



Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung

Masterarbeit



Aufbereitungstechnische Versuchsreihen
am optimierten Magnetsystem der IFE
Aufbereitungstechnik GmbH

Dipl.-Ing. Lukas Seisenbacher, BSc

September 2021



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

www.unileoben.ac.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 24.09.2021

Unterschrift Verfasser/in
Lukas Seisenbacher

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand in einer Kooperation zwischen der Montanuniversität Leoben mit der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH.

Die Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH (IFE), welche 1947 gegründet wurde, befasst sich seit mehr als 70 Jahren mit der Aufbereitung von Schüttgütern mit einer Schwerpunktsetzung in den Grundprozessen „Förderung“, „Klassierung“ und „Sortierung“. Dieses in Privatbesitz befindliche mittelständische Unternehmen aus Niederösterreich liegt an der historischen österreichischen Eisenstraße in Waidhofen an der Ybbs. So eng wie die Eisenstraße als Versorgungsweg für Bergbau, Eisenindustrie und der für Schmelzöfen und Verhüttung notwendigen Holz- und Forstwirtschaft verwoben war, so eng ist auch die Verbindung von IFE mit der Aufbereitungstechnik von primären und sekundären Rohstoffen wie auch der Metallurgie. Dieser Historie verpflichtet, versorgt IFE bis heute ihre Kunden mit modernster Vibrations-, Klassier- und Sortiertechnik.

Dass vor einigen Jahrzehnten einsetzende Umdenken der Abfallwirtschaft hin zu einer sekundärrohstoffaufbereitenden Industrie bedient die IFE Aufbereitungstechnik GmbH heute mit einem breiten Spektrum an innovativen Sieben, Separatoren, Magnetscheidern und Wirbelstromscheidern.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders möchte ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Helmut Flachberger, und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Andreas Böhm, danken, die meine Arbeit durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung begleitet und begutachtet haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt. An dieser Stelle sei Herr Christian Karl und Herr Dipl.-Ing. Dr.mont. Georg Doninger erwähnt die diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Meiner Frau Bettina Seisenbacher danke ich besonders für den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meines gesamten Studiums und das Korrekturlesen meiner Arbeit. Auch bei meiner Schwiegermutter Rosa Fink möchte ich mich bedanken für die tatkräftige Unterstützung bei der Handklaubung.

Abschließend möchte ich mich bei meiner gesamten Familie vor allem bei meinen Eltern Konrad und Eleonore bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der versuchstechnischen Erprobung eines hinsichtlich maximaler Flussdichte optimierten Trommelmagnetscheiders, wobei die Sortierleistung zu bestehenden Magnetsystemen mit ähnlichen magnetischen Eigenschaften gegenübergestellt wird.

Im ersten Teil wird der Festkörpermagnetismus auf Basis physikalischer Grundlagen detailliert erklärt und mit den Vorgängen bei magnetischen Sortierprozessen in Zusammenhang gebracht. Die Messung der magnetischen Flussdichte ist für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Magnetsysteme in dieser Arbeit ein zentrales Thema. Dafür wurde eine spezielle Messvorrichtung entwickelt, um systematische Fehler bei der Hallsondenführung zu minimieren. Weiters werden das optimierte Magnetsystem sowie die daran vorgenommenen konstruktiven wie auch werkstofflichen Verbesserungen, beschrieben und auf die Problematik mit auftretenden Wirbelströmen während des Betriebs eingegangen.

Die Beschreibung der Probenahme und der Probenvorbereitung als auch die Charakterisierung der Proben für die Versuchsreihen lässt bereits vor der Versuchsdurchführung einige konkrete Aussagen zur Sortierbarkeit des gewählten Aufgabematerials zu. Nach der Versuchsdurchführung werden die verschiedenen Produkte einer Handklaubung unterzogen und dabei nach optischen Merkmalen klassifiziert.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass das optimierte Magnetsystem in Abhängigkeit von der Korngröße des Aufgabematerials gleich gute oder bessere Sortierergebnisse als das bestehende Magnetsystem liefert.

Abstract

This master's thesis is concerned with experimental testing of a drum-type magnetic separator optimised for maximum flux density, whose sorting capacity is contrasted with existing magnet systems with similar magnetic properties.

The first part provides a detailed explanation of solid-state magnetism based on its foundations in physics and puts it into the context of what happens in magnetic sorting processes. Measurement of magnetic flux is a central topic for the comparability of different magnetic systems in this study. To this end, a special measuring device has been developed in order to minimise systematic errors in the Hall effect sensor guidance. Furthermore, the optimised magnet system and the improvements made to it – in terms of its design and also the materials – and the problem of eddy currents occurring during operation are discussed.

The description of the sampling and sample preparation as well as the characterisation of the samples for the test series allows for some concrete statements regarding the sortability of the selected feed material even prior to running the tests. After completion of the test, the various products were subject to hand-picking, with classification according to visual characteristics.

The evaluation of the test results has shown that – depending on the grain size of the feed material – the optimised magnet system delivers equally good or better sorting results than the existing magnet system.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	- 9 -
2. AUFGABENSTELLUNG	- 10 -
3. GRUNDLAGEN	- 11 -
3.1 Magnetismus – physikalische Grundlagen	- 11 -
3.1.1 Magnetfeld und Feldlinien	- 12 -
3.1.2 Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte	- 13 -
3.1.3 Permeabilität und Suszeptibilität	- 14 -
3.1.4 Diamagnetismus / Paramagnetismus / Ferromagnetismus	- 15 -
3.1.5 Antiferromagnetismus, Ferrimagnetismus	- 18 -
3.1.6 Elementarmagnet und Austauschwechselwirkung	- 19 -
3.1.7 Entmagnetisierung	- 20 -
3.1.8 Hysterese	- 21 -
3.1.9 Messung magnetischer Felder	- 23 -
3.1.10 Magnetwerkstoffe	- 25 -
3.1.11 Güte und maximale Einsatztemperatur	- 30 -
3.2 Grundprozesse der Aufbereitung	- 31 -
3.2.1 Zerkleinern	- 31 -
3.2.2 Klassieren	- 33 -
3.2.3 Sortieren	- 34 -
3.3 Sortierung im magnetischen Feld	- 35 -
3.3.1 Stoff- und Körpersuszeptibilität	- 38 -
3.4 Apparate der Magnetscheidung	- 40 -
3.4.1 Einteilung	- 40 -
3.4.2 Apparate	- 42 -
4. HALLSONDEN-POSITIONIERSYSTEM	- 49 -
4.1 Anforderungen an das Positioniersystem	- 50 -
4.2 Konzept und Komponenten	- 51 -
4.3 Anwendung des Positioniersystems	- 53 -
5. DAS OPTIMIERTE MAGNETSYSTEM	- 55 -
5.1 Verbesserungspotential	- 55 -
5.2 Beschreibung des Magnetsystems	- 56 -
5.3 Problematik mit Wirbelströmen	- 57 -
5.4 Flussdichtemessung am optimierten Magnetsystem	- 59 -

6.	PROBENCHARAKTERISIERUNG UND PROZESSBESCHREIBUNG	- 62 -
6.1	Verfahrensstammbaum	- 63 -
6.2	Probenahme	- 64 -
6.3	Probencharakterisierung	- 65 -
6.3.1	Siebanalyse	- 65 -
6.3.2	Einteilung in Flussdichteklassen.....	- 69 -
7.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	- 71 -
7.1	Probenvorbereitung	- 71 -
7.2	Wertstoffgehalt der Aufgabe.....	- 74 -
7.3	Versuchsablauf.....	- 75 -
7.3.1	Maschinenbeschreibung.....	- 75 -
7.3.2	Maschinen- und Versuchsparameter.....	- 76 -
8.	AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	- 77 -
8.1	Wertstoffgehalte der Produkte.....	- 77 -
8.2	Bilanztafel	- 77 -
8.3	Visualisierung der Produkte	- 78 -
8.3.1	Probe 1 – Magnetprodukt (MP 1)	- 78 -
8.3.2	Probe 1 – unmagnetisches Produkt (UMP 1).....	- 79 -
8.3.3	Probe 2 – Magnetprodukt (MP 2)	- 80 -
8.3.4	Probe 2 – unmagnetisches Produkt (UMP 2).....	- 81 -
8.3.5	Probe 3 – Magnetprodukt (MP 3)	- 82 -
8.3.6	Probe 3 – unmagnetisches Produkt (UMP 3).....	- 83 -
8.3.7	IFE KP – Magnetprodukt	- 84 -
8.3.8	IFE KP – unmagnetisches Produkt.....	- 85 -
9.	CONCLUSIO.....	- 86 -
10.	VERZEICHNISSE	- 88 -
10.1	Quellenverzeichnis	- 88 -
10.2	Abbildungsverzeichnis.....	- 89 -
10.3	Tabellenverzeichnis.....	- 90 -
11.	ANHANG	- 90 -

1. Einleitung

Umweltverschmutzung und Ressourcenschonung sind Herausforderungen, denen sich unsere Gesellschaft besser heute denn morgen zu stellen hat. Der verantwortungsbewusste Umgang mit Abfällen und industriellen Reststoffen ist dabei von zentraler Bedeutung. Das Ziel muss eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft sein, in der Abfälle als werthaltige sekundäre Rohstoffquellen behandelt werden und nicht als zu entledigender Müll. Um das stoffliche Recycling voranzutreiben, müssen Technologien wie die Magnetscheidung, welche bei der Aufbereitung sekundärer Rohstoffe eine bedeutende Stellung einnehmen, konsequent weiterentwickelt werden.

Das Aussortieren von ferromagnetischen Stoffen, in der Regel Eisen- und Stahlteile, mit Schwachfeldmagneten ist die verbreitetste Anwendung der Magnettechnik im Recycling. Vorteile gegenüber anderen Prozessen (z.B. der Schwertrübescheidung) sind u.a. die trockene Betriebsweise, die geringen Anschaffungs- und Betriebskosten und die einfache Steuer- und Automatisierbarkeit. Die Entwicklung immer stärkerer Magnetsysteme ermöglicht aber auch das Aussortieren von weniger stark magnetisierbaren Stoffen – wie V2A-Stählen oder auch Messing-Legierungen.

2. Aufgabenstellung

Die in Waidhofen an der Ybbs beheimatete Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH hat eine neue Generation von Magnetscheidern entwickelt, um auch sehr schwach magnetisierbare Bestandteile wirkungsvoll aufkonzentrieren zu können.

Die im Zuge der Masterarbeit durchzuführenden Untersuchungen am optimierten Magnetsystem sollen die Einsatzmöglichkeiten ausloten und die Einsatzgrenzen aufzeigen. Hierzu werden aufbereitungstechnische Versuchsreihen mit industriellen Reststoffen aus einer Kabelschrottaufbereitung durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Versuchsreihen im Technikum von IFE werden mit den erzielten Ergebnissen aus der bestehenden Kabelschrott-Aufbereitungsanlage verglichen.

Begleitend dazu sollen die magnetischen Eigenschaften des Magnetsystems messtechnisch erfasst und veranschaulicht werden. Hierfür ist ein Messaufbau zu entwickeln, der die Ermittlung reproduzierbarer Messergebnisse sicherstellt.

3. Grundlagen

3.1 Magnetismus – physikalische Grundlagen

Historisch wurden magnetische Kräfte erstmals an Steinen aus der griechischen Stadt Magnesia beobachtet, von welcher der Magnetismus auch seinen Namen erhalten hat. Der physikalische Hintergrund magnetischer und elektrischer Kräfte wurde erst im 19. Jahrhundert geklärt und 1864 von James Clerk Maxwell mit Hilfe der Maxwellgleichungen mathematisch formuliert. Viele wissenschaftliche und technische Errungenschaften unserer heutigen Welt wären ohne Magnetismus nicht denkbar. Die Entdeckung des Erdmagnetfeldes und seine Nutzung im Kompass haben die Seefahrt und damit die Geschichte nachhaltig beeinflusst. Spätere Entwicklungen wie Lautsprecher, Festplattenlaufwerk oder Magnetresonanztomografie sind weitere Beispiele aus Technik und Medizin, welche für unsere moderne Gesellschaft unentbehrlich geworden sind (Schmitt, 2015).

Die nachfolgenden Informationen im Kapitel 4.1 wurden zum Großteil aus einem Glossar für physikalische Grundlagen zu Magnetismus, welches von Herrn Dipl. Phys. Franz-Josef Schmitt zusammengestellt wurde, entnommen.

3.1.1 Magnetfeld und Feldlinien

Magnetfelder bestehen aus elektromagnetischer Energie, diese überträgt die Kräfte eines Magneten. Magnetische Feldlinien veranschaulichen das Magnetfeld, sie haben jedoch auch eine echte physikalische Bedeutung, weil durch die Dichte der Feldlinien die Stärke der magnetischen Kräfte und durch die Richtung der Feldlinien die Richtung der magnetischen Kräfte angezeigt wird (Schmitt, 2015; Tipler & Mosca, 2012; Fritsche, 2020).

Magnetische Feldlinien verlaufen definitionsgemäß immer vom Nordpol zum Südpol eines Magneten und stehen senkrecht zu dessen Oberfläche. Sie enden allerdings nicht am Südpol, sondern verlaufen im inneren des Magneten zurück zum Nordpol. Der Grund hierfür ist, dass es keine Quellen oder Senken des Magnetfeldes gibt. Es gibt also keinen Stoff, aus dem magnetische Feldlinien „herauslaufen“, ohne wieder „hineinzulaufen“ und umgekehrt. Dies ist physikalisch so zu verstehen, dass es keine magnetischen Ladungen gibt wie beispielsweise eine positive oder eine negative elektrische Ladung (ebd.).

Bringt man den Nordpol eines Magneten in die Nähe eines ferromagnetischen Stoffes (z.B. Eisen), so dringen die Feldlinien in diesen ein. Das Eisen richtet dem Nordpol des Magneten seinen durch Magnetisierung entstandenen Südpol entgegen, so dass die Feldlinien des Nordpols des Magneten direkt zum Südpol des magnetisierten Eisens zeigen. Vom Bereich des Nordpols des magnetisierten Eisens ausgehend, verlaufen die Feldlinien dann zurück zum Südpol des Magneten (Schmitt, 2015).

3.1.2 Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte

Der magnetische Fluss Φ kann als Gesamtheit aller magnetischen Feldlinien verstanden werden. Die magnetische Flussdichte B beschreibt entsprechend die Dichte und Richtung der Feldlinien, welche durch eine gedachte Fläche im Raum treten. Wenn die Feldlinien geradlinig verlaufen (zum Beispiel zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten siehe Abbildung 3.1), dann ergibt sich der magnetische Fluss Φ durch eine bestimmte Fläche A , welche senkrecht zum Fluss steht, als Produkt aus der magnetischen Flussdichte B und der Fläche A . Indirekt ist die magnetische Flussdichte auch ein Maß für die Stärke des Magnetfeldes. (Schmitt, 2015; Tipler & Mosca, 2012).

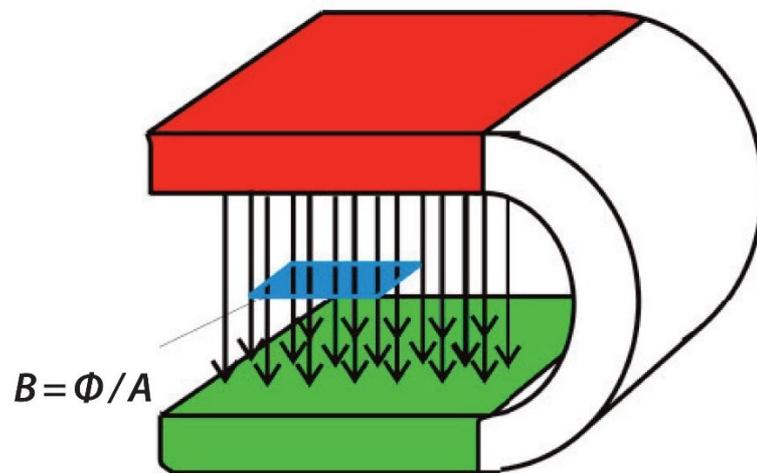


Abbildung 3.1 Die magnetische Flussdichte B am Beispiel eines Hufeisenmagnets (Schmitt, 2015)

Die magnetische Feldstärke wird meist mit dem Buchstaben H abgekürzt und es gilt der Zusammenhang $B = \mu_0 \mu_r H$ mit der magnetischen Permeabilitätskonstante des Vakuums μ_0 und einer stoffspezifischen relativen magnetischen Permeabilitätskonstanten μ_r . Diese ist jedoch meist ungefähr 1, außer bei ferromagnetischen Stoffen, bei welchen μ Werte von bis zu 100.000 annehmen kann. Die magnetische Flussdichte wird in Tesla (T) gemessen. Der magnetische Fluss entsprechend in $T \cdot m^2$. Die Einheit $1 T \cdot m^2$ wird auch als 1 Weber (Wb) bezeichnet (ebd.).

3.1.3 Permeabilität und Suszeptibilität

Unter Permeabilität (lat. permeare = durchlassen) versteht man allgemein die Durchlässigkeit von Materie. Entsprechend bezeichnet die magnetische Permeabilität μ die Durchlässigkeit der Materie für den magnetischen Fluss. Die Größe eines Magnetfeldes H kann mit Hilfe der magnetischen Flussdichte B und der magnetischen Permeabilität μ über den Zusammenhang $H = \frac{B}{\mu}$ beschrieben werden.

Dabei wird die magnetische Permeabilität über eine Naturkonstante skaliert, die sogenannte magnetische Feldkonstante. Für jeden Stoff kann dann die magnetische Permeabilität über eine relative magnetische Permeabilität μ_r und die magnetische Feldkonstante μ_0 wie folgt definiert werden: $\mu = \mu_0 \mu_r$

Für das Vakuum gilt per Definition $\mu_r = 1$.

Die magnetische Suszeptibilität χ (lat. suscipere = übernehmen) beschreibt, ähnlich wie die magnetische Permeabilität, wie gut ein magnetischer Fluss einen Stoff durchdringen kann. Während die Permeabilität den gesamten Fluss im Inneren eines Festkörpers angibt, bezeichnet die Suszeptibilität nur den von der Materie übernommenen Anteil des magnetischen Flusses. Die Suszeptibilität χ ist deshalb genau um 1 kleiner als die Permeabilität: $\chi = \mu - 1$

Betrachtet man die Magnetisierung M eines Stoffes in einem äußeren Magnetfeld H_0 , so ist die Magnetisierung direkt durch die Suszeptibilität χ gegeben. Es gilt:

$$M = \chi \cdot H_0$$

Das gesamte Magnetfeld H ist dann die Summe aus der Magnetisierung und dem einfallenden Magnetfeld:

$$H = M + H_0 = \chi \cdot H_0 + H_0 = (\chi + 1) \cdot H_0$$

(Schmitt, 2015; Tipler & Mosca, 2012)

3.1.4 Diamagnetismus / Paramagnetismus / Ferromagnetismus

Wird ein Stoff einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, so kommt es zu einer Magnetisierung des Stoffes. Richtung und Stärke dieser Magnetisierung beruhen auf intrinsischen Eigenschaften des Stoffes und werden durch die Begriffe Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus gekennzeichnet (Schmitt, 2015; Tipler & Mosca, 2012).

Die Magnetisierung von Materie in einem äußeren Feld, also die Ausrichtung der Elementarmagnete im Stoff, kann dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet oder gleichgerichtet sein. Ist die Magnetisierung dem äußeren Feld entgegengerichtet, so spricht man von Diamagnetismus. In paramagnetischen Körpern ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet. In ferromagnetischen Stoffen ist die Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld gleichgerichtet und aufgrund einer besonderen Wechselwirkung der Elektronenspins, der sogenannten Austauschwechselwirkung, besonders stark (ebd.).

Die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe ist bei gleichem äußeren Magnetfeld im Allgemeinen deutlich größer als die Magnetisierung paramagnetischer Stoffe. Bei Raumtemperatur sind jedoch nur die Elemente Eisen, Nickel und Kobalt ferromagnetisch. Daneben gibt es noch ferromagnetische Legierungen und Verbindungen sowie Elemente, die bei tiefen Temperaturen ferromagnetisch werden. Bei sehr hohen Temperaturen werden alle ferromagnetischen Stoffe paramagnetisch, weil dann die thermische Energie der Elektronen größer ist als die Austauschwechselwirkung und die parallele Ausrichtung der Elektronenspins zerstört wird. Es gibt für diesen Übergang eine charakteristische Temperatur, die sogenannte Curie – Temperatur (ebd.).

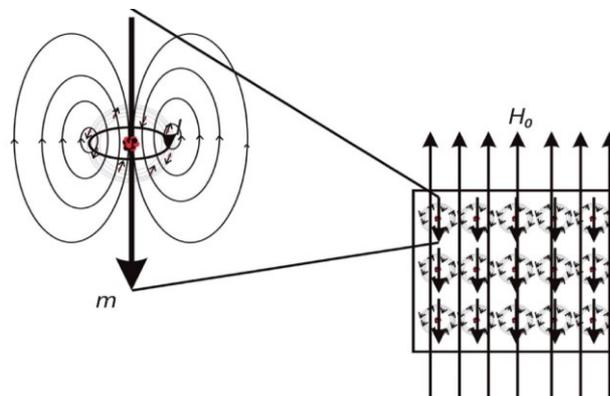


Abbildung 3.2 Schematische Darstellung von Diamagnetismus (Schmitt, 2015)

Zum Verständnis der physikalischen Ursache für Dia-, Para- und Ferromagnetismus kann man sich vorstellen, dass jeder Stoff aus Atomen mit Atomkernen und Elektronen besteht. Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, so werden unter dem Einfluss dieses Magnetfeldes Bewegungen der Elektronen, also Ströme, induziert. Nach der Lenz'schen Regel sind diese Ströme so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirken. Deshalb sind die induzierten magnetischen Momente, man spricht auch von induzierter Magnetischer Polarisation, so ausgerichtet, dass der Stoff als Ganzes schwach aus dem äußeren Magnetfeld herausgedrängt wird, also diamagnetische Eigenschaften zeigt, dies tritt bei allen Stoffen auf. Das Prinzip wird in Abbildung 3.2 schematisch illustriert (ebd.).

Es kann jedoch sein, dass zusätzliche paramagnetische oder ferromagnetische Eigenschaften den Diamagnetismus eines Stoffes überlagern. Zu Para- bzw. Ferromagnetismus kommt es genau dann, wenn die Elektronen der gesamten Elektronenhülle an jedem Atom des Stoffes einen resultierenden Gesamtspin besitzen. Einzelne Elektronen besitzen immer einen sogenannten "Spin", welcher ein magnetisches Moment trägt. In vielen Stoffen heben sich die Elektronenspins jedoch paarweise auf. Diese Stoffe sind dann diamagnetisch. Wenn jedoch jedes Atom eine ungerade Anzahl an Elektronen besitzt, dann können sich die Elektronenspins in jedem einzelnen Atom nicht paarweise aufheben. Dann beispielsweise besitzt jedes Atom mit seinen Elektronen einen resultierenden Gesamtspin des letzten verbleibenden "ungepaarten" Elektrons. Diese Stoffe sind para- oder ferromagnetisch (Schmitt, 2015).

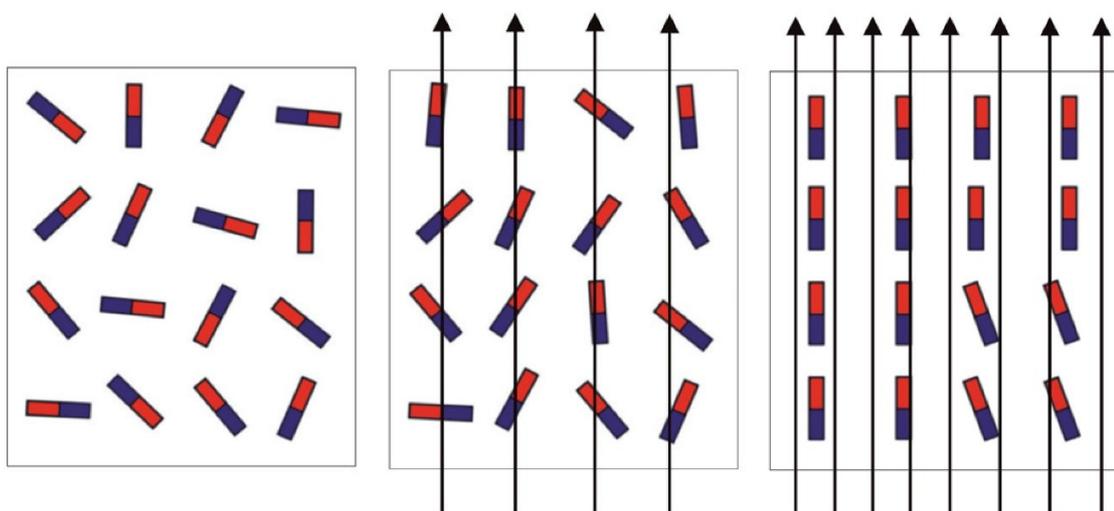


Abbildung 3.3 Darstellung der Elementarmagn. mit blauem Nord- und rotem Südpol (Schmitt, 2015)

In Abbildung 3.3 werden die Elementarmagnete schematisch als einfache Stabmagnete mit blauem Nord- und rotem Südpol dargestellt. Ohne äußeres Magnetfeld sind die resultierenden Spins jedes Atoms eines paramagnetischen Stoffes statistisch orientiert (links). Durch ein äußeres Magnetfeld kommt es teilweise zur Ausrichtung der Spins, also zur Magnetisierung bzw. leichten Verstärkung des äußeren Magnetfeldes (mittig). Ist die Wechselwirkung der einzelnen Spins sehr groß, spricht man von Ferromagnetismus (rechts). In einem Diamagneten sind die eingezeichneten Elementarmagnete gar nicht vorhanden, da sich die Elektronenspins an jedem Atom vollständig kompensieren (ebd.).

Die atomaren magnetischen Momente der resultierenden Spins sind durch die Bewegung der Atome gleichmäßig in alle Raumrichtungen verteilt, so dass die Magnetfelder aller Elementarmagnete zusammengenommen sich gegenseitig kompensieren und der Stoff nach außen nichtmagnetisch erscheint. Die resultierenden Gesamtspins aller Atome richten sich aber in einem äußeren Magnetfeld aus. Der Nordpol aller Elementarmagnete zeigt dann in Richtung des Südpols des äußeren Feldes und umgekehrt. In diesem Fall verhält sich die Probe selbst wie ein Magnet und wird vom äußeren Magnetfeld angezogen. Die gleichzeitig induzierten Kreisströme, welche aufgrund der Lenz'schen Regel ihrer Ursache (dem äußeren Magnetfeld) entgegengerichtet sind, sind in paramagnetischen und ferromagnetischen Stoffen schwächer als der Effekt der ausgerichteten Elementarmagnete, so dass die abstoßende Wirkung der induzierten Kreisströme von der anziehenden Wirkung der ausgerichteten Elementarmagnete übertroffen wird. In einem Ferromagneten kommt es zu einer Stabilisierung der Elektronenspins durch die Austauschwechselwirkung. Jeder Elementarmagnet wird dann in seiner Ausrichtung zusätzlich stabilisiert. Dies führt zu einer oft millionenfach stärker anziehenden Wirkung (ebd.).

3.1.5 Antiferromagnetismus, Ferrimagnetismus

Neben Dia-, Para- und Ferromagnetismus gibt es auch Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus. Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus sind vergleichbar mit der Überlagerung der magnetischen Eigenschaften zweier ferromagnetischer Stoffe unterschiedlicher Ausrichtung in einem einzigen Stoff. Man spricht von "zwei entgegengesetzt polarisierten ferromagnetischen Untergittern". In Manganoxid (MnO) beispielsweise sind benachbarte Spins antiparallel ausgerichtet. Es bilden sich zwei Ebenen untereinander paralleler Spins, die gerade entgegengerichtet sind. Dies ist typischer Antiferromagnetismus. Die magnetischen Eigenschaften von zwei verschiedenen ferromagnetischen "Untergittern" heben sich auf (Schmitt, 2015).

Der Ferrimagnetismus ist ein Antiferromagnetismus, bei dem die magnetischen Eigenschaften des einen Untergitters wesentlich schwächer sind als die des anderen Untergitters (Schmitt, 2015; Fritsche, 2020).

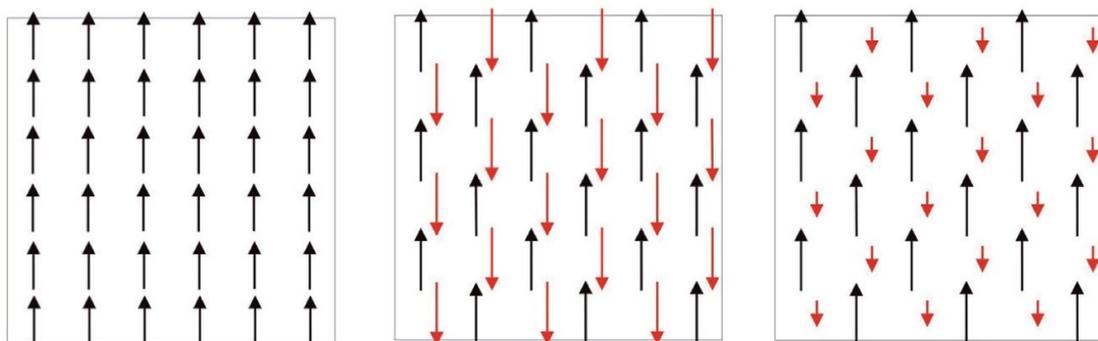


Abbildung 3.4 Ausrichtung der atomaren Spins bei Antiferro- und Ferrimagnetismus (Schmitt, 2015)

In Abbildung 3.4 wird die Ausrichtung der atomaren Spins in Antiferromagneten und Ferrimagneten grafisch dargestellt. Die Ausrichtung der atomaren Spins innerhalb eines Weiß'schen Bezirks eines Ferromagneten wird im linken Bild dargestellt – alle Spins sind gleichsinnig parallel ausgerichtet. In der Mitte ist die Situation in einem Antiferromagneten zu sehen. Es gibt zwei antiparallel ausgerichtete Untergitter. In einem Ferrimagneten (rechts) sind die magnetischen Momente der Spins eines Untergitters wesentlich schwächer als die Spins des anderen Untergitters. Die magnetischen Momente heben sich also nicht vollständig auf (Schmitt, 2015).

3.1.6 Elementarmagnet und Austauschwechselwirkung

Die magnetischen Eigenschaften der Materie, also Ferromagnetismus, Paramagnetismus und Diamagnetismus, werden durch Elementarmagnete erklärt, die an jedem Atom eines para- und ferromagnetischen Festkörpers zu finden sind. Dabei handelt es sich überwiegend um Elektronenspins oder Kernspins, die als Atomare Spins eine magnetische Wirkung wie kleine Elementarmagnete besitzen. Derartige Elementarmagnete werden in der Physik als magnetische Momente bezeichnet. (Schmitt, 2015).

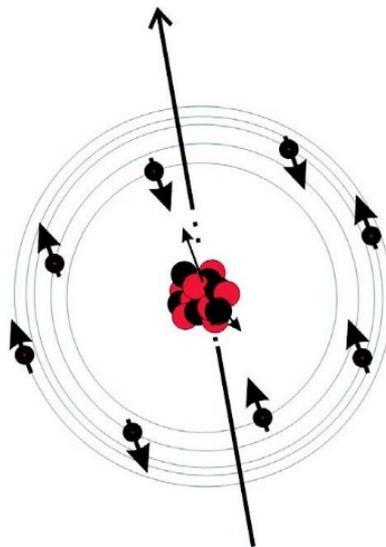


Abbildung 3.5 Elektronenspin - Summe aller einzeln addierbaren magnetischen Momente (Schmitt, 2015)

Die Abbildung 3.5 zeigt ein Atom, welches aus einem Atomkern und einer Elektronenhülle besteht. Durch die Bewegungszustände dieser geladenen Bausteine entsteht ein magnetisches Feld, welches sich aus der Summe aller einzeln addierbaren magnetischen Momente der Atome zusammengesetzt. Die magnetischen Momente der Atome setzen sich zusammen aus den Beiträgen des Elektronenspins und aus dem Kernspin. Bei den gängigen ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Kobalt, Nickel) dominiert jedoch der Beitrag des Elektronenspins (ebd.).

Die magnetischen Kräfte von Permanentmagneten werden darüber erklärt, dass die Elementarmagnete an den einzelnen Atomen des Stoffes parallel ausgerichtet sind. Tatsächlich findet man diese parallele Ausrichtung der Atomaren Spins in ferromagnetischen Stoffen, wenngleich nicht unbedingt im gesamten Stoff, so doch in den sogenannten Weiß'schen Bezirken (Schmitt, 2015; Tipler & Mosca, 2012).

Die ausgerichteten magnetischen Momente der Elementarmagnete ermöglichen genau dann eine dauerhafte Magnetisierung, wenn die Kräfte, welche die parallele Ausrichtung der Elementarmagnete stabilisieren, groß genug sind. Die wichtigste Kraft hierbei ist die Austauschwechselwirkung der Elektronenspins. Sie führt in den Ferromagneten dazu, dass ausgerichtete Atomare Spins sich nicht wieder durch thermische Bewegung durchmischen können und deshalb eine dauerhafte Magnetisierung verbleibt. Der Unterschied des Paramagneten im Vergleich zum Ferromagneten besteht darin, dass die Ausrichtung der Elementarmagnete im Paramagneten nicht stabil ist, im Ferromagneten dagegen schon. Diamagnete besitzen gar keine Elementarmagnete, die ausgerichtet werden könnten (ebd.).

3.1.7 Entmagnetisierung

Ein ferromagnetischer Stoff wird in einem äußeren Magnetfeld selbst magnetisiert. Auch nicht ferromagnetische Stoffe (z.B. Dia- und Paramagnete) lassen sich magnetisieren, jedoch ist der Effekt in diesen Stoffen deutlich schwächer. Bei Dia- und Paramagneten verschwindet die Magnetisierung auch wieder, wenn das äußere Magnetfeld abgeschaltet wird. Bei ferromagnetischen Stoffen beobachtet man eine verbleibende Magnetisierung, die sogenannte Remanenz (Schmitt, 2015).

Eine Entmagnetisierung kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden. Am einfachsten ist eine starke Erschütterung des Stoffes. Dadurch wird die Stabilisation der ausgerichteten Elektronenspins zerstört (ebd.).

Ebenso führt eine starke Erwärmung zur Entmagnetisierung. Durch Erwärmung steigt die Bewegungsenergie der Elektronen an und die ausgerichteten Spins werden durch die Bewegung durchmischt, wenn die Temperatur über die sogenannte Curie Temperatur steigt. Oberhalb dieser Temperatur geht ein ferromagnetischer Stoff in einen paramagnetischen Stoff über. Die Curie Temperatur ist stoffspezifisch. Sie liegt bei 769 °C für Eisen, 1.127 °C für Kobalt und 358 °C für Nickel (ebd.).

Auch das Anlegen eines starken Gegenfeldes, welches entgegen den ausgerichteten Elementarmagneten, den Elektronenspins, gepolt ist, hebt die Magnetisierung auf. Dies wird erreicht, wenn eine bestimmte, für den ferromagnetischen Stoff typische Feldstärke, die sogenannte Koerzitivfeldstärke, überschritten wird (ebd.).

3.1.8 Hysterese

Die Hysterese beschreibt den Effekt, dass die Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes nicht exakt proportional zum äußeren Magnetfeld verläuft und von der magnetischen Vorbehandlung des Stoffes abhängt. Dies bedeutet, dass die Magnetisierung von ferromagnetischen Stoffen nicht linear mit dem äußeren Magnetfeld zunimmt. Insbesondere bleiben ferromagnetische Stoffe ein wenig magnetisiert, wenn das äußere Magnetfeld ganz abgeschaltet wird. Diese verbleibende Magnetisierung wird als Remanenz bezeichnet (Schmitt, 2015; Tipler & Mosca, 2012).

Die Magnetisierung eines Ferromagneten steigt zunächst mit dem äußeren Magnetfeld an. Wird das äußere Magnetfeld reduziert, so geht auch die Magnetisierung wieder zurück. Dieser Prozess läuft jedoch langsamer ab als der vorherige Anstieg der Magnetisierung, so dass sogar noch Magnetisierung (Remanenz) verbleibt, wenn das Magnetfeld ganz ausgeschaltet wird. Dieser nicht proportionale Zusammenhang ist ein gewisses "Hinterherhinken" der magnetischen Flussdichte hinter der magnetisierenden Feldstärke (ebd.).

Eine mathematische Kurve, welche die jeweilige Magnetisierung als magnetische Flussdichte B bei einem bestimmten äußeren Magnetfeld H angibt, wird als Hysteresekurve bezeichnet (siehe Abbildung 3.6). Die Hysteresekurve ist unterschiedlich für verschiedene Stoffe und tritt nur bei ferromagnetischen Stoffen auf. Ein magnetisch weicher Stoff wird durch die in der Abbildung 3.6 links gezeigte Hysteresekurve charakterisiert, ein magnetisch harter Stoff durch die rechte Hysteresekurve. Die rote Kurve bezeichnet, exemplarisch dargestellt, den Verlauf der magnetischen Flussdichte in einem Stoff, welcher noch nicht magnetisiert ist. Sie wird auch als Neukurve bezeichnet. Hier sind die magnetische Flussdichte und damit auch die Magnetisierung M des Stoffes näherungsweise linear zum äußeren Magnetfeld H (ebd.).

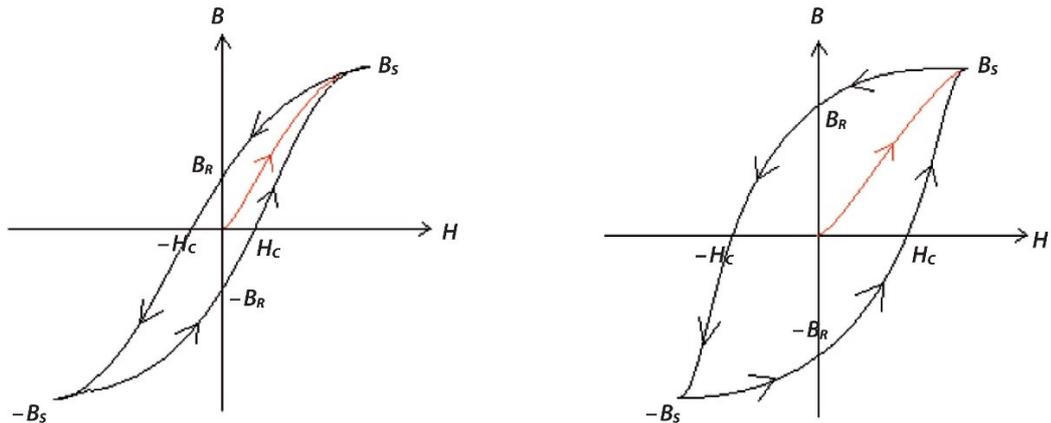


Abbildung 3.6 Hystereseurve eines weich- (links) und hartmagnetischen (rechts) Stoffes (Schmitt, 2015)

Das Magnetfeld im Inneren des Stoffes ist die Summe aus dem äußeren Magnetfeld H und der Magnetisierung des Stoffes M . Ist der Körper bereits magnetisiert, so bewirkt ein äußeres Magnetfeld H , welches der Magnetisierung des Körpers entgegengerichtet ist, zunächst eine Abschwächung der bestehenden Magnetisierung. Erst ab der sogenannten Koerzitivfeldstärke H_c tritt Magnetisierung parallel zum äußeren Magnetfeld auf, also eine Ummagnetisierung. Die neue Magnetisierung steigt nichtlinear bis zur Sättigungsfeldstärke B_s . Reduziert man dann das äußere Magnetfeld wieder, so fällt die magnetische Flussdichte im Stoff langsamer ab als sie vorher angestiegen ist. Es verbleibt schließlich sogar die Remanenz B_R (Schmitt, 2015).

Die Fläche, die von der Hystereseurve eingeschlossen wird, hat die Dimension einer Energie. Diese Fläche entspricht genau jener Energie pro Volumeneinheit des Magneten, welche bei einem Durchlauf der Magnetisierung von der positiven Sättigungsflussdichte B_s bis zur negativen Sättigungsflussdichte $-B_s$ und dem anschließenden Rückweg von $-B_s$ zu B_s aufgewendet werden muss. Diese Energie wird bei dem Magnetisierungsvorgang als Wärme frei. Bei magnetisch harten Stoffen ist diese Energie größer als bei magnetisch weichen Stoffen. Die harten Stoffe sind entsprechend widerstandsfähiger gegen kleine Störungen der Magnetisierung durch äußere Magnetfelder, Wärme oder Stöße und eignen sich gut als Magnetstoffe für Permanentmagnete. Weichmagnetische Substanzen werden für Transformatoren verwendet, da für die Ummagnetisierung nur wenig elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird (ebd.).

3.1.9 Messung magnetischer Felder

Methoden zur Messung magnetischer Felder lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- Induktionsmethoden
- Kraftmethoden
- Indirekte Methoden

Das Grundgesetz der elektromagnetischen Induktion wird bei magnetischen Messungen häufig verwendet, da es eine exakte lineare Abhängigkeit der Messspannung von der Flussänderung liefert. Im Prinzip wird eine Leiterschleife in einem Magnetfeld positioniert. Die zeitliche Änderung des von der Leiterschleife umfassten magnetischen Flusses induziert eine Messspannung. Eine Integration der Messspannung über die Zeit des Vorganges ergibt die Flussänderung aus welcher die Flussdichte B oder die Feldstärke H abgeleitet werden kann (Michalowsky, 1995).

Im Magnetfeld wirken auf Proben mechanische Kräfte, die dem magnetischen Moment proportional sind und als Grundlage für verschiedene Messverfahren dienen. Für homogene Magnetfelder wird das an den magnetischen Polen einer (z.B. stabförmigen) Probe auftretende Kräftepaar, welches ein Drehmoment verursacht ausgenützt. Bei inhomogenen Magnetfeldern verursacht der Feldgradient eine translatorische Kraft, welche z.B. in Magnetwaagen gemessen wird (ebd.).

Die wohl gängigste Art zur Bestimmung der Stärke von magnetischen Feldern ist die Verwendung von Hallsonden. Das Magnetfeld selbst wird in A/m oder Oersted gemessen. In den Naturwissenschaften und der Technik ist man jedoch mehr an die Maßeinheit Tesla gewöhnt, die für die magnetische Flussdichte verwendet wird. Deshalb zeigen die Hallsonden meist den Wert der magnetischen Flussdichte in Tesla an (Schmitt, 2015)

Die Hallsonde nutzt den Halleffekt zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte. Aufgrund der Lorentzkraft wirkt auf Ladungsträger, die sich in einem Magnetfeld bewegen, eine Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger (siehe Abbildung 3.7). Diese werden also zu einer Seite des Ladungsträgers hingedrängt. Wenn man nun einen Strom an ein Leiterplättchen anlegt, welches sich in einem Magnetfeld befindet, so wirkt eine Kraft auf die Träger des Stroms, also die Elektronen. Die Richtung der Kraft steht dabei senkrecht auf die Bewegungsrichtung der Elektronen und senkrecht auf das Magnetfeld (ebd.).

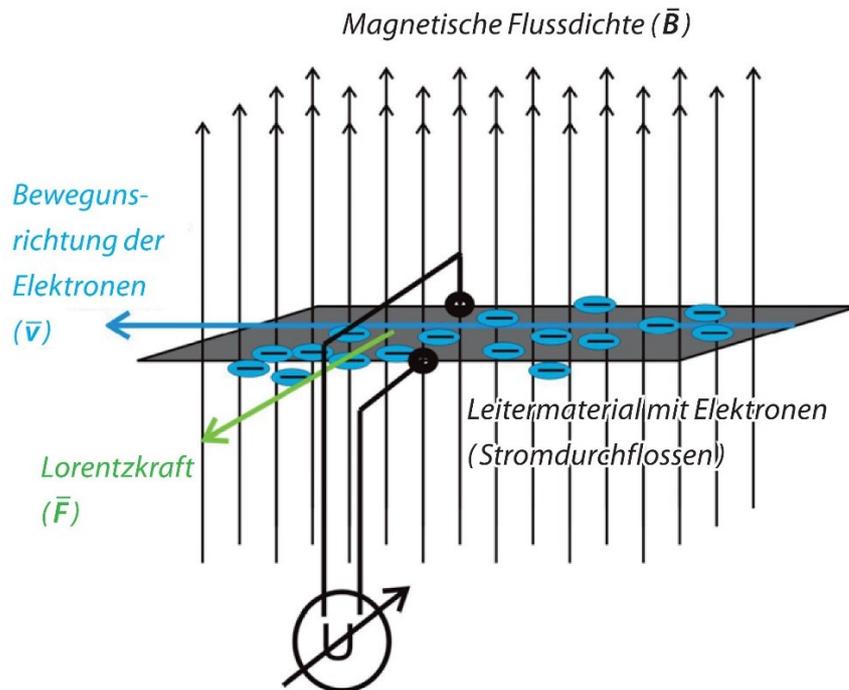


Abbildung 3.7 Halleffekt am Beispiel eines Leiterplättchens (Schmitt, 2015)

Die Spannung U über dem Plättchen ist für einen festen Strom I und eine feste Geometrie des Leiterplättchens proportional zur magnetischen Flussdichte B , die das Plättchen durchdringt. Dadurch kann aus der Hallspannung U direkt die magnetische Feldstärke bestimmt werden. Die Formel für die Lorentzkraft \vec{F} auf Ladungsträger der Geschwindigkeit \vec{v} in der magnetischen Flussdichte \vec{B} lautet $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, wobei q die Ladung bezeichnet. Für Elektronen gilt demnach $\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$, da die Ladung des Elektrons gerade eine negative Elementarladung e beträgt. Auf positive Ladungen würde gerade eine entgegengesetzt gerichtete Kraft wirken. Der Halleffekt kann also auch zur Feststellung genutzt werden, ob die Teilchen, die beim Stromfluss in Bewegung sind (also die Elektronen), eine negative Ladung tragen und keine positive. Im stromdurchflossenen Plättchen der Hallsonde werden die Elektronen nun senkrecht aus ihrer Bewegungsrichtung verschoben und sammeln sich in Richtung einer Seite des Plättchens. Dadurch kommt es über der Breite des Plättchens zu einer elektrischen Spannung, die proportional zum Magnetfeld ist, welches gemessen werden soll. Aus dem Wert der sogenannten Hall-Spannung U über dem Plättchen kann mit Hilfe einer weiteren Umrechnung der gleichzeitig wirkenden elektrischen Kräfte, die mit der Lorentzkraft im Gleichgewicht sind, direkt das äußere Magnetfeld angegeben werden, in welchem sich das Plättchen befindet (Schmitt, 2015).

3.1.10 Magnetwerkstoffe

Man unterscheidet bei Magnetwerkstoffen grundsätzlich zwischen hartmagnetischen und weichmagnetischen Werkstoffen, wobei die Einsatzgebiete aufgrund der Eigenschaften völlig unterschiedlich sind.

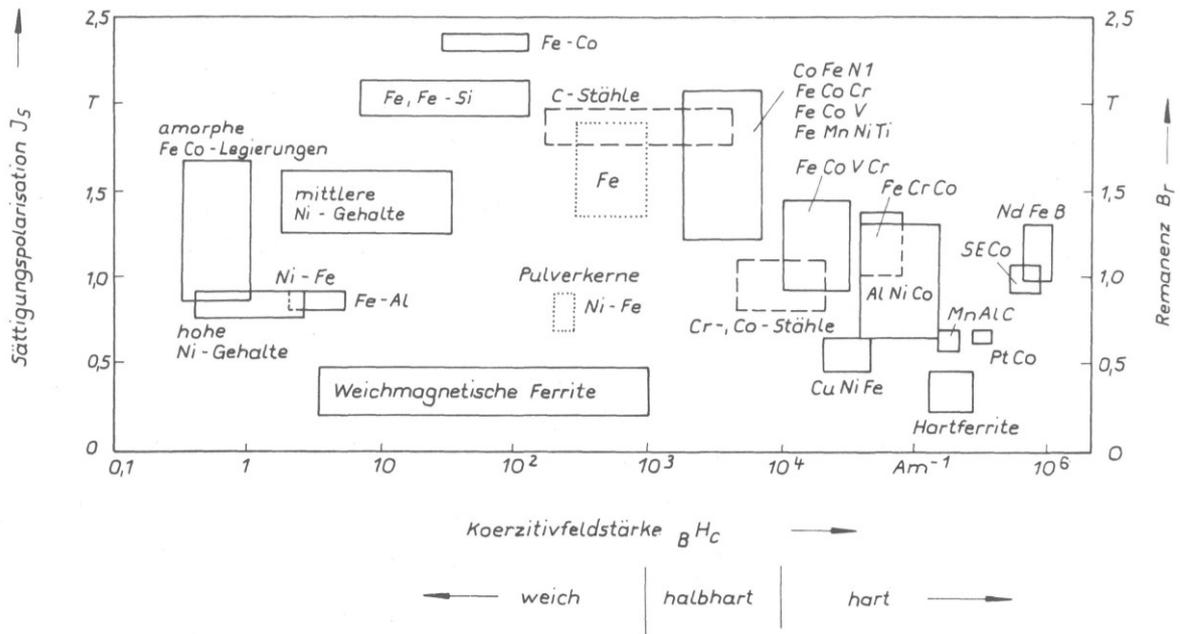


Abbildung 3.8 Wertebereiche von J_s , B_r , und $B H_c$ bei magn. Werkstoffen (Michalowsky, 1995)

Weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch die leichte Magnetisierbarkeit, kleine Koerzitivkraft und niedrige Verluste aus. Hauptanwendung sind Elektrobleche in Trafos, Generatoren und Motoren. Für den Einsatz in magnetischen Separatoren finden diese Werkstoffe jedoch keinen Einsatz und werden nicht weiter behandelt. Im Unterschied zu den weichmagnetischen Stoffen sind die hartmagnetischen Stoffe dadurch gekennzeichnet, dass nach Abschalten eines hinreichend großen äußeren Magnetfeldes zur Aufmagnetisierung des Magneten die wirksame magnetische Polarisation praktisch gleich der Sättigungspolarisation ist (Michalowsky, 1995).

Die wichtigsten magnetischen Kenngrößen der hartmagnetischen Werkstoffe sind laut Michalowsky:

- Remanenzinduktion B_r
- Koerzitivfeldstärke der magnetischen Polarisation $J H_c$ bzw. Induktion $B H_c$
- Rechteckförmigkeit der Hystereseschleife
- Einsatztemperatur

Hauptanwendungsrichtungen für hartmagnetische Werkstoffe sind:

- Motoren, Generatoren
- Lautsprecher, Mikrophone, Telefone, Hörgeräte
- Elektrische Zähler, Sensoren und andere Bauteile der Messtechnik
- Geräte der Haushalts- und Medizintechnik
- **Magnetische Separatoren**
- Schwebbahnen, Hebevorrichtungen
- Magnetische Kupplungen

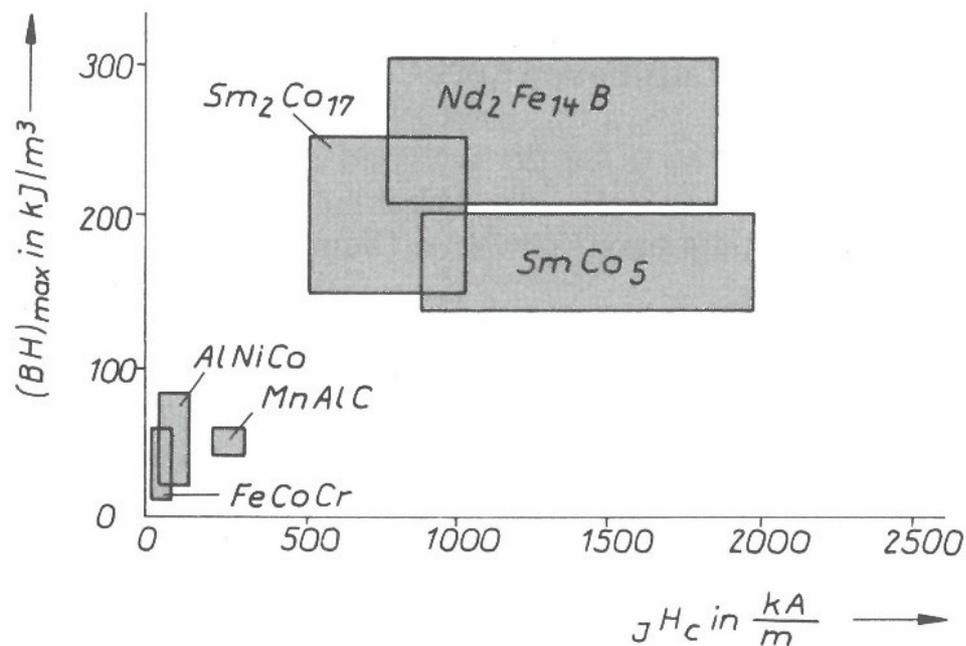


Abbildung 3.9 Energieprodukt $(BH)_{max}$ und Koerzitivfeldstärke jH_c gebräuchlicher hartmagnetischer Werkstoffe (Michalowsky, 1995)

Eine Übersicht zu den Werten von $(BH)_{max}$ und jH_c der gebräuchlichsten hartmagnetischen metallischen Werkstoffe ist in Abbildung 3.9 gegeben. Im Folgenden soll auf die einzelnen Werkstoffgruppen, welche in Apparaten der Magnetscheidung Anwendung finden, näher eingegangen werden (Michalowsky, 1995).

3.1.10.1 Oxidische Dauermagnetwerkstoffe

Bei Werkstoffen mit der Zusammensetzung $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ und $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ handelt es sich um oxidische Magnetwerkstoffe, wobei die Bleiferritverbindungen aufgrund des hohen Verarbeitungsaufwands (Toxizität) nicht mehr verwendet werden. Verbindungen dieses Typus zeichnen sich durch eine hexagonale Kristallstruktur aus. Für die Herstellung wird eine feine Korngemenge (0,5-1,0 μm) aus $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ oder $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ verwendet. Diese feinen Teilchen verhalten sich wie Einbereichsteilchen – also wie Teilchen, die nur aus einer einzigen magnetischen Domäne bestehen. Sie sind in Suspensionen mit etwa 35% Wassergehalt und 65% Volumenanteil $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ oder $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ während des Pressvorganges durch ein äußeres Magnetfeld ausrichtbar. Die Herstellschritte sind in Abbildung 3.10 veranschaulicht (Michalowsky, 1995).

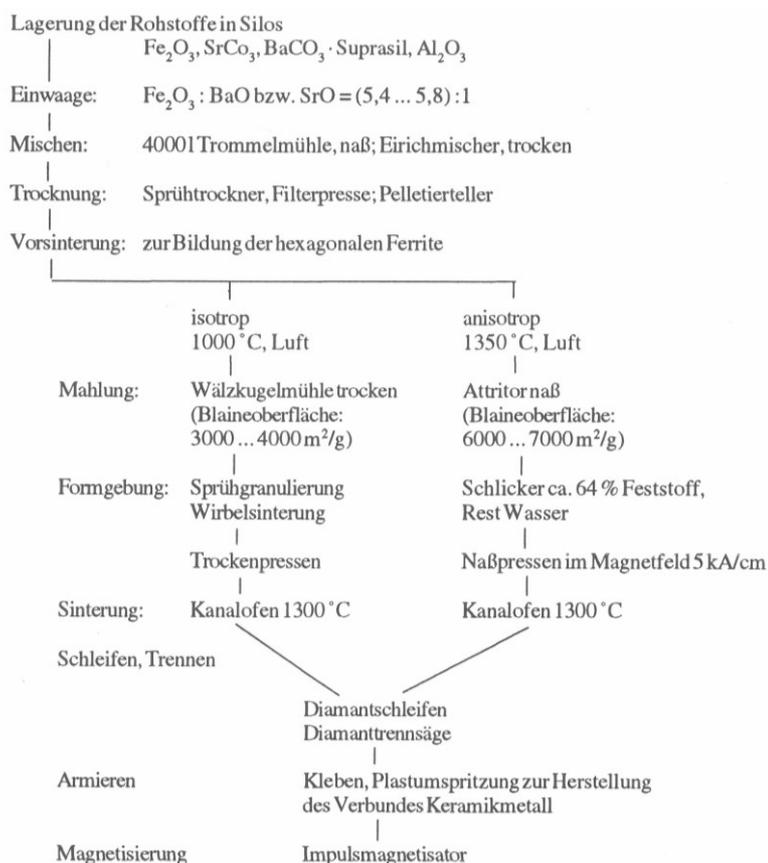


Abbildung 3.10 Ablauf der Fertigung oxydischer Dauermagnetwerkstoffe (Michalowsky, 1995)

Neben der chemischen Zusammensetzung haben Störungen im kristallinen Aufbau des Werkstoffes wie Korngröße und Korngrößenverteilung, Poren und Porenverteilung, Ausbildung der Textur, Ausscheidungen zweier Phasen, einen großen Einfluss auf die Größe der Koerzitivfeldstärke und anderer magnetischer Eigenschaften (ebd.).

3.1.10.2 Dauermagnetwerkstoffe auf Basis von Seltenerdmetallen

Die SE-Magnete basieren auf Verbindungen der SE-Metalle mit den 3d-Metallen (intermetallische Phasen). Die primären magnetischen Eigenschaften werden wesentlich durch die Art und Größe des magnetischen Moments der SE-Atome bzw. der 3d-Metallatome sowie den Einfluss des Kristallaufbaus (räumliche Anordnung und Abstände der Atome, Nachbarschaftsverhältnisse) auf die Größe dieser lokalen magnetischen Momente und ihrer magnetischen Kopplung bestimmt. Die magnetische Härtung erfordert die Einstellung einer bestimmten Gefügestruktur (Korngröße, Defektstruktur an den Korngrenzen Ausscheidungsstruktur usw.). Aufgrund ihrer großen kristallinen magnetischen Anisotropieenergie bei gleichzeitig hoher magnetischer Sättigungspolarisation werden bei den SE-Magneten die höchsten Werte für das maximale Energieprodukt erreicht (Michalowsky, 1995).

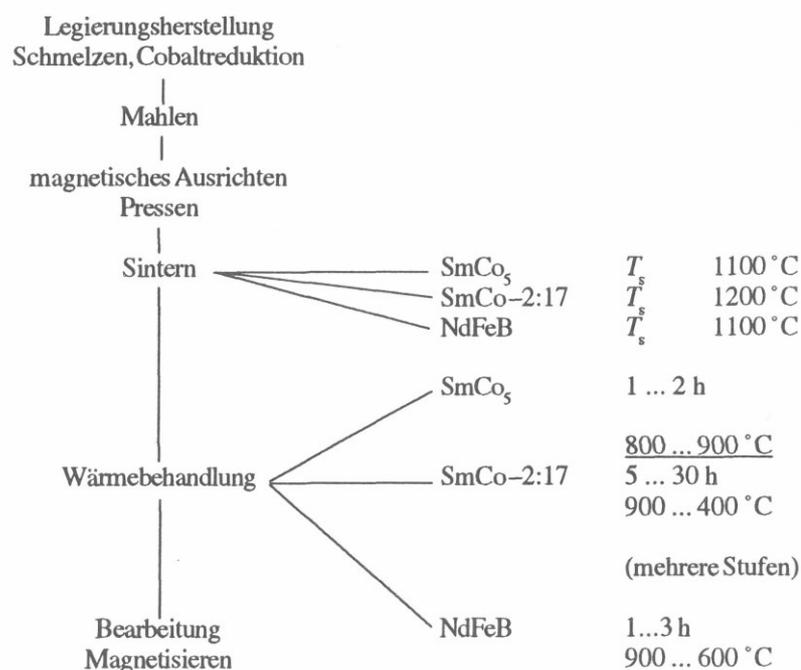


Abbildung 3.11 Herstellungsschritte bei der Herstellung von Dauermagnetwerkstoffen auf Basis von Seltenerdmetallen (Michalowsky, 1995).

Die Herstellung von Dauermagnethochleistungswerkstoffen erfolgt auf Basis der Hauptphasen SmCo₅, Sm₂Co₁₇ und Nd₂Fe₁₄B. Ihre Fertigung erfolgt vorwiegend auf pulvermetallurgischem Weg. In Abbildung 3.11 ist eine Übersicht zu den Herstellungsschritten von Sintermagneten auf Basis der Seltenerdmetalle zu sehen (ebd.).

Die SE-Ausgangslegierungen bzw. Ausgangspulver werden auf schmelzmetallurgischen Weg oder auf dem Weg der kalzithermischen Reduktion der SE-Oxide hergestellt. Die Formgebung erfolgt isostatisch oder durch Pressen mit Formwerkzeugen. Je nach der Bauteilgröße, der erforderlichen Maßtoleranzen und in Abhängigkeit von der Stückzahl wird der endformnahe pulvermetallurgische Weg oder die Herausarbeitung der Form aus dem Massivstück bevorzugt (Michalowsky, 1995).

3.1.11 Güte und maximale Einsatztemperatur

Die Güte eines Magneten entspricht dem sogenannten Energieprodukt. Das Energieprodukt ist das Produkt aus der magnetischen Flussdichte B und der magnetischen Feldstärke H und ist physikalisch ein Maß für die pro Volumeneinheit gespeicherte magnetische Energie. Magnete besitzen eine Kraftwirkung proportional zu ihrem Energieprodukt, wenn Magnete gleicher Größe verglichen werden. Sind zwei Magnete gleich groß und gleich geformt, so hat ein Magnet mit einem doppelten Energieprodukt im Vergleich zu einem anderen Magneten auch die doppelte Kraftwirkung (Schmitt, 2015).

Das Energieprodukt kann in Gauss Oersted gemessen werden. Ein Gauss Oersted ist das Produkt aus der Einheit Gauss für die magnetische Flussdichte und der Einheit Oersted für die magnetische Feldstärke. Durch den Umrechnungsfaktor $1 \text{ Oersted} = 79,577 \text{ A/m}$ besitzt das Energieprodukt in den Standardeinheiten der Energiedichte J/m^3 einen grundsätzlich anderen Zahlenwert als in den Einheiten Gauss Oersted. Es gilt: $1.000 \text{ Gauss Oersted} = 7,9577 \text{ J/m}^3$. Typischerweise haben gute Permanentmagnete einige Hundert kJ/m^3 magnetische Energie gespeichert. Dies sind einige Zehn Mega Gauss Oersted (MGOe). Die Güte eines Magneten wird nun als Zahl angegeben. Der Zahlenwert entspricht dem Energieprodukt in der Einheit MGOe. Neben dem Zahlenwert für das Energieprodukt findet man bei der angegebenen Güte eines Magneten oft noch einen Buchstaben zur Bezeichnung der maximalen Einsatztemperatur. Die maximale Einsatztemperatur von Permanentmagneten ist begrenzt, da ein Permanentmagnet durch Remanenz nach Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes entsteht. Die Remanenz verschwindet spätestens dann vollständig, wenn die stoffspezifische Curie Temperatur überschritten wird. Auch bei niedrigerem Erwärmen kann es jedoch zu einer teilweisen Entmagnetisierung kommen. Deshalb sollte die maximale Einsatztemperatur nicht überschritten werden. Es gilt als Konvention, dass Magnete mit dem Buchstaben N bis $80 \text{ }^\circ\text{C}$, M bis $100 \text{ }^\circ\text{C}$, H bis $120 \text{ }^\circ\text{C}$, SH bis $150 \text{ }^\circ\text{C}$, EH bis $180 \text{ }^\circ\text{C}$ und UH bis $200 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden können. Die Gütebezeichnung N45 charakterisiert also einen Magneten mit einem Energieprodukt von 45 MGOe (358 kJ/m^3), der bis $80 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden kann. (Schmitt, 2015).

3.2 Grundprozesse der Aufbereitung

Unter Aufbereitung versteht man die Weiterverarbeitung von primärem oder sekundärem festen Rohgut zu marktfähigen Produkten mit dem Ziel, den Wert des Rohgutes zu maximieren.

Man unterscheidet in der Aufbereitung folgende Grundverfahren:

- Zerkleinern – Aufschluss von Verwachsungen bzw. Schaffen von Dispersität
- Klassieren – Trennen nach Korngröße
- Sortieren – Trennen nach physikalischen Eigenschaften
- Hilfsprozesse – z.B. fest/flüssig Trennung

(Böhm, 2017)

Obwohl diese Einteilung der Grundverfahren in einer Zeit entstand, in welcher die Aufbereitung sich hauptsächlich auf primäres Rohgut beschränkte, ist sie auch heute für die Aufbereitung von sekundärem Rohgut immer noch aktuell. Die Begründung liegt in der Tatsache, dass die Trennwirkung von Sortierprozessen stark von der Korngrößenverteilung der Aufgabe abhängt. Daher sind in der Regel eine Klassierung und eine vorgeschaltete Zerkleinerung notwendig.

3.2.1 Zerkleinern

Durch Zerteilen wird der Dispersitätszustand fester oder flüssiger Stoffe durch Überwinden der Bindekräfte in den Ausgangspartikeln derart verändert, dass kleinere Partikel entstehen. (Schubert, 2003).

Zerkleinerungsprozesse spielen in vielen Industriebereichen eine wichtige Rolle. Nahezu alle festen Stoffe müssen bei Gewinnung und Verarbeitung zerkleinert werden; Beispiele dafür sind mineralische, pflanzliche und tierische Rohstoffe, Zwischenprodukte in der chemischen und pharmazeutischen Industrie, Pigmente, Kunststoffe, Baustoffe und Abfallstoffe (z. B. Schrotte, Kunststoffe, Altpapier). Die Anforderungen können unterschiedlich sein und lassen sich hinsichtlich folgender Gesichtspunkte schematisieren (ebd.):

- Partikelgrößenverteilung: Im einfachsten Fall ist eine bestimmte charakteristische Partikelgröße, z.B. der Medianwert oder die Obergrenze vorgegeben. Zusätzlich können auch Forderungen bezüglich der

Verteilungsbreite oder gar der Verteilungsfunktion gestellt sein. In manchen Fällen wird auch eine untere Begrenzung der Partikelgrößenverteilung verlangt (staubfreies Produkt). Solch weiterführende Forderungen können im Allgemeinen nicht durch bloßes Zerkleinern, sondern nur mit einer Kombination von Zerkleinerungsmaschinen und Klassiereinrichtungen erfüllt werden (ebd.).

- Spezifische Oberfläche: Prinzipiell lässt sich die gleiche spezifische Oberfläche mit unendlich vielen Partikelgrößenverteilungen erreichen. Deshalb ist diese Anforderung meistens mit einer Vorgabe zum Körnungsaufbau verknüpft (ebd.).
- Aufschlussgrad: Die Partikeln von mineralischen und pflanzlichen Rohstoffen sowie von Abfallstoffen bestehen aus verschiedenen Komponenten. Das Zerkleinern soll im Allgemeinen die Wertstoffe freilegen, um diese mittels eines Sortierprozesses aufkonzentrieren zu können (ebd.).
- Partikelform: Für manche Anwendungen sind annähernd kubische, gerundete, blättchenförmige oder scharfkantige Partikel vorteilhaft. Diese speziellen Formen sollen dann überwiegend vorhanden sein (ebd.).

Die Zerkleinerungsmaschinen sekundärer Rohstoffe unterscheiden sich meistens von jenen aus der primären Ausbereitung. Zum einen wird ein hinreichender Aufschluss des Rohgutes in der Regel in größeren Korngrößen als in der Primärrohstoffaufbereitung erzielt und zum anderen sind die stoffspezifischen Eigenschaften der Aufgabe völlig anders wie bei Gesteinen. Betrachtet man beispielsweise metallische Schrotte, würde eine Zerkleinerung dieser mit einem Steilkegelbrecher oder Backenbrecher aufgrund der Zähigkeit der meisten Metalle nicht funktionieren. Bevorzugte Beanspruchungsarten bei der Zerkleinerung von Schrotten oder Verbundstoffen sind Schneiden, Reißen, Schlag und Prall, wobei dies wiederum von der Plastizität/Sprödhheit der Aufgabe abhängt. Klassische Vertreter solcher Zerkleinerungsmaschinen wären Schrottscheren, Ein- oder Mehrwellenschredder und Hammermühlen.

Im Bereich der Aufbereitung von metallischen Verbundstoffen, das können sowohl Verbunde aus mehreren unterschiedlichen Metallen (z.B. Al-Cu-Kühler) oder auch Verbunde aus Metallen und Kunststoffen (z.B. Altgeräte) sein, hat sich der Querstromzersetzer als besonders effizient hervorgetan. Die Energie welche beim Aufprall frei wird bewirkt in der Regel eine sehr effiziente Trennung des Verbundes in seine Einzelkomponenten. Die Partikelgröße der Einzelkomponenten wird dabei kaum

beeinflusst. Im Gegensatz dazu wird bei einer schneidenden oder reißenden Zerkleinerung, die Partikelgröße solange verringert bis der Aufschluss erreicht wird. Das geschieht in der Regel aber in einem weit feineren Korngrößenbereich als beim Querstromzerspaner.

3.2.2 Klassieren

Klassierprozesse dienen zur Trennung von Partikelkollektiven in Produkte unterschiedlicher Partikelgrößenzusammensetzung. Die zum Erreichen dieses Prozessziels industriell eingesetzten Wirkprinzipien lassen sich in zwei Gruppen gliedern, nämlich die Siebklassierung und die Stromklassierung. Beim Siebklassieren geschieht die Trennung nach charakteristischen Längen der Partikel mittels einer semipermeablen Trennfläche (Siebboden), in der sich viele geometrisch gleiche Öffnungen befinden. Partikel, die während ihrer Bewegung über den Siebboden hinweg in einer passenden Lage kleiner als die Öffnungen sind, können diese passieren und ins Feingut gelangen, während die anderen oberhalb verbleiben und das Grobgut bilden. Für das Klassieren lassen sich auch die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten bzw. Bewegungsbahnen ausnutzen, die die Partikeln in einem Fluid unter der Wirkung von Feld-, Strömungs- und Trägheitskräften erreichen bzw. zurücklegen, weil diese von der Partikelgröße abhängen. Diese Trennungen bezeichnet man als Stromklassieren, weil letztlich die bei der Umströmung der Partikel auftretenden partikelgrößenabhängigen Widerstandskräfte für den Klassiereffekt verantwortlich sind. Hierbei ist es zweckmäßig, von vornherein zwischen Hydroklassierung (Nassklassierung) und Aeroklassierung (Windsichtung) zu unterscheiden. (Schubert, 2003)

In der Recyclingindustrie werden fast ausschließlich Siebe eingesetzt, da die Trennschnitte in der Regel größer als 1 mm sind. Da sich die Hydroklassierung eher für Korngrößen <1mm eignet und zusätzlich noch ein Nassprozess ist, findet diese im Recycling keine Anwendung. Anders sieht es bei der Aeroklassierung (Windsichtung) aus. Dieser Prozess wird häufig verwendet, um Folien auszusortieren oder leichtere Partikel (z.B. Steinwolle, Styropor, etc.) aus Bauschuttmassen abzutrennen, wobei man hier strenggenommen nicht mehr nach Korngröße, sondern eher nach einer Kombination aus Dichte und angeströmter Fläche sortiert.

3.2.3 Sortieren

Mit Hilfe von Sortierprozessen werden festdisperse Stoffsysteme, die eine Mischung darstellen, nach stofflichen Gesichtspunkten getrennt. Dazu wird ein physikalisches Trennmerkmal ausgenutzt, bezüglich dessen sich die zu trennenden Partikel genügend unterscheiden. Als solches kommen laut Schubert (2003) vor allem folgende Eigenschaften in Betracht:

- Dichte
- **magnetische Suszeptibilität**
- elektrische Eigenschaften (Leitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante)
- Grenzflächeneigenschaften (Benetzbarkeit)
- optische Eigenschaften
- Eigenstrahlung sowie angeregte Strahlung
- mechanische Eigenschaften.

Sollen die in einem festdispersen Stoffsystem enthaltenen Wertstoffe in einem Trennprodukt angereichert oder schädliche Bestandteile abgereichert werden, so ist ein angemessener Aufschluss der zu trennenden Phasen eine unverzichtbare Voraussetzung für den Trennerfolg beim Sortieren. Die wichtigsten Einsatzgebiete für Sortierprozesse sind in der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe und - in den Industrieländern stark zunehmend - beim Recycling fester Abfälle zu finden (Schrott, Altpapier, Kunststoffe, Bauschutt u. a.) (Schubert, 2003).

3.3 Sortierung im magnetischen Feld

Industrielle Trennprozesse bei denen sich die Sortierung unter der Einwirkung eines magnetischen Felds vollzieht werden als Magnetscheidung bezeichnet. Die Voraussetzung dafür ist, dass sich die zu trennenden Phasen eines Aufgabeguts hinsichtlich ihrer magnetischen Suszeptibilität genügend unterscheiden. Dann wirken auf diese Partikel in inhomogenen Magnetfeldern verschieden große magnetische Kräfte, so dass sie im Prozessraum unterschiedliche Bewegungsbahnen zurücklegen.

Ganz allgemein ist festzustellen, dass im Prozessraum eines Magnetscheiders die magnetischen Kraftkomponenten des Magnetfelds, die auf die abzutrennenden magnetischen Partikeln wirken, größer als die Summe der jeweils entgegengesetzt gerichteten äußeren Kraftkomponenten (Schwerkraft, Widerstandskraft) sein müssen (siehe Abbildung 3.12). (Schubert, 2003)

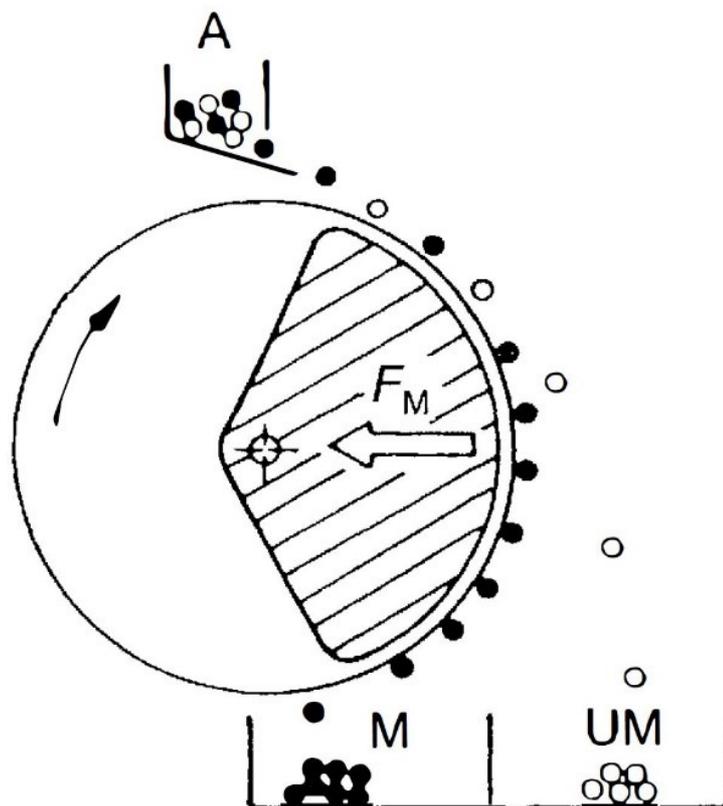


Abbildung 3.12 Wirkprinzip der Trennungen an magnetischen Separatoren - Ablensortierung am Trommelmagnetscheider (A Aufgabegut; M magnetisches Produkt; UM unmagnetisches Produkt) (Schubert, 2003)

Für die magnetische Kraft auf einzelne Partikel lässt sich laut Schubert (2003) folgender Zusammenhang ableiten:

$$F_M = \frac{1}{2} V_p \mu_0 \frac{\kappa_S}{1 + E \kappa_S} \text{grad} \mathbf{H}^2 \quad \text{Gleichung 3.1}$$

V_p Partikelvolumen

μ_0 magnetische Feldkonstante bzw. Induktionskonstante

$$(\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 4\pi * 10^{-7} \frac{N}{A^2})$$

κ_S volumenbezogene Suszeptibilität des Stoffs der Partikel

H Feldstärke des äußeren Magnetfelds

E Entmagnetisierungsfaktor

Dieser Zusammenhang gilt zwar im Vakuum, lässt sich aber auch in Luft und Wasser anwenden, da deren Suszeptibilitäten vernachlässigbar klein sind. Für die Ableitung ist außerdem noch vorausgesetzt worden, dass die Partikel genügend klein sind bzw. $\text{grad} \mathbf{H}^2$ über das Volumen hinweg als konstant angenommen werden darf. Der Entmagnetisierungsfaktor E berücksichtigt die Schwächung des äußeren Felds im Inneren der Partikel, da aufgrund ihrer Magnetisierung ein inneres Feld dem äußeren entgegenwirkt. E hängt von der Form der Partikel und ihrer Orientierung im äußeren Feld ab (Kugel: $E = 1/3$; dünne Scheiben quer zur Feldrichtung: $E \sim 1$; nadelförmige Partikel in Feldrichtung: $E \sim 0$).

Setzt man die magnetische Körpersuszeptibilität κ_P

$$\kappa_P = \frac{\kappa_S}{1 + E \kappa_S} \quad \text{Gleichung 3.2}$$

Für ein Partikel in Gleichung 3.1 ein, so erhält man

$$F_M = \frac{1}{2} V_p \mu_0 \kappa_P \text{grad} \mathbf{H}^2 \quad \text{Gleichung 3.3}$$

(Schubert, 2003)

Unter Verwendung des nachfolgenden Zusammenhangs

$$\text{grad}H^2 = \text{grad}H^2 = 2 H \text{ grad}H \quad \text{Gleichung 3.4}$$

lässt sich Gleichung 3.3 wie folgt umformen:

$$\mathbf{F}_M = V_P \mu_0 \kappa_P H \text{ grad}H \quad \text{Gleichung 3.5}$$

beziehungsweise:

$$\mathbf{F}_M = V_P \mu_0 M_P \text{ grad}H \quad \text{Gleichung 3.6}$$

wobei $M_P = \kappa_P H$ die Magnetisierung der Partikel bedeutet.

Die Gleichung 3.5 macht besonders deutlich, dass die Intensität der magnetischen Kraft sowohl von der Feldstärke als auch deren Gradienten, d. h. von der Inhomogenität des Felds, abhängt.

Falls schwach paramagnetische Stoffe ($1 + E \kappa_S \approx 1$) vorliegen, lässt sich Gleichung 3.5 mit $\kappa_P = \frac{\kappa_S}{1 + E \kappa_S}$ folgendermaßen vereinfachen:

$$\mathbf{F}_M = V_P \mu_0 \kappa_S H \text{ grad}H \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Für ferromagnetische Stoffe ($\kappa_S \gg 1$) ergibt sich:

$$\mathbf{F}_M = \frac{\mu_0}{E} V_P H \text{ grad}H \quad \text{Gleichung 3.8}$$

Dies bedeutet, dass dann die auf ein Partikel wirkende Kraft einem Betrag zustrebt, der nicht mehr von den magnetischen Eigenschaften, sondern nur noch von $H \text{ grad}H$, V_P und E bestimmt wird.

(Schubert, 2003)

Die vorstehenden Gleichungen für die magnetische Kraft F_M setzen mit Ausnahme von Gleichung 3.6 einen linearen Zusammenhang zwischen der Induktion B und H bzw. M_P und H voraus. Dies ist bei ferromagnetischen Stoffen jedoch höchstens im Anfangsteil der Magnetisierungskurven näherungsweise erfüllt. Deshalb ist für ferromagnetische Stoffe nur Gleichung 3.6 anwendbar, wobei mit wachsender Feldstärke die Magnetisierung M_P eines Partikel ihrem Sättigungswert $M_{P,s}$ zustrebt (Schubert, 2003).

3.3.1 Stoff- und Körpersuszeptibilität

Endliche Körper werden in einem äußeren Magnetfeld polarisiert. Die von den Polzentren ausgehende Feldstärke wirkt der erzeugenden Feldstärke entgegen. Die resultierende Feldstärke im Inneren des Körpers sinkt unter jene des Erzeugersystems im Vakuum. Bezieht man die Magnetisierung des Körpers auf die Feldstärke des Erzeugersystems im Vakuum, wie es bei der Trennung von Kraftdichte des Scheiders und Körpereigenschaften notwendig wird, erhält man den gegenüber der Stoffsuszeptibilität verminderten Wert der Körpersuszeptibilität (Böhm, 2009)

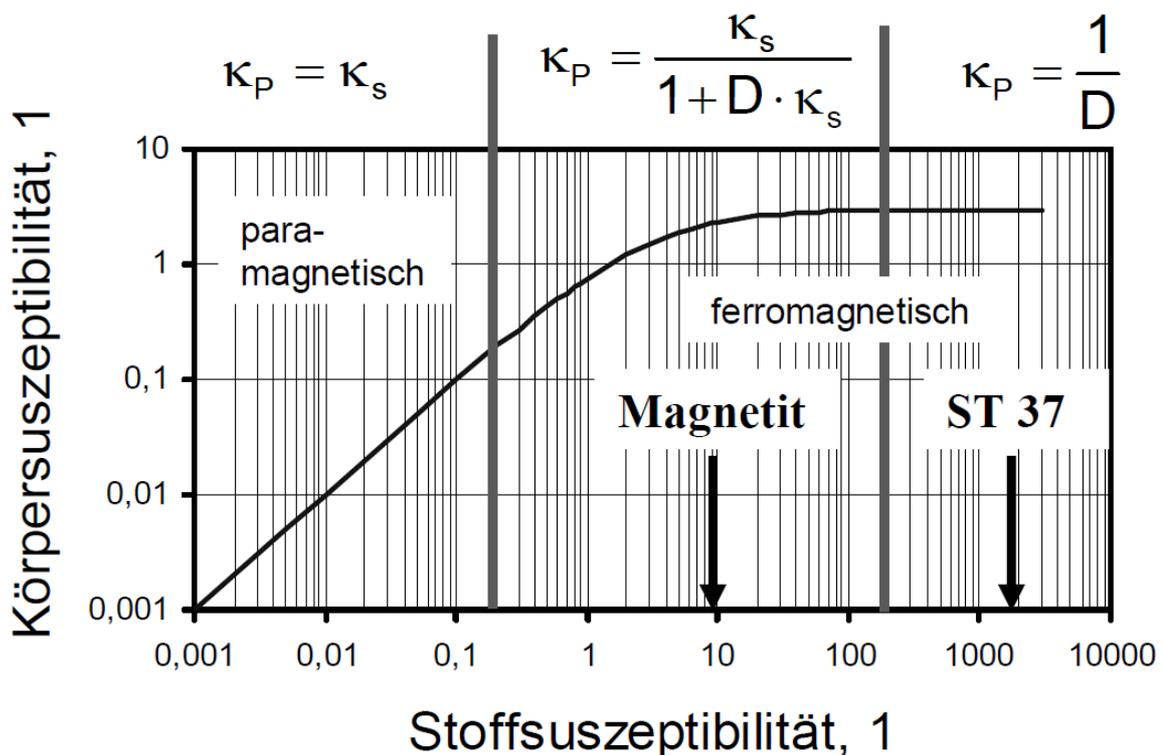


Abbildung 3.13 Zusammenhang zwischen Stoff- und Körpersuszeptibilität für den Fall der Kugel (Böhm, 2009)

Entsprechend dem elektrotechnisch-physikalischen Fachschrifttum kann – sofern es sich um Rotationsellipsoide handelt und damit die Feldstärke im Inneren des Körpers homogen an allen Punkte verläuft – ein einfaches Verhältnis zwischen Körpersuszeptibilität und Stoffsuszeptibilität mit Hilfe des Entmagnetisierungsfaktors (D) aufgebaut werden (Böhm, 2009):

$$\kappa_P = \frac{\kappa_S}{1 + D * \kappa_S}$$

Gleichung 3.9

Die Kugel besitzt einen Entmagnetisierungsfaktor von 0,33, eine sehr dünne Scheibe einen Entmagnetisierungsfaktor von 1. Körner liegen entsprechend dem Schrifttum zwischen 0,1 und 0,25 (ebd.).

Betrachtet man modellhaft Körner als Rotationsellipsoide, gilt der einfache Zusammenhang zwischen scheinbarer Stoff- bzw. Körpersuszeptibilität. Der Kurvenverlauf in Abbildung 3.13 zeigt, dass bei niedriger Suszeptibilität (paramagnetischer Bereich, $\kappa_S < 0,2$) kein Unterschied zwischen Stoff- und Körpersuszeptibilität auftritt. Im Übergangsbereich zwischen schwach und stark magnetischen Materialien $0,2 < \kappa_S < 200$ (Martit, Magnetit) spielt die Kornform eine bedeutende Rolle, während im Bereich hoher Stoffsuszeptibilitäten die Körpersuszeptibilität praktisch nur mehr vom Entmagnetisierungsfaktor bestimmt wird. Bei Abweichungen von der Form des Rotationsellipsoids wird der Entmagnetisierungsfaktor eine Funktion der Suszeptibilität. Die praktische Erfahrung mit der Aushebetiefe zeigt, dass lange, schmale Körper aus größerer Entfernung angezogen werden als gedrungene Formen (Kugellagerkugeln, Schraubenmuttern) (ebd.).

3.4 Apparate der Magnetscheidung

3.4.1 Einteilung

Die Einteilung von Apparaten in der Magnetscheidung kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Dabei können auch Überschneidungen auftreten, die eine klare hierarchische Einteilung schwierig machen. An dieser Stelle werden Magnetscheider nach gegensätzlichen Merkmalen eingeteilt:

- Schwachfeld / Starkfeld

In der Literatur (z.B. Schubert, 2003) findet man als Grenzwert zwischen Schwach- und Starkfeldmagnetscheidung eine magnetische Feldstärke von etwa 120 kA/m beziehungsweise eine maximale Flussdichte an der Oberfläche des Magnetsystems von 0,15 T.

- nass / trocken

Ob der Magnetscheideprozess nass oder trocken betrieben wird, hängt in erster Linie von der Korngröße der Aufgabe ab. Größere bis mittlere Körnungen werden auf Trockenscheidern getrennt, feine bis feinste Körnungen verarbeitet man vorwiegend nass. Bei Nassstrennungen beeinträchtigen jedoch die Widerstands- bzw. Schleppkräfte des Fluides den Trennvorgang, die mit abnehmender Partikelgröße relativ zu den anderen Kräften anwachsen. Da die Aufgabe im Recycling eher im Grobkornbereich, liegt findet man in dieser Branche auch Großteils nur Trockenscheider. Eine Ausnahme wären Stäube, wie sie zum Beispiel in größeren Mengen in Hütten und Stahlwerken auftreten (Schubert, 2003)

- Elektromagnet / Permanentmagnet

Mit Hilfe herkömmlicher Elektromagnetsysteme mit Eisenkern lassen sich bei entsprechend optimaler Ausbildung sowie Verwendung leistungsfähiger Isolationswerkstoffe für die Wicklungen Feldstärken bis zu maximal 1,6 MA/m (entspricht Flussdichten bis 2 T) bei entsprechend geringem Luftspalt (Prozessraum) erreichen. Permanentmagnetsysteme liegen in der Praxis bei einer maximalen Flussdichte von etwa 1,0 T an der Oberfläche (Schubert, 2003).

- offenes / geschlossenes Magnetsystem

Ob es sich um ein offenes oder geschlossenes Magnetsystem handelt, hängt in der Regel davon ab ob es sich um einen Elektro- oder Permanentmagnet handelt. Bei offenen Magnetsystemen kommen sowohl Elektro- als auch Permanentmagnete zum Einsatz, wobei Permanentmagnete aufgrund des einfacheren konstruktiven Aufbaues bevorzugt werden. Bei geschlossenen Systemen handelt es sich um Spulen mit Eisenkern und Eisenjoch. Das Joch wird durch einen Luftspalt unterbrochen, dieser Spalt bildet den Prozessraum und ist in seiner Größe sehr beschränkt (Schubert, 2003).

- Gegenlauf / Gleichlauf

Gleichlaufscheider zeichnen sich durch hohe Zuverlässigkeit aus und werden verbreitet für gröberes Gut eingesetzt. Da das Gut alle Pole passiert, wird das magnetische Produkt gut „durchgearbeitet“ und eine hohe Anreicherung ist die Folge. Gegenlaufscheider gewährleisten ein sehr hohes Ausbringen, weil die feststofffreie Trommeloberfläche in die an ferromagnetischem Rohgut verarmte Suspension eintaucht und ein wesentlicher Anteil des magnetischen Produkts auf kürzestem Weg ausgetragen wird. Dadurch werden jedoch die Anreicherung bzw. die Qualität des magnetischen Produkts beeinträchtigt (Schubert, 2003).

- Ablenk- / Aushebe- /Rückhaltescheider

Für die Gliederung ist auch wichtig, ob das Aufgabegut von oben oder von unten (bzw. von der Seite) in den Prozessraum eingeführt wird, da hierdurch zugleich das Wirkprinzip mitbestimmt wird. Im erstgenannten Fall wird das magnetische Produkt durch die magnetischen Kräfte aus dem Gutstrom abgelenkt (Ablenkscheider) oder im Prozessraum aus den Suspensionsstrom zurückgehalten (Rückhaltescheider), im zweiten Fall aus dem Gut- oder Suspensionsstrom an die Fördervorrichtung für das magnetische Produkt herausgehoben (Aushebescheider) (Schubert, 2003).

3.4.2 Apparate

Im folgendem werden offene Permanentmagnetsysteme in trockener Bauweise betrachtet. Diese werden vorwiegend im Recycling industrieller Rest- und Verbundstoffe eingesetzt.

3.4.2.1 Trommelscheider

Trommelscheider sind die am Häufigsten verwendete Art von Magnetscheidern. Dabei kommt überwiegend die Permanentmagnettechnik zum Einsatz, elektromagnetische Trommeln sind industriell von untergeordneter Bedeutung. Mit Trommelscheidern können Partikelgrößen von einigen Zentimetern bis hinunter zu wenigen Mikrometern sortiert werden. Betrieben werden die Trommeln dabei entweder trocken oder nass. Im Weiteren werden aber nur Systeme mit Permanentmagneten in trockener Betriebsweise betrachtet (Michalowsky, 1995).

Bei herkömmlichen Trommelscheidern werden für das Magnetsystem Ferritmagnete mit geringer Intensität verwendet. Solche Magnetsysteme haben auch heute noch Ihre Berechtigung, wenn es um das Sortieren von ferromagnetischen Partikeln geht. Dies gilt sowohl für die Primärrohstoffgewinnung (Magnetit) als auch in der Recyclingindustrie (Stahlteile). Hier würden stärkere Magnetsysteme dazu führen, dass ferromagnetische Partikel aufgrund der sehr hohen Magnetkraft so stark angezogen werden, dass diese von der rotierenden Trommel nicht mehr abgeworfen werden, sondern im unteren Bereich des Magnetsystems quasi „hängen bleiben“. Außerdem wäre es aus einer rein wirtschaftlichen Betrachtung nicht sinnvoll, viel teurere Magnetsysteme mit Seltenerd-Dauermagneten zu verwenden, wenn keine so hohe Intensität des Magnetfeldes gefordert ist (ebd.)

Für weniger stark magnetisierbare (paramagnetische) Partikel werden Systeme mit Seltenerd-Dauermagneten eingesetzt. Der Preis und die Verfügbarkeit dieser Magnetwerkstoffe haben sich in den letzten Jahren stark verbessert. Dadurch fanden leistungsstarke Trommelscheider mit Magnetsystemen aus Neodym-Eisen-Bor-Legierungen ihren Einzug in die Aufbereitungstechnik. Die Anwendung beschränkt sich aber nicht nur auf paramagnetische Partikel. Auch Partikel, die bei der Zerkleinerung nicht völlig aufgeschlossen wurden und sowohl einen ferro- als auch para- bzw. diamagnetischen Anteil besitzen, können mit stärkeren Magnetsystemen aussortiert werden. Die Kraftwirkung ist aber stark abhängig vom Stoffanteil ferro- zu diamagnetisch im Verbundstoffpartikel (Michalowsky, 1995).

Der grundsätzliche Aufbau aller Trommelmagnetscheider ist im Wesentlichen gleich (Abbildung 3.14). Permanentmagnete werden im stationären Magnetsystem in einer rotierenden Trommel aus nichtmagnetischem Werkstoff angeordnet. Das Magnetsystem, welches aus Magneten mit wechselnder Polarität besteht, deckt in etwa einen Winkel von etwa 120° der rotierenden Trommel ab (ebd.)

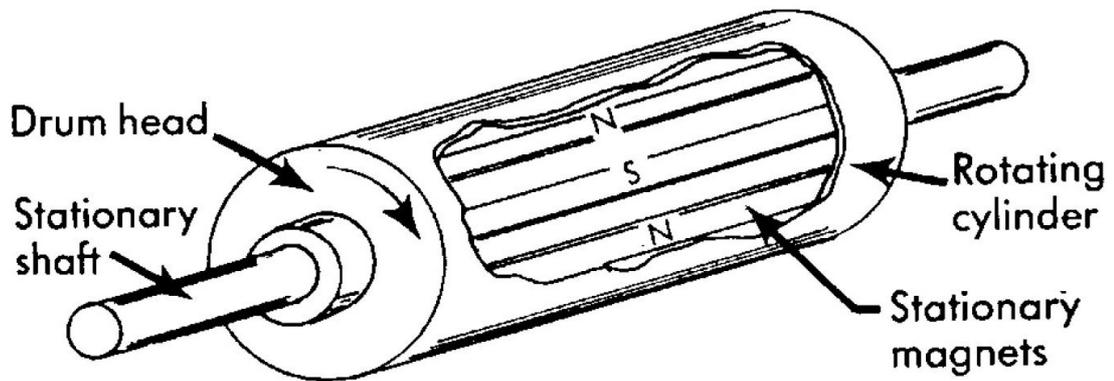


Abbildung 3.14 Vereinfachter Aufbau eines Trommelscheiders mit radialer Magnetisierung (Michalowsky, 1995)

Die Polarität wechselt radial entlang des Umfangs der Trommel und verhält sich gleichmäßig entlang der Breite der Trommel. Diese Wechselepolanordnung (Abbildung 3.15) versetzt die magnetischen Partikel in eine Rotation. Dadurch werden die, von magnetischen Partikeln eingeschlossenen, nichtmagnetischen Partikel freigesetzt und somit nicht fälschlicherweise im Magnetprodukt ausgetragen (ebd.)

Herkömmliche Trommeln auf Ferritbasis erzeugen eine Flussdichte von bis zu 0,22 T an der Trommeloberfläche und etwa 0,10 T bei einem radialen Abstand von 50 mm. Die wesentlich stärkeren Magnetsysteme aus NdFeB-Magnetwerkstoffen erreichen auf der Trommeloberfläche Flussdichten von etwa 1 T (ebd.).

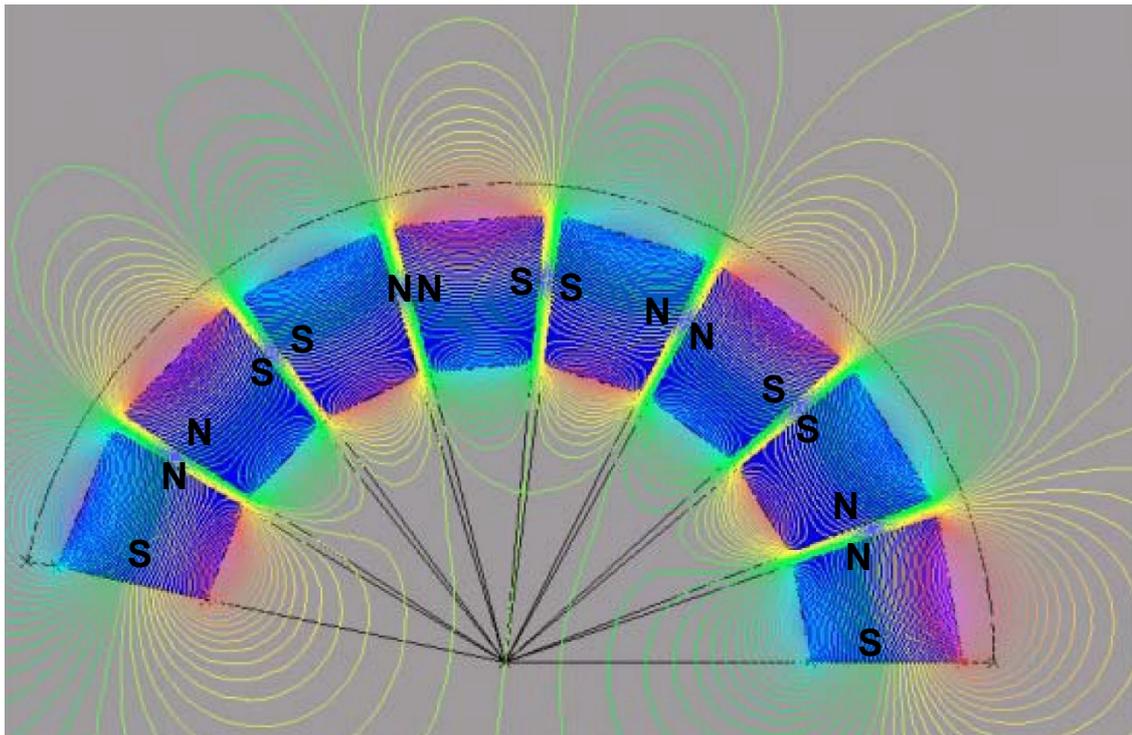


Abbildung 3.15 Schematische Darstellung des magnetischen Flusses am Magnetsystems eines Trommelscheiders mit radialer Magnetisierung und Wechseipolanordnung (Michalowsky, 1995)

Trommelscheider werden mit unterschiedlichen Durchmessern und Breiten hergestellt. Bei den weniger starken Magnetsystemen mit Ferritmagneten werden Trommeln üblicherweise mit Durchmessern von 600 bis 1.500 mm hergestellt. Magnetsysteme auf Basis von Seltenerd magneten werden im Allgemeinen kleiner gebaut, hier reichen die Durchmesser von 380 bis 1.000 mm. Die Breite der Trommeln variiert üblicherweise zwischen 500 und 3.000 mm und wird bei der Auslegung in der Regel an den Durchsatz angepasst (Michalowsky, 1995).

3.4.2.2 Magnetbandwalzenscheider

Erste Permanentmagnetbandwalzenscheider stammen bereits aus dem Jahr 1968. Ein für die Aufbereitungstechnik nützlicher Apparat wurde daraus aber erst, als Seltenerdmetallwerkstoffe eingesetzt wurden. Anfänglich wurden SmCo-Permanentmagnete verwendet, die jedoch schnell durch NdFeB-Permanentmagnete ersetzt wurden (Michalowsky, 1995).

Das Magnetsystem besteht im Wesentlichen aus Permanentmagneten in Form von Scheiben oder Ringen. Dazwischen werden Scheiben aus einem weichmagnetischen Stahl angeordnet, dies sind die sogenannten Flussleitscheiben. Die Scheiben werden in abwechselnder Reihenfolge aneinandergereiht und bilden somit eine Rolle bzw. Walze. Die benachbarten, axial magnetisierten Magnetscheiben sind einander mit der gleichen Polarität zugewandt. Daraus resultiert, dass die Polarität entlang der Achse der Walze wechselt und sich gleichmäßig entlang des Umfangs der Walze verhält. Die dazwischen angeordneten Flussleitscheiben haben die gleiche Aufgabe wie der Eisenkern einer Spule, sie verstärken das Magnetfeld. Dadurch können auf der Oberfläche der Walze sehr hohe Flussdichten erzeugt werden (ebd.).

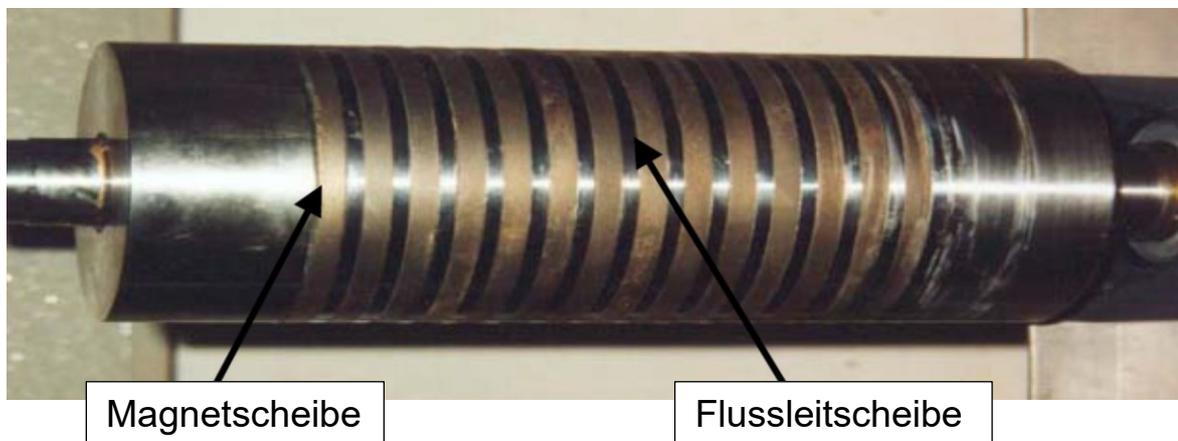


Abbildung 3.16 Aufbau einer Magnetwalze mit axialer Magnetisierung (Michalowsky, 1995)

Die Ausbildung des magnetischen Flusses hängt stark von den geometrischen Verhältnissen der Magnet- und Stahlscheiben ab. Dünne Magnet- und Stahlscheiben erzeugen im Allgemeinen ein sehr starkes Feld mit hoher Flussdichte an der Oberfläche der Walze. Mit dickeren Stahlscheiben kann eine größere Reichweite der Magnetkraft erzielt werden. Ein übliches Verhältnis der Breite des Magneten zur Stahlscheibe beträgt 4:1, wobei die richtige Wahl des Dickenverhältnisses hauptsächlich von den

magnetischen Eigenschaften und der Partikelgrößenverteilung der Aufgabe abhängt (Michalowsky, 1995).

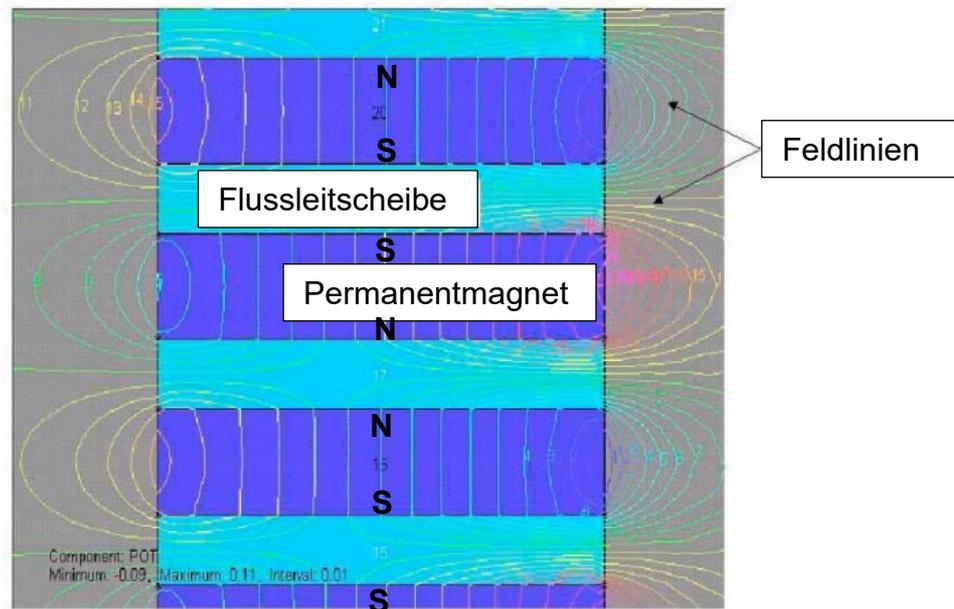


Abbildung 3.17 Schematische Darstellung des magnetischen Flusses am Magnetsystem eines Magnetbandwalzenscheiders mit axialer Magnetisierung (Michalowsky, 1995)

Abbildung 3.17 stellt den Feldlinienverlauf des magnetischen Flusses eines Magnetbandwalzenscheiders schematisch dar. Die Abnahme der Flussdichte mit zunehmendem Abstand zur Walzenoberfläche ist durch den höheren Abstand der Feldlinien zueinander klar ersichtlich (ebd.)

Beim Magnetbandwalzenscheider wird ein Band zwischen der angetriebenen Magnetwalze und einer Umlenkrolle gespannt. Auf diesem Band wird das Aufgabegut in einer Monokornschicht aufgegeben und Richtung Magnetwalze transportiert. Für eine hohe Kraftwirkung auf die magnetisierbaren Partikel, muss das Band möglichst dünn sein, sodass der Abstand zwischen Magnetwalze und Aufgabematerial so klein wie möglich wird. Magnetische Partikel werden beim Passieren der Magnetwalze von dieser angezogen und dadurch von ihrer natürlichen Flugbahn abgelenkt. Im Austragsbereich befindet sich ein Trichter mit einer Trennschneide. Diese wird so positioniert, dass der ausgetragene Produktstrom in zwei Produkte geteilt wird – ein Magnetprodukt (MP) und ein unmagnetisches Produkt (UMP) (Michalowsky, 1995).

Der gebräuchlichste Durchmesser der Rolle betrug früher 72 oder 76 mm, mittlerweile sind Rollen mit einem Durchmesser von 100 und 300 mm von mehreren Herstellern erhältlich. Größere Rollen werden eher durch Magnetsegmente als durch Ringe aufgebaut. Mit zunehmendem Rollendurchmesser nehmen die Verweilzeit von Partikeln im Magnetfeld, die Feldtiefe und die Abscheideleistung zu. Alternativ könnte durch Erhöhen der Rotationsgeschwindigkeit zur Aufrechterhaltung der gleichen Verweilzeit wie bei einer kleineren Walze ein höherer Durchsatz bei der Walze mit einem größeren Durchmesser erzielt werden. Für Anwendungen im Produktionsmaßstab beträgt die Breite der Magnetzone der Rolle entweder 1.000 oder 1.500 mm, obwohl für Anwendungen im kleineren Maßstab Rollen mit einer Breite von 250 und 500 mm verfügbar sind. Der Durchsatz von Magnetbandwalzenscheidern wird von vielen Faktoren beeinflusst, darunter Partikelgröße, Partikeldichte, Anteil der magnetisierbaren Partikel in der Aufgabe und die gewünschte Qualität des Endprodukts. Als Richtlinie kann ein Durchsatz von 2 bis 6 t/h/m im Korngrößenbereich kleiner 2 mm erreicht werden, während gröbere Kornfraktionen mit einem Durchsatz von bis zu 15 t/h/m verarbeitet werden können. Durch den modularen Aufbau können mehrere Scheider hintereinander zu einer kompakten Einheit zusammengefasst werden – dann spricht man von einer mehrstufigen Anordnung (ebd.).

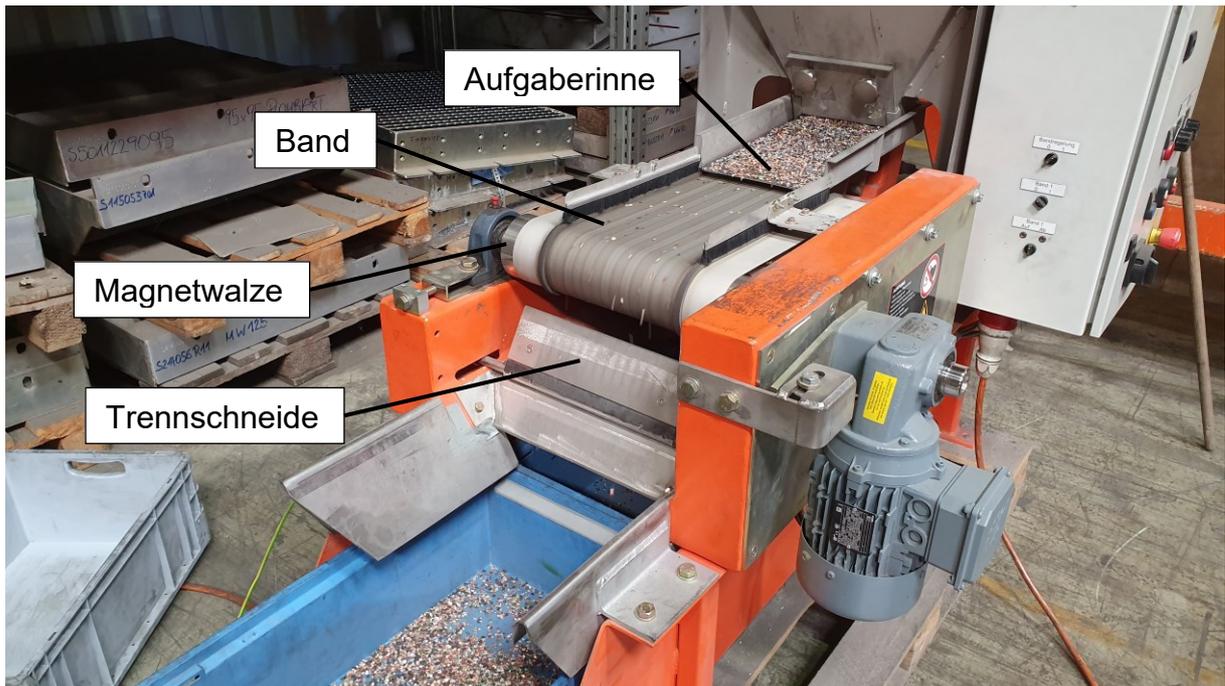


Abbildung 3.18 Aufbau eines Magnetbandwalzenscheiders der Firma IFE Aufbereitungstechnik vom Typ KP (versuchstechnischer Maßstab)

Eine Herausforderung bei dieser Bauart von Magnetscheidern stellt die Bandspannung und -führung dar. Dies geschieht in der Regel über eine verstellbare Umlenkrolle, entweder mechanisch oder durch eine elektronische Regelung. In modernen Anlagen wird nur noch eine automatische Regelung eingesetzt.

Permanente Magnetbandwalzenscheider besitzen jedoch zahlreiche Vorteile wie einen geringen Energieverbrauch, eine geringere Masse und Stellfläche. Das offene Magnetsystem (kein Luftspalt) ermöglicht die Behandlung gröberer Partikel als bei elektrischen Magnetsystemen. Während Permanent-Magnetbandwalzenscheider überwiegend im trockenen Betrieb eingesetzt werden, gibt es zum Beispiel auch Nassanlagen zur Aufkonzentrierung von Diamanten (Michalowsky, 1995).

4. Hallsonden-Positioniersystem

Die Messung der Flussdichte in definierten Abständen zur Oberfläche an Magnettrommeln und Rotoren von Wirbelstromscheidern ermöglichen einen Vergleich von Magnetsystemen unterschiedlicher Hersteller. Die gemessenen Wertepaare aus Abstand und Flussdichte lassen sich graphisch darstellen. Dieses Diagramm gibt Rückschlüsse über die Abnahme der Flussdichte radial zur Oberfläche des Magnetsystems (Abnahme der Flussdichte mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche).

Die Charakterisierung des neuen Magnetsystems und der anschließende Vergleich mit bestehenden Magnetsystemen spielt für diese Arbeit eine zentrale Rolle. Um dabei Messfehler auszuschließen, ist eine sehr exakte und reproduzierbare Führung der Hallsonde zwingend notwendig. Aus diesem Grund wurde zuerst ein entsprechendes Positioniersystem entwickelt.

4.1 Anforderungen an das Positioniersystem

Um in einem exakten Abstand zur Oberfläche die Flussdichte mit einer Hallsonde zu messen, können der Einfachheit halber auch Abstandshalter mit definierter Dicke aus diamagnetischen Stoffen (z.B. Holz oder Polyethylen) verwendet werden. Bis jetzt wurde diese Methode auch verwendet, um bestehende Magnetsysteme zu vermessen. Der entscheidende Nachteil liegt in der Führung der Messsonde durch Menschenhand. Nicht nur der Abstand zur Oberfläche ist für die Messung wichtig, sondern auch die exakt radiale Führung der Hallsonde. Zeigt die Längsachse der Hallsonde bei der Messung nicht Richtung Mittelpunkt des Magnetsystems (Abbildung 9), durchsetzt die radiale Komponente der Flussdichte das Hallplättchen nicht mehr normal zur Oberfläche des Sensors. Dadurch wird fälschlicherweise ein geringerer Messwert angezeigt, was zu nicht vergleichbaren Messwerten führt.

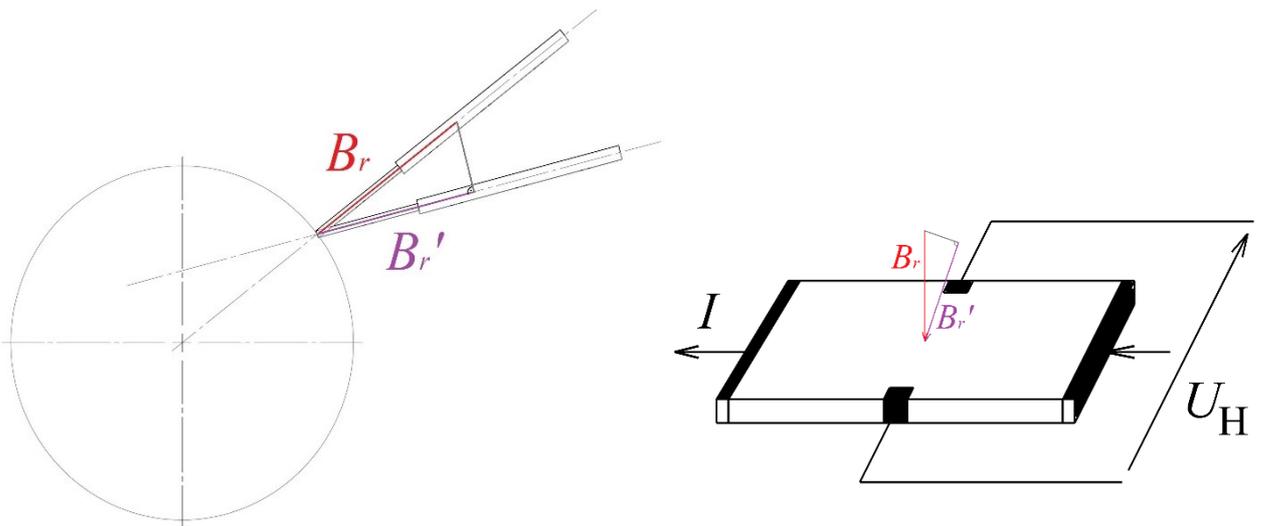


Abbildung 4.1 Auswirkung bei falscher Winkel-Positionierung der Hallsonde (links) und Abweichung der gemessenen Komponente B_r' des Hallensors (rechts) von der tatsächlichen radialen Flussdichtekomponente B_r .

Eine Positioniereinrichtung muss nun so gestaltet werden, dass die Hallsonde immer in Richtung Mittelpunkt des Magnetsystems zeigt. Außerdem soll die Abstandspostionierung durch eine digitale Messung ähnlich wie bei einem Messschieber ausgeführt werden. Die Vorrichtung darf das Magnetfeld nicht beeinflussen und sollte daher möglichst aus diamagnetischen Stoffen gefertigt sein.

4.2 Konzept und Komponenten

Um den Einfluss der Komponenten auf das Magnetfeld so gering wie möglich zu halten und dennoch eine stabile Konstruktion zu realisieren, wurde für sämtliche Bauteile (bei denen es möglich war) der Werkstoff 1.4301 (X5CrNi18-10) verwendet. Dieser weist laut Datenblatt eine relative Permeabilität von 1,075 auf und beeinflusst somit das Magnetfeld kaum. Es wäre theoretisch möglich gewesen, auch Kunststoffe einzusetzen. Diese erfüllen jedoch nicht die geforderten mechanischen Eigenschaften, besonders hinsichtlich Langzeiteinsatz der Vorrichtung im Feld.

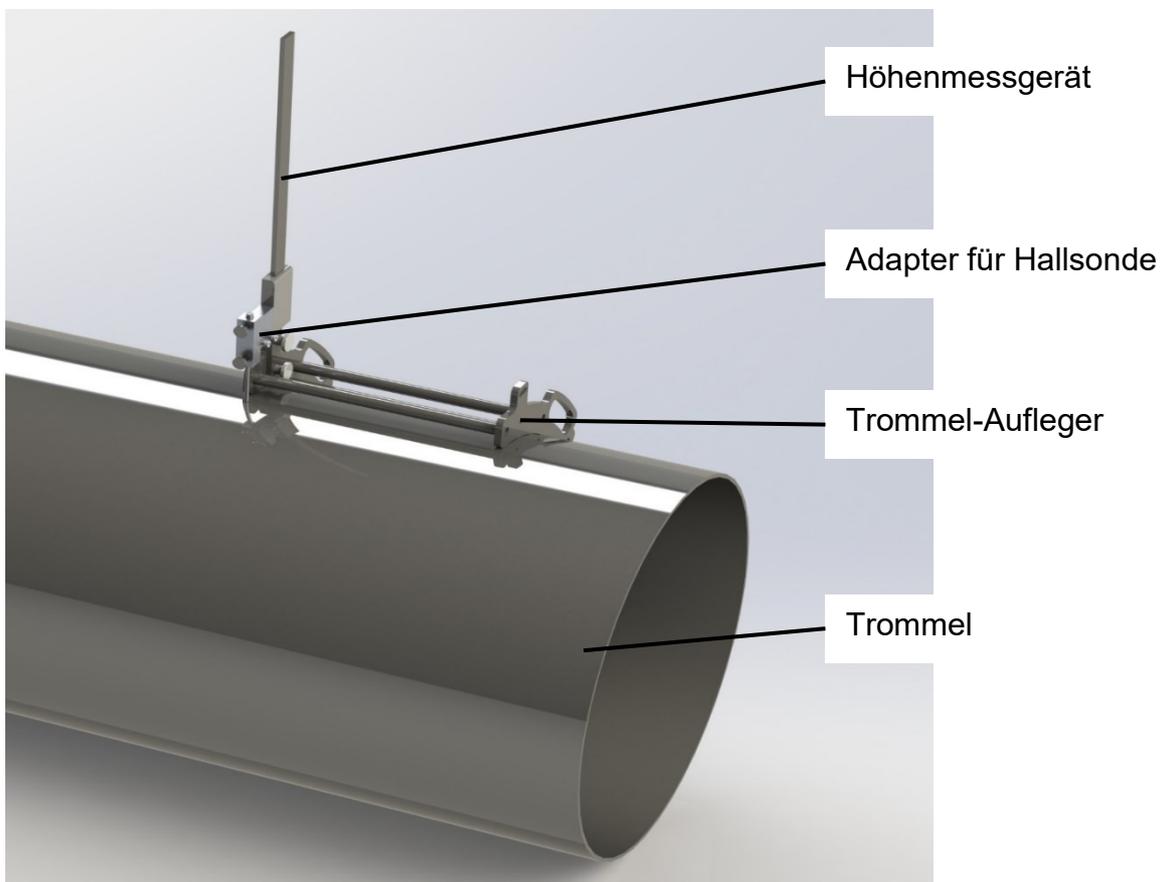


Abbildung 4.2 Zusammenstellungszeichnung der Messvorrichtung

An den Trommel-Aufleger, bestehend aus lasergeschnittenen Blechen und Verbindungsstreben, wird das Höhenmessgerät durch eine Rändel-Schraubverbindung montiert. Die Hallsonde wird mittels eines eigens angefertigten Adapters am Höhenmessgerät befestigt. Die radiale Lage der Messsonde kann durch Lockern der Rändelschrauben genau eingestellt und danach geklemmt werden.

Für die Abstandpositionierung und Führung der Hallsonde wird ein digitales Anreiß- und Höhenmessgerät der Marke WABECO verwendet. Mit dieser Messeinrichtung kann der Abstand der Messsonde zur Trommeloberfläche auf zehntel (theoretisch hundertstel) Millimeter genau justiert werden. Der große Vorteil liegt nun darin, dass die Abstände der Messreihe im Vorfeld definiert und auch reproduzierbar eingestellt werden können. Dadurch können Messergebnisse schnell und einfach verglichen werden. Um die Hallsonde am Höhenmesser zu befestigen, wurde ein Adapter konstruiert und gefertigt. Eine Schnittansicht des Adapters ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Die Hallsonde selbst wird mittels Rändelschrauben in der Adapterbohrung geklemmt.

Der Trommel-Aufleger wurde in drei unterschiedlichen Varianten gefertigt. Zwei Varianten entsprechen jener Form wie sie in Abbildung 10 zu sehen ist. Diese beiden Varianten unterscheiden sich lediglich im Radius der Aufleger-Bleche. Damit können sowohl IFE Wirbelstromscheider ($r = 325\text{mm}$) als auch IFE Magnettrommeln ($r = 250\text{ mm}$) vermessen werden. Die dritte Variante wurde als rechtwinkeliges Winkelprofil ausgeführt. Das Höhenmessgerät wird dabei so angebracht, dass die Längsachse der Hallsonde die Symmetrielinie des rechten Winkels bildet, und somit genau radial zur Trommel steht. Dieser Trommel-Aufleger kann für Magnetbandwalzenscheider mit unterschiedlichen Walzendurchmessern verwendet werden.

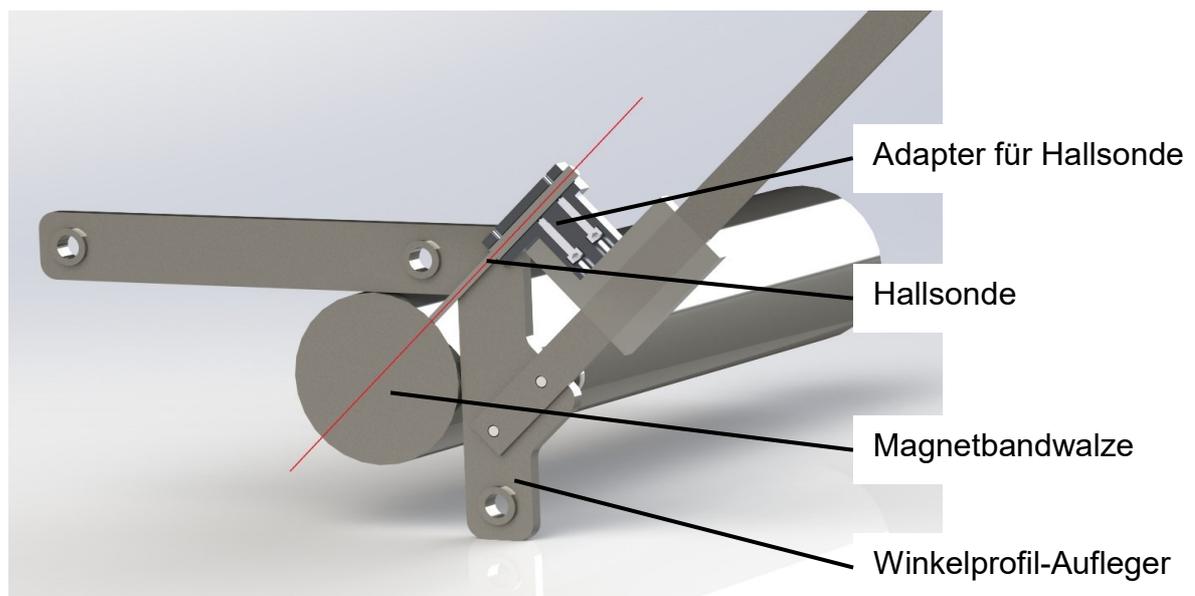


Abbildung 4.3 Schnittansicht der Positioniereinrichtung mit dem Winkelprofil-Aufleger für Magnetbandwalzenscheider. Die rote Linie beschreibt die radiale Ausrichtung der Hallsonde zur Magnetwalze.

4.3 Anwendung des Positioniersystems

An den für die Anwendung entsprechenden Trommel-Aufleger wird das Höhenmessgerät samt Hallsondeneinheit montiert. Die Hallsonde selbst wird durch die Bohrung im Adapter durchgeführt und mit Rändelschrauben geklemmt. Danach kann die Positioniereinrichtung auf die Magnettrommel aufgesetzt werden.

Für die erste Anwendung muss die radiale Winkellage des Sensors eingestellt werden. Dafür werden die Rändelschrauben, mit welchen das Höhenmessgerät an den Trommel-Aufleger montiert wurde, gelockert - die Winkellage der Hallsonde zur Trommeloberfläche lässt sich dadurch verändern. Diese wird so eingestellt, dass die Längsachse der Hallsonde radial zur Trommellängsachse steht, also diese schneidet. Dafür kann beispielsweise ein Linienlaser behilflich sein. Abbildung 4.4 zeigt das erstmalige Einrichten der Winkellage des Messsystems mittels Linienlaser. Danach wird das Höhenmessgerät mit den Rändelschrauben an den Trommel-Aufleger geklemmt. Es empfiehlt sich, die Winkelposition des Höhenmessgerätes zum Trommel-Aufleger zu markieren. Sollte sich die Klemmung lösen, kann die Winkellage ohne aufwendiges Einrichten wiederhergestellt werden.

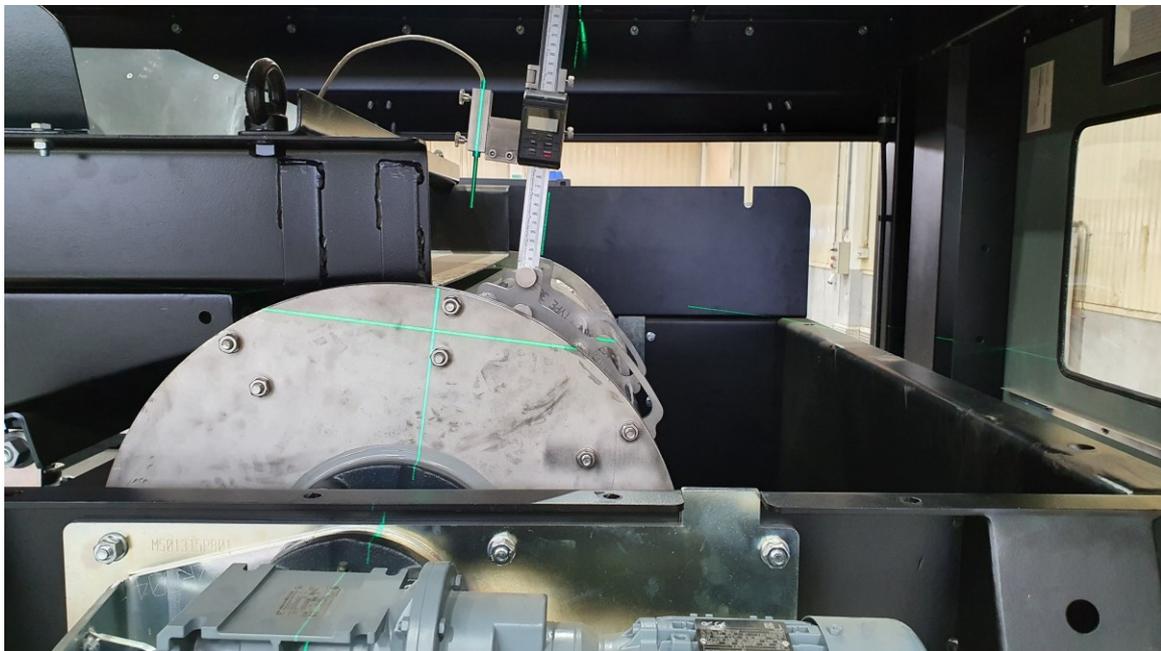


Abbildung 4.4 Einrichten der Winkellage des Messsystems mit einem Linienlaser

Für die Messung selbst wird das Positioniersystem samt Hallsonde auf der Trommel aufgesetzt. Die Vorrichtung wird so positioniert, dass die Hallsonde einen Maximalwert anzeigt. Es handelt sich dabei um einen sogenannten ausgezeichneten Punkt, an dem der Feldstärkevektor lediglich eine Komponente mit Kraftwirkung radial zur Trommeloberfläche aufweist.

Nun werden Flussdichtewerte zusammen mit dem zugehörigen Abstandswert zur Oberfläche abgelesen und tabelliert eingetragen. Diese Wertepaare ergeben annähernd eine Exponentialfunktion und dienen als Vergleichsparametern mit anderen Magnetscheidern.

5. Das optimierte Magnetsystem

Fortschritte bei der Verfügbarkeit und Erschwinglichkeit von Seltenerd-Permanentmagneten haben zur Entwicklung und Konstruktion leistungsstarker Hochleistungs-Trommelmagnetscheider geführt, indem Standardferritmagnete durch NdFeB-Permanentmagnete ersetzt werden. Nahezu alle aktuellen Lieferanten von solchen Hochleistungs-Trommelmagnetscheidern halten sich an diese herkömmliche Designphilosophie.

5.1 Verbesserungspotential

Nicht nur der Maximalwert der Flussdichte an der Oberfläche des Magnetsystems, sondern vor allem die Abnahme der Flussdichte über den Radial-/Normalabstand bestimmen die Kraftwirkung des Scheiders und den Einfluss der Korngröße auf die Trennwirkung. (Böhm, (2009))

Es gibt zwei Möglichkeiten, diese Kraftwirkung eines Magnetsystems zu erhöhen:

- Magnetwerkstoffe mit höherem Energieprodukt
- Erhöhung des Magnetwerkstoffvolumens

Das Energieprodukt ist proportional zur Menge an Energie pro Volumeneinheit in einem Magneten. Für Dauermagnetwerkstoffe ist dieser Wert aus physikalischer Sicht beschränkt. Die zurzeit stärksten am Markt erhältlichen Dauermagnetwerkstoffe sind NdFeB-Legierungen mit einem Energieprodukt von etwa 390kJ/m^3 (N50H). Wobei es auch Magnetwerkstoffe mit bis zu 430 kJ/m^3 gibt, welche aber aus wirtschaftlicher Sicht für die Industrie noch nicht interessant sind. Zusätzlich weisen diese Magnetwerkstoffe auch eine geringere Einsatztemperatur auf, was gerade bei so starken Magneten aufgrund von Wärmeentwicklung durch Wirbelströme problematisch sein kann.

Auch das Volumen des Permanentmagneten ist auf Grund der Geometrie und Baugröße konstruktiv beschränkt. Hier gibt es aber besonders hinsichtlich der geometrischen Form der Magnete noch viel Verbesserungspotential.

Ziel ist es, das Magnetsystem nun so zu optimieren, dass eine hohe Kraftwirkung welche möglichst tief in den Trennraum eindringt, entsteht. Das bedeutet, dass auch Partikel mit geringer Suszeptibilität und großer Korngröße mit ausreichender Kraftwirkung vom Magnetsystem angezogen werden. Dafür müssen die oben genannten Möglichkeiten in einem sinnvollen Maß ausgereizt werden.

5.2 Beschreibung des Magnetsystems

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Bauart eines Magnetsystems zwischen radialer und axialer Magnetisierung. Für Trommelscheider wird fast ausschließlich das radial magnetisierte Magnetsystem mit Wechsellpolanordnung eingesetzt. Auch das optimierte Magnetsystem weist eine radiale Magnetisierung mit Wechsellpolanordnung auf. Das bedeutet, dass die Magnete abwechselnd gegenpolig axial am Umfang des Magnetsystems angeordnet werden (siehe Abbildung 3.14 bzw. Abbildung 5.1).

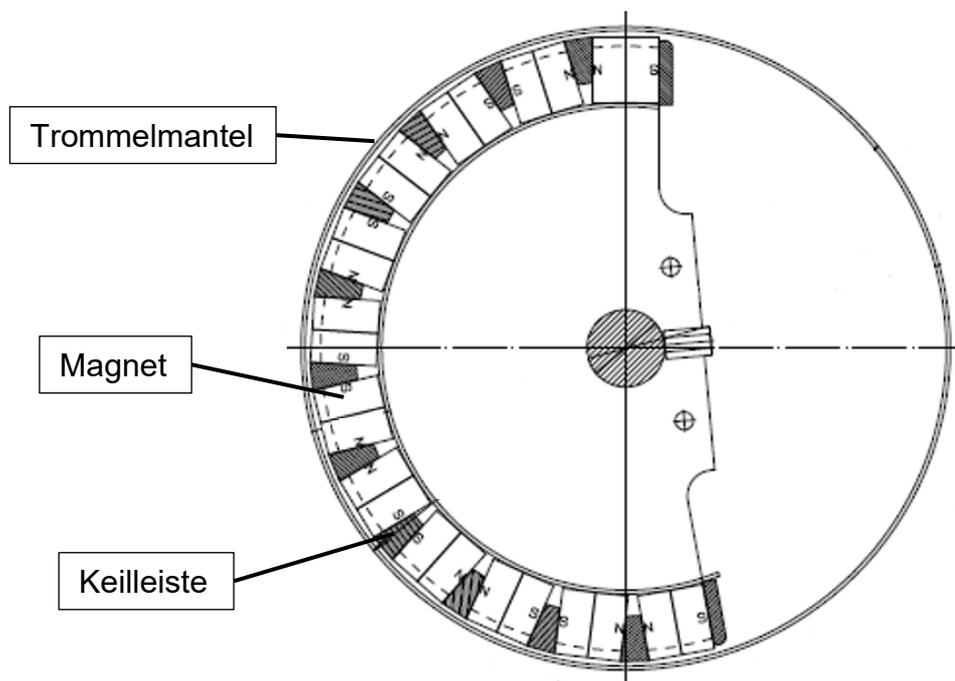


Abbildung 5.1 Skizze des Magnetscheiders vom Typ HPG der IFE Aufbereitungstechnik GmbH

Der Aufbau des neuen Magnetsystems entspricht in etwa dem eines bereits am Markt verfügbaren Modells. Abbildung 5.1 zeigt dieses Magnetsystem vom Typ HPG der IFE Aufbereitungstechnik GmbH. Beim optimierten Magnetsystem werden statt den Ferritmagneten, nunmehr Seltenerdminerale auf FeNdB-Basis mit einer Güte von N50H verwendet. Diese weisen ein etwa 14-mal höheres Energieprodukt auf als die Ferritmagnete. Wobei hier angemerkt werden muss, dass der Einsatz stärkerer Permanentminerale bei Trommelscheidern keine große Neuerung darstellt. Jedoch findet man in der Industrie kaum Seltenerdminerale mit solch einer hohen Güte.

Optimiert wurde auch die Geometrie von Keilleiste und Magnet. Dabei wurde darauf geachtet, das Volumen des Magneten möglichst groß auszubilden aber gleichzeitig

einen sicheren Halt der Magnete zu gewährleisten. Zusätzlich konnte durch die Optimierung auch noch eine Erleichterung bei der Montage des Magnetsystems erreicht werden. Details zur Geometrie dürfen aus Geheimhaltungsgründen aber nicht publiziert werden, sind aber auch nicht zentraler Gegenstand dieser Arbeit.

5.3 Problematik mit Wirbelströmen

Die Erzeugung von Wirbelströmen im rotierenden Mantel stellt bei so hohen Feldstärken wie beim optimierten Magnetsystem ein Problem dar. Diese Wirbelströme haben einerseits eine bremsende Wirkung, andererseits erzeugen diese zusätzlich noch Wärme. Faktoren, welche die Erzeugung von Wirbelströmen beeinflussen sind:

- Magnetische Feldstärke
- Anzahl der Magnetpole
- Rotationsgeschwindigkeit
- Dicke des Trommelmantels
- Elektrische Leitfähigkeit des Trommelmantels

Die Minimierung dieser Wirbelströme kann werkstofftechnisch oder theoretisch auch konstruktiv erzielt werden. Die Drehzahl der Trommel lässt sich zwar beeinflussen, sollte aber aus prozesstechnischer Sicht nicht reglementiert werden. Ähnliches gilt für die Anzahl der Magnetpole, diese ergibt sich aus der Optimierung des Magnetsystems. Würde man für die Trommel einen Werkstoff einsetzen, welcher keine elektrische Leitfähigkeit besitzt, könnte diese Problematik völlig eliminiert werden. Es findet sich jedoch kein nichtleitender Werkstoff mit ausreichender Verschleißfestigkeit, der technisch wirtschaftlich zu einem Trommelmantel verarbeitbar ist. Somit muss für den Trommelmantel ein metallischer Werkstoff verwendet werden. Sinnvoll ist es, einen metallischen Werkstoff mit möglichst geringer elektrischer Leitfähigkeit einzusetzen. Selbstverständlich muss der Trommelmantel auch eine möglichst geringe Suszeptibilität aufweisen, um das Magnetfeld des Magnetsystems nicht zu beeinflussen.

Standardmäßig wird der Trommelmantel bei IFE aus dem rostbeständigen Stahl X5CrNi18-10 (1.4301) gefertigt. Auch die Trommel des neuen Magnetscheiders wurde aus diesem Werkstoff gefertigt. Erste Tests zeigen aber eine enorme Bremswirkung aufgrund der erzeugten Wirbelströme, sodass sich die Trommel mit der Hand nur mit

sehr hohem Kraftaufwand bewegen lässt. Aus diesem Grund wird der rostbeständige Stahl X15CrNiSi25-21 (1.4841) als Werkstoff eingesetzt. Dieser weist eine weit geringere elektrische Leitfähigkeit auf und zusätzlich noch günstigere magnetische Eigenschaften.

Werkstoffbezeichnung	Werkstoffnummer	Elektrischer Widerstand bei 20°C in ($\Omega \text{ mm}^2$)/m
X5CrNi18-10	1.4301	0,73
X15CrNiSi25-21	1.4841	0,9

Tabelle 5.1 Elektrischer Widerstand für Trommelwerkstoffe

Der elektrische Widerstand der beiden Werkstoffe ist in Tabelle 5.1 zu finden und ist Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit, dementsprechend muss er möglichst hoch sein. Datenblätter zu den beiden Werkstoffen befinden sich im Anhang.

Die bremsende Wirkung aufgrund der Wirbelströme wird durch den verbesserten Werkstoff so weit verringert, dass ein Betrieb des Magnetscheiders möglich wird. Trotzdem treten weiterhin Wirbelströme auf, die eine Erwärmung der Trommel verursachen und aufgrund von Wärmeübertragung auch das Magnetsystem erwärmen.

Für Standard NdFeB-Magnete wird eine maximale Einsatztemperatur von 80 °C empfohlen. Diese Temperatur könnte im Dauerbetrieb erreicht oder gar überschritten werden. Erste Tests im mehrstündigen Betrieb haben eine konstante Temperatur von 60 °C an der Trommeloberfläche verursacht. Wie die Temperaturverhältnisse im Inneren der Trommel, aber vor allem am Magnetsystem sind, kann nur abgeschätzt werden. Positiven Einfluss hat der Luftspalt zwischen Magnetsystem und Trommel, dadurch kann keine direkte Wärmeleitung stattfinden. Um sicher zu gehen, dass keine entmagnetisierenden Vorgänge am Magnetsystem stattfinden, werden temperaturunempfindlichere Magnete mit der Güte N50H (bzw. H50) eingesetzt. Diese weisen eine maximale Einsatztemperatur von 120 °C auf.

5.4 Flussdichtemessung am optimierten Magnetsystem

Die Aufzeichnung der Abnahme der Flussdichte mit zunehmenden Radialabstand zur Oberfläche ist ein zentrales Thema dieser Arbeit. Dafür wird die Messvorrichtung aus Abschnitt 5 verwendet. Diese Vorrichtung erlaubt die Messung der Flussdichte mit zunehmenden Radialabstand bei exakter radialer Führung. Der Radialabstand kann dabei in zehntel Millimeter (theoretisch hundertstel Millimeter) Schritten verändert werden.

Es wurde ein Feldstärkemessgerät aus dem Hause Magnet-Physik vom Typ FH54 und eine axiale Hallsonde vom Typ HS-AGB5-4805 verwendet (Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2 Messaufbau – Abnahme der Flussdichte radial zur Trommeloberfläche

Die Messung wurde an sogenannten ausgezeichneten Punkten durchgeführt. Diese Punkte zeichnen sich dadurch aus, dass der Flussdichtevektor in diesem Punkt nur eine radiale Komponente aufweist. Diese durchsetzt das Hallplättchen der Messsonde, bei radialer Sondenführung, normal und das Feldstärkemessgerät zeigt dann ein Maximum an. Es wurde zuerst der maximale Flussdichtewert an der Oberfläche gemessen und aufgezeichnet und dann der Abstand schrittweise erhöht und dabei der zugehörige Flussdichtewert aufgezeichnet.

Dies wurde ebenfalls am Magnetbandwalzenscheider vom Typ IFE KP mit der entsprechenden Messvorrichtung und dem gleichen Feldstärkemessgerät durchgeführt. Im Sinne einer einfachen und effizienten Vergleichbarkeit wurden dieselben Messabstände verwendet.

Tabelle 5.2 zeigt die Messergebnisse an einem ausgezeichneten Punkt sowohl vom optimierten als auch vom Magnetsystem vom Typ IFE KP:

Abstand [mm]	Flussdichte [T]		Faktor
	optimiertes Magnetsystem	IFE KP	
0,3	1,007	1,170	0,86
0,4	0,999	1,135	0,88
0,5	0,990	1,092	0,91
0,6	0,982	1,057	0,93
0,7	0,974	1,018	0,96
0,8	0,966	0,985	0,98
0,9	0,957	0,951	1,01
1,0	0,949	0,922	1,03
1,1	0,942	0,894	1,05
1,2	0,934	0,867	1,08
1,3	0,926	0,843	1,10
1,4	0,919	0,817	1,12
1,5	0,911	0,793	1,15
1,6	0,904	0,769	1,18
1,7	0,896	0,750	1,19
1,8	0,889	0,730	1,22
1,9	0,881	0,712	1,24
2,0	0,874	0,693	1,26
2,1	0,868	0,674	1,29
2,2	0,860	0,657	1,31
2,3	0,853	0,640	1,33
2,4	0,847	0,625	1,36
2,5	0,840	0,621	1,35
2,6	0,833	0,593	1,40
2,7	0,827	0,580	1,43
2,8	0,820	0,566	1,45
2,9	0,814	0,552	1,47
3,0	0,808	0,538	1,50
3,1	0,802	0,527	1,52
3,2	0,796	0,513	1,55
3,3	0,790	0,503	1,57
3,4	0,783	0,491	1,59
3,5	0,777	0,480	1,62
3,6	0,772	0,469	1,65
3,7	0,766	0,459	1,67
3,8	0,760	0,449	1,69
3,9	0,755	0,439	1,72
4,0	0,749	0,420	1,78

Abstand [mm]	Flussdichte [T]		Faktor
	optimiertes Magnetsystem	IFE KP	
4,1	0,744	0,410	1,81
4,2	0,738	0,400	1,85
4,3	0,733	0,392	1,87
4,4	0,727	0,384	1,89
4,5	0,722	0,376	1,92
4,6	0,717	0,368	1,95
4,7	0,711	0,360	1,98
4,8	0,706	0,353	2,00
4,9	0,701	0,345	2,03
5,0	0,696	0,338	2,06
5,1	0,691	0,331	2,09
5,2	0,686	0,323	2,12
5,3	0,682	0,317	2,15
5,4	0,677	0,311	2,18
5,5	0,672	0,304	2,21
5,6	0,667	0,298	2,24
5,7	0,663	0,292	2,27
5,8	0,658	0,286	2,30
5,9	0,654	0,280	2,34
6,0	0,649	0,274	2,37
6,1	0,645	0,269	2,40
6,2	0,640	0,263	2,43
6,3	0,636	0,258	2,47
6,4	0,632	0,253	2,50
6,5	0,627	0,247	2,54
6,6	0,623	0,243	2,56
6,7	0,619	0,238	2,60
6,8	0,615	0,233	2,64
6,9	0,610	0,229	2,66
7,0	0,606	0,224	2,71
7,1	0,602	0,219	2,75
7,2	0,598	0,215	2,78
10,1	0,500	0,120	4,17
14,0	0,400	0,057	7,02
19,5	0,300	0,022	13,6
28,4	0,200	0,006	33,3
46,1	0,100	0,001	100
140,3	0,010	0	-

Tabelle 5.2 Messergebnisse der Flussdichtemessung beider Magnetsysteme

Die Messwerte starten bei 0,3 mm, da das Hallplättchen in der Sonde nicht ganz an der Oberfläche sitzt sondern aus konstruktiven Gründen etwas weiter innen verbaut ist. Überträgt man die Messergebnisse in ein Diagramm (Abbildung 5.3), lässt sich schnell eine Gesetzmäßigkeit zwischen Flussdichte und Radialabstand erkennen. Diese folgt näherungsweise einer Exponentialfunktion.

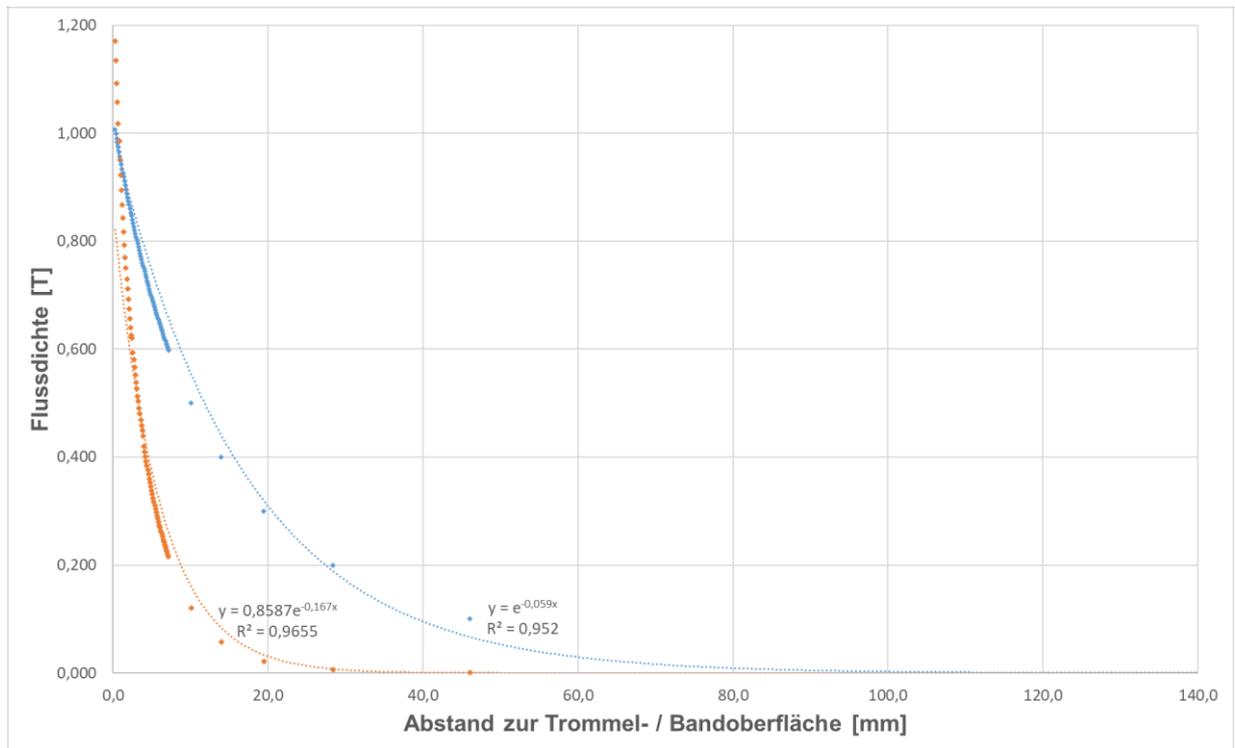


Abbildung 5.3 Verlauf der Flussdichte mit zunehmendem Abstand zur Trommel- bzw. Bandoberfläche

Abbildung 5.3 stellt den Unterschied hinsichtlich des Gradienten des Magnetfeldes beider Magnetsysteme sehr anschaulich dar. Die maximale Flussdichte an der Bandoberfläche beim Typ IFE KP ist etwas höher als an der Trommeloberfläche des optimierten Systems. Bei einem Abstand von etwa 0,9 mm zur Trommeloberfläche liegen beide Magnetsysteme in einem ähnlichen Flussdichtebereich. Bei einem Abstand von etwa 3 mm ist die Flussdichte des optimierten Systems bereits um 50 % höher, bei 4,8 mm doppelt und bei etwa 10 mm schon viermal so hoch.

6. Probencharakterisierung und Prozessbeschreibung

Das verwendete Aufgabegut wurde einer bestehenden stationären Kabelschrott-Aufbereitungsanlage entnommen. In dieser Aufbereitungsanlage werden die Kabelschrotte zur Herstellung hinreichender Aufschlussverhältnisse zunächst dreistufig zerkleinert. In der ersten Stufe ($k_{\max} < 60$ mm) kommt ein 1-Wellen-Zerkleinerer der Marke UNTHA XR zum Einsatz. Mit zwei weiteren Zerkleinerungsapparaten der Firma ELDAN wird ein Granulat im Korngrößenbereich 0 bis 6 mm hergestellt. Danach wird mittels einer klugen Kombination aus Magnetscheidung, Dichtesortierung, Wirbelstromscheidung und optischer Sortierung in verschiedene Fraktionen sortiert.

Dabei fallen folgende Fraktionen an:

- Konzentrat aus Eisen bzw. Stahl
- Kunststoffgranulat (hauptsächlich PVC und PE)
- Kupferlitzen
- Edelstahlkonzentrat (schwachmagnetisch)
- Kupfergranulat (Millberry)
- Messingkonzentrat
- Mischfraktionen (werden zum Teil erneut aufgegeben)

Die Aufbereitungsanlage wird im Zweischichtbetrieb mit einem Durchsatz von etwa 2,5 bis 3 Tonnen pro Stunde betrieben.

6.1 Verfahrensstammbaum

Abbildung 6.1 illustriert den schematischen Aufbereitungsstammbaum jener Kabelschrott-Aufbereitungsanlage, aus welcher die Proben für die Versuche am neu entwickelten Magnetscheider stammen. Der Aufbereitungserfolg des Magnetbandwalzenscheiders soll mit den Ergebnissen der Versuche verglichen werden.



Abbildung 6.1 Schematischer Verfahrensstammbaum einer modernen Kabelschrott-Aufbereitungsanlage

6.2 Probenahme

Als Aufgabegut für die Versuchsreihen am neu entwickelten Magnetscheider wurden beide Produkte (Magnetprodukt MP / unmagnetisches Produkt UMP) des Magnetbandwalzenscheiders über einem Zeitraum von etwa vier Stunden parallel in einem Bigbag aufgefangen (Abbildung 6.2). Für eine erste Charakterisierung des Versuchsmaterials wurden dabei in unregelmäßigen Zeitabständen kleine Teilproben abgezogen, vereinigt und vermischt.



Abbildung 6.2 Probenahmestelle – Beprobung der Produkte am Magnetbandwalzenscheider

Die Menge und Massenverteilung der Produkte sind Tabelle 6.1 zu entnehmen:

	Masse [kg]	Masse [%]
Mischfraktion (UMP)	484,0	93,7
Messingfraktion (MP)	32,7	6,3
Aufgabe	516,7	100,0

Tabelle 6.1 Menge und Massenverteilung der Produkte des Magnetbandwalzenscheiders

6.3 Probencharakterisierung

Um genauere Erkenntnisse über das Aufgabegut für die Versuchsreihen zu erhalten, wurden die vereinigten Teilproben einer zweistufigen Merkmalsklassenanalyse unterzogen. Abbildung 6.3 zeigt das Aufgabegut des Magnetbandwalzenscheiders vom Typ IFE KP. Im Folgenden wird das Aufgabegut „Probe IFE KP“ genannt.



Abbildung 6.3 Aufgabegut Magnetbandwalzenscheider – Probe IFE KP

6.3.1 Siebanalyse

Die folgenden Bilder veranschaulichen die Ergebnisse der Siebanalyse mit den Maschenweiten 1 mm, 2 mm, 3,15 mm und 4 mm.

Eine Anreicherung des Kupfers im Feinkornbereich ist bereits mit dem freien Auge ersichtlich. Untermuert wird diese Behauptung durch die Dichte der Partikelgrößenklasse <1 mm, diese liegt sehr knapp an der Stoffdichte von reinem Kupfer. Die Kupferanreicherung im Feinkornbereich wird auch im bestehenden Prozess ausgenützt, indem eine Litzen-Fraktion abgesiebt wird. Man erkennt bei der Partikelgrößenklasse <1 mm auch, dass die entsprechende Siebung im Prozess gut funktioniert, da der Massenanteil dieser Fraktion sehr gering ist.

Im Allgemeinen nimmt die Dichte der Probe mit zunehmender Korngröße ab. Dies lässt sich auf den geringeren Kupferanteil in der jeweiligen Probe zurückführen, was wiederum auch mit freiem Auge ersichtlich ist.



IFE KP

<1 mm

m=0,51 %

$\rho= 7,36 \text{ g/cm}^3$



IFE KP

1-2 mm

m=17,18 %

$\rho=7,41 \text{ g/cm}^3$



IFE KP

2-3,15 mm

m=43,74 %

$\rho=3,72 \text{ g/cm}^3$

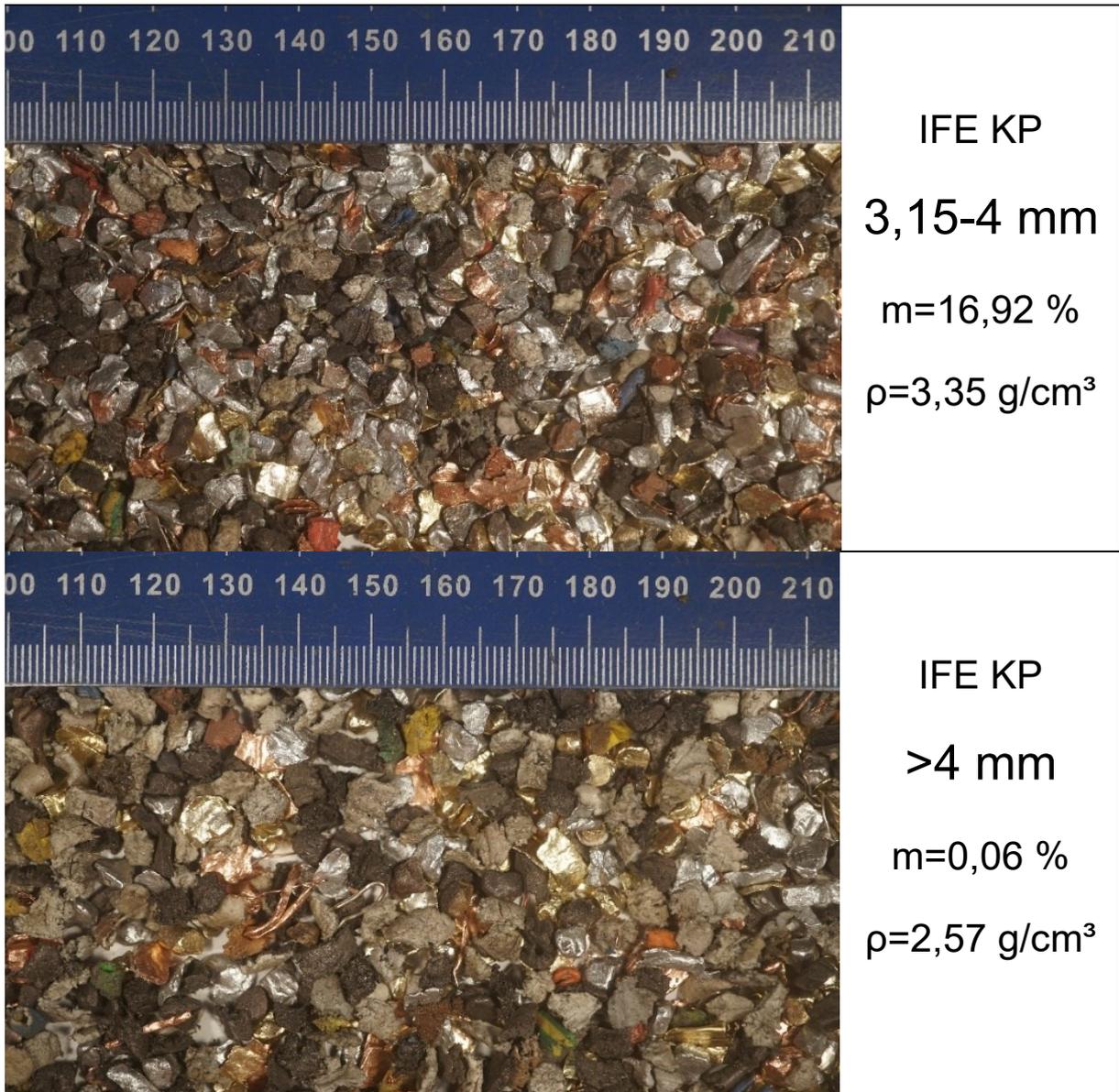


Abbildung 6.4 Ergebnisse der Siebanalyse des Aufgabegutes

Für die Probe IFE KP kann über die magnetischen Eigenschaften aus den gewonnenen Erkenntnissen der Siebanalyse noch nichts gesagt werden. Die Feststoffdichte in den Korngrößenklassen wurde aus den einzelnen Feststoffdichten der Flusssichteklassen aus 7.3.2 rückgerechnet.

Tabelle 6.2 und Abbildung 6.5 zeigen die Korngrößenverteilung der Probe IFE KP.

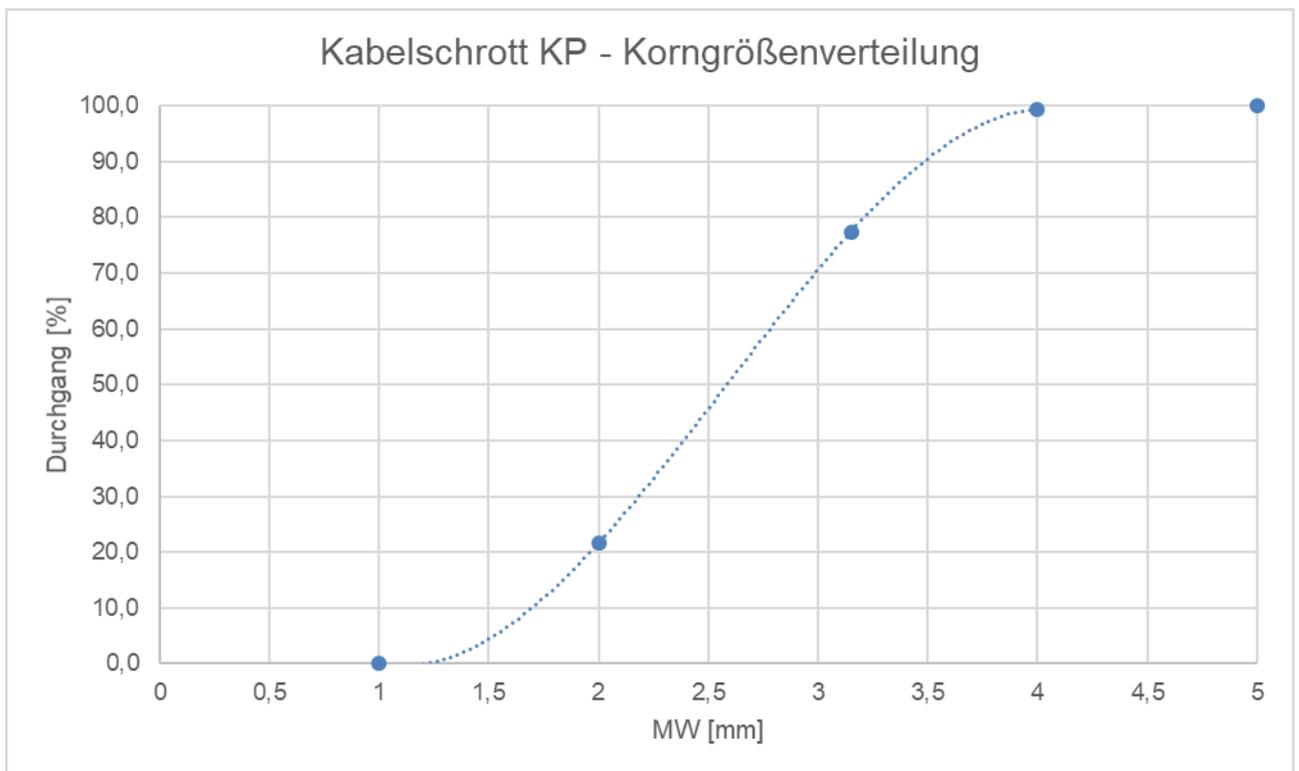


Abbildung 6.5 Korngrößenverteilung der Probe IFE KP

MW [mm]	Masse [%]	Σ Masse [%]
>4	0,65	0,65
4/3,15	21,91	22,56
3,15/2	55,79	78,35
2/1	21,58	99,93
<1	0,07	100,00

Tabelle 6.2 Korngrößenverteilung der der Probe IFE KP

6.3.2 Einteilung in Flusssichteklassen

Die Einteilung in Flusssichteklassen wurde mittels Handmagnet durchgeführt. Dabei wurden drei Magnete mit unterschiedlicher Maximalflusssichte an der Oberfläche verwendet.

Begonnen wurde mit dem Magneten, der 0,2 Tesla an der Oberfläche aufweist. Dieser wurde so lange über der verteilten Probe bewegt, bis keine Partikel mehr vom Magneten angehoben wurden. Alle ausgehobenen Partikel bilden die Flusssichteklasse $<0,2$ Tesla und sind damit als am stärksten magnetisierbar anzusehen.

Für die nächsten Schritte wurde ein Magnet mit 0,6 Tesla und ein Magnet mit 1,0 Tesla verwendet. Jeder Schritt ergab wiederum eine Fraktion (0,2-0,6 und 0,6-1,0 Tesla). Der Rückstand welcher von keinem Magneten angezogen wurde, wird mit $>1,0$ Tesla bezeichnet und ist damit am schwächsten magnetisierbar.

Dieser Vorgang wurde für jede Korngrößenklasse aus der Siebanalyse durchgeführt. Anschließend wurde bei den einzelnen Fraktionen mit einem Heliumpyknometer die Feststoffdichte des Körnergemisches bestimmt.



Abbildung 6.6 Einteilung in Flusssichteklassen mittels Aushebemagnet

MW mm	Masse m _j %	R %	D %	Flussdichteklassen										
				i = 1 B < 0,2T		i = 2 0,2T < B < 0,6T		i = 3 0,6T < B < 1,0T		i = 4 B > 1,0T		Summe		
				m _{ij} , %	ρ _{ij} , g/cm ³	m _{ij} , %	ρ _{ij} , g/cm ³	m _{ij} , %	ρ _{ij} , g/cm ³	m _{ij} , %	ρ _{ij} , g/cm ³	m _i , %	ρ _j , g/cm ³	
5	0,0	0,0	100											
4	0,6	0,6	99,4	0,01	6,28	0,07	7,86	0,04	8,52	0,53	2,24	0,65	2,57	
3,15	21,9	22,6	77,4	0,21	7,17	2,07	7,84	0,95	7,71	18,69	3,05	21,91	3,35	
2	55,8	78,3	21,7	0,40	7,58	3,06	7,92	1,42	7,24	50,91	3,54	55,79	3,72	
1	21,6	99,9	0,1	0,05	7,03	0,20	6,95	0,08	5,81	21,24	7,42	21,58	7,41	
0	0,1	100	0,0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,07	7,36	0,07	7,36	
Σ	100											100	4,04	

Tabelle 6.3 Unterteilung der Siebklassen in Flussdichteklassen mit zugehöriger Feststoffdichte

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Feststoffpartikeldichte im feineren Partikelgrößenbereich, höher liegt als im größeren.

7. Versuchsdurchführung

7.1 Probenvorbereitung

Um bei der Versuchsauswertung den Aufbereitungserfolg nicht nur über die Masseverteilung zu beurteilen, wurde auch der Gehalt an Wertstoffen, in diesem Fall V2A-, V4A- und Messingpartikel, ermittelt.

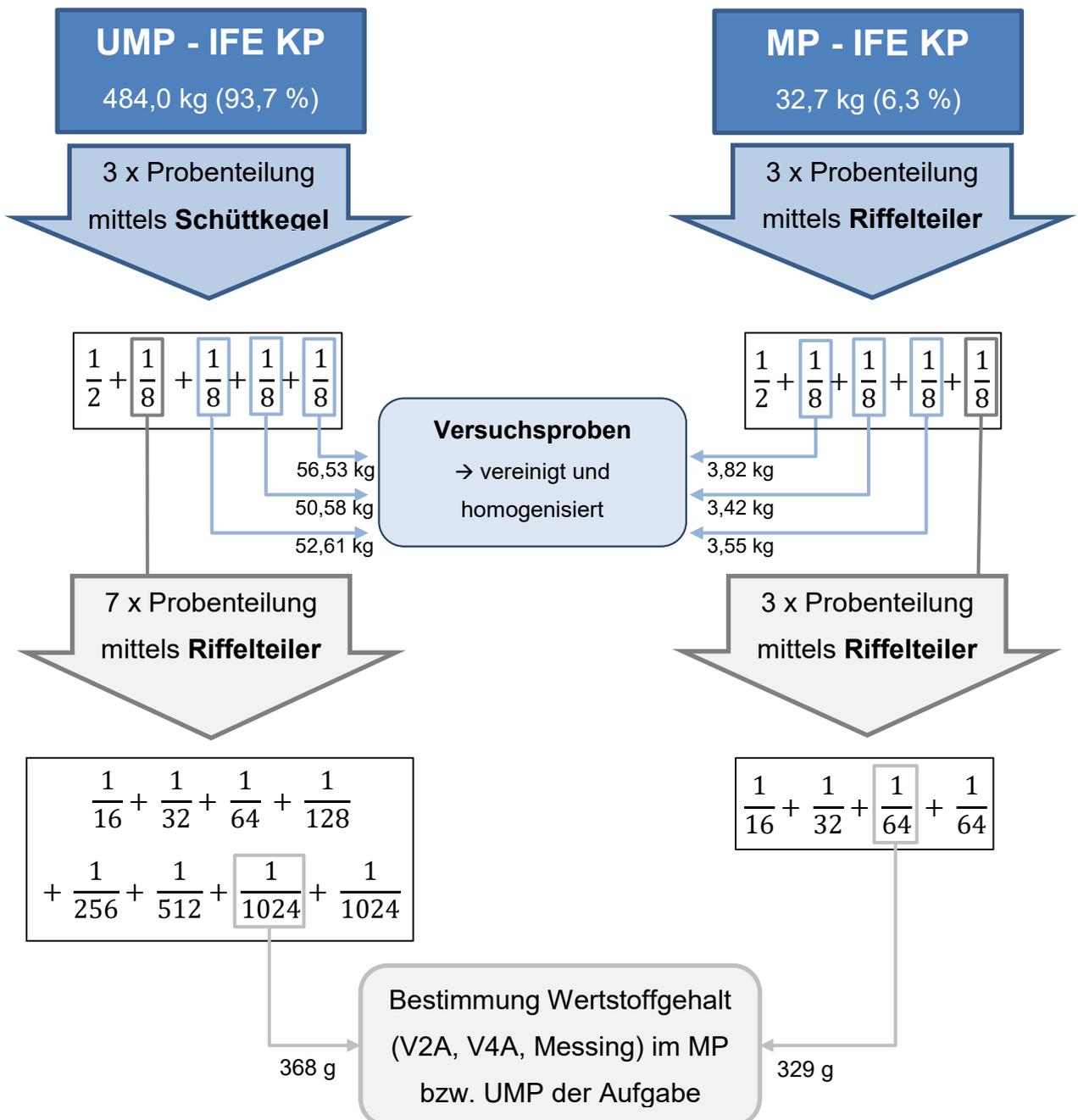


Abbildung 7.1 Ablauf der Probenteilung

Dafür wurden die Proben auf eine für die Handklaubung sinnvolle Menge geteilt und auf Basis visueller Merkmale sortiert. Für die Versuchsdurchführung selbst wurde aus beiden Proben der Produkte IFE KP Teilproben entnommen und diese dann vereinigt und homogenisiert.

Abbildung 7.1 veranschaulicht die Schritte bei der Probenvorbereitung.



Abbildung 7.2 Probenteilung mittels Schüttkegel

Die vergleichsweise große Menge der Probe UMP – IFE KP wurde zuerst mittels Schüttkegel (Abbildung 7.2) und danach mit einem Riffelteiler geteilt. Die im Verhältnis viel kleinere Probe MP – IFE KP wurde ausschließlich mit dem Riffelteiler (Abbildung 7.3) geteilt.



Abbildung 7.3 Probenteilung mittels Riffelteiler

Für die Versuchsproben 1 bis 3 wurde jeweils $\frac{1}{8}$ der Proben UMP und MP vereinigt und homogenisiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Massenverhältnis von UMP zu MP bei jeder Versuchsprobe mit jener der ursprünglichen Aufgabe übereinstimmte. Tabelle 7.1 zeigt das Mischungsverhältnis aus UMP und MP der Proben 1 bis 3.

Probe 1	Masse [kg]	Masse [%]
UMP	56,94	93,7
MP	3,82	6,3
Aufgabe	60,76	100,0

Probe 2	Masse [kg]	Masse [%]
UMP	52,61	93,7
MP	3,55	6,3
Aufgabe	56,16	100,0

Probe 3	Masse [kg]	Masse [%]
UMP	50,58	93,7
MP	3,42	6,3
Aufgabe	54,00	100,0

Tabelle 7.1 Massenverhältnis UMP zu MP der Versuchsproben 1 bis 3

Für das Homogenisieren der Versuchsprobe wurde ein Kunststoffbehälter verwendet. In diesem wurden beide Proben vereinigt und vermischt (Abbildung 7.4).



Abbildung 7.4 Homogenisieren der Versuchsproben

7.2 Wertstoffgehalt der Aufgabe

Die Teilproben aus der Probenvorbereitung zur Bestimmung des Wertstoffgehalts wurden mittels Handklaubung in die Fraktionen „Kupfer“ (Cu), „Aluminium“ (Al), „Messing“ (Me) / „Edelstahl“ (VA) „Blei“ (Pb) und „Rest“ sortiert, wobei die Restfraktion hauptsächlich Kunststoff, mineralische und nicht aufgeschlossene Partikel enthält. Diese Massenverteilung entspricht den Wertstoffgehalten der jeweiligen Probe und soll den Wertstoffgehalt der Aufgabe (UMP/MP) repräsentieren.

IFE KP	Masse [%]	Me/VA [%]	Cu [%]	Al [%]	Pb [%]	Rest [%]
UMP	93,7	22,2	22,2	33,3	1,9	20,3
MP	6,3	93	0,9	3,3	0	2,7
Aufgabe	100	26,7	20,9	31,4	1,8	19,2

Tabelle 7.2 Repräsentative Wertstoffgehalte der Probe IFE KP

An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese Gehalte eine Momentaufnahme des Betriebszustandes der Kabelschrott-Aufbereitung darstellen. Die gesamte Probe wurde in einem Zeitraum von etwa vier Stunden gesammelt. Für den Vergleich der Magnetsysteme ist diese Momentaufnahme zweckmäßig. Die Gehalte repräsentieren aber auf keinen Fall die Durchschnittsgehalte des Aufgabematerials über einen längeren Zeitraum wie zum Beispiel ein Jahr.

7.3 Versuchsablauf

Die Versuchsreihe wurde erfolgreich im Dezember 2020 im Technikum der IFE Aufbereitungstechnik durchgeführt. Die drei Proben wurden batchweise aufgegeben, dabei wurden die Einstellparameter minimal variiert.

7.3.1 Maschinenbeschreibung

Für die Versuchsdurchführung wurde der Prototyp aus dem IFE Technikum mit der Typenbezeichnung KHP 500x650 Z/11 verwendet (Abbildung 7.5).



Abbildung 7.5 Trommelmagnetscheider vom Typ KHP 500x650 Z/11 (IFE Aufbereitungstechnik)

Bei dieser Maschine handelt es sich um einen Trommelmagnetscheider, bei dem das optimierte Magnetsystem eingesetzt und getestet wird. Die maximale Flussdichte an der Trommeloberfläche liegt knapp über 1.000 mT. Eine detaillierte Beschreibung des Magnetsystems ist in Kapitel 5 zu finden. Der Durchmesser der Trommel beträgt 500 mm. Die Beschickung erfolgt durch einen Aufgabebunker mit Einfülltrichter und einer Dosierrinne. Damit kann, die Aufgaberate mittels frequenzgesteuerten Magnettriebwerk stufenlos geregelt werden.

Die Trommel selbst wird von einem Getriebemotor angetrieben, die Drehzahl kann mittels Frequenzumrichter geregelt werden. Die Trennschneide wird händisch positioniert und mit Schrauben geklemmt. Die Position wird mittels x und y Koordinate zur Trommelachse angegeben und muss händisch mit einem Maßband gemessen werden (Abbildung 7.6). Die genaue Vermessung der Trennschneideposition zur Trommelachse erweist sich in der Praxis als schwierig, daher kann es hier zu Ungenauigkeiten kommen, die eine Reproduzierbarkeit des Versuches einschränken. Dennoch beschreiben die Abstände (Koordinaten) der Trennschneidenkante zur Trommelachse in Kombination mit dem Trommeldurchmesser den Versuchsaufbau ausreichend genau und lassen somit auch Vergleiche mit Maschinen anderer Hersteller zu.

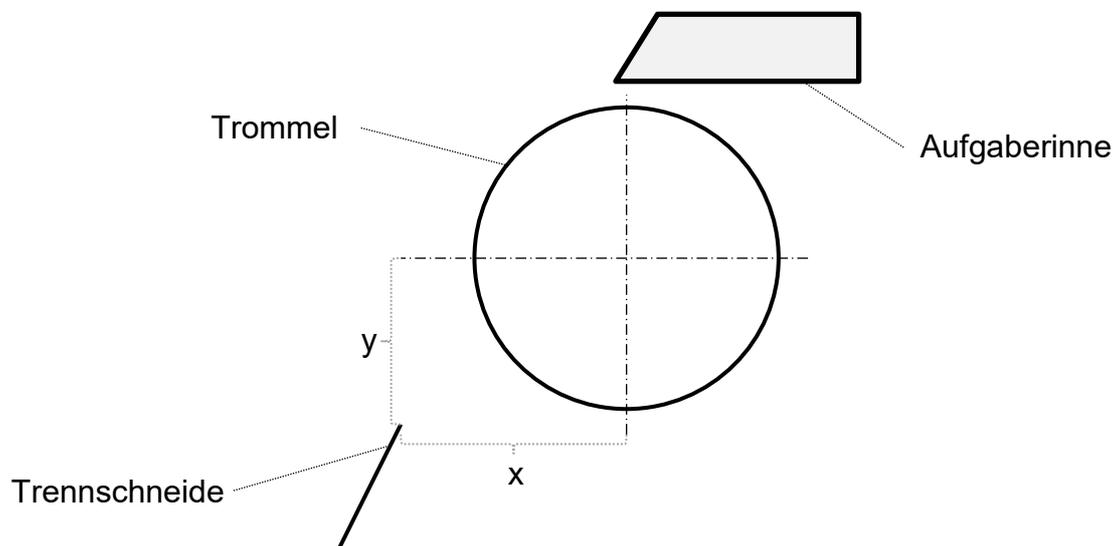


Abbildung 7.6 Definition der Trennschneidenposition

7.3.2 Maschinen- und Versuchsparameter

Für die drei Versuche wurde die Maschinen entsprechend nachstehender Tabelle eingestellt:

Maschinenparameter	Probe 1	Probe 2	Probe 3
Aufgaberate [t/h]	0,94	0,92	0,89
Trommeldrehzahl [U/min]	51	51	51
Trennschneide x [mm]	270	281	276
Trennschneide y [mm]	28	28	28

Tabelle 7.3 Maschinenparameter bei der Versuchsdurchführung am Prototypen

8. Auswertung der Ergebnisse

8.1 Wertstoffgehalte der Produkte

Um die Sortierergebnisse des optimierten Magnetsystems mit dem bestehenden Magnetscheider IFE KP zu vergleichen, wurden auch bei den Produkten der Proben 1 bis 3 die Wertstoffgehalte bestimmt. Dafür wurde wiederum eine Teilprobe aus jedem einzelnen Produkt entnommen und händisch nach optischen Merkmalen sortiert. Die Massenverteilung der Teilprobe soll die Verteilung der Wertstoffgehalte des gesamten Produktes repräsentieren.

8.2 Bilanztafel

Probe 1	Masse [%]	$g_{ME/VA}$ [%]	$r_{ME/VA}$ [%]	g_{Cu} [%]	r_{Cu} [%]	g_{Al} [%]	r_{Al} [%]	g_{Pb} [%]	r_{Pb} [%]	g_{Rest} [%]	r_{Rest} [%]
UMP	90,9	22,6	71,3	39,4	99,6	17,2	99,3	5,5	98,7	15,3	98,3
MP	9,1	90,9	28,7	2,1	0,4	1,9	0,7	1,1	1,3	3,9	1,7
Aufgabe	100,0	26,9	100,0	37,0	100,0	16,3	100,0	5,3	100,0	14,6	100,0

Probe 2	Masse [%]	$g_{ME/VA}$ [%]	$r_{ME/VA}$ [%]	g_{Cu} [%]	r_{Cu} [%]	g_{Al} [%]	r_{Al} [%]	g_{Pb} [%]	r_{Pb} [%]	g_{Rest} [%]	r_{Rest} [%]
UMP	90,0	23,7	71,1	35,2	99,5	17,7	98,9	3,2	97,3	20,2	97,8
MP	10,0	86,7	28,9	2,4	0,5	2,9	1,1	1,3	2,7	6,7	2,2
Aufgabe	100,0	27,7	100,0	33,2	100,0	16,8	100,0	3,0	100,0	19,4	100,0

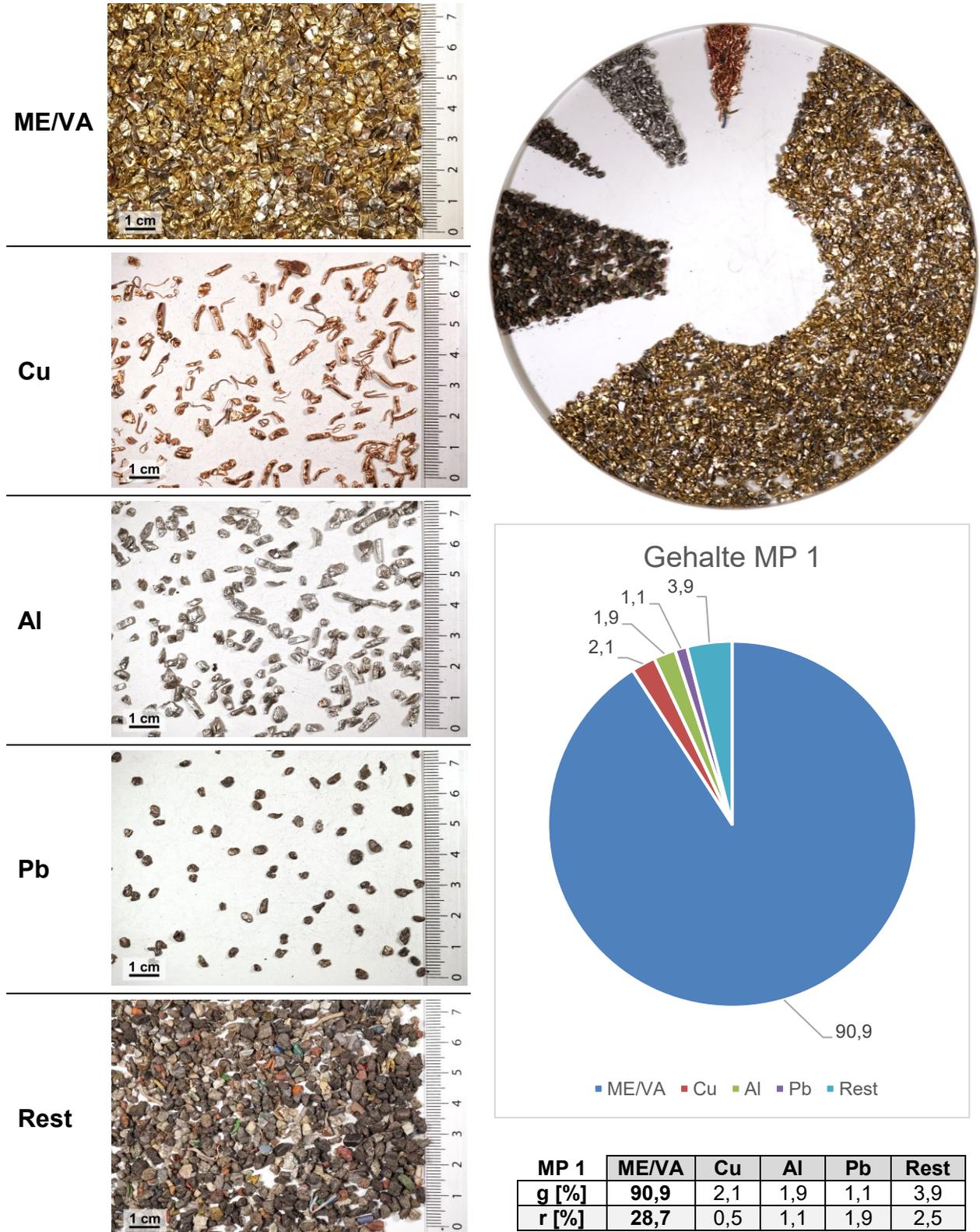
Probe 3	Masse [%]	$g_{ME/VA}$ [%]	$r_{ME/VA}$ [%]	g_{Cu} [%]	r_{Cu} [%]	g_{Al} [%]	r_{Al} [%]	g_{Pb} [%]	r_{Pb} [%]	g_{Rest} [%]	r_{Rest} [%]
UMP	91,0	21,6	70,7	33,1	99,7	20,1	99,5	3,5	99,3	21,6	98,2
MP	9,0	90,8	29,3	1,5	0,3	1,4	0,5	0,4	0,7	5,9	1,8
Aufgabe	100,0	26,0	100,0	31,1	100,0	18,9	100,0	3,3	100,0	20,6	100,0

IFE KP	Masse [%]	$g_{ME/VA}$ [%]	$r_{ME/VA}$ [%]	g_{Cu} [%]	r_{Cu} [%]	g_{Al} [%]	r_{Al} [%]	g_{Pb} [%]	r_{Pb} [%]	g_{Rest} [%]	r_{Rest} [%]
UMP	93,7	22,2	77,9	22,2	99,7	33,3	99,3	1,9	99,9	20,3	99,1
MP	6,3	93,0	22,1	0,9	0,3	3,3	0,7	0,0	0,1	2,7	0,9
Aufgabe	100,0	26,7	100,0	20,9	100,0	31,4	100,0	1,8	100,0	19,2	100,0

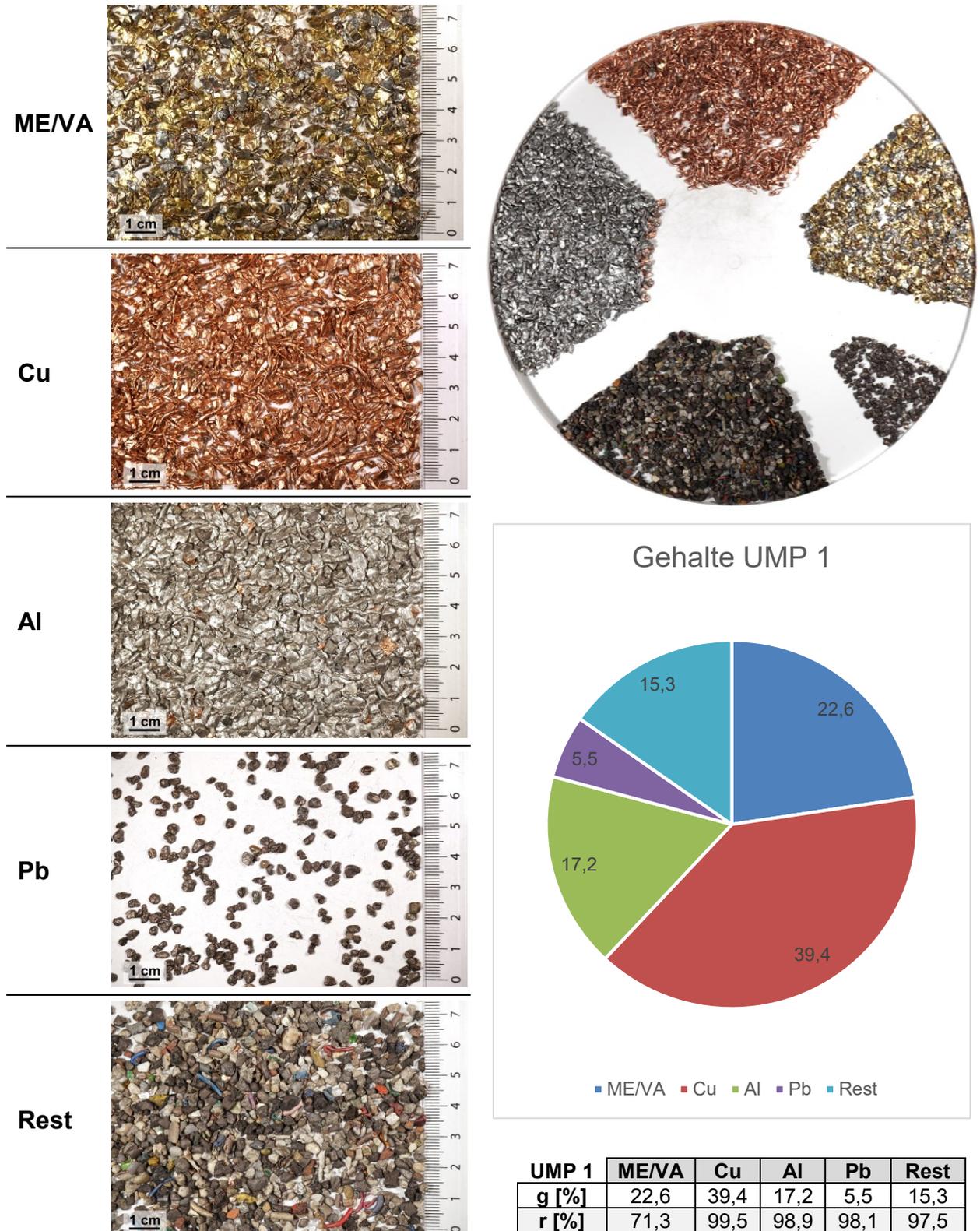
Tabelle 8.1 Bilanztafel der Proben 1 bis 3 und IFE KP

8.3 Visualisierung der Produkte

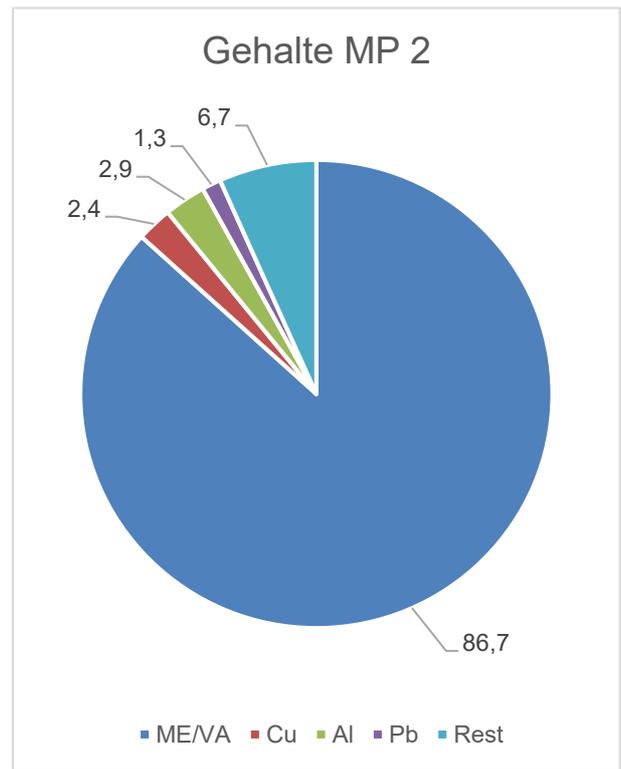
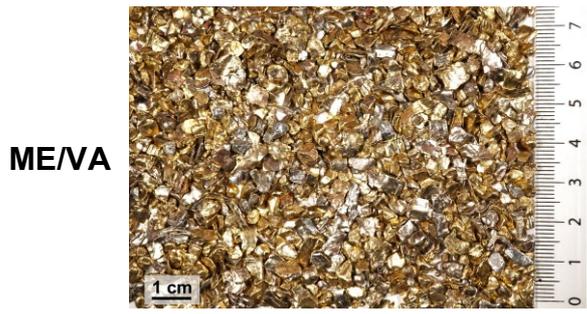
8.3.1 Probe 1 – Magnetprodukt (MP 1)



8.3.2 Probe 1 – unmagnetisches Produkt (UMP 1)

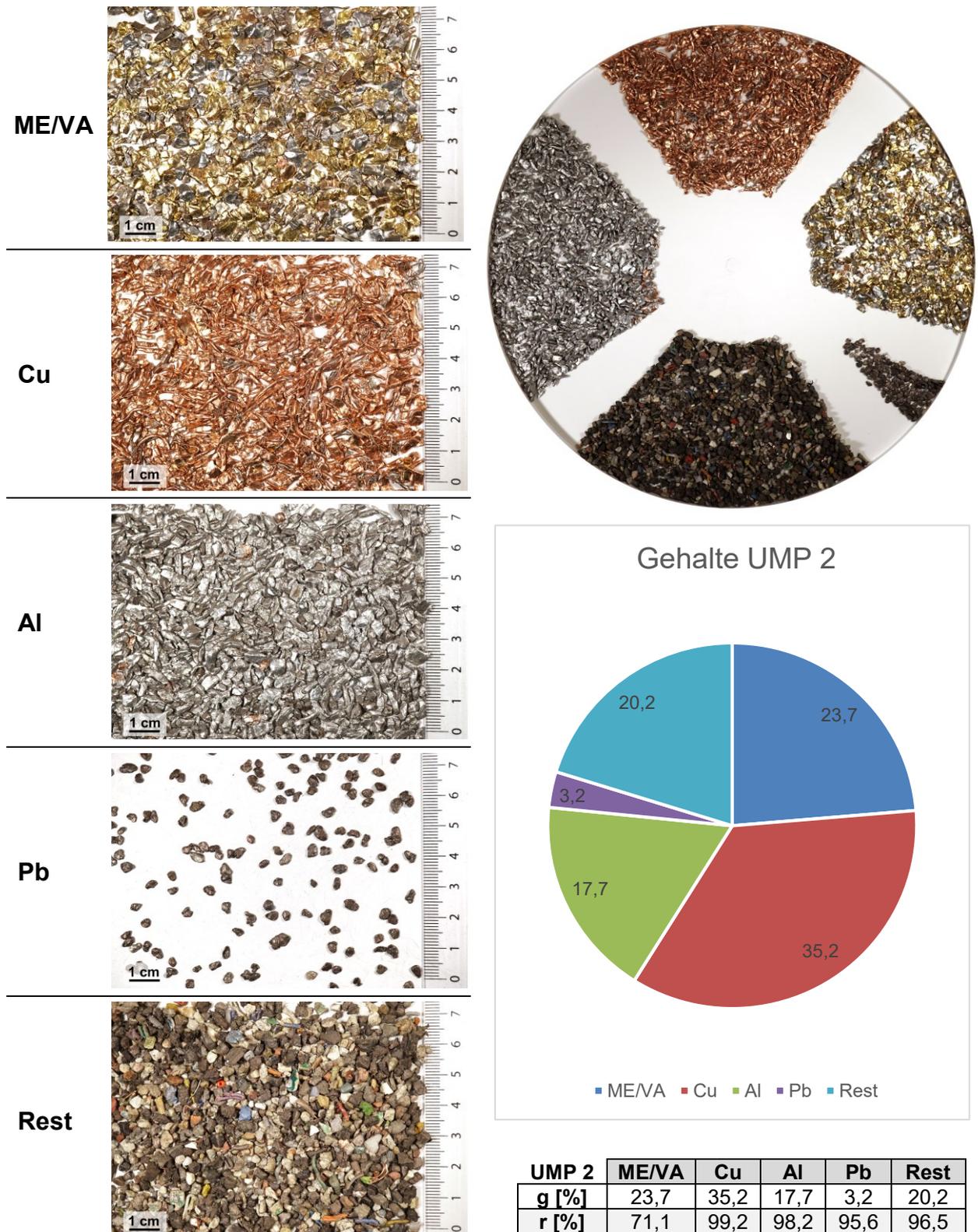


8.3.3 Probe 2 – Magnetprodukt (MP 2)

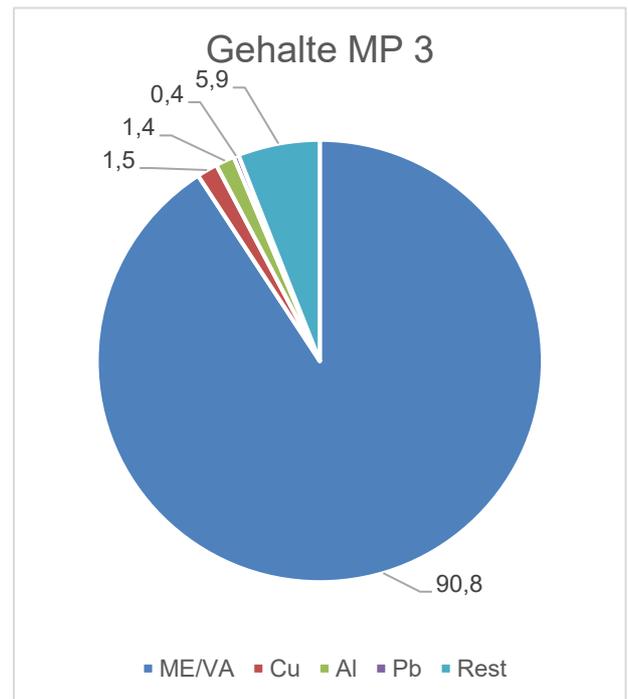
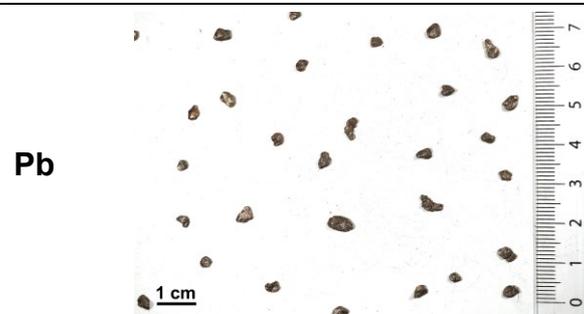


MP 2	ME/VA	Cu	Al	Pb	Rest
g [%]	86,7	2,4	2,9	1,3	6,7
r [%]	28,9	0,8	1,8	4,4	3,5

8.3.4 Probe 2 – unmagnetisches Produkt (UMP 2)

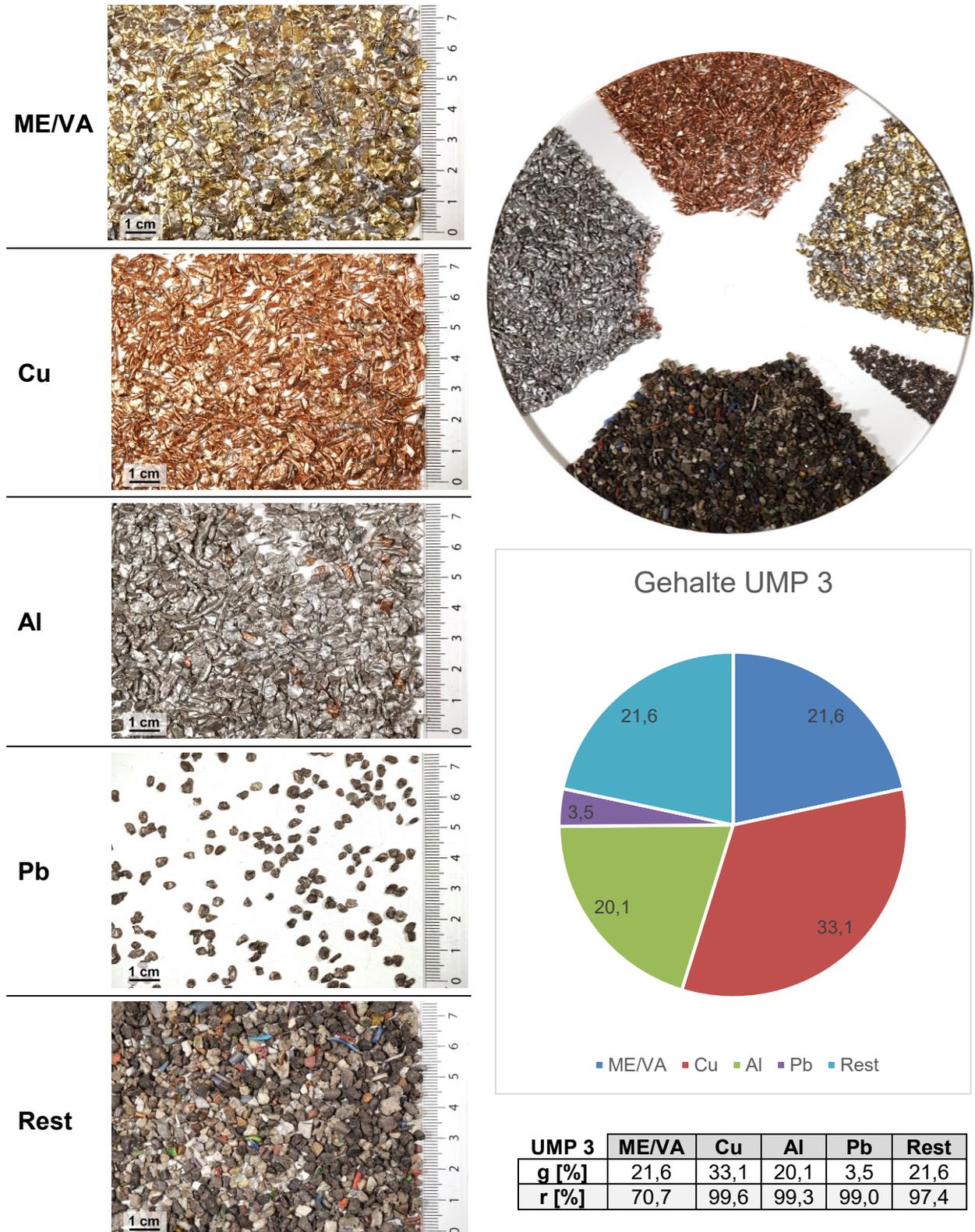


8.3.5 Probe 3 – Magnetprodukt (MP 3)

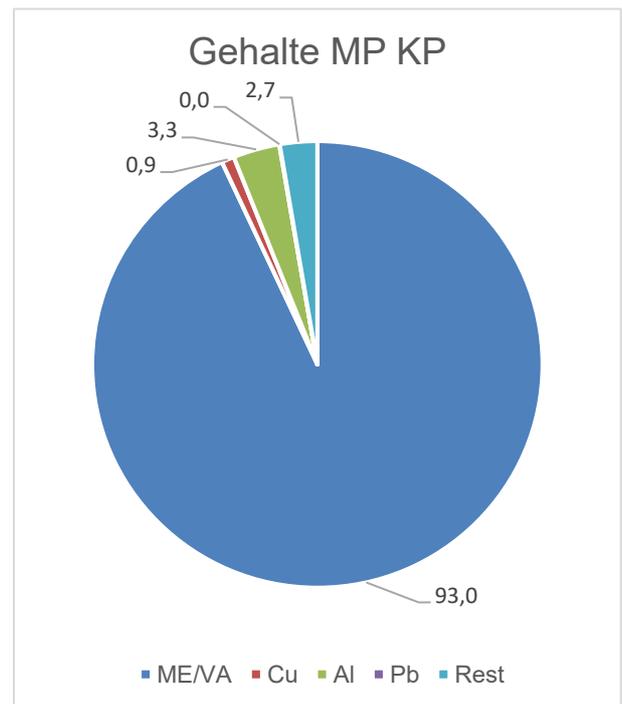
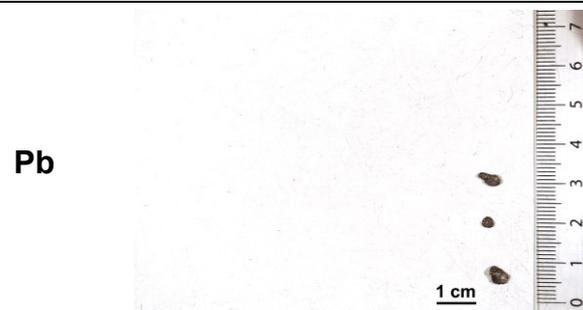
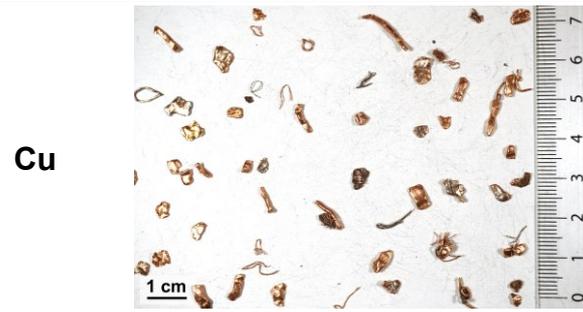
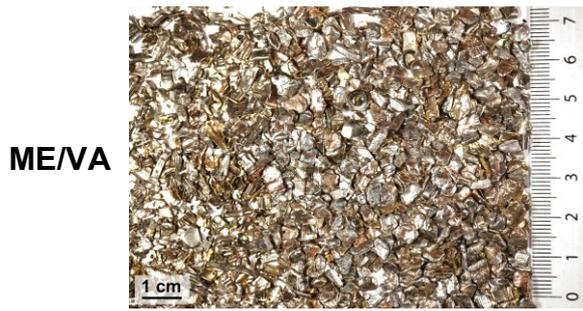


MP 3	ME/VA	Cu	Al	Pb	Rest
g [%]	90,8	1,5	1,4	0,4	5,9
r [%]	29,3	0,4	0,7	1	2,6

8.3.6 Probe 3 – unmagnetisches Produkt (UMP 3)

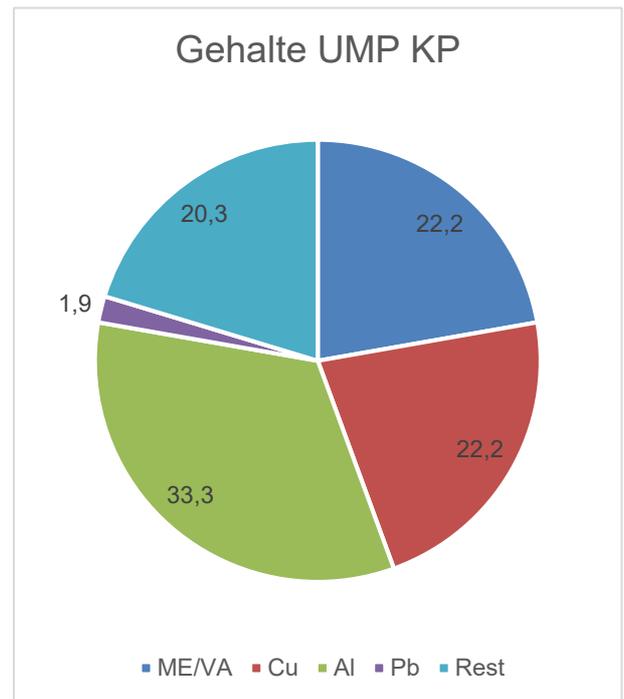
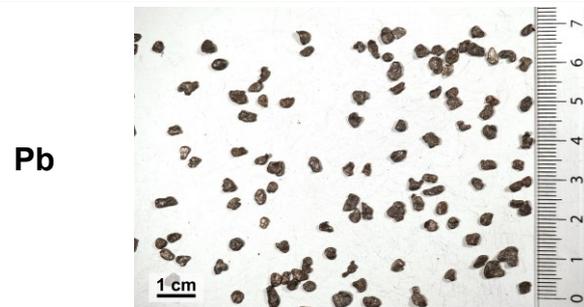
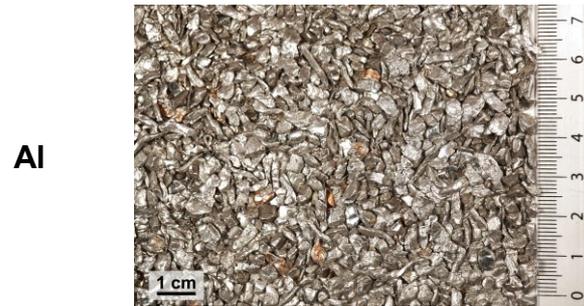
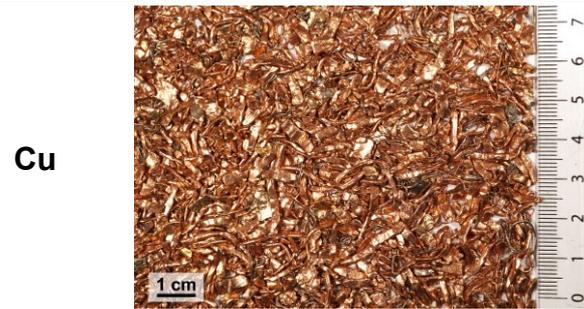
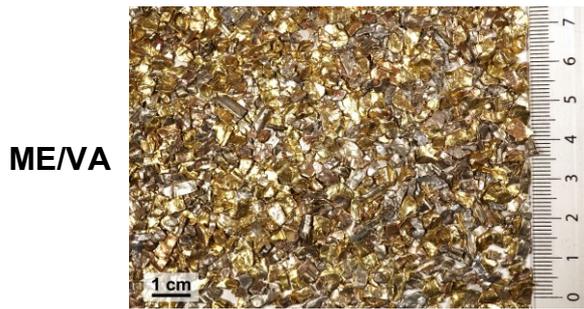


8.3.7 IFE KP – Magnetprodukt



MP KP	ME/VA	Cu	Al	Pb	Rest
g [%]	93,0	0,9	3,3	0,0	2,7
r [%]	22,1	0,3	0,7	0,1	0,9

8.3.8 IFE KP – unmagnetisches Produkt



UMP KP	ME/VA	Cu	Al	Pb	Rest
g [%]	22,2	22,2	33,3	1,9	20,3
r [%]	77,9	99,7	99,3	99,9	99,1

9. Conclusio

Gegenüberstellung des Trommelmagnetscheiders mit optimierten Magnetsystem zu Magnetbandwalzenscheidern:

- Die hohe Flussdichte von etwa 1000 mT an der Trommeloberfläche des neuen Magnetsystems entspricht jener, wie man sie auch bei den in der Industrie üblichen Magnetbandwalzenscheidern findet. Jedoch kann man in Abbildung 5.3 ganz klar den Unterschied des Gradienten der Flussdichte erkennen. Je geringer der Gradient des Magnetfeldes, desto größere Partikel können damit verlässlich angezogen werden. Magnetfelder mit geringem Gradienten der Flussdichte bei gleichzeitig hoher Flussdichte an der Oberfläche können mit der Bauart von Magnetbandwalzenscheidern nicht realisiert werden.
- Ein weiterer großer Vorteil von Trommelmagnetscheidern ist die geringe Fehleranfälligkeit der Maschine selbst. Magnetbandwalzenscheider haben zwei große Schwächen gegenüber Trommelmagnetscheidern. Zum einen ein möglicher Bandschieflauf und zum anderen der Verschleiß des Bandes selbst. Scharfkantige Partikel können das Band schnell aufschlitzen, was die möglichen Einsatzgebiete dieser Bauart sehr einschränkt. Trommelmagnetscheider sind hingegen wartungsarm und in der Regel Verschleißfest (bei extrem schleißenden Materialien wie Quarzsand kann es sein, dass der Trommelmantel nach ein paar Jahren ausgetauscht werden muss).

Erfahrungswerte zum Hallsonden Positioniersystem:

- Die Einrichtung des Positioniersystems stellt durchaus einen Mehraufwand dar. Mit etwas Erfahrung ist eine schnelle Messung der Flussdichte an der Oberfläche eines Trommelmagneten in der Praxis auch ohne ein Positioniersystem möglich.
- Will man jedoch einen möglichst genauen Verlauf der Flussdichte in Abhängigkeit des Abstandes zur Trommeloberfläche, ist das Positioniersystem sicherlich die genauere und vor allem effizientere Möglichkeit als Gegenstände mit definierter Dicke als Abstandshalter beizulegen.

Interpretation der Versuchsergebnisse:

- Sowohl das Masseausbringen als auch das Inhaltsausbringen von Messing und VA ist in den drei Produkten MP 1, MP 2 und MP 3 höher als in der Vergleichsprobe MP KP aus der bestehenden Anlage.
- Der Gehalt an Messing und VA in den drei Produkten MP 1, MP 2 und MP 3 ist niedriger als in der Vergleichsprobe MP KP aus der bestehenden Anlage.
- Der Durchsatz lag dabei bei etwa 0,9 t/h und könnte sicherlich noch gesteigert werden. Zum Vergleich liegt der Durchsatz des Magnetbandwalzenscheiders in der bestehenden Anlage bei etwa 1,2 t/h.
- Man sieht bei den drei Produkten aus der Versuchsreihe sehr deutlich, dass die Reinheit des Magnetprodukts stark von der Position der Trennschneide abhängt. Das Produkt MP 2 hat zwar das höchste Masseausbringen an Messing und VA, jedoch auch die geringste Reinheit.
- Das Inhaltsausbringen hingegen ist mit $29,0 \pm 0,3$ % bei allen drei Magnetprodukten ziemlich gleich und auch deutlich höher als beim bestehenden Prozess, dessen Inhaltsausbringen im Magnetprodukt bei etwa 22,1 % liegt.
- Was die Analysewerte der Handklaubung betrifft muss klar gesagt werden, dass auch der Mensch, mit seinen Augen als Sensoren, als quasi „sensorgestützter Sortierer“, bei der analysescharfen Sortierung seine Grenzen hat. Gerade bei grauen Partikeln - also VA, Aluminium und Blei - kann es zu Verwechslungen kommen, besonders wenn die Oberfläche Oxidationserscheinungen aufweist.
- Mehr als 99% des Aufgabematerials der Versuchsreihe weist ein Korngröße von weniger als 4 mm auf. Bei dieser Korngröße erzielt auch der Magnetbandwalzenscheider noch sehr gute Ergebnisse. Um das Potential des tiefen Magnetfeldes besser testen zu können, wäre ein Aufgabematerial im Korngrößenbereich 5 bis 20 mm aussagekräftiger. Dies sollte für eine zukünftige Versuchsreihe berücksichtigt werden.

10. Verzeichnisse

10.1 Quellenverzeichnis

Böhm, A. (2009). Theoretische Aspekte der Magnetscheidung für die Praxis. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (2009) 154 Heft 4.

Böhm, A. (2017). Vorlesung Grundzüge der Aufbereitung

Fritsche, O. (2020). Physik für Chemiker II – Elektrizität, Magnetismus, Optik, Quanten- und Atomphysik. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin.

Michalowsky, L. (1995). Magnettechnik – Grundlagen und Anwendungen. Fachbuchverlag Leipzig, Köln

Schmitt, F.-J. (2015). Glossar: Magnetismus von A-Z. Online unter <https://www.supermagnete.at/track.php?e=glossar>, Zugriff am 29.08.2019.

Schubert, H. (2003). Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Tipler, P. A. Mosca, G. (2012). Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 6. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1 Die magnetische Flussdichte B am Beispiel eines Hufeisenmagnets (Schmitt, 2015)	13 -
Abbildung 4.2 Schematische Darstellung von Diamagnetismus (Schmitt, 2015)	15 -
Abbildung 4.3 Darstellung der Elementarmagn. mit blauem Nord- und rotem Südpol (Schmitt, 2015)	16 -
Abbildung 4.4 Ausrichtung der atomaren Spins bei Antiferro- und Ferrimagnetismus (Schmitt, 2015)	18 -
Abbildung 4.5 Elektronenspin - Summe aller einzeln addierbaren magnetischen Momente (Schmitt, 2015).....	19 -
Abbildung 4.6 Hysteresekurve eines weich- (links) und hartmagnetischen (rechts) Stoffes (Schmitt, 2015)	22 -
Abbildung 4.7 Halleffekt am Beispiel eines Leiterplättchens (Schmitt, 2015)	24 -
Abbildung 4.8 Wertebereiche von J_s , B_r , und B_{HC} bei magn. Werkstoffen (Michalowsky, 1995)	25 -
Abbildung 4.9 Energieprodukt $(BH)_{max}$ und Koerzitivfeldstärke J_{HC} gebräuchlicher hartmagnetischer Werkstoffe (Michalowsky, 1995).....	26 -
Abbildung 4.10 Ablauf der Fertigung oxydischer Dauermagnetwerkstoffe (Michalowsky, 1995).....	27 -
Abbildung 4.11 Herstellungsschritte bei der Herstellung von Dauermagnetwerkstoffen auf Basis von Seltenerdmetallen (Michalowsky, 1995).....	28 -
Abbildung 4.12 Wirkprinzip der Trennungen an magn. Separatoren - Ablensortierung am Trommelmagnetscheider (A Aufgabegut; M magnetisches Produkt; UM unmagnetisches Produkt) (Schubert, 2003)	35 -
Abbildung 4.13 Zusammenhang zw. Stoff- und Körpersuszeptibilität für den Fall der Kugel (Böhm, 2009)	38 -
Abbildung 4.14 Vereinf. Aufbau eines Trommelscheiders mit radialer Magnetisierung (Michalowsky, 1995)	43 -
Abbildung 4.15 Schematische Darstellung des magnetischen Flusses am Magnetsystems eines Trommelscheiders mit radialer Magnetisierung und Wechseipolanordnung (Michalowsky, 1995)	44 -
Abbildung 4.16 Aufbau einer Magnetwalze mit achsialer Magnetisierung (Michalowsky, 1995)	45 -
Abbildung 4.17 Schematische Darstellung des magnetischen Flusses am Magnetsystem eines Magnetbandwalzenscheiders mit achsialer Magnetisierung (Michalowsky, 1995)	46 -
Abbildung 4.18 Aufbau eines Magnetbandwalzenscheiders der Firma IFE Aufbereitungstechnik vom Typ KP (versuchstechnischer Maßstab)	48 -
Abbildung 5.1 Auswirkung bei falscher Winkel-Positionierung der Hallsonde und Abweichung der gemessenen Komponente B_r' des Hallsensors von der tatsächlichen radialen Flussdichtekomponente B_r	50 -
Abbildung 5.2 Zusammenstellungszeichnung der Messvorrichtung	51 -
Abbildung 5.3 Schnittansicht der Positioniereinrichtung mit dem Winkelprofil-Aufleger für Magnetbandwalzenscheider. Die rote Linie beschreibt d. radiale Ausrichtung der Hallsonde zur Magnetwalze. -	52 -
Abbildung 5.4 Einrichten der Winkellage des Messsystems mit einem Linienlaser	53 -
Abbildung 6.1 Skizze des Magnetscheiders vom Typ HPG der IFE Aufbereitungstechnik GmbH	56 -
Abbildung 6.2 Messaufbau – Abnahme der Flussdichte radial zur Trommeloberfläche	59 -
Abbildung 6.3 Verlauf der Flussdichte mit zunehmendem Abstand zur Trommel- bzw. Bandoberfläche.....	61 -
Abbildung 7.1 Schematischer Verfahrensstammbaum einer modernen Kabelschrottaufbereitung	63 -

Abbildung 7.2 Probenahmestelle – Beprobung der Produkte am Magnetbandwalzenscheider	- 64 -
Abbildung 7.3 Aufgabegut Magnetbandwalzenscheider – Probe IFE KP	- 65 -
Abbildung 7.4 Ergebnisse der Siebanalyse des Aufgabegutes	- 67 -
Abbildung 7.5 Korngrößenverteilung der Probe IFE KP	- 68 -
Abbildung 7.6 Einteilung in Flusssdichteklassen mittels Aushebemagnet	- 69 -
Abbildung 8.1 Ablauf der Probenteilung	- 71 -
Abbildung 8.2 Probenteilung mittels Schüttkegel	- 72 -
Abbildung 8.3 Probenteilung mittels Riffelteiler	- 72 -
Abbildung 8.4 Homogenisieren der Versuchsproben	- 73 -
Abbildung 8.5 Trommelmagnetscheider vom Typ KHP 500x650 Z11 (IFE Aufbereitungstechnik).....	- 75 -
Abbildung 8.6 Definition der Trennschneidenposition	- 76 -

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1 Elektrischer Widerstand für Trommelwerkstoffe	- 58 -
Tabelle 5.2 Messergebnisse der Flusssdichtemessung beider Magnetsysteme	- 60 -
Tabelle 6.1 Menge und Massenverteilung der Produkte des Magnetbandwalzenscheiders	- 64 -
Tabelle 6.2 Korngrößenverteilung der der Probe IFE KP	- 68 -
Tabelle 6.3 Unterteilung der Siebklassen in Flusssdichteklassen mit zugehöriger Feststoffdichte	- 70 -
Tabelle 7.1 Massenverhältnis UMP zu MP der Versuchsproben 1 bis 3	- 73 -
Tabelle 7.2 Repräsentative Wertstoffgehalte der Probe IFE KP	- 74 -
Tabelle 7.3 Maschinenparameter bei der Versuchsdurchführung am Prototypen	- 76 -
Tabelle 8.1 Bilanztafel der Proben 1 bis 3 und IFE KP	- 77 -

11. Anhang

- a) Werkstoffdatenblatt X5CrNi18-10 (1.4301)
- b) Werkstoffdatenblatt X15CrNiSi25-21 (1.4841)

NICHTROSTENDER AUSTENITISCHER STAHL

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (IN MASSEN-% NACH DIN EN 10088-3)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
min.	-	-	-	-	-	17,5	8,0	-
max.	0,07	1,0	2,0	0,045	0,03	19,5	10,5	0,1

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (IN MASSEN-% NACH ASTM A276)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
min.	-	-	-	-	-	18,0	8,0
max.	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	20,0	11,0

Kundenspezifische Einschränkungen der Normanalyse sind nach Rücksprache mit der Deutschen Edelstahlwerke GmbH möglich.

VERWENDUNGSHINWEISE

Acidur 4301 ist ein austenitischer Chrom-Nickel-Stahl. Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit, der guten Verarbeitungseigenschaften und des attraktiven Aussehens (Ausführungsarten: glanzpoliert, geschliffen oder gebürstet) findet diese Güte in zahlreichen Gebieten Anwendung. Im geschweißten Zustand ist Acidur 4301 jedoch nicht beständig gegen interkristalline Korrosion. Falls ein Schweißen nicht vermieden werden kann, empfiehlt sich die Anwendung von Acidur 4307.

ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

Korrosionsbeständigkeit	gut
Mechanische Eigenschaften	mittel
Schmiedbarkeit	gut
Schweißbeignung	ausgezeichnet
Spanbarkeit	mittel

NORMEN UND BEZEICHNUNGEN

DIN EN 10088-3	1.4301 X5CrNi18-10
AISI	304
UNS	S30400
B.S.	304S31
JIS	SUS304
AFNOR	Z7CN18-09
SS	2333
GOST	08Ch18N10
UNE	F.3504

BESONDERE EIGENSCHAFTEN

- » polierfähig
- » für Tieftemperaturen geeignet
- » bis 550°C verwendbar
- » verbesserte Zerspanung bei Sondergüte



PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Dichte in kg/dm³ 7,9

Elektrischer Widerstand
bei 20°C in (Ω mm²/m) 0,73

Magnetisierbarkeit sehr gering¹

Wärmeleitfähigkeit
bei 20°C in W/(m K) 15

Spezifische Wärmekapazität
bei 20°C in J/(kg K) 500
E-Modul in GPa bei

» 20°C 200

» 100°C 194

» 200°C 186

» 300°C 179

» 400°C 172

» 500°C 165

Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient
in 10⁻⁶K⁻¹

» 20°C - 100°C 16,0

» 20°C - 200°C 16,5

» 20°C - 300°C 17,0

» 20°C - 400°C 17,5

» 20°C - 500°C 18,0

¹ Der Werkstoff kann im abgeschreckten Zustand leicht magnetisierbar sein. Mit steigender Kaltverformung nimmt die Magnetisierbarkeit zu.

VERARBEITUNG

Spangebende Verarbeitung ja

Freiform- und Gesenkschmieden ja

Kaltumformung ja

Kaltstauchen ja

Polierbarkeit ja

TEMPERATUREN FÜR WARMUMFORMUNG UND WÄRMEBEHANDLUNG

WARMUMFORMUNG

Temperatur in °C	Abkühlung
1200 - 900	Luft

WÄRMEBEHANDLUNG

Temperatur in °C	Abkühlung
Lösungsglühen (+AT) 1000 - 1100	Luft, Wasser, rasche Abkühlung

Da diese Güte zur Ausscheidung von Chromkarbiden neigt, muss die Zeit im Temperaturbereich von 400°C - 850°C sowohl bei der Herstellung als auch bei der Verarbeitung begrenzt werden.

ANWENDUNGSGEBIETE

- » Automobilindustrie
- » Bauindustrie
- » Chemische Industrie
- » Dekorative Zwecke und Kücheneinrichtung
- » Elektronische Ausrüstung
- » Erdölindustrie / petrochemische Industrie
- » Lebensmittelindustrie
- » Behälterbau
- » Architekturelemente

Hinweis: Lieferung gemäß bauaufsichtlicher Zulassung Z-30.3-6 und Druckbehälternorm DIN EN 10272.



NICHTROSTENDER AUSTENITISCHER STAHL

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (IN MASSEN-% NACH DIN EN 10095)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
min.	-	1,5	-	-	-	24,0	19,0	-
max.	0,2	2,5	2,0	0,045	0,015	26,0	22,0	0,11

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (IN MASSEN-% NACH ASTM A276)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
min.	-	1,5	-	-	-	23,0	19,0
max.	0,25	3,0	2,0	0,045	0,03	26,0	22,0

Kundenspezifische Einschränkungen der Normanalyse sind nach Rücksprache mit der Deutsche Edelstahlwerke GmbH möglich.

VERWENDUNGSHINWEISE

Permodur 4841 ist ein nichtrostender hitzebeständiger Chrom-Nickel-Stahl, der eine gute Beständigkeit gegen Oxidation bei hohen Temperaturen zeigt. Des Weiteren zeichnet sich Permodur 4841 durch seine guten Festigkeitseigenschaften bei hohen Temperaturen aus. Außerdem zeigt diese Güte eine ausgezeichnete chemische Beständigkeit bei Temperaturen bis 1100°C.

BESONDERE EIGENSCHAFTEN

- » bis ~1150°C zunderbeständig an Luft
- » Anwendungsbereich 900°C - 1120°C

NORMEN UND BEZEICHNUNGEN

DIN EN 10095	1.4841 X15CrNiSi25-21
AISI	314
UNS	S31400
B.S.	314S25
JIS	SUH310
AFNOR	Z15CNS25-20
SEW 470	1.4841

ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

Korrosionsbeständigkeit	sehr gut
Mechanische Eigenschaften	mittel
Schmiedbarkeit	gut
Schweißbeignung	gut
Spanbarkeit	mittel



PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Dichte in kg/dm ³	7,9
Elektrischer Widerstand bei 20°C in (Ω mm ²)/m	0,9
Magnetisierbarkeit	nicht vorhanden
Wärmeleitfähigkeit	
» bei 20°C in W/(m K)	15
» bei 500°C in W/(m K)	19
Spezifische Wärmekapazität bei 20°C in J/(kg K)	500
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in 10 ⁻⁶ K ⁻¹	
» 20°C - 200°C	15,5
» 20°C - 400°C	17,0
» 20°C - 600°C	17,5
» 20°C - 800°C	18,0
» 20°C - 1000°C	19,0

ANWENDUNGSGEBIETE

- » Apparatebau für Hochtemperatureinsatz
- » Automobilindustrie
- » Chemische Industrie
- » Erdölindustrie
- » Zement-Kettenindustrie
- » Maschinenbau
- » Ofenbau

VERARBEITUNG

Spangebende Verarbeitung	selten
Freiform- und Gesenkschmieden	ja
Kaltumformung	ja
Kaltstauchen	ja

TEMPERATUREN FÜR WARMUMFORMUNG UND WÄRMEBEHANDLUNG

WARMUMFORMUNG

Temperatur in °C	Abkühlung
1150 - 800	Luft

WÄRMEBEHANDLUNG

Temperatur in °C	Abkühlung
Lösungsglühen (+AT) 1050 - 1150	Luft, Wasser, ausreichend schnelle Abkühlung



