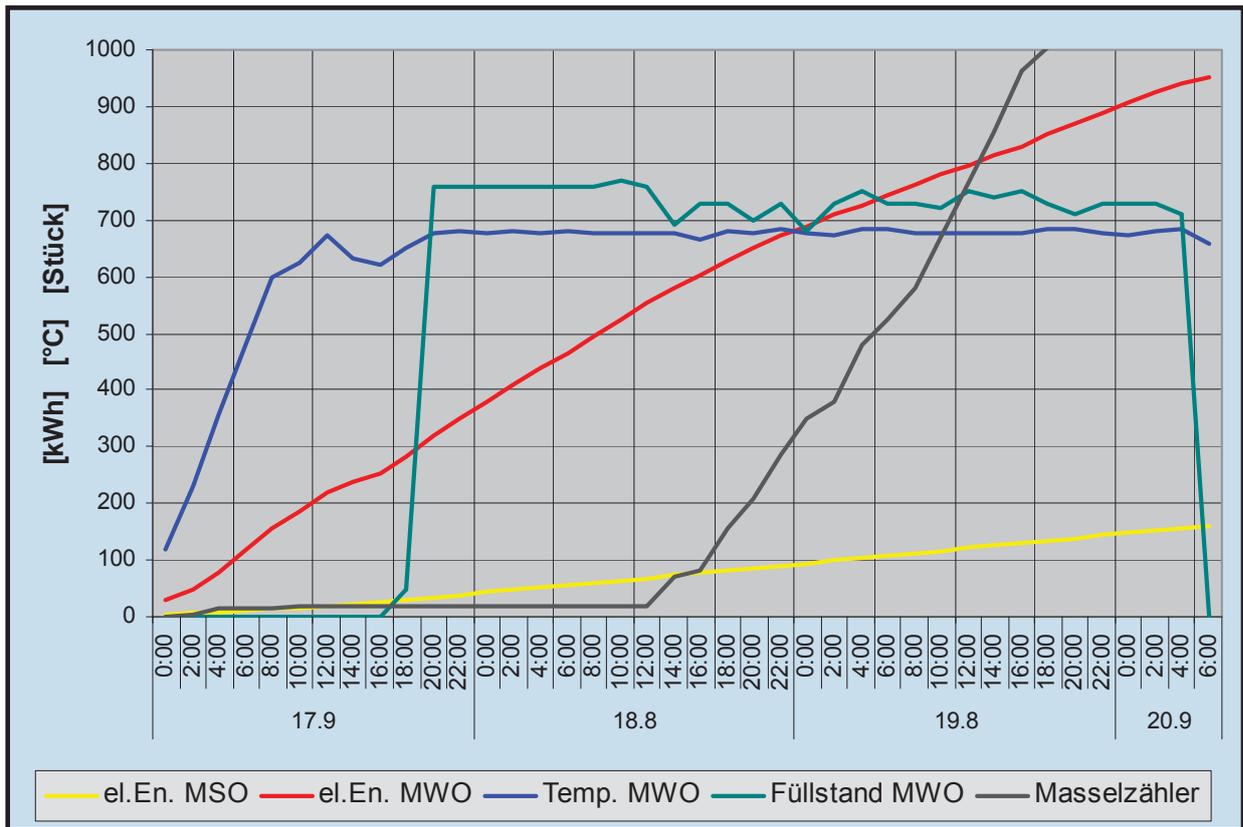


Abbildung 5-9: Elektrischer Energieverbrauch beim Conti-Rückschmelzen

5.3.1.2 Stoffstrombilanz

In Tabelle 5-3 sind die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe quantifiziert, die für die Produktion von 1000 kg Magnesium-Massel vonnöten sind. Der wichtigste Rohstoff ist Magnesium-Schrott, der mit Aluminium und Mangan auflegiert wird, um die geforderte Zusammensetzung für AZ91 zu erhalten.

Der Wert für die Schlichte ist ein Jahresmittelwert vom Batch-Verfahren. Dieser Wert wurde auch für das kontinuierliche Verfahren übernommen, da einerseits in dem einwöchigen Versuchsbetrieb der Verbrauch an Schlichte nicht ermittelt werden konnte, und andererseits für beide Verfahren das gleiche Masselgießband verwendet wird.

Das Metallausbringen, also die Masse der Mg-Massel bezogen auf die Masse eingesetzten Metalls, beträgt beim salzlosen Prozess 94%. Ca. 6% des Rohstoff-Inputs wird in Form von Krätze abgeschöpft.

Tabelle 5-3: Stoffströme beim kontinuierlichen Rückschmelzverfahren

INPUT	Magnesium-Schrott		1.061,54 kg
	Legierungsmetalle	Aluminium	1,51 kg
		Mangan	0,27 kg
	Schlichte		0,58 kg
	Schutzgas	Stickstoff	27,34 Nm ³
HFC R-134a		0,14 Nm ³	
OUTPUT	Mg-Massel		1.000,00 kg
	Krätze		60,52 kg

Die Masse des Feststoffinputs (Magnesium-Schrott + Legierungsmetalle + Schlichte) ergibt in Summe 1063,9 kg, die Masse des Feststoffoutputs (Mg-Massel + Krätze) beläuft sich auf 1060,52 kg. Die Differenz von 3,38 kg beruht primär auf Messungenauigkeiten. Ein Teil des Feststoffmasseverlusts lässt sich aber auch auf Verdampfen der Magnesiumschmelze zurückführen. Andererseits reagieren Gase aus der die Schmelze umgebenden Atmosphäre mit dem Magnesium, was die Feststoffmasse der Krätze erhöht.

5.3.2 Batch-Verfahren

5.3.2.1 Energieverbrauch

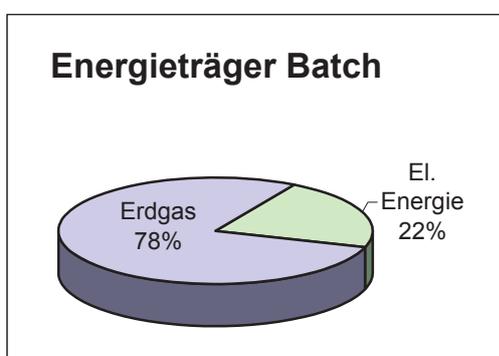


Abbildung 5-10: Energieträger beim Batch-Verfahren

Der Energiebedarf beim Batch-Verfahren wird wie beim kontinuierlichen Verfahren mit Erdgas und Elektrizität gedeckt. Das Erdgas hat mit 78% einen relativ hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Der bei weitem größte Anteil des Erdgases wird bei den beiden Tiegelöfen zum Schmelzen des Schrotts verwendet. Beim diskontinuierlichen Verfahren werden zwei Tiegelöfen verwendet in die

abwechselnd Schrott gefüllt und geschmolzen wird. Im Vergleich dazu benötigt das kontinuierliche Verfahren nur einen Schmelzofen, der kontinuierlich befüllt wird.

Bei der elektrischen Energie stellt die Abgasreinigungsanlage mit 60% den größten Verbraucher dar, der Shredder schlägt sich immerhin mit 27% zu Buche. In Tabelle 5-4 sind die Absolutwerte des elektrischen Energieverbrauchs pro Kilogramm produzierten Magnesiums und die prozentualen Anteile angegeben.

Tabelle 5-4: Verbrauch an elektrischer Energie beim Batch-Verfahren

	[KWh/kg Mg _{Output}]	Anteil [%]
Abgasreinigungsanlage	0,48	60
Shredder	0,22	27
MTO + MWO	0,10	13
Summe	0,80	100

5.3.2.2 Stoffstrombilanz

Pro 1000 kg produzierten Magnesium-Masse werden 1083 kg Schrott und ca. 16 kg an Legierungsmetallen (Al, Mn, Zn, Be) eingesetzt. Dies ergibt ein Metallausbringen von 91%, es werden also 91% des eingesetzten Metalls (Schrott plus Legierungsmetalle) in Form von Mg-Masse in das Produkt überführt. Die restlichen 9% werden oxidiert und gehen in die Krätze oder verlassen über die Absaugung den Prozess.

Die rund 30 kg Flux, die für die Herstellung von 1000 kg Masse notwendig sind, gehen fast vollständig in die Krätze. Die Krätze wird abgeschöpft und aus den Tiegelöfen geleert und dann an ein Entsorgungsunternehmen zur Deponierung weitergegeben.

Stickstoff und Schwefeldioxid dienen als Schutzgas im Warmhalteofen und am Masselgießband. 1,0 Nm³ Argon werden nicht direkt für den Prozess verwendet, sondern werden am Spektrometer für die Analyse der Legierungszusammensetzung benötigt (siehe Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5: Stoffströme beim diskontinuierlichen Rückschmelzen

Input		Magnesium-Schrott	1083,30 kg
	Legierungs-Metalle	Beryllium	2,35 kg
		Aluminium	11,91 kg
		Mangan	0,31 kg
		Zink	1,10 kg
		Flux	30,27 kg
		Schlichte	0,58 kg
		Stickstoff	60,5 Nm ³
		Schwefeldioxid	3,1 Nm ³
		Argon	1,0 Nm ³
Output		Mg-Massel	1000,00 kg
		Krätze	121,45 kg

6 Bewertung der Rückschmelzverfahren

6.1 Auswahl der Bewertungsmethoden

Die in Tabelle 6-1 durchgeführte Charakterisierung der nicht-monetären Bewertungsmethoden soll als Entscheidungshilfe dienen, welche Methoden für die Lösung des vorliegenden Problems am zielführendsten sind.

Tabelle 6-1: Charakterisierung der nicht-monetären Bewertungsverfahren

Nicht-monetäre Bewertungsverfahren	Berücksichtigung der Inputs	Berücksichtigung der Outputs	Verfügbarkeit von Charakterisierungsfaktoren	einfache Durchführbarkeit	Vollständigkeit/Aussagekraft
CML	+	+	0	0	0
ECO-Indicator	+	+	0	-	+
KEA	+	-	+	+	0
kritische Volumina	-	+	0	+	0
MIPS	+	-	0	+	0
Öko-Bilanz (DIN 14040)	+	+	0	0	+
SPI	+	+	+	+	+
Umweltbelastungspunkte	+	+	0	+	0

Mit der Kategorie „Verfügbarkeit von Charakterisierungsfaktoren“ wird beurteilt in welchem Maße Faktoren vorhanden und auch zu erhalten sind, die die einzelnen Stoff- und Energieströme aus der Sachbilanzbilanz in eine Wirkungsbilanz überführen (z.B. die Materialintensitäten beim MIPS, oder die Teilflächen beim SPI, oder die Bereitstellungsnutzungsgrade beim KEA).

Ausschlaggebend für die Wahl der Bewertungsmethoden war in erster Linie die Sachbilanz, also die vorhandenen Daten. Da die Emissionen speziell des kontinuierlichen Prozesses nicht aufgenommen werden konnten, werden für die Bewertung vorrangig inputorientierte Methoden, also MIPS und KEA herangezogen. In die nähere Auswahl kommen auch noch SPI und Eco-Indicator, die sowohl In- als auch Outputs berücksichtigen. Der Eco-Indicator wurde schlussendlich deshalb nicht für die Bewertung verwendet, da für diese Methode benötigte Daten über Emissionen nicht vorhanden sind.

Es wurde versucht den Lebenszyklus eines Mg-Bauteils mit dem Material Input per Service (MIPS) zu bewerten. Diese Bewertungsmethode, die in der Theorie einen sehr interessanten und auch einfachen Ansatz bietet, stellt sich im Praxistest jedoch als unzureichend heraus. Dies liegt vor allem daran, dass es seit 1998 keine aktualisierten Werte für die Materialintensitäten gibt, und auch die vorhandenen Werte⁴⁴ nur ein kleines Spektrum der Möglichkeiten an Materialinputs abdecken.

Für die Bewertung werden der KEA und der SPI ausgewählt.

Für den KEA spricht:

- Der Energieverbrauch im sehr energieintensiven Magnesiumkreislauf wird ausreichend berücksichtigt.
- Die für die Bewertung notwendigen Charakterisierungsfaktoren sind in einer umfangreichen Datenbank im Internet⁴⁵ vorhanden.
- Es handelt sich um eine einfache und auch für den Nicht-Fachmann verständliche Methode.

Der SPI wird ausgewählt, weil:

- dadurch, dass entsprechende Softwaretools⁴⁶ vorhanden sind, die Durchführung wesentlich erleichtert wird.
- es sich beim SPI um eine umfassende Bewertungsmethode handelt, in der sämtliche Stoff- und Energieströme aus der Sachbilanz berücksichtigt werden.

⁴⁴ Wuppertal Institut, 1998

⁴⁵ Umweltbundesamt, 2002

⁴⁶ Koschuh, 2002

6.2 Systemgrenzen

In diesem Kapitel wird die Bewertung von zweierlei Dingen durchgeführt. Nämlich erstens die Bewertung der beiden Recyclingverfahren, Batch- und Conti-Prozess, und zweitens eine Bewertung des gesamten Lebenszyklus eines Magnesiumbauteils.

Wie in Abbildung 6-1 zu sehen ist, besteht der Lebenszyklus eines Mg-Bauteils aus den Abschnitten Gewinnung, Produktion, Nutzung und Entsorgung. Das Recycling ist ebenfalls Bestandteil dieses Lebenszyklus, wobei die Rückführung von Mg-Abfällen in die Produktion an zwei unterschiedlichen Punkten angreift.

Einmal werden Abfälle, vornehmlich der Schrottklasse 1 die während der Produktion anfallen, innerhalb des Betriebs mit dem kontinuierlichen Rückschmelzverfahren recycelt. Bei der zweiten Recyclingschleife wird Schrott von meist minderer Qualität nach der Nutzungsphase mit dem Batch-Verfahren rückgeschmolzen und wieder der Produktion zugeführt. Das bedeutet unter anderem, dass für das Batch-Verfahren wesentlich längere Transportwege notwendig sind als für das kontinuierliche Verfahren. Diese Tatsache verhindert eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Rückschmelzverfahren, da sie unterschiedlichen Rahmenbedingungen unterworfen sind.

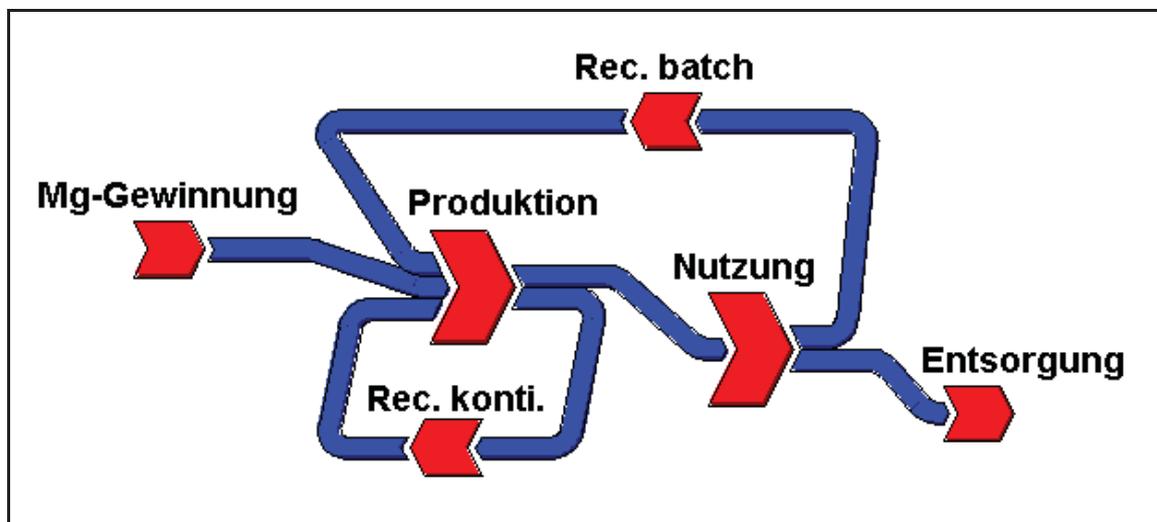


Abbildung 6-1: Lebenszyklus eines Magnesium-Bauteils von der Wiege bis zur Bahre

Die Systemgrenzen der beiden Recyclingverfahren müssen identisch gewählt werden um sie vergleichbar zu machen. Die Bewertung beginnt beim Zerkleinern des Schrotts im Shredder und endet beim Auswurf des Masselgießbandes. Innerhalb dieser Grenzen

werden sämtliche Stoff- und Energieströme, Transportwege, der Flächenbedarf, der Energiebedarf für die Abgasbehandlung und die menschliche Arbeitskraft berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden der Rohstoff- und Energiebedarf für die Herstellung der Rückschmelzanlagen und die Schadstoffe in der Abluft.

Für die Bewertung des Lebenszyklus eines Mg-Bauteils sind die Grenzen so gelegt worden, dass der gesamte Primärenergiebedarf von der Mg-Gewinnung über die Produktions- und Nutzungsphase bis zur Entsorgung inklusive der Recyclingschleifen und sämtlicher Transportwege berücksichtigt wird.

6.3 Software zur Bilanzierung/ Bewertung

Es steht mittlerweile eine Vielzahl von Softwaretools zur Erstellung von Sachbilanzen/LCI und zur anschließenden Bewertung mit unterschiedlichen nichtmonetären Bewertungsmethoden zur Verfügung. Einige seien hier angeführt:

- **AUDIT:** Sehr umfangreiches Softwarepaket, das eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Darstellung (z.B. Sankey-Diagramme) und Bewertung anbietet. Angepasst an die Möglichkeiten, die hier geboten sind, muss man sich auch entsprechend intensiv mit dem Programm auseinandersetzen.
- **GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung)**⁴⁷: Am Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung der Universität Stuttgart entwickelte Software zur Durchführung von Ökobilanzen und zur Aggregation von Sachbilanzdaten zu Potentialen, wie z.B. dem Global Warming Potential (GWP), dem Ozone Depletion Potential (ODP) oder dem Acidification Potential (AP). Dieses Tool bietet Möglichkeiten zu einer übersichtlichen grafischen Darstellung von Stoffflüssen und unterschiedlichen Szenarien.
- **GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme)**⁴⁸: Datenbank mit Bilanzierungs- und Analysemöglichkeiten für Lebenszyklen von Energie-, Stoff- und Transportprozessen auf monetärer und nichtmonetärer Basis.

⁴⁷ Vgl.: Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart, 2002

⁴⁸ Vgl.: Umweltbundesamt, 2003

- Spi.xls⁴⁹: Einfaches und leicht verständliches Programm, mit dem der ökologische Fußabdruck (ÖFA) eines Produktes, Prozesses schnell und ohne langwieriges Einarbeiten in die Materie bestimmt werden kann. Es sind bereits fertige Module vorhanden in denen z.B. einer Stunde Arbeitszeit, oder dem Verbrauch von 1 kWh elektrischer Energie, oder der Emission von 1 mg SO₂ ein definierter ökologischer Fußabdruck in [m²a/unit] zugewiesen wird. Diese Vergleichsmodule werden mit den Stoff- und Energieströmen aus der Sachbilanz verknüpft und somit der ÖFA des Prozesses, Produktes oder der Dienstleistung ermittelt. Der Nachteil liegt darin, dass nicht für alle Sachbilanzposten Vergleichsmodule vorhanden sind, so dass diese zum Teil selbst erstellt, oder über die retropropagatorische Methode berechnet werden müssen.
- SPI-Excel-Makro⁵⁰: Am Institut für Verfahrenstechnik der TU Graz entwickeltes Tool zur Ermittlung des Sustainable Process Index. Die Art der Verwendung ist in einem Manual in der Dissertation von Dr. Krotscheck beschrieben.
- TEAM –TEAM plus: Hierbei handelt es sich um ein Softwarepaket, das aus zwei Teilen besteht. Der eine Teil dient zum Erstellen der Sachbilanz, der andere zur Durchführung einer Bewertung, basierend auf der Sachbilanz, wobei mehrere Bewertungsmethoden, wie z.B. der Eco-Indicator, die EPS-Methode, oder das GWP zur Auswahl stehen.

⁴⁹ Vgl.: Koschuh, 2000

⁵⁰ Krotscheck, 1995

6.4 Bewertung des Rückschmelzens mit dem kumulierten Energieaufwand

Die hier durchgeführte Bewertung sowohl des Konti- als auch des Batch-Verfahrens bezieht sich auf den Recyclingprozess inklusive den benötigten Hilfs- und Betriebsstoffen und der verbrauchten Energie in Form von elektrischem Strom und Erdgas. Nicht berücksichtigt werden die Bereitstellung der Anlage und die Magnesium-Vorkette bis zum Schrott.

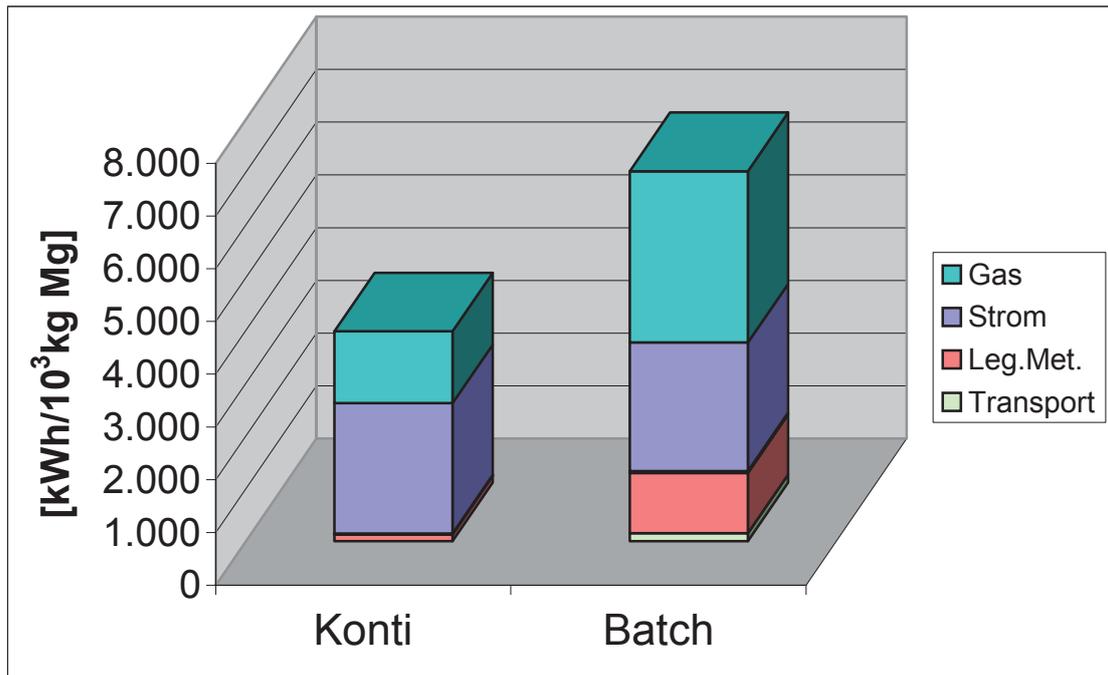


Abbildung 6-2: Kumulierter Energieaufwand für das Rückschmelzen von Magnesium

Wie aus Abbildung 6-2 ersichtlich sind Erdgas und elektrischer Strom die Hauptverursacher des kumulierten Energieaufwandes. Im Gegensatz zum Konti-Verfahren haben beim Batch-Verfahren auch die Legierungsmetalle (Al, Mn, Zn, Be) einen nicht unwesentlichen Anteil am KEA, was hauptsächlich darauf zurückzuführen ist, dass beim Batch-Prozess minderwertigere Schrottklassen rückgeschmolzen werden, wohingegen beim salzlosen Prozess vornehmlich Schrott der Klasse 1 zum Einsatz kommt.

Schutzgase, Flux und Schlichte haben wenig bis gar keine Auswirkung auf den kumulierten Energieaufwand. Bemerkenswert ist noch der Transport beim diskontinuierlichen Rückschmelzen, da dieses Verfahren nicht für das In-house-Recycling gedacht ist und somit in den meisten Fällen der Schrott zu einem Recyclingbetrieb transportiert werden

muss. Im Gegensatz dazu wird beim kontinuierlichen Verfahren der Schrott dort rückgeschmolzen, wo er anfällt.

Aus den oben angeführten Gründen, vor allem aber wegen des höheren Erdgasverbrauchs, ergibt sich ein um 76% höherer KEA für das diskontinuierliche Batch-Verfahren. Allerdings muss hier mit Nachdruck betont werden, dass für beide Verfahren unterschiedliche Rahmenbedingungen vorliegen, einerseits was die verwendeten Schrottklassen anlangt und andererseits was den Transport des Schrottes betrifft (Vgl. Abschnitt 6.2 Systemgrenzen).

Tabelle 6-2: KEA Rückschmelzen (Angaben in [kWh/1000kg Mg])

	Konti	Batch
Transport	0,00	151,19
Leg.Met.	129,67	1.143,68
Salz	0,00	7,24
Stickstoff	11,32	25,05
SO ₂	0,00	0,0004
HFC R-134a	4,44	0,00
Strom	2.469,60	2.440,20
Gas	1.364,64	3.248,06
Summe	3.980,16	7.015,43

Im Gegensatz zur Primärproduktion schneiden jedenfalls beide Recyclingverfahren hervorragend ab. Der diskontinuierliche Salzprozess benötigt 10,5% (ca. 7 kWh/kg) und das kontinuierliche Rückschmelzen immerhin nur ca. 6% (ca. 4 kWh/kg) dessen, was an kumuliertem Energieaufwand für die Produktion von Primärmagnesium (66,63 kWh/kg)⁵¹ anfällt.

⁵¹ Umweltbundesamt, 2002

6.5 Bewertung mit dem SPI

Für die Bewertung der beiden Rückschmelzprozesse mit dem Sustainable Process Index (SPI) wurde das SPI-Excel-Makro, erstellt von Dr. Christian Krotscheck⁵², und das Makro spi.xls von Mag. Koschuh herangezogen. Das Softwaretool von Mag. Koschuh⁵³ stellt ein einfaches und leicht verständliches Werkzeug dar, in dem Prozessdefinition, Sachbilanz, Wirkungsbilanz und Interpretation/Diskussion klar getrennt und übersichtlich dargestellt sind und somit der SPI relativ unkompliziert ermittelt werden kann.

Für den kontinuierlichen Rückschmelzprozess ergibt sich ein ökologischer Fußabdruck (ÖFA) von $83 \text{ m}^2\cdot\text{a}/\text{kg}$ und für den diskontinuierlichen Prozess $181 \text{ m}^2\cdot\text{a}/\text{kg}$. Der ÖFA bezieht sich auf ein Kilogramm produziertes Magnesium.

Der ökologische Fußabdruck ist gleichzusetzen mit dem spezifischen Flächengebrauch. Wenn man davon ausgeht, dass in Österreich einem Einwohner durchschnittlich $11000 \text{ [m}^2\cdot\text{a}/\text{cap}]$ ⁵⁴ zur Verfügung stehen, so ergibt sich für ein Kilogramm sekundäres Magnesium ein SPI von $7,5\cdot 10^{-3} \text{ [cap}/\text{kg sek.Mg}]$ für das Konti-Verfahren, bzw. ein SPI von $1,6\cdot 10^{-2} \text{ [cap}/\text{kg sek.Mg}]$ für das Batch-Verfahren.

Bei dieser Bewertung wurden die Emissionen nicht berücksichtigt, da darüber keine ausreichenden Daten vorhanden waren.

In Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 sind die ökologischen Fußabdrücke der beiden Rückschmelzprozesse im Detail dargestellt.

In der Spalte „Menge“ sind die Aufwendungen dargestellt, die für die Erzeugung von einem Kilogramm sekundärem Magnesium mit dem kontinuierlichen, bzw. mit dem diskontinuierlichen Verfahren benötigt werden.

Die Spalte „spez. ÖFA“ (spezifischer Ökologischer Fußabdruck) gibt jene Fläche an, die zur Bereitstellung von einer Stunde Arbeitskraft, oder einer Kilowattstunde el. Energie oder

⁵² Krotscheck, 1995

⁵³ Koschuh, 2000

⁵⁴ Krotscheck, 1995, S. 90

einem Kilogramm Erdgas, etc. gebraucht wird. Die Werte in dieser Spalte stammen aus den Vergleichsmodulen der Software spi.xls.

Die Spalte „Modulgenauigkeit“ bezieht sich auf die Qualität der Daten des spezifischen ÖFA, wobei der Wert 0 für eine sehr grobe Schätzung und der Wert 12 für höchste Genauigkeit steht.

Das Produkt aus Menge und spez. ÖFA ergibt den ÖFA (Ökologischer Fußabdruck), also die spezifische Fläche für die Bereitstellung von 1 kg sekundärem Magnesium (Vgl.: Abschnitt 3.3 Der Sustainable Process Index (SPI)).

Tabelle 6-3: Der Sustainable Process Index für das kontinuierliche Rückschmelzen bezogen auf 1 kg sekundäres Magnesium

Bezeichnung	Menge	Einheit	Modulname	spez. ÖFA	Einheit	Modulgenauigkeit	ÖFA [m ²]	Anteil [%]
Arbeitskraft	0,025	h	Personenarbeit	405	[m ² *a/h]	12	10,11	12,18
El. Energie	0,840	kWh	El. En., Verbund Austria	10	[m ² *a/kWh]	0	8,40	10,12
Erdgas	0,106	kg	Erdgas	539	[m ² *a/kg]	11	57,12	68,80
Aluminium	1,510	g	Aluminium, primär	1.310	[m ² *a/kg]	2	1,98	2,38
Mangan	0,270	g	Legierungen	470	[m ² *a/kg]	3	0,13	0,15
Schlichte	0,580	g	Bornitridschlichte	683	[m ² *a/kg]	2	0,40	0,48
N ₂	34,100	g	Stickstoff, N ₂	21	[m ² *a/kg]	1	0,71	0,86
FKW R-134a	0,639	g	FKW-134a	5470	[m ² *a/kg]	2	3,50	4,21
Krätze	60,520	g	Deponie	11	[m ² *a/kg]	12	0,68	0,82
Standfläche	0,001	m ²	Standfläche	1,00	[m ² *a/m ²]	12	0,00	0,00
Summe	---	---	---	---	---	---	83,03	100,00

Erwartungsgemäß schlägt sich die Verwendung des nichtregenerativen Energieträgers Erdgas bei beiden Prozessen am stärksten zu Buche. Weitere signifikante Auswirkungen haben die menschliche Arbeitskraft und der Bedarf an elektrischer Energie.

Der spezifische Flächengebrauch (spez. ÖFA) für eine Stunde Arbeitszeit, bei 1800 Arbeitsstunden/a, berechnet sich aus dem durchschnittlichen Verbrauch einer Person an Energie, Lebensmittel, Konsum- und Gebrauchsgegenständen pro Jahr. Der höchste

Flächengebrauch ergibt sich durch Energieverbrauch von PKW (44%) und Heizung (35%) und durch Nahrung (16%).⁵⁵

Der spezifische ÖFA für die elektrische Energie bezieht sich auf die Situation in Österreich und hauptsächlich auf die Produktion aus Wasserkraft.

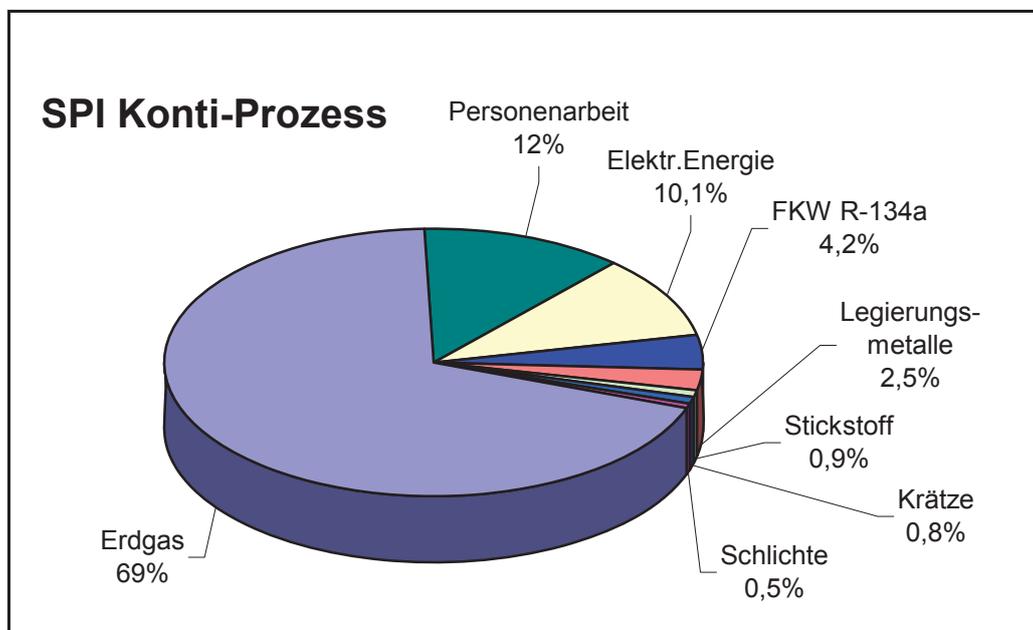


Abbildung 6-3: Der Sustainable Process Index des Konti-Verfahrens

Der Erdgasverbrauch macht beim kontinuierlichen Rückschmelzen mit knapp 70% den größten Anteil des Sustainable Process Index aus. Personenarbeit (12%) und der Bedarf an elektrischer Energie (10%) haben ebenfalls einen nicht unbedeutenden Anteil am SPI. Die Bereitstellung der Schutzgasatmosphäre aus Stickstoff und R-134a wirkt sich in Summe mit knapp 5% aus.

⁵⁵ Krottschek, 1995, S. 217

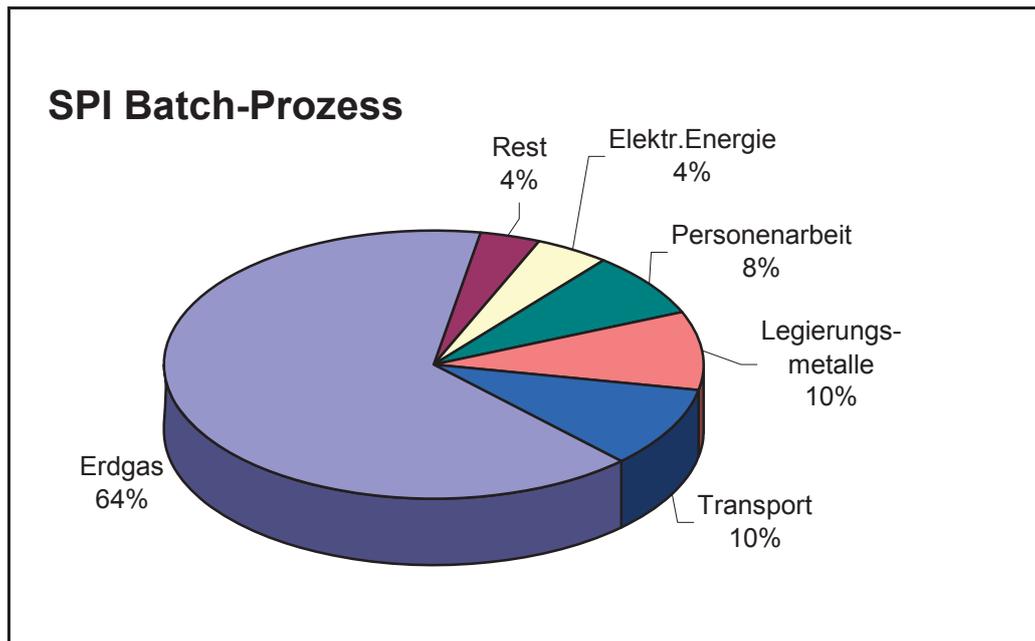


Abbildung 6-4: Anteile der einzelnen Sachbilanzposten am SPI des diskontinuierlichen Prozesses

Beim Batch-Verfahren hat ebenfalls der Erdgasverbrauch den Hauptanteil am SPI.

Da beim diskontinuierlichen Rückschmelzen üblicherweise nicht innerhalb des Produktionsbetriebs recycelt wird, muss der Transport zum Rückschmelzbetrieb berücksichtigt werden, der 10% des SPI ausmacht.

Für den Transport wurde ein durchschnittlicher LKW mit einem Gesamtgewicht von 20 t und einer Nutzlast von 9 t mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h und einer Jahreskilometerleistung von 80.000 km/a angenommen. Die durchschnittlich bis zum Recyclingbetrieb zurückgelegte Strecke wurde mit 300 km angenommen. Der Aufwand für den Gütertransport kommt hauptsächlich durch den Treibstoff (50%) und die hohen NO_x-Emissionen (41%) zustande.⁵⁶

Die Legierungsmetalle wirken sich beim Batch-Verfahren mit 10% des SPI ebenfalls signifikant aus, was in erster Linie auf die mindere Schrottqualität und die dadurch verstärkt bedingte Notwendigkeit des Auflegierens zurückzuführen ist.

⁵⁶ Krotscheck, 1995, S. 167 f

**Tabelle 6-4: Der Sustainable Process Index für das diskontinuierliche Rückschmelzen
bezogen auf 1 kg sekundäres Magnesium**

Bezeichnung	Menge	Einheit	Modulname	spez. ÖFA	Einheit	ÖFA [m ²]	Modulgenauigkeit	Anteil [%]
Transport	0,300	tkm	LKW 20t	58	[m ² *a/m ²]	17,40	7	9,62
Arbeitskraft	0,035	h	Personenarbeit	405	[m ² *a/h]	14,16	12	7,83
El. Strom	0,800	kWh	El. En., Verbund Österreich	10	[m ² *a/kWh]	8,00	0	4,42
Erdgas	0,218	kg	Erdgas	539	[m ² *a/kg]	117,56	11	64,97
Beryllium	2,350	g	Legierungen	470	[m ² *a/kg]	1,10	3	0,61
Aluminium	11,910	g	Aluminium, primär	1.311	[m ² *a/kg]	15,61	2	8,63
Mangan	0,310	g	Legierungen	470	[m ² *a/kg]	0,15	3	0,08
Zink	1,100	g	Legierungen	470	[m ² *a/kg]	0,52	3	0,29
Flux	30,270	g	Gewerbesalz	100	[m ² *a/kg]	3,03	1	1,67
Schlichte	0,580	g	Bornitridschlichte	683	[m ² *a/kg]	0,40	2	0,22
N ₂	75,610	g	Stickstoff, N ₂	21	[m ² *a/kg]	1,57	1	0,87
SO ₂	3,100	g	Sauerstoff, O ₂	21	[m ² *a/kg]	0,07	0	0,04
Argon	1,000	g	Argon	21	[m ² *a/kg]	0,02	0	0,01
Krätze	121,450	g	Deponie	11	[m ² *a/kg]	1,37	12	0,76
Standfläche	0,001	m ²	Standfläche	1	[m ² *a/m ²]	0,00	12	0,00
Summe	---	---	---	---	---	180,96	---	100

6.6 Modellierung und Bewertung des Lebenszyklus eines Mg-Bauteils

In weiterer Folge sollen die beiden Recyclingverfahren in den Lebenszyklus eines Mg-Bauteils eingebettet werden. Dies ist einerseits notwendig, da eine direkte Vergleichbarkeit des Konti- mit dem Batch-Verfahren aufgrund der unterschiedlichen Einsatzgebiete (Schrottklassen) nicht gegeben ist. Andererseits sind manche Bewertungsmethoden, wie z.B. MIPS oder KEA von ihrem prinzipiellen Aufbau her nur über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes anwendbar. Die Bewertung des Lebenszyklus macht die Auswirkungen des Recyclings und der Gewichtsreduktion von Bauteilen auf den Energieverbrauch deutlich. Da die Rückschmelzverfahren nur im Zusammenspiel mit der Gewinnung von Mg, der Produktion, Nutzung und Entsorgung von Bauteilen ihre ökonomische und ökologische Bedeutung entwickeln, ist eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenswegs notwendig.

Der Lebenszyklus beginnt mit der Rohstoffproduktion, also der Gewinnung von Magnesium durch Schmelzflusselektrolyse oder durch die silikothermische Magnesiumgewinnung.

Für die Schmelzflusselektrolyse wird zuerst weitgehend wasserfreies Magnesiumchlorid aus Endlaugen aus der Kaliindustrie oder aus Meerwasser gewonnen. Die Elektrolyse erfolgt dann in einer Elektrolysezelle, wobei unterschiedliche Zelltypen, jedoch alle mit dem gleichen Grundprinzip, zum Einsatz kommen. Wie auch bei der Silikothermie muss als letzter Schritt eine Raffination durchgeführt werden.⁵⁷

Bei der silikothermischen Magnesiumgewinnung wird gebrannter Dolomit ($\text{CaO} \cdot \text{MgO}$) oder Magnesit mit Eisensilikat (FeSi) reduziert. Dabei treten Eisen und Kalziumsilikat als feste Schlacken auf. Industrielle Verfahren arbeiten bei Temperaturen von ca. 1200°C und unter technischem Vakuum.

Im Anschluss an den Herstellungsprozess muss das Rohmagnesium von Verunreinigungen wie Chloriden, MgO und Mg_3N_4 befreit werden. Dies geschieht durch Abstehen, Abdecken und eventuell Waschen mit einem geeigneten Salzgemisch. Bei hohen Wasserstoffgehalten kann eine Chlor- oder Stickstoff-Spülgasbehandlung durchgeführt

⁵⁷ Antrekowitsch, 2000, S. 180 f

werden. Um Reinstmagnesium zu erhalten wird, unter hohem Kosten- und Energieaufwand, destilliert ($T_S = 1090^\circ\text{C}$).⁵⁸

Auf die Magnesium-Gewinnung folgt im Lebenszyklus die Produktion des eigentlichen Bauteils, wie in diesem Fall z.B. ein Querlenker, ein Kofferraumdeckel oder Getriebegehäuse oder auch ein Laptopgehäuse aus Magnesium. Diese Bauteile werden üblicherweise im Druckguss hergestellt. Als weiteres Beispiel sei hier das Getriebegehäuse aus der Magnesiumlegierung AZ91 angeführt wie es beim Audi-A4 oder auch beim VW-Passat Verwendung findet.

In der Nutzungsphase von Magnesiumbauteilen, die im Kfz-Bereich oder bei Schienenfahrzeugen eingesetzt werden, ergeben sich durch die Leichtbauweise bedeutende Einsparpotentiale durch den gewichtsbedingten Kraftstoffminderverbrauch.

Die Entsorgungsphase setzt sich zusammen aus Transport, Shreddern, Separieren und Deponieren.

6.6.1 KEA für den Lebenszyklus eines Querlenkers

Der hier betrachtete Querlenker kann sowohl in Magnesium als auch in Aluminium ausgeführt werden, was einen direkten Vergleich zwischen den beiden Werkstoffen ermöglicht. Der Querlenker wiegt in der Aluminiumausführung 1150 g und in der Magnesiumbauweise 775 g.

6.6.1.1 Primärproduktion

Für den kumulierten Energieaufwand der Primärproduktion werden Werte aus einer Internet-Datenbank vom Umweltbundesamt der BRD wie in Tabelle 6-5 verwendet.

Für den Magnesium-Querlenker ergibt sich ein KEA für die Primärproduktion von:

$$66,64 \text{ [kWh/kg]} * 0,775 \text{ [kg]} = 51,65 \text{ [kWh]}$$

Für den Aluminiumbauteil ergibt sich analog ein $KEA_{\text{Primärproduktion}}^{\text{Aluminium}}$ von 83,79 [kWh]

⁵⁸ Antrekowitsch, 2000, S. 182

Tabelle 6-5: KEA Primärproduktion in [kWh/kg]⁵⁹

	Magnesium	Aluminium
KEA-nichterneuerbar	56,04 kWh/kg	66,65 kWh/kg
KEA-erneuerbar	8,54 kWh/kg	0,77 kWh/kg
KEA-andere	2,06 kWh/kg	5,43 kWh/kg
KEA-Summe	66,64 kWh/kg	72,86 kWh/kg

6.6.1.2 Herstellung des Bauteils

Der KEA für die Bereitstellung eines Aluminium-Mix aus Primär- und Sekundär-Al, gewichtet nach den Anteilen am Gesamtaufkommen in Deutschland im Jahr 1995, beträgt 43,05 kWh/kg (siehe Tabelle 6-6).

Der KEA für die Bereitstellung eines Aluminium-Strangpressprofils beträgt 46,89 kWh/kg. Dieser Wert kann als guter Durchschnittswert für unterschiedlichste stranggepresste Aluminiumprofile angesehen werden, da die genaue Zielform kaum etwas am Energieeinsatz ändert.⁶⁰

Aus der Differenz des KEA für Al-Profile und dem KEA für den Al-Mix ergibt sich der KEA für die Herstellung eines Aluminiumbauteils ohne die Aluminiumvorkette von 3,84 kWh/kg (siehe Tabelle 6-6)⁶¹.

Da man bei Magnesium von einem gleichen Verarbeitungsprozess ausgehen kann, und der wesentliche Unterschied im Energieverbrauch durch die spezifische Wärme und die Schmelztemperatur begründet ist, lässt sich für das gleiche Bauteil in Magnesiumausführung ein KEA von 4,122 kWh/kg (ebenfalls ohne Magnesiumvorkette) bestimmen.

⁵⁹ Umweltbundesamt, 2002

⁶⁰ Corradini, Köhler, 1999, S 72 ff

⁶¹ Corradini, Köhler, 1999, S 68

**Tabelle 6-6: Kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung von Aluminium frei
Halbwerkzeug und KEA für Aluminium-Profile⁶²**

	Prim-Al-Mix	Sek-Al-Mix	Al-Mix	Al-Profil
KEA [kWh/kg]	56,68	4,359	43,05	46,89

6.6.1.3 Nutzungsphase

Der kumulierte Energieaufwand in der Nutzungsphase ist in diesem Fall vom Gewicht des Bauteils und dem dadurch bedingten Kraftstoffmehrverbrauch abhängig. Die Literaturwerte für den gewichtsbedingten Kraftstoffmehrverbrauch schwanken je nach Interessenslage zwischen 0,15 und 1,0 l/100km*100kg. Das tatsächliche Treibstoffeinsparpotential durch Gewichtsreduktion muss für jedes Fahrzeug individuell bestimmt werden, da es dafür keinen allgemeingültigen Wert gibt, weil er von Faktoren wie Effizienz des Antriebs oder Absolutgewicht des Fahrzeugs abhängig ist.⁶³

Für den Querlenker wurde ein gewichtsbedingter Mehrverbrauch von 0,4 l/100km*100kg bei einem mit Benzin betriebenen PKW und eine Lebensdauer von 12 Jahren mit 15.000km/a angenommen. Bei einem KEA von 11,46 kWh pro Liter Benzin⁶⁴ bedeutet dies rund 95 kWh kumulierten Energieaufwand für den Querlenker in Aluminiumausführung und 64 kWh für das Magnesiumbauteil.

Der kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung von Benzin ab Tankstelle beträgt 1,2538 kWh/kWh.⁶⁵ Bei einem Energieinhalt von 11,944 kWh/kg und einer Dichte von 0,76 kg/dm³ erhält man den KEA von 11,46 kWh/l Benzin.

Analog dazu erhält man für Diesel einen KEA von 11,11 kWh/l (KEA für Bereitstellung von Diesel ab Tankstelle = 1,1215178 kWh/kWh; unterer Heizwert von Diesel = 42,7 MJ/kg; Dichte von Diesel = 0,835 kg/l).

⁶² Corradini, Köhler, 1999, S 68 ff.

⁶³ Eberle, 2000

⁶⁴ Umweltbundesamt, 2003

⁶⁵ Umweltbundesamt, 2002

6.6.1.4 Entsorgungsphase

In der Entsorgungsphase fällt ein kumulierter Energieaufwand von 0,27 kWh für den Querlenker in der Aluminium-Ausführung an.⁶⁶ Der KEA für das Bauteil in Magnesium wurde mit 0,24 kWh etwas niedriger angenommen, da durch das niedrigere Gewicht weniger Energie für die Transportwege aufgewendet werden muss.

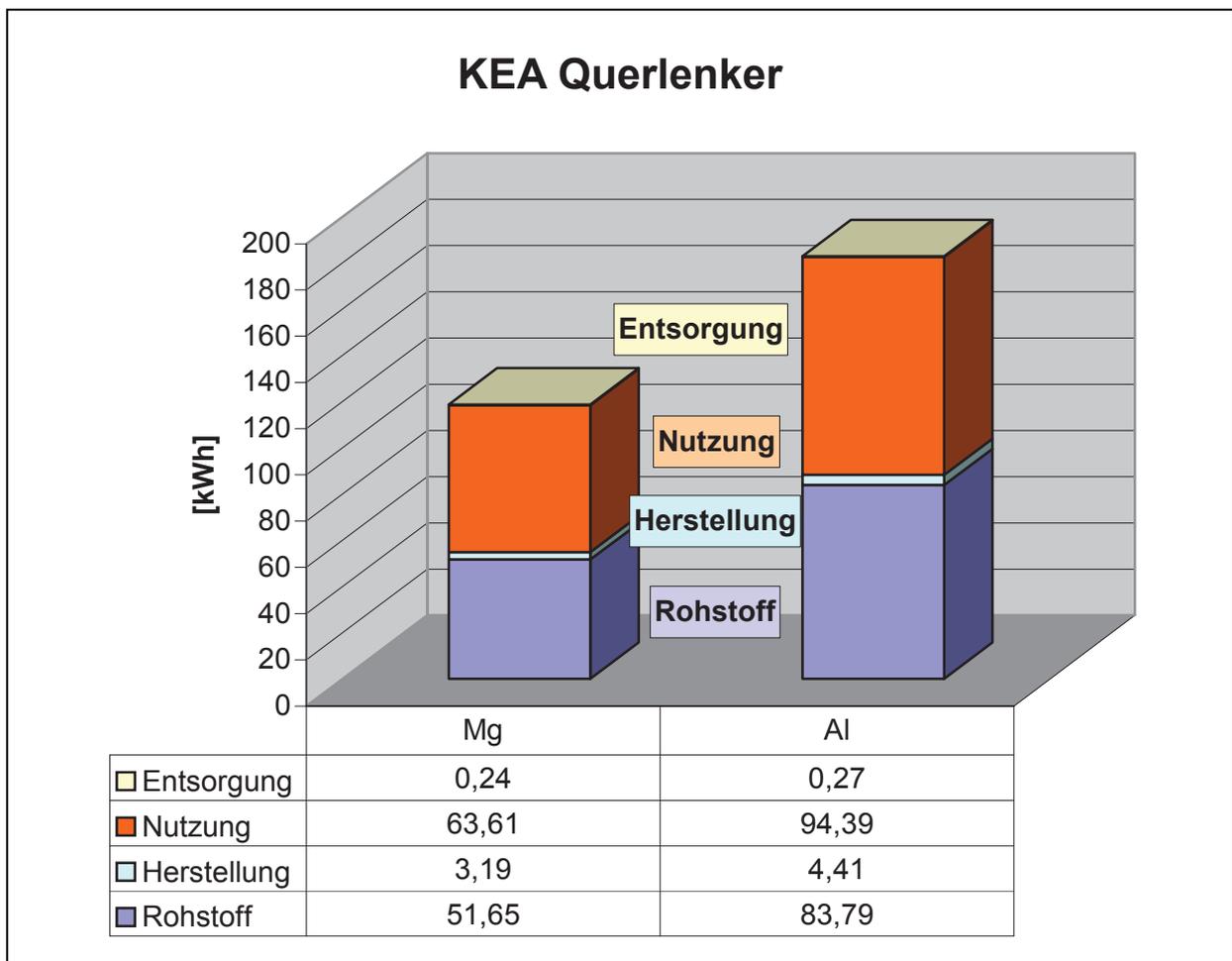


Abbildung 6-5: KEA Querlenker

In Abbildung 6-5 ist der KEA des Mg-Bauteils dem KEA des Al-Bauteils gegenübergestellt. Der KEA zur Bereitstellung des Rohstoffs (Primärproduktion von Mg bzw. Al) macht bei beiden Bauteilen ca. 45% des Gesamt-KEA aus (unterster Abschnitt der Säulen in Abbildung 6-5).

⁶⁶ Grossart, 2000, S 97

Der KEA für die Herstellung des Bauteils aus den Rohstoffen macht jeweils ca. 2,5% des Gesamt-KEA aus, und fällt damit nicht wesentlich ins Gewicht.

Der KEA der Nutzungsphase (in erster Linie Spritverbrauch) fällt mit über 50% Anteil am Gesamt-KEA am stärksten ins Gewicht. Daraus ist eindeutig ersichtlich, dass sich ein erhöhter Energiebedarf in der Herstellung durchaus rechtfertigen lässt, wenn dadurch eine Gewichtsreduktion erreicht wird, was wiederum zu einem geringeren KEA in der Nutzungsphase führt.

Der KEA der Entsorgung ist mit >0,2% Anteil am Gesamt-KEA zu vernachlässigen.

Weiters lässt sich in Abbildung 6-5 erkennen, dass der Gesamt-KEA des Al-Querlenkers um 54% höher ist als der des Mg-Bauteils. Dies ist einerseits auf den höheren Energiebedarf bei der Al-Primärproduktion und andererseits auf das höhere Gewicht des Al-Querlenkers, das sich im KEA der Nutzungsphase niederschlägt, zurückzuführen.

6.6.2 Vergleich des KEA für ein Bauteil aus Magnesium bzw. Stahl

Für den Werkstoffvergleich zwischen Magnesium und Stahl wurde eine Trennwand zwischen Kraftstoffbehälter und Kofferraum ausgewählt, wie sie von Mercedes-Benz beim Typ SLK verwendet wird. Die eingeschraubte Trennwand aus Magnesium-Druckguss bringt 3,2 Kilogramm auf die Waage, während eine vergleichbare Abtrennung aus Stahlblech etwa sechs Kilogramm wiegt. Mit Magnesium baut man nur um ca. 50% leichter als mit Stahl, obwohl das Dichteverhältnis ungefähr $\frac{1}{4}$ beträgt. Das relativ hohe Gewicht des Magnesiumbauteils ist durch eine an den Werkstoff angepasste Konstruktionsweise bedingt.⁶⁷

Im direkten Vergleich zwischen Magnesium und Stahl fällt der wesentlich höhere Energiebedarf bei der Gewinnung des Leichtmetalls im Gegensatz zum Rohstahl auf. Durch die geringere Dichte und damit leichtere Bauweise kann dieser Nachteil jedoch in der Nutzungsphase (benzinbetriebener PKW mit einer Lebensdauer von 12 Jahren und einer Fahrleistung von 15.000 km/a) wieder wettgemacht werden. Es wurde ein gewichtsbedingter Kraftstoffmehrverbrauch von 0,4 l/100km*100kg angenommen (gleiche Bedingungen wie für den Vergleich der Querlenker).

⁶⁷ Motormove Online, 1999

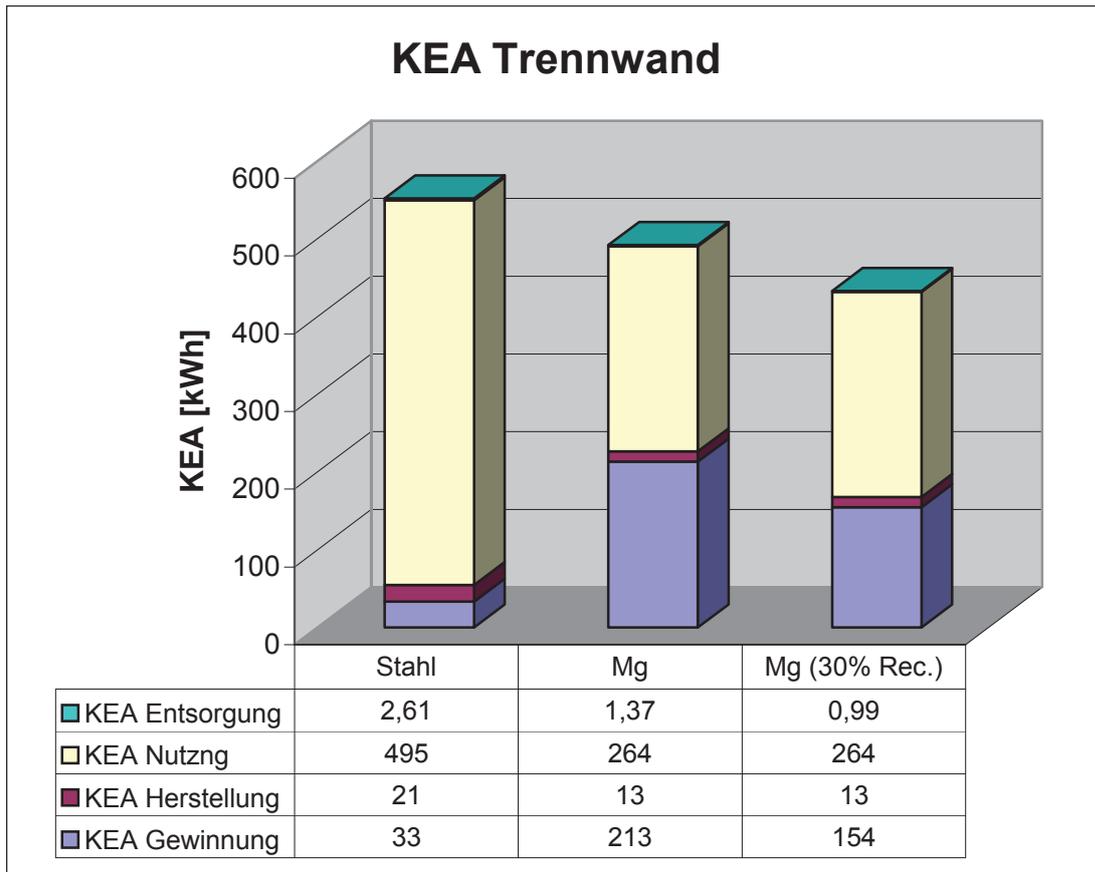


Abbildung 6-6: KEA für eine Trennwand in Magnesium bzw. Stahlausführung

Der KEA der Entsorgungsphase fällt bei einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus nicht mehr signifikant ins Gewicht. In Abbildung 6-6 ist ebenso ersichtlich, dass bei einer Recyclingquote von 30%, also wenn 30% des primären Magnesiums durch sekundäres substituiert werden, der KEA des Bauteils um 9% verringert wird. Durch ein verstärktes Recycling lassen sich also bedeutende ökologische Verbesserungen im Lebenszyklus der Magnesiumtrennwand, vor allem wegen des niedrigeren Energiebedarfes, erreichen.

7 Zusammenfassung

Das Leichtmetall Magnesium wird vor allem in der Fahrzeug- und Flugzeugindustrie, aber auch zur Herstellung von Gehäusen von Elektronik- und Telekommunikationsgeräten eingesetzt. Das Recycling des Schrotts, der in Form von Abfallprodukten und Produktionsausschuss anfällt, scheint sowohl in ökologischer als auch ökonomischer Sicht sinnvoll, da vor allem durch das Wegfallen der Rohmetallgewinnung der Energiebedarf bedeutend verringert werden kann. Die Wiederverwendung von Altstoffen sollte nicht nur im Hinblick auf geringere Produktionskosten in Betracht gezogen werden, sondern kann auch einen Ansatzpunkt zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise bieten.

Für das Recycling von Magnesium werden zurzeit zwei grundlegende Verfahrensprinzipien angewendet, nämlich das Umschmelzen mit bzw. ohne Flussmittel. Für diese Arbeit wurden zwei Anlagen der Firma Rauch-Fertigungstechnik durchleuchtet und einer ökologischen Bewertung unterzogen. Eine Anlage, die kontinuierlich und ohne Flussmittel produziert, und vor allem für das In-house-Recycling und für hochwertigen Schrott konzipiert ist und eine diskontinuierlich arbeitende Anlage für das Recycling mit Flussmittel, die auch für das Umschmelzen von minderwertigen Schrottklassen geeignet ist.

Für beide Verfahren stellt Erdgas den Hauptenergieträger dar, wobei das diskontinuierliche Verfahren mit 2,88 kWh/kg mehr als doppelt soviel Erdgas zum Umschmelzen von einem Kilogramm Magnesium verbraucht wie das kontinuierliche. Der Verbrauch an elektrischer Energie ist mit ca. 0,8 kWh/kg bei beiden Verfahren in etwa gleich. Am meisten elektrische Energie wird für die Abgasbehandlung, gefolgt von Shredder und Warmhalteofen aufgewendet. Das Metallausbringen, also jener Teil des eingeschmolzenen Schrotts, der in das Produkt in Form von Massel übergeht, beträgt beim Schmelzverfahren mit Flussmittel 91% und beim Schmelzen ohne Flussmittel, vor allem wegen dem Einsatz hochwertigerer Schrottklassen, 94%.

Unterzieht man die beiden Recyclingverfahren einer Bewertung mit dem Kumulierten Energieaufwand (KEA), so ergeben sich für das diskontinuierliche Rückschmelzen um ca. 75% höhere primärenergetische Aufwendungen. Dies ist einerseits bedingt durch den höheren Erdgasverbrauch und andererseits dadurch, dass für das diskontinuierliche Verfahren, aufgrund der minderen Schrottqualität, mehr Legierungsmetalle wie Aluminium, Beryllium, Zink und Mangan benötigt werden. Die primärenergetischen Aufwendungen für Transport und Betriebshilfsmittel wie Flux, Schutzgase und Schichten fallen nicht ins

Gewicht. Im Vergleich zur Produktion von Primärmagnesium stellen beide Recyclingverfahren eine signifikante Verbesserung dar. Sekundärmagnesium aus dem Umschmelzen mit Salz hat 10,5% und Mg aus dem salzlosen Verfahren nur 6% der primärenergetisch bewerteten Aufwendungen von Primärmagnesium.

Bei der Bewertung des kontinuierlichen Magnesiumrückschmelzens mit dem Sustainable Process Index (SPI) bedingt die Bereitstellung von Erdgas den größten Flächenverbrauch gefolgt von der Bereitstellung menschlicher Arbeitskraft und dem elektrischen Energiebedarf. Der SPI des diskontinuierlichen Verfahrens ist mehr als doppelt so hoch als der des kontinuierlichen. Dies ist in erster Linie auf den höheren Erdgasverbrauch aber auch auf die größeren Transportwege zum Recyclingunternehmen und den höheren Bedarf an Aluminium zum Auflegieren zurückzuführen.

Um die Umweltauswirkungen der Verwendung des Leichtmetalls Magnesium in der Fahrzeugindustrie beurteilen zu können, wurde die Lebenswege von zwei Magnesiumbauteilen mit dem Kumulierten Energieaufwand bewertet und mit Bauteilen aus Stahl bzw. Aluminium verglichen, die durch die Magnesiumbauteile substituiert werden können. Auf den KEA des gesamten Lebenszyklus hat vor allem die Nutzungsphase des Bauteils und die Gewinnung des Rohstoffs, also Magnesium, Aluminium oder Stahl wesentliche Auswirkungen. Die Energieaufwendungen für die Herstellung des Bauteils und die Entsorgung fallen nicht ins Gewicht.

Bei der Rohstoffgewinnung zeichnet sich Stahl durch die bei weitem niedrigsten Energieaufwendungen aus, was allerdings in der Nutzungsphase mehr als kompensiert wird. Die Gewinnung des Rohstoffs Aluminium benötigt um ca. 38% mehr Primärenergie als Magnesium.

In der Nutzungsphase ergibt sich für ein Magnesiumbauteil durch den gewichtsbedingten Kraftstoffminderverbrauch eine Reduktion des $KEA_{Nutzung}$ um ca. 30% im Vergleich zu Aluminium und im Vergleich zu Stahl um ca. 50%. Es ist nicht möglich allein aus der Dichte der Werkstoffe auf das Gewichtsverhältnis der Bauteile zu schließen, da ein werkstoffgerechtes Konstruieren notwendig ist.

Durch das Recycling von Magnesium können die primärenergetisch bewerteten Aufwendungen des gesamten Lebenszyklus eines Bauteils signifikant verringert werden. So ergibt ein Rücklaufverhältnis von 30% eine Reduktion des KEA_{gesamt} von immerhin 9%.

8 **Abbildungsverzeichnis**

ABBILDUNG 2-1: ENTWICKLUNG DES BEDARFS AN DRUCKGUSSTEILEN AUS MAGNESIUM IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE	11
ABBILDUNG 2-2: DICHTEVERGLEICH VERSCHIEDENER WERKSTOFFE	12
ABBILDUNG 3-1: SCHEMA EINES MATERIALSTAMMBAUMS FÜR DIE HERSTELLUNG	16
ABBILDUNG 3-2: BESTANDTEILE EINER ÖKOBILANZ	17
ABBILDUNG 3-3: ZEITLICHER VERLAUF DER MIPS ÜBER DEN LEBENSWEG	24
ABBILDUNG 4-1: BLOCKSCHALTBILD DES KONTINUIERLICHEN RÜCKSCHMELZVERFAHRENS	33
ABBILDUNG 4-2: STOFF- UND ENERGIESTRÖME IM SALZLOSEN RÜCKSCHMELZVERFAHREN	34
ABBILDUNG 4-3: STOFF- UND ENERGIESTRÖME BEIM DISKONTINUIERLICHEN RÜCKSCHMELZEN ..	35
ABBILDUNG 5-1: WÄGUNG DES MG-SCHROTTS	36
ABBILDUNG 5-2: STROMWANDLER MSO	38
ABBILDUNG 5-3: STROMZANGE FLUKE 31	38
ABBILDUNG 5-4: GASZÄHLER UND VOLUMENKORREKTOR	40
ABBILDUNG 5-5: ANTEIL DER ELEKTRIZITÄT BZW. DES ERDGASES AM GESAMTENERGIEBEDARF (LINKS) UND ANTEILE DER EINZELNEN VERBRAUCHER AM ERDGASVOLUMEN (RECHTS)	42
ABBILDUNG 5-6: ELEKTRISCHER ENERGIE-VERBRAUCH DES KONTINUIERLICHEN RÜCKSCHMELZENS	43
ABBILDUNG 5-7: ENERGIEVERBRAUCH DES MAGNESIUM-SCHMELZOFENS BEIM HOCHFahren ...	44
ABBILDUNG 5-8: ERDGASVERBRAUCH BEIM KONTINUIERLICHEN RÜCKSCHMELZEN	45
ABBILDUNG 5-9: ELEKTRISCHER ENERGIEVERBRAUCH BEIM KONTI-RÜCKSCHMELZEN	47
ABBILDUNG 5-10: ENERGIETRÄGER BEIM BATCH-VERFAHREN	48

ABBILDUNG 6-1: LEBENSZYKLUS EINES MAGNESIUM-BAUTEILS VON DER WIEGE BIS ZUR BAHRE	53
ABBILDUNG 6-2: KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND FÜR DAS RÜCKSCHMELZEN VON MAGNESIUM	56
ABBILDUNG 6-3: DER SUSTAINABLE PROCESS INDEX DES KONTI-VERFAHRENS	60
ABBILDUNG 6-4: ANTEILE DER EINZELNEN SACHBILANZPOSTEN AM SPI DES DISKONTINUIERLICHEN PROZESSES	61
ABBILDUNG 6-5: KEA QUERLENKER	67
ABBILDUNG 6-6: KEA FÜR EINE TRENNWAND IN MAGNESIUM BZW. STAHLAUSFÜHRUNG.....	69

9 Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: VERWENDUNG VON MAGNESIUM	8
TABELLE 2-2: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER MAGNESIUMLEGIERUNG AZ91	9
TABELLE 2-3: EIGENSCHAFTEN DER MAGNESIUMLEGIERUNG AZ91	10
TABELLE 3-1: ABKÜRZUNGEN DER TEILFLÄCHEN.....	18
TABELLE 4-1: SCHROTTKLASSEN FÜR MAGNESIUM	27
TABELLE 4-2: PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN UND ÖKOTOXIKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN VON HFC-134A.....	29
TABELLE 4-3: ÜBLICHE SCHMELZ UND RAFFINERIESALZE	31
TABELLE 4-4: TECHNISCHE DATEN DER ALU-STOP LC25 BORNITRID-SCHLICHTE	32
TABELLE 5-1: ENERGIEBEDARF KONTI-VERFAHREN BEI VERSCHIEDENEN BETRIEBZUSTÄNDEN.	40
TABELLE 5-2: ANTEIL DER EINZELNEN ANLAGENTEILE AM ELEKTRISCHEN ENERGIEVERBRAUCH BEIM KONTI-VERFAHREN	44
TABELLE 5-3: STOFFSTRÖME BEIM KONTINUIERLICHEN RÜCKSCHMELZVERFAHREN.....	48
TABELLE 5-4: VERBRAUCH AN ELEKTRISCHER ENERGIE BEIM BATCH-VERFAHREN	49
TABELLE 5-5: STOFFSTRÖME BEIM DISKONTINUIERLICHEN RÜCKSCHMELZEN.....	50
TABELLE 6-1: CHARAKTERISIERUNG DER NICHT-MONETÄREN BEWERTUNGSVERFAHREN.....	51
TABELLE 6-2: KEA RÜCKSCHMELZEN (ANGABEN IN [kWh/1000kg Mg])	57
TABELLE 6-3: DER SUSTAINABLE PROCESS INDEX FÜR DAS KONTINUIERLICHE RÜCKSCHMELZEN BEZOGEN AUF 1 KG SEKUNDÄRES MAGNESIUM.....	59
TABELLE 6-4: DER SUSTAINABLE PROCESS INDEX FÜR DAS DISKONTINUIERLICHE RÜCKSCHMELZEN BEZOGEN AUF 1 KG SEKUNDÄRES MAGNESIUM.....	62
TABELLE 6-5: KEA PRIMÄRPRODUKTION IN [kWh/kg]	65

TABELLE 6-6: KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND FÜR DIE BEREITSTELLUNG VON ALUMINIUM FREI
HALBWERKZEUG UND KEA FÜR ALUMINIUM-PROFILE 66

10 Literatur

AHC Oberflächentechnik (Hrsg.): Werkstoffguide, Online im Internet: URL: <<http://www.ahc-oberflaechentechnik.de/werkstoffguide/leichtmetall.htm#1>> (Abruf 06.08.2001)

AHC Oberflächentechnik (Hrsg.): Werkstoffguide Leichtmetalle, Online im Internet: URL: <<http://www.ahc-oberflaechentechnik.de/werkstoffguide/leichtmetall.htm#2>> (Abruf: 10.08.2001)

Amt der Oö. Landesregierung Abteilung Umweltschutz/Abfallwirtschaft (Hrsg.): Leitfaden für einen sicheren Umgang mit Aluminium und Magnesium, Online im Internet: URL: <http://www.ooe.gv.at/umwelt/abfall/grundlagen/Magnesium_Broschuere.pdf> (Stand 2001, Abruf 25.11.2003)

Antrekowitsch: Metallrecycling, 2000, Vorlesungsskriptum, Institut für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben, S 178-187

Aune, T.K.; Westengen, H.: Magnesiumdruckguss – Legierungen und Eigenschaften. In: Gießerei-Praxis, 1996 Heft 19/20, Seite 398-403

Baumgartner, Rupert: Öko-Controlling, Vorlesungsskriptum, Institut für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben, 2001

Beffort, Oliver; Hausmann, Christian: Magnesium – ein Leichtmetall für die Zukunft, Online im Internet: URL: <http://www.empa.ch/deutsch/FACHBER/ABT126/1.3.hybrid/1.3.8.literatur_mmc/literatur/magnesium/mg_21_century/mg_zukunft.pdf> (Abruf 23.07.2001)

Beffort, Oliver; Hausmann, Christian: Leichtmetalle - Magnesium, Online im Internet: URL: <http://www.empa.ch/deutsch/FACHBER/ABT126/1.3.hybrid/1.3.8.literatur_mmc/literatur/light_metals_general/Mg-composites.pdf> (Abruf 23.07.2001)

Büro für angewandte Mineralogie Dr. Stephan Rudolph (Hrsg.): Untersuchungen zum Einsatz von Bornitrid in Gießereischichten zum Vergießen von Aluminium- und Magnesium-Legierungen, Online im Internet: URL: <<http://www.a-m.de/>> (Stand 2000; Abruf 22.11.2002)

Corradini, R.; Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil III Metalle- München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Juli 1999

CSIRO Australia (Hrsg.): Alternative Magnesium Cover Gases: Reducing Greenhouse Gas Emissions, Online im Internet: URL: <<http://www.cmst.csiro.au/castalloys/covergas.htm>> (Abruf 07.08.2001, Stand 01.08.2000)

Department of Science and Technology (TIFAC) Government of India (Hrsg.): HFC-134a An Ozone friendly CFC substitute, Online im Internet: URL: <<http://www.tifac.org.in/do/hgt/case/cfc.htm>> (Abruf 03.08.2001)

Ditze, A.; Scharf, C.; Schwerdtfeger, K.: Recycling von Magnesiumlegierungen, DGM-Seminar „Magnesium – Eigenschaften, Potentiale und Anwendungen“. - 28.10. -30.10.1998

Eberle, Reinhard: Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau, Diss., TU Berlin 2000

Europäische Forschungsgemeinschaft Magnesiumguss e.V.: 8. Magnesium Abnehmerseminar, 14.15. Juni 2000, Aalen, ISBN 3-932291-21-2

Europäisches Institut für Normung: Ökobilanz, EN ISO 14040, S 7

Grossart, Silvia: Energie- und Stoffstrombetrachtungen über den Lebenszyklus eines Aluminium-Gussbauteils, Diplomarbeit, Leoben, Montanuniversität, 2000

Hausladen, Gerhard: Skript Heiztechnik, Online im Internet: URL: <<http://www.tga.uni-kassel.de/studium/heiztechnik.pdf>> (Stand Februar 1998, Abruf 27.11.2003)

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart (Hrsg.): Gabi4, Online im Internet: URL: <<http://www.gabi-software.com/>> (Abruf 22.11.2002)

Jahrbuch Stahl 1996 Band 1: Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1995

Kammer, Katrin: Magnesium Taschenbuch- Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2000, S 49-73

Koschuh, Werner: LCA-Forum, LCA-Tool, Online im Internet: URL: <<http://members.aon.at/nachhaltigeswirtschaften/download.html>> (Stand November 2000; Abruf 22.11.2002)

Krotschek, Christian: Prozessbewertung in der nachhaltigen Wirtschaft, Diss., Technische Universität, Graz, 1995

motormove online (Hrsg.): Der Mercedes-Benz SLK, Online im Internet: URL
<http://www.schwab-kolb.com/dcnews28.htm> (Abruf 30.08.2002, Stand 1999)

Rauch Schmelztechnik (Hrsg.): Melting Technique, Online im Internet: URL:
<<http://www.rauch-ft.com>> (Abruf 22.11.2002)

Refrigerant Supply Inc. (Hrsg.): R-134a Tetrafluoroethane, Online im Internet: URL:
<<http://www.refrigerant-supply.com/r-134a.htm>> (Abruf 03.08.2001, Stand 1999)

Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MIPS – das Maß für ökologisches
Wirtschaften. - Berlin: Birkhäuser Verlag, 1994, ISBN 3-7643-2959-9

Tripod (Hrsg.): Links to Magnesium Resources, Online im Internet, URL:
<<http://members.tripod.com/Mg/links.htm#finish>> (Abruf: 22.11.2002)

U.S. Environmental Protection Agency (Hrsg.): Cost and emission reduction analysis of
SF6 emissions from magnesium production and parts casting in the United States, Online
im Internet: URL: <[www.epa.gov/outreach/ghginfo/reports/pdf/
chapter_04_magnesium.pdf](http://www.epa.gov/outreach/ghginfo/reports/pdf/chapter_04_magnesium.pdf)> (Abruf 07.08.2001, Stand: Juni 2001)

U.S. Geological Survey Minerals Information Team (Hrsg.): Magnesium Statistics and
Information, Online im Internet: URL:
<<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/>> (Stand 12.09.2002; Abruf
22.11.2002)

Umweltbundesamt (Hrsg.): Kumulierter Energieaufwand, mehr als eine Zahl, Online im
Internet: URL: <<http://www.oeko.de/service/kea/>> (Abruf 14.07.2003)

Umweltbundesamt (Hrsg.): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-
Instrumente (ProBas), Online im Internet: URL: [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-
daten/daten/baum/](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/baum/) (Abruf 22.11.2002)

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Kumulierter Energieaufwand Begriffe, Definitionen,
Berechnungsmethoden.- Berlin: Beuth Verlag, 1997; VDI 4600

Uni Terra – Kindler & Glied (Hrsg.): Rutherford Lexikon der Elemente, Online im Internet:
URL: <<http://www.uniterra.de/rutherford/ele012.htm>> (Stand 1999, Abruf 13.04.2003)

Wichmann, Ch.: Pricing The Environment, Online im Internet: URL: <[http://www.uni-
hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/wichman.pdf](http://www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/wichman.pdf)> (Stand 10.10.2002, Abruf 01.05.2003)

Wuppertal Institut - Abteilung Stoffströme und Strukturwandel (Hrsg.): MI-Werte, Online im Internet: URL: <<http://www.wupperinst.org/Projekte/mipsonline/download/MIWerte.pdf>> (Stand 1998, Abruf 28.11.2003)

11 Anhang

11.1 Berechnung des Wärmeverlustes am Masselgießband:

Magnesiumschmelze mit durchschnittlich 605°C beim Befüllen der Formen kühlt bis zum Auswurf der Masse auf durchschnittlich 301°C ab (Temperaturwerte stammen aus Messungen mit Thermoelement). Das durchschnittliche Gewicht von einem Mg-Massel beträgt in etwa 7 kg:

			<u>* 7 kg AZ91</u>
605 → 595°C:	$c_p = 1,42 \text{ kJ/kgK}$	→	99,40 kJ
Specific heat of fusion:	370kJ/kg	→	2.590,00 kJ
595 → 470°C:	$c_p = 1,335 \text{ kJ/kgK}$	→	1.168,13 kJ
470 → 301°C	$c_p = 1,2 \text{ kJ/kgK}$	→	<u>1.419,60 kJ</u>
			5.277,13 kJ/Massel

c_p ... spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK

Die Masselformen aus Grauguss werden mit einem Brenner vorgeheizt und haben vor dem Befüllen eine durchschnittliche Temperatur von 138°C. Bis zum Auswurf der Masse erwärmen sich die Formen auf 217°C. Die Temperaturen wurden wiederum aus Messungen der Formen an der Innen- und Außenseite mit einem Thermoelement gemittelt. Das Gewicht der Masselformen wurde durch Wägen mit ca. 21kg bestimmt:

138 → 217°C $c_p = 0,553 \text{ kJ/kgK}$ (der c_p -Wert für eine mittlere Temperatur von 177,5°C wurde durch graphische Interpolation von Literaturwerten⁶⁸ ermittelt)

$$c_p * m * \Delta T = 0,553 * 21 * (138 - 217) = -917,43 \text{ kJ/Form}$$

⁶⁸ Jahrbuch Stahl, 1995

Daraus folgt, dass pro Massel und Form $5277,13 - 917,43 = 4359,70$ kJ in Form von Strahlungswärme, Konvektion und Leitungswärme vom Befüllen der Form bis zum Masselauswurf abgegeben werden.

Bei einer Fertigung von durchschnittlich 1,3 Massel pro Minute ergibt sich eine Wärmeleistung von:

$$1,3 \text{ Massel/min} * 60 \text{ min/h} * 4359,7 \text{ kJ} \cong 340.000 \text{ kJ/h} = 94.440 \text{ J/sec} \cong \underline{\underline{90 \text{ kW}}}$$