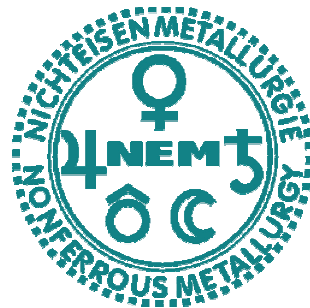


DIPLOMARBEIT

Thema:

Einflussparameter auf das Ausbringen beim Erschmelzen von kontaminierten Aluminiumschrotten



Ersteller:

René Rumpold

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch

DDipl.-Ing. Christoph Wagner

Leoben, 18. März 2011

Einflussparameter auf das Ausbringen beim Erschmelzen von kontaminierten Aluminiumschrotten

Die besonderen Materialeigenschaften und die hohen Recyclingraten des Sekundär-aluminiums machen diesen Werkstoff zu einem unverzichtbaren und zukunftsorientierten Ausgangsstoff für zahlreiche Einsatzgebiete wie die Automobil-, Verpackungs- und Bauindustrie. Um umweltschonende Recyclingprozesse bei einem möglichst hohen Gesamtwirkungsgrad zu realisieren, wird dauerhaft an neuen Konzepten und Anlagen gearbeitet, die sich von den konventionellen Methoden unterscheiden. Einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtprozess und damit auf die Qualität der Sekundäraluminiumprodukte haben Verunreinigungen metallischer (Fe, Cu, Zn), nichtmetallischer (Steine, Stäube), organischer (Lacke, Beschichtungen, Öle) und anorganischer Natur (Oxide), welche sich als Anhaftungen und freie Fremdstoffe auf den eingesetzten Vorstoffen befinden. Um diese entstehenden Qualitätsverluste zu kompensieren, sind kostenintensive Arbeitsschritte vor und während des Schmelzprozesses notwendig. Diese Problematik soll durch die Ermittlung des Einflusses von Anhaftungen der Aluminiumschrotte auf die Ausbringungsrate in einem Zweikammer-Herdofen (Closed-Well-Ofen) untersucht werden. Voraussetzung dafür ist eine umfangreiche Charakterisierung der Schadstoffe bei den eingesetzten Materialien. Im experimentellen Teil der Diplomarbeit wird auf folgende Untersuchungen eingegangen:

- Charakterisierung des Einsatzmaterials
- Trocknungsversuche
- Abschwelversuche
- Schmelzversuche

Aufgrund der Kenntnis von Einflussparameter auf die Ausbringung können gezielte Optimierungen an der bestehenden Ofenanlage durchgeführt werden, wodurch eine Verringerung des Brennstoffeinsatzes (damit auch der CO₂-Anfall), der anfallenden Krätzemenge und des Staubanteils erfolgt. Gleichzeitig erhöht sich das Wertmetallausbringen sowie die Produktqualität. Dadurch wird eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage erreicht und Kosten gespart.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Affidavit

I declare in lieu oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

René Rumpold

Danksagung

Für die fachliche Betreuung möchte ich mich besonders bei Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch bedanken.

Bei der Durchführung der Arbeit hat mich im Speziellen Herr DDipl.-Ing Christoph Wagner unterstützt, wofür ich herzlich danke.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Franz Dobesberger und der Hütte Klein-Reichenbach, die durch Inauftraggeben der Diplomarbeit und aufgrund der freundlichen Unterstützung den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben.

Bedanken möchte ich mich für die ausgezeichnete Betreuung bei Herrn Herbert Flankl MSc., der durch häufige Diskussionen, Anregungen und Hilfestellungen einen wesentlichen Beitrag zur Diplomarbeit leistete.

Allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Instituts für Nichteisenmetallurgie, die mich bei der Durchführung dieser Diplomarbeit unterstützt haben, möchte ich ebenfalls einen Dank aussprechen.

.

Einflussparameter auf das Ausbringen beim Erschmelzen von kontaminierten Aluminiumschrotten

Die Sekundäraluminiumproduktion gewinnt vor allem in Industriestaaten immer mehr an Bedeutung. Das wichtigste Einsatzmaterial für das Aluminiumrecycling ist Schrott. Je nach Anwendung des Aluminiums werden häufig dekorative oder schützende Schichten aufgebracht, die sich auch an den Sekundärmaterialien wiederfinden. Diese meist organischen Beschichtungen beeinflussen die Umschmelzverluste bzw. das Krätzebildungsverhalten beim Recycling, wodurch es zu verringertem Ausbringen kommt. Weiters können durch die gebildeten Abschwelgase unerwünschte Emissionen auftreten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Abschwel- und Schmelzverhalten diverser Schrotte charakterisiert. Daneben fanden auch Trocknungsversuche statt, um die maximale Feuchtigkeit an diesen Materialien zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Daten können der Gesamtverlust sowie die entstehende Krätze menge für die beprobten Materialien vorhergesagt werden. Weiters sind die Verluste auf die jeweiligen Prozesse aufgeschlüsselt. Die Ergebnisse für die einzelnen Schrottproben sind in Sankey-Diagrammen zusammengeführt.

Parameters influencing the output during melting of contaminated aluminum scrap

The secondary aluminum production becomes more and more important especially in industrial countries. The main raw material for aluminum recycling is scrap. In some applications are decorative or protective coatings on the aluminium, which can also be found on the scrap. These mostly organic coatings affect the melting losses and the dross formation during recycling, so that the aluminum output decreases. Furthermore unwanted emissions can be produced by the pyrolysis gases. The main scope of this work is the determination of the pyrolysis and melting behavior of different scrap samples. Additionally some drying tests were performed to identify the maximum moisture content. The determined data can be used to calculate the overall losses and the dross formation of the tested materials. Finally the results are combined in so called Sankey-diagrams which show the input and output in detail.

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Statistik.....	2
1.2	Recyclingquote.....	3
2.	ALUMINIUMRECYCLING	5
2.1	Schrottarten.....	5
2.1.1	Neuschrott.....	5
2.1.2	Späne.....	6
2.1.3	Altschrott.....	6
2.2	Aufbereitungstechnologien.....	8
2.2.1	Zerkleinerung.....	8
2.2.2	Abtrennen der freien Verunreinigungen.....	8
2.2.3	Abtrennen der gebundenen Verunreinigungen.....	10
2.3	Schmelztechnologien.....	13
2.3.1	Zweikammerofen.....	15
2.3.2	Drehtrommelofen.....	16
3.	FEUCHTIGKEIT BEI ALUMINIUMSCHROTTEN	18
3.1	Eintrag von Feuchtigkeit.....	18
3.2	Auswirkungen von feuchtem Einsatzmaterial.....	18
4.	ABSCHWELEN VON ORGANISCHEM MATERIAL	20
4.1	Organische Verunreinigungen.....	20
4.2	Abschwelen.....	22
5.	SCHMELZVERHALTEN VON ALUMINIUMSCHROTTEN	25
5.1	Krätzebildung.....	25
5.1.1	Abschwelrückstände.....	26

5.1.2	Fremdmetalle	27
5.1.3	Schrottforn	28
5.1.4	Temperaturführung	29
5.1.5	Kapillareffekte	30
6.	CHARAKTERISIERUNG DES EINSATZMATERIALS	31
6.1	Gebrauchte Getränkedosen	31
6.2	Jalousielamellen	32
6.3	Profile	33
6.4	Spenglerblech	34
6.5	Foliertes Spenglerblech	35
7.	BESTIMMUNG DES ANTEILS AN ORGANISCHER FRAKTION	36
8.	TROCKNUNGSVERHALTEN	39
8.1	Versuchsaufbau und -durchführung	39
8.1.1	Jalousien	42
8.1.2	Kleinmaterial I	43
8.1.3	Kleinmaterial II	44
8.1.4	Spenglerblech I	45
8.1.5	Spenglerblech II	46
8.1.6	Foliertes Spenglerblech	47
8.1.7	Schredder I	48
8.1.8	Schredder II	49
8.1.9	Kühler	50
8.1.10	Profile I	51
8.1.11	Profile II	52
8.2	Ergebnisse der Trocknungsversuche	53
9.	ABSCHWELVERHALTEN	55
9.1	Versuchsaufbau und -durchführung	55
9.2	Ergebnisse der Abschwelversuche	56

9.2.1	Profile	56
9.2.2	Dosen	59
9.2.3	Jalousielamellen	61
9.2.4	Spenglerblech	64
9.2.5	Foliertes Spenglerblech.....	66
9.2.6	Zusammenfassung.....	68
10.	SCHMELZVERHALTEN	70
10.1	Versuchsaufbau und -durchführung	70
10.2	Ergebnisse der Schmelzversuche	71
11.	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	76
11.1	Trocknungsverluste	76
11.2	Abschmel- und Schmelzverluste	77
11.3	Gesamtverluste	79
12.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	83
13.	LITERATURVERZEICHNIS	84
14.	TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS	86
15.	ANHANG.....	90

1. Einleitung

Das Wiederverwerten von Metallen bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Definitionsgemäß bedeutet der Begriff Recycling die Aufarbeitung von bereits genutzten Rohstoffen zur Wiederverwendung. Vorteile sind: [1]

- Schonung von Primärrohstoffen (Erze)
- Energieeinsparung
- Schonung von Deponiekapazitäten
- verringerte Emissionen

Die Schonung von Primärrohstoffen spielt beim Aluminium eine untergeordnete Rolle, da der Aluminiumgehalt in der Erdkruste sehr hoch ist und sich somit große Reserven für den Primärrohstoff ergeben. [1, 2, 3]

Ein wichtiger Punkt in Bezug auf die Aluminiumherstellung ist die Energie. Die Primärherstellung von Aluminium über Bayerprozess und Schmelzflusselektrolyse ist sehr energieintensiv und birgt somit ein hohes Einsparungspotenzial. In Abbildung 1 ist der Energieverbrauch der Primär- und Sekundärerzeugung gegenübergestellt. Der grüne Balken zeigt die Herstellroute über Bauxit und der blaue jene über Schrott. Im Vergleich lässt sich eine Energieeinsparung von bis zu 95 % durch Recycling erzielen. [1, 2, 3]

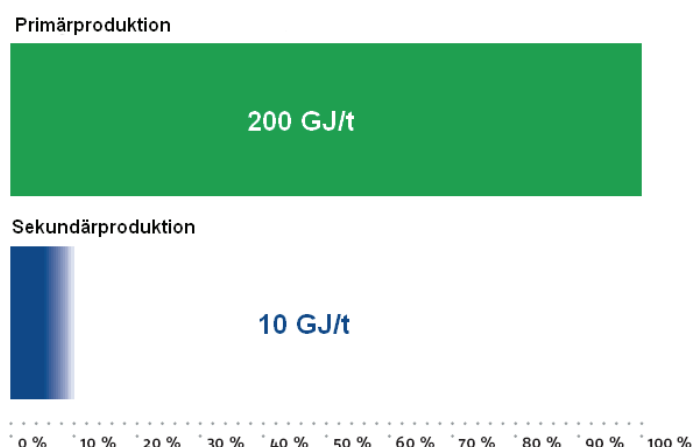


Abbildung 1: Energieverbrauch für die Aluminiumherstellung [2]

Der Hauptverbraucher an Energie bei der Primärherstellung ist die Schmelzflusselektrolyse, welche Energie in elektrischer Form benötigt, um das sehr stabile Aluminiumoxid zu zerlegen. Insgesamt beträgt der Energieverbrauch ca. 200 GJ/t Aluminium. Bei der Aluminiumproduktion durch Recycling ist der Schrott lediglich aufzuschmelzen und

gegebenenfalls zu reinigen (ca. 10 GJ/t). Daher resultiert dieser enorme Unterschied bezüglich Energieverbrauch. [2,4]

Durch die stetig sinkenden Deponiekapazitäten besteht die Notwendigkeit des Wiederverwertens von Metallen. Bei der Herstellung von Aluminium aus den Primärrohstoffen fällt neben dem Wertmetall noch Rotschlamm an. Dieser Rückstand, der momentan nicht wirtschaftlich aufarbeitbar ist, muss deponiert werden. Zusammenfassend werden durch die Sekundärherstellung einer Tonne Aluminium folgende Emissionen verringert: [2]

- Bauxitrückstände um 1300 kg
- Kühlwasser um 15.000 l
- Prozesswasser um 860 l
- CO₂ um 2000 kg
- SO₂ um 11 kg

Nachfolgend sind Statistiken, Recyclingquoten und allgemeine Informationen zum Recycling von Aluminium erläutert.

1.1 Statistik

Aluminium ist nach Stahl das am häufigsten produzierte Metall und somit das mengenmäßig wichtigste Nichteisenmetall. Der Jahresweltverbrauch betrug 2009 etwa 48 Mio. t und wird sich laut IAI (International Aluminium Institute) bis 2020 verdoppeln. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Aluminiumproduktion in den Jahren 1950 bis 2009. Es ist zu erkennen, dass die Aluminiumproduktion vor allem in den letzten zehn Jahren ein sehr starkes Wachstum aufweist. [3]

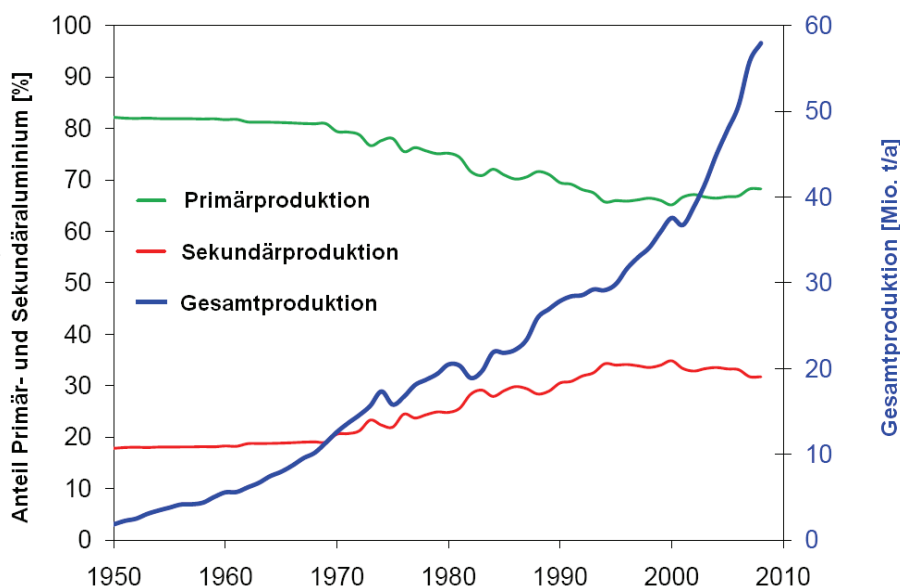


Abbildung 2: Aluminiumproduktion in den Jahren 1950 bis 2009 [3]

In Abbildung 2 sind auch die Anteile von Primär- und Sekundärproduktion dargestellt. Hierbei ist von 1970 bis 2000 eine stetige Steigerung der Recyclinganteile zu erkennen. Aufgrund der stark gestiegenen Nachfrage in den Jahren 2000 bis 2008 musste die Primärerzeugung erhöht werden und der Anteil an Sekundäraluminium sank bzw. blieb konstant obwohl in absoluten Zahlen eine Steigerung der Produktion aus sekundären Rohstoffen festzustellen war. Aufgrund verbesserter Recyclingtechnologien und verstärktem Materialrücklauf wird sich der Sekundäranteil laut IAI (International Aluminium Institute) in Zukunft wieder erhöhen.

1.2 Recyclingquote

Die Recyclingquote stellt das Verhältnis von produziertem Sekundäraluminium zum vorhandenen Recyclingmaterial dar. Dieser Wert zeigt, wieviel Aluminium durch ungenügende Trennung, schlechte Aufarbeitung etc. für das Recycling verloren geht. In Abbildung 3 sind die Recyclingquoten je nach Anwendungsgebiet für Deutschland und die Europäische Union (EU) aufgezeigt.

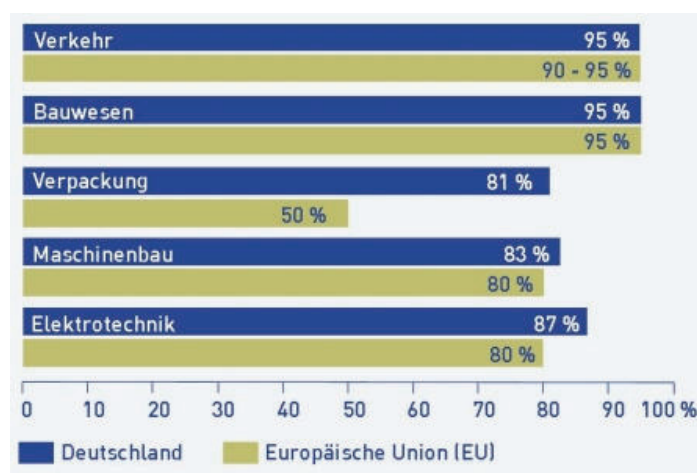


Abbildung 3: Recyclingquoten für Aluminium nach Anwendungsgebieten (2008) [5]

Diese von der GDA (Gesamtverband der Aluminiumindustrie) ermittelten Daten zeigen sehr gute Rückführquoten in der EU mit Ausnahme von Verpackung, da viel Material wie Dosen, Tuben etc. im Hausmüll verloren gehen [3, 5].

2. Aluminiumrecycling

Beim Recycling von Aluminium kommen unterschiedliche Einsatzstoffe, Aufbereitungs- und Schmelztechnologien zum Einsatz. Die nachfolgenden Punkte geben einen Überblick über die verschiedenen Wiederverwertungstechniken.

2.1 Schrottarten

Schrotte gelten als wichtige Einsatzstoffe für die Sekundäraluminiumherstellung. Es werden aber auch Krätzen und Schmelzsalze aufgearbeitet, um restliches Aluminium zurückzugewinnen. Bei der sekundärmetallurgischen Produktion sind vereinfacht folgende Schrottarten zu unterscheiden:

- Neuschrott
- Späne
- Altschrott

Nachfolgend werden die einzelnen Schrottarten näher erläutert.

2.1.1 Neuschrott

Neuschrotte wie z.B. Schnitt- und Stanzreste sind meist produktionsbedingte Abfälle aus Primärhütten, Gießereien oder Formgebungsanlagen. Diese weisen im Vergleich zum Altschrott nur sehr geringe Verunreinigungen auf, welche hauptsächlich in Form von Oxidschichten oder organischen Anhaftungen vorliegen. Die Recyclingrate dieser Schrotte ist sehr hoch, da nur Umschmelzverluste auftreten. Abbildung 4 zeigt typischen Neuschrott der Hütte Klein Reichenbach. [1]



Abbildung 4: Darstellung von Neuschrott (Stanzreste)

2.1.2 Späne

Späne, die durch zerspanende Bearbeitung von Halbzeugen anfallen, sind eigentlich der Untergruppe Neuschrott zuzuordnen und entstehen beim Bearbeiten von Aluminium durch Drehen, Fräsen, Bohren sowie Sägen. Schrotte dieser Art sind sehr häufig mit Öl und Feuchtigkeit verunreinigt (siehe Abbildung 5). [1]



Abbildung 5: Darstellung von Spänen

2.1.3 Altschrott

Altschrott stellt jenes Material dar, das nach Ablauf der Lebensdauer bestimmter Produkte zurückbleibt. Daher richtet sich das Aufkommen dieser Schrottart nach den Anwendungsgebieten für Aluminium. In Abbildung 6 (rechts) sind diese Bereiche angeführt (Stand 2007) und Abbildung 6 (links) zeigt die dazugehörigen Lebenszyklen. Für die Sparte Transport sind zwei unterschiedliche Sektoren festgelegt. Der rote Bereich kennzeichnet jenen für PKW's und LKW's, während der orange Abschnitt für langlebigere Produkte steht, die in Schiffen und bei Eisenbahnen zum Einsatz kommen. [3]

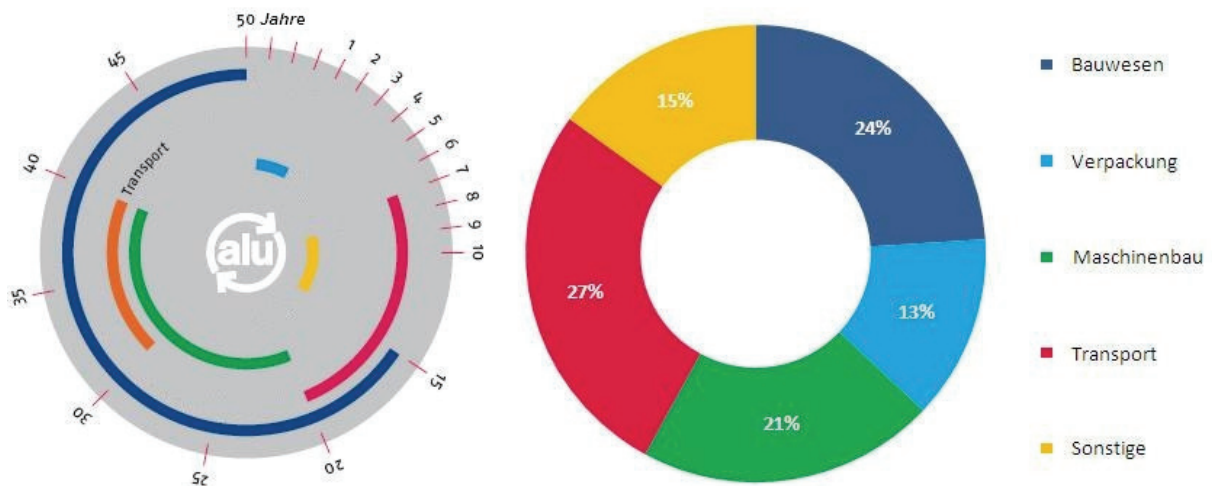


Abbildung 6: Lebensdauer und Anwendungsgebiete für Aluminium [3]

In Abbildung 6 ist zu sehen, dass die Lebensdauer mancher Produkte sehr hoch ist und somit bis zu 50 Jahre vergehen können, bis das Material wieder dem Recyclingprozess zur Verfügung steht. Verpackungsmaterial aus Aluminium steht hingegen meist nach einigen Monaten bis zu einem Jahr wieder zur Verwendung bereit.

Altschrott enthält eine Vielzahl an Verunreinigungen, wie beispielsweise Lacke, Öle, unterschiedlichste organische Verbindungen sowie auch Glas, Karbonfasern oder andere Metalle. Daher muss dieses Einsatzmaterial vor dem eigentlichen Schmelzprozess eine Reihe von Aufbereitungsschritten durchlaufen, um so wenige Verunreinigungen als möglich in das Schmelzaggregat einzubringen. Abbildung 7 stellt einen typischen Altschrott dar. [1, 3]



Abbildung 7: Darstellung von Altschrott

2.2 Aufbereitungstechnologien

Die Aufbereitung der jeweiligen Schrotte erfordert je nach Beschaffenheit des Einsatzmaterials mechanische, chemische, magnetische, elektrische oder thermische Vorbehandlungsschritte. Grundsätzlich sind bei der Aufbereitung folgende Schritte notwendig:

- Zerkleinerung bzw. Aufschluss
- Abtrennen der freien Verunreinigungen
- Abtrennen der gebundenen Verunreinigungen

Nachfolgend wird näher auf die einzelnen Aufbereitungsschritte eingegangen.

2.2.1 Zerkleinerung

Für die Zerkleinerung finden verschiedenste Brechaggregate Anwendung. Die Haupteinsatzgebiete der Brecher sind die Aufarbeitung von Krätzen und Schmelzsalzen aber vor allem auch stark verunreinigter Aluschrott und gebrauchte Getränkedosen (UBC). Für die Zerkleinerung von Aluminiumschrott kommen folgende Maschinen zum Einsatz: [1, 8]

- Prallbrecher
- Hammermühle
- Shredder
- Backenbrecher

Beim Aluminiumrecycling stellt der Shredder das wichtigste Zerkleinerungsaggregat dar, der auch sehr häufig bei der Autoverwertung Anwendung findet. [1] [8]

2.2.2 Abtrennen der freien Verunreinigungen

Das Abtrennen der freien Verunreinigungen ist ein Sortierprozess, der alle Stoffe, die nicht direkt mit dem Aluminium verbunden sind, entfernen soll. Durch die aluminiumspezifischen Eigenschaften wie Dichte, Aussehen usw. lässt sich das Aluminium in mehreren Schritten von seinen Begleitstoffen trennen. Voraussetzung dafür ist ein ausreichender Aufschluss der Vorstoffe. [1, 8]

Für die Sortierung kommen folgende Technologien in Frage:

- Handsortierung
- Magnetscheider

- Wirbelstromabscheider
- Luftstromseparierung
- Zyklon
- Schwimm-Sink-Sortierung

Die Handsortierung ist die älteste Methode. Dabei werden das Aluminium und die Verunreinigungen händisch aus der kontaminierten Schrottfraction geklaubt. Besonders bei Haushaltsmüll oder auch Aluminium- und Kupferkabel führt diese Art der Separation zu guten Trennerfolgen. In Europa bzw. der westlichen Welt haben sich jedoch die automatisierten Sortiermethoden durchgesetzt. Im Gegensatz zur händischen Sortierung sind bei der maschinellen Trennung meist mehrere Schritte notwendig, um das Aluminium herauszufiltern. [1, 8]

Zur Abtrennung von Eisen, Stahl und Nickelbasislegierungen bieten sich Magnetscheider an. Über ein elektromagnetisches Feld kann magnetisches von unmagnetischem Material getrennt werden. Grundsätzlich wird zwischen Magnettrommel und Überkopfmagnetband unterschieden, wobei der letzt genannte eher für grobes Material geeignet ist. [1, 8]

Wirbelstromabscheider nutzen ebenfalls magnetische Felder, wirken jedoch viel selektiver in Bezug auf die Materialvielfalt. So sind auch unmagnetische Stoffe voneinander trennbar. Durch ein Magnetfeld eines Permanentmagneten werden Ströme (Wirbelströme) in elektrisch leitende Teile induziert. Diese führen zu einem Sekundärmagnetfeld gleicher Orientierung wie das Primärfeld. Durch Umpolarisieren des Primärfeldes kommt es zum Abstoßen der magnetisierten Teilchen, die je nach Ausmaß der Magnetisierung stärker bzw. schwächer abgelenkt werden. Die Erzeugung des wechselnden Magnetfeldes erfolgt durch ein Polrad. Die Skizze eines Wirbelstromscheideners ist in Abbildung 8 dargestellt. [1, 8]

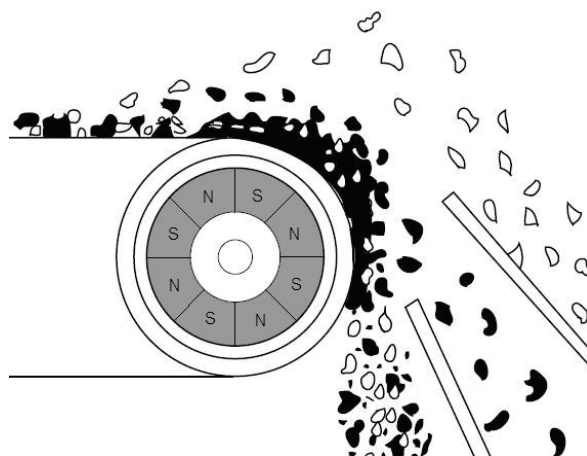


Abbildung 8: Skizze eines Wirbelstromabscheiders [8]

Mit Hilfe dieses Apparates besteht die Möglichkeit, sowohl nichtmetallische Fraktionen als auch verschiedene Metalle voneinander zu trennen. Um eine ausreichende Trennschärfe zu erreichen, müssen die Partikel ähnliche Größe und Form aufweisen. [1, 8]

Weitere Möglichkeiten zur Separierung von Aluminiumschrott ergeben sich durch Ausnutzung der Dichte. Mit Hilfe eines Luftstroms können leichtere Stoffe abgetrennt werden. Solche Luftstromscheider finden bei kommunalen Abfällen, Elektronikschrott aber auch bei Shreddermaterial aus der Automobilverwertung Anwendung. Diese Sortiermaschinen gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen. Die wichtigsten sind der vertikale „Zick-Zack“-Luftscheider für Müll und der „air table“ für Aufarbeitung von Draht- und Kabelschrott sowie Shredderfraktionen. [1, 8]

Zyklone nutzen das Gewicht des zu trennenden Materials, da auf schwere Teilchen in einer Kreisbewegung eine höhere Fliehkraft wirkt als auf leichte. Die schwere Fraktion wird im Zylinder nach außen gedrängt, während das leichtere Material innen bleibt und somit einfach abzutrennen ist. [1, 8]

Eine selektive Trennung kann über Schwimm-Sink-Sortierung erfolgen. Teilchen höherer Dichte sinken ab und jene mit niedrigen Werten steigen auf. Dazu muss die Trennflüssigkeit eine Dichte aufweisen, die zwischen jenen der zu trennenden Stoffe liegt. Durch einen mehrstufigen Prozess sind die einzelnen Verunreinigungen wie Holz (Papier), Kunststoff und Metalle selektiv vom Aluminium entfernbar. [1, 8]

2.2.3 Abtrennen der gebundenen Verunreinigungen

Gebundene Anhaftungen sind jene Verunreinigungen im Aluminiumschrott, die fest mit diesem verbunden sind. Isolierungen, aufgeklebte Folien und Lackierungen gehören dieser Gruppe an. Teilweise können die gebundenen Verunreinigungen über Zerkleinerung und anschließende Sortierung abgetrennt werden. In den meisten Fällen sind jedoch andere Technologien erforderlich. Dazu kommen folgende „Decoating“-Techniken zum Einsatz: [9, 10]

- Nasschemisch
- Mechanisch
- Thermisch

Die nachfolgenden Punkte erläutern die einzelnen Techniken um organisches Material abzutrennen.

Nasschemisches Decoating

Die nasschemische und mechanische Entfernung von gebundenen Verunreinigungen findet nur selten Anwendung und befindet sich teilweise noch im Versuchsstadium. Die Motivation zur Entwicklung solcher Verfahren ist das Wegfallen einer thermischen Behandlung, welche Emissionen wie Dioxine und Furane freisetzen kann.

Das nasschemische Decoating erfolgt über eine Solvent-Extraktion. Dabei löst sich die Beschichtung vom Aluminiumschrott im Extraktionsmittel. Laut Rabah [9] ist bei Dosen als Einsatzmaterial eine vollständige Entfernung der Beschichtung möglich. Im Gegensatz dazu erfolgt beim thermischen Prozess lediglich eine Entfernung des Lackes zu 95 – 97 %. Da das Extraktionsmittel bei der Solvent-Extraktion aufzuarbeiten und der Schrott zu trocknen ist, bevor dieser dem Schmelzprozess zugeführt werden kann, sind weitere Behandlungsschritte notwendig. [9]

Mechanisches Decoating

Eine weitere Möglichkeit zur Entfernung von Beschichtungen bietet die mechanische Aufarbeitung. Eine Variante dazu stellt das Sandstrahlen dar. Dabei entfernen feine Sandkörner die Lackschicht durch Abrasion. Dieser Sand ist nach seinem Einsatz vom organischen Material zu säubern und kann wiederverwendet werden. Der Nachteil des Sandstrahlens ist der verringerte Decoatinggrad im Vergleich zu den anderen Verfahren.

Eine weitere Technologie, um das Beschichtungsmaterial vom Aluminium zu trennen, ist das „Result-Verfahren“, welches sich aus drei Prozessschritten zusammensetzt. Im ersten Schritt findet eine Zerkleinerung des jeweiligen Schrottes statt. Danach gelangt das Material in den so genannten Beschleuniger, wo die Trennung abläuft. Durch das Beschleunigen der Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten und den gleichzeitigen Einsatz von Ultraschall findet eine Separation entlang der Phasengrenzfläche statt. Nach diesem Aufschlussvorgang kann das Material einer Sortierung zugeführt werden. Typische Beispiele für Verbundstoffe, die mit Hilfe dieses Verfahrens trennbar sind: Heizungsrohre, Elektronikschrott, Kabel, Flaschendeckel, Tuben, Verbundfolien und sonstige Aluminiumverbunde. Ungeeignet ist dieser Prozess für massive oder dickwandige Schrotte. [9, 10]

Thermisches Decoating

Die Entfernung von Beschichtungen durch thermische Behandlung ist das zurzeit am wichtigste Verfahren. Durch die Wärmeeinbringung verflüchtigen sich die organischen Verbindungen und das blanke Aluminium sowie die pulverförmigen Rückstände bleiben zurück. Die Hauptbestandteile dieser Rückstände sind Pyrolysekohle und Oxide der Farbpigmente, die sich durch Abklopfen oder Abblasen mittels Druckluft vom Aluminium

abtrennen lassen. Zusätzlich verdampft auch die Feuchtigkeit durch den Wärmeeintrag. Aggregate zum Abtrennen der Beschichtungen können folgendermaßen klassifiziert werden:

- Zweikammeröfen
- Banddecoater
- Festbettreaktor
- Wirbelschichtreaktor
- Gleichstrom- und Gegenstromdrehrohrreaktor

Zweikammeröfen finden außer für sehr groben Schrott heute aufgrund des diskontinuierlichen Betriebs und energetischen Nachteilen nur noch selten Anwendung. [11]

Drehrohrreaktoren werden bevorzugt, wobei sich die Betriebsweise immer nach dem jeweiligen Einsatzmaterial richtet. Da die Schrotte von Recycler zu Recycler stark variieren, ist ein Vergleich bezüglich Effizienz der Aggregate untereinander schwierig. Tabelle 1 zeigt den Vergleich einiger thermischer Decoating-Verfahren. [1, 11, 13]

Tabelle 1: Vergleich von thermischen Decoating-Verfahren [11]

Verfahren	Verfahrenstechnisches Prinzip	Input-Erfordernisse	Output	Abfälle
IDEX	Drehrohr	Keine Einschränkungen	Al stückig, blank	Stäube Aschen
ALCAN	Wirbelschicht		Al stückig, blank	
Intal	Drehtrommel	Nur für Späne	Späne blank	
Result	Ultraschall (kalter Prozess)	Nicht für massive oder dicke Schrotte	Al-Granulate	Stäube Organik

2.3 Schmelztechnologien

Nach der Schrottaufbereitung erfolgt das Erschmelzen der reinen Einsatzstoffe. Abbildung 9 zeigt einen Überblick von den verschiedenen Schmelztechnologien.

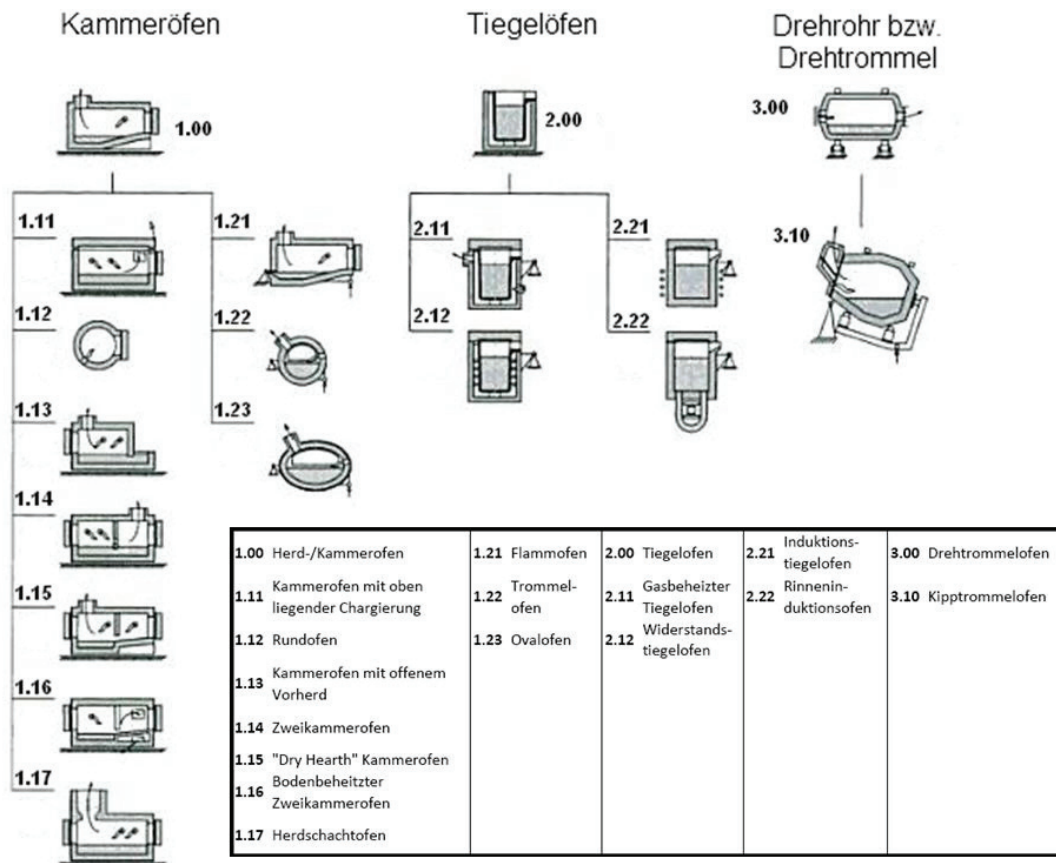


Abbildung 9: Überblick der Schmelztechnologien [1]

Bei den Flamm-, Trommel- und Ovalöfen handelt es sich um kippbare Aggregate, während die Kammeröfen, der Rund- und Herdschachtofen als stationäre Aggregate ausgeführt sind. Wie schon bei der Aufbereitung hängt die verwendete Technologie stark vom Einsatzstoff ab. Daher gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Aggregate, die meist einander ähneln. Aus Abbildung 10 sind die jeweiligen Einsatzgebiete der verschiedenen Bauarten zu entnehmen.

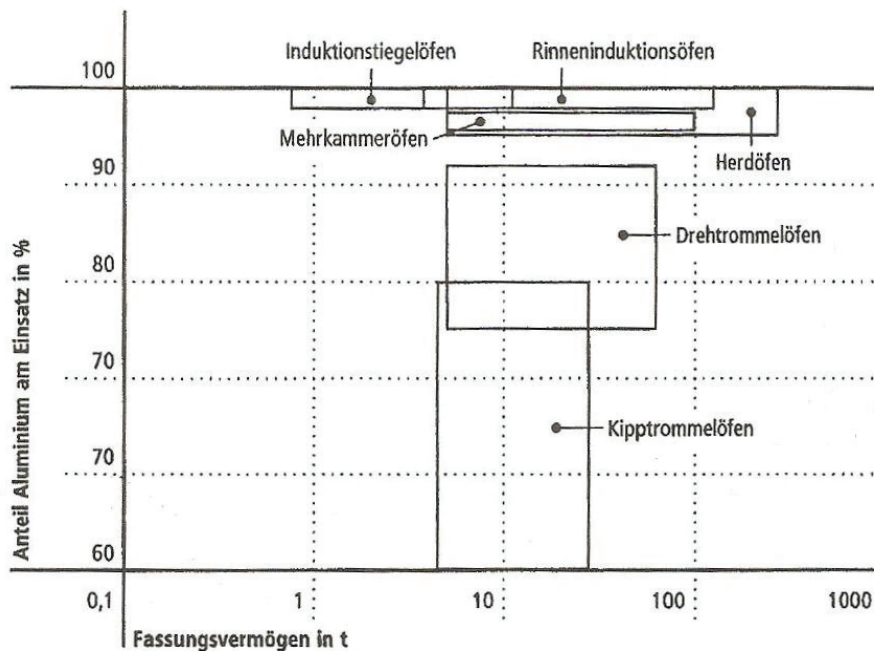


Abbildung 10: Einsatzgebiete der verschiedenen Öfen [14]

Zu erkennen ist, dass sich die Trommelöfen in Verbindung mit einer Salzschlacke auch für stark kontaminiertes Material eignen, während Tiegelöfen reine Umschmelzaggregate sind, das heißt, nur Schrott mit geringsten Verunreinigungen verarbeiten.

Beim Aluminiumrecycling ist grundsätzlich zwischen Remelter und Refiner zu unterscheiden. Erstere sind reine Umschmelzer, die keine Behandlung des flüssigen Metalls vornehmen. Im Gegensatz dazu gibt es die Refiner, welche mit Hilfe von Salzschlacken das Flüssigmetall reinigen und somit auch stark kontaminierten Schrott einsetzen.

Tabelle 2 zeigt die Verwendung der verschiedenen Aggregate für die unterschiedlichen aluminiumverarbeitenden Betriebe. Daraus ist zu erkennen, dass sich bei Remeltern die Kammeröfen durchgesetzt haben, während Refiner eher auf Trommelöfen zur Sekundär-aluminiumerzeugung zurückgreifen. Die angeführte Nummer in der ersten Spalte der Tabelle 2 verweist auf die Nummerierung in der Abbildung 9. [1, 14]

Tabelle 2: Einsatzgebiete der verschiedenen Aggregate [1]

Nr.	Aggregat	Remelter	Refiner	Gießerei
1.00	Herd-/Kammerofen	4	3	3
1.11	Kammerofen mit oben liegender Chargierung	2	1	0
1.12	Rundofen	1	0	0
1.13	Kammerofen mit offenem Vorherd	0	0	2
1.14	Zweikammerofen	3	1	1
1.15	"Dry Hearth" Kammerofen	0	3	0
1.16	Bodenbeheizter Zweikammerofen	0	0	3
1.17	Herdschachtofen	0	0	3
1.21	Herdofen, kippbar	4	3	3
1.22	Trommelofen, kippbar	2	3	0
1.23	Ovalofen, kippbar	2	3	0
2.00	Tiegelofen	0	0	3
2.21	Induktionstiegelofen	2	1	3
2.22	Rinneninduktionsofen	2	0	1
3.00	Drehtrommelofen	0	4	0
Nomenklatur: 0-nicht verwendet, 1 in Ausnahmefällen verwendet, 2 regelmäßig verwendet, 3 Standardtechnologie, 4 Haupttechnologie				

Nachfolgend sind die Prinzipien der beiden wichtigsten Schmelzaggregate für das Aluminiumrecycling näher erläutert. [1, 14]

2.3.1 Zweikammerofen

Zweikammeröfen finden beim Umschmelzen von Aluminiumschrott ohne oder nur mit geringen Mengen an Schmelzsatz Anwendung. Das Schmelzaggregat besteht im Wesentlichen aus zwei Kammern, wobei die Trennwand lediglich bis zum Flüssigmetall reicht. Grundsätzlich weisen Herdöfen einen flachen Herd mit großer Oberfläche auf. Durch die großen Chargiertüren eignen sich diese Öfen auch für grobes und großstückiges Material. Die Chargierung des Schrottes erfolgt nicht direkt in das Schmelzbad, sondern auf eine Brücke im Ofenraum, wo das Material erst abschwelt und trocknet, bevor es mit dem flüssigen Metall in Kontakt kommt. Bei der nächsten Schrottaufgabe wird der abgeschwelte Einsatz ins Bad geschoben. Dieser Bereich des Ofens wird als Schrottkammer bezeichnet. Von dort fließt das flüssige Metall in die Heizkammer. Zur Erhöhung der Schmelzleistung besteht die Möglichkeit, das flüssige Metall von der Heiz- in die Schrottkammer zurückzupumpen, wodurch ein schnelleres Aufschmelzen des Einsatzes erfolgt. Die Beheizung der Heizkammer wird durch Erdgasbrenner sowie durch das im Schrottbereich entstehende Pyrolysegas bewerkstelligt. Dieses kann durch Nachbrenner aber auch direkt in

der Schrottkammer umgesetzt werden. In Abbildung 11 ist ein derartiger Zweikammerofen dargestellt. [1, 14,15]

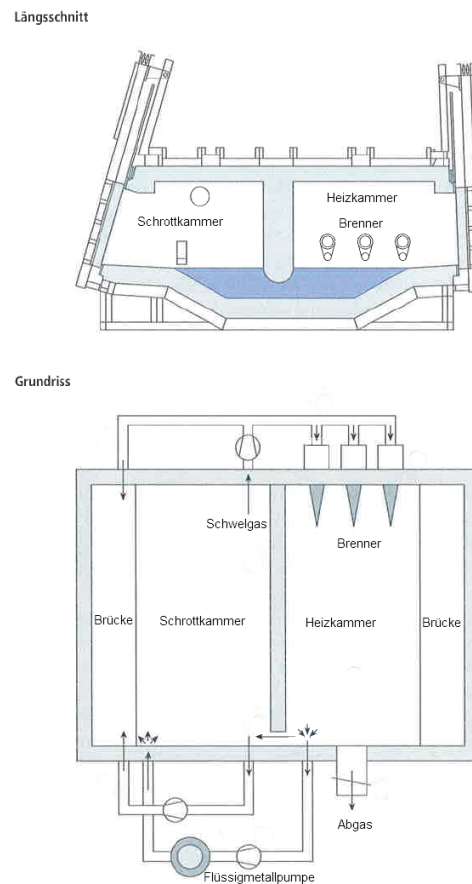


Abbildung 11: Darstellung eines Zweikammerofens [15]

2.3.2 Drehtrommelofen

Der Drehtrommelofen stellt das am häufigsten eingesetzte Aggregat bei der Aufarbeitung von stark verunreinigtem Aluminiumschrott dar. Für diese Materialien ist der Einsatz von Schmelzadditiven bzw. einer Salzschlacke unerlässlich, da neben der Erschmelzung auch eine Reinigung stattfinden soll. Durch die Drehung des feuerfest zugestellten Zylinders während des Schmelz- und Behandlungsvorgangs wird die Reaktionskinetik verbessert und somit ein schnellerer Behandlungsvorgang realisiert. Die Drehzahl beträgt ca. 1 – 8 Umdrehungen pro Minute, abhängig vom Aggregatzustand der Schrotte. Am Beginn des Einschmelzvorgangs sollte eine geringe Drehzahl gewählt werden, um die feuerfeste Zustellung vor Abrasion zu schützen. Danach ist eine höhere Drehzahl einzustellen, um die Reaktionskinetik zu verbessern. Die Beheizung erfolgt über stirnseitig angeordnete Erdgasbrenner, wie in Abbildung 12 dargestellt. Im Vergleich zu den Herd- bzw. Kammeröfen lassen sich mit Drehtrommelöfen schnellere Behandlungszeiten erzielen. Die

Schrotteinsatzkapazitäten sind jedoch deutlich kleiner (siehe auch Abbildung 10) und der anlagentechnische Aufwand und somit die Kosten höher. Eine Alternative zum Drehtrommelofen ist der Kipptrommelofen, der sich besonders für den Einsatz von stark oxidhaltigen bzw. minderwertigen Aluminiumschrott eignet (siehe auch Abbildung 12). [1, 14, 15]

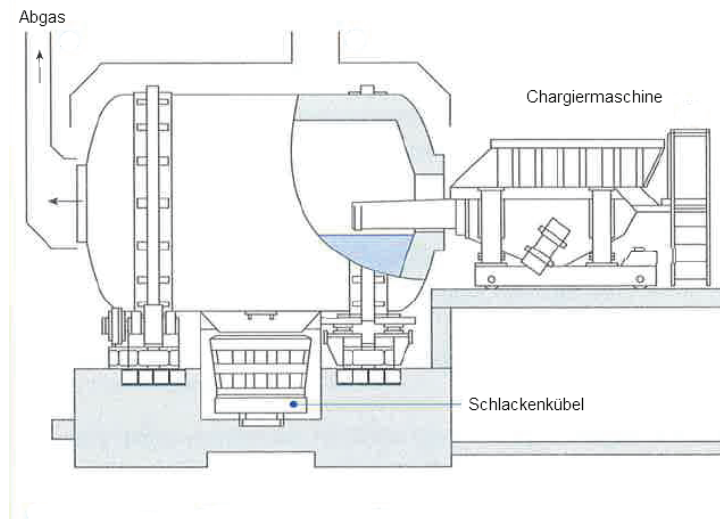


Abbildung 12: Darstellung eines Drehtrommelofens [15]

3. Feuchtigkeit bei Aluminiumschrotten

Für die nachfolgenden Trocknungsversuche ist die Kenntnis über das Verhalten und Einbringen von Feuchte in den Schrott von Interesse.

3.1 Eintrag von Feuchtigkeit

Wasser bzw. Feuchtigkeit in Schrotten kann (siehe Gleichung 3.1 und 3.2) durch die beim Schmelzbetrieb ablaufenden Reaktionen zu erheblichen Problemen führen. Dabei gibt es sehr viele verschiedene Ursachen Feuchtigkeit in das Einsatzmaterial einzubringen. Hauptsächlich erfolgt dies bei der Lagerung oder beim Transport. [14, 15]



Bei einigen Schrottsorten ist jedoch bereits Feuchte durch z. B. Produktionsprozesse vorhanden. Dies gilt beispielsweise bei der Verarbeitung durch zerspanende Tätigkeiten, da in diesem Fall meist Wasser/Öl oder Emulsionen zur Kühlung bzw. Schmierung verwendet werden. In weiterer Folge bleiben diese Kühl- und Schmiermittel auch an den Spänen haften. Anhaftende Feuchte tritt auch bei Getränkedosen auf, die nicht vollständig entleert wurden. Bei Lagerung und Transport von Schrotten ist die Witterung für den Feuchteeintrag hauptverantwortlich. Einerseits führt hierbei die Taupunktunterschreitung durch den Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht und andererseits Niederschlag bei schlechtem Wetter zur Feuchtigkeitseinbringung. Für den Schmelzbetrieb sind meist nur im Schrott eingeschlossener Schnee und Eis gefährlich, da anhaftende Oberflächenfeuchte beim Chargiervorgang entweichen kann. Weiters sind auch Hohlräume die noch Restflüssigkeit beinhalten, mit einem hohen Gefahrenpotenzial verbunden. [14, 15]

3.2 Auswirkungen von feuchtem Einsatzmaterial

Schmelzflüssiges Aluminium weist eine Temperatur von größer 660 °C auf, während Wasser bei 100 °C von seinem flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht. Diese Umwandlung erfolgt mit einer enormen Volumenexpansion, da aus einem Liter Wasser ca. 1400 Liter (Abhängig von der Temperatur) Wasserdampf entstehen. Durch entsprechende Wasser- und Aluminiummengen kommt es zu heftigen Reaktionen, die zu Materialauswurf oder Ofenzerstörung führen können. [14, 15]

Aber auch kleinere Wassermengen haben negative Auswirkungen, da das flüssige Aluminium mit anhaftender Feuchte reagiert. Neben Krätze (Al_2O_3) entsteht auch Wasserstoff. Dieser scheidet sich beim Abkühlen aufgrund des Löslichkeitssprunges zwischen flüssigem und festem Aggregatzustand aus und führt zu Poren im festen Material. Bei Vorhandensein von signifikanten Feuchtigkeitsgehalten im Schrott treten auch wirtschaftliche Nachteile auf. Einerseits wird mit dem Aluminiumschrott Wasser und anhaftende Feuchte eingekauft und andererseits bedingt diese Feuchtigkeit einen höheren Energieeintrag beim Schmelzbetrieb sowie eine verstärkte Krätzebildung und somit ein geringeres Ausbringen. [14, 15]

4. Abschwelen von organischem Material

Aluminiumrecycling besitzt neben dem enormen Energieeinsparungspotenzial auch den Vorteil, dass es beliebig oft durchführbar ist, ohne merkliche Qualitätsverluste zu verzeichnen. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn sehr reiner Aluminiumschrott eingesetzt wird. In der Realität treten in sehr vielen Schrottsorten Verunreinigungen auf, welche die Qualität sowie auch das Ausbringen negativ beeinflussen können. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, findet in der Regel vor dem Schmelzen der Einsatzstoffe eine Abschwel- bzw. Pyrolysebehandlung statt.

Aluminiumschrott enthält neben dem Wertmetall noch unerwünschte Begleitelemente, Anhaftungen oder freie Fremdstoffe die folgende Einteilung zulassen:

- Metallisch (Fe, Zn etc.)
- Nichtmetallisch (Steine, Staub etc.)
- Organisch (Lacke, Beschichtungen etc.)
- Anorganisch (Oxide, Wasser etc.)

Metallische Verunreinigungen werden häufig bei unzureichender Aufbereitung der Schrotte erhalten. Bei gebrauchten Getränkedosen tritt oft ein hoher Fremdmittelgehalt auf, da diese teilweise aus Weißblech (Fe, Sn) gefertigt sind und rein optisch keine Unterscheidung zu Aluminiumdosen erkennen lassen.

In Neuschrotten finden sich hauptsächlich organische Verunreinigungen, die durch Beschichtungen (Lacke), Isolationen oder Schutzschichten (Folien) hervorgerufen werden.

In Altschrotten kommen hingegen alle vorher klassifizierten Verunreinigungsarten vor. Eine Aufbereitung dieser Schrotte vor ihrem Einsatz ist daher empfehlenswert. [14, 15]

4.1 Organische Verunreinigungen

Unter organische Verunreinigungen fallen hauptsächlich Lacke bzw. Anstriche, welche zu dekorativen Zwecken und zum Schutz des Metalls auf das Aluminium aufgetragen werden. Grundsätzlich bestehen die Lacke aus folgenden Komponenten:

- Bindemittel
- Teilweise Lösemittel
- Additive
- Pigmente und Füllstoffe

Das Abschwelen führt zu einer partiellen Abscheidung der organischen Verunreinigungen. Um die Bedingungen optimal einzustellen, ist die Kenntnis über die Inhaltsstoffe dieser Substanzen von Vorteil.

Das Bindemittel ist der wichtigste Bestandteil einer Beschichtung und ist neben Additiven in jedem Lack vorhanden. Es umhüllt die anderen Komponenten und bildet den Lackfilm. Die Bindemittel bestehen aus langkettigen Kohlenwasserstoffen, wobei hauptsächlich Epoxidharz aber auch Polyethylen, Polyvinylchlorid etc. als Filmbildner zum Einsatz kommen.

Lösemittel bewirken eine gute Verarbeitbarkeit der Lacke, indem sie diese verdünnen. Nach dem Auftragen bzw. Verarbeitung des Lackes sollen sie möglichst vollständig verdunsten, um somit eine Aushärtung zu erreichen. Das heißt, diese Stoffe spielen beim Recycling keine Rolle, da sie ohnehin nicht mehr im Lack vorhanden sind. Außerdem wird Aluminium meist mit Pulverlacken beschichtet, die lösungsmittelfrei sind.

Additive sind Hilfsmittel, welche die Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenhärte und Verarbeitungseigenschaften positiv beeinflussen. Die am häufigsten verwendeten Additive sind Benzoin (Keton) und verschiedene Wachse (Kohlenwasserstoffe).

Pigmente, hauptsächlich Metalloxide bzw. Spinelle aus diesen Oxiden verleihen dem Lack seine Farbe. Es werden auch Farbstoffe organischer Natur eingesetzt, die vor allem die Verbindungen giftiger Elemente wie Blei und Kadmium ersetzen sollen. In seltenen Fällen können auch Metallsulfide zum Einsatz kommen. Tabelle 3 zeigt die Metallionen, ihre charakteristische Farbe und die dazugehörigen Farbpigmente. [16]

Tabelle 3: Farbpigmente von Lacken [16]

Ion	Farbe	Pigment
Ti ⁴⁺	weiß	TiO ₂
V ⁴⁺	grün, blau	(Zr,V)SiO ₂
Cr ³⁺	grün, gelb	Cr ₂ O ₃
Mn ²⁺	hellrosa	MnO
Mn ³⁺	violett	Mn ₂ O ₃
Mn ⁴⁺	rot, braun	MnO ₂
Fe ³⁺	gelb, braun	Fe ₂ O ₃
Fe ²⁺	blau, grün	Fe(C ₂ O ₄)·2H ₂ O
Co ²⁺	blau, violett	CoAl ₂ O ₄
Ni ²⁺	grün	NiO
Cu ²⁺	blau, grün	CuO

Eine weitere Lackkomponente stellen die sogenannten Füllstoffe dar. Aufgabe dieser ist das Volumen des Lackes zu erhöhen, ohne die anderen Eigenschaften wesentlich zu

beeinflussen. Am häufigsten finden Kalziumkarbonate, Magnesiumsilikathydrate und Bariumsulfate Anwendung als Füllstoffe.

Die Hauptverunreinigungen bei Neuschrotten sind daher hauptsächlich organische Verbindungen bzw. Kohlenwasserstoffe, aber auch Metallverbindungen wie Oxide oder Sulfate.

Diese Verunreinigungen führen letztendlich zu einem geringeren Metallausbringen sowie zu einem höheren Fremdelementgehalt im Aluminium. Durch ein kontrolliertes Abschwelen bzw. Pyrolysieren vor dem Schmelzen kann die Qualität deutlich verbessert und die anfallenden Emissionen verringert werden. [16]

4.2 Abschwelen

Durch Abschwelen findet bei organischen Verbindungen eine thermochemische Spaltung der langkettigen Kohlenwasserstoffe statt. Der Abschwelvorgang für organisches Material lässt sich in zwei Teile gliedern:

- Aufbrechen der langkettigen Moleküle in kürzere
- Verflüchtigung der einzelnen Komponenten bzw. der kurzkettigen Kohlenwasserstoffe

Durch diese beiden Schritte entstehen letztendlich gasförmige, flüssige und feste Rückstände (Gas, Teer und Kohle). Das Verhältnis der drei Komponenten steht in direktem Zusammenhang mit der Temperatur. Umso höher diese ist, desto mehr an gasförmigen Produkten entstehen, während bei niederen Werten feste und flüssige Rückstände zurückbleiben. In Abbildung 13 ist ein Abschwelvorgang einer beschichteten Aluminiumprobe dargestellt. [17, 18]

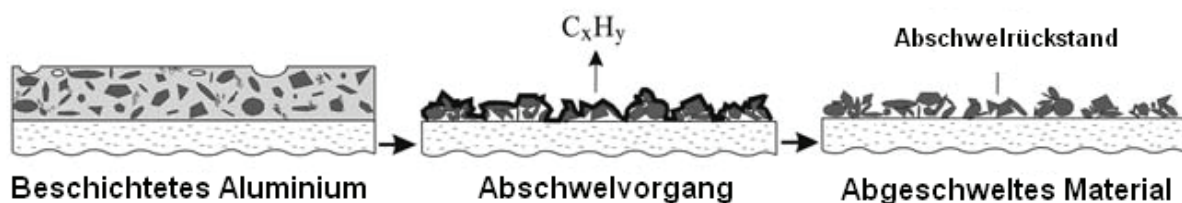


Abbildung 13: Darstellung eines Abschwelvorgangs [17]

Wie aus Abbildung 13 ersichtlich, kommt es durch die Temperatureinwirkung zum Verflüchtigen der Kohlenwasserstoffe. Als Rückstand bleiben die stabilen Metallverbindungen (hauptsächlich Oxide) und der Abschwelkohlenstoff zurück. Enthält die Ofenatmosphäre geringe Gehalte an Sauerstoff (ca. 1 %) führt dieser dazu, dass ein Teil des Kohlenstoffs je nach Temperatur zu CO bzw. CO_2 umgesetzt wird. Das entstehende Gas

enthält ca. 15 % Staub und Aerosole (Teer, Öle). Der restliche Teil setzt sich hauptsächlich aus CO, H₂, CO₂, N₂ und kurzkettigen Kohlenwasserstoffen (Benzol etc.) zusammen. Dieses Gas kommt entweder als Heizstoff in integrierten Nachbrennern zum Einsatz oder durchläuft eine Aufbereitung, wodurch laut Escherle [18] sogenanntes „Syngas“ entsteht. Bei der Erzeugung von Syngas findet eine Reinigung der Gase durch unterstöchiometrische Verbrennung statt. Durch die hohen Temperaturen werden die noch vorhandenen längeren Kohlenwasserstoffe gecrackt und die Feststoffe vergast bzw. verbrannt. Anschließend folgen Wasch- und Filteroperationen, so dass dieses synthetische Gas entsteht. In Tabelle 4 ist eine typische Syngaszusammensetzung angegeben. [17, 18]

Tabelle 4: Typische Zusammensetzung von Syngas [18]

	Wert	Einheit
H ₂	22	Vol %
CO	14	Vol %
CO ₂	12	Vol %
CH ₄	2	Vol %
N ₂	50	Vol %
Unterer Heizwert	4,88	MJ/m ³

Dieses Gas kann wiederum in anderen Heizaggregaten (z.B. Schmelzöfen) zum Einsatz kommen.

Letztendlich verbleiben lediglich der Abschwelkohlenstoff und die Metallverbindungen der Lackinhaltsstoffe auf dem Aluminium zurück. Da diese Substanzen keine feste Bindung mehr zum Aluminium aufweisen, können diese leicht durch Abklopfen entfernt werden. Die Trennung dieses Materials ist unbedingt zu empfehlen, da das Aluminium beinahe alle Metalloxide laut folgenden Gleichungen (4.1 – 4.3) reduzieren kann.



Einerseits würden diese Metalle das Aluminium verunreinigen und andererseits zu einer verstärkten Al₂O₃-Bildung (Krätze) führen.

Der Kohlenstoff, der als Reststoff des Abschwelprozesses auf dem Aluminium verbleibt, hat ebenfalls negative Auswirkungen im nachfolgenden Schmelzprozess. Mit einer Reaktion des Kohlenstoffes während des Schmelzprozesses geht eine starke lokale Temperaturerhöhung einher, die zu erhöhter Krätzebildung und zur Bildung von Al₄C₃ führt [16]. Ein erhöhter Aluminiumverlust durch Abschwelprodukte ist die Folge.

Beim Abschwelen ist auch auf die Temperatur zu achten, da zu niedrige Werte unvollständige Reaktionen zur Folge haben, während bei zu hohen Temperaturen ein Wachstum der natürlichen Oxidschicht des Aluminiums eintritt (von ca. 2 – 10 nm bei Raumtemperatur auf bis zu 0,2 µm knapp unter dem Schmelzpunkt). [14, 17, 18, 19]

5. Schmelzverhalten von Aluminiumschrotten

Der Einschmelzvorgang des Schrottes stellt den wichtigsten Schritt im Aluminiumrecycling dar. Die abzuziehende Krätze im Schmelzofen beinhaltet Verunreinigungen, Aluminiumoxid und metallisches Aluminium, welche die Aluminiumverluste beim Umschmelzen definieren.

5.1 Krätzebildung

Aluminiumkrätze besteht im Wesentlichen aus Oxiden, anhaftenden Aluminium, Fremdmetallen und weiteren stabilen Verbindungen. Den größten Anteil nimmt Aluminiumoxid (Al_2O_3) und metallisches Aluminium ein. Die freie Reaktionsenthalpie ΔG^0_T für Oxidationsreaktionen ist sehr stark negativ (siehe Abbildung 14). Obwohl aus thermodynamischer Sicht das gesamte Aluminium in Gegenwart von Sauerstoff mit diesem reagieren müsste, findet lediglich eine Oxidation an der Grenzschicht statt. Grund dafür ist die Hemmung des Sauerstofftransports durch die sich bildende Aluminiumoxidschicht, die das darunterliegende Metall somit vor einer weiteren Verbindungsbildung schützt.

Beim Schmelzen von Schrotten im Zweikammerofen, welcher auch bei der Hütte Klein Reichenbach zum Einsatz kommt, sind hauptsächlich folgende Effekte für die Krätzebildung verantwortlich:

- Abschwelrückstände
- Fremdmetalle
- Schrottgeometrie
- Temperaturführung
- Kapillareffekte

In den nachfolgenden Kapiteln werden die angeführten Prozesse näher erläutert.

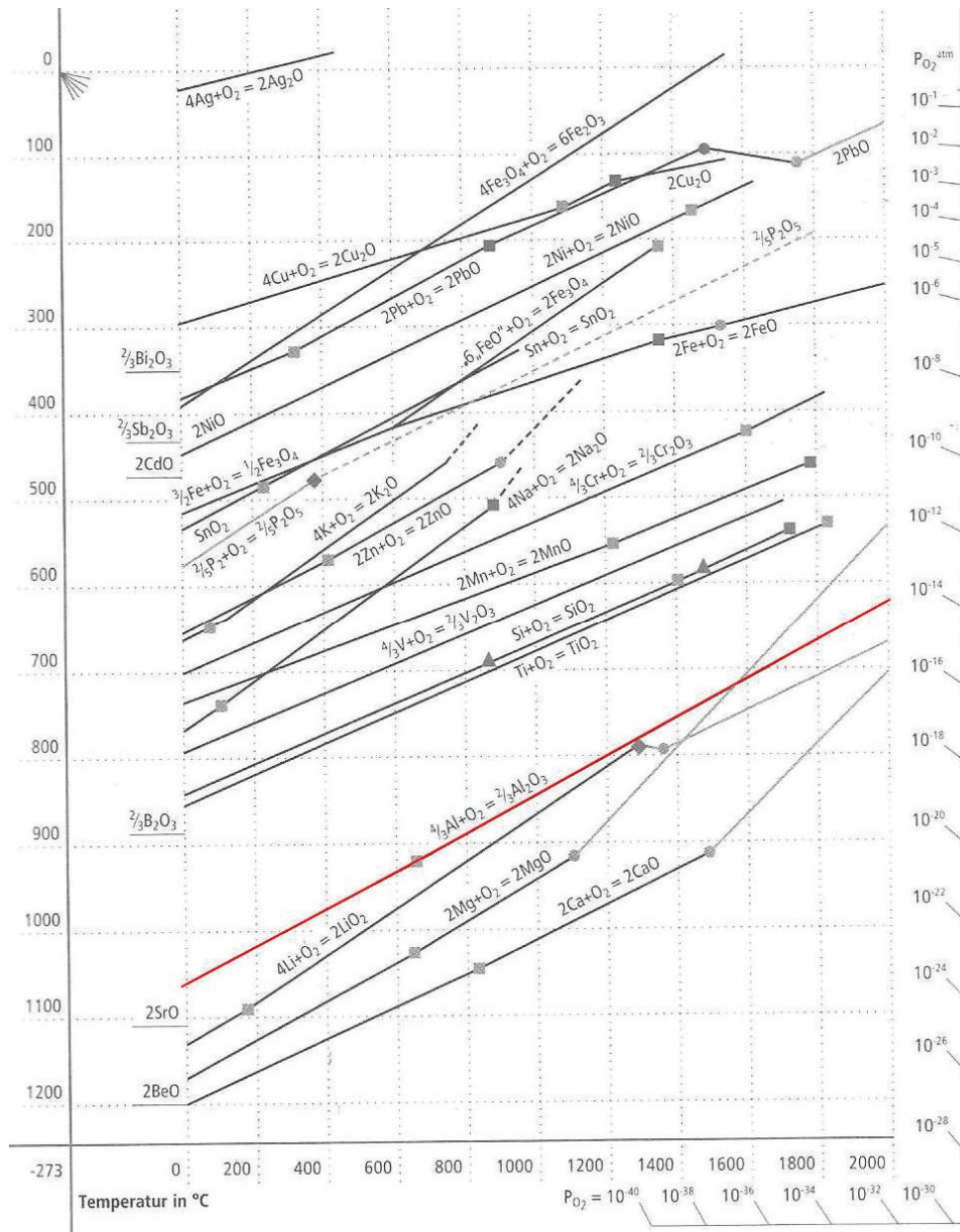
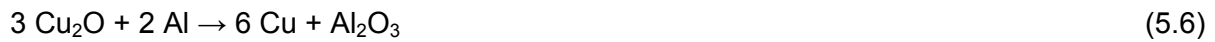


Abbildung 14: Richardson-Ellingham-Diagramm [14]

5.1.1 Abschwelrückstände

Beim Zweikammerofen wird der Schrott vor dem Chargieren auf einer Brücke abgeschwelt. Durch die Aufgabe der nächsten Charge erfolgt das Einbringen des bereits abgeschweltsen Schrottes in das Bad. Die jeweiligen Abschwelrückstände werden daher mit dem Schrott ins flüssige Aluminium chargiert. Diese Verbindungen, hauptsächlich Oxide, sind bis auf wenige Ausnahmen (CaO, MgO und LiO₂) weniger stabil als das flüssige Aluminium (vgl. Abbildung 66). Aluminium reduziert diese Oxide unter Bildung von Aluminiumoxid. Die nachfolgenden Gleichungen 5.1 – 5.9 zeigen mögliche Reaktionen für die bei den Abschwelversuchen ermittelten oxidischen Rückstände. [14]



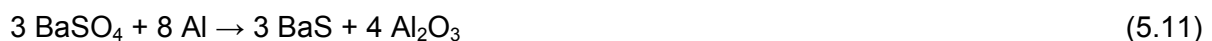
Die Reaktionen laufen nicht immer vollständig ab, sodass noch andere Oxide außer Al_2O_3 in der Krätze zu finden sind. Vor allem Magnesiumoxid führt zu einer Veränderung der Aluminiumoxidschicht indem sich ein $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ -Spinell bildet, welcher die Oxidation des darunterliegenden Metalls begünstigt.

Zusätzlich zu dem Aluminiumoxid verunreinigen jene Metalle die Schmelze, welche durch die Reduktion aus ihren Oxiden entstehen.

Neben den oxidischen Rückständen bleibt auch ein signifikanter Kohlenstoffgehalt durch die Abschmelkohle zurück. Dieser Kohlenstoff reagiert nach Gleichung 5.10 unter Bildung von Aluminiumkarbid. [14]



Ein weiterer Rückstand aus der Pyrolyse ist das als Füllstoff verwendete Bariumsulfat (BaSO_4), welches mit Aluminium nach folgender Gleichung 5.11 reagiert.



Das entstehende Bariumsulfid findet sich ebenso wie das Aluminiumoxid in der Krätze wieder. [14, 20, 21]

5.1.2 Fremdmetalle

Fremdmetalle kommen sehr häufig durch unzureichende Aufbereitung des Schrottes in das Schmelzaggregat. Daneben führt auch die Reduktion von Oxiden (siehe voriges Kapitel 5.1.1) zur Erzeugung von Fremdmetallen direkt im Bad. Der Fremdmetallgehalt im Aluminium wirkt sich auf die Oxidation aus. In Abbildung 15 ist diese Abhängigkeit bei 800 °C und einem jeweiligen Elementgehalt von einem Atomprozent dargestellt.

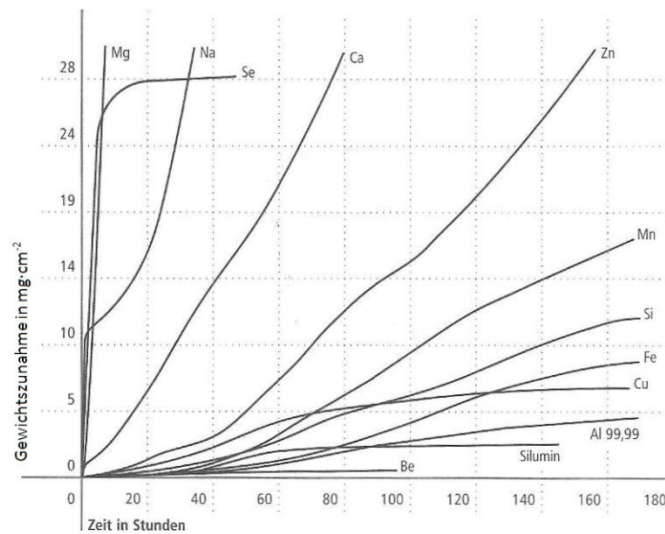


Abbildung 15: Einfluss der Elemente auf die Oxidation [14]

Das Auflösungsverhalten von Metallen in Aluminiumschmelzen ist sehr unterschiedlich. Eisen und Mangan lösen sich unter Wärmeenergie, während sich Magnesium, Silizium und Zink endotherm reagieren. Dennoch findet sich immer Fremdmetall in der Krätze, da es einerseits durch die relativ niedrigen Temperaturen nur teilweise im Aluminium gelöst wird und andererseits können Schrottteile mit Hohlräumen (z.B. Weißblechdosen) aufschwimmen bzw. findet kein Eintauchen in das Schmelzbad statt.

Abbildung 15 zeigt weiters, dass bei Aluminium-Magnesium-Legierungen mit größeren Schmelzverlusten durch Oxidation zu rechnen ist. [14, 21]

5.1.3 Schrottforn

Je nach Anwendungszweck des Aluminiums gibt es verschiedenste Schrottfornen. Diese wirken sich unterschiedlich auf das Schmelzverhalten aus. Massive Teile haben geringere Krätzebildung zur Folge als sehr dünne die Hohlräume aufweisen (Dosen).

Ein Grund dafür liegt in der großen spezifischen Oberfläche, wodurch sich wegen der natürlichen Oxidschicht höhere Aluminiumoxidanteile ergeben. Weiters tauchen diese Stoffe nicht sofort nach dem Chargieren ins Bad ein, da sie relativ leicht sind und somit die Oxidschicht (Krätze) nicht durchdringen. [1, 14]

Grundsätzlich führt Material mit einer großen spezifischen Oberfläche zu einem höheren Gaseintrag in das Schmelzbad, da beim Eintauchen die schützende Oxidschicht der Schmelze zerstört wird. Die Zusammensetzung des eingetragenen Gases hängt stark von der Brennerführung (Luftzahl) ab. In der Schrottkammer eines Zweikammerofens befindet sich aufgrund des Abschwelvorganges sehr wenig Sauerstoff, da dieser sofort mit dem

Schmelgas reagiert. Außerdem ist der Sauerstoffgehalt, je nach Brennerführung in der Heizkammer ohnehin nur sehr gering (1 – 2 %). Das Abgas enthält CO_2 , H_2O und N_2 die mit dem flüssigen Aluminium nach Gleichungen 5.12 – 5.14 reagieren. [7, 14]



Aus diesen Reaktionen entstehen krätzebildende Produkte, wie Al_2O_3 , AlN und Al_4C_3 sowie Wasserstoff, der beim Erstarren des Aluminiums zu Poren führen kann. Daher ist das Einbringen der Brennerabgase bzw. Pyrolysegase in das Schmelzbad zu vermeiden. Bei Dosen beispielsweise führt das Zerkleinern bzw. Schreddern des Materials laut Giese [7] zu einer Reduktion des Umschmelzverlustes von ca. 70 % (von 6 % auf 2 %). [7, 14]

5.1.4 Temperaturführung

Für die Ausbildung der Aluminiumoxidschicht spielt die Temperatur und Verweildauer eine wichtige Rolle. Mit steigender Temperatur kann die Al_2O_3 -Schicht bei festen und flüssigen Aluminium wachsen. Beim Erhitzen der Schmelze über 700 °C findet eine Umwandlung des γ -Aluminiumoxids zu α - Al_2O_3 statt. Mit dieser Transformation geht eine signifikante Volumenabnahme einher, wodurch sich Risse im Al_2O_3 -Schutzfilm bilden. Dadurch können die krätzeverursachenden Gase das darunterliegende flüssige Aluminium leichter erreichen und somit zu verstärkter Oxidation führen. In Abbildung 16 ist die Oxidation in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. [14, 21]

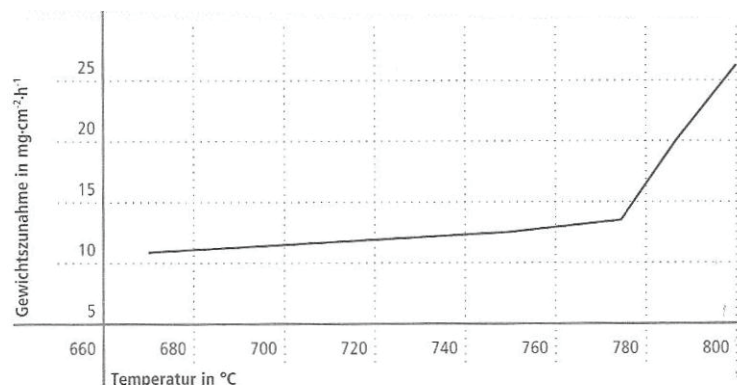


Abbildung 16: Temperatureinfluss auf die Oxidation von flüssigem Aluminium [14]

Für ein optimales Ausbringen ist eine genaue Temperaturregelung und genaue Kenntnis des Abschmelzvorgangs bzw. der Abschmelzprodukte von Vorteil.

5.1.5 Kapillareffekte

Die vorhergehenden Punkte erläutern die Bildung von hauptsächlich nichtmetallischen Krätzeinhaltsstoffen. Diese weisen meist eine hohe spezifische Oberfläche mit einer großen Porenanzahl auf. Kapillar- und Adhäsionseffekte führen zum Anhaften von flüssigem Aluminium an der Krätzeoberfläche. Weiters wird auch zwischen den Krätzeteilchen flüssiges Metall eingeschlossen. Durch diese Effekte weist die Krätze neben den nichtmetallischen Inhaltstoffen hohe Anteile an metallischem Aluminium auf. Diese Gehalte können bis zu 70 % erreichen.

6. Charakterisierung des Einsatzmaterials

Nachfolgend sind die untersuchten Schrottproben aufgelistet. Neben den Probenbildern werden auch lichtmikroskopische Abbildungen angeführt, um die Beschichtungsanteile zu verdeutlichen.

6.1 Gebrauchte Getränkedosen

Die gebrauchten Getränkedosen, welche zur Gruppe der Altschrotte zählen, sind in Abbildung 17 dargestellt. Es handelt sich dabei um lackiertes Aluminium, wobei die Beschichtung aufgrund von Schriftzügen, Logos etc. sehr ungleichmäßig und nur einseitig aufgebracht ist. Das Grundmaterial der Dosen besteht aus einem Aluminium-Magnesium-Werkstoff. Die Deckel entsprechen einer AlMg5- und die Körper einer AlMg1-Legierung. [14]



Abbildung 17: Darstellung gebrauchter Getränkedosen

In Abbildung 18 ist die lichtmikroskopische Aufnahme des Dosenquerschliffes abgebildet.

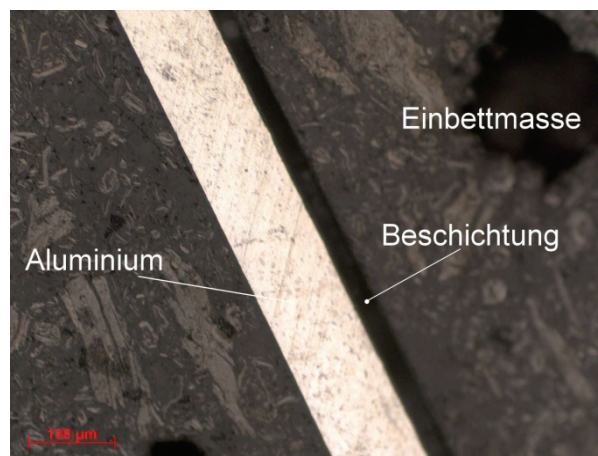


Abbildung 18: Querschnitt einer Dose

Abbildung 18 zeigt, dass die einseitige Beschichtung der Dosen sehr dünn ist. Durch die geringe Materialstärke und sehr große spezifische Oberfläche der Dosen (Oberfläche/Gewicht) wird die Krätzbildung beim Schmelzen negativ beeinflusst. Weiters bringen Hohlräume die Gefahr von Luft- oder Flüssigkeitseintrag mit sich.

6.2 Jalousielamellen

Jalousielamellen sind sehr gleichmäßig lackierte Teile, die aufgrund ihrer Form, bezogen auf das Volumen, einen sehr hohen Beschichtungsanteil aufweisen. Abbildung 19 zeigt das eingesetzte Material, welches zur Gruppe der Altschrotte zählt. Üblicherweise werden diese Jalousielamellen aus einer Aluminium-Magnesium-Silizium Legierung (6xxx-Serie) gefertigt.



Abbildung 19: Darstellung der verwendeten Jalousielamellen

Der Querschnitt einer Jalousielamelle ist in Abbildung 20 dargestellt.

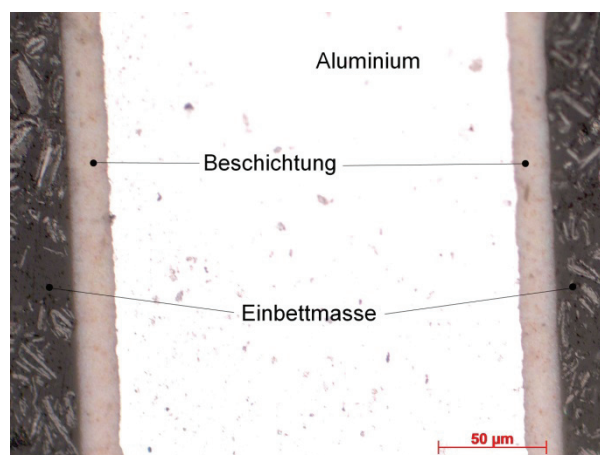


Abbildung 20: Querschnitt einer Jalousielamelle

Es sind wieder Grundmaterial, Beschichtung und jeweils am Rand die Einbettmasse ersichtlich. Weiters ist zu erkennen, dass es sich bei den Jalousielamellen um ein sehr dünnes Material mit einer relativ dicken Lackierung handelt.

6.3 Profile

Profile werden hauptsächlich für den Fenster- und Türenbau eingesetzt und weisen teilweise neben der Lackierung noch eine Kunststoffisolierung auf. In Abbildung 21 sind diese Profile dargestellt. Die Herstellung dieser Produkte erfolgt über Strangpressen. Da sich vor allem 6xxx-Legierungen (Mg-Si) für diese massive Umformung eignen, sind Profile ein Hauptanwendungsgebiet dieser Legierungsart.



Abbildung 21: Darstellung der verwendeten Profile

Profile sind ebenso wie die beiden vorhergehenden Materialien aus dekorativen Zwecken mit Farbe lackiert. In Abbildung 22 ist die Detailaufnahme eines Profilquerschnitts ersichtlich.

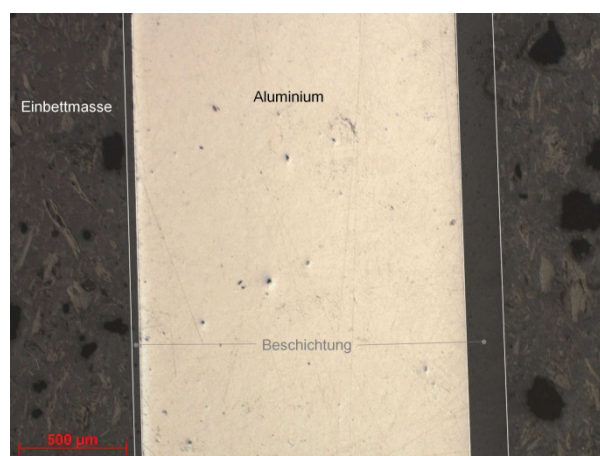


Abbildung 22: Querschnitt eines Profils

Aufgrund des schlechten Kontrasts zwischen Beschichtung und Einbettmasse sind die Grenzflächen durch weiße Linien gekennzeichnet. Die Profilaußenseite weist eine sehr dicke Lackschicht auf, während die innenseitig liegende Schicht sehr dünn ausgeführt ist. Der Lackanteil der Profile fällt durch die Dicke des Aluminiums entsprechend gering aus. Aufgrund der Kunststoffisolierung ist jedoch der Gesamtorganikanteil sehr hoch.

6.4 Spenglerblech

Das Spenglerblech (siehe Abbildung 23) ist ein beidseitig lackiertes Blech mit teilweiser Riffelung (größere Oberfläche).



Abbildung 23: Darstellung von Spenglerblech

Spenglerbleche finden in der Bauindustrie für verschiedene Zwecke, wie z.B. als Fassadenelemente oder in Dachkonstruktionen, Anwendung. Die vorwiegend eingesetzten Legierungen sind 3xxx (AlMn), 5xxx (AlMg) und 6xxx (AlMgSi). In Ausnahmefällen kann auch Reinaluminium (> 99 %) zum Einsatz kommen.

In der nachfolgenden Abbildung 24 ist der Querschnitt einer Spenglerblechprobe dargestellt.

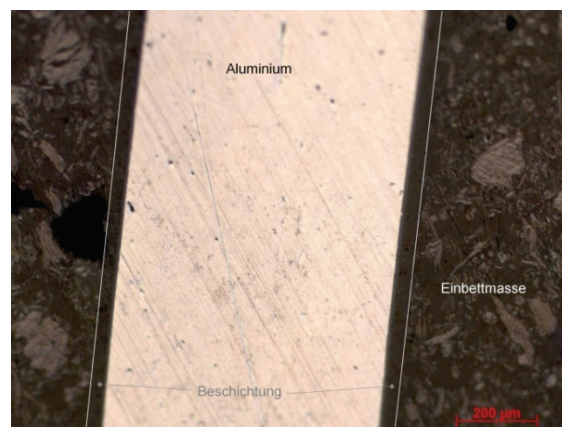


Abbildung 24: Querschnitt eines Spenglerblechs

Die Grenzflächen Beschichtung-Einbettmasse sind weiß markiert. Das Spenglerblech weist eine relativ gleichmäßige beidseitige Lackierung auf.

6.5 Foliertes Spenglerblech

Das folierte Spenglerblech entspricht fast dem normalen, jedoch mit dem Unterschied, dass bei diesem Material einseitig eine zusätzliche Folie aufgeklebt ist. Diese dient zum Schutz der Oberfläche während der Montage. Abbildung 25 zeigt das folierte Spenglerblech.



Abbildung 25: Darstellung des eingesetzten folierten Spenglerblechs

In Abbildung 26 ist die Detailansicht des Spenglerblechs mit Folie dargestellt.

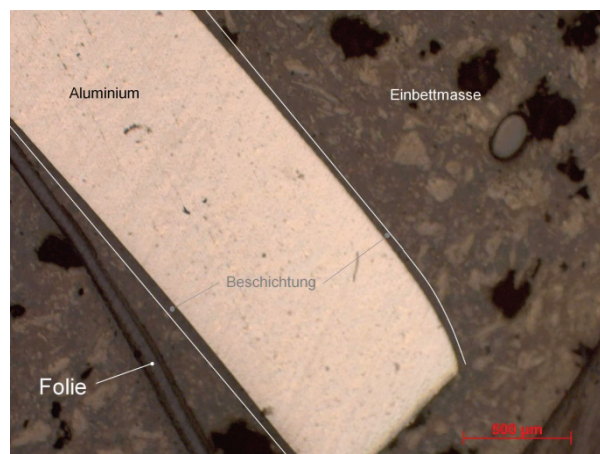


Abbildung 26: Querschnitt Spenglerblech mit Folie

Deutlich ist die größtenteils abgelöste Folie zu erkennen. Im Vergleich zu Abbildung 24 ist ersichtlich, dass sich die Bleche im Bezug auf Materialstärke und Lackierung kaum voneinander unterscheiden. Der wesentliche Unterschied besteht nur in den zusätzlichen Schichten durch Kleber und Folie.

7. Bestimmung des Anteils an organischer Fraktion

Zur Bestimmung des Organikanteils der Beschichtungen der Schrotte wurde mittels Lichtmikroskop die Schichtdicke der Lackierung bestimmt und anschließend über die Dichte der prozentuelle Anteil berechnet. Für die nachfolgenden Abschwelversuche ist eine Abschätzung der Menge an organischem Material (Lackierung, Folie) erforderlich. Mit Hilfe des Lichtmikroskops erfolgte die Messung der unterschiedlichen Schichtdicken und die Ermittlung der Organikanteile. Abbildung 27 zeigt die angefertigten Schliffe der verschiedenen Schrottproben. Die roten Punkte geben die jeweiligen Messstellen für die Schichtdickenermittlung an.

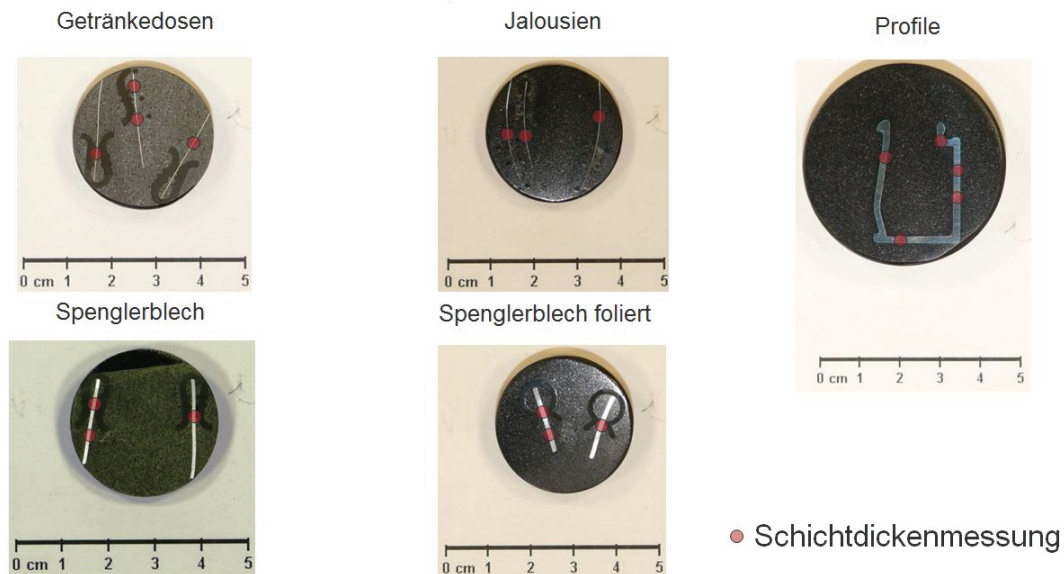


Abbildung 27: Darstellung der angefertigten Querschliffe der Proben

Der Massenanteil des anhaftenden organischen Materials wurde über die nachfolgenden Formeln 7.1 - 7.4 bestimmt.

Dosen:

$$\text{Gew. \%}_{\text{Beschichtung}} = \frac{\rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}}}{\rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}} + \rho_{\text{Al}} \cdot d_{\text{Al}}} \quad (7.1)$$

Jalousielamellen und
Spenglerblech:

$$\text{Gew. \%}_{\text{Beschichtung}} = \frac{2 \cdot \rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}}}{2 \cdot \rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}} + \rho_{\text{Al}} \cdot d_{\text{Al}}} \quad (7.2)$$

Profile:

$$\text{Gew. \%}_{\text{Beschichtung}} = \frac{\rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}1} + \rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}2}}{\rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}1} + \rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}2} + \rho_{\text{Al}} \cdot d_{\text{Al}}} \quad (7.3)$$

$$\text{Spenglerblech mit Folie: } \text{Gew. \%}_{\text{Beschichtung}} = \frac{2 \cdot \rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}} + \rho_{\text{Folie}} \cdot d_{\text{Folie}}}{2 \cdot \rho_{\text{Lack}} \cdot d_{\text{Lack}} + \rho_{\text{Folie}} \cdot d_{\text{Folie}} + \rho_{\text{Al}} \cdot d_{\text{Al}}} \quad (7.4)$$

Zur Berechnung des organischen Anteils sind lediglich die Dicken d sowie die dazugehörigen Dichten ρ der verschiedenen Materialien notwendig. Tabelle 5 zeigt das Ergebnis der Schichtdickenmessungen.

Tabelle 5: Schichtdicken der verschiedenen Proben

	Schichtdicke [μm]		Stärke Al [mm]
	innen	außen	
Dosen	4,80	4,80	0,11
Jalousien	18,29	18,29	0,19
Profile	70,88	157,51	1,34
Spenglerblech	41,98	41,98	0,68
Spenglerblech (foliert)	35,38	110,18	1,00

Neben den Schichtdicken sind für die Bestimmung des Lackanteils in Gewichtsprozent auch die Dichten der einzelnen Schichten erforderlich. Tabelle 6 zeigt die jeweiligen Dichtewerte.

Tabelle 6: Dichten der unterschiedlichen Schichten

Dichte [g/cm^3]	Min.	Max.
Dichte Lackschicht	0,9	1,43
Dichte Aluminium	2,66	
Dichte PVC (Folie)	1,275	

Für Aluminium wurde eine Dichte von $2,66 \text{ g}/\text{cm}^3$ gewählt, da dieser Mittelwert einen repräsentativen Wert der verwendeten Legierungen der Schrottproben darstellt. Schwieriger gestaltet sich die Ermittlung der Lackdichte. Da es sehr viele verschiedene Lackrezepturen und Dichtewerte gibt und außerdem die Dichte von den jeweiligen Farbpigmenten und somit von der verwendeten Farbe abhängt wurde die Lackdichte basierend auf Produkten der Firma „Kaddi Lack“ (www.speziallack.de) festgesetzt. Die Daten stammen aus den jeweiligen Produktdatenblättern.

Abbildung 28 zeigt die Masseanteile an organischem Material für die verschiedenen Schrottproben. Die Balken mit helleren Farbtönen zeigen die Berechnung mit der minimalen und die dunklen repräsentieren die Auswertung mit der maximalen Lackdichte.

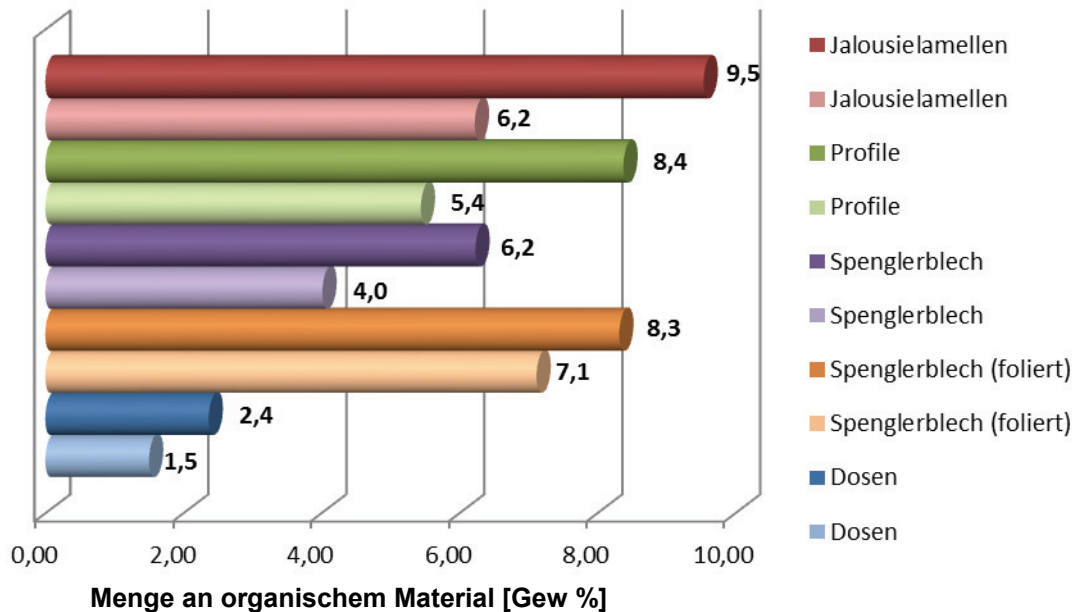


Abbildung 28: Darstellung der Massenanteile an organischem Material auf den verschiedenen Proben

Die Jalousielamellen, Profile und das folierte Spenglerblech weisen Beschichtungsanteile im Bereich von 5 – 10 % auf. Dosen zeigen hingegen nur sehr wenig Beschichtungsmaterial (1,5 – 2,4 %). Dieses Ergebnis ist aber nur als Tendenz zu verstehen, da einerseits die Beschichtung sehr ungleichmäßig sein kann (wie bei den Dosen oder den Profilen) und andererseits die Dichte der Lacke einen großen Unsicherheitsfaktor darstellt. Das Diagramm gibt einen groben Überblick anhaftender Organik wieder. Durch diese Abschätzung kann auf die abzuschwelende Menge rückgeschlossen werden. Im schlechtesten Fall führt allein das Beschichtungsmaterial ohne Berücksichtigung von sonstigen anhaftenden Verunreinigungen (Isolierung etc.) zu einem Verlust von ca. 10 %.

Schlesinger [8] gibt folgende Anteile organischen Beschichtungen an:

Spenglerblech (painted sidings)..... 3 % Organik
 Dosen 2 – 3 % Organik
 Profile (window frames)..... 21 % Organik
 Spenglerblech foliert (epoxy strip)..... 6 % Organik

Die durch die Schichtdickenmessung berechneten Werte stimmen bei Dosen sehr gut überein. Das Spenglerblech und Spenglerblech foliert weichen nur geringfügig ab. Die Profile weisen jedoch einen deutlichen Unterschied auf, der auf das Isoliermaterial zurückzuführen ist. In den hier durchgeführten Berechnungen wurde lediglich die Lackschicht der Profile untersucht. Dementsprechend führt Schlesinger [8] einen höheren Wert an. Beschichtungsanteile weiterer Materialien sind im Anhang angeführt. [8]

8. Trocknungsverhalten

Mit Hilfe von Trocknungsversuchen fand die Bestimmung der anhaftenden Feuchtigkeit an diversen Schrotten statt. Die verschiedenen Einsatzmaterialien wurden von der Hütte Klein Reichenbach zur Verfügung gestellt.

8.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der erste Schritt bei der Versuchsdurchführung ist das vollständige Befeuchten der Probe. Dazu dient ein Schrottkorb (siehe Abbildung 29) aus rostfreiem Lochblech, in dem sich das Probenmaterial während des ganzen Versuchs befindet. Der Korb weist Abmessungen von 30 x 45 x 35 cm (b x l x h) auf und besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 50 l.

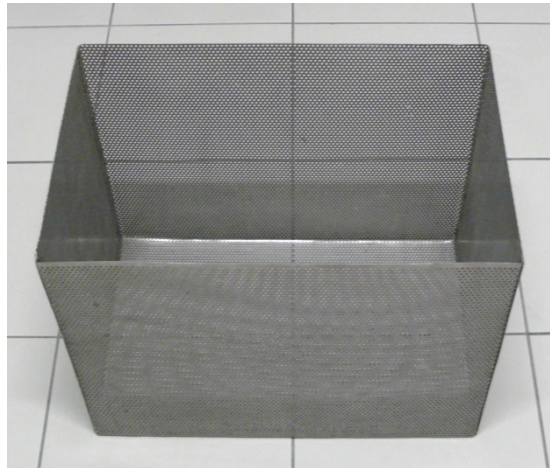


Abbildung 29: Darstellung des Probenbehälters

Zur Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes der Schrotproben erfolgte zuerst das vollständige Befeuchten der Probe durch Eintauchen des Korbes inklusive Schrottprobe in ein Wasserbad für eine definierte Zeitspanne (10 min). In Abbildung 30 ist der Probenbehälter im Wasserbad ersichtlich.



Abbildung 30: Probenbehälter im Wasserbad

Nach der Eintauchphase wurden die Teilproben aus dem Wasserbad entfernt, um in einer definierten Zeit (5 min) das Abtropfen des überschüssigen Wassers zu ermöglichen. Danach erfolgten die Bestimmung der Feuchtmasse und nachfolgend das Trocknen im Trockenschrank bei 105 °C für 24 h.

Als Trocknungsaggregat diente ein Trockenschrank der Marke Nabertherm Type TR 120 mit einem Volumen von 120 l und einer Maximaltemperatur T_{\max} von 300 °C. Der Trockenschrank samt Probenbehälter ist in Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31: Trocknungsofen für die Versuchsdurchführung

Durch Zurückwiegen des getrockneten Materials kam es zur Bestimmung der Gewichts Differenz als Massenanteil des Wassers und somit des Trocknungsverlustes. Da auch der Korb Wasser aufnimmt, wurde dieser ohne Probenmaterial einem Trocknungsversuch unterzogen und bei der Berechnung der Gewichts Differenz berücksichtigt.

Begriffe:

- Trockenmasse (m_T): nach dem festgelegten Trocknungsverfahren erhaltene Masse
- Feuchtmasse (m_W): nach dem Abtropfen erhaltene Masse
- Wassergehalt (w_W): Massenanteil des Wassers als Gewichtsverlust beim festgelegten Trocknungsversuch bestimmt; angegeben in %

Nachfolgend sind die untersuchten Schrottproben aufgelistet. In den Abbildungen 30 – 40 ist jeweils ein Bild der Originalprobe und der Probe nach dem Abtropfen ersichtlich. Anhaftende Feuchte an den Schrottproben ist, wenn deutlich sichtbar, rot markiert. Diese durch Trocknungsversuche ermittelte Feuchtigkeit ist in tabellarischer Form vermerkt. Grundsätzlich wurden die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Proben eingesetzt. Weiters kamen auf Wunsch der Hütte Klein Reichenbach zusätzlich folgende Proben zum Einsatz:

- Kleinmaterial
- Schredderfraktion
- Kühlermaterial

Das Kleinmaterial stellt einen sehr stark verunreinigten Einsatzstoff dar, das Holzstücke, verschiedene Kunststoffe, Staub, Fremdmetalle etc. als freie Verunreinigungen im Schrott beinhaltet. Es handelt sich dabei um unsortierten Schrott.

Das Schreddermaterial kann in zwei Fraktionen unterteilt werden. Einerseits mit definierter Größe und wenig Verunreinigungen und andererseits Material, das dem Kleinmaterial stark ähnelt, jedoch weniger Schadstoffanteile aufweist. Die Schredderfraktion ist eine Mischung aus zerkleinerten Dosen, diversen Verpackungsprodukten, Drähten aber auch größeren Schrottteilen.

Das Kühlermaterial stammt aus Verbrennungskraftmaschinen und ist mit diversen Ölen und sonstigen Schmiermitteln kontaminiert. Kühler weisen anwendungsbedingt eine große Oberfläche auf, um einen guten Wärmeaustausch zu erreichen. Daher ist bei diesem Vorstoff mit einer hohen Wasseraufnahmekapazität zu rechnen.

Zusammen mit dem unter Kapitel 6 erläuterten Proben stellen diese Materialien laut HKB eine typische Schrottlieferung dar.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für die einzelnen Proben angeführt. Neben der tabellarischen Auswertung sind Abbildungen zur Gegenüberstellung von trockenem zu nassem Einsatzmaterial angeführt.

8.1.1 Jalousien

Die Jalousien sind nach dem Tauchvorgang mit einem sehr dünnen Wasserfilm überzogen. Teilweise ist auch Tröpfchenbildung zu erkennen (siehe rote Markierung in Abbildung 32).



(a)



(b)

Abbildung 32: Jalousien: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 7: Anhaftende Feuchte auf Probe „Jalousien“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Jalousien	5623	5375	248	4,4	4,5	0,06
	5628	5375	253	4,5		
	5628	5375	253	4,5		

8.1.2 Kleinmaterial I

In der Schrotprobe „Kleinmaterial I“ (Abbildung 33) befindet sich eine Reihe von Verunreinigungen, wie z.B. Kunststoff, Staub, andere Metallteile oder auch Holz, welche die Wasseraufnahme erhöhen.



(a)



(b)

Abbildung 33: Kleinmaterial I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 8: Anhaftende Feuchte auf Probe „Kleinmaterial I“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Kleinmaterial I	11548	11010	538	4,7	4,5	0,19
	11538	11015	523	4,5		
	11503	11010	493	4,3		

8.1.3 Kleinmaterial II

Abbildung 34 zeigt die Schrottprobe „Kleinmaterial II“. Wie auch Probe „Kleinmaterial I“ ist diese durch Stoffe wie z.B. Holz, Staub oder andere Metalle verunreinigt. In Abbildung 29 (b) sind deutlich kräftigere Farben durch den anhaftenden Wasserfilm zu erkennen.



(a)



(b)

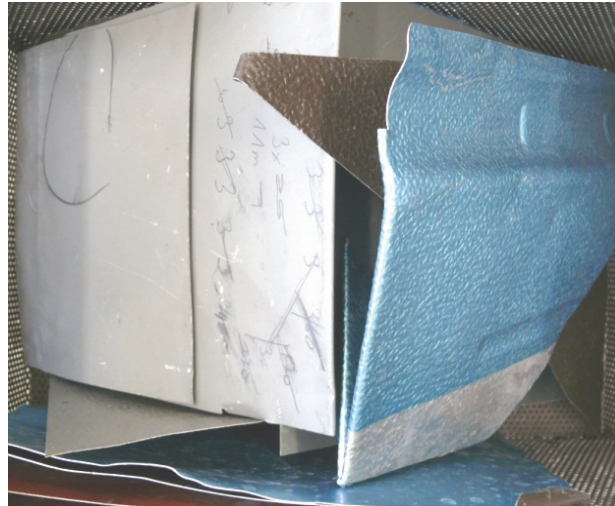
Abbildung 34: Kleinmaterial II: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 9: Anhaftende Feuchte auf Probe „Kleinmaterial II“

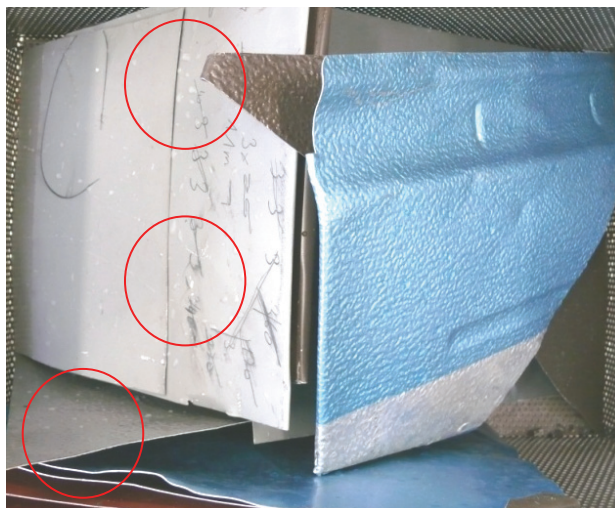
Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Kleinmaterial II	11323	10955	368	3,3	3,3	0,16
	11343	10945	398	3,5		
	11288	10925	363	3,2		

8.1.4 Spenglerblech I

Beim Spenglerblech I bildet sich die anhaftende Feuchte nicht als Flüssigkeitsfilm, sondern als definierte Tropfen aus (siehe Abbildung 35).



(a)



(b)

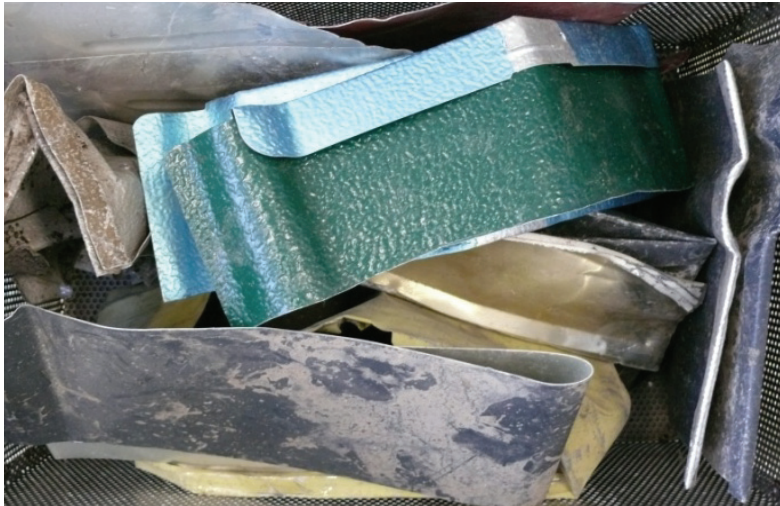
Abbildung 35: Spenglerblech I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 10: Anhaftende Feuchte auf Probe „Spenglerblech I“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Spenglerblech I	6023	5835	188	3,1	3,1	0,05
	6018	5835	183	3,0		
	6023	5835	188	3,1		

8.1.5 Spenglerblech II

Abbildung 36 zeigt die Schrottprobe „Spenglerblech II“. Wie beim Spenglerblech I bildet sich die anhaftende Feuchte als Tropfen aus.



(a)



(b)

Abbildung 36: Spenglerblech II: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 11: Anhaftende Feuchte auf Probe „Spenglerblech II“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Spenglerblech II	6513	6410	103	1,6	1,6	0,04
	6513	6410	103	1,6		
	6518	6410	108	1,7		

8.1.6 Foliertes Spenglerblech

Das folierte Spenglerblech (Abbildung 37) unterscheidet sich vom normalen durch die aufgeklebte Folie. Die Flüssigkeitsanhaftung erfolgt gleich wie beim Spenglerblech mit dem Unterschied, dass sich Feuchtigkeit zwischen Folie und Blech ansammelt, wodurch es zu einer vermehrten Feuchtigkeitsaufnahme kommt.



(a)



(b)

Abbildung 37: Foliertes Spenglerblech: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 12: Anhaftende Feuchte auf Probe „Foliertes Spenglerblech“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Foliertes Spenglerblech	11153	10860	293	2,6	2,7	0,14
	11148	10860	288	2,6		
	11178	10860	318	2,8		

8.1.7 Schredder I

Durch das Schreddern des Schrottes entstehen faustgroße Metallstücke, die im Weiteren eine möglichst sortenreine Trennung zulassen. In Abbildung 38 ist das Aluminiumschredder-material „Schredder I“ dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 38: Schredder I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 13: Anhaftende Feuchte auf Probe „Schredder I“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Schredder I	6168	6055	113	1,8	1,8	0,08
	6163	6055	108	1,8		
	6178	6060	118	1,9		

8.1.8 Schredder II

Die Schrotprobe „Schredder II“ ist in Abbildung 39 ersichtlich. Durch die kräftigeren Farben in Abbildung 37 (b) ist ein anhaftender Wasserfilm zu erkennen.



(a)



(b)

Abbildung 39: Schredder II: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 14: Anhaftende Feuchte auf Probe „Schredder II“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Schredder II	5293	5140	153	2,9	3,1	0,32
	5318	5135	183	3,4		
	5283	6130	153	2,9		

8.1.9 Kühler

Abbildung 40 zeigt die Schrotprobe „Kühler“. Die hohe spezifische Oberfläche ist deutlich zu erkennen. Diese führt auch zu großen Mengen von Wasseransammlungen.



(a)



(b)

Abbildung 40: Kühler: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 15: Anhaftende Feuchte auf Probe „Kühler“

Probenmaterial	m_w [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_w [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Kühler	15043	13200	1843	12,3	11,4	0,71
	14813	13165	1648	11,1		
	14778	13160	1618	11,0		

8.1.10 Profile I

Abbildung 41 zeigt die Schrottprobe „Profile I“. Die eingesetzten Profile weisen meist komplexe Querschnitte mit vielen Fugen auf. Die Profile finden sehr häufig Einsatz als Rahmen im Fensterbau.



(a)



(b)

Abbildung 41: Profile I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 16: Anhaftende Feuchte auf Probe „Profile I“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Profile I	9443	9355	88	0,9	1,0	0,05
	9458	9360	98	1,0		
	9453	9360	93	1,0		

8.1.11 Profile II

Abbildung 42 zeigt die Schrottprobe „Profile II“, welche zur Gänze aus Fensterprofilen besteht.



(a)



(b)

Abbildung 42: Profile I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen

Tabelle 17: Anhaftende Feuchte auf Probe „Profile II“

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Profile II	11523	11350	173	1,5	1,6	0,30
	11518	11370	148	1,3		
	11578	11360	218	1,9		

8.2 Ergebnisse der Trocknungsversuche

In der nachfolgenden Tabelle 18 sind die Gehalte an anhaftender Feuchte auf den einzelnen Schrottsorten aufgelistet.

Tabelle 18: Anhaftende Feuchte der jeweiligen Schrottproben

Probenmaterial	m_W [g]	m_T [g]	Differenz [g]	w_W [%]	Mittelwert [%]	Standard- abweichung [%]
Jalousien	5623	5375	248	4,4	4,5	0,06
	5628	5375	253	4,5		
	5628	5375	253	4,5		
Kleinmaterial I	11548	11010	538	4,7	4,5	0,19
	11538	11015	523	4,5		
	11503	11010	493	4,3		
Kleinmaterial II	11323	10955	368	3,3	3,3	0,16
	11343	10945	398	3,5		
	11288	10925	363	3,2		
Spenglerblech I	6023	5835	188	3,1	3,1	0,05
	6018	5835	183	3,0		
	6023	5835	188	3,1		
Spenglerblech II	6513	6410	103	1,6	1,6	0,04
	6513	6410	103	1,6		
	6518	6410	108	1,7		
Foliertes Spenglerblech	11153	10860	293	2,6	2,7	0,14
	11148	10860	288	2,6		
	11178	10860	318	2,8		
Schredder I	6168	6055	113	1,8	1,8	0,08
	6163	6055	108	1,8		
	6178	6060	118	1,9		
Schredder II	5293	5140	153	2,9	3,1	0,32
	5318	5135	183	3,4		
	5283	6130	153	2,9		
Kühler	15043	13200	1843	12,3	11,4	0,71
	14813	13165	1648	11,1		
	14778	13160	1618	11,0		
Profile I	9443	9355	88	0,9	1,0	0,05
	9458	9360	98	1,0		
	9453	9360	93	1,0		
Profile II	11523	11350	173	1,5	1,6	0,30
	11518	11370	148	1,3		
	11578	11360	218	1,9		

Der Gehalt an anhaftender Feuchte (Wassergehalt) ermittelt sich aus dem Verhältnis der Gewichts Differenz zwischen nassem und trockenem Material sowie der Masse des feuchten Schrottes.

Beim Aufsetzen des Probenbehälters auf die Waage bleibt immer etwas Feuchtigkeit zurück. Diese muss anschließend von der Feuchtmasse abgezogen werden, da das zurückbleibende Wasser ebenfalls von der Waage erfasst wird, sich aber nicht mehr am Probenmaterial befindet. Weiters ist die Gewichts Differenz noch um den Betrag des Wassers, welches sich am Korb und nicht am Probenmaterial haften bleibt, zu korrigieren. Dazu lieferten Leerversuche mit dem Probekorb ohne Material die entsprechenden Daten. Mit Hilfe dieser Schritte ist die Bestimmung der anhaftenden Feuchte an den Schrottproben möglich. Einen Unsicherheitsfaktor stellt jedoch die Aufgabe des Materials dar. So können z.B. die jeweiligen Schrotte im Probenbehälter auf verschiedenste Weise angeordnet werden, bei variierenden Werten an anhaftender Feuchtigkeit.

Die in Tabelle 18 ermittelten Daten für anhaftende Feuchte an Aluminiumschrotten stellen einen Richtwert zur Abschätzung eines möglichen Feuchtigkeitseintrages auf die vorhin definierten Schrottteile dar. Es ist zu erkennen, dass die Schrottprobe „Kühler“ die größte Menge an anhaftender Feuchtigkeit besitzt. Gefolgt von den Proben „Jalousien“, „Kleinmaterial I“ und „Kleinmaterial II“.

Ein weiterer Faktor neben den genannten Eigenschaften ist die spezifische Oberfläche bzw. die Oberfläche bezogen auf das Gewicht der Proben. Dieser Sachverhalt ist beim Vergleich der Jalousien mit anderen Proben ersichtlich.

Beim Vergleich der beiden Schreddersorten ist zu erkennen, dass der wesentlich kompaktere „Shredder I“ deutlich weniger Wasser als „Shredder II“ aufnimmt.

Beim Spenglerblech konnte kein signifikanter Unterschied zwischen folierten und unfolierten Spenglerblech gefunden werden.

Dies trifft ebenfalls auf die beiden Fraktionen „Profile I“ und „Profile II“ zu.

9. Abschwelverhalten

Mit Hilfe der nachfolgenden Versuche sollen die Auswirkungen verschiedener Abschwelbedingungen auf die anhaftenden Verunreinigungen und somit in weiterer Folge auf das Schmelzverhalten geklärt werden.

9.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Bestimmung der Abschwelverluste der jeweiligen Schrottproben erfolgte in einem Kammerofen der Marke Nabertherm über Aufheizen der Materialien. Durch die Verbindung der Probenschale mit einer Waage wird das Gewicht der Proben während der Versuchsdauer bestimmt. Der Versuchsaufbau ist Abbildung 43 zu entnehmen.

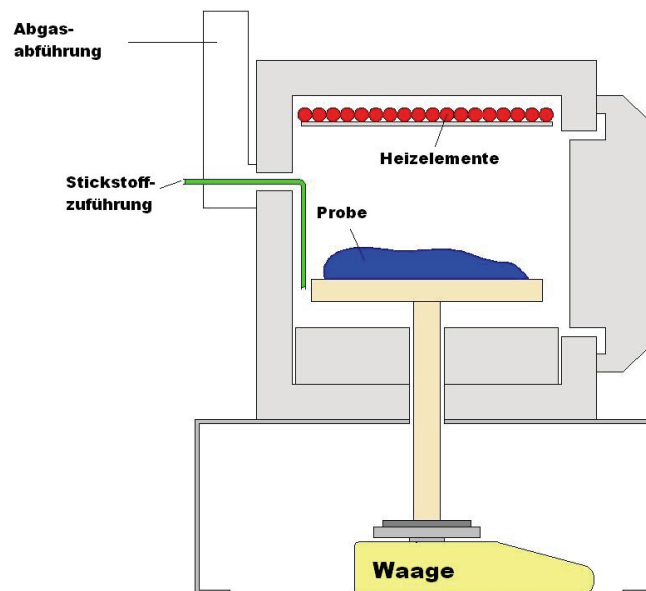


Abbildung 43: Versuchsaufbau der Abschwelversuche

Um den Ofenraum weitgehend von Sauerstoff zu befreien und eine möglichst inerte Atmosphäre einzustellen, wurde dieser mit Stickstoff gespült. Da der Ofen aufgrund der Messapparaturen nicht vollkommen dicht ist, lässt sich ein Restsauerstoffgehalt von ca. 1,5 - 2 % nicht vermeiden.

Die Abschwelversuche wurden für fünf verschiedene Materialien bei jeweils drei unterschiedlichen Temperaturen (350 °C, 450 °C und 550 °C) durchgeführt. Die untere Grenze von 350 °C ergibt sich, da laut Literatur die Abschwelreaktionen bzw. die Verflüchtigung von organischen Anhaftungen bei ca. 320 °C einsetzen. Nach oben hin ist die Temperatur durch niedrig schmelzende Legierungen beschränkt. Die Aufheizraten wurden für alle Versuche mit

650 °C pro Stunde festgelegt. Nach dem Aufheizen erfolgte ein einstündiges Halten. Proben, die mit 350 °C abgeschwelt wurden benötigten teilweise eine Verlängerung der Versuchsdauer, um ein vollständiges Abschwelen zu gewährleisten. Abbildung 44 zeigt den Kammerofen während des Abschwelversuchs.



Abbildung 44: Darstellung des Abschwelofens

Neben der gravimetrischen Auswertung der Proben erfolgte weiters die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung der Abschwelrückstände mittels EDX-Einheit des Rasterelektronenmikroskops.

9.2 Ergebnisse der Abschwelversuche

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den Abschwelversuchen der einzelnen Proben näher erläutert.

9.2.1 Profile

Bei den Profilen trat mit 7,81 % der höchste Abschwelverlust auf. Dieser ist darauf zurückzuführen, da das Material durch eine Kunststoffisolierung den größten Anteil an organischem Material aufwies. Die nachfolgenden Abbildungen 45 und 46 zeigen die Profile vor und nachdem sie bei der jeweiligen Temperatur behandelt wurden. In Abbildung 45, bei der mit 350 °C abgeschwelten Probe, lässt sich eine Teerbildung erkennen. In Abbildung 46, bei 450 °C, ist durch Verflüchtigungen ein nur mehr sehr geringer Teeranteil erkennbar. Bei einer Abschweltemperatur von 550 °C liegen lediglich noch Farbpigmente, Füllstoffe und ein äußerst feines Kohlenstoffgerüst auf dem Aluminium vor.



(a)



(b)

Abbildung 45: Profile (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt



(a)



(b)

Abbildung 46: Profile (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt

In Abbildung 47 ist der Temperatur- (rote Linie) und Gewichtsverlauf (blaue Linie) über die Zeit des Abschmelzvorganges dargestellt. Bei den Gewichtsverläufen ist zu erkennen, dass bei einer Abschmelztemperatur von 350 °C eine langsame stetige Gewichtsabnahme erfolgt, während bei den höheren Temperaturen innerhalb eines bestimmten Zeitbereiches der Abschmelzvorgang stattfindet. Dieser startet bei ca. 400 °C und endet bei 500 °C.

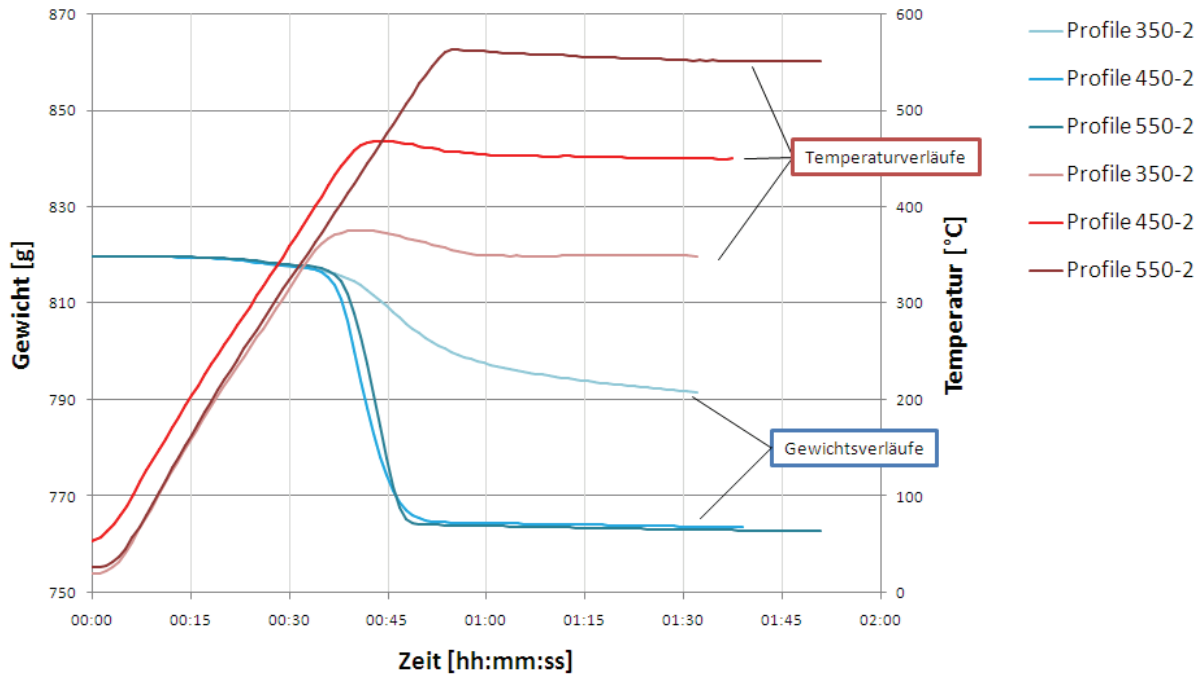


Abbildung 47: Temperatur- und Gewichtsverlauf beim Abschwelen der Profile

Neben der Gewichts- und Temperaturaufzeichnung fand eine Analyse der chemischen Zusammensetzung des verbleibenden organischen Materials (Abschwelrückstand) mittels EDX-Einheit des Rasterelektronenmikroskops statt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 48 für braune Profile dargestellt. Die Gehalte bei 25 °C geben die Lackzusammensetzung im Ausgangszustand (nicht abgeschwelt) an.

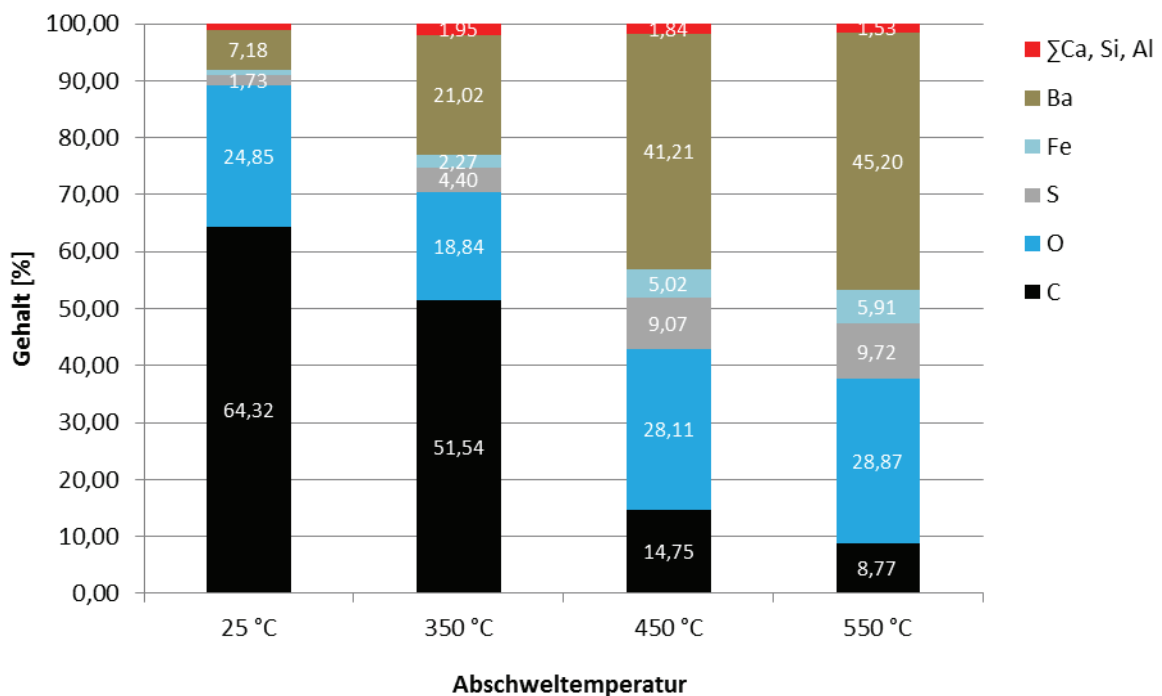


Abbildung 48: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von braunen Profilen

Der Kohlenstoffverlauf in Abbildung 48 zeigt, dass die Kohlenwasserstoffe durch die Temperatureinwirkung verflüchtigt werden. In diesem Fall liegt die kritische Temperatur bei ca. 450 °C, da sich der Kohlenstoffgehalt nicht mehr drastisch verringert und davon auszugehen ist, dass dieser in Form von Pyrolysekohle auftritt. Neben dem Kohlenstoff sind weitere Elemente ersichtlich, bei denen es sich um Lackzusatzstoffe handelt. Beim Vergleich der Barium- und Schwefelgehalte ist davon auszugehen, dass es sich um den Füllstoff Bariumsulfat (BaSO_4) handelt. Weiters wurden Eisen- und Siliziumoxid als Farbpigmente identifiziert, deren Gehalt in dieser Lackzusammensetzung nur sehr gering war. Der starke Anstieg des Bariumgehaltes über die Temperatur kann durch die Verflüchtigung der Kohlenwasserstoffe erklärt werden. Da das Barium-Schwefel-Verhältnis beim Abschmelvorgang annähernd konstant bleibt, ist eine Zersetzung von BaSO_4 auszuschließen. Im Anhang sind die Zusammensetzungen andersfarbiger Profile nach dem Abschmelzen angeführt.

9.2.2 Dosen

Die Dosen weisen einen Abschmelverlust von 1,84 % bis 3,07 % auf. In den nachfolgenden Abbildungen 49 und 50 sind die jeweiligen Proben dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 49: Dosen (a) nicht abgeschmolzen (b) bei 350 °C abgeschmolzen



Abbildung 50: Dosen (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt

Bei Abschweltemperaturen von 350 °C bleibt an den Dosen noch Teer bzw. organisches Material zurück, während bei höheren Temperaturen lediglich die Lackzusatzstoffe und der Schwelkohlenstoff am Material vorliegen. In Abbildung 51 ist der Temperatur- und Gewichtsverlauf für die verschiedenen Abschweltemperaturen dargestellt. Die Rottöne kennzeichnen die Temperatur und die Blautöne das Gewicht (auch in den nachfolgenden Abschwelverläufen gleich). Ähnlich den Profilen ist bei 350 °C Abschweltemperatur ein eher stetiger Gewichtsverlust zu erkennen, während bei 550 °C ein Übergang mit sehr starker Gewichtsabnahme ersichtlich ist.

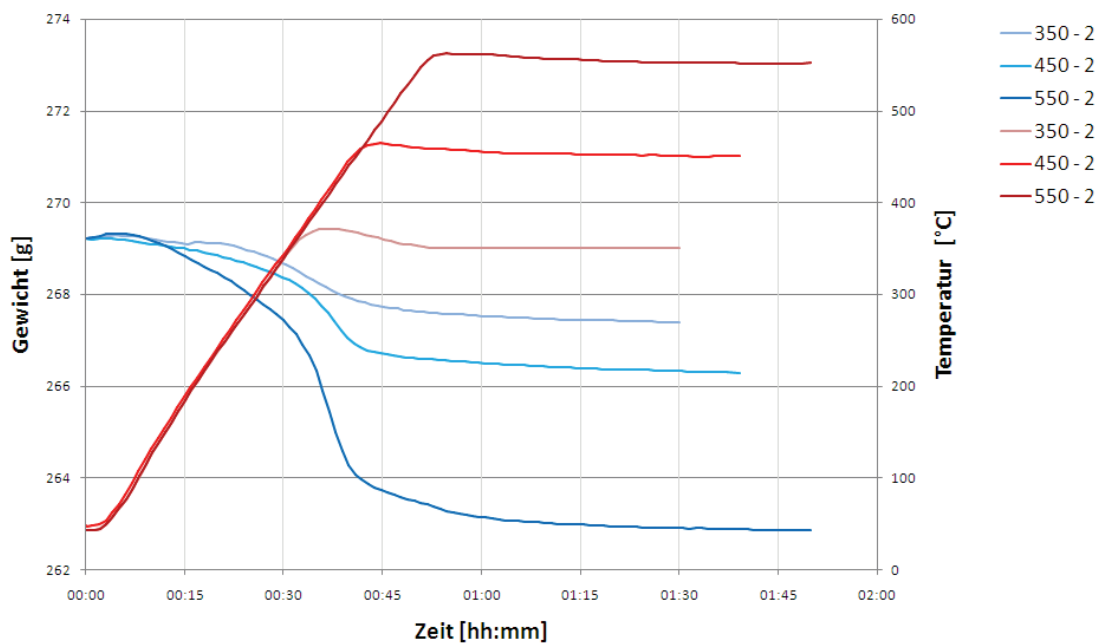


Abbildung 51: Abschwelverlauf der Dosen

In Abbildung 52 ist die chemische Zusammensetzung der Dosen nach dem Abschwelvorgang aufgezeigt. Der Kohlenstoffgehalt nimmt stark ab, während sich die anderen Elemente anreichern.

Ähnlich zu den Profilen findet eine signifikante Abnahme des Kohlenstoffs erst bei Temperaturen zwischen 350 °C und 400 °C statt. Zu beachten ist, dass lediglich ein Ausschnitt der Dosenoberfläche betrachtet wurde und die Inhaltsstoffe bei Dosen stark variieren können.

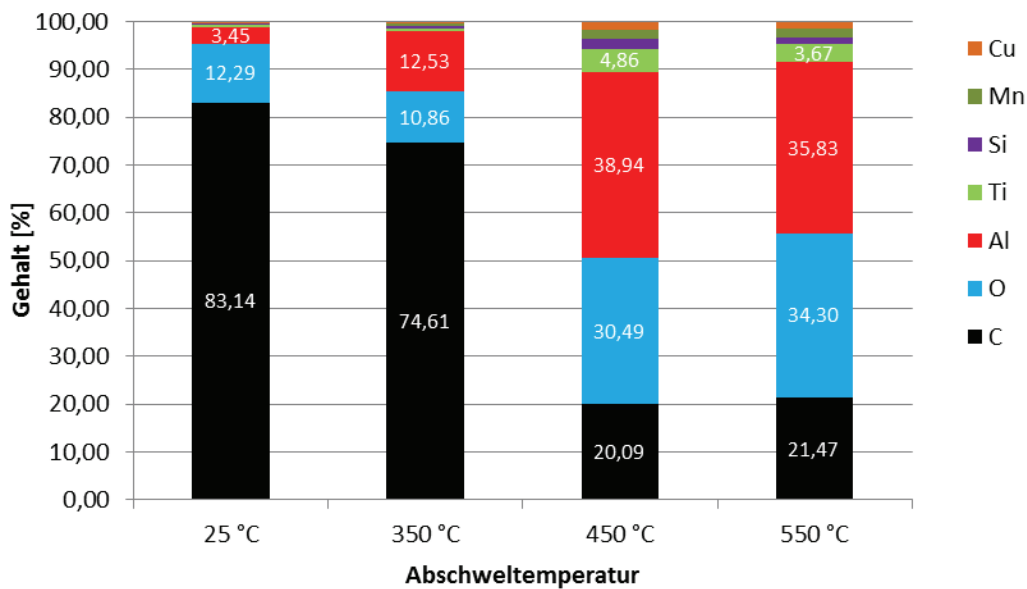


Abbildung 52: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von Dosen

9.2.3 Jalousielamellen

Die Jalousien mit einem Abschwelverlust zwischen 3,01 % und 4,49 % weisen den zweithöchsten Abschwelverlust aller fünf Proben auf. Der Grund dafür liegt in der geringen Dicke und dem großen Oberfläche/Volumen-Verhältnis des Einsatzmaterials. In den nachfolgenden Abbildungen 53 bis 54 sind die jeweiligen Proben dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 53: Jalousielamellen (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt



(a)



(b)

Abbildung 54: Jalousielamellen (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt

Bei den Jalousien ist im Gegensatz zu den Profilen oder dem folierten Spenglerblech keine Teerbildung zu erkennen. Vielmehr bildet sich eine dichte Schicht aus Restmaterial der Lackierung aus, die nicht am Aluminium haftet und sehr leicht zu entfernen ist.

Abbildung 55 zeigt die Abschwelverläufe der Jalousielamellen. Die Gewichtsverläufe sind einander fast identisch mit dem Unterschied, dass mit steigender Temperatur auch der Abschwelverlust größer wird.

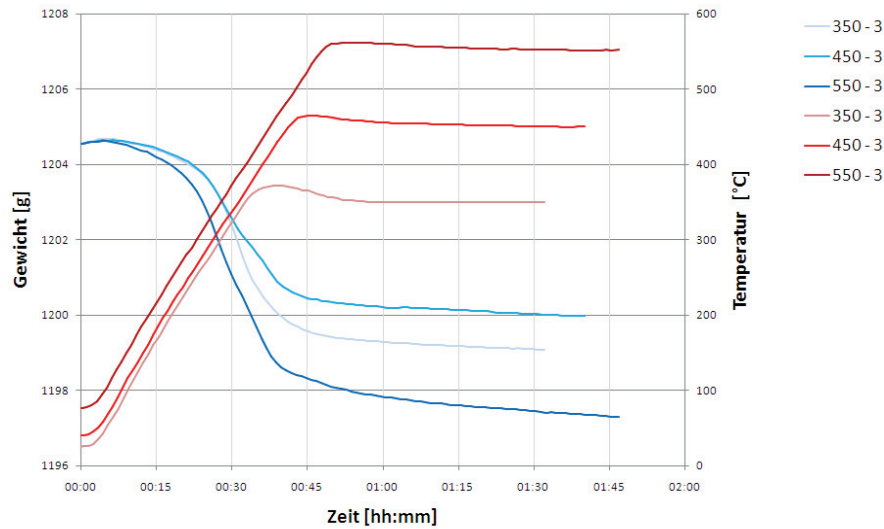


Abbildung 55: Abschmelzverlauf von Jalousien

Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 56) zeigt die Änderung der chemischen Zusammensetzung der Beschichtung bei unterschiedlichen Abschmelztemperaturen. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Proben ist schon bei 350 °C Abschmelztemperatur ein signifikanter Abfall des Kohlenstoffgehalts zu erkennen. Weiters ist auch bei 550 °C der Abschmelzkohleanteil mit 1,45 % sehr gering. Das heißt, dass sich die Beschichtung durch thermische Einwirkung sehr gut entfernen lässt. Bei hohen Abschmelztemperaturen besteht der verbleibende Rückstand fast zur Gänze aus Titanoxid, das sehr häufig in weißen Lacken der Jalousielamellen zur Anwendung kommt.

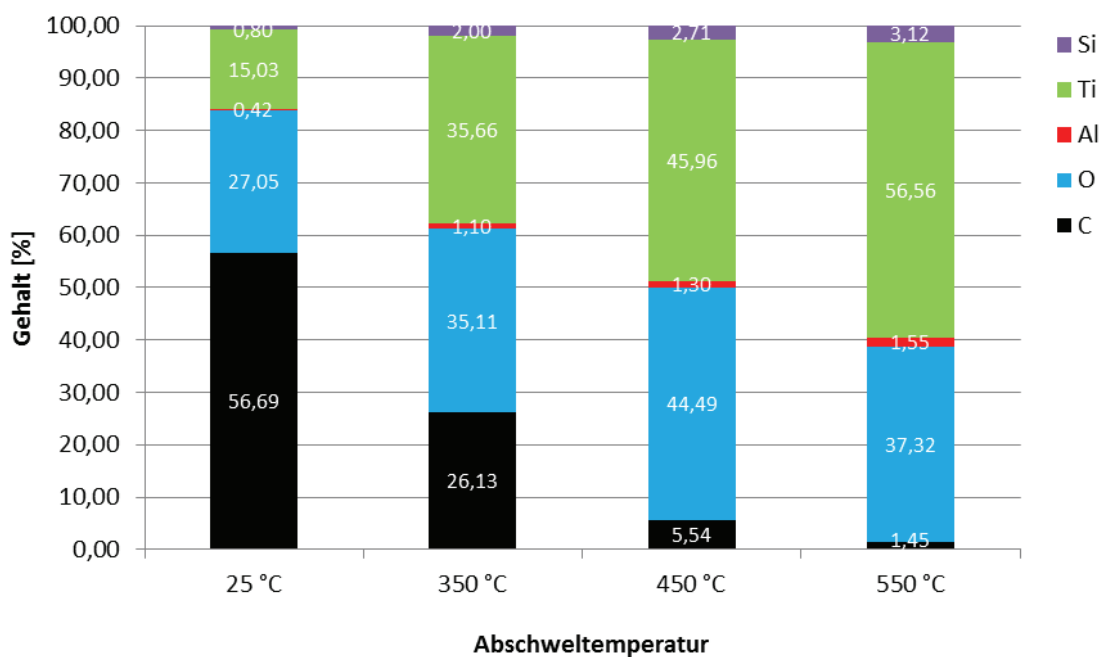


Abbildung 56: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschmelzen von Jalousielamellen

9.2.4 Spenglerblech

Die abgeschwelten Spenglerblechproben sind in den nachfolgenden Abbildungen 57 und 58 dargestellt. Das Spenglerblech bildet beim Abschwellen im Gegensatz zu den Jalousielamellen einen krümeligen Rückstand (siehe Abbildung 57 (b)). Die Abschwelraten betragen 1,69 % bis 2,03 % und zählen somit zu den geringsten aufgrund des niedrigen Anteils an organischen Verunreinigungen durch die Lackierung.



(a)



(b)

Abbildung 57: Spenglerblech (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt



(a)



(b)

Abbildung 58: Spenglerblech (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt

In Abbildung 59 ist der Gewichts- und Temperaturverlauf für die Spenglerbleche wiedergegeben.

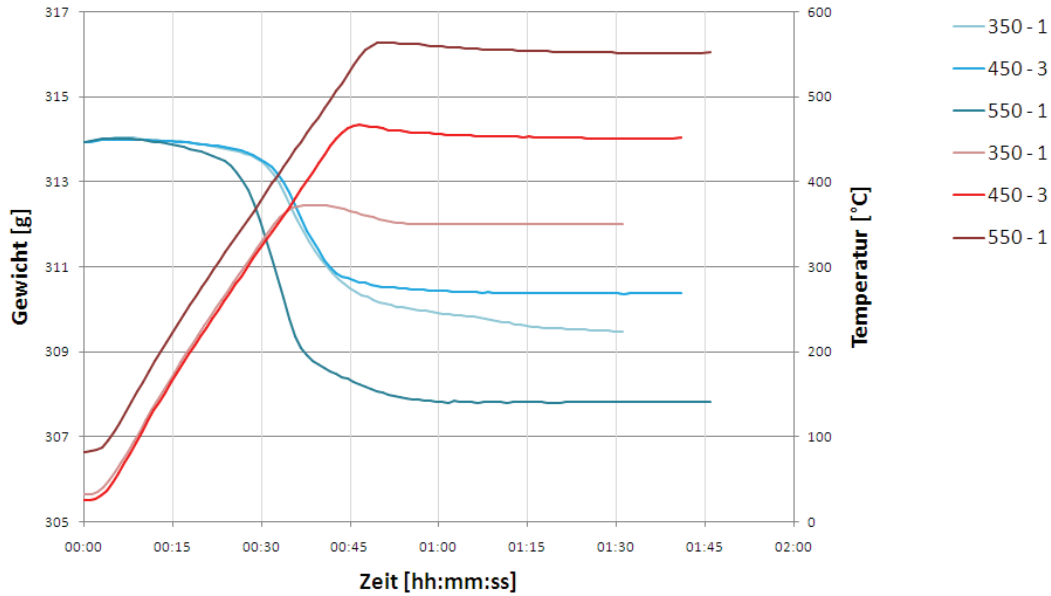


Abbildung 59: Abschwelverlauf von Spenglerblech

Die chemische Zusammensetzung des Spenglerblechs nach den Abschwelvorgängen zeigt einen sehr starken Kohlenstoffabfall von 25 °C auf 350 °C. Die Beschichtungen weisen eine Reihe von unterschiedlichen Inhaltsstoffen auf, deren Verhalten bei den jeweiligen Temperaturen der Abbildung 60 zu entnehmen ist. Aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes kann hauptsächlich von oxidischem Material im Rückstand ausgegangen werden. Dabei lassen sich wieder typische Farbpigmente wie Titan-, Eisen- oder Manganoxide erkennen.

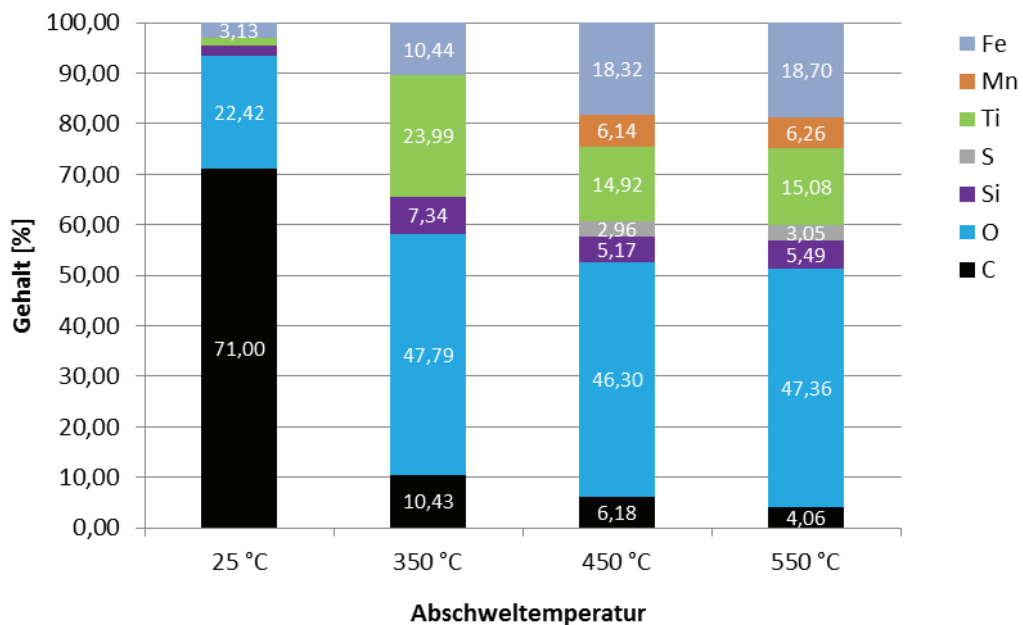


Abbildung 60: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von Spenglerblech

9.2.5 Foliertes Spenglerblech

Dieses Material gleicht im Grundmaterial dem Spenglerblech mit dem Unterschied, dass eine Folie auf das Blech geklebt ist. Dadurch wird der organische Anteil enorm erhöht und Abschwelverluste zwischen 2,23 % und 4,04 % erreicht. Durch diesen erhöhten Organikanteil bildet sich Teer aus. Abbildungen 61 und 62 zeigen die abgeschwelten Proben.

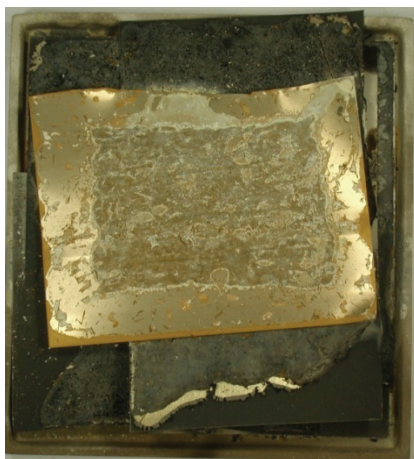


(a)



(b)

Abbildung 61: Foliertes Spenglerblech (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt



(a)



(b)

Abbildung 62: Foliertes Spenglerblech (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt

In Abbildung 63 ist der Abschwelverlauf von foliertem Spenglerblech dargestellt. Aufgrund des hohen Organikanteils lassen sich sehr starke Gewichtsabnahmen verzeichnen, welche bei ca. 330 °C starten und dann innerhalb von 15 Minuten enden. Ausgenommen davon ist die Probe, die bei 350 °C abgeschwelt wurde. Sie zeigt nach starkem Gewichtsabfall im

Bereich von 450 °C und 550 °C noch einen stetigen Masseverlust bis kurz vor Versuchsende.

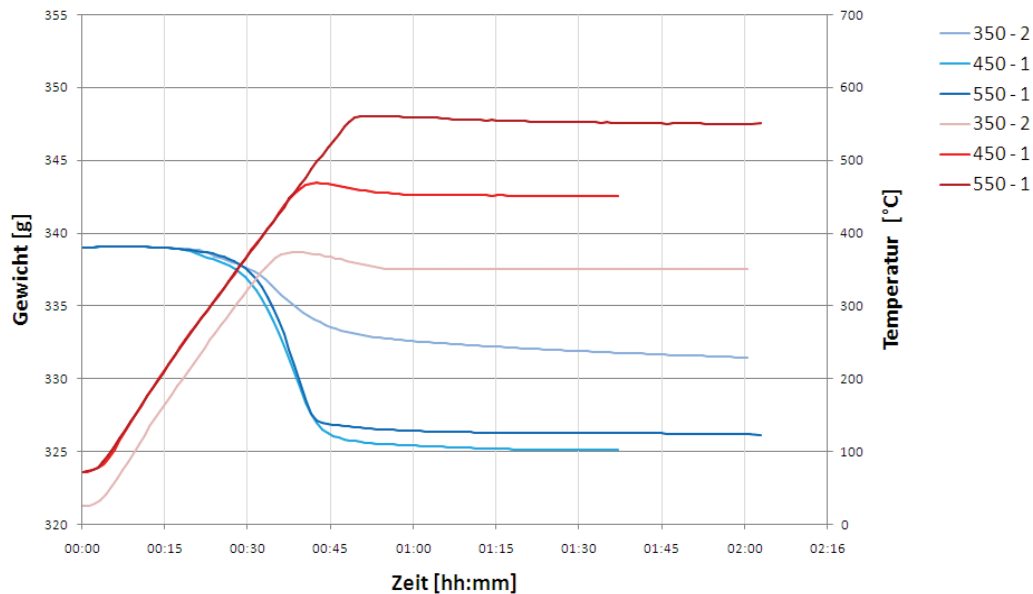


Abbildung 63: Abschwelverlauf von foliertem Spenglerblech

In Abbildung 64 sind die Anteile der Inhaltsstoffe der Beschichtung nach den jeweiligen Abschwelbehandlungen des Bleches ersichtlich. Der Kohlenstoffgehalt sinkt ab, während der Metalloxidanteil steigt. Der wesentliche Unterschied zu den anderen Proben liegt in der höheren Anzahl an Inhaltsstoffen.

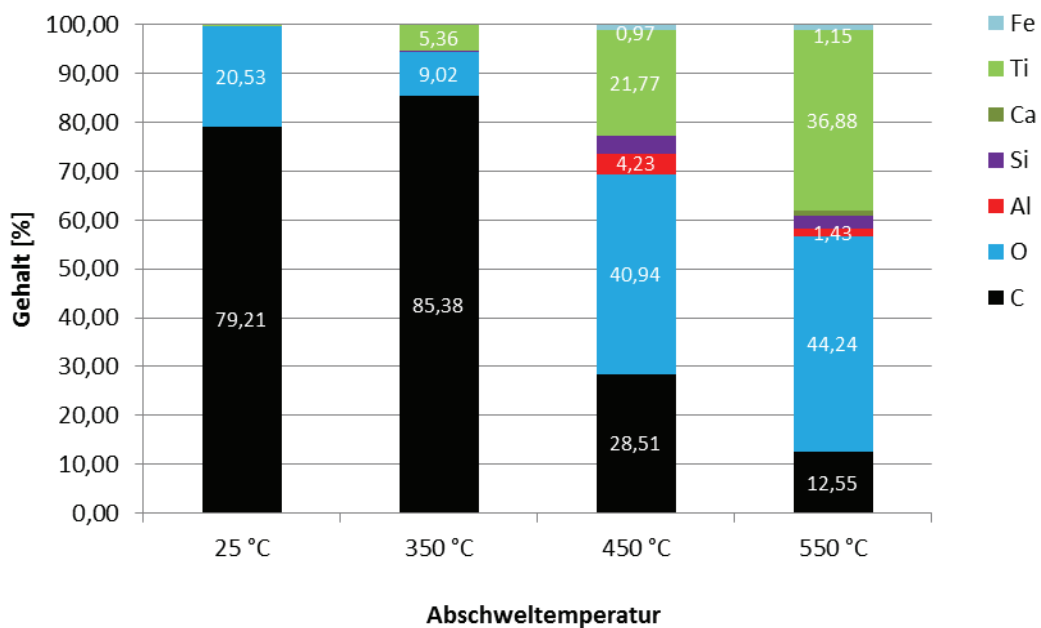


Abbildung 64: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von foliertem Spenglerblech

Wird die leicht abziehbare Folie separat abgeschwelt, ergeben sich die in Abbildung 65 angeführten Zusammensetzungen. Da der Kohlenstoffgehalt von 25 °C auf 350 °C steigt und der Sauerstoffgehalt sinkt, fand in diesem Temperaturfenster die Verflüchtigung von Kleberresten statt. Danach ist ein normaler Abschmelvorgang zu erkennen. Da die Folie eine weiße Farbe aufweist, ist der Hauptbestandteil des Rückstandes Titanoxid, wie auch anhand der Analyse in Abbildung 65 ersichtlich ist.

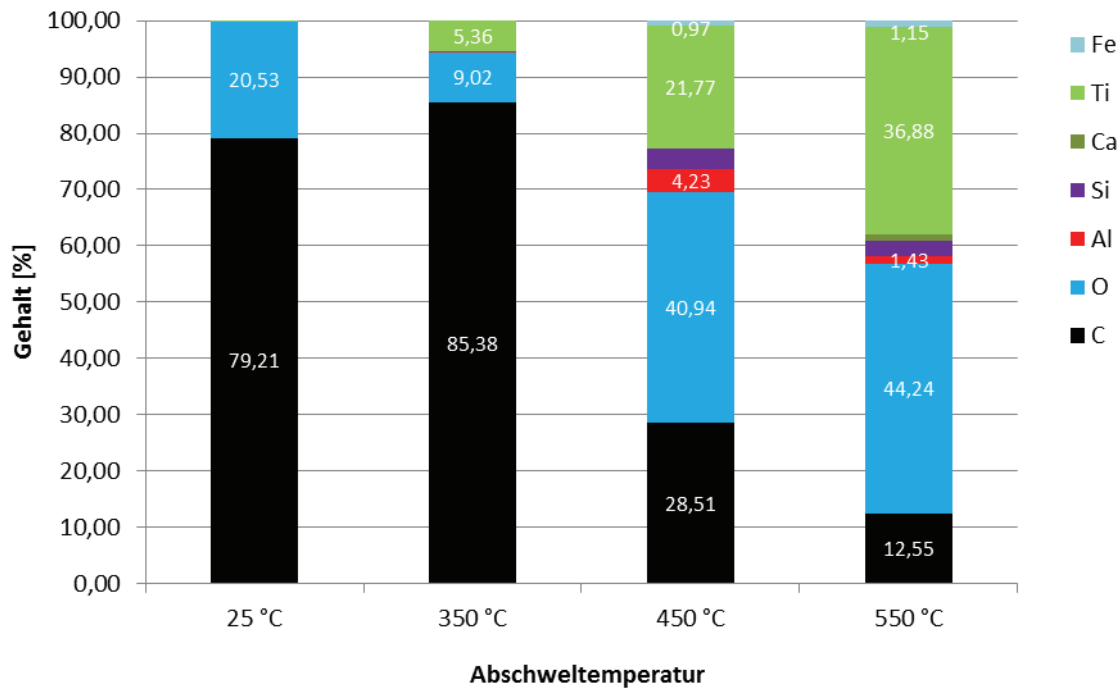


Abbildung 65: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschmelzen der Folie

9.2.6 Zusammenfassung

In Abbildung 66 sind die Ergebnisse zu allen durchgeführten Abschmelversuchen dargestellt. In der Legende ist das jeweilige Material mit der Abschmeltemperatur angeführt. Tendenziell ist zu erkennen, dass mit höherer Temperatur mehr organisches Material verflüchtigt werden kann (wie auch in der Literatur angegeben). Bei den Profilen, Spenglerblech und beim folierten Spenglerblech ist der Abschmelgrad bei 450 °C höher als jener bei 550 °C, wobei der Unterschied sehr gering ist und davon auszugehen ist, dass schon ab 450 °C ein vollständiger Abschmelvorgang stattgefunden hat. Die Profile und das folierte Spenglerblech zeigen weiters, dass bei zu geringer Abschmeltemperatur nur etwa die Hälfte des organischen Materials verflüchtigt wird, während das Spenglerblech schon bei relativ niedrigen Temperaturen einen Großteil seiner Beschichtung vergast. Daraus folgt, dass die Profile und das folierte Spenglerblech wesentlich sensibler auf ungleichmäßige Temperaturverteilungen reagieren als z. B. Spenglerblech.

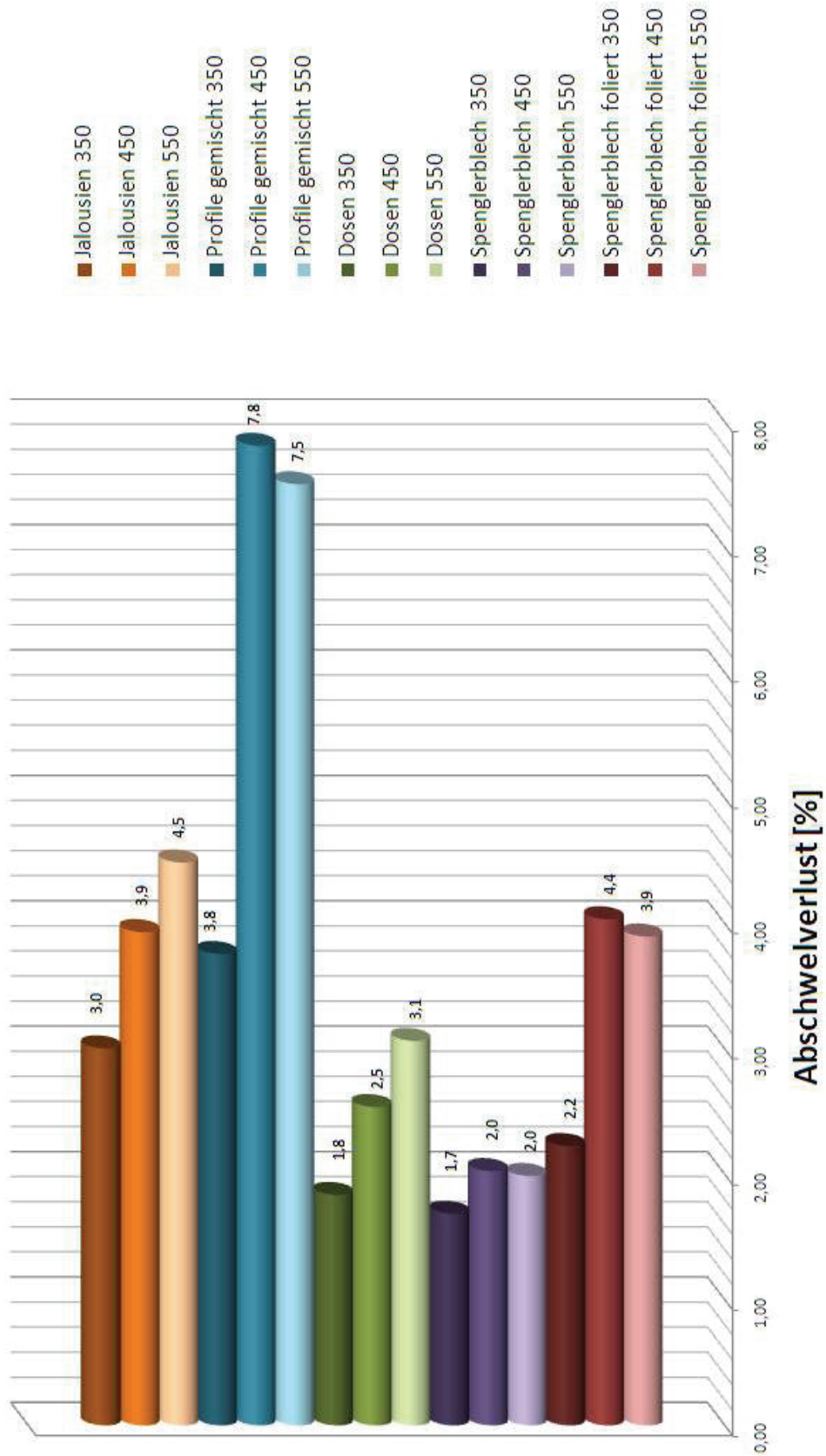


Abbildung 66: Abschmelzverluste der jeweiligen Schrottproben

10. Schmelzverhalten

Um die Verluste beim Schmelzen bezüglich der unter Kapitel 3 erläuterten Proben qualitativ als auch quantitativ zu erfassen, wurden aufbauend auf die Abschweluntersuchungen Schmelzversuche durchgeführt.

10.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Ermittlung der Umschmelzverluste bzw. Krätzebildung der jeweiligen Proben wurde folgende Versuchseinrichtung verwendet (siehe Abbildung 67).

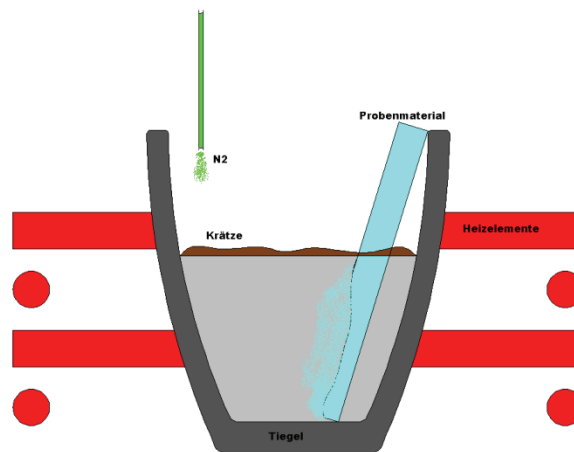


Abbildung 67: Versuchsaufbau der Schmelzversuche

In einem Kohlenstofftiegel erfolgte das Aufschmelzen von ca. 500 g Aluminium mit einer Reinheit von 99 %. In das Metallbad wurde die jeweilige Probe chargiert und die gebildete Krätze nach 30 Minuten abgezogen. Durch genaues Verwiegen aller Einsatzstoffe fand die Bestimmung des Krätzeanteiles statt. Um eine Oxidation des vorgelegten Aluminiums zu vermeiden, erfolgte die Spülung mit Stickstoff (siehe Abbildung 67). Die Temperatur der Heizelemente des Widerstandsofens wurde auf 800 °C eingestellt, so dass im Metallbad eine Temperatur von 700 °C – 750 °C vorlag. In Abbildung 68 ist der Versuchsablauf dargestellt.

1. Aufschmelzen Reinaluminium



2. Probenchargierung



3. Krätzebildung



4. Abziehen der Krätze



5. Abgießen



6. Krätzerückwaage

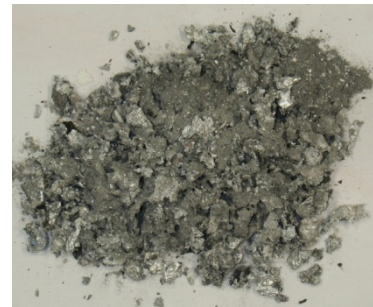


Abbildung 68: Versuchsablauf der Schmelzversuche

Nach dem Aufschmelzen des vorgelegten Aluminiums ist lediglich eine sehr dünne und vernachlässigbar kleine Oxid- bzw. Nitridhaut auf der Badoberfläche zu erkennen. Das Chargieren der unterschiedlichen Proben verlief teilweise sehr problematisch. Bei den Profilen trat aufgrund ihrer Isolierung eine sehr starke Rauchentwicklung und Flammenbildung auf. Die Jalousielamellen und Dosen mussten aufgrund ihres geringen Gewichts regelrecht unter das Schmelzbad gedrückt werden, wobei die Dosen trotzdem immer wieder aufschwammen. Nach dem Einbringen des Probenmaterials fand die Krätzebildung statt. Das Abziehen der Krätze erfolgte nach einer exakt definierten Zeit. Die Dauer wurde mit 30 Minuten festgelegt, da nach dieser Zeit das vollständige Aufschmelzen des Einsatzstoffes garantiert war. Das Entfernen der Krätze erfolgte mit Werkzeugen, welche mit einer Schlichte versehen waren, um das Mitreißen und Ankleben von metallischem Aluminium durch die Werkzeuge zu minimieren. Danach wurde das verbleibende Aluminium in Barren abgegossen und schließlich die einzelnen Stoffe rückgewogen, um den Krätzeanteil bestimmen zu können.

10.2 Ergebnisse der Schmelzversuche

In Abbildung 69 sind die jeweiligen Krätzeanteile bezogen auf das Einsatzmaterial dargestellt. Zur Bewertung der Krätzebildung wird das Gewicht der Krätze auf jenes des Einsatzmaterials bezogen (Gleichung 10.1).

$$\% \text{ Krätze} = \frac{\text{Masse}_{\text{Krätze}}}{\text{Masse}_{\text{Einsatzmaterial}}} \cdot 100 \quad (10.1)$$

Die Dosen weisen die höchste Krätzebildung auf. Ähnlich hohe Werte wurden bei den Jalousien festgestellt. Die Profile zeigen nach dem Abschwelen mit niedriger Temperatur einen starken Krätzeanfall. Mit steigender Abschweltemperatur sinkt der Krätzeanteil wie auch bei den Dosen und Jalousielamellen. Das Spenglerblech zeigt eine ähnliche Tendenz. Das folierte Spenglerblech weist keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Abschweltemperaturen auf. Während des Chargiervorgangs war starke Rauch- und teilweise sogar Flammenbildung zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass die organischen Abschwelrückstände verbrannt wurden bevor diese ins Metallbad gelangten. Daher liegt immer ein ähnlicher Abschwelgrad unabhängig von der vorhergehenden Behandlung vor.

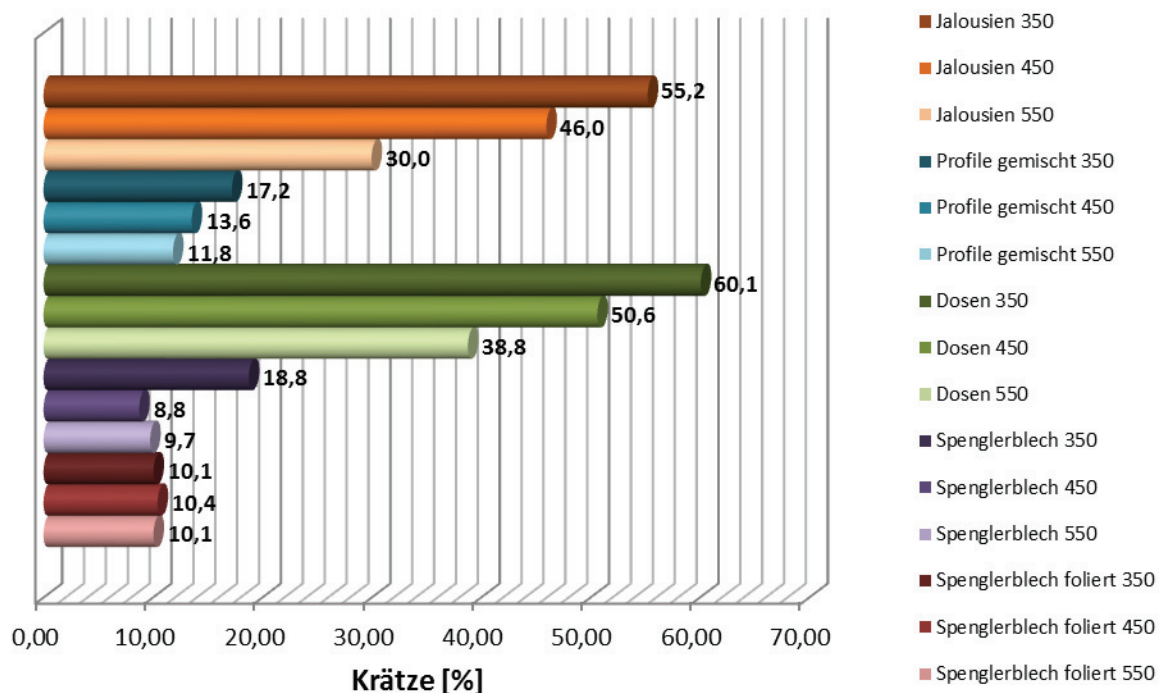


Abbildung 69: Krätzebildung bezogen auf das Einsatzmaterial

Zur Feststellung des metallischen Aluminiumgehaltes der Krätzen wurden die Proben von der Firma „A.M.C.O united samplers and assayers GmbH“ in Duisburg auf ihren Aluminiumgehalt analysiert. In Tabelle 19 sind die jeweiligen Aluminiumgehalte für verschiedene Proben angeführt. Die meisten Einsatzmaterialien zeigen einen sehr hohen metallischen Aluminiumgehalt (bis zu 96 %). Diese außerordentlich hohen Werte sind auf den Abkrätzvorgang zurückzuführen, da flüssiges Aluminium mitgerissen wird, welches sich anschließend nicht mehr von der Krätze trennen lässt.

Tabelle 19: Aluminiumgehalt in der Krätze

Probenmaterial	Anteil metallisches Aluminium [%]
Jalousielamellen 350 °C	93,5
Jalousielamellen 450 °C	94,0
Jalousielamellen 550 °C	89,0
Profile 350 °C	85,1
Profile 450 °C	81,0
Profile 550 °C	74,1
Spenglerblech 350 °C	93,5
Spenglerblech 450 °C	89,2
Spenglerblech 550 °C	93,5
Spenglerblech foliert 350 °C	88,9
Spenglerblech foliert 450 °C	91,1
Spenglerblech foliert 550 °C	96,1
Dosen 350 °C	95,9
Dosen 450 °C	97,0
Dosen 550 °C	95,8

Abbildung 70 zeigt die jeweiligen Krätzegehalte ohne metallisches Aluminium. Diese Anteile stellen die theoretischen Krätze mengen dar, wenn das Mitreißen bzw. die Kontamination der Krätze mit metallischem Aluminium vollständig verhindert wird.

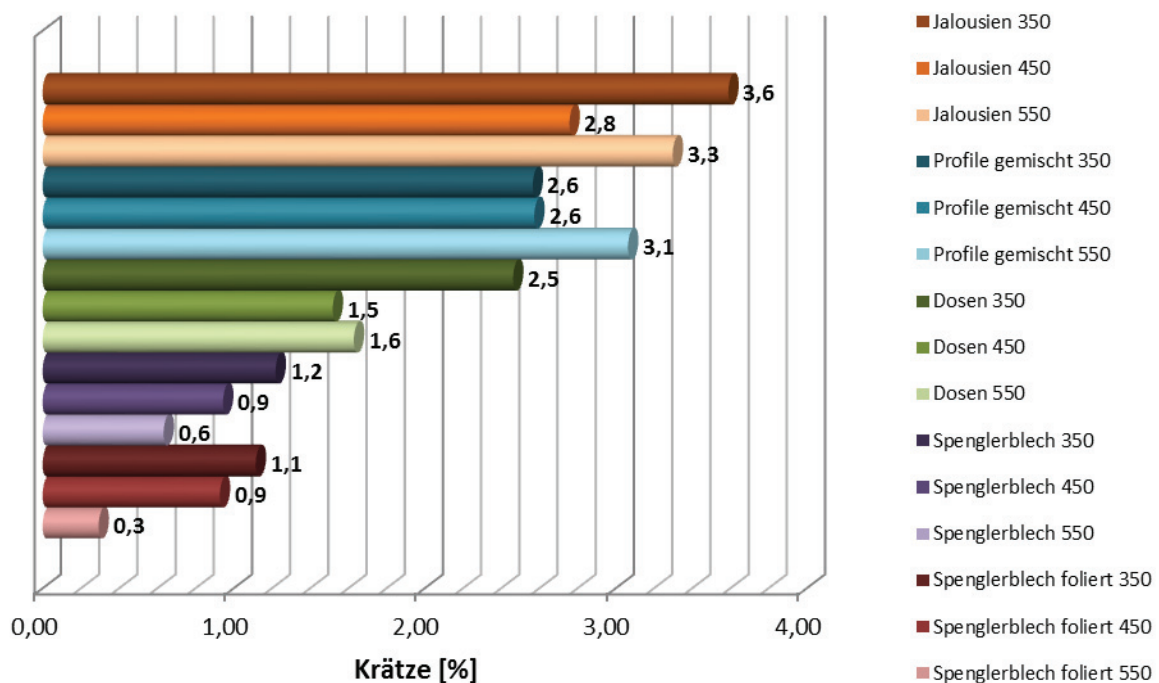


Abbildung 70: Krätzebildung ohne metallisches Aluminium

Die während des Schmelzversuchs abgegossenen Blöcke wurden immer wieder als Vorlagematerial verwendet. Tabelle 20 zeigt den Aluminiumgehalt der abgegossenen Blöcke. Daraus ist zu erkennen, dass keine wesentliche Verunreinigung des 99 %igen Startmaterials während der Schmelzversuche stattfand.

Tabelle 20: Aluminiumgehalt in den Barren

Block Nr.	Aluminium [%]
1	97,90
2	98,10
3	98,82
4	98,39
5	98,04
6	98,01
7	98,16
8	98,36
9	98,73
10	98,13
11	98,30
12	98,23

Während des Schmelzversuchs waren diverse Verflüchtigungen durch Rauch, Flammen und Staub zu verzeichnen. Mittels Gleichung 10.2 wurde das Ausbringen an Aluminium bestimmt.

$$\text{Aluminiumausbringen} = \frac{\text{Masse}_{\text{Aluminium+Tiegel}} + \text{Masse}_{\text{Barren}} - \text{Masse}_{\text{Aluminium vorgelegt}}}{\text{Masse}_{\text{Einsatzmaterial}}} \quad (10.2)$$

Die $\text{Masse}_{\text{Aluminium+Tiegel}}$ beschreibt jenes Aluminiumgewicht, das nach dem Abgießen im Tiegel zurückbleibt. Da ausschließlich Aluminium im Tiegel vorhanden ist, führt eine einfache Differenzwiegung des Tiegels vor und nach dem Versuch zu dieser Masse. Die anderen Mengen sind durch den jeweiligen Index definiert. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 71 dargestellt. Im Bezug auf die vorhergehenden Krätzbildungsauswertungen muss natürlich ein Umkehrschluss gelten, daher weisen die Dosen und Jalousien die geringsten Ausbringungsraten auf, da sie auch die meiste Krätze bilden und diese den mengenmäßig größten Verlust darstellt.

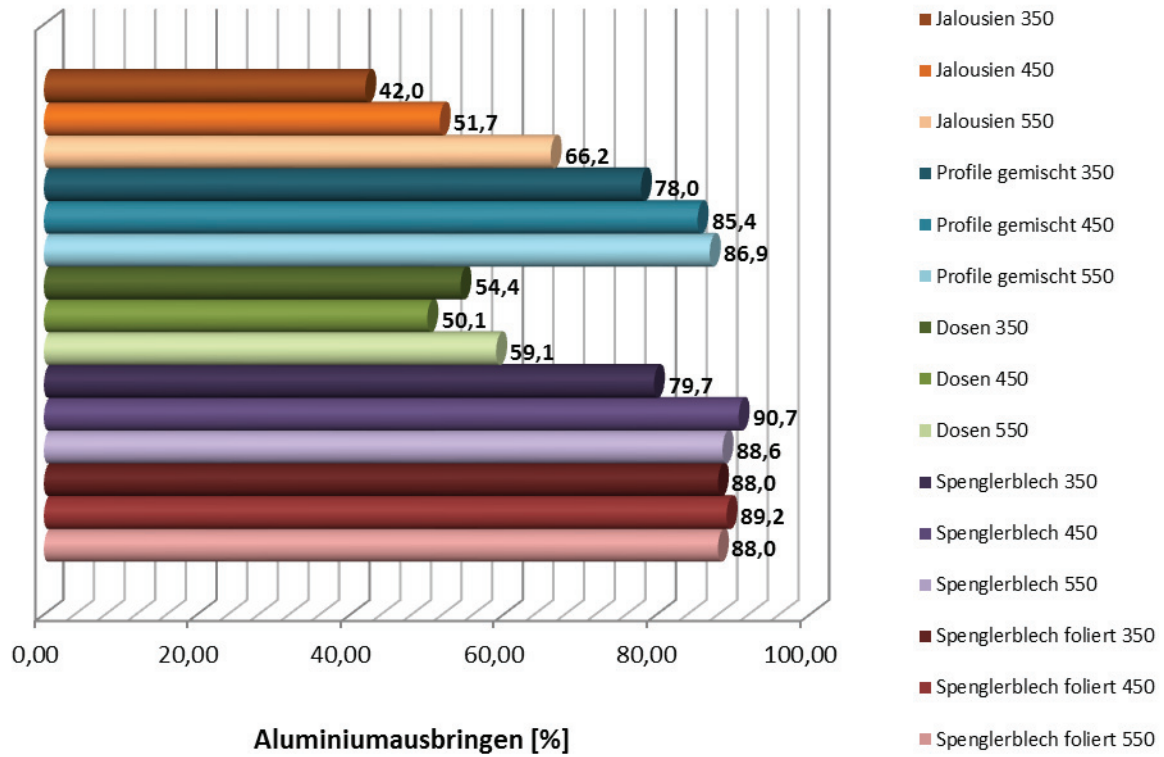


Abbildung 71: Aluminiumausbringen der Schmelzversuche

11. Ergebnisse und Diskussion

Die nachfolgenden Punkte erläutern die Endergebnisse der jeweiligen Versuche.

11.1 Trocknungsverluste

Trocknungsverluste treten bei feuchten Einsatzstoffen auf. Da das Material laut den Ausführungen in den vorhergehenden Kapiteln nie frei von Wasser vorliegt, kommt es immer zu einem Verlust beim Verwerten von Aluminiumschrott. Abbildung 72 zeigt das maximal anhaftende Wasser an den Proben in Gewichtsprozent. Das heißt, wenn Kühlermaterial in vollkommen feuchtem Zustand angeliefert wird, können bis zu 11,4 % Wasser enthalten sein. Das sind bei einer 10 t-Lieferung 1,14 t Wasser. Zum einen erhöht sich durch diese Feuchtigkeit das Schrottgewicht und zum anderen besteht die Gefahr eines Wassereintrags in das Schmelzaggregat.

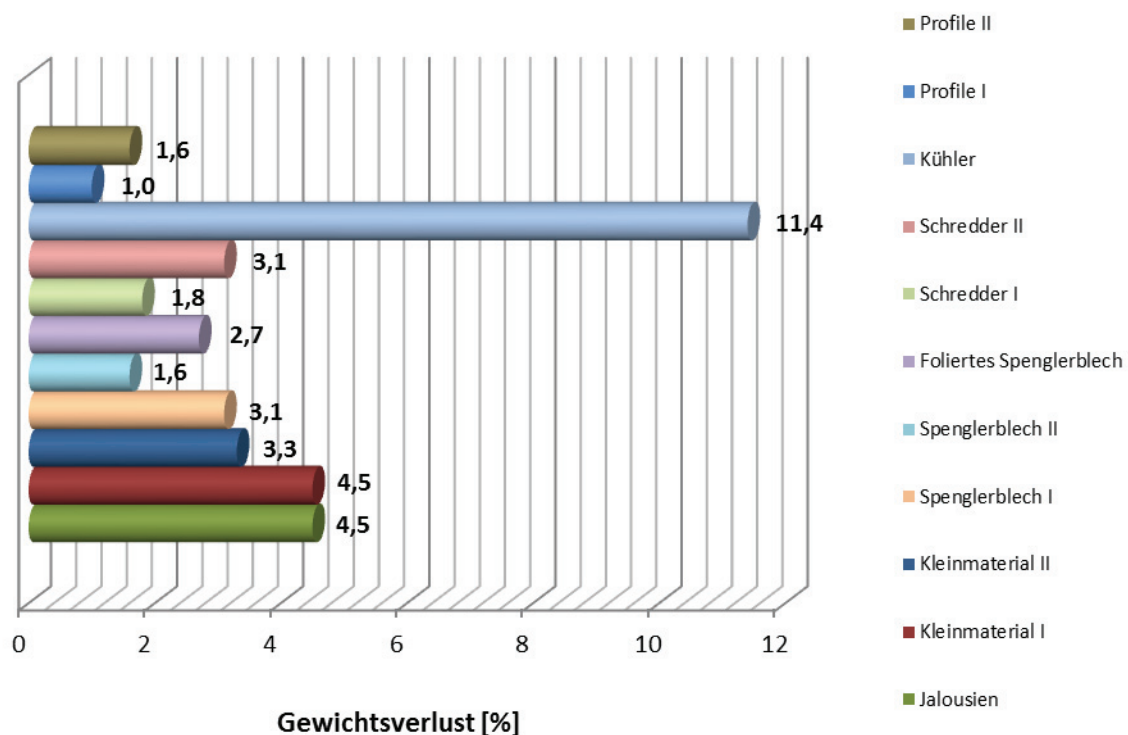


Abbildung 72: Trocknungsverluste der eingesetzten Proben

Wie aus Abbildung 72 ersichtlich, weisen Schrotte mit großer spezifischer Oberfläche (Kühlermaterial und Jalousielamellen) bessere Wasseraufnahmefähigkeiten auf. Neben der spezifischen Oberfläche führen auch Hohlräume, wie sie beim Kühlermaterial auftreten zu höherer Wasseraufnahmekapazität. Weiters werden durch hygroskopische Verunreini-

gungen wie Holzteile oder Staub (Kleinmaterial) große Wassermengen im Schrott gebunden. Zusammenfassend wirken sich folgende Eigenschaften des Schrottes auf die Wasseraufnahmekapazität auf:

- Spezifische Oberfläche
- Hohlräume
- Hygroskopische Verunreinigungen

Das in den Schmelzprozess eingebrachte Wasser birgt bei entsprechender Menge einerseits ein Gefahrenpotenzial und andererseits führt es zu vermehrter Krätzebildung durch den höheren H₂O-Gehalt in der Ofenatmosphäre.

Durch Kompaktieren (kleinere spezifische Oberfläche), Zerkleinern (keine Hohlräume) und Sortieren (keine Verunreinigungen) kann die Wasseraufnahmekapazität verringert werden. Eine Trocknung des Schrottes führt unabhängig von den genannten Eigenschaften zu einer Verringerung des Wassergehaltes.

11.2 Abschwel- und Schmelzverluste

Abbildung 73 fasst die Verluste der Abschwel- und Schmelzbehandlung als Aluminiumausbringen zusammen. Bei den Jalousielamellen führt beispielsweise eine zu geringe Abschweltemperatur zu einem Absinken des Ausbringens um ca. 20 %. Die Dosen zeigen ebenfalls eine starke Abhängigkeit von der Temperatur. Die anderen Proben weisen ebenso dieses Verhalten auf, jedoch nicht in diesem Ausmaß wie Dosen und Jalousielamellen. In den Schrottpackungen, die in den Ofen chargiert werden, treten oft Temperaturgradienten von außen nach innen auf, wodurch stark unterschiedliche Abschwelerggebnisse folgen. Daher ist durch ein genau geregeltes Abschwelen das Aluminiumausbringen bei bestimmten Proben (Jalousielamellen) enorm zu steigern.

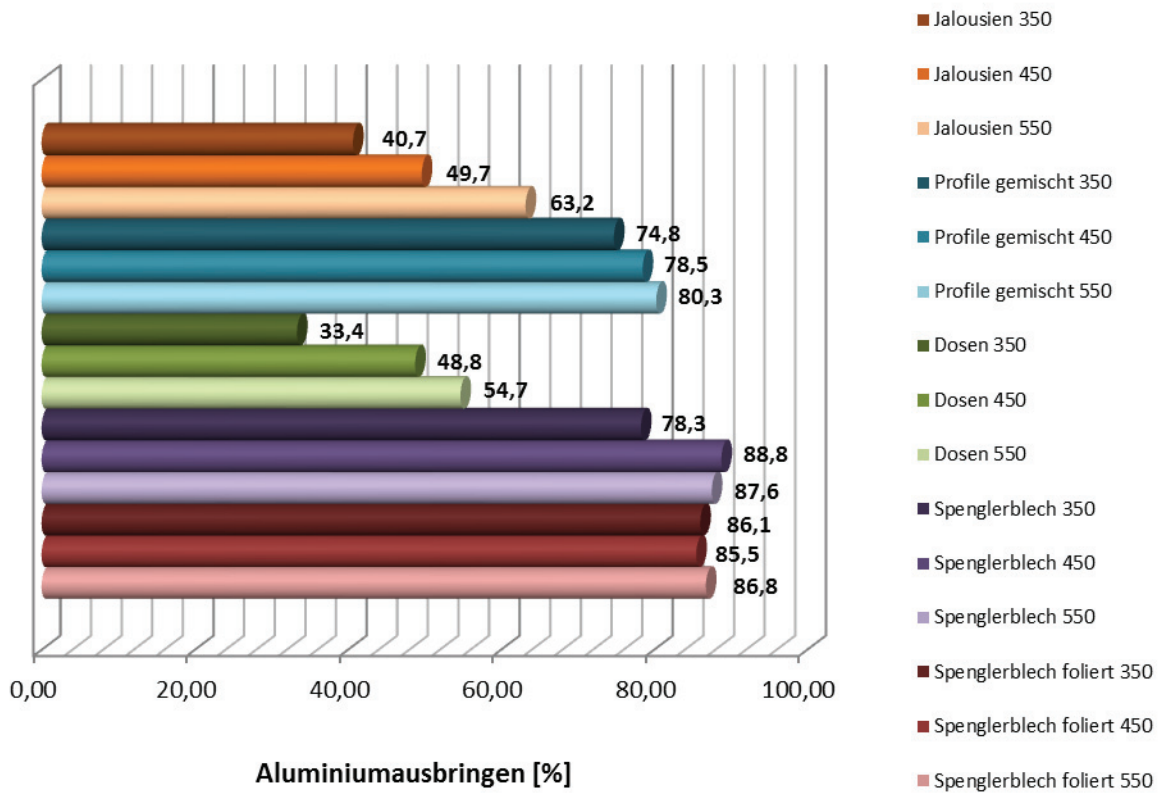


Abbildung 73: Aluminiumausbringen nach Abschwelen und Schmelzen

11.3 Gesamtverluste

Tabelle 21 zeigt den Gesamtverlust der jeweiligen Proben inklusive Ansammlungen von Feuchtigkeit.

Tabelle 21: Anteil der jeweiligen Verluste und Ausbringen nasser Proben

	Abschwel- temperatur [°C]	Feuchte [%]	Abschwel- verlust [%]	Krätze [%]	Verlust beim Schmelzen [%]	Aluminium- Ausbringen [%]
Spenglerblech foliert	350	2,63	2,11	9,57	1,88	83,81
Spenglerblech foliert	450	2,63	3,82	9,76	0,41	83,38
Spenglerblech foliert	550	2,63	3,74	7,14	0,78	85,68
Spenglerblech	350	3,01	1,59	17,90	1,52	75,98
Spenglerblech	450	3,01	1,91	8,32	0,52	86,24
Spenglerblech	550	3,01	1,87	9,26	1,59	84,27
Dosen	350	0,00	1,54	49,35	4,43	44,68
Dosen	450	0,00	2,44	47,50	3,10	46,96
Dosen	550	0,00	3,06	37,59	2,14	57,21
Profile	350	1,57	3,63	16,29	4,74	73,76
Profile	450	1,57	7,56	12,30	1,08	77,48
Profile	550	1,57	7,26	10,77	1,21	79,18
Jalousielamellen	350	4,30	2,75	51,29	2,69	38,97
Jalousielamellen	450	4,30	3,59	42,30	2,25	47,56
Jalousielamellen	550	4,30	4,13	27,65	2,85	61,03

Abbildung 74 stellt den Gesamtverlust bzw. die Aufschlüsselung der Verluste graphisch dar. Die farblichen Unterteilungen der verschiedenen Balken geben an, um welche Verluste es sich handelt.

Bei Dosen ist nur ein sehr geringer Abschwelverlust ersichtlich, jedoch bildet dieses Material enorme Krätzemengen beim Schmelzen, wodurch ein niedriges Ausbringen an Aluminium erzielt wird. Da mit den Dosen kein Trocknungsversuch durchgeführt wurde, standen keine Daten zur Auswertung zur Verfügung. Deshalb entspricht dieses Ergebnis bei Dosen trockenem Material. Bei den anderen Einsatzstoffen stellt der Feuchtegehalt die maximal

mögliche Wasserbeladung dar. Die in der Abbildung 74 angegebenen Verluste treten beim Schmelzen durch Staubaustrag oder Verbrennen des organischen Restmaterials auf. Die Profile 350 °C weisen aufgrund der geringen Abschmeltemperatur noch sehr hohe Organikanteile auf. Durch die Größe des Einsatzmaterials war kein vollständiges Eintauchen in die Schmelze möglich, wodurch ein Großteil dieses Materials verbrannte und neben der Krätze einen weiteren Schmelzverlust verursachte.

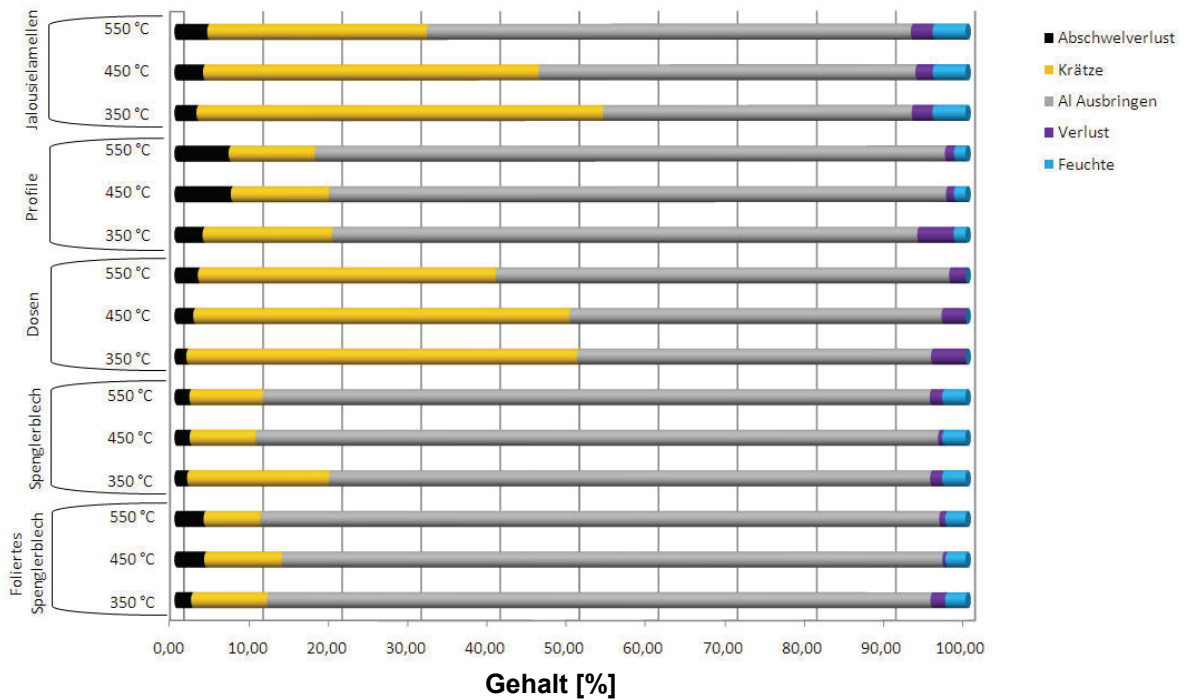


Abbildung 74: Anteil der jeweiligen Verluste und Ausbringen beim Recyceln nasser Proben

Nachfolgend werden die Gesamtverluste der verschiedenen Proben anhand von Sankey-Diagrammen graphisch dargestellt.

Diese Diagramme (Abbildung 75 – 79) stellen den Materialfluss mit Hilfe von mengenproportionalen Pfeilen dar. Die Darstellungen gehen von jeweils 100 kg Schrott aus.

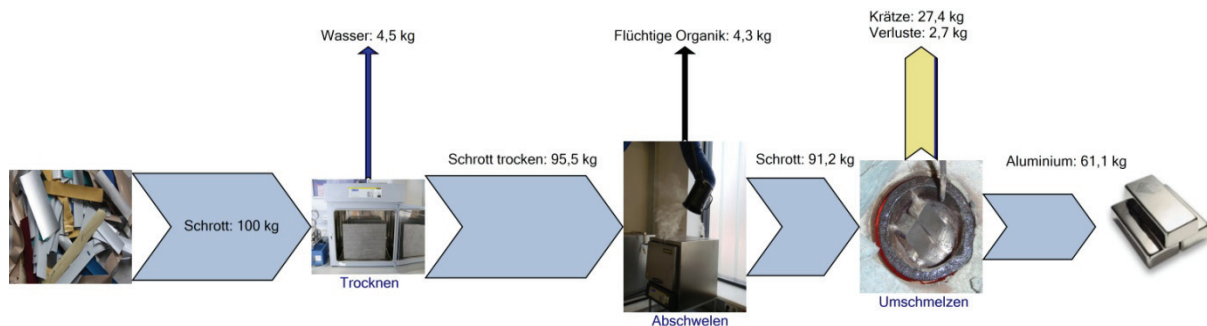


Abbildung 75: Ausbringen für Jalousielamellen bei den verschiedenen Prozessstufen

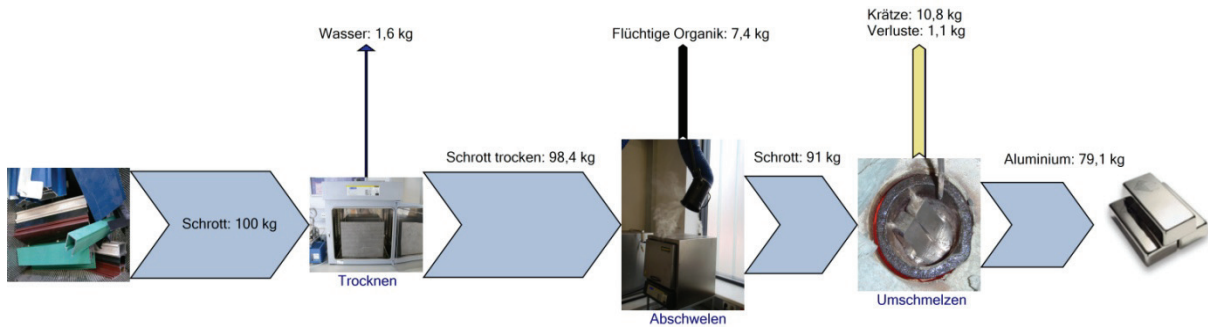


Abbildung 76: Ausbringen für Profile bei den verschiedenen Prozessstufen

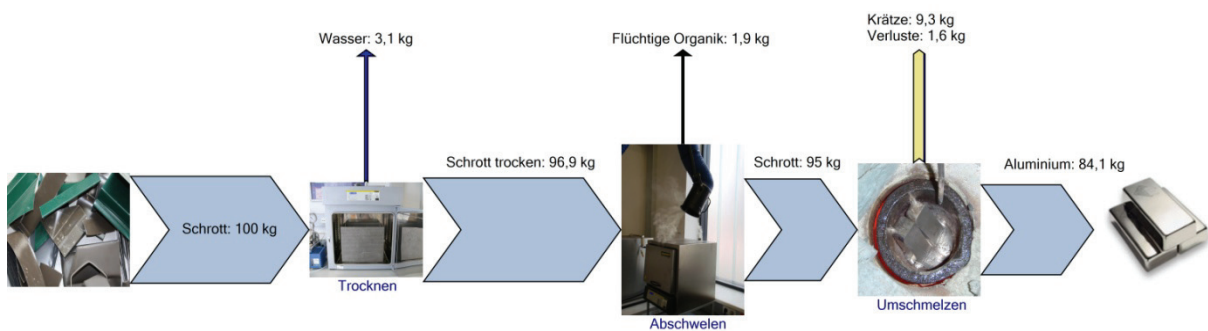


Abbildung 77: Ausbringen für Spenglerblech bei den verschiedenen Prozessstufen

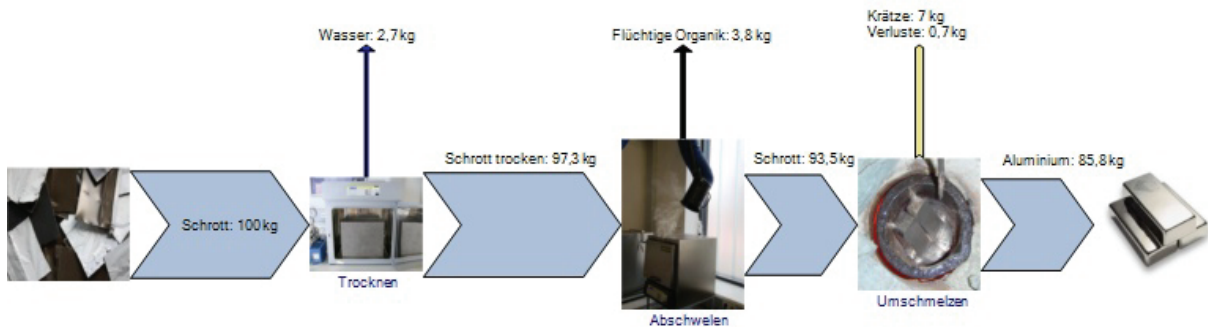


Abbildung 78: Ausbringen für foliertes Spenglerblech bei den verschiedenen Prozessstufen

Da mit den Dosen kein Trocknungsversuch durchgeführt wurde, ist in Abbildung 81 kein Trocknungsprozess dargestellt.

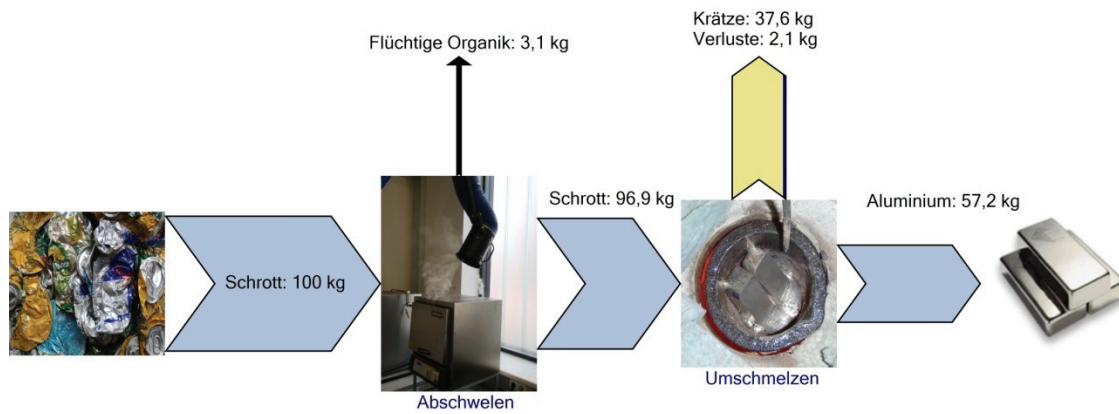


Abbildung 79: Ausbringen für Dosen bei den verschiedenen Prozessstufen

Wie aus den Sankey-Digrammen zu entnehmen ist, sind die Ausbringungsraten stark materialabhängig. Bei entsprechender Vorbehandlung (Abschwelbehandlung) ist das Ausbringen akzeptabel, nur die Dosen und Jalousien weisen starke Gesamtverluste auf.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Das Recycling von Metallen spielt aus ökologischer und ökonomischer Sicht eine wichtige Rolle, da Energie, Rohstoffe eingespart und Deponiekapazitäten geschont werden. Die Aufarbeitung von Aluminiumschrotten wirkt sich auf den Energiebedarf besonders positiv auf. Die Sekundärmaterialien, welche bei der Verwertung zum Einsatz kommen, enthalten eine Vielzahl von Verunreinigungen, die das Ausbringen beeinflussen. Das Ziel des Aluminiumrecyclings ist die Minimierung der Schmelzverluste unter wirtschaftlichen Bedingungen. Daher ist die Kenntnis über das Verhalten der jeweiligen Verunreinigungen bzw. des Schrottes während des Schmelzprozesses von Bedeutung. Im Rahmen einer ausführlichen Literatur- und Patentrecherche erfolgte die Beschreibung der unterschiedlichen Ofenanlagen, wobei im Besonderen auf den Zweikammerofen eingegangen wurde, sowie die mögliche Aufbereitung und das Verhalten von Aluminium und der organischen Anhaftungen bei erhöhter Temperatur. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde weiters eine exakte Charakterisierung der Einsatzmaterialien sowie Trocknungs-, Abschwel- und Schmelzversuche durchgeführt. Besonderes Augenmerk lag auf dem Verhalten der organischen Anhaftungen (Beschichtungen, Lacke, usw.) während dieser Untersuchungen. Die jeweiligen Proben (Dosen, Profile, Spenglerblech und Jalousielamellen) stammen von der Hütte Klein Reichenbach.

Im ersten Schritt, der Charakterisierung des Einsatzmaterials, erfolgte die Bestimmung der Schichtdicken und des Aussehens der Proben. Die nachfolgenden Trocknungsversuche dienten zur Ermittlung der maximalen Wasseraufnahmekapazität der verschiedenen Schrotte. Die Verluste durch Verflüchtigung von organischem Material konnten mit Hilfe von Abschwelversuchen bestimmt werden. Letztendlich fand das Einschmelzen der abgeschwelten Proben statt, wodurch die jeweiligen Umschmelzverluste ermittelt wurden. Durch die Zusammenführung der jeweiligen Versuchsdaten konnten Gesamtverlust und dessen Verteilung für jede Probe bestimmt werden. Die erstellten Sankey-Diagramme zeigen, bei welchem Prozess unter welchen Bedingungen welche Verluste auftreten. Mit Hilfe eines auf den gewonnenen Daten basierenden Berechnungsprogrammes können auch Verluste und anfallende Krätzemenge vorhergesagt werden. Diese Berechnung beinhaltet lediglich die fünf erprobten Materialien. Um den Datensatz in Zukunft zu erweitern, ist das angeführte Versuchsschema für weitere Schrotte durchzuführen.

13. Literaturverzeichnis

- [1] Schmitz C: Handbook of Aluminum Recycling: Fundamentals. Mechanical Preparation. Metallurgical Processing. Plant Design; Vulkan-Verlag, 2006, ISBN: 3-8027-2936-6
- [2] Bertram M.; Kirchner G.: Aluminum recycling the road to high quality products; Report of EAA/OEA
- [3] Global Aluminum Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development, Report of IAI, 2009
- [4] Green J.: Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability, ASM International, 2007, ISBN: 0-87170-859-0
- [5] Internet: <http://www.aluinfo.de> (20.12.2010); Homepage der GDA
- [6] Totten G.; Mackenzi S.: Handbook of Aluminum: volume Two: Alloy Production and Materials Manufacturing, Marcel Dekker, 2003, ISBN: 0-8247-0896-2
- [7] Giese A.; Rahms H.: Optimierung der thermischen Prozessführung beim Recycling von Aluminiumschrott unter Berücksichtigung des Einflusses organischer Anhaftungen auf den Aluminiumabbrand, Essen, Forschungsbericht, 2008,
- [8] Schlesinger M.: Aluminium Recycling, CRC Press, 2007, ISBN: 0-8493-9662-X
- [9] Rabah M.: Preparation of aluminum-magnesium alloys and some valuable salts from used beverage cans, Waste Management 23, 2003, 173 – 182
- [10] Internet: <http://www.result-technology.com> (05.01.2010); Homepage der Result Technology AG
- [11] Thomanetz E.: Vermeidung von Abfällen und Emissionen bei der Sekundäraluminium-Herstellung im Produktionsmassstab, 1999, ABAG-itm GmbH,
- [12] Internet: <http://www.insertec.biz> (05.01.2010); Produktinformation IDEX System
- [13] Rao R.: Resource recovery and recycling from metallurgical wastes, Elsevier, 2006, ISBN: 0-08-045131-4
- [14] Krone K.: Aluminium Recycling vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, VDS, 2000, ISBN: 3-00-03839-6
- [15] Internet: <http://www.airproducts.de> (09.01.2010); Produktinformation zu Twin chamber melter und Rotary melter
- [16] Müller B, Poth U.: Lackformulierung und Lackrezeptur, Vincentz, 2005, ISBN: 3-87870-170-5

-
- [17] Kvithyld A., Meskers C.: Recycling Light Metals: Optimal Thermal De-coating, JOM Vol. 60 No. 8, 2008, 47 – 51
- [18] Escherle A: Application of Pyrolysis in Aluminum Recycling, Erzmetall 55 Nr. 9, 2002, 471 - 478
- [19] Kvithyld A, Abel Engh T.: Decoating of aluminum scrap in various atmospheres, Proceedings Light Metals 2002, TMS, 1055 – 1060
- [20] Mukhopadhyay J., Ramana Y. V.: Extraction of Value Added Products from Aluminum Dross Material to Achieve Zero Waste, Proceedings Light Metals 2005, TMS, 1209 - 1212
- [21] Stevens W., Riverin G.: Aluminum melting and dross formation – a historical and modern perspective of the situation, Proceedings Light Metals 2003, TMS, 801 – 807
- [22] Rombach G.: Verhalten mineralischer Pigmente beim Aluminium Recycling, Erzmetall 53, 2000, 98 – 105
- [23] Freti S., Buxman K.: Metallurgy of dross formation on aluminium melts, Light Metal, 1982, AIME
- [24] Gelfort E.: Secondary aluminium recovery without dross formation, Aluminium Vol 73, 1997, 70 – 76, ISSN: 0002-6689
- [25] Dispinar D., Campbell J.: Metal quality studies in secondary remelting of aluminium, Foundry Trade Journal Vol. 178, 2004, 78 – 81, ISSN: 0015-9042

14. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energieverbrauch für die Aluminiumherstellung [2].....	1
Abbildung 2: Aluminiumproduktion in den Jahren 1950 bis 2009 [3]	3
Abbildung 3: Recyclingquoten für Aluminium nach Anwendungsgebieten (2008) [5]	4
Abbildung 4: Darstellung von Neuschrott	6
Abbildung 5: Darstellung von Spänen	6
Abbildung 6: Lebensdauer und Anwendungsgebiete für Aluminium [3].....	7
Abbildung 7: Darstellung von Altschrott	7
Abbildung 8: Skizze eines Wirbelstromabscheiders [8].....	9
Abbildung 9: Überblick der Schmelztechnologien [1]	13
Abbildung 10: Einsatzgebiete der verschiedenen Öfen [14]	14
Abbildung 11: Darstellung eines Zweikammerofens [15]	16
Abbildung 12: Darstellung eines Drehtrommelofens [15]	17
Abbildung 13: Darstellung eines Abschwelvorgangs [17]	22
Abbildung 14: Richardson-Ellingham-Diagramm [14]	26
Abbildung 15: Einfluss der Elemente auf die Oxidation [14]	28
Abbildung 16: Temperatureinfluss auf die Oxidation von flüssigem Aluminium [14].....	29
Abbildung 17: Darstellung gebrauchter Getränkedosen	31
Abbildung 18: Querschiff einer Dose.....	31
Abbildung 19: Darstellung der verwendeten Jalousielamellen.....	32
Abbildung 20: Querschnitt einer Jalousielamelle	32
Abbildung 21: Darstellung der verwendeten Profile	33
Abbildung 22: Querschnitt eines Profils	33
Abbildung 23: Darstellung von Spenglerblech	34
Abbildung 24: Querschnitt eines Spenglerblechs.....	34
Abbildung 25: Darstellung des eingesetzten folierten Spenglerblechs	35
Abbildung 26: Querschnitt Spenglerblech mit Folie	35
Abbildung 27: Darstellung der angefertigten Querschliffe der Proben	36
Abbildung 28: Darstellung der Massenanteile an organischem Material auf den ver- schiedenen Proben	38
Abbildung 29: Darstellung des Probenbehälters	39
Abbildung 30: Probenbehälter im Wasserbad	40
Abbildung 31: Trocknungsöfen für die Versuchsdurchführung	40
Abbildung 32: Jalousien: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen.....	42
Abbildung 33: Kleinmaterial I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	43
Abbildung 34: Kleinmaterial II: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	44

Abbildung 35: Spenglerblech I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	45
Abbildung 36: Spenglerblech II: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	46
Abbildung 37: Foliertes Spenglerblech: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen ...	47
Abbildung 38: Schredder I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	48
Abbildung 39: Schredder II: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	49
Abbildung 40: Kühler: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen.....	50
Abbildung 41: Profile I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	51
Abbildung 42: Profile I: (a) Originalprobe; (b) Probe nach dem Abtropfen	52
Abbildung 43: Versuchsaufbau der Abschwelversuche	55
Abbildung 44: Darstellung des Abschwelofens	56
Abbildung 45: Profile (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt	57
Abbildung 46: Profile (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt.....	57
Abbildung 47: Temperatur- und Gewichtsverlauf beim Abschwelen der Profile	58
Abbildung 48: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von braunen Profilen	58
Abbildung 49: Dosen (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt.....	59
Abbildung 50: Dosen (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt.....	60
Abbildung 51: Abschwelverlauf der Dosen.....	60
Abbildung 52: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von Dosen	61
Abbildung 53: Jalousielamellen (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt.....	62
Abbildung 54: Jalousielamellen (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt	62
Abbildung 55: Abschwelverlauf von Jalousien	63
Abbildung 56: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von Jalousie- lamellen.....	63
Abbildung 57: Spenglerblech (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt	64
Abbildung 58: Spenglerblech (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C abgeschwelt	64
Abbildung 59: Abschwelverlauf von Spenglerblech	65
Abbildung 60: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von Spengler- blech.....	65
Abbildung 61: Foliertes Spenglerblech (a) nicht abgeschwelt (b) bei 350 °C abgeschwelt ...	66
Abbildung 62: Foliertes Spenglerblech (a) bei 450 °C abgeschwelt (b) bei 550 °C ab- geschwelt	66
Abbildung 63: Abschwelverlauf von foliertem Spenglerblech.....	67
Abbildung 64: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen von foliertem Spenglerblech	67
Abbildung 65: Zusammensetzung der Rückstände nach dem Abschwelen der Folie	68
Abbildung 66: Abschwelverluste der jeweiligen Schrottproben.....	69

Abbildung 67: Versuchsaufbau der Schmelzversuche	70
Abbildung 68: Versuchsablauf der Schmelzversuche	71
Abbildung 69: Krätzebildung bezogen auf das Einsatzmaterial	72
Abbildung 70: Krätzebildung ohne metallisches Aluminium	73
Abbildung 71: Aluminiumausbringen der Schmelzversuche	75
Abbildung 72: Trocknungsverluste der eingesetzten Proben	76
Abbildung 73: Aluminiumausbringen nach Abschwelen und Schmelzen	78
Abbildung 74: Anteil der jeweiligen Verluste und Ausbringen beim Recyclen nasser Proben	80
Abbildung 75: Ausbringen für Jalousielamellen bei den verschiedenen Prozessstufen	80
Abbildung 76: Ausbringen für Profile bei den verschiedenen Prozessstufen	81
Abbildung 77: Ausbringen für Spenglerblech bei den verschiedenen Prozessstufen	81
Abbildung 78: Ausbringen für foliertes Spenglerblech bei den verschiedenen Prozessstufen	81
Abbildung 79: Ausbringen für Dosen bei den verschiedenen Prozessstufen	82
Abbildung 80: Abschwelverlauf Spenglerblech mit Oberflächenrelief	90
Abbildung 81: Abschwelverlauf von weißen Profilen	91
Abbildung 82: Abschwelverlauf von grünen Profilen	91
Abbildung 83: Abschwelverlauf von blauen Profilen	92
Abbildung 84: Abschwelverlauf von silberfarbigen Jalousielamellen	92
Abbildung 85: Abschwelverlauf von gelben Jalousielamellen	93
Abbildung 86: Abschwelverlauf von beige Jalousielamellen	93
Abbildung 87: Abschwelverlauf der Profisolierung	94
Tabelle 1: Vergleich von thermischen Decoating-Verfahren [11]	12
Tabelle 2: Einsatzgebiete der verschiedenen Aggregate [1]	15
Tabelle 3: Farbpigmente von Lacken [16]	21
Tabelle 4: Typische Zusammensetzung von Syngas [18]	23
Tabelle 5: Schichtdicken der verschiedenen Proben	37
Tabelle 6: Dichten der unterschiedlichen Schichten	37
Tabelle 7: Anhaftende Feuchte auf Probe „Jalousien“	42
Tabelle 8: Anhaftende Feuchte auf Probe „Kleinmaterial I“	43
Tabelle 9: Anhaftende Feuchte auf Probe „Kleinmaterial II“	44
Tabelle 10: Anhaftende Feuchte auf Probe „Spenglerblech I“	45
Tabelle 11: Anhaftende Feuchte auf Probe „Spenglerblech II“	46
Tabelle 12: Anhaftende Feuchte auf Probe „Foliertes Spenglerblech“	47
Tabelle 13: Anhaftende Feuchte auf Probe „Schredder I“	48

Tabelle 14: Anhaftende Feuchte auf Probe „Schredder II“	49
Tabelle 15: Anhaftende Feuchte auf Probe „Kühler“	50
Tabelle 16: Anhaftende Feuchte auf Probe „Profile I“	51
Tabelle 17: Anhaftende Feuchte auf Probe „Profile II“	52
Tabelle 18: Anhaftende Feuchte der jeweiligen Schrottproben.....	53
Tabelle 19: Aluminiumgehalt in der Krätze.....	73
Tabelle 20: Aluminiumgehalt in den Barren	74
Tabelle 21: Anteil der jeweiligen Verluste und Ausbringen nasser Proben.....	79
Tabelle 22: Beschichtungsanteile verschiedener Schrottsorten.....	90

15. Anhang

Nachfolgend sind die Beschichtungsanteile der unterschiedlichen Schrottsorten angeführt.

Tabelle 22: Beschichtungsanteile verschiedener Schrottsorten

Scrap Type	Coating/Structure	Coating Wt. (%)
Aerosols	Lacquers, paints	2–3
Capstock	Polymers, lacquers	30
Converted foil	Inks, lacquers	7
DSD (flexible packaging)	Various	<85
Epoxy strip	Epoxy, paint	6
Frag	Oil, paint, polymers	<4
Lid stock	Vinyls	8
New lithographic plate	Phenolic resin, paper	<4
Mill foil	Rolling oils	<10
Paper laminate	Paper, inks	50–60
Plastic laminate	Polymers, inks, wax	40–90
Painted sidings	Paints	3
Tube laminate	Polymers, lacquers	70
Turnings	Cutting oils	<20
UBC/new can stock	Lacquers, paints	2–3
Used lithographic plate	Phenolic resin, inks	2
Window frames	Thermolacquers, resins	21

Die Abbildungen 80 – 87 zeigen die Zusammensetzung der organischen Beschichtung für verschiedene Materialien und Farben bei unterschiedlichen Temperaturen.

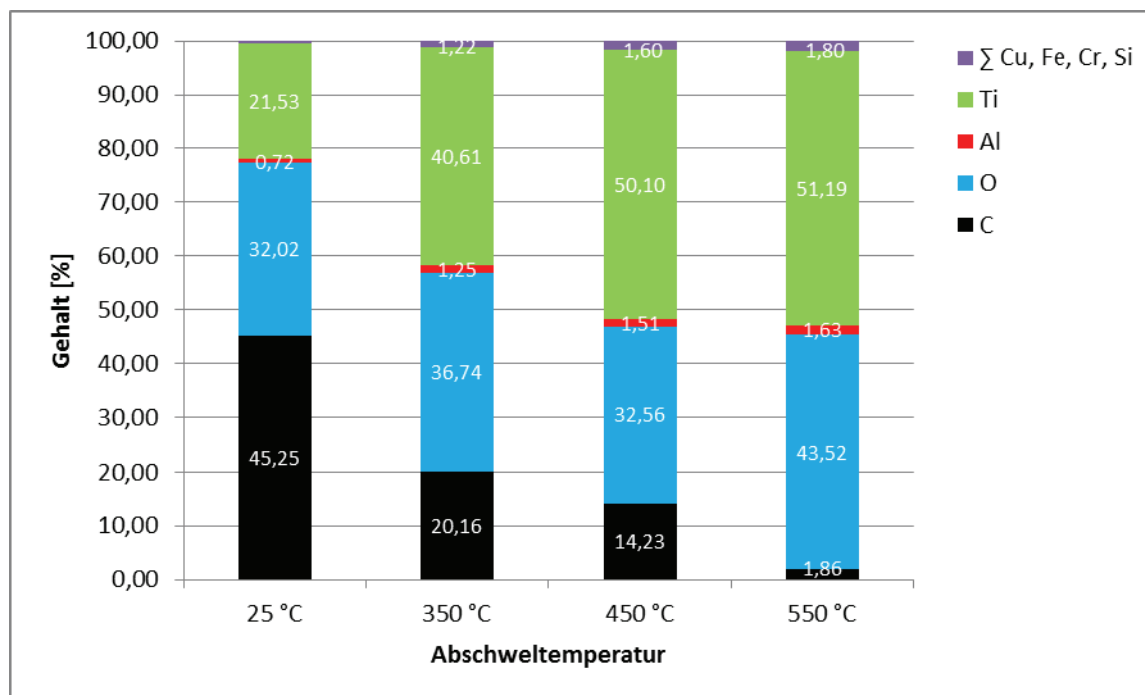


Abbildung 80: Abschwelverlauf Spenglerblech mit Oberflächenrelief

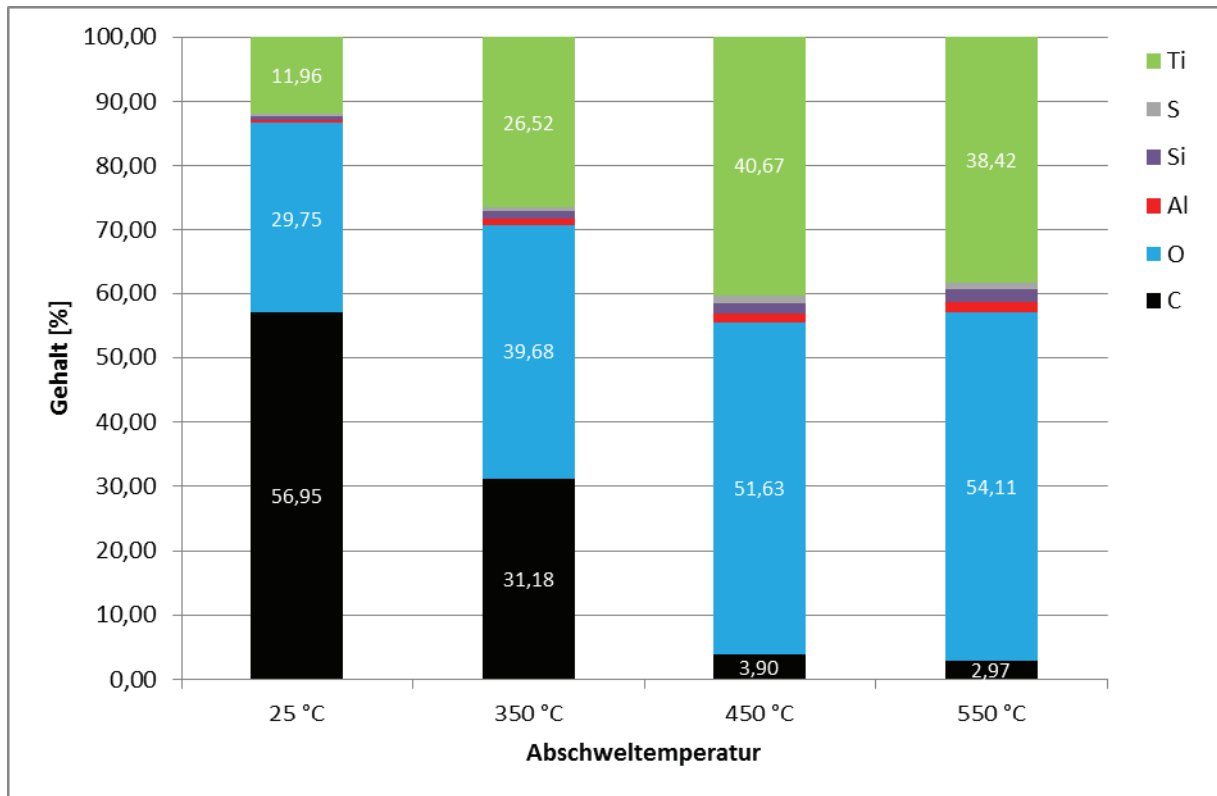


Abbildung 81: Abschwelverlauf von weißen Profilen

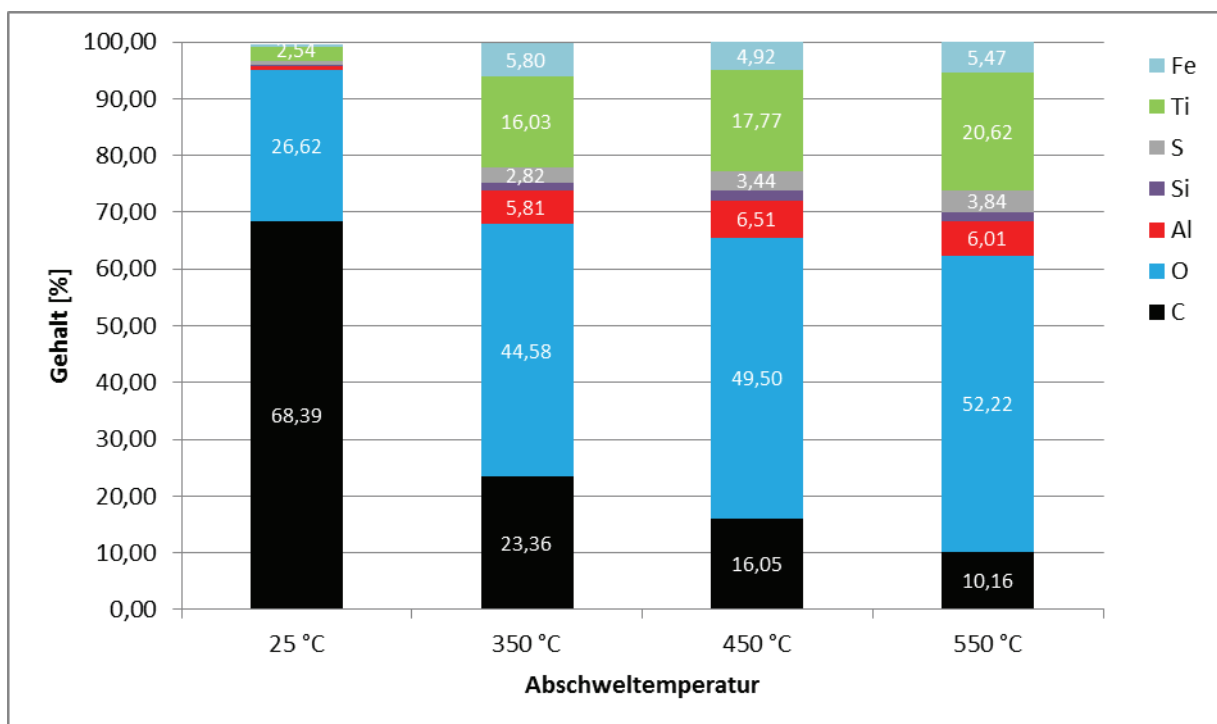


Abbildung 82: Abschwelverlauf von grünen Profilen

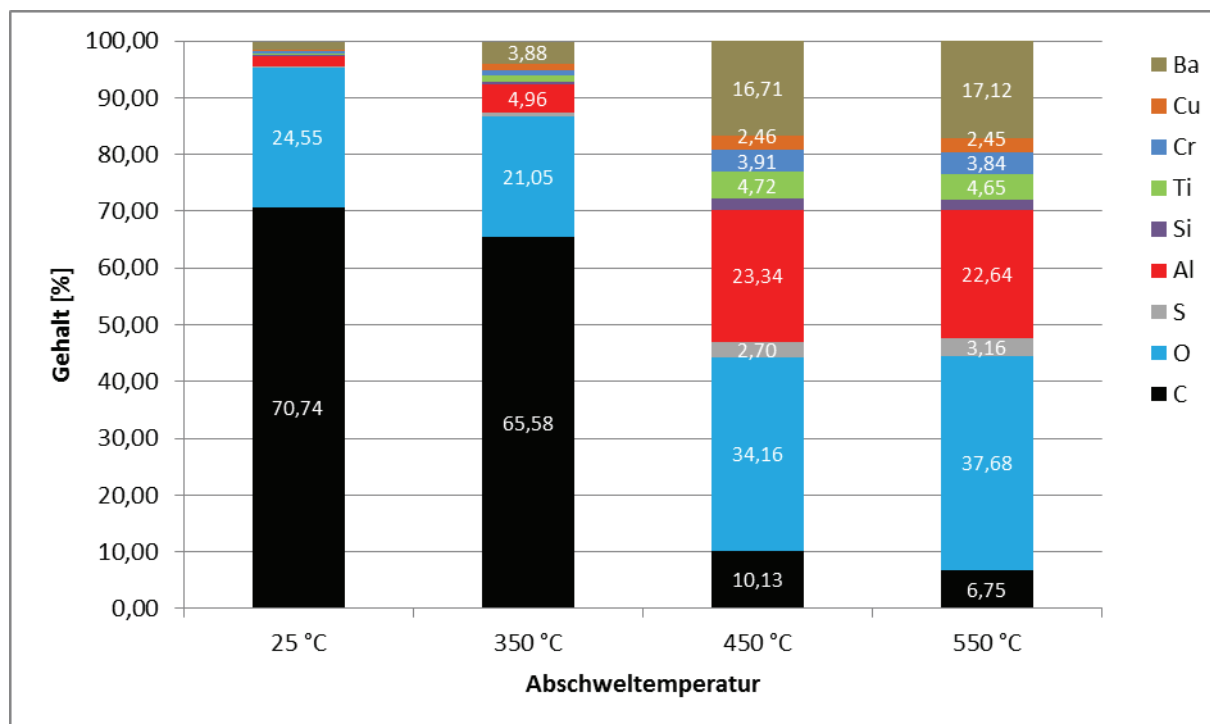


Abbildung 83: Abschwelverlauf von blauen Profilen

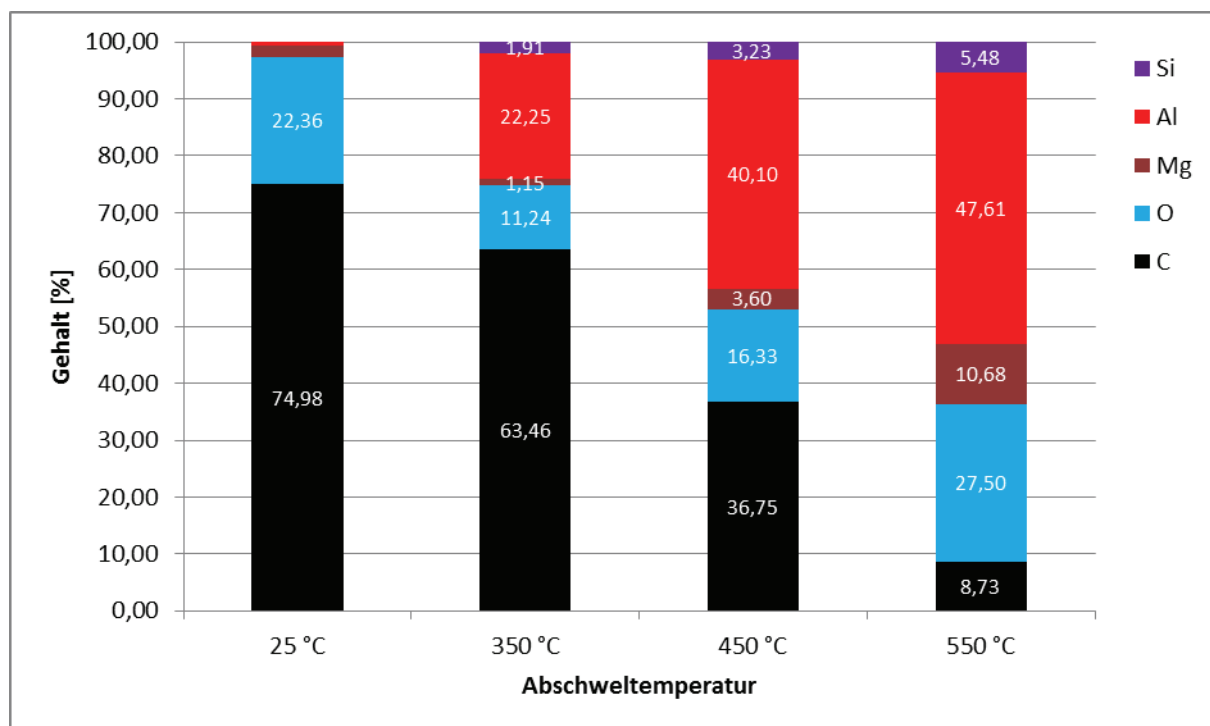


Abbildung 84: Abschwelverlauf von silberfarbigen Jalousielamellen

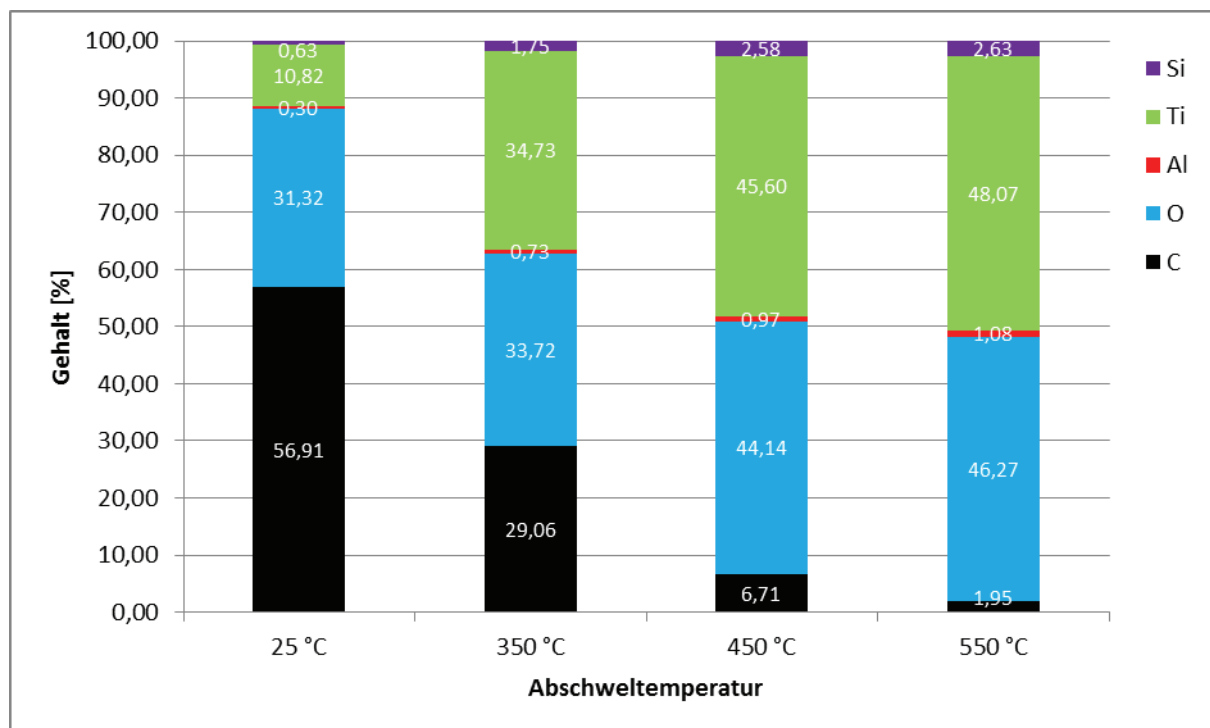


Abbildung 85: Abschwelverlauf von gelben Jalousielamellen

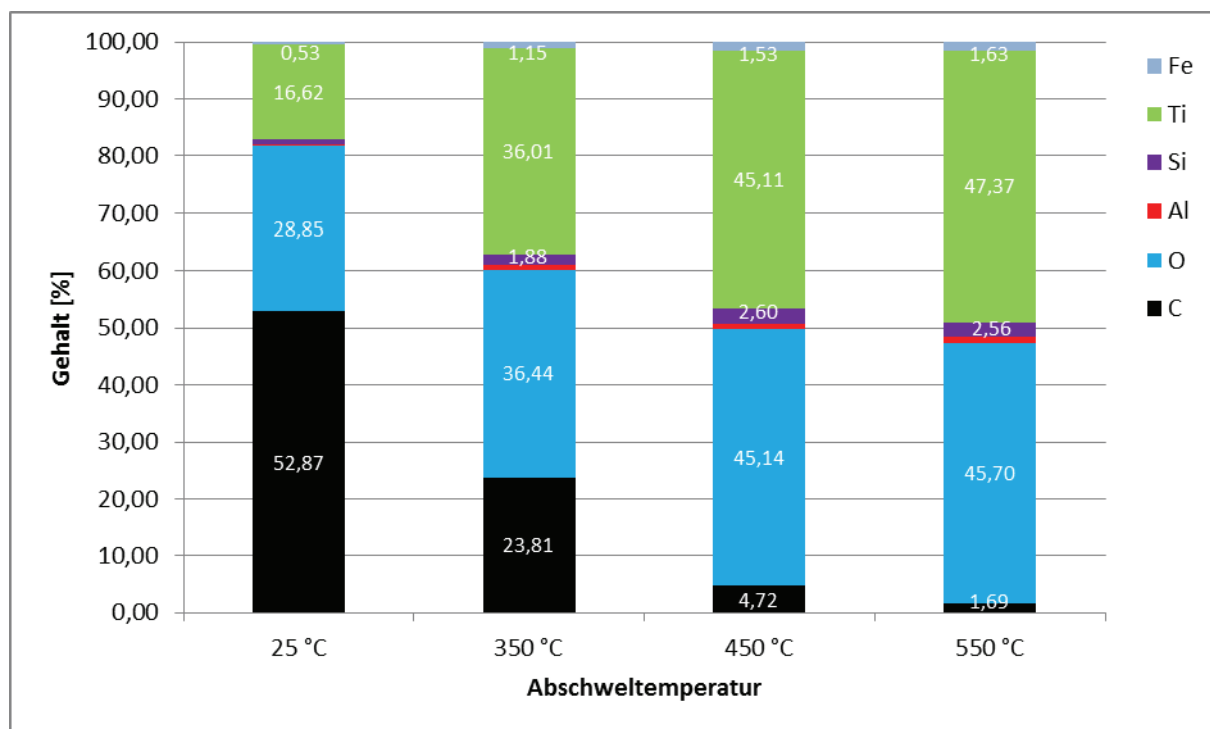


Abbildung 86: Abschwelverlauf von beige Jalousielamellen

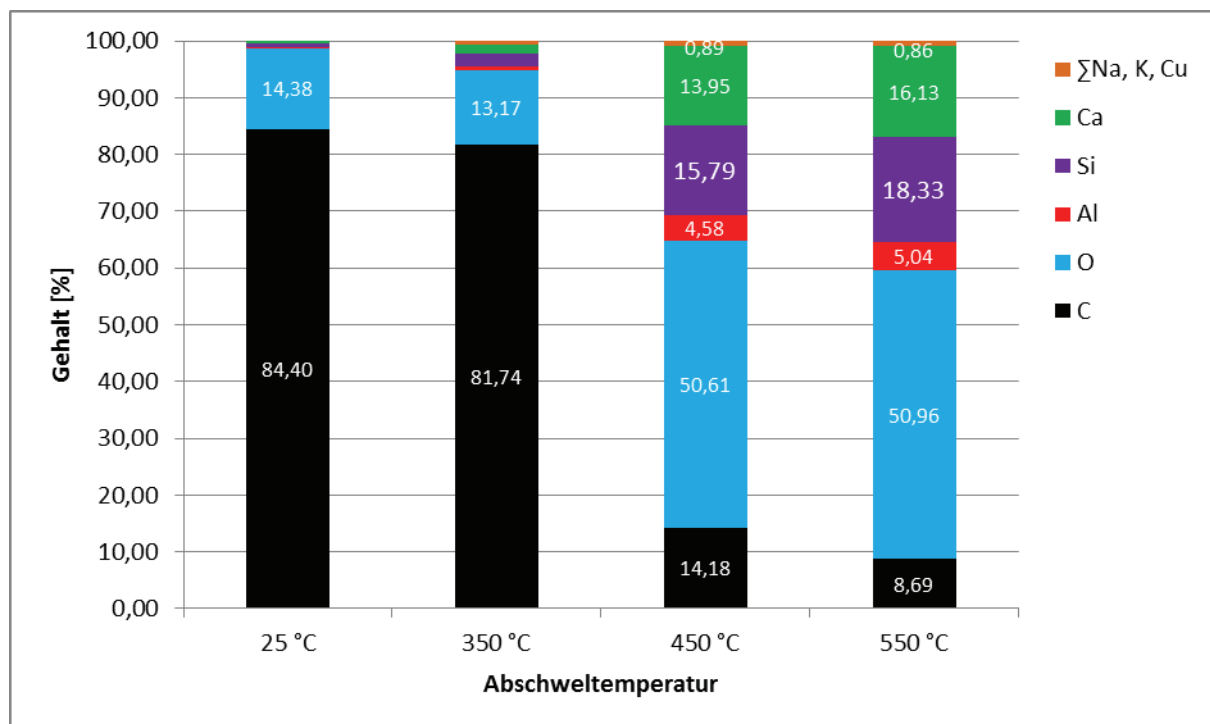


Abbildung 87: Abschwelverlauf der Profisolierung