



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Rotationszerstäubung als Methode der  
Inwertsetzung von mineralischen  
Reststoffen

Peter Eisner, BSc

Mai 2024



**EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

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

Datum 19.05.2024

---

Unterschrift Verfasser/in  
Peter Eisner

# Masterarbeit

## Rotationszerstäubung als Methode der Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen

Konstruktion und Bau einer Versuchsanlage

erstellt am

**Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik**

**Vorgelegt von:**

Peter Eisner, BSc.  
11806884

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. Dr.mont. Klaus Doschek-Held  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, am 21. Mai 2024

---

## Danksagung

An dieser Stelle ist es für mich an der Zeit, „Danke“ zu sagen!

Allen voran gilt mein Dank dem Betreuer meiner Masterarbeit, Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Klaus Doschek-Held. Vielen Dank für Möglichkeit, diese Arbeit verfassen zu dürfen, vielen Dank für die fachliche Unterstützung und vielen Dank für unsere zahlreichen Gespräche, die - auch wenn sie oft zeitlich ausufernten - immer eine Quelle der Inspiration und Motivation waren.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch für die Aufnahme in das Team des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik.

Ein großer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl, die mir jederzeit hilfsbereit und verlässlich zur Seite standen. Dabei möchte ich ganz besonders Wolfgang Rühl, Thomas McFarlane Hoad und Lorenz Watzka hervorheben, die mich beim Bau der Rotationszerstäubung unterstützt haben und ohne die die Umsetzung dieses Projektes nicht möglich gewesen wäre. Vielen Dank!

Außerdem möchte ich mich bei Dr.rer.nat. Florian Steindl und dem Institut für Materialprüfung der TU Graz für die durchgeführte RFA bedanken.

Danke an meine Mitbewohner, Alexander und Michael, für die vielen, unfassbar tollen Momente unserer gemeinsamen Zeit in Leoben. Ebenso gilt der Dank allen meinen Freunden, Musikkameraden und Wegbegleitern, die ich in Leoben kennen lernen durfte.

Mehr als nur Dankbarkeit gebührt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern! Ihr habt mir dieses Studium ermöglicht und mich in allen Situationen bedingungslos unterstützt.

*Glück Auf!*

---

## Kurzfassung:

Der Klimawandel stellt alle energie- und treibhausgasintensiven Industrien vor die Herausforderung, ihre Produktionsprozesse hinsichtlich deren Klimafreundlichkeit zu verbessern. Mit einem Anteil von jeweils 7 % an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen haben dabei die Eisen- und Stahl- sowie die Zementindustrie eine zentrale Schlüsselposition inne. Neben der intrinsischen Motivation der Unternehmen spielen auch extrinsische Faktoren, wie die Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen, oder das wachsende Interesse an Nachhaltigkeit von Seite der Investoren eine große Rolle.

In der Eisen- und Stahlindustrie führt diese „Greentransformation“ zu neuen Produktionsprozessen wie der Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff und dem Ausbau von Elektrolichtbogenöfen, was auch Änderungen in den Flüssen der Nebenprodukte zur Folge hat. Es kommt zur Verringerung der Verfügbarkeit von Hochofenschlacke, die als Hüttensand in der Zementindustrie als Ersatz für den Klinker eingesetzt wird. Somit ist es notwendig, Alternativen zum Hüttensand zu finden und zu erforschen, um die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie weiter mitigieren zu können.

Bei der Produktion von Hüttensand wird dieser in einem amorpher Zustand erstarrt, damit sich latent hydraulische Eigenschaften ausbilden, die zur Bindemittleignung führen. In der Vergangenheit wurde dies mit einer Nassgranulation gelöst. Dabei kommt es nicht nur zum Verlust der gesamten nutzbaren Energie der mineralischen Phase, es wird weiters noch Energie zur Trocknung des Hüttensandes benötigt. Die Trockengranulation mittels Rotationszerstäubung hingegen erlaubt es, die thermische Energie des Produktes nutzbar zu machen und gleichzeitig die Trocknungsenergie einzusparen. Dabei wird mittels Fliehkraft ein Zerfall des schmelzflüssigen Materials in Tropfen herbeigeführt. Die an die Luft übertragene Wärme kann anschließend als Prozesswärme eingesetzt werden.

Um die Effekte bei der Rotationszerstäubung von verschiedenen mineralischen Reststoffen untersuchen zu können, wird eine entsprechende Anlage benötigt. Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine Rotationszerstäubungsanlage im Labormaßstab am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik auszulegen, zu konstruieren und zu errichten. Diese soll dabei mit der bereits vorhandenen Induktionsschmelzanlage kombinierbar sein.

Die Ergebnisse der ersten Versuche der Rotationszerstäubung zeigen, dass die Partikel der produzierten mineralischen Phase den gegenständlichen Ansprüchen für eine Bindemittelnutzung genügen und mit den zuvor durchgeführten Berechnungen in Einklang stehen.

---

## **Abstract:**

Climate change presents all energy and greenhouse gas-intensive industries with the challenge of improving the climate-friendliness of their production processes. With a share of 7 % of the global CO<sub>2</sub>-emissions each, the iron and steel industry and the cement industry both hold a key position in this regard. In addition to the intrinsic motivation of the companies, extrinsic factors, e.g. changes in the legal requirements or the growing interest towards sustainability shown by investors, also play an important role.

The „green transformation“ in the iron and steel industry is leading to new production processes, such as direct reduced iron ore using hydrogen gas and the expansion of electric arc furnaces. This also results in a change regarding the side-stream products. There will be a reduction in the availability of blast furnace slag, which is used in its granulated form as a substitute for clinker in the cement industry. It is therefore necessary to find and research alternatives to blast furnace slag in order to further mitigate process eminent CO<sub>2</sub>-emission in the cement industry.

During its production, granulated blast furnace slag is solidified in an amorphous state in order to develop latent hydraulic properties, that lead to its suitability as a binder material. In the past, this was achieved using a wet granulation process. Not only does this result in the loss of the useable energy of the mineral phase, but more energy is needed to dry the granulate. Dry granulation using rotary atomization, on the other hand, makes it possible to utilise the thermal energy stored in the product and save on drying energy at the same time. In dry granulation, centrifugal force is used to cause the molten material to disintegrate into droplets. The energy, which is transferred to the air during cooling can then be used as process heat.

In order to be able to study the effects of rotary atomization of residual mineral products, a corresponding system is required. The aim of this work is therefore to design, engineer and build a laboratory-scale rotary atomizer at the Chair of Thermal Processing Technology. It should be possible to combine the atomizer with the existing induction melting plant.

The results of the rotary atomizer tests show that the system is capable of producing particles that meet the requirements for being used as binder materials. The properties of the particles are furthermore in line with the calculation which were carried out beforehand.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis . . . . .	VII
Abbildungsverzeichnis . . . . .	VIII
Tabellenverzeichnis . . . . .	XI
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XII
Nomenklatur . . . . .	XIII
1 Einleitung und Motivation . . . . .	1
1.1 Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen als Bindemittelkomponente	3
1.2 Energetische Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen . . . . .	6
1.3 Fragestellung und Zielsetzung . . . . .	7
2 Grundlagen der Rotationszerstäubung . . . . .	8
2.1 Abtropfen . . . . .	8
2.2 Flüssigkeitsstrahlzerfall . . . . .	9
2.3 Rotationszerstäubung . . . . .	12
3 Material und Methode . . . . .	19
3.1 Auslegung, Konstruktion und Bau der Rotationszerstäubung . . . . .	19
3.2 Versuche mit der Rotationszerstäubung . . . . .	20
3.3 Stoffeigenschaften des zu untersuchenden Materials . . . . .	22
4 Durchführung . . . . .	24
4.1 Auslegung der Rotationszerstäubung . . . . .	24
4.2 Neukonstruktion der Induktionsschmelzanlage . . . . .	25
4.3 Konstruktion der Rotationszerstäubungsanlage . . . . .	29
4.4 Umbau der Induktionsschmelzanlage . . . . .	32
4.5 Bau der Rotationszerstäubung . . . . .	34
4.6 Versuchsdurchführung . . . . .	38
5 Ergebnisse und Diskussion . . . . .	40
5.1 Auslegung der Rotationszerstäubung . . . . .	40
5.2 Konstruktion der Rotationszerstäubung . . . . .	45
5.3 Bau der Rotationszerstäubung . . . . .	48
5.4 Versuche mit der Rotationszerstäubung . . . . .	49
6 Schlussfolgerungen und Ausblick . . . . .	63
7 Bibliografie . . . . .	65
A Deklaration KI und generativer Methoden . . . . .	A
B Auswertung Massenstrom . . . . .	B
C Auswertung der Partikelgröße mit Python . . . . .	C
D Konstruktionspläne . . . . .	E

# Abbildungsverzeichnis

1	Globaler Ausstoß an Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) zwischen 1990 und 2023 [1]. . . . .	1
2	Prognostizierter Ausstoß an Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) der Zement- bzw. der Eisen- und Stahlindustrie für die Szenarien: „Stated Policies Scenario“ (STEPS), „Announced Pledges Scenario“ (APS) und „Net Zero Emissions by 2050 Scenario“ (NZE) [2]. . . . .	2
3	Entwicklung der Zementzusammensetzung von 2020 bis 2070 im „Sustainable Development Scenario“ (Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)) [3]. . . . .	3
4	Anteil der verschiedenen Routen an der globalen Rohstahlproduktion für das Stated Policies Scenario (STEPS) und Sustainable Development Scenario (SDS) der Internationalen Energieagentur (Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace (BF/BOF), Smelting Reduction/Basic Oxygen Furnace (SR/BOF), Direct Reduced Iron/Electric Arc Furnace (DRI/EAF), Electric Furnace (EF), Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)) [6]. . . . .	4
5	Nebenprodukte bei der Erzeugung von Rohstahl über die integrierte Hochofensauerstoffblaskonverter-Route (Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace (BF/BOF)) und die Elektrolichtbogenofen-Route (Electric Arc Furnace (EAF)) [8]. . . . .	5
6	Konzept einer Trockengranulationsanlage für Hochofenschlacke [18]. . . . .	7
7	Schematische Darstellung des Abtropfvorgangs von (a) Kapillaren und (b) benetzten Oberflächen [22]. . . . .	8
8	Zerfallsbereiche von Flüssigkeitsstrahlen (a) Rayleigh-Bereich, (b) erster windinduzierter Bereich, (c) zweiter windinduzierter Bereich und (d) Zerstäubungsbereich [22]. . . . .	9
9	Klassifizierung von verschiedenen Zerfallsbereichen anhand der Reynoldszahl $Re$ und der Ohnesorge-Zahl $Oh$ [23]. . . . .	10
10	Schematische Darstellung des Zerfalls von Flüssigkeitsstrahlen für langsame Austrittsgeschwindigkeiten nach [25]. . . . .	10
11	Vergleich zwischen (a) dem nach Rayleigh [27] modellierten und (b) dem tatsächlichen Flüssigkeitszerfall [28]. . . . .	11
12	Einteilung von Rotationszerstäubern nach der Geometrie ihrer Rotationskörper [18], [30]. . . . .	13
13	Verlauf der Fluidströmung beim Auftreffen auf die rotierende Scheibe mit dem (1) Aufgabestahl, dem (2) Staupunkt, der (3) Filmströmung und dem (4) Zerfallsbereich [22]. . . . .	13
14	Zerfallsmechanismen bei der Rotationszerstäubung [31]. . . . .	14
15	Bezogene Filmstärke $\delta^*$ in Abhängigkeit vom bezogenen Radius $r^*$ für unterschiedliche Strömungsbedingungen [34]. . . . .	16
16	Schema der methodischen Herangehensweise zur Auslegung, Konstruktion und Errichtung der Rotationszerstäubung. . . . .	19

17	Aufbau des Tiegelsystems beim Schmelzversuch für die Rotationszerstäubung mit 1) Keramikfasermatte, 2) Stopfen, 3) Graphittiegel, 4) Keramiktiegel, 5) Probenmaterial, 6) Kupferspule, 7) Feuerfestzement, 8-10) Thermoelemente Typ K.	20
18	Input- und Outputströme der Versuche mit der Rotationszerstäubung.	21
19	Dynamische Viskosität der Hüttensandprobe E2018-032 gemessen mit einem <i>Anton Paar FRS 1800</i> Hochtemperatur-Viskosimeter und -Rheometer [48].	23
20	Visualisierung der bestehenden Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.	26
21	<i>InduMelt</i> mit 1) Spule, 2) Leistungskondensatoren, 3) Netzteil, 4) Kühlgerät und 5) Unterkonstruktion.	26
22	Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik in ihrer Ursprungsvariante.	27
23	Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bei Variante 1: Vorrücken des Schwingkreises.	28
24	Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bei Variante 2: Versetzen des Leistungskondensators.	28
25	Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bei Variante 3: Drehung des Schwingkreises.	29
26	Doppelwandiger Stahlbehälter aus dem Projekt „InnoBla“ [51].	30
27	Schnitt durch die Rotationszerstäubung mit 1) Tiegelhalterung, 2) Drehscheibe, 3) Motorschutz, 4) Motor, 5) Behälter, 6) Maschinentisch und 7) Unterkonstruktion.	30
28	Schnitt durch die Rotationszerstäubung und die Induktionsschmelzanlage.	31
29	Rohr- und Instrumentationsschema des Kühlkreislaufs.	32
30	Fotografie des neu montierten Schwingkreises auf der oberen Platte der Induktionsschmelzanlage <i>InduMelt</i> .	33
31	Fotografie des neuen Bedienpaneels der Induktionsschmelzanlage <i>InduMelt</i> .	33
32	Fotografie der neuen Kontrollbox der Induktionsschmelzanlage <i>InduMelt</i> .	34
33	Fotografie der Unterkonstruktion des Rotationszerstäubers aus 40 mm Aluminium Konstruktionsprofilen.	34
34	Fotografie des Ausschnitts am Behälterboden zur Durchführung des Elektromotors.	35
35	Fotografie der Unterkonstruktion mit aufgesetztem Behälter.	36
36	Fotografie vom Aufbau des Maschinentischs mit Schwingungsdämpfern, Elektromotor und Drehscheibe.	37
37	Fotografie der montierten Tiegelhalterung mit einem Ring aus Feuerfestzement.	38
38	Positionierung der Messgeräte für die Versuche an der Rotationszerstäubung.	38
39	Minimaler Scheibendurchmesser in Abhängigkeit der Drehzahl zur Verhinderung von Schlupf.	41
40	Berechnung des minimalen Volumenstroms $\dot{V}_{min}$ zur Verhinderung einer Gerineströmung nach [22], [32] für unterschiedliche Benetzungswinkel $\gamma$ .	41
41	Berechnung der voraussichtlichen Grenzvolumenströme ( $\dot{V}_{min}$ : Türkis, $\dot{V}_{max}$ : Orange) für die Übergänge der Zerfallsbereiche.	42
42	Verlauf der Filmströmung auf der Drehscheibe.	43

43	Abhängigkeit der Randdicke von der Drehzahl. . . . .	43
44	Abhängigkeit des Tropfendurchmessers von der Drehzahl (Grau: direkter Tropfenzerfall, Türkis: Fadenzerfall, Orange: Lamellenzerfall; Angabe als Sauterdurchmesser $x_{32}$ , außer Dunsikii und Nikitin 1972: $x_{0,5}$ ). . . . .	44
45	Visualisierung der adaptierten Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. . . . .	45
46	Visualisierung der finalen Rotationszerstäubungsanlage mit <i>Fusion 360</i> . . . . .	46
47	Visualisierung der adaptierten Induktionsschmelzanlage <i>InduMelt</i> und der neuen Rotationszerstäubung mit dem Programm <i>Fusion 360</i> . . . . .	47
48	Fotografie der fertiggestellten Rotationszerstäubung und der umgebauten Induktionsschmelzanlage. . . . .	48
49	Fotografie der entstandenen künstlichen Mineralfasern bei Versuch 1. . . . .	49
50	Temperatur- und Leistungsprofil der Induktionsschmelzanlage beim Aufheizvorgang zu Versuch 1 (TE = Thermoelement). . . . .	50
51	Temperatur- und Leistungsprofil der Induktionsschmelzanlage beim Aufheizvorgang zu Versuch 2 (TE = Thermoelement). . . . .	51
52	Temperaturprofil des Abstichs bei Versuch 1. . . . .	52
53	Temperaturprofil des Abstichs bei Versuch 2. . . . .	52
54	Aufnahme des Behälters der Rotationszerstäubung mit der Action-Kamera bei Versuch 1. . . . .	54
55	Aufnahme der Drehscheibe mit der Videokamera bei Versuch 1. . . . .	54
56	Aufnahme der Drehscheibe mit der Wärmebildkamera bei Versuch 1. . . . .	55
57	Aufnahme der Drehscheibe beim Fehlbetriebszustand einer Gerinneströmung mit der Wärmebildkamera bei Versuch 1. . . . .	55
58	Aufnahme der Drehscheibe mit der Videokamera bei Versuch 2. . . . .	56
59	Aufnahme der Partikel im Flug mit der Hochgeschwindigkeitskamera bei Versuch 2. . . . .	56
60	Aufnahme der Drehscheibe und der Behälterwand mit der Wärmebildkamera bei Versuch 2. . . . .	57
61	Bestimmung der Verteilungsdichte des Tropfendurchmessers bei Versuch 1 mittels einer Siebanalyse. . . . .	58
62	Bestimmung der Verteilungsdichte des Tropfendurchmessers bei Versuch 2 mittels einer Siebanalyse. . . . .	58
63	Markierung der Partikelkontouren bei der Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit einem Python-Skript. . . . .	59
64	Bestimmung der Verteilungsdichte des Tropfendurchmessers bei Versuch 2 mittels einer Bildauswertung. . . . .	60
65	Vergleich der Berechnung der voraussichtlichen Grenzvolumenströme für die Übergänge der Zerfallsbereiche und den tatsächlichen Volumenströme aus den Versuchen ( $\dot{V}_{min}$ : Türkis, $\dot{V}_{max}$ : Orange). . . . .	61
66	Diffraktogramm der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) der granulierten Hütten sandproben [58]. . . . .	62

# Tabellenverzeichnis

1	Anforderungen an Hüttensand als Klinkerersatzstoff bzw. Zusatzstoff Typ II gemäß ÖNORM EN 197-1 [11], ÖNORM EN 15167-1 [12] und ÖNORM B 3309 [13] aus [15]. . . . .	6
2	Minimaler Volumenstrom für den Fadenzerfall bei der Rotationszerstäubung [34], [37]–[40]. . . . .	17
3	Maximaler Volumenstrom für den Fadenzerfall bei der Rotationszerstäubung [39]–[41]. . . . .	17
4	Empirische Formeln zur Berechnung des Tropfendurchmessers beim direkten Tropfenzerfall [38], [39]. . . . .	18
5	Empirische Formeln zur Berechnung des Tropfendurchmessers beim Fadenzerfall [37], [39], [42], [43]. . . . .	18
6	Empirische Formel zur Berechnung des Tropfendurchmessers beim Lamellenzerfall [39]. . . . .	18
7	Chemische Zusammensetzung des Hüttensands <i>HÜS4500</i> [45]. . . . .	22
8	Stoffeigenschaften von Hüttensand. . . . .	23
9	Signal- und Steuergrößen für die Inbetriebnahme-Versuche der Rotationszerstäubung. . . . .	39
10	Massenbilanz der Rotationszerstäubungsversuche mit Hüttensand ( <i>HÜS4500</i> ). . . . .	49
11	Berechnung der Massen- und Volumenströme bei den Rotationszerstäubungsversuchen mit Hüttensand ( <i>HÜS4500</i> ). . . . .	53
12	Vergleich der berechneten Durchmesser und der Korngrößenverteilungen. . . . .	61
13	Deklaration des Einsatzes künstlicher Intelligenz (KI) basierter Werkzeuge. . . . .	A
14	Liste verwendeter Prompts für den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI). . . . .	A
15	Auswertung des Massenstroms beim Abstich der Versuche aus dem Projekt „UpcycSlag-Binder“ [45]. . . . .	B

# Abkürzungsverzeichnis

APS	Announced Pledges Scenario
BF/BOF	Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace
CAD	Computer Aided Design
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DRI/EDF	Direct Reduced Iron/Electric Arc Furnace
DSG	Dry Slag Granulation
EAF	Electric Arc Furnace
EF	Electric Furnace
IEA	Internationale Energie Agentur
KI	künstliche Intelligenz
KMF	künstliche Mineralfasern
LOI	Loss on Ignition
NZE	Net Zero Emissions by 2050 Scenario
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SDS	Sustainable Development Scenario
SR/BOF	Smelting Reduction/Basic Oxygen Furnace
STEPS	Stated Policies Scenario

# Nomenklatur

$\gamma$	Benetzungswinkel	rad
$\delta$	Dicke des Flüssigkeitsfilms auf der Drehscheibe	m
$\delta^*$	Bezogene Schichtdicke der Filmströmung	-
$\eta$	dynamische Viskosität	Pa s
$\lambda_{\text{opt}}$	Optimale Wellenlänge für den Strahlzerfall	m
$\nu$	kinematische Viskosität	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\pi$	Kreiszahl	-
$\rho$	Flüssigkeitsdichte	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_{\text{diff}}$	Dichtedifferenz	$\text{kg m}^{-3}$
$\sigma$	Oberflächenspannung	$\text{N m}^{-1}$
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	$\text{rad s}^{-1}$
$a^*$	dimensionslose Beschleunigungsziffer	-
$Bo$	Bond-Zahl	-
$d$	Durchmesser des Flüssigkeitsstrahls	m
$D$	Durchmesser der Scheibe	m
$f$	Frequenz	$\text{s}^{-1}$
$F_{\sigma}$	Oberflächenkraft	N
$F_A$	Auftriebskraft	N
$F_g$	Schwerkraft	N
$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m s}^{-2}$
$L_Z$	Strahlzerfallslänge	m
$\dot{m}$	Massenstrom	$\text{kg s}^{-1}$
$n$	Drehzahl	$\text{min}^{-1}$
$Oh$	Ohnesorge-Zahl	-
$r$	Radius der Drehscheibe	m
$r^*$	Bezogener Radius der Drehscheibe	-
$Re$	Reynolds-Zahl	-
$t$	Zeit	s
$\bar{u}$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$\text{m s}^{-1}$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$\dot{V}^*$	dimensionsloser Volumenstrom	-
$We$	Weber-Zahl	-
$x$	Tropfendurchmesser	m
$x_{0.5}$	Median des Tropfendurchmessers	m
$x_{10}$	Mittlerer Durchmesser der Tropfen	m
$x_{32}$	Verhältnis aus Volumen zu Oberfläche monodisperser Kugeln (Sauterdurchmesser)	m

$x_{peak}$	Durchmesser mit der größten Häufigkeit in einer Korngrößenverteilung	m
Z	Zerstäuberzahl	-

# 1 Einleitung und Motivation

Der globale Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) im Jahr 2023 betrug 37,4 Milliarden Tonnen (Mrd. t), was einer Steigerung um 410 Millionen Tonnen (Mio. t) zum Jahr 2022 entspricht [1]. Die Steigerung der Treibhausgasemissionen führte dazu, dass im Jahr 2022 die globale Mitteltemperatur ca. 1,2 °C über den vorindustriellen Werten lag, was schon nahe an der 1,5 °C-Marke des Pariser Klimaabkommen ist. Der Verlauf der Emissionen von 1990 bis 2023 ist in Abbildung 1 dargestellt. [2]

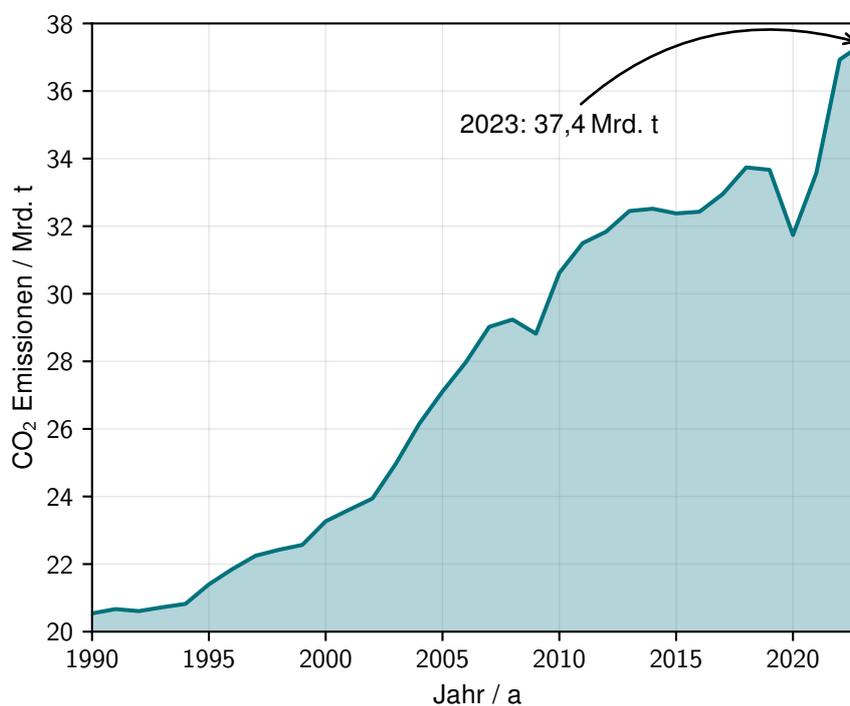


Abbildung 1: Globaler Ausstoß an Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zwischen 1990 und 2023 [1].

Im Jahr 2022 lag der durch die Eisen- und Stahlindustrie verursachte Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei 7,11 %, was 2623 Mio. t CO<sub>2</sub> entspricht, womit sie jener Industriesektor mit meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist. An zweiter Stelle weißt die Zementindustrie 2418 Mio. t, bzw. 6,55 % der global Emissionen, auf. Die Eisen- und Stahl- und die Zementindustrie tragen somit eine große Verantwortung in der Erreichung der Klimaziele. Darum wurden von der Internationalen Energie Agentur (IEA) verschiedene Szenarien entwickelt, die den benötigten Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigen, siehe Abbildung 2. [2]

Das „Stated Policies Scenario“ (STEPS) beschreibt dabei die Entwicklung basierend auf dem Status-Quo für die verschiedenen Sektoren, Länder und Regionen. Einen Schritt weiter geht das „Announced Pledges Scenario“ (APS), das das Erreichen der von den Ländern skandierten nationalen Klimaziele abbildet. Schließlich zeigt das „Net Zero Emissions by 2050 Scenario“ die benötigte Reduktion der Emissionen für das Erreichen des 1,5 °C Ziels auf. [2]

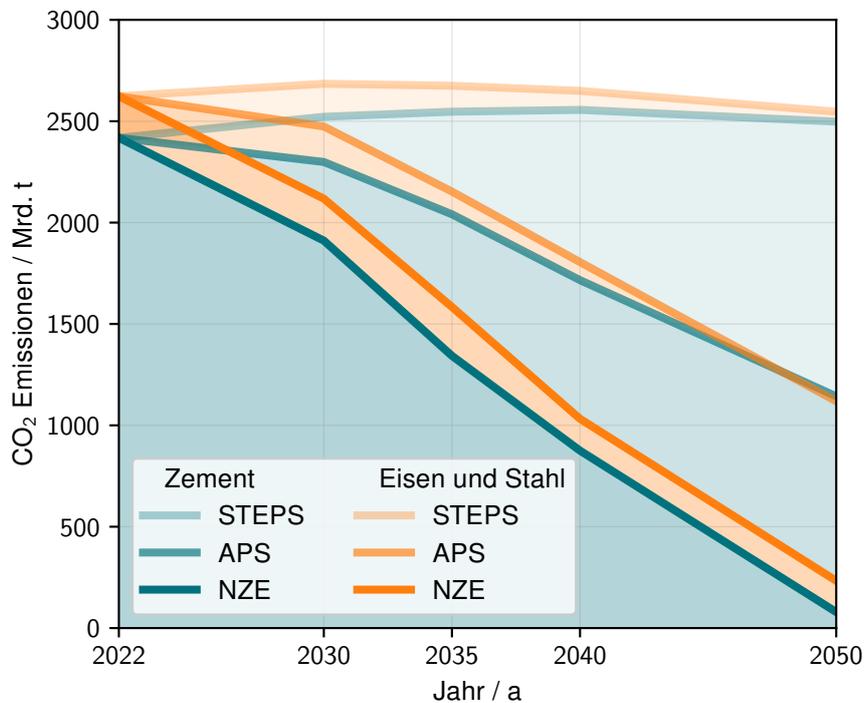


Abbildung 2: Prognostizierter Ausstoß an Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) der Zement- bzw. der Eisen- und Stahlindustrie für die Szenarien: „Stated Policies Scenario“ (STEPS), „Announced Pledges Scenario“ (APS) und „Net Zero Emissions by 2050 Scenario“ (NZE) [2].

Wie in Abbildung 2 erkennbar ist, müssen zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 fast die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Für das „Announced Pledges Scenario“ (APS) sind es jedenfalls die Hälfte der aktuellen Emissionen. Dies benötigt eine Umstellung der Produktionsprozesse der Zementindustrie und der Eisen- und Stahlindustrie in den kommenden Jahren.

## 1.1 Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen als Bindemittelkomponente

Zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie stammen aus der Kalzinierung des Klinkers, bei der CaCO<sub>3</sub> unter Abspaltung von CO<sub>2</sub> in CaO umgewandelt wird. Um diese Emissionen zu vermindern, gibt es die Möglichkeit den Klinkeranteil im Zement durch Substitution mit alternativen Bestandteilen zu reduzieren, oder mittels Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) das entstandene CO<sub>2</sub> zu binden. Das „Sustainable Development Scenario“ (SDS) der IEA, das Netto-Null Emissionen bis 2070 anstrebt, gibt dazu, wie in Abbildung 3 dargestellt, einen Fahrplan. [3]

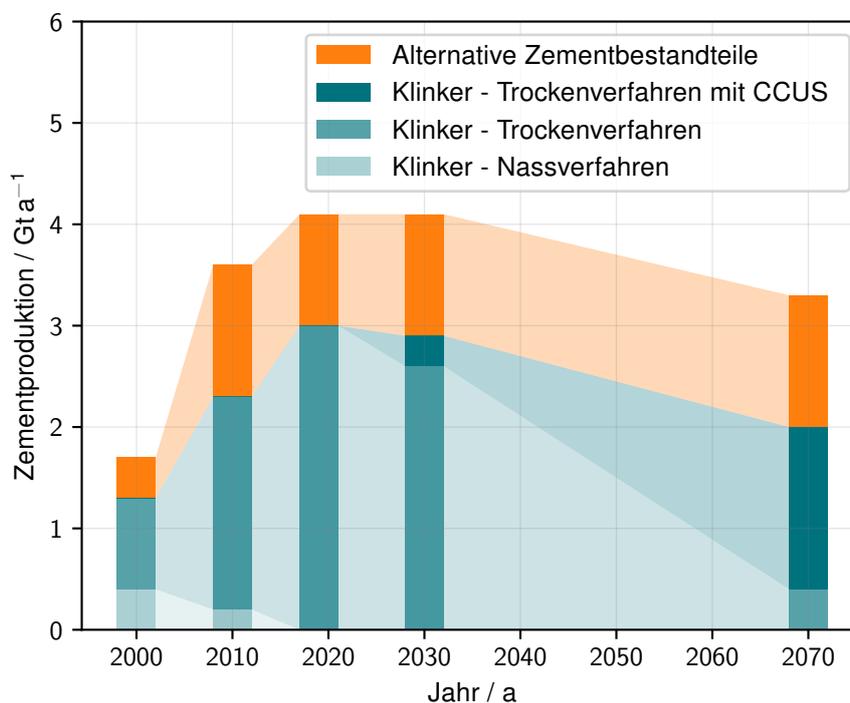


Abbildung 3: Entwicklung der Zementzusammensetzung von 2020 bis 2070 im „Sustainable Development Scenario“ (Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)) [3].

Das neuere NZE-Szenario geht dabei noch einen Schritt weiter und prognostiziert einen Rückgang des Anteils von Klinker im Zement bis 2050 auf 57%, dabei sollen 93% des Klinkers emissionsfrei produziert werden. Das entspricht einer Bindung von 1310 Mio. t CO<sub>2</sub> a<sup>-1</sup> durch CCUS-Verfahren im Jahr 2050. Bis 2030 sollen gemäß NZE-Szenario CCUS-Projekte im Umfang von 170 Mio. t CO<sub>2</sub> a<sup>-1</sup> ausgebaut werden, wohingegen die aktuell geplanten Projekte eine Kapazität von weniger als 25 Mio. t CO<sub>2</sub> a<sup>-1</sup> aufweisen. [4]

### 1.1.1 Bindemittelkomponenten aus der Eisen- und Stahlindustrie

In der Zementindustrie führt die „Greentransformation“ der Eisen- und Stahlindustrie zur Verknappung des Angebots an Sekundärzumahlstoffen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, sieht das Sustainable Development Szenario eine Verschiebung des Schwerpunkts der Produktionsrouten von Rohstahl vor. Die Fokussierung auf die Elektrostahlroute und der vermehrte Einsatz und Stahlschrott hat auch eine Verschiebung der Neben- und Abfallproduktströme zur Folge. [5]

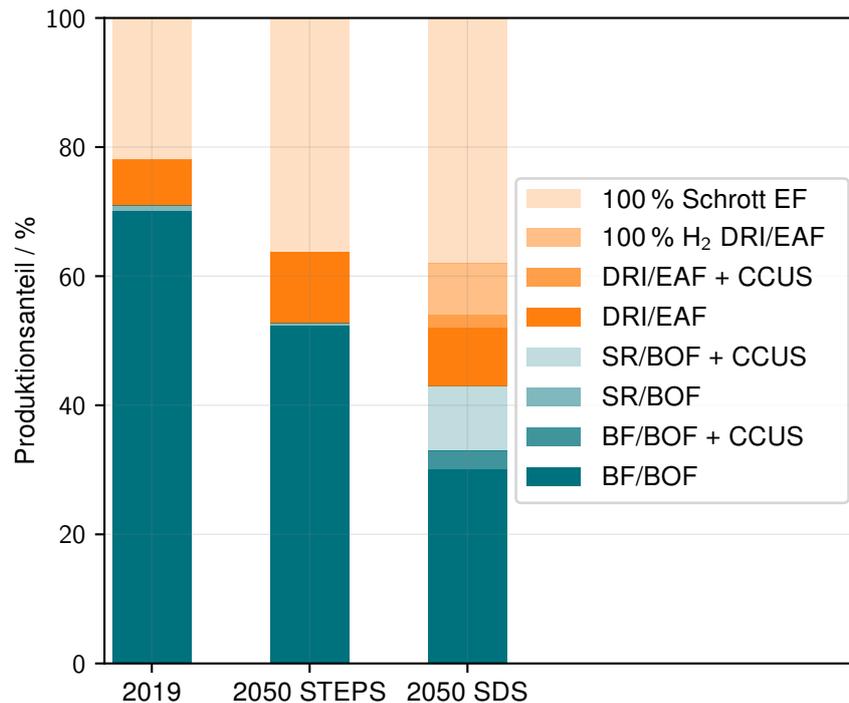


Abbildung 4: Anteil der verschiedenen Routen an der globalen Rohstahlproduktion für das Stated Policies Scenario (STEPS) und Sustainable Development Szenario (SDS) der Internationalen Energieagentur (Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace (BF/BOF), Smelting Reduction/Basic Oxygen Furnace (SR/BOF), Direct Reduced Iron/Electric Arc Furnace (DRI/EAF), Electric Furnace (EF), Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)) [6].

Wie in Abbildung 5 dargestellt ist, kommt es durch die neue Produktionsroute mit dem Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnace - EAF) zum Wegfall von Hochofenschlacke. Im Jahr 2018 wurde die in Europa produzierte Hochofenschlacke zu 80,3 % in der Beton- und Zementindustrie eingesetzt, hingegen die Stahlwerksschlacke nur zu 5,4 %. [7], [8]

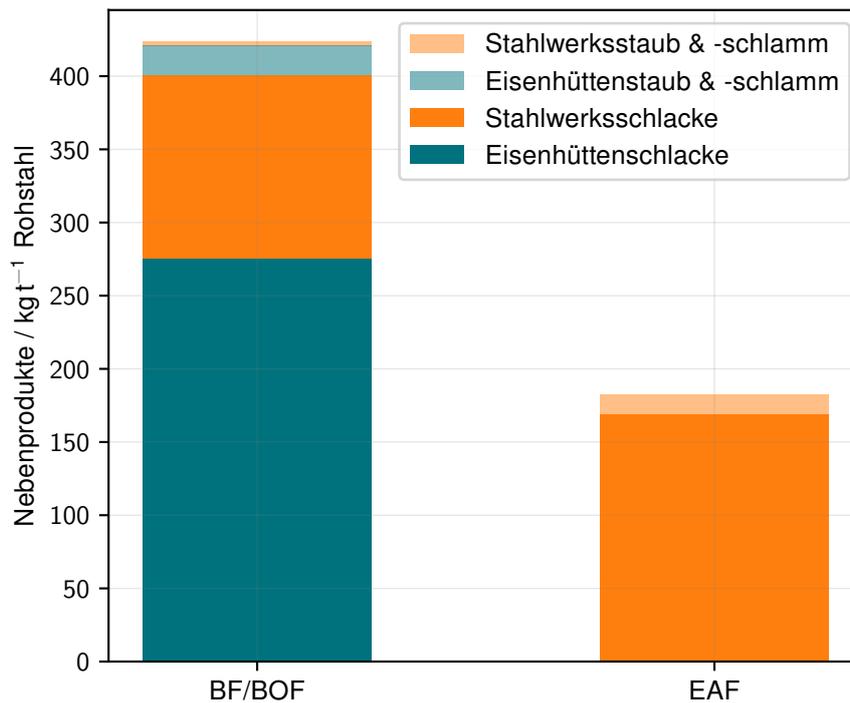


Abbildung 5: Nebenprodukte bei der Erzeugung von Rohstahl über die integrierte Hochofen-Sauerstoffblaskonverter-Route (Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace (BF/BOF)) und die Elektrolichtbogenofen-Route (Electric Arc Furnace (EAF)) [8].

### 1.1.2 Aufkommen anderer mineralischer Reststoffe

Neben den Trends in der Eisen- und Stahl-, oder der Zementindustrie, führt auch die nationale Gesetzgebung zu neuen Fragestellungen hinsichtlich mineralischer Reststoffe. So etwa das Bundesgesetzblatt Nr. II 144/2021 [9], nach dem ab dem 01.01.2027 keine weiteren Abfälle bestehend aus künstlichen Mineralfasern (KMF) mehr deponiert werden dürfen. Daher müssen für KMF-Abfälle neue Verwertungsmöglichkeiten geschaffen werden. Hierzu läuft am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bereits unter anderem das Forschungsprojekt „BitKOIN - CO<sub>2</sub>-reduzierte Bindemittel durch thermochemische Konversation mineralwolleabfallhaltiger Reststoffkombinationen“ [10].

### 1.1.3 Normative Grenzwerte für die stoffliche Verwertung als Bindemittelkomponente

Für die Verwendung von Hüttensand in der Zementindustrie gelten gemäß ÖNORM EN 197-1 [11], ÖNORM EN 15167-1 [12] und ÖNORM B 3309 [13] gewisse Anforderungen, die in der Tabelle 1 zusammengefasst sind. Da es für andere mineralische Reststoffe noch keine dezidierten Normen gibt, werden in Anlehnung die Normen für Hüttensand herangezogen. Für diese Arbeit besonders relevant ist dabei der Glasgehalt, der maßgeblich die reaktiven Eigenschaften des Bindemittels bestimmt [14].

Tabelle 1: Anforderungen an Hüttensand als Klinkerersatzstoff bzw. Zusatzstoff Typ II gemäß ÖNORM EN 197-1 [11], ÖNORM EN 15167-1 [12] und ÖNORM B 3309 [13] aus [15].

	Klinkerersatzstoff	Zusatzstoff Typ II	
	ÖNORM EN 197-1	ÖNORM EN 15167-1	ÖNORM B 3309
Glasanteil	$\geq 2/3$	$\geq 2/3$	
CaO+SiO <sub>2</sub> +MgO	$\geq 2/3$	$\geq 2/3$	
(CaO+MgO)/(SiO <sub>2</sub> )	$> 1,0$	$> 1,0$	
MgO		$\leq 18 \% ^a$	$\leq 12 \% ^{a,d}$
SO <sub>3</sub>	$\leq 4,0 \% ^a$	$\leq 2,5 \% ^a$	$\leq 4,0 \% ^e$
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent			$\leq 3,5 \% ^a$
Chloridgehalt	$\leq 0,10 \% ^a$	$\leq 0,10 \% ^{a,c}$	$\leq 0,10 \% ^a$
Freikalk (CaO)			$\leq 1,0 \% ^b$
Restkohlenstoff			$\leq 3,0 \% ^b$
Glühverlust	$\leq 5,0 \% ^a$	$\leq 3,0 \% ^a$	$\leq 10,0 \% ^b$
<sup>a</sup> gemäß Prüfnorm EN 196-2 <sup>b</sup> gemäß Prüfnorm ÖNORM EN 450-1 <sup>c</sup> Ein höherer Chloridgehalt ist erlaubt, wenn der maximale Chloridgehalt angegeben wird. <sup>d</sup> Ein MgO-Anteil bis maximal 15,0% ist erlaubt, wenn die Raumbeständigkeit gemäß ÖNORM B 3309-1:2010 Abschnitt 4.10 erbracht wird. <sup>e</sup> Bestimmung nach ÖNORM B 3309-1:2010 Anhang E			

## 1.2 Energetische Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen

Für die Verwendung von mineralischen Reststoffen als Bindemittelkomponente ist meist eine vorangehende Reduktion und Konditionierung notwendig, um die benötigten Grenzwerte einhalten zu können. Der Schritt erfordert eine thermochemische Behandlung bei der eine Art synthetischer Hüttensand hergestellt wird. [10]

Bei diesem Prozess wird, wie in der Eisen- und Stahlherstellung, die Schlacke mit bis zu 1650 °C abgestochen. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus weist sie somit eine große Menge thermischer Energie auf. Laut Barati et al. [16] beträgt diese in der Eisen- und Stahlindustrie global gesehen 330 TW h a<sup>-1</sup>. In der konventionellen Hüttensandherstellung mittels Nassgranulation nach dem Stand der Technik wird diese Energiemenge nicht ausgenützt. Die flüssige Schlacke besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von 1 W m<sup>-1</sup> K bis 3 W m<sup>-1</sup> K, bzw. 0,1 W m<sup>-1</sup> K bis 0,3 W m<sup>-1</sup> K im festen Zustand, und ist somit ein schlechter Wärmeleiter. Dadurch wird zur effizienten Wärmerückgewinnung eine große Oberfläche benötigt. Aktuelle Bestrebungen zielen darauf ab, durch eine trockene Granulation der schmelzflüssigen Schlacke die Oberfläche soweit zu vergrößern, dass eine Wärmeübertragung auf die Luft technisch möglich wird. Ein diesbezügliches Verfahrenskonzept ist in Abbildung 6 dargestellt. [17]

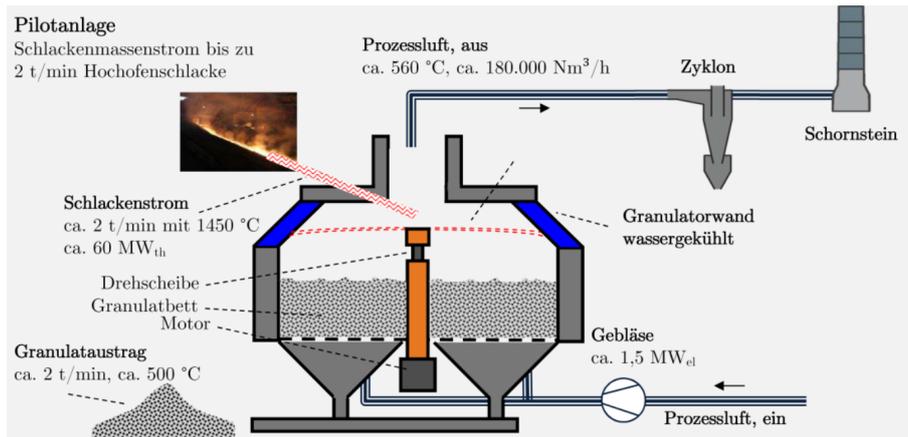


Abbildung 6: Konzept einer Trockengranulationsanlage für Hochofenschlacke [18].

Neben der Rückgewinnung der thermischen Energie als Prozesswärme, ist es theoretisch auch möglich diese für endotherme chemische Reaktionen bereit zu stellen, wie in Zhang et al. [19] dargelegt ist. Dadurch lässt sich, wie in Akiyama et al. [20] beschrieben, eine höhere exergetische Effizienz erreichen. Unter anderem eignen sich die Temperaturniveaus für die Methan-Reformierung, oder die Kalzinierung von Kalkstein, wie sie in der Zementindustrie stattfindet. Dadurch hätte diese Form der Verwendung einen doppelten Effekt bei der Dekarbonisierung der Zementindustrie. Ein derartiges Konzept wurde bereits unter anderem von Purwanto et al. [21] beschrieben. [20]

### 1.3 Fragestellung und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit soll die Eignung der Rotationszerstäubung zur Herstellung von Bindemittelkomponenten für die Zementindustrie aus mineralischen Reststoffen wissenschaftlich untersucht werden. Dazu werden die physikalischen Grundlagen und Rahmenbedingungen für die Konstruktion einer Rotationszerstäubungsanlage mit Drehscheibe recherchiert. Basierend auf den Ergebnissen wird anschließend eine, für den Betrieb im Technikum des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik ausgelegte, Rotationszerstäubung konstruiert und errichtet.

Abschließend soll mit Versuchskampagnen die Funktionsfähigkeit der Anlage überprüft werden. Dabei soll das Hauptaugenmerk auf einer adäquaten Tropfengröße und einem ausreichend hohen Glasgehalt liegen, um auf eine spätere Bindemittelleignung schließen zu können. Die Erfassung der Messdaten erfolgt mittels Siebanalyse und bildgebenden Verfahren (Wärmebild- und Hochgeschwindigkeitskamera) .

## 2 Grundlagen der Rotationszerstäubung

Der Zerfall von Flüssigkeiten kann in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Dazu zählen das Abtropfen, der Flüssigkeitsstrahlzerfall, der Lamellenzerfall und das Zerstäuben von Flüssigkeiten durch Gase. Nachfolgend werden das Abtropfen sowie der Flüssigkeitsstrahlzerfall weiter behandelt, da diese für die Rotationszerstäubung relevant sind. [22]

### 2.1 Abtropfen

Den einfachsten Flüssigkeitszerfall stellt das Abtropfen einer Flüssigkeit dar, da hier nur die Schwerkraft, die Auftriebskraft sowie die Kapillarkräfte eine Rollen spielen und der Prozess als quasi-statisch angenommen werden kann. Eine schematische Darstellung des Abtropfens ist in Abbildung 7 dargestellt. [22]

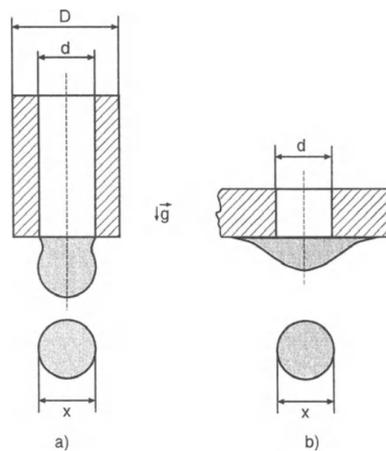


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Abtropfvorgangs von (a) Kapillaren und (b) benetzten Oberflächen [22].

Im Moment des Abreißens ist die Summe aller Kräfte die auf Tropfen wirken null  $F_A + F_g + F_\sigma = 0$ .

Durch Umformungen ergibt sich daraus

$$\frac{\pi x^3 \rho_{\text{diff}} g}{6} = \pi d \sigma \quad (1)$$

wodurch der maximale Tropfendurchmesser

$$x_{\text{max}} = \left( \frac{6d\sigma}{\rho_{\text{diff}} g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

mit dem Kapillarrohrdurchmesser  $d$ , der Dichtedifferenz zwischen den Medien  $\rho_{\text{diff}}$ , der Oberflächenspannung  $\sigma$  sowie der Erdbeschleunigung  $g$  berechnet werden kann. Als charakteristische

dimensionslose Größe für diese Zerfallsart gilt die Bond-Zahl

$$Bo \equiv \frac{d^2 \rho_{\text{diff}} g}{\sigma} \quad (3)$$

die das Verhältnis zwischen Schwerkraft und Kapillarkraft beschreibt. [22]

## 2.2 Flüssigkeitsstrahlzerfall

Ein Flüssigkeitsstrahl kann auf unterschiedliche Weisen zerfallen, je nachdem welche Verhältnisse zwischen Flüssigkeitsträgheit, Oberflächenspannung und den aerodynamischen Kräften, die auf ihn wirken, herrschen. Mit steigender Reynolds-Zahl werden die verschiedenen Zerfallsprozesse, die in Abbildung 8 dargestellt sind, durchlaufen. [22]

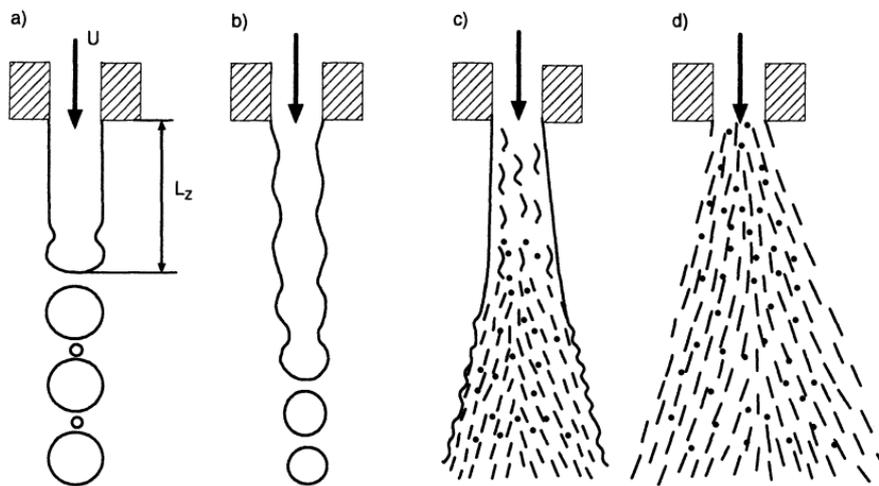


Abbildung 8: Zerfallsbereiche von Flüssigkeitsstrahlen (a) Rayleigh-Bereich, (b) erster windinduzierter Bereich, (c) zweiter windinduzierter Bereich und (d) Zerstäubungsbereich [22].

Reitz hat in [23] diese Übergänge experimentell untersucht und dabei die in Abbildung 9 dargestellte Unterscheidung gefunden. Als charakteristische Größe für den Strömungszustand ist dabei die Reynoldszahl

$$Re = \frac{\bar{u}d}{\nu} \quad (4)$$

mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$ , dem Durchmesser des Flüssigkeitsstrahl  $d$  und der kinematischen Viskosität  $\nu$  angeführt. Für die Berücksichtigung des Einflusses der Viskosität auf den Tropfenzerfall wird die Ohnesorge-Zahl

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma d}} \quad (5)$$

mit der dynamischen Viskosität  $\eta$ , der Dichte  $\rho$ , der Oberflächenspannung  $\sigma$  und dem Strahldurchmesser  $d$  verwendet. [23]

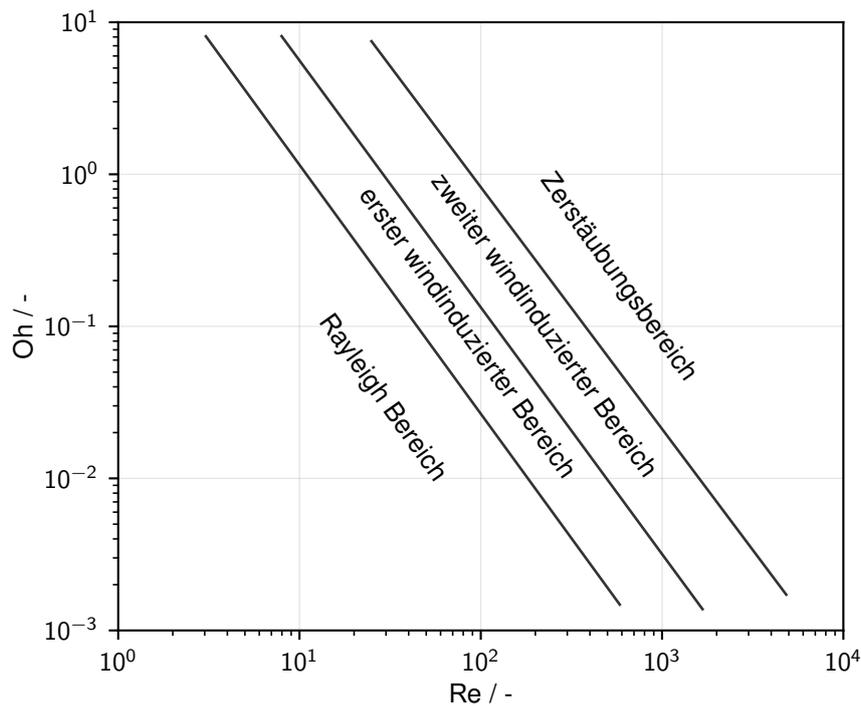


Abbildung 9: Klassifizierung von verschiedenen Zerfallsbereichen anhand der Reynoldszahl  $Re$  und der Ohnesorge-Zahl  $Oh$  [23].

Beim Austreten des Strahls aus der Düse treten Wechselwirkungen zwischen Strahl und Umgebung auf. Dadurch kommt es zu Störungen, die sich wellenartig entlang der Oberfläche ausbreiten. Bei niedrigen Strahlgeschwindigkeiten weisen diese Schwingungen große Wellenlängen und kleine Amplituden auf, während bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten durch instabiles Wachstum kurze Wellenlängen vorrangig sind. Zur Beschreibung wird die Strahlzerfallslänge  $L_Z$  verwendet, die vom Düsenaustritt bis zur Zerfallsstelle gemessen wird, siehe Abbildung 8. [22]

Bei geringen Fluidgeschwindigkeiten spielen bei der Tropfenentstehung hauptsächlich zwei Moden eine Rolle: Der Kurzwellenzerfall und der Langwellen-, oder Rayleigh-Taylor-Zerfall. Der Kurzwellenzerfall tritt im Bereich der Tropfenabschnürung auf, während die langen Kapillarwellen durch den Flüssigkeitsstrahl propagieren. Eine Schema des Mechanismus ist in Abbildung 10 dargestellt. [24]

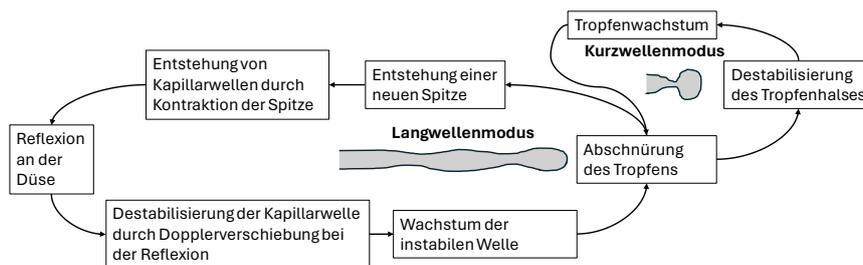


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Zerfalls von Flüssigkeitsstrahlen für langsame Austrittsgeschwindigkeiten nach [25].

### 2.2.1 Kurzwellenzerfall

Die Abschnürung des Tropfen durch den Kurzwellenzerfall wurde unter anderem von Umemura in [26] untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich an der Spitze des Flüssigkeitsstrahles, sofern keine externen Störungen auftreten, eine stehende Welle ausbildet, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Flüssigkeitsstrahl bewegt. Die Wellenlänge  $\lambda_{\text{opt}}$  kann durch die stationäre Lösung der linearen Approximation der Bewegungsgleichung mit

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{\pi}{\sqrt{3}}d = 1,813d \quad (6)$$

berechnet werden, wobei  $d$  den Durchmesser des Flüssigkeitsstrahles angibt. [26]

### 2.2.2 Rayleigh-Taylor-Zerfall

Erste Untersuchungen zum Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen wurden 1873 von Plateau entwickelt und von Rayleigh [27] weitergeführt. Rayleigh wies mit empirischen Versuchen nach, dass der Strahl am stärksten auf Störungswellen vom Betrag 143,7 % des Strahlumfangs beeinflusst wird. Dadurch ergibt sich sich mit  $d$  als Strahldurchmesser

$$\lambda_{\text{opt}} = 4,508d \quad (7)$$

als optimale Störungswellenlänge. Wird der abgetrennte Strahlteil als Zylinder betrachtet, so lässt sich der Durchmesser des Tropfens mit dem äquivalenten Volumen berechnen durch

$$x = 1,89d. \quad (8)$$

Neben den Haupttropfen entstehen in zweiter Ordnung noch kleinere Satellitotropfen deren Volumen jedoch vernachlässigbar ist, wie in Abbildung 11 dargestellt ist.

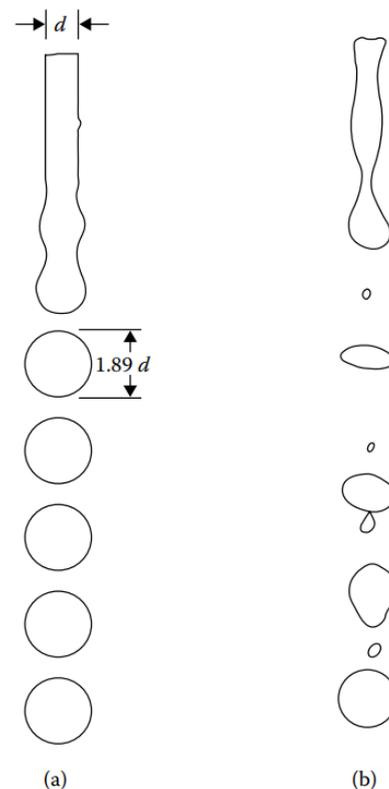


Abbildung 11: Vergleich zwischen (a) dem nach Rayleigh [27] modellierten und (b) dem tatsächlichen Flüssigkeitszerfall [28].

Weber hat in [29] in allgemeineres Modell entwickelt, welches die Flüssigkeitsviskosität  $\eta$  mit ein berechnet. Daher gilt nach Weber für die optimale Zerfallswellenlänge

$$\lambda_{\text{opt}} = \sqrt{2}\pi d \left( 1 + \frac{3\eta}{\sqrt{\rho\sigma d}} \right) \quad (9)$$

und für den Tropfendurchmesser

$$x = 1,88d \left( 1 + 3 \frac{We^{0,5}}{Re} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

wobei  $We$  die dimensionslose Weber-Zahl, die das Verhältnis zwischen den Trägheitskräften und den Kapillarkräften mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  beschreibt,

$$We \equiv \frac{\bar{u}^2 \rho d}{\sigma} \quad (11)$$

darstellt. Die Reynolds-Zahl  $Re$  ist dabei mit der kinematischen Viskosität  $\nu$  definiert als

$$Re \equiv \frac{\bar{u} d}{\nu} \quad (12)$$

und gibt als Verhältnis zwischen konvektiven und molekularen Impulsaustausch Aufschluss über den Strömungszustand im Fluid. [22]

### 2.3 Rotationszerstäubung

Als „Zerstäuben“ wird das Zerteilen von Flüssigkeiten in einzelne Tropfen bezeichnet. Diese weisen dabei eine bestimmte Größe auf und bewegen sich entsprechend ihres Geschwindigkeitsvektors. Durch die Zerteilung erhöht sich die Oberfläche der Flüssigkeit, was Reaktions- und Wärmeübertragungseffekte begünstigt. Dafür wird durch ein rotierendes Element mechanische Energie in das System eingebracht. Die Flüssigkeit bewegt sich aufgrund von Reibungs- und Zentrifugalkräften über den Rand hinaus, wo sie, in Abhängigkeit ihrer Stoffeigenschaften und der Prozessparameter, in Tropfen desintegriert. [18], [22]

#### 2.3.1 Konzepte der Rotationszerstäubung

Die Bauform von Rotationszerstäubern kann anhand der Geometrie des rotierenden Elements unterschieden werden. In Abbildung 12 sind die drei Hauptbauformen nach Sternowsky [30] dargestellt. In dieser Arbeit wird aufgrund des Einsatzzwecks vor allem die Bauform des Scheibenzerstäubers, siehe Abbildung 12a, behandelt, wobei auch der Becherzerstäuber nach Wozniak [22] bei schlecht benetzenden Flüssigkeiten gute Ergebnisse aufweist.

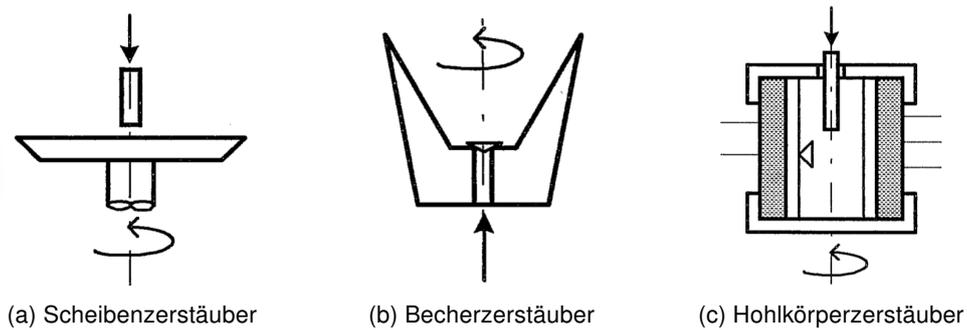


Abbildung 12: Einteilung von Rotationszerstäubern nach der Geometrie ihrer Rotationskörper [18], [30].

### 2.3.2 Strömungsweg

Bei der Rotationszerstäubung erfolgt die Aufgabe des zu zerstäubenden Fluids meistens axial zur Drehscheibe und möglichst konzentrisch. Dadurch bildet sich in der Scheibenmitte der Staupunkt aus, von dem aus das Fluid durch die Fliehkraft in radiale Richtung beschleunigt wird. Die entstehende Filmströmung beeinflusst maßgeblich die Tropfengröße im Zerfallsbereich, siehe Abbildung 13. [22]

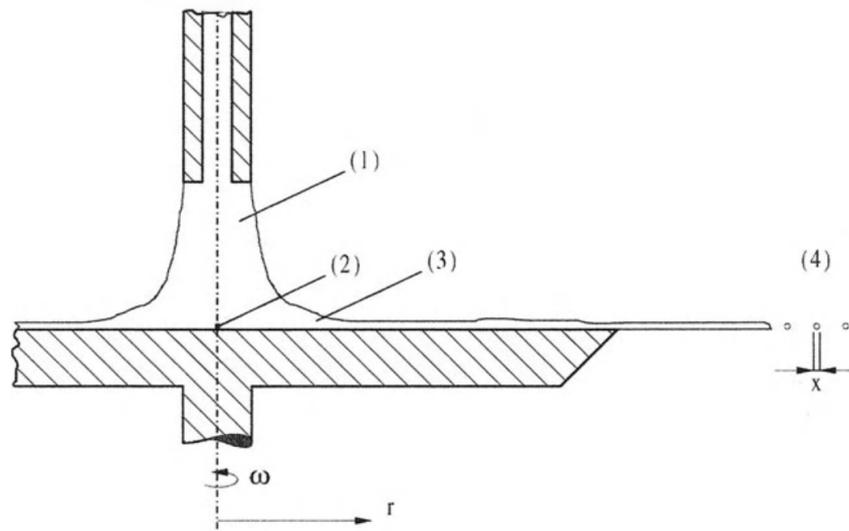


Abbildung 13: Verlauf der Fluidströmung beim Auftreffen auf die rotierende Scheibe mit dem (1) Aufgabestahl, dem (2) Staupunkt, der (3) Filmströmung und dem (4) Zerfallsbereich [22].

Für die Größe der entstehenden Tropfen sind vor allem die Prozessparameter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und Volumenstrom  $\dot{V}$  sowie die Stoffeigenschaften Dichte  $\rho$ , Oberflächenspannung  $\sigma$ , dynamische Viskosität  $\eta$  und der Benetzungswinkel  $\gamma$  ausschlaggebend.

### 2.3.3 Zerfallsmechanismen eines Rotationszerstäubers

In Abhängig der verschiedenen Prozessparameter und Stoffeigenschaften stellen sich unterschiedliche Zerfallsmechanismen ein. Diese sind in Abbildung 14 dargestellt. [28], [31]

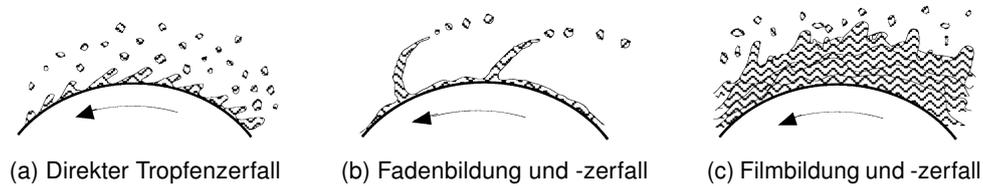


Abbildung 14: Zerfallsmechanismen bei der Rotationszerstäubung [31].

Bei einem niedrigen Volumenstrom stellt sich der direkte Tropfenzerfall ein, bei dem es zu einem „Abtropfen“ der Flüssigkeit kommt, siehe Abbildung 14a. In Anlehnung an das Abtropfen aus Kapillaren stellt sich statisches Gleichgewicht der Zentrifugalkraft und der Oberflächenkraft ein. Daraus resultieren große Primärtropfen und kleine Sekundärtropfen, wodurch sich eine bimodale Verteilung der Tropfengröße einstellt. Wird der Volumenstrom bei Beibehaltung aller anderen Parameter erhöht, so kommt es zur Elongation des Zerfallsbereichs und zur Bildung von Fäden, den sogenannten Ligamenten, siehe Abbildung 14b. Diese zerfallen nach den Prinzipien des Flüssigkeitsstrahlzerfalls und bilden dabei eine nahezu monodisperse Tropfengröße, wodurch sich diese Zerfallsart besonders für technische Anwendungen eignet [22]. Durch eine weitere Erhöhung des Volumenstroms erhöht sich die Anzahl und Dicke der Ligamente, bis sich ein vollständiger Flüssigkeitsfilm um die Drehscheibe herum ausbildet, siehe Abbildung 14c. Es bilden sich Randwülste, die zu Tropfen zerfallen. Mit einem steigenden Volumenstrom und höheren Geschwindigkeiten gewinnt auch der Einfluss von turbulenten Luftkräften mehr an Bedeutung, wodurch Tropfen mit unregelmäßiger Größe entstehen. [22], [28], [31]

### 2.3.4 Mindestvolumenstrom

Für eine effektive Granulation muss der darauf geachtet werden, dass durch einen zu geringen Volumenstrom die Benetzungsgrenze nicht unterschritten wird, da es sonst zur Ausbildung einer Gerinneströmung kommt. Für den minimalen Volumenstrom  $\dot{V}_{in}$  ist dabei die Reynoldszahl am Scheibenrand definiert als: [22]

$$Re_{\min} \equiv \frac{\dot{V}_{\min} \rho}{D \pi \eta} \quad (13)$$

Wird der minimale Volumenstrom unterschritten, so kommt es zu Ausbildungen von trockenen, nicht benetzten Stellen auf der Drehscheibe. In Anlehnung an das Modell von Hartley und Murgatroyd [32], die das Phänomen an der vertikalen Platte untersucht haben, kann der dimensionslose Mindestvolumenstrom  $\dot{V}_{\min}^*$  unter der Annahme der Wandhaftung mit

$$\dot{V}_{\min}^* = \frac{0,814 (1 - \cos(\gamma))^{\frac{6}{5}} Z^{\frac{1}{5}}}{We^{\frac{2}{5}}} \quad (14)$$

berechnet werden. Dabei ist der dimensionslose Volumenstrom definiert als

$$\dot{V}^* = \frac{\dot{V}^2 \rho}{\sigma D^3} \quad (15)$$

und die Zerstäuberzahl  $Z$  als

$$Z \equiv \frac{\eta^2}{\rho \sigma D} \quad (\equiv Oh^2) \quad (16)$$

die gleichzeitig das Quadrat der Ohnesorge-Zahl  $Oh$  darstellt. Die Weber Zahl

$$We \equiv \frac{\omega^2 D^3 \rho}{\sigma} \quad (17)$$

wird hier in ihrer Form für den Rotationszerstäuber verwendet.

### 2.3.5 Scheibendurchmesser und Filmdicke

Tritt ein sehr hoher Volumenstrom auf, so kann es sein, dass die Bedingung des Wandhaftens nicht mehr gültig ist und es zum Schlupf kommt, der einen negativen Einfluss auf die Effektivität der Granulation hat. Dabei weißt die Filmströmung eine hohe relative Geschwindigkeit zum Scheibenrand hin auf, was durch eine Vergrößerung des Scheibendurchmesser, oder eine Erhöhung der Drehzahl ausgeglichen werden kann. Theissing hat in [33] diese Filmströmung hinsichtlich ihrer Geschwindigkeitsverteilung untersucht. Um dabei verschiedene stoffspezifische und geometrische Vorgaben bei der Flüssigkeitszufuhr vergleichbar zu machen, verwendet Theissing den bezogenen Radius

$$r^* = r \left( \frac{\eta \omega}{\dot{V}^2 \rho} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

und die bezogene Filmdicke

$$\delta^* = \delta \left( \frac{\eta}{\rho \omega} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (19)$$

In Abbildung 15 sind die Zusammenhänge nach Theissing [33] für vier Strömungsbedingungen von Mehrhardt und Brauer [34] numerisch ausgewertet worden. Dabei ist erkennbar, dass ab einem bezogenen Radius von  $r^* = 1$  die Bedingungen der Flüssigkeitszufuhr keinen Einfluss mehr auf die bezogene Schichtdicke und somit die Strömung auf der Scheibe aufweisen.

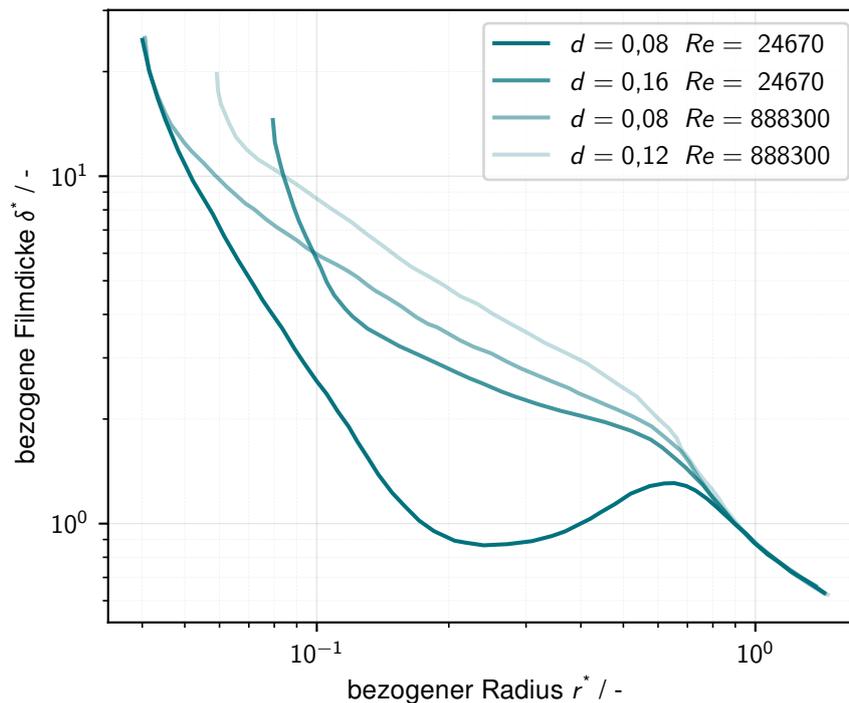


Abbildung 15: Bezogene Filmdicke  $\delta^*$  in Abhängigkeit vom bezogenen Radius  $r^*$  für unterschiedliche Strömungsbedingungen [34].

Nach Nikolaev et al. [35] gilt für das Erreichen eines schulppfreien Betriebszustandes für den Scheibendurchmesser  $D$ :

$$D \geq 3,2 \dot{V}^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\rho}{\eta \omega} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (20)$$

Daraus folgt, dass bei einer Verdoppelung des Volumenstroms die Drehzahl um das Vierfache erhöht werden muss, um der Entstehung von Schlupf entgegenwirken zu können. Dabei halbiert sich die Dicke des Flüssigkeitsfilms am Scheibenrand

$$\delta = \left( \frac{3\eta \dot{V}}{2\pi r^2 \rho \omega^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

gemäß der Beziehung aus [36].

### 2.3.6 Kritischer Volumenstrom

Wird der Volumenstrom bei gleichbleibenden Umgebungsparametern über den Mindestvolumenstrom erhöht, werden die in Abbildung 14 dargestellten Zerfallsmechanismen nacheinander durchlaufen. Für technische Anwendungen ist dabei der Zerfallsbereich der Fadenbildung am wesentlichsten, da dort eine nahezu monodisperse Tropfenverteilung entsteht. Um den für diesen Bereich benötigten Volumenstrom berechnen zu können, wurden in zahlreichen Veröf-

fentlichungen empirische und numerische Modelle publiziert, für die einige Beispiel in Tabelle 2 bzw. Tabelle 3 angeführt sind. Dabei werden immer die Grenzvolumenströme beim Übergang zwischen den Zerfallsbereichen angegeben. Somit ergeben sich für den Bereich der Fadenbildung ein minimaler Volumenstrom  $\dot{V}_{\min}$  und ein maximaler Volumenstrom  $\dot{V}_{\max}$ . Die dabei verwendete dimensionslose Beschleunigungszahl ist definiert als

$$a^* \equiv \frac{D\omega^2\eta^4}{2\sigma^3\eta} \quad (22)$$

Tabelle 2: Minimaler Volumenstrom für den Fadenzerfall bei der Rotationszerstäubung [34], [37]–[40].

Art	Autor	Formel	Quelle
Scheibe	Dunskii und Nikitin 1972	$\dot{V}_{\min} = 0,429 (Oh^2)^{0,156} (a^*)^{-0,375} \left(\frac{\pi D\eta}{\rho}\right)$	[37]
Scheibe	Matsumoto et al. 1974	$\dot{V}_{\min} = 0,104 (Oh^2)^{0,125} (a^*)^{-0,425} \left(\frac{\pi D\eta}{\rho}\right)$	[38]
Scheibe	Mehrhardt und Brauer 1979	$\dot{V}_{\min} = 0,019 (Oh^2)^{-0,1} (a^*)^{-0,3} \left(\frac{\pi D\eta}{\rho}\right)$	[34]
Scheibe	Tanasawa et al. 1979	$\dot{V}_{\min} = 80 \left(\frac{D}{n}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \left[1 + 10 \left(\frac{\eta}{(\rho\sigma D)^{0,5}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1}$	[39]
Scheibe	Frost 1981	$\dot{V}_{\min} = 1,52 (Oh^2)^{-1} \left(\frac{\eta D}{\rho}\right) \left(\frac{\rho\omega D^2}{\eta}\right)^{-0,95}$	[40]

Tabelle 3: Maximaler Volumenstrom für den Fadenzerfall bei der Rotationszerstäubung [39]–[41].

Art	Autor	Formel	Quelle
Becher	Hinze und Milborn 1950	$\dot{V}_{\max} = 0,344 (Oh^2)^{0,017} (a^*)^{-0,3} \left(\frac{\pi D\eta}{\rho}\right)$	[41]
Scheibe	Tanasawa et al. 1979	$\dot{V}_{\max} = 5,3 \left(\frac{D}{n}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \left(\frac{\rho}{\eta}\right)^{\frac{1}{3}}$	[39]
Scheibe	Frost 1981	$\dot{V}_{\max} = 19,8 (Oh^2)^{-0,9} \left(\frac{\eta D}{\rho}\right) \left(\frac{\rho\omega D^2}{\eta}\right)^{-0,84}$	[40]

### 2.3.7 Tropfengröße

Für die Berechnung der Tropfengröße wurden, wie bei den Volumenströmen, zahlreiche empirische Formeln gefunden. Einige für die Rotationszerstäubung mit einer Drehscheibe relevanten Formeln sind für die verschiedenen Betriebszustände in den Tabellen 4, 5 und 6 angeführt.

Tabelle 4: Empirische Formeln zur Berechnung des Tropfendurchmessers beim direkten Tropfenzerfall [38], [39].

Autor	Formel	Quelle
Tanasawa et al. 1979	$x_{32} = \frac{27}{f} \left( \frac{\sigma}{D\rho} \right)^{0,5} \left( 1 + 0,003 \frac{\dot{V}\rho}{D\eta} \right)$	[39]
Matsumotu et al. 1974	$x_{32} = 1,6D \left( \frac{\rho D^3 \omega}{8\sigma} \right)^{-0,523}$	[38]

Tabelle 5: Empirische Formeln zur Berechnung des Tropfendurchmessers beim Fadenzerfall [37], [39], [42], [43].

Autor	Formel	Quelle
Dunskii und Nikitin 1972	$x_{0,5} = 2,56a^{*-0,429} \dot{V}^{*0,286} \frac{\eta^2}{\sigma\rho}$	[37]
Tanasawa et al. 1979	$x_{32} = 0,119 \frac{\dot{V}^{0,1} \sigma^{0,5}}{f D^{0,5} \rho^{0,4} \eta^{0,1}}$	[39]
Kayano und Kamiya 1979	$x_{32} = 0,26f^{-0,79} \dot{V}^{0,32} D^{-0,69} \rho^{-0,29} \sigma^{0,26} (1 + 1,027\eta^{0,65})$	[42]
Kitamura und Takahashi 1992	$x_{10} = 1,6Re^{0,26} Oh^{0,38} We^{-0,42} D$	[43]

Tabelle 6: Empirische Formel zur Berechnung des Tropfendurchmessers beim Lamellenzerfall [39].

Autor	Formel	Quelle
Tanasawa et al. 1979	$x_{32} = 15,6 \frac{\dot{V}^{0,5}}{f} \left( \frac{\sigma}{D^2\rho} \right)^{0,4}$	[39]

### 3 Material und Methode

Nachfolgende werden die methodische Herangehensweise und die Stoffeigenschaften des verwendeten Hüttensands beschrieben, basierend auf denen die Auslegung der Rotationszerstäubung erfolgt.

#### 3.1 Auslegung, Konstruktion und Bau der Rotationszerstäubung

In Abbildung 16 ist die methodische Herangehensweise zum Bau der Rotationszerstäubung graphisch dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass das in den Kapiteln 1 und 2 erarbeitete Wissen als Grundlage für die Auslegung und die Kriterien der Rotationszerstäubung dienen. Die Berechnung der charakteristischen Kennzahlen, die zur Auslegung der Rotationszerstäubung dienen, beruht auf der Annahme, dass die einzige im Prozess kontrollierbare Größe die Drehzahl der Drehscheibe ist. Daher wird diese als Signalgröße für die Auslegung und den Betrieb der Rotationszerstäubung herangezogen. Die anderen konstruktiv festgelegten Größen werden gemäß Siebertz et al. [44] als Steuergrößen betrachtet.

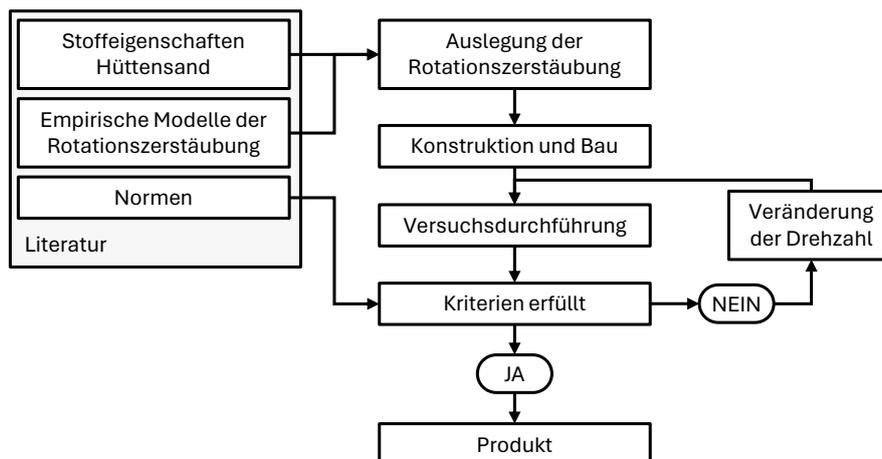


Abbildung 16: Schema der methodischen Herangehensweise zur Auslegung, Konstruktion und Errichtung der Rotationszerstäubung.

Für Hochtemperaturversuche steht am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik eine Induktionsschmelzanlage mit der Bezeichnung *InduMelt* zur Verfügung. Mit einer elektrischen Leistung bis zu 10 kW können Proben auf über 1600 °C erhitzt werden. Der Energieeintrag erfolgt dabei über einen wassergekühlten L-C-Schwingkreis aus Kupfer, der ein elektromagnetisches Feld erzeugt. Bei den Rotationszerstäubungsversuchen wird die *InduMelt* mit einem Graphittiegel verwendet, der an der Unterseite eine Bohrung aufweist. Diese Bohrung ist während des Aufheizens mit einem Stopfen aus Graphit verschlossen, der beim Abstich nach oben aus dem Tiegel gezogen wird. Damit die *InduMelt* als Schmelzaggregat für die Rotationszerstäubung verwendet werden kann, müssen zuerst Adaptierungen vorgenommen werden. Dabei ist es das Ziel, den

Granulationsraum in radiale Richtung zu vergrößern und gleichzeitig die Robustheit der Anlage zu erhöhen.

Am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik wird bereits seit einigen Jahren an der Rotationszerstäubung geforscht. Daher wurden schon einige Rotationszerstäubungsanlagen konstruiert und gebaut, die eine Aufgabemenge von bis zu  $60 \text{ kg min}^{-1}$  erreicht haben [53]. Bei Bau der gegenständlichen Rotationszerstäubung ist es ein Ziel, eine Maximierung der Granulatmenge nach dem Versuch mit möglichst geringem Sachkosteneinsatz zu erreichen.

Um diese Kriterien von bestmöglich zu erfüllen, soll zur Konstruktion die CAD-Software *Fusion 360* zur Anwendung kommen. Damit ist es möglich, verschiedene Varianten zu probieren und zu optimieren, ohne jedesmal einen Prototyp bauen zu müssen.

## 3.2 Versuche mit der Rotationszerstäubung

Zur Überprüfung der Funktionalität der Rotationszerstäubung wird eine Versuchskampagne geplant. Dazu wird der in Abschnitt 3.3 beschriebene Hüttensand verwendet, da dessen Eigenschaft durch Untersuchungen umfassend bekannt sind. Bei den Versuchen soll eruiert werden, ob sich das Material mit der Rotationszerstäubung granulieren lässt und welche Eigenschaften das Granulat hinsichtlich Tropfendurchmesser und Glasgehalt aufweist.

### 3.2.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau des Tiegel systems ist in Abbildung 17 dargestellt.

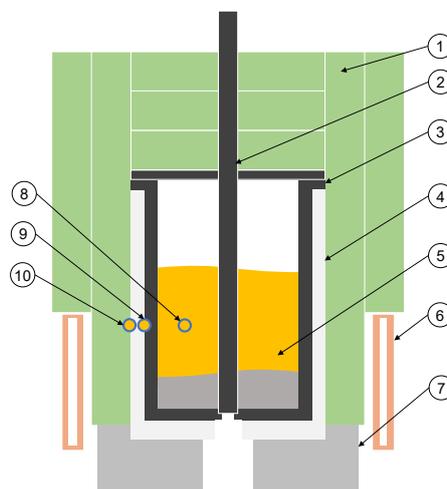


Abbildung 17: Aufbau des Tiegel systems beim Schmelzversuch für die Rotationszerstäubung mit 1) Keramikfasermatte, 2) Stopfen, 3) Graphittiegel, 4) Keramiktiegel, 5) Probenmaterial, 6) Kupferspule, 7) Feuerfestzement, 8-10) Thermoelemente Typ K.

Für den Versuch wird ein Tiegel aus Graphit verwendet, bei dem im Boden eine Bohrung mit 8 mm hergestellt wird. Diese dient beim Abstich als Ausgußpunkt und wird während des

Versuchs mit einem Graphitstopfen verschlossen. Der Graphittiegel sitzt in einem Tiegel aus Keramikmaterial, welcher wiederum in zwei Lagen hochtemperaturbeständiger Keramikfasermatte gewickelt ist. Dieser Aufbau dient der Wärmeisolierung, um die Energieverluste während des Versuchs zu minimieren.

### 3.2.2 Messdatenerfassung

Wie in Abbildung 17 ersichtlich ist, werden im Aufbau des Tiegelsystems drei Thermoelemente vom Typ K implementiert. Deren Temperaturwerte werden während des Aufheizens mittels einer Messdatenerfassung aufgezeichnet. Um im hohen Temperaturbereich, bei denen die Thermoelemente ausfallen, Messwerte zu erhalten, wird zusätzlich eine Wärmebildkamera eingesetzt. Diese misst über eine kleine Öffnung in der Dämmschicht die Oberflächentemperatur des Keramiktiegels.

Zur videographischen Dokumentation der Versuche werden folgende Verfahren verwendet:

- Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Tropfenzerfalls,
- Aufnahme der Fluidbewegung auf der Drehscheibe mittels Videokamera und
- Beobachtung des Behälterinnenraums durch einer Actionkamera.

### 3.2.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf sieht vor, dass die Tiegel auf eine Zieltemperatur von 1400 °C erwärmt und für 30 min auf dieser Temperatur gehalten werden. Anschließend wird der Granulationsprozess eingeleitet, indem die Drehscheibe auf die zuvor festgelegte Drehzahl beschleunigt und der Stopfen aus dem Tiegel gezogen wird. Dabei wird der Abstich mit den zuvor diskutierten Messmethoden aufgezeichnet. In Abbildung 18 sind die bei dem Versuch zu erwartenden Input- und Outputströme dargestellt. Im Anschluss an den Versuch wird das abgekühlte Granulat der Analyse zugeführt.

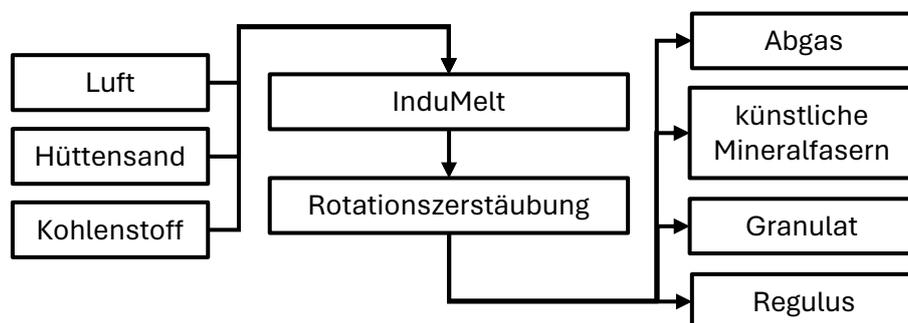


Abbildung 18: Input- und Outputströme der Versuche mit der Rotationszerstäubung.

### 3.2.4 Analyse des Probenmaterials

Alle Input- und Outputströme sollen einer gravimetrischen Analyse zugeführt werden, um mögliche Verluste ermitteln zu können. Weiters wird das Granulat einer Siebanalyse zugeführt, welche mit einer optischen KorngröÙenauswertung verglichen werden soll. Im Anschluss wird das Granulat an der TU Graz hinsichtlich seines Glasgehalts untersucht, um festzustellen, ob die Grenzwerte gemäß Tabelle 1 eingehalten werden können.

## 3.3 Stoffeigenschaften des zu untersuchenden Materials

Wie in Abschnitt 3.2 dargelegt wird, wird für die ersten Granulationsversuche der für die österreichische Eisen- und Stahlindustrie typische Hüttensand *HÜS4500* verwendet. Dieser war bereits Bestandteil zahlreicher Forschungsprojekte am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, unter anderem *US-B* [45], *BitKOIN* [10] und *RMB* [46]. In der Tabelle 7 ist die chemische Zusammensetzung des *HÜS4500* dargestellt, die mittels RFA Analyse an der TU Graz erstellt wurde [45].

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des Hüttensands *HÜS4500* [45].

Bezeichnung	Anteil / %
SiO <sub>2</sub>	37,59
TiO <sub>2</sub>	0,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
FeO	0,44
MnO	1,28
MgO	9,44
CaO	36,49
K <sub>2</sub> O	0,96
Na <sub>2</sub> O	0,38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00
SO <sub>3</sub>	-
S	0,88
Cl	-
LOI	-
Summe	99,99

Der Grund für die Verwendung des *HÜS4500* liegt darin, dass bei späteren Versuchen ein Hüttensandsubstitut erstellt werden soll, das den Bindemittleigenschaften von Hüttensand ähnelt. Darum wird angenommen, dass sich auch die Stoffeigenschaften der mineralischen Phasen ähneln. Aus diesem Grund basiert die Auslegung größtenteils auf den Stoffeigenschaften von Hüttensand, die in der Tabelle 8 aufgelistet sind.

Tabelle 8: Stoffeigenschaften von Hüttensand.

Beschreibung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle	Anmerkung
Dichte	$\rho$	2600	$\text{kg m}^{-3}$	[14], [47]	
dynamische Viskosität	$\eta$	1	Pa s	[48]	bei 1362 °C
Oberflächenspannung	$\sigma$	0,42	$\text{N m}^{-1}$	[49]	

Die dynamische Viskosität einer Hüttensand-Probe wurde 2018 am Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde an der Montanuniversität Leoben mit einem *Anton Paar FRS 1800* Hochtemperatur-Viskosimeter und -Rheometer untersucht. In Abbildung 19 ist der gemessene Verlauf der dynamischen Viskosität dargestellt. Für die Tabelle 8 und die weiteren Berechnungen wurde daraus beispielhaft der Wert 1 Pa s bei 1362 °C ausgewählt, da dies der voraussichtlichen mittleren Abstichtemperatur entspricht.

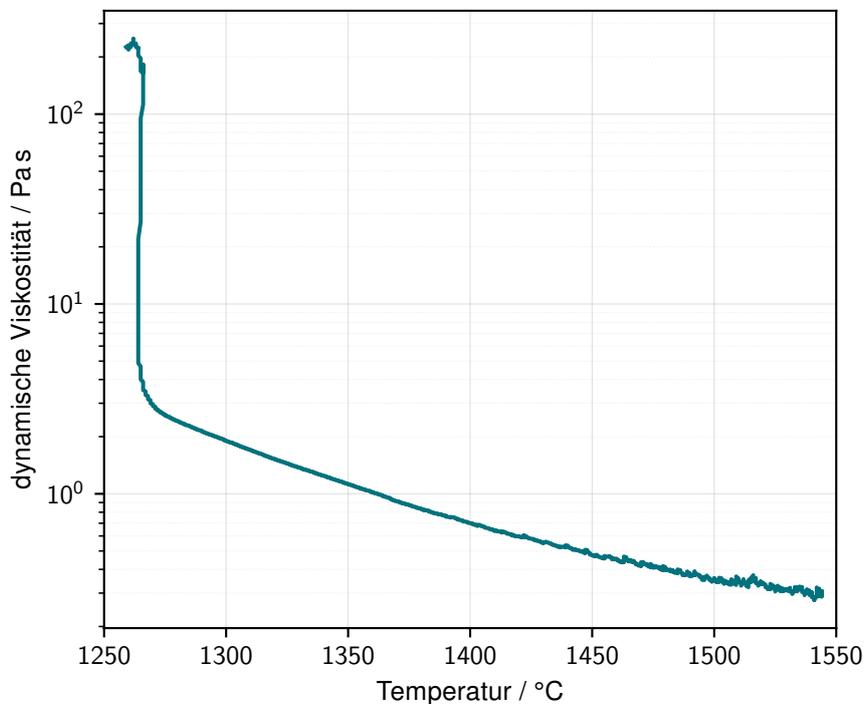


Abbildung 19: Dynamische Viskosität der Hüttensandprobe E2018-032 gemessen mit einem *Anton Paar FRS 1800* Hochtemperatur-Viskosimeter und -Rheometer [48].

## 4 Durchführung

Nachfolgend wird die Auslegung und der Bau der Rotationszerstäubung, der Umbau der Induktionsschmelzanlage sowie die Versuchsdurchführung beschrieben.

### 4.1 Auslegung der Rotationszerstäubung

Die in Abschnitt 2.3 diskutierten empirischen Formeln werden herangezogen, um die Berechnung für die Auslegung der Rotationszerstäubung durchzuführen.

#### 4.1.1 Voraussichtlicher Volumenstrom

Der Volumenstrom ist durch die geometrischen Bedingungen der Abstichöffnung und die physikalischen Stoffeigenschaften des Materials bestimmt. Aus Versuchen im Projekt „UpcycSlag-Binder (US-B)“ [45], bei denen dieselbe Abstichmethode und derselbe Hüttensand, bzw. hüttensand-ähnliche Materialien verwendet wurden, kann ein durchschnittlicher Massenstrom genähert werden. Bei den Versuchen wurde der Abstich mit einer Wärmebildkamera dokumentiert, wodurch die Zeitdauer des Abstichs ermittelt werden kann. Ebenso ist die Masse des Abstichs und die spezifische Dichte des Materials bekannt, wodurch sich mit

$$\dot{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\Delta t_i} \quad (23)$$

der voraussichtliche Massenstrom und mit

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (24)$$

der voraussichtliche Volumenstrom ergibt.

#### 4.1.2 Minimaler Scheibendurchmesser und Filmdicke

Ist der voraussichtliche Volumenstrom bekannt, so kann mit Nikolaev et al. [35]

$$D = 3,2 \dot{V}^{0,5} \left( \frac{30 \rho}{\pi n \eta} \right)^{0,25} \quad (25)$$

der minimal benötigte Scheibendurchmesser  $D$  in Abhängigkeit der Drehzahl bestimmt. Dadurch lässt sich der Scheibendurchmesser eruiieren, bei dem ein möglichst großer Drehzahlbereich im Betrieb der Anlage möglich ist, ohne die Drehscheibe unnötig groß werden zu lassen.

Anschließend kann der Verlauf der Filmströmung auf der Scheibe mit der Formel 21 beschrieben werden. Dabei ist vor allem die Dicke der Strömung am Scheibenrand von Interesse.

### 4.1.3 Mindestvolumenstrom

Ist der Durchmesser der Scheibe definiert, so kann durch Kombination der Formeln 14, 15, 16 und 17 der Mindestvolumenstrom in Abhängigkeit der Drehzahl  $n$ , ausgedrückt mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ , für verschiedene Benetzungswinkel  $\gamma$  beschrieben werden:

$$\dot{V}_{\min} = \left( \frac{0,814^{\frac{5}{2}} \sigma^3 D^4 \eta (1 - \cos \gamma)^3}{\rho^4 \omega^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (26)$$

### 4.1.4 Zerfallsbereich

Wie in Abschnitt 2.3.6 dargelegt, ist für technische Anwendungen besonders der Bereich der Fadenbildung und des Fadenerfalls relevant. Daher soll vorab beurteilt werden, ob die Anlage fähig ist, diesen Zerfallsbereich zu erreichen, bzw. welche Drehzahlen dafür notwendig sind. Dazu werden gemäß den Formeln aus den Tabellen 2 und 3 die Grenzvolumenströmen  $\dot{V}(n)_{\min}$  und  $\dot{V}(n)_{\max}$  für den konkreten Fall der Rotationszerstäubung aus dieser Arbeit berechnet. Dabei wird die Drehzahl als Signalgröße variabel angenommen.

Durch den Vergleich mit dem voraussichtlichen Volumenstrom ist es möglich, den Drehzahlbereich bestimmen zu können, bei dem die Rotationszerstäubung im Fadenerfallsbereich arbeitet.

### 4.1.5 Tropfendurchmesser

Als finaler Schritt kann der zu erwartende Durchmesser der granulierten Tropfen abgeschätzt werden. Für die Beschreibung des direkten Tropfenerfalls und des Lamellenzerfalls, die die nicht gewünschten Betriebszustände darstellen, werden die Modelle nach Matsumotu et al. 1974 [38], siehe Tabelle 4, bzw. Tanasawa et al. 1979 [39], siehe Tabelle 6, herangezogen. Um den erwünschten Bereich des Fadenerfalls abzubilden, werden die Modelle Tanasawa et al. 1979 [39], Kayano und Kamiya 1979 [42] und Dunsikii und Nikitin 1972 [37] verwendet, siehe Tabelle 5.

## 4.2 Neukonstruktion der Induktionsschmelzanlage

Um verschiedene Varianten in der Konstruktion testen und optimieren zu können, wird das CAD-Programm *Fusion 360* der Firma *Autodesk* verwendet. Damit es möglich ein Modell der bestehenden *InduMelt* zu erstellen, um anhand dieses digitalen Klons die geometrischen Rahmenbedingungen der Rotationszerstäubung bestimmen zu können. Dazu muss die Schmelzanlage zuerst vermessen werden, um sie anschließend, wie in Abbildung 20 dargestellt, als Modell in das Konstruktionsprogramm überführen zu können. Der Konstruktionsplan der Anlage ist im Anhang D.1 zu finden.



Abbildung 20: Visualisierung der bestehenden Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.

Die einzelnen Komponenten der *InduMelt* sind in der Abbildung 21 beschrieben. Dazu gehören 1) die Spule, 2) die Leistungskondensatoren, 3) das Netzteil, 4) das Kühlgerät und 5) die Unterkonstruktion.

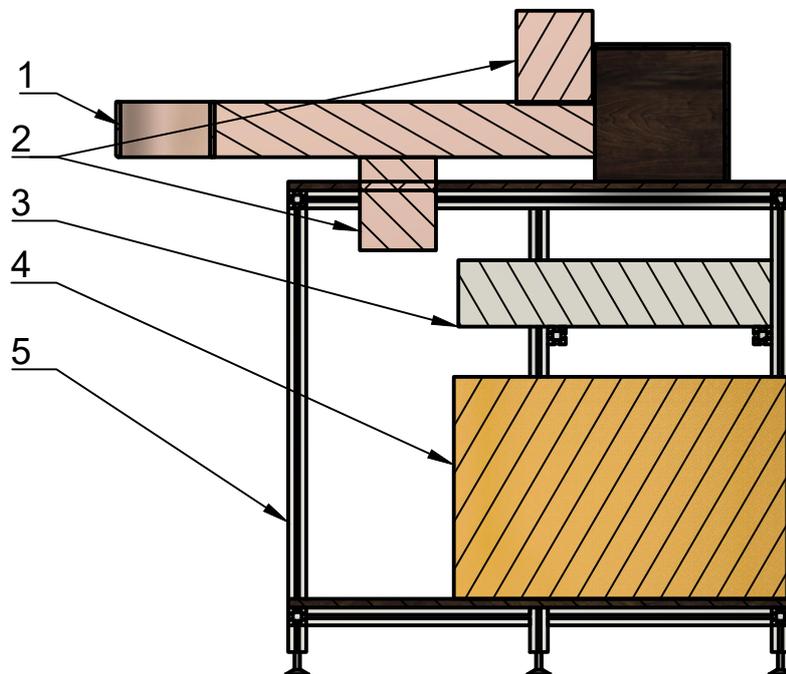


Abbildung 21: *InduMelt* mit 1) Spule, 2) Leistungskondensatoren, 3) Netzteil, 4) Kühlgerät und 5) Unterkonstruktion.

#### 4.2.1 Maximierung des Durchmessers

Wird der Schnitt durch die Anlage, siehe Abbildung 22, betrachtet ist erkennbar, dass der Durchmesser der Rotationszerstäubung durch die Unterkonstruktion und den unteren der beiden Leistungskondensatoren räumlich begrenzt ist. Somit ist für die Rotationszerstäubung ein maximaler Radius von 275 mm möglich.

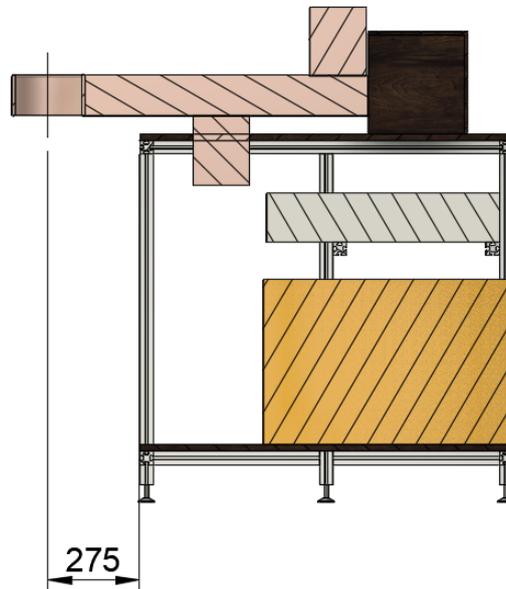


Abbildung 22: Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik in ihrer Ursprungsvariante.

Um den verfügbaren Platz unter der Spule optimieren zu können, werden daher folgende Umbaumaßnahmen überprüft:

- Variante 1: Vorrücken des Schwingkreises.
- Variante 2: Versetzung des unteren Kondensators auf die Spulenseite.
- Variante 3: Drehung des Schwingkreises um 180° um die horizontale Achse.

Bei Variante 1 wird die Befestigung des Schwingkreises auf der Induktionsschmelzanlage gelöst, um diesen so weit vorrücken zu können, bis der untere Leistungskondensator an der vorderen Anlagenbegrenzung ansteht. Dadurch wäre, wie in Abbildung 23 erkennbar, ein Platzgewinn um 120 mm von 275 mm auf 395 mm erreichbar.

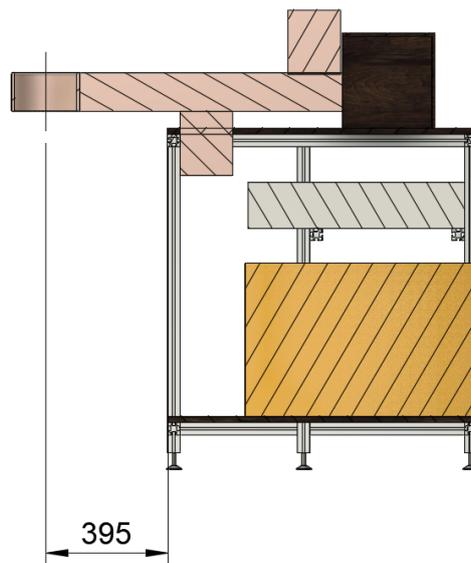


Abbildung 23: Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bei Variante 1: Vorrücken des Schwingkreises.

Variante 2 erfordert die Demontage des unten liegenden Leistungskondensators, der mit je vier Schrauben pro Pol mit der Spule verschraubt ist, wobei das Gewinde im Kondensator ausgeführt ist. Um ihn an der Spulenoberseite befestigen zu können müssten dort die notwendigen acht Löcher gebohrt werden. In Abbildung 24 ist eine Visualisierung dieser Variante ersichtlich. Durch den Eingriff in das Spulen-Design könnte sich bei diese Variante der Strompfad in einem ausreichenden Maße ändern, dass sich das Betriebsverhalten des gesamten Schwingkreises ändert.

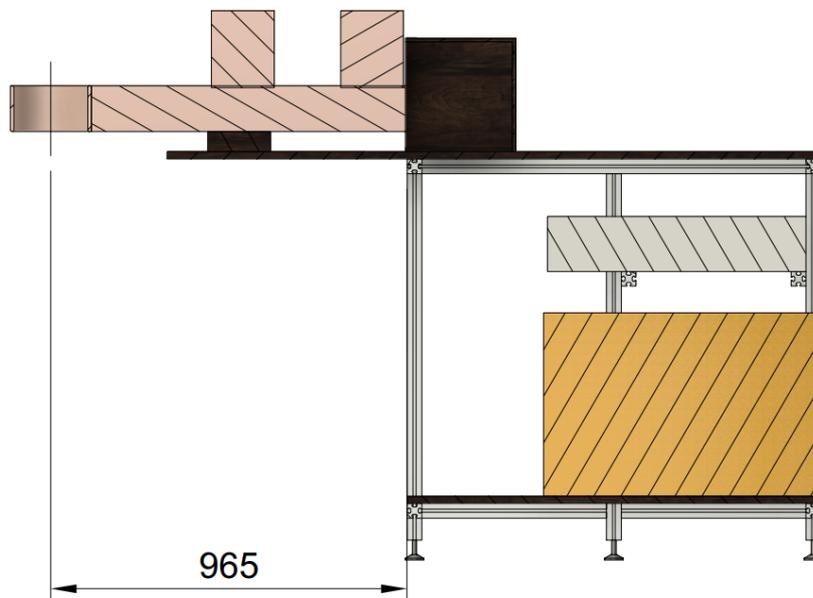


Abbildung 24: Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bei Variante 2: Versetzen des Leistungskondensators.

Variante 3 erlaubt es, den Schwingkreis unverändert zu lassen. Hierbei muss nur der Schwingkreis um  $180^\circ$  gedreht werden, um die Positionierung der Leistungskondensatoren zu vertauschen. Der dadurch erzielte Raumgewinn an der Spulenunterseite ist zwar um die Länge eines Kondensators geringer als bei Variante 2, aber dafür besteht nicht die Gefahr, das Betriebsverhalten der Anlage zu verändern. Eine Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage mit Variante 3 ist in Abbildung 25 ersichtlich.

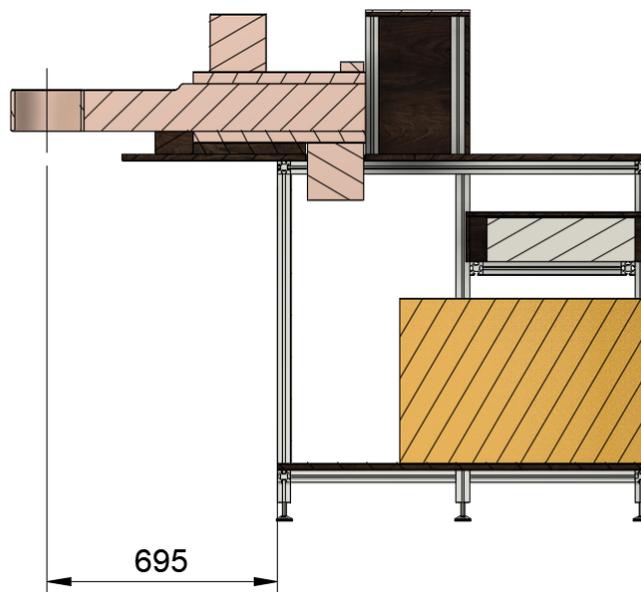


Abbildung 25: Schnitt durch die Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik bei Variante 3: Drehung des Schwingkreises.

Somit ergibt sich für die Granulation ein nutzbarer Durchmesser von 1290 mm, was um 840 mm mehr ist, als in der ursprünglichen Bauform der Induktionsschmelzanlage.

### 4.3 Konstruktion der Rotationszerstäubungsanlage

Nachfolgend wird die Konstruktion der Rotationszerstäubung mit dem Programm *Fusion 360* behandelt.

#### 4.3.1 Konstruktion des Behälters

Aufgrund der, durch das Drehen der Spule geschaffenen, geometrischen Verhältnisse ergibt es sich, dass ein bereits am Lehrstuhl vorhandenes Bauteil als Behälter wiederverwendet werden kann. Dabei handelt es sich um einen doppelwandigen Stahlbehälter aus dem Projekt „InnoBla“ [50], der in Abbildung 26 dargestellt ist.

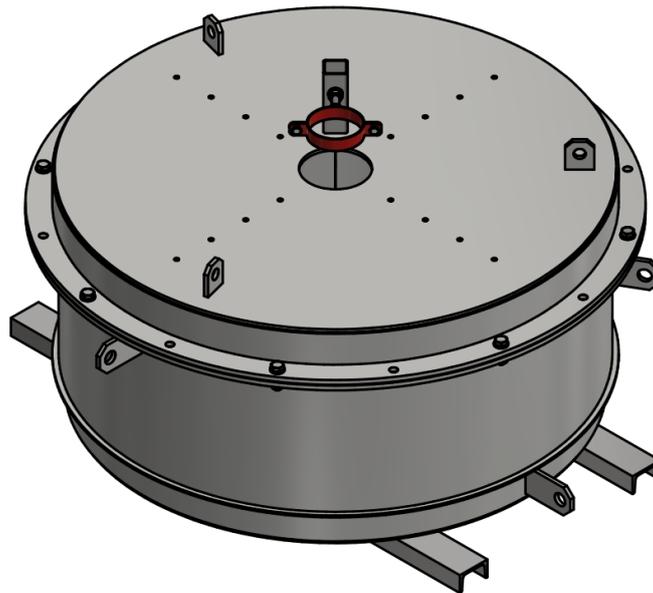


Abbildung 26: Doppelwandiger Stahlbehälter aus dem Projekt „InnoBla“ [51].

Wie in Lv et al. [52] beschrieben, besitzt ein wassergekühlter Behälter den Vorteil, dass die heißen Partikel weniger stark am Rand agglomerieren, da sie schneller Abkühlen und zu Boden fallen. Daher wird dieser Behälter für die Konstruktion und den Bau der Rotationszerstäubung herangezogen.

#### 4.3.2 Unterkonstruktion und Halterungen

In Abbildung 27 ist ein Schnitt durch die Rotationszerstäubung dargestellt.

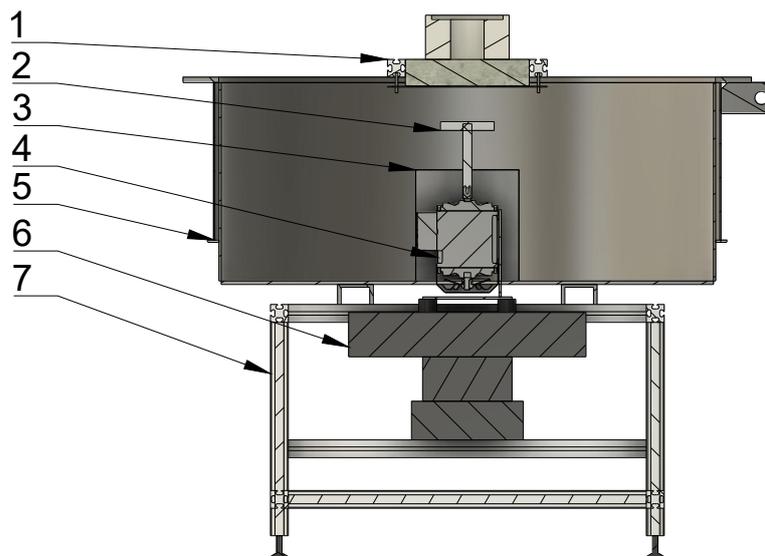


Abbildung 27: Schnitt durch die Rotationszerstäubung mit 1) Tiegelhalterung, 2) Drehscheibe, 3) Motorschutz, 4) Motor, 5) Behälter, 6) Maschinentisch und 7) Unterkonstruktion.

Darin sind die Bestandteile der Anlage: 1) Tiegelhalterung, 2) Drehscheibe, 3) Motorschutz, 4) Motor, 5) Behälter, 6) Maschinentisch und 7) Unterkonstruktion ersichtlich. Wegen seiner guten Verarbeitbarkeit dient als Konstruktionsmaterial ein Aluminiumprofil mit einer Kantenlänge von 40 mm. In Abbildung 27 ist auch die aufgesetzte Tiegelhalterung ersichtlich. Diese sitzt auf einer gelochten Stahlplatte, die über vier Gewindestangen absenkbar ist, um die Höhe des Tiegels in der Spule variieren zu können. Die Motorhalterung unter dem Behälter ist nur schematisch dargestellt. Hierbei soll ein Maschinentisch dienen, der eine Positionierung des Motors in der horizontalen Ebene ermöglicht.

#### 4.3.3 Minimierung der Fallhöhe

Neben dem Durchmesser der Granulation ist auch der Abstand der Drehscheibe vom Abstichöffnung ein maßgeblicher Parameter für die Auslegung der Rotationszerstäubung. Aufgrund des Strahlenzerfalls beim Abstich kann es zur ungleichmäßigen Beaufschlagung des Drehtellers kommen. Daher muss der Abstand der Drehscheibe zur Abstichöffnung kleiner als die kritische Länge sein. Durch die, wie in Abbildung 28 dargestellte, Platzierung des Motor fast gänzlich innerhalb des Behälters ist es möglich, diese Distanz auf 240 mm zu reduzieren. Dabei kann gleichzeitig ein Sicherheitsabstand von 100 mm zum oberen Behälterranda hin garantiert werden. Theoretisch wäre es durch eine Anhebung der Motorhalterung machbar, unter Minimierung des Sicherheitsabstandes auf 0 mm, den Abstand zur Abstichöffnung auf 140 mm zu verkürzen.

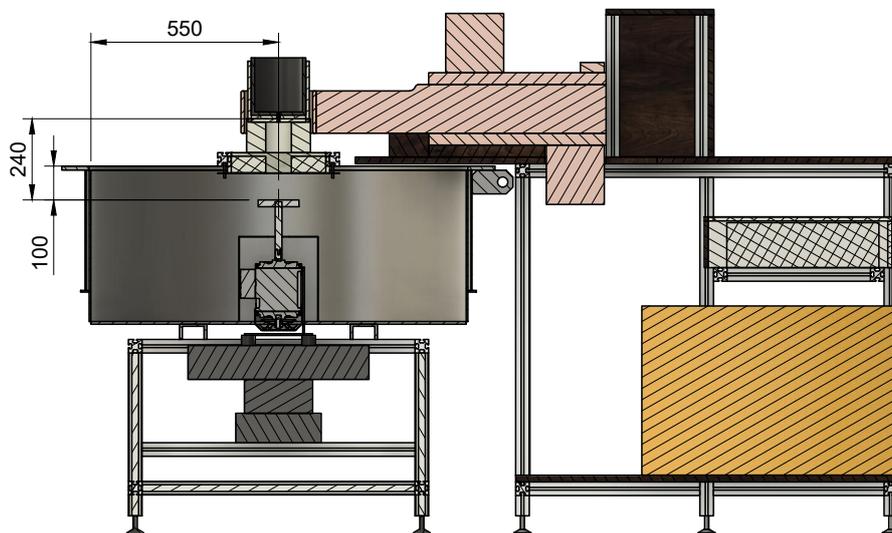


Abbildung 28: Schnitt durch die Rotationszerstäubung und die Induktionsschmelzanlage.

#### 4.4 Umbau der Induktionsschmelzanlage

Vor dem Umbau der Induktionsschmelzanlage wird eine Fotodokumentation erstellt, um den aktuellen Stand der Anlage und alle wichtigen Anschlüsse und Verbindungen festzuhalten. Alle Schläuche der Wasserkühlung, ebenso wie alle elektrischen Bauteile und Kabeln, werden beschriftet und dokumentiert. Für die Kühlleitungen ist dies im Schema in Abbildung 29 dargestellt.

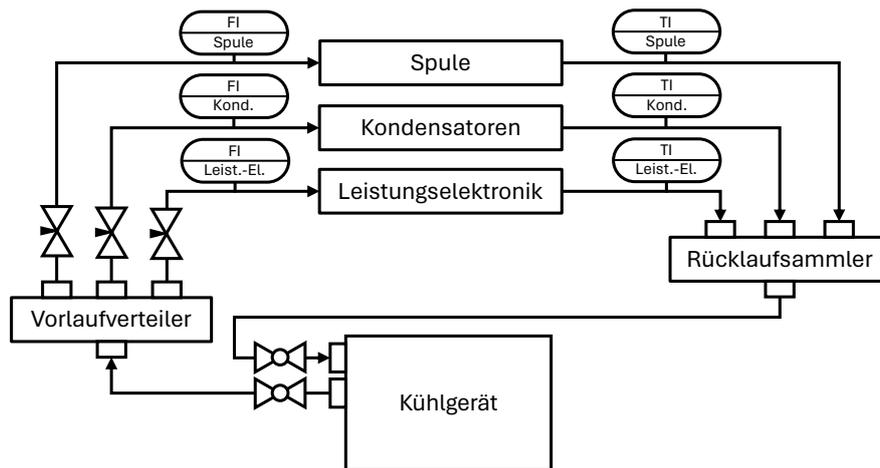


Abbildung 29: Rohr- und Instrumentationsschema des Kühlkreislaufts.

Für den Umbau der Induktionsschmelzanlage muss diese fast vollständig zerlegt werden. Dazu werden zunächst die elektrischen Komponenten, die Steuerelektronik und das Netzteil, bis auf den Schwingkreis mit eingebauter Leistungselektronik demontiert. Anschließend wird das Kühlleitungssystem geöffnet und das sich in der Anlage befindliche Kühlwasser entleert. Nachdem die Einhausungen der Bauteile entfernt sind, befindet sich auf dem Untergestell aus 40 mm-Aluminium Profilen nur noch der Schwingkreisverbund bestehend aus Spulen, Kondensatoren und der wassergekühlten Leistungselektronik. Dieser wird angehoben, um 180° um die horizontale Achse gedreht und provisorisch auf der Unterkonstruktion verschraubt. Anschließend können auf einer neuen Deckenplatte die Ausschnitte für die Bauteile vorgenommen werden. Nachdem die Platte auf der Unterkonstruktion montiert ist, kann der Schwingkreis an seinen finalen Platz gehoben und dort befestigt werden, wie in Abbildung 30 dargestellt ist.



Abbildung 30: Fotografie des neu montierten Schwingkreises auf der oberen Platte der Induktionsschmelzanlage *InduMelt*.

Alle Bedienelemente werden auf einem Panel zusammengefasst, welches so montiert wird, dass es beim Betrieb der Anlage von den Verantwortlichen innerhalb einer Armlänge erreichbar ist. Dadurch kann die Sicherheit bei den Versuchen erhöht werden, da ein Nothalt der Anlage ohne Verlassen der Bedienerposition eingeleitet werden kann. Das fertiggestellte Bedienpanel ist in Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31: Fotografie des neuen Bedienpanels der Induktionsschmelzanlage *InduMelt*.

Für die vor dem Umbau nur provisorisch befestigte Steuerelektronik wird eine Einhausung angefertigt, die diese vor äußeren Einflüssen schützt, siehe Abbildung 32. Weiters werden alle Kabeldurchführungen mit Verschraubungen ausgeführt. Diese bieten eine Zugentlastung und schützen die Verbindungsstellen vor mechanischen Einwirkungen.

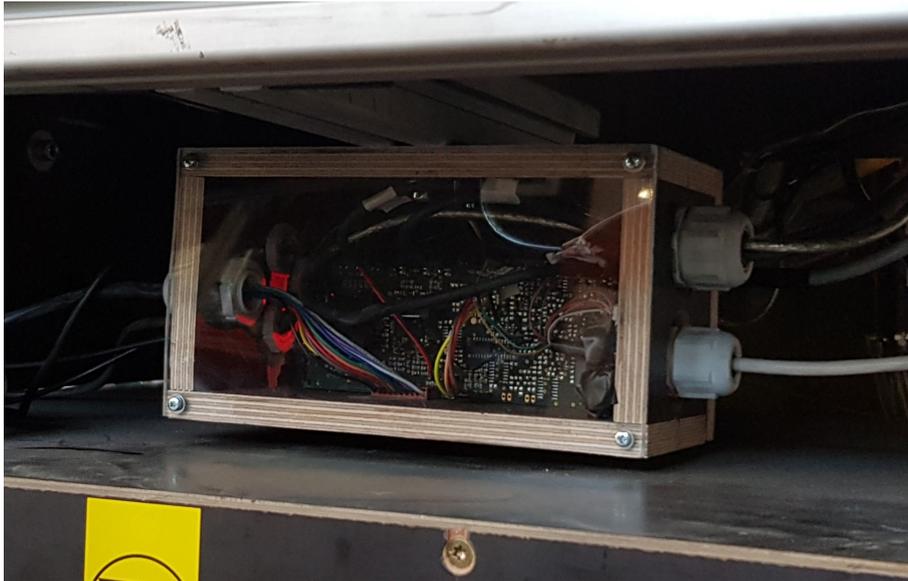


Abbildung 32: Fotografie der neuen Kontrollbox der Induktionsschmelzanlage *InduMelt*.

## 4.5 Bau der Rotationszerstäubung

Nachfolgend wird der Bau der Rotationszerstäubung, sowie die Auswahl deren Komponenten beschrieben.

### 4.5.1 Unterkonstruktion

Ein Foto der Unterkonstruktion ist in Abbildung 33 dargestellt.



Abbildung 33: Fotografie der Unterkonstruktion des Rotationszerstäubers aus 40 mm Aluminium Konstruktionsprofilen.

Für den Bau der Unterkonstruktion werden Aluminium Konstruktionsprofile mit einer Kantenlänge von 40 mm verwendet. Diese werden mit M6-Gewindestangen versteift, indem diese durch die mittlere Bohrung der Profile geführt und mit Muttern vorgespannt werden. Dadurch ergibt sich eine Verbindung, die die auftretenden Zugkräfte entsprechend aufnehmen kann.

Die Unterkonstruktion besteht aus einem oberen und einem unteren Rahmen, die über sechs vertikale Profile miteinander verbunden sind. Am unteren Ende der vertikalen Verstrebrungen werden Füße montiert, die über ein Gewinde in der Höhe verstellt werden können, wodurch die gesamte Anlage nivelliert werden kann. Außerdem wird mit den Füßen die Höhe der unteren Kante des unteren Rahmens so eingestellt, dass die Anlage mit einem Hubwagen manipuliert werden kann.

### 4.5.2 Behälter

Der für die Rotationszerstäubung verwendete Behälter stammt ursprünglich aus dem Forschungsprojekt „InnoBla“ [50]. Durch die doppelwandige Ausführung ist es möglich, den Behälter während des Versuchs mit Wasser zu kühlen. Außerdem besitzt der Behälter einen Deckel, der mittels einem Lochring am Flansch verschraubt werden kann. Um den Behälter für die Rotationszerstäubung verwenden zu können, müssen zuerst die bestehende Zustellung aus Feuerfestbeton und die verbauten Keramikfasermatten entfernt werden. In Abbildung 34 ist der leere Behälter dargestellt. Dabei ist auch der angefertigte Ausschnitt im Boden für die Durchführung des Motors erkennbar.



Abbildung 34: Fotografie des Ausschnitts am Behälterboden zur Durchführung des Elektromotors.

Abbildung 35 zeigt den, auf die Unterkonstruktion gesetzten, Behälter. Weiters sind in Abbildung 35 die Anschlagpunkte erkennbar, die unter dem Flansch angeschweißt sind. Durch die drei Anschlagpunkte ist es möglich, die gesamte Rotationszerstäubung mit dem Hallenkran zu bewegen.



Abbildung 35: Fotografie der Unterkonstruktion mit aufgesetztem Behälter.

### 4.5.3 Motor und Motorhalterung

Mit der Motorhalterung wird der Elektromotor, der für die Rotation der Drehscheibe sorgt, an der Unterkonstruktion befestigt. Gleichzeitig soll sie eine variable Positionierung ermöglichen, um die Drehscheibe unter der Abstichöffnung zentrieren zu können. Dafür wird ein Maschinentisch verwendet, der eine Verstellung in zwei Achsen ermöglicht. Die Motorhalterung bestimmt auch den vertikalen Abstand der Drehscheibe zur Abstichöffnung.

Als Antrieb für die Drehscheibe wird ein Elektromotor der Firma *ABB* mit der Bezeichnung „M3AA 80B 2“ mit einer Leistung von 0,75 kW verwendet. Der Motor wird mit Schwingungsdämpfern am Maschinentisch befestigt, wodurch die beim Betrieb auftretende Vibrationen weniger stark auf die Unterkonstruktion übertragen werden, siehe Abbildung 36. Um den Motor drehzahlvariabel betreiben zu können, wird ein *Siemens Micromaster 420* Frequenzumrichter verwendet.

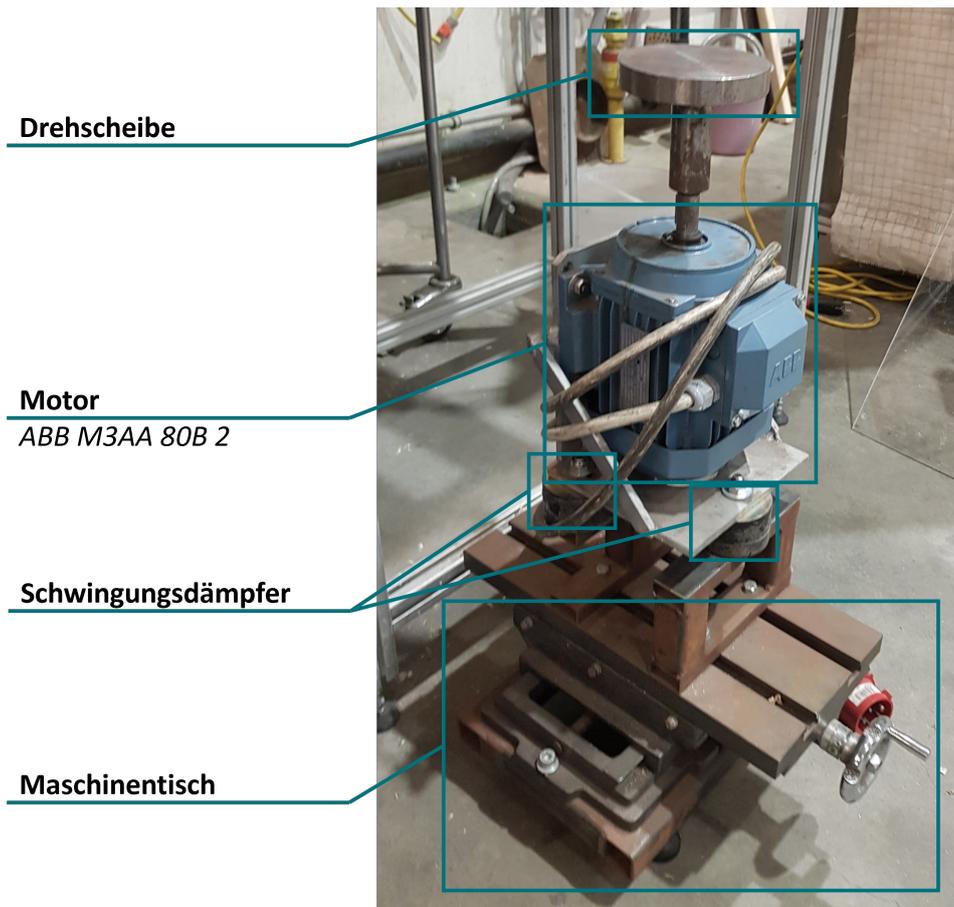


Abbildung 36: Fotografie vom Aufbau des Maschinentischs mit Schwingungsdämpfern, Elektromotor und Drehscheibe.

#### 4.5.4 Drehscheibe

Die Nabe des Elektromotors besitzt eine Passfedernut und eine axiale Bohrung mit einem M6-Gewinde. Über die Passfedernut wird eine Riemenscheibe mit einem Durchmesser von 160 mm aufgenommen, die den Zweck hat, die rotierende Masse zu vergrößern, um so die Laufruhe zu optimieren. Die Aufnahme der eigentlichen Drehscheibe zur Zerstäubung erfolgt über des innen liegende M6-Gewinde, in das die Achse der Drehscheibe verschraubt wird.

#### 4.5.5 Tiegelhalterung

Zur Befestigung des Tiegels wird eine Tiegelhalterung gebaut. Diese besteht aus einer Metallplatte, die mit Feuerfeststeinen ausgelegt wird, auf denen ein Ring aus Feuerfestzement platziert werden kann. Dieser Ring hat eine Vertiefung deren Durchmesser dem des verwendeten Tiegels entspricht. Dadurch kann der Tiegel passgenau in der Tiegelhalterung positioniert werden.

Die Tiegelhalterung wird mit vier Gewindestangen an zwei Aluminium Konstruktionsprofilen montiert, wodurch die Höhe der Halterung und somit die Position des Tiegels innerhalb der Spule der Induktionsschmelzanlage verstellt werden kann. Eine Fotografie der installierten Tiegelhalterung ist in Abbildung 37 dargestellt.



Abbildung 37: Fotografie der montierten Tiegelhalterung mit einem Ring aus Feuerfestzement.

## 4.6 Versuchsdurchführung

Insgesamt werden zwei Versuche durchgeführt, wobei der zweite Versuch auf den Erfahrungen des ersten aufbaut. Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß der Beschreibung in Abschnitt 3.2, wobei die Positionierung der Messgeräte in Abbildung 38 dargestellt ist.

### High-Speed-Kamera

*Chronos 1.4*

### Messkarte

*National Instruments*

### Action-Kamera

*GoPro Hero 4*

### Wärmebildkamera

*InfraTech VarioCam*

### Videokamera

*Sony Handycam*



Abbildung 38: Positionierung der Messgeräte für die Versuche an der Rotationszerstäubung.

Bei der Herstellung der Tiegelsysteme wird die Menge des eingesetzten Hüttensandes jeweils gravimetrisch bestimmt. Dabei ergeben sich für die zwei Versuche 1124,3g bzw. 1178,1g. Gemäß den in Abschnitt 3.1 berechneten Arbeitsbereichen werden als Signalgrößen für die

Versuche die Drehzahlen  $1000 \text{ min}^{-1}$  und  $800 \text{ min}^{-1}$  ausgewählt, die mit den restlichen Steuergrößen in der Tabelle 9 zusammengefasst sind.

Tabelle 9: Signal- und Steuergrößen für die Inbetriebnahme-Versuche der Rotationszerstäubung.

	Versuch 1	Versuch 2
Material	HÜS4500	HÜS4500
Drehzahl / $\text{min}^{-1}$	1000	800
Einwaage / g	1124,3	1178,1
Zieltemperatur / $^{\circ}\text{C}$	1400	1400
Haltezeit / min	30	30

Um die Tiegel, wie in Abbildung 17 dargestellt, dämmen zu können, wird eine Keramikfasermatte passgenau zugeschnitten und um die Tiegel gewickelt, so dass alle Lücken geschlossen werden. Einzig an der Vorderseite wird eine Öffnung mit einem Durchmesser von ca. 1 cm hergestellt, um mit der Wärmebildkamera die Oberflächentemperatur des Keramiktiegels bestimmen zu können.

Das geschlossene Tiegelsystem wird anschließend in der Spule der Induktionsschmelzanlage platziert und die zuvor eingearbeiteten Thermoelemente mit der Messkarte verbunden. Nach Beginn der Aufzeichnung der Messdaten kann mit dem Erwärmen der Probe begonnen werden. Dazu wird über die Kontrolleinheit der *InduMelt* eine Leistung vorgegeben, die sukzessive erhöht wird, bis die Wärmebildkamera die Haltetemperatur anzeigt. Sobald diese erreicht ist wird die Leistung reduziert und die Temperatur gehalten, bis nach Ablauf der Haltezeit der Abstich vorbereitet wird.

Für den Abstich wird die Wärmebildkamera so positioniert, dass sich der Drehteller und der Schlackenstrahl im Messbereich befinden. Weiters wird am Frequenzumrichter die Drehzahl der Drehscheibe vorgegeben. Anschließend werden die Videoaufzeichnung aller Kameras gestartet und die Verbindung des Netzteil mit dem Stromnetz getrennt. Danach wird innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne der Stopfen, unter Berücksichtigung aller Sicherheitsaspekte und mithilfe der Schutzausrüstung, nach oben aus dem Tiegel gezogen. Dadurch läuft das schmelzflüssige Material auf die Drehscheibe und wird granuliert.

Nach einer kurzen Abkühlphase kann das Material der Analyse zugeführt werden. Das abgekühlte Granulat wird einer Siebanalyse mit den Maschenweiten  $20\,000 \mu\text{m}$ ,  $9000 \mu\text{m}$ ,  $6300 \mu\text{m}$ ,  $4000 \mu\text{m}$ ,  $3150 \mu\text{m}$ ,  $2000 \mu\text{m}$ ,  $1000 \mu\text{m}$ ,  $500 \mu\text{m}$ ,  $250 \mu\text{m}$  unterzogen. Dabei werden die künstliche Mineralfasern und der Regulus außen vorgelassen, da sich diese nicht für eine Siebanalyse eignen. Im Anschluss an die Siebanalyse wird eine Rückstellprobe entnommen und die Granulatfraktion an die TU Graz zur Bestimmung des Glasgehaltes übermittelt.

Zeitgleich erfolgt die Analyse der thermo- und videographischen Messverfahren, sowie die Bestimmung der Korngrößenverteilung mittels Bildanalyse.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Resultate der Auslegungsberechnungen, die finalen Konstruktionszeichnungen sowie die fertiggestellte Rotationszerstäubung präsentiert und diskutiert. Abschließend erfolgt die Auswertung der Analysen der durchgeführten Versuche.

### 5.1 Auslegung der Rotationszerstäubung

Nachfolgend werden die einzelnen Teilergebnisse der Auslegung der Rotationszerstäubung anhand der empirischen Formeln besprochen.

#### 5.1.1 Voraussichtlicher Massenstrom

Durch Auswertung der Daten aus Tabelle 15 in Anhang B mit den Formeln 23 und 24 kann ein voraussichtlicher Massenstrom von

$$\dot{m} = 0,123 \text{ kg s}^{-1}. \quad (27)$$

und ein voraussichtlicher Volumenstrom von

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,123 \text{ kg s}^{-1}}{2600 \text{ kg m}^{-3}} = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (28)$$

berechnet werden.

#### 5.1.2 Scheibendurchmesser

Gemäß der in Gleichung 20 angeführten Formel kann der minimal erforderliche Scheibendurchmesser  $D$ , unter Zuhilfenahme des voraussichtlichen Volumenstroms, in Abhängigkeit der Drehzahl  $n$  berechnet werden, siehe Abbildung 39.

Um in allen Betriebspunkten Schlupf zu verhindern, wird ein Drehscheibendurchmesser von 120 mm gewählt. Dieser ist neben dem Volumenstrom auch von den Stoffeigenschaften wie der Dichte und der dynamischen Viskosität des Materials abhängig, die wiederum von der Temperatur abhängig sind. In dieser Auswertung wurden sie zur Vereinfachung als konstant angenommen.

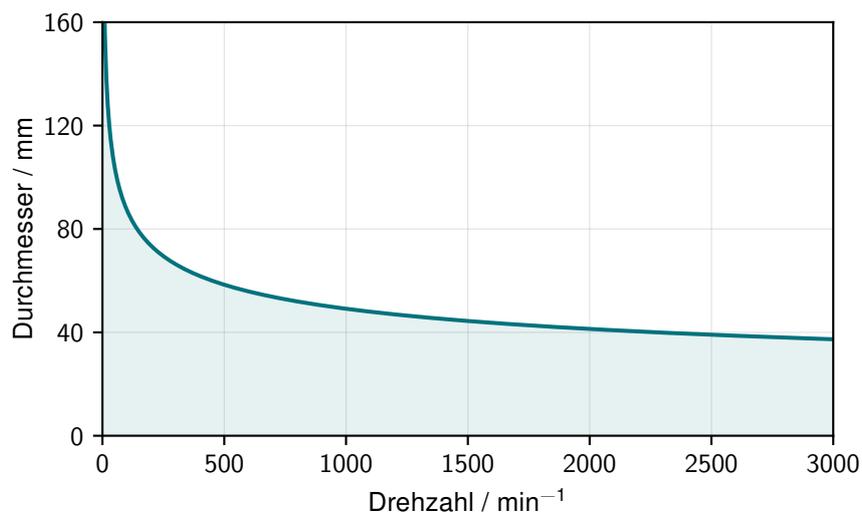


Abbildung 39: Minimaler Scheibendurchmesser in Abhängigkeit der Drehzahl zur Verhinderung von Schlupf.

### 5.1.3 Mindestvolumenstrom

Der in Gleichung 26 beschriebene Mindestvolumenstrom zur Vermeidung einer Gerinneströmung kann für alle möglichen Benetzungswinkel von 0° bis 180° ausgewertet werden, wie in Abbildung 40 dargestellt ist.

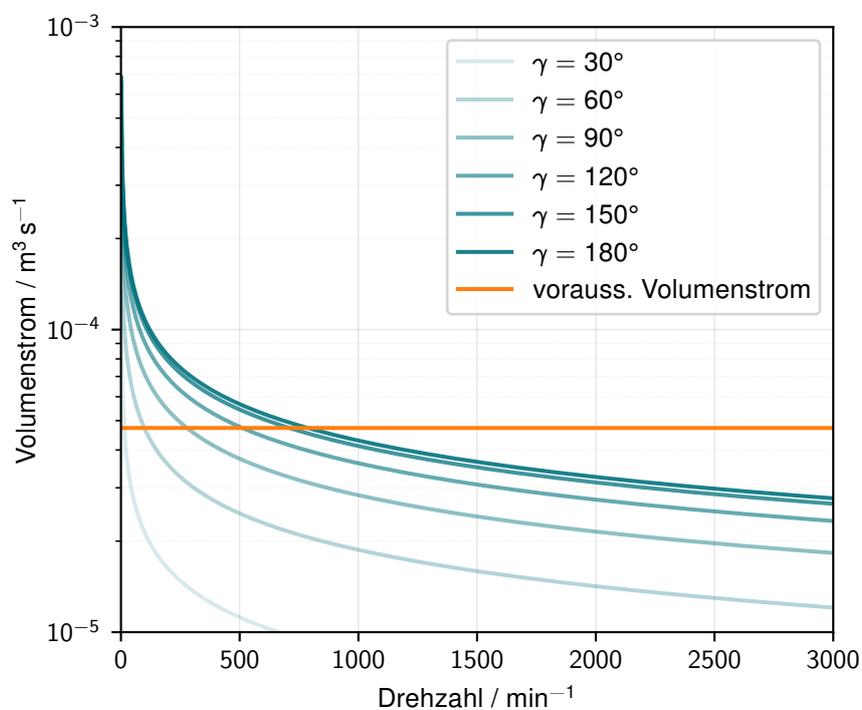


Abbildung 40: Berechnung des minimalen Volumenstroms  $\dot{V}_{min}$  zur Verhinderung einer Gerinneströmung nach [22], [32] für unterschiedliche Benetzungswinkel  $\gamma$ .

In der Abbildung 40 ist erkennbar, dass der voraussichtliche Volumenstrom von  $4,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ab einer Drehzahl von  $n = 785 \text{ min}^{-1}$  eine gerinnefreie Strömung unter allen Benetzungswinkeln erlaubt.

Mit sinkendem Benetzungswinkel sinkt auch die niedrigst mögliche Drehzahl, bei der keine Gerinneströmung eintritt. Benetzt die Flüssigkeit die Drehscheibe mit einem Winkel kleiner  $120^\circ$ , so sind auch Drehzahlen bis 500 Umdrehungen pro Minute möglich.

#### 5.1.4 Übergang zwischen den Zerfallsarten

In Abbildung 41 sind die Grenzvolumenströme für den Fadenzerfall für die gegebenen Prozessparameter und Stoffeigenschaften nach der variablen Drehzahl ausgewertet. Dabei ist in Abbildung 41 erkennbar, dass nach Tanasawa et al. [39] die Drehzahl zwischen  $100 \text{ min}^{-1}$  bis  $500 \text{ min}^{-1}$  liegen muss, um den Betriebsbereich zu erreichen. Diese liegt jedoch unter der zuvor festgestellten minimalen Drehzahl von  $785 \text{ min}^{-1}$ , weshalb der Benetzungswinkel unter  $120^\circ$  liegen muss, damit es zum Fadenzerfall kommt. Nach Frost [40] wird der Übergangsbereich zum Lamellenzerfall allerdings erst bei einer Drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  erreicht.

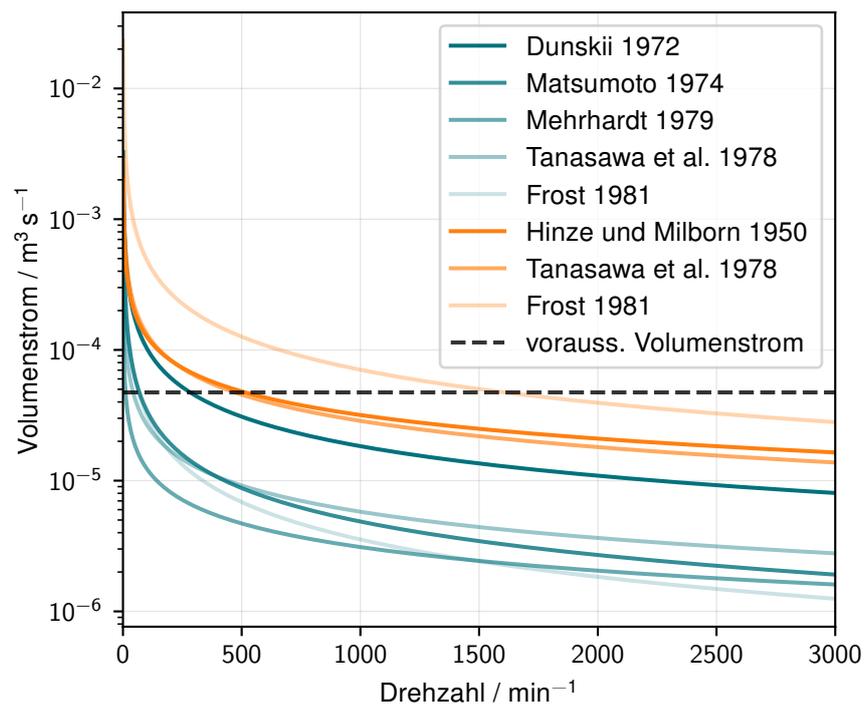


Abbildung 41: Berechnung der voraussichtlichen Grenzvolumenströme ( $\dot{V}_{min}$ : Türkis,  $\dot{V}_{max}$ : Orange) für die Übergänge der Zerfallsbereiche.

### 5.1.5 Dicke der Filmströmung und Randdicke

Die Dicke der Filmströmung auf der Drehscheibe kann gemäß der Formel 21 berechnet werden, siehe Abbildung 42.

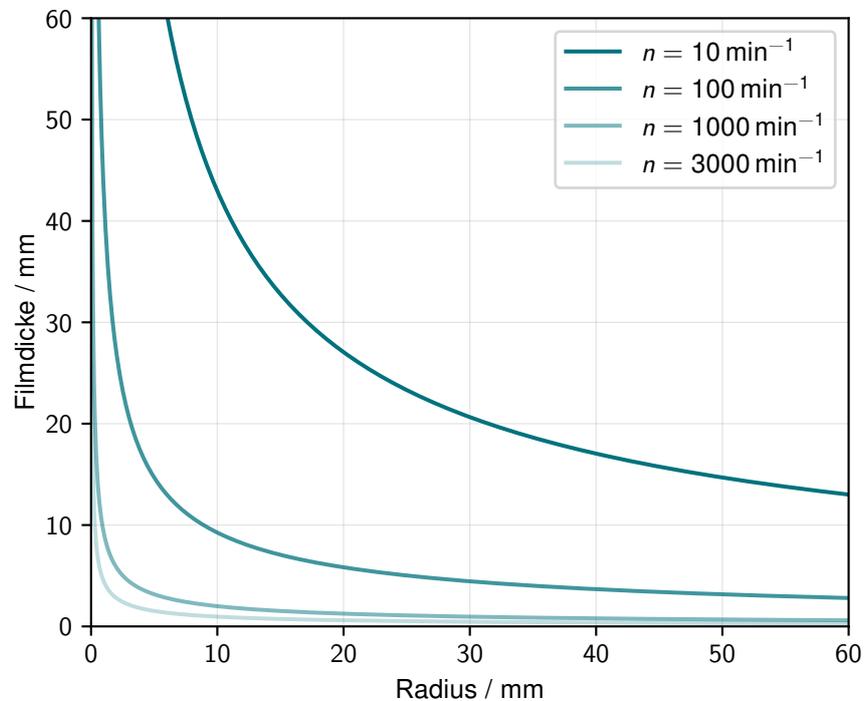


Abbildung 42: Verlauf der Filmströmung auf der Drehscheibe.

Wird dieselbe Formel 21 bei konstantem Radius mit variabler Drehzahl ausgewertet, so ergibt sich eine Darstellung für die Dicke der Randschicht, wie in Abbildung 43 dargestellt ist.

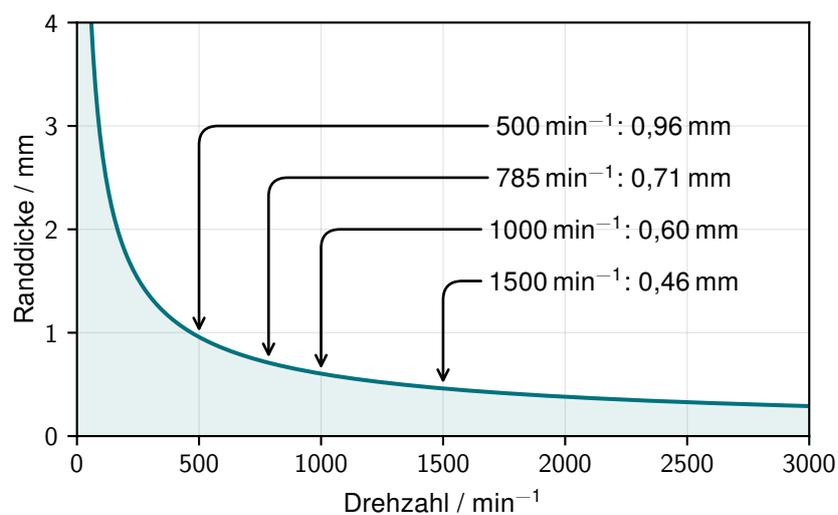


Abbildung 43: Abhängigkeit der Randdicke von der Drehzahl.

### 5.1.6 Tropfendurchmesser

Gemäß den Gleichungen aus den Tabellen 4, 5 und 6 kann der Durchmesser der entstehenden Partikel für den gegebenen Fall bestimmt werden. Abbildung 44 zeigt den Durchmesser als Funktion der Drehzahl, die variabel gewählt werden kann. Die durchgezogenen Linien symbolisieren dabei den Sauterdurchmesser  $x_{32}$  der das Verhältnis zwischen dem Volumen und der Oberfläche der Teilchen angibt. Von Duskii und Nikitin [37] wird der Durchmesser als Median  $x_{0,5}$  der Partikelverteilung angegeben.

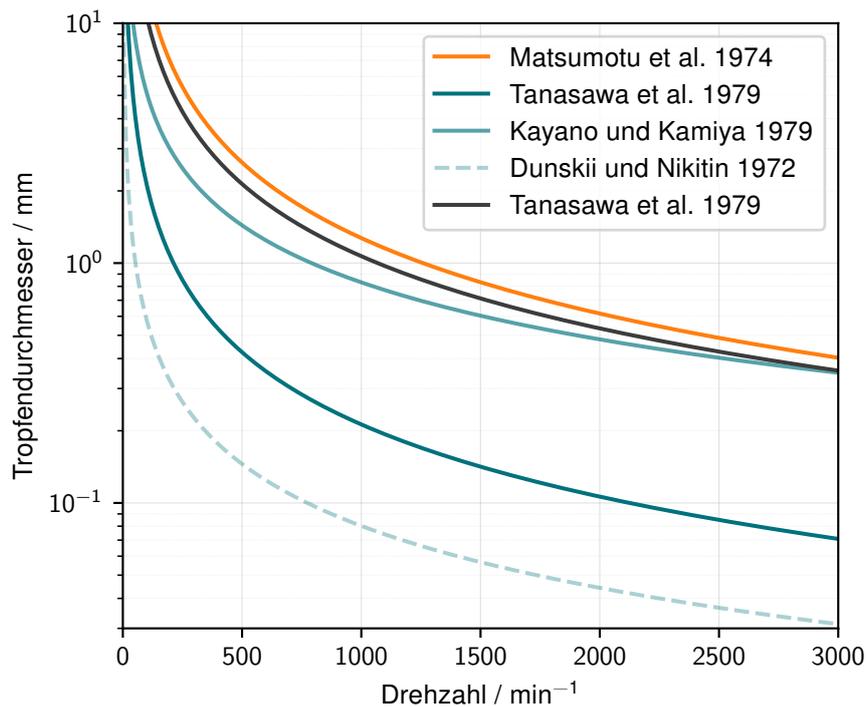


Abbildung 44: Abhängigkeit des Tropfendurchmessers von der Drehzahl (Grau: direkter Tropfenzerfall, Türkis: Fadenzerfall, Orange: Lamellenzerfall; Angabe als Sauterdurchmesser  $x_{32}$ , außer Duskii und Nikitin 1972:  $x_{0,5}$ ).

## 5.2 Konstruktion der Rotationszerstäubung

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus der Konstruktion der Rotationszerstäubung dargestellt.

### 5.2.1 Adaptierung der Induktionsschmelzanlage

Die neu konstruierte Induktionsschmelzanlage ist in Abbildung 45 dargestellt und ein Konstruktionsplan zur Anlage in Anhang D.2 verfügbar. Dabei ist erkennbar, dass gegenüber der Ursprungsvariante nun mehr Raum unter dem Schwingkreis verfügbar ist. Außerdem sind alle Bedienelemente dem Anlagenführer zugewandt, wodurch dieser beim Betrieb der Anlage schneller und sicherer auf die Gegebenheiten reagieren kann. Das neue Design bietet dabei weiterhin die Möglichkeit, alle bisherigen Anbauteile ohne deren Adaption weiter zu verwenden, da sich die Höhe der Spule nicht verändert hat.



Abbildung 45: Visualisierung der adaptierten Induktionsschmelzanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.

### 5.2.2 Rotationszerstäubung

In der Abbildung 46 ist die konstruierte Rotationszerstäubung dargestellt. Die Pläne dazu sind in Anhang D.3 ersichtlich. Sie bietet einen Granulationsraum mit einem Durchmesser von 1100 mm und einer Tiefe von 338 mm. Die Drehscheibe ist mit einem Durchmesser von 120 mm ausgeführt und in einem Abstand von 240 mm, bei einem Sicherheitsabstand von 100 mm zu oberem Rand, von der Abstichöffnung positioniert. Die gesamte Anlage kann entweder mittels einem Hubwagen, oder über die angebrachten Anschlagpunkte mit einem Kran bewegt werden.



Abbildung 46: Visualisierung der finalen Rotationszerstäubungsanlage mit *Fusion 360*.

Abbildung 47 zeigt die Visualisierung der Rotationszerstäubung als Anbau an die modifizierte *InduMelt*. Dabei ist erkennbar, dass die Deckplatte der *InduMelt* exakt mit der oberen Kanten des Behälters und der Tiegelhalterung der Rotationszerstäubung abschließt. Dadurch ist der Schwingkreis geschützt vor möglichen Querschlägern bei der Granulation. Durch die Aufhängung der Tiegelhalterung an den Gewindestangen ist es möglich, die vertikale Position des Tiegels in der Spule zu verändern. Die horizontale Positionierung über der Drehscheibe erfolgt mit dem Maschinentisch. Ein Plan der gesamten Anlage ist in Anhang D.4 dargestellt.



Abbildung 47: Visualisierung der adaptierten Induktionsschmelzanlage *InduMelt* und der neuen Rotationszerstäubung mit dem Programm *Fusion 360*.

### 5.3 Bau der Rotationszerstäubung

Die fertiggestellte Rotationszerstäubung ist in Abbildung 48 dargestellt. Dabei ist auch die Position des Bedienpersonals erkennbar, das am Tisch einen Überblick über die gesamte Anlage und gleichzeitig alle Bedienelemente in Reichweite hat. Am vorderen Ende der Rotationszerstäubung sind auch die Wasserein- und -auslässe erkennbar, mit denen die Behälterwand gekühlt werden kann.



Abbildung 48: Fotografie der fertiggestellten Rotationszerstäubung und der umgebauten Induktionsschmelzanlage.

## 5.4 Versuche mit der Rotationszerstäubung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Versuche behandelt. Dazu wurden zuerst die Tiegel gereinigt und alle erzeugten Fraktionen gewogen, wie in der Tabelle 10 angeführt. Das granuliert Material wurde anschließend einer Siebanalyse unterzogen, um die Korngrößenverteilung bestimmen zu können.

Tabelle 10: Massenbilanz der Rotationszerstäubungsversuche mit Hüttensand (HÜS4500).

	Versuch 1	Versuch 2
Einwaage / g	1124,3	1178,1
Regulus / g	42,6	58,2
Mineralwolle / g	37,9	43,9
Produkt / g	1032,7	1061,7
Verlust / g	11,1	14,3

Bei der Rotationszerstäubung können neben dem eigentlichen Granulat bei Betriebsfehlzuständen, wie An- und Abfahrphänomenen, künstliche Mineralfasern entstehen, wie in Abbildung 49 erkennbar ist. Diese wurden separat erfasst und entsprechen 3,4 % der Masse des Produktes bei Versuch 1 bzw. 3,8 % bei Versuch 2.



Abbildung 49: Fotografie der entstandenen künstlichen Mineralfasern bei Versuch 1.

Aufgrund der Reaktion des Sauerstoffs im Probenmaterial mit dem Graphittiegel reduzieren die metallischen Bestandteile des Hüttensands und sinken im Tiegel zu Boden. Dabei entsteht der sogenannte Regulus. Dieser wird beim Abstich nicht ausgetragen und kann anschließend mechanisch entfernt werden. Zuzüglich des Regulus und den künstlichen Mineralfasern trat bei Versuch 1 ein Verlust von 11,1 g bzw. 0,99 % der eingewogenen Masse auf. Bei Versuch 2 entsprach der Verlust 14,3 g bzw. 1,2 %.

Der Massenverlust lässt sich dadurch erklären, dass beim Ausleeren des Behälters nicht alle Teilchen eingesammelt werden konnten. Einige wenige Partikel setzten sich permanent an der Oberfläche des Behälters fest. Außerdem wird durch die Metallreduktion mit Kohlenstoff (zum Beispiel:  $\text{FeO} + \text{CO} \longrightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ ) der gebundene Sauerstoff aus dem Material entfernt und mit dem Abgas aus dem System ausgetragen.

#### 5.4.1 Aufheizrate und Temperaturprofil

In Abbildung 50 sind die Messwerte der Thermoelemente, der Wärmebildkamera und der Leistungselektronik beim Aufheizen des Versuchs 1 dargestellt. Es ist erkennbar, dass zwischen den Thermoelementen und der Wärmebildkamera eine deutliche Diskrepanz herrscht. Möglicherweise wurden die Thermoelemente beim Verschweißen verunreinigt, wodurch sich der Seebeck-Koeffizient verändert. Daher wurde im Verlauf des Versuchs die Wärmebildkamera als Haupttemperatursteuergröße herangezogen.

Die Leistung wurde in kleinen Schritten erhöht, um so das Verhalten der gesamten Anlage bei der Erstinbetriebnahme beobachten zu können. Nach ca. 2 Stunden und 45 Minuten wurde die Haltetemperatur erreicht und eine halbe Stunde lang gehalten.

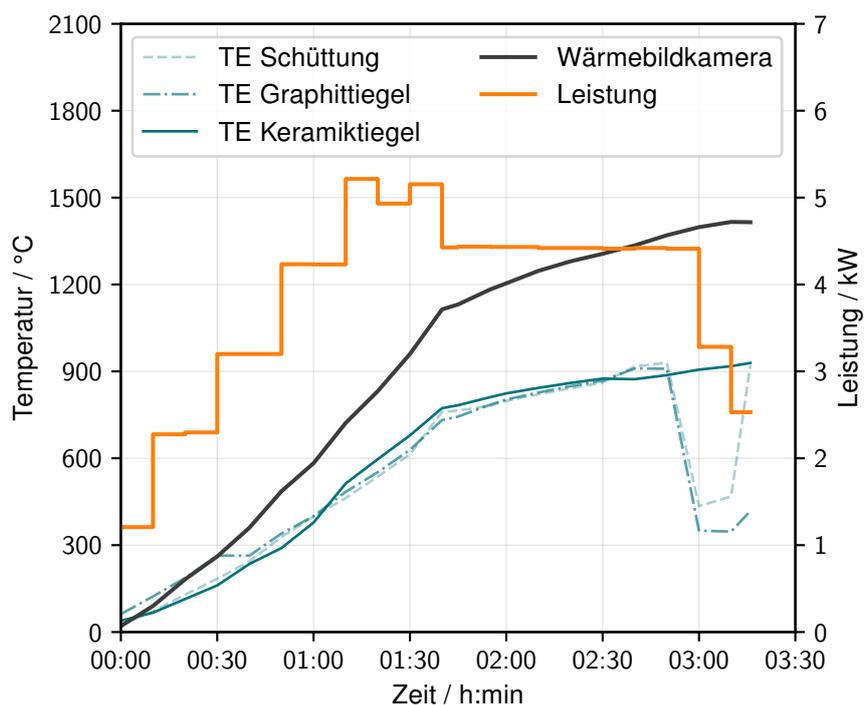


Abbildung 50: Temperatur- und Leistungsprofil der Induktionsschmelzanlage beim Aufheizvorgang zu Versuch 1 (TE = Thermoelement).

Abbildung 51 zeigt die gleichen Messwerte für den Versuch 2. Da beim Aufheizen von Versuch 1 keine Komplikationen mit der Anlage aufgetreten sind, wurde der Leistungseintrag bei Versuch 2 erhöht. Dadurch konnte die Haltetemperatur bereits nach 2 Stunden erreicht werden. Außerdem zeigen die Thermoelemente und die Wärmebildkamera eine gute Übereinstimmung, wobei

die Thermoelemente bei hohen Temperaturen anfangen zu schwanken, da der Messbereich außerhalb ihres Arbeitsbereichs von 1100 °C liegt [54].

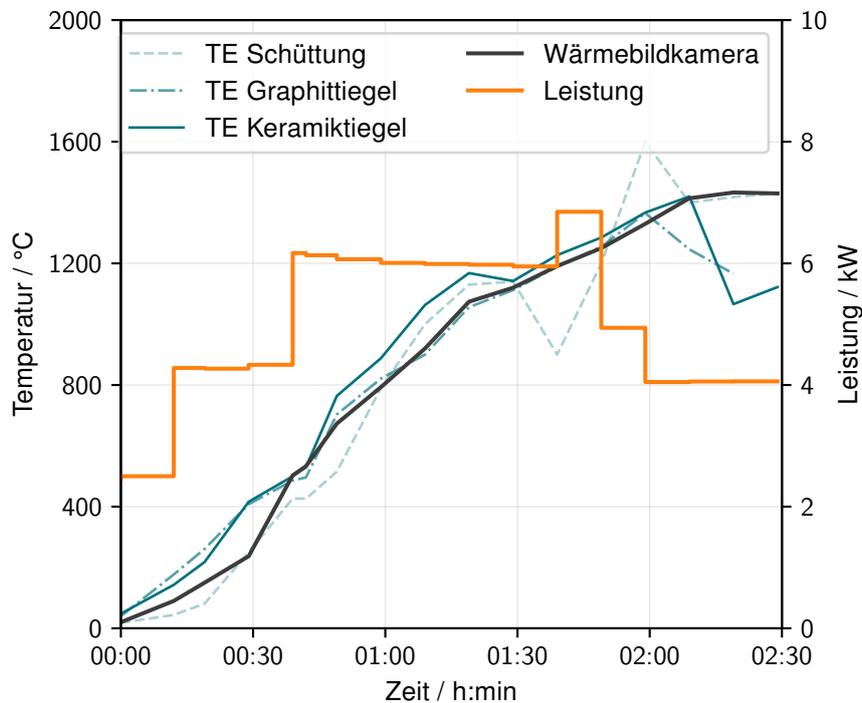


Abbildung 51: Temperatur- und Leistungsprofil der Induktionsschmelzanlage beim Aufheizvorgang zu Versuch 2 (TE = Thermoelement).

#### 5.4.2 Abstichtemperatur und -dauer

Beim Abstich wurde die Wärmebildkamera so positioniert, dass das Auftreffen des Schlackenstrahls auf die Drehscheibe beobachtet werden kann. Aus den Messdaten kann die maximale Temperatur ausgelesen und über die Zeit aufgetragen werden. Damit ergibt sich der Temperaturverlauf beim Abstich woraus sich wiederum die Dauer des Abstichs ermitteln lässt.

Beim ersten Versuch war die Wärmebildkamera beim Abstich falsch parametrierter, wodurch ihr maximaler Messbereich mit 600 °C begrenzt war. Darum wurde in Abbildung 52 nur eine relative Temperatur angegeben. Es lässt sich jedoch trotzdem die Abstichdauer mit 22,8 s ermitteln. Die Spitzen am Ende der Zeitdauer stammen von einzelnen Tropfen, die durch manuelles Schütteln des Tiegels gelöst worden sind.

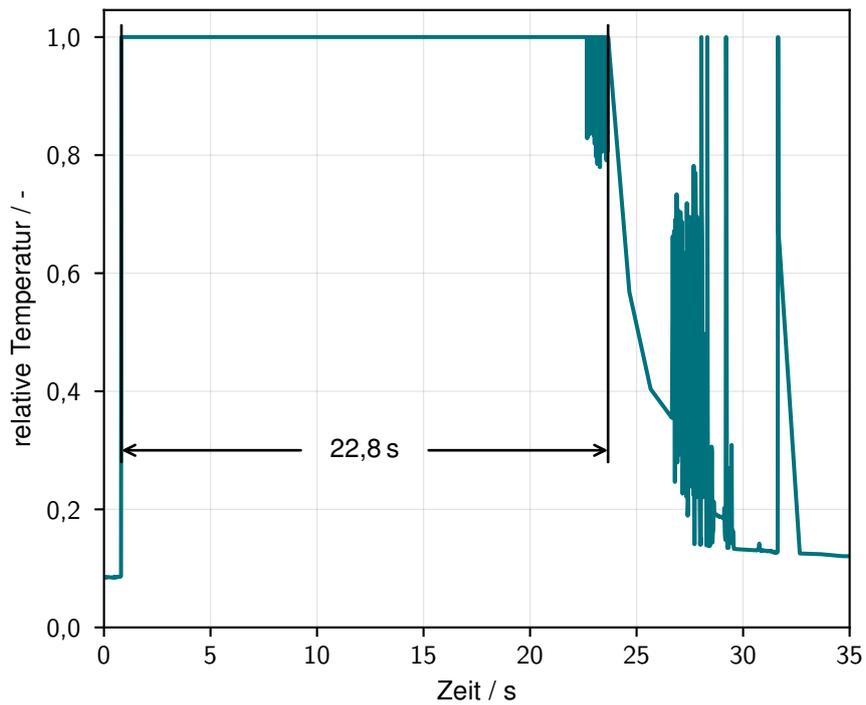


Abbildung 52: Temperaturprofil des Abstichs bei Versuch 1.

Abbildung 53 zeigt den Verlauf der Abstichtemperatur des zweiten Versuchs.

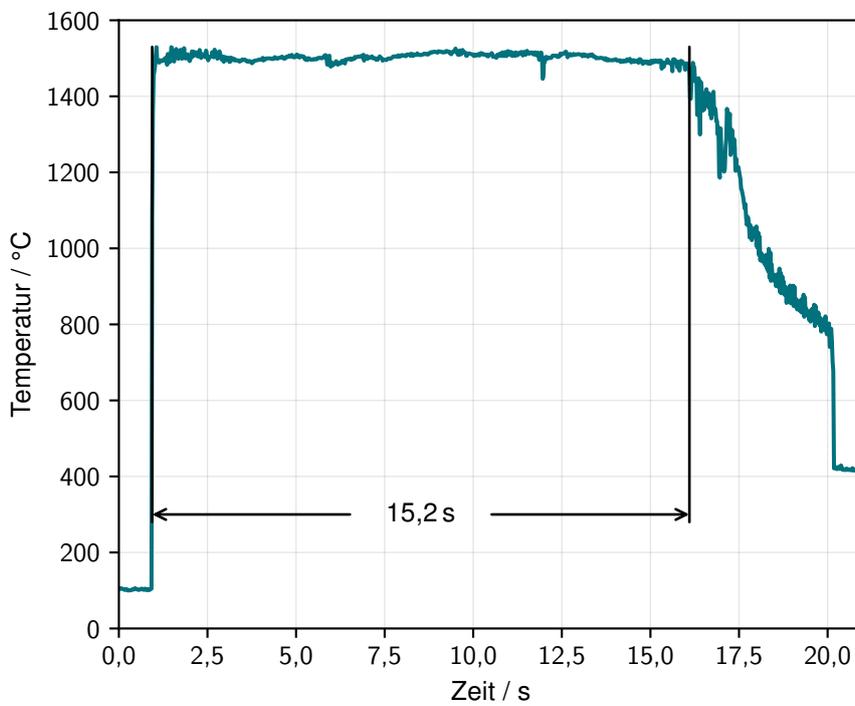


Abbildung 53: Temperaturprofil des Abstichs bei Versuch 2.

Die Wärmebildkamera wurde für den zweiten Versuch korrekt parametrierung, weshalb eine Abstichtemperatur von 1500 °C gemessen werden konnte. Somit wurde die Zieltemperatur von 1400 °C um 100 °C übertroffen. Für die Dauer des Abstichs konnte eine Zeit von 15,2 s bestimmt werden.

Aus der Abstichdauer und der abgestochenen Masse lässt sich der mittlere Massenstrom berechnen. In Kombination mit der Dichte des Hüttensands ergibt sich schließlich der Volumenstrom, wie in der Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Berechnung der Massen- und Volumenströme bei den Rotationszerstäubungsversuchen mit Hüttensand (HÜS4500).

	Versuch 1	Versuch 2
Mineralwolle / g	37,9	43,9
Produkt / g	1032,7	1061,7
Summe / g	1070,6	1105,6
Zeit / s	22,8	15,2
Massenstrom / $\text{kg s}^{-1}$	0,047	0,073
Volumenstrom / $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$2,80 \cdot 10^{-5}$

### 5.4.3 Auswertung der Videoaufnahmen

Nachfolgend werden einzelne Standbilder aus den Videoaufnahmen beispielhaft ausgewertet und diskutiert.

#### Versuch 1

Abbildung 54 zeigt das Innere der Rotationszerstäubung während des Versuchs. Dabei ist erkennbar, dass sich die Teilchen aufgrund der hohen tangentialen Beschleunigung nahezu in einer geraden Linie von der Drehscheibe wegbewegen. Sie treffen auf die Behälterwand auf, wo sie kurz anhaften und anschließend abfallen. Dadurch sammeln sich die meisten Tropfen an der Ecke zwischen Behälterwand und -boden. Das kann dazu führen, dass die noch warmen Partikel zu größeren Tropfen agglomerieren.



Abbildung 54: Aufnahme des Behälters der Rotationszerstäubung mit der Action-Kamera bei Versuch 1.

In Abbildung 55 ist eine Nahaufnahme der Drehscheibe zu sehen. Da der Strahl exzentrisch auf die Scheibe auftrifft und sofort in radiale Richtung beschleunigt wird, bildet sich genau in der Mitte der Drehscheibe eine nicht benetzte Stelle aus.

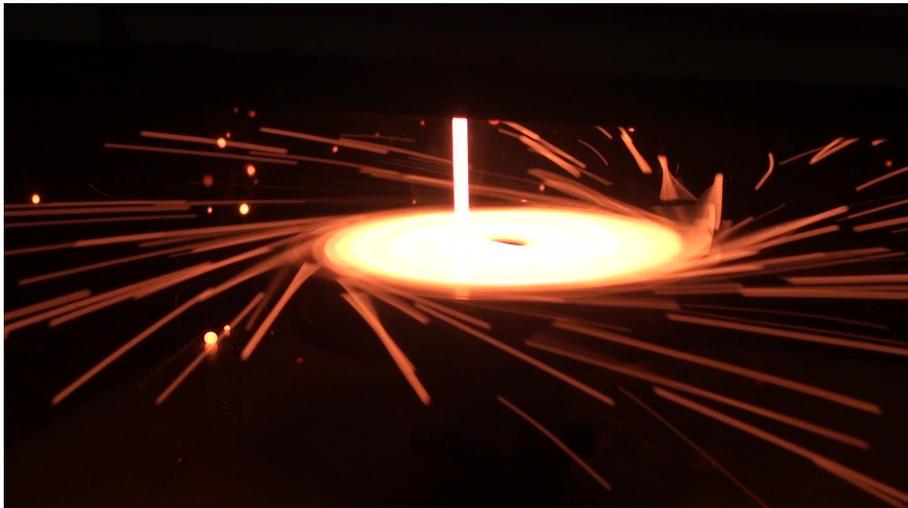


Abbildung 55: Aufnahme der Drehscheibe mit der Videokamera bei Versuch 1.

Auch wenn die Temperaturen des Schlackenstahls in Abbildung 56 nicht korrekt sind, so stimmen doch die Temperaturen unter  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Daher ist erkennbar, dass die zerteilten Schlacketropfen im Flug eine Temperatur zwischen  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufweisen.

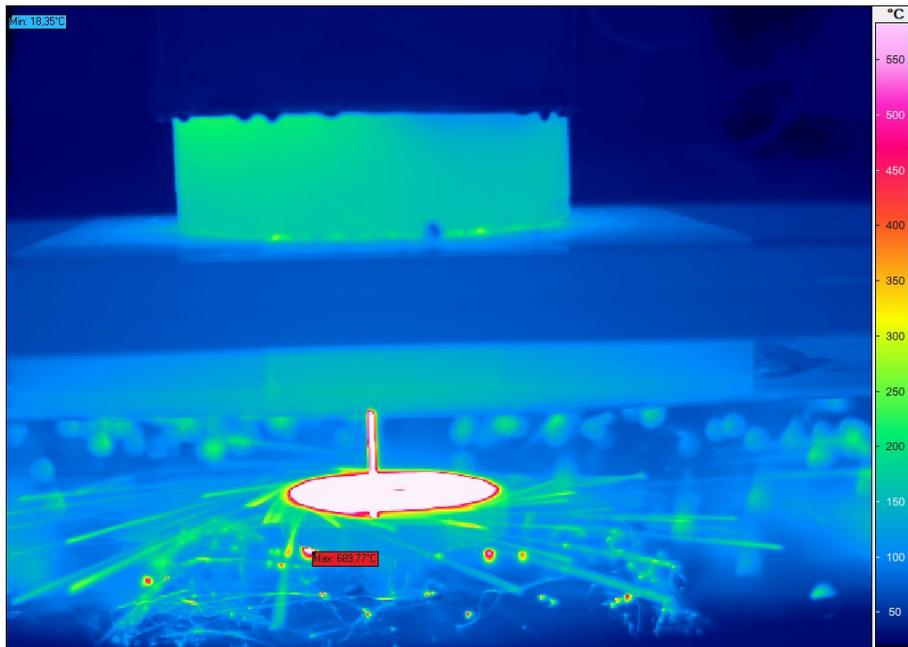


Abbildung 56: Aufnahme der Drehscheibe mit der Wärmebildkamera bei Versuch 1.

In Abbildung 57 ist die Ausbildung einer Gerinneströmung erkennbar. Dabei wird die Drehscheibe aufgrund eines zu geringen Volumenstroms nicht vollständig benetzt und die gesamte Flüssigkeit rinnt kumuliert einseitig ab. Dieser Fall sollte möglichst vermieden werden, da die heiße Schlacke ohne abzukühlen auf darunter liegende Motorabdeckung gelangt und diese beschädigen kann.

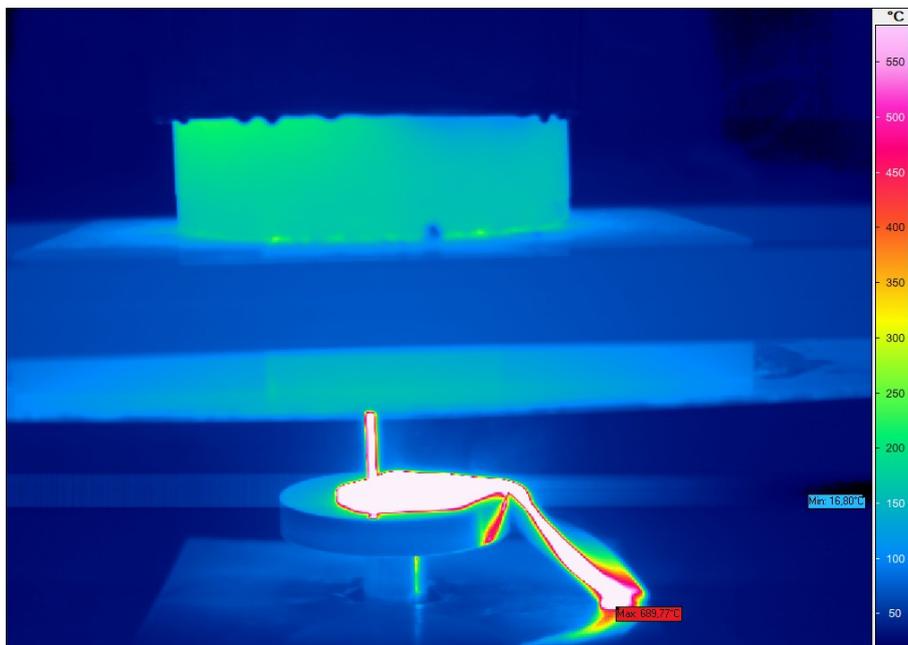


Abbildung 57: Aufnahme der Drehscheibe beim Fehlbetriebszustand einer Gerinneströmung mit der Wärmebildkamera bei Versuch 1.

## Versuch 2

Abbildung 58 zeigt eine Nahaufnahme der Drehscheibe bei Versuch 2. Dabei ist erkennbar, dass der Strahl ohne abzureißen auf die Scheibe auftrifft und sich eine, wie von Lenewit et al. [55] und Vita [56] beschriebene, spiralförmige Strömung ausbildet.

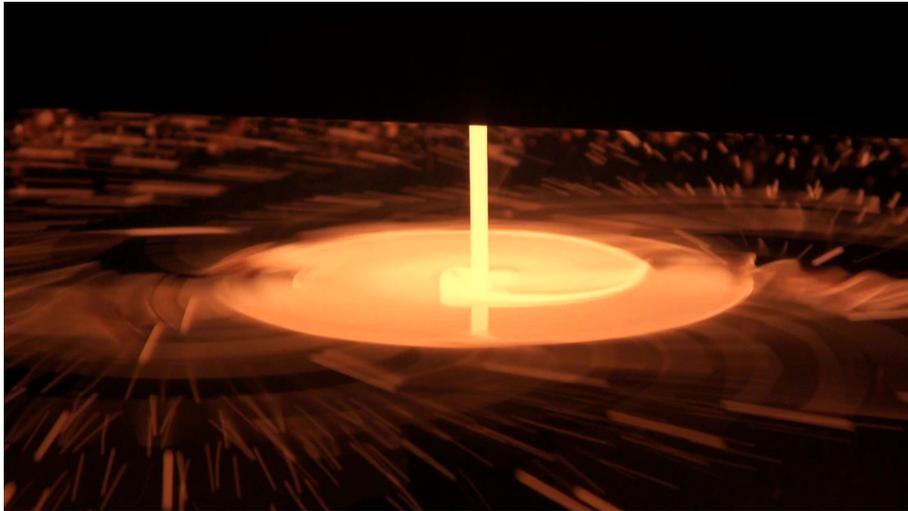


Abbildung 58: Aufnahme der Drehscheibe mit der Videokamera bei Versuch 2.

Für Versuch 2 wurde zusätzlich eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet, die die Flugbahn der Teilchen in der horizontalen Ebene verfolgt. In Abbildung 59 ist ein Standbild der Teilchen im Flug dargestellt. Durch die niedrige Verschlusszeit von  $40 \mu\text{s}$  bei 1770 Bildern pro Sekunde ist es möglich, die Bewegung der Teilchen einzufrieren, wodurch sie keine optische Verzerrung aufweisen.

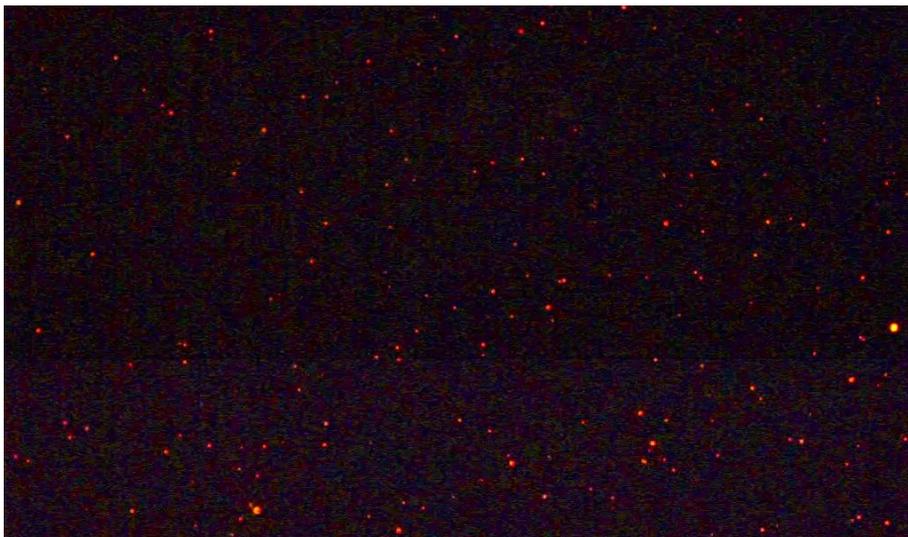


Abbildung 59: Aufnahme der Partikel im Flug mit der Hochgeschwindigkeitskamera bei Versuch 2.

Die Aufnahme der Wärmebildkamera in Abbildung 60 zeigt die homogene Verteilung des

Materials auf der Scheibe und der Partikel im Flug. Es ist erkennbar, dass einige, vor allem große, Teilchen, die an der Behälterwand auftreffen noch eine Temperatur von über 1000 °C aufweisen. Die kleineren Partikel verlieren aufgrund ihres größeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses schneller ihre Temperatur und kühlen bis zum Kontakt mit der Behälterwand auf ca. 650 °C ab.

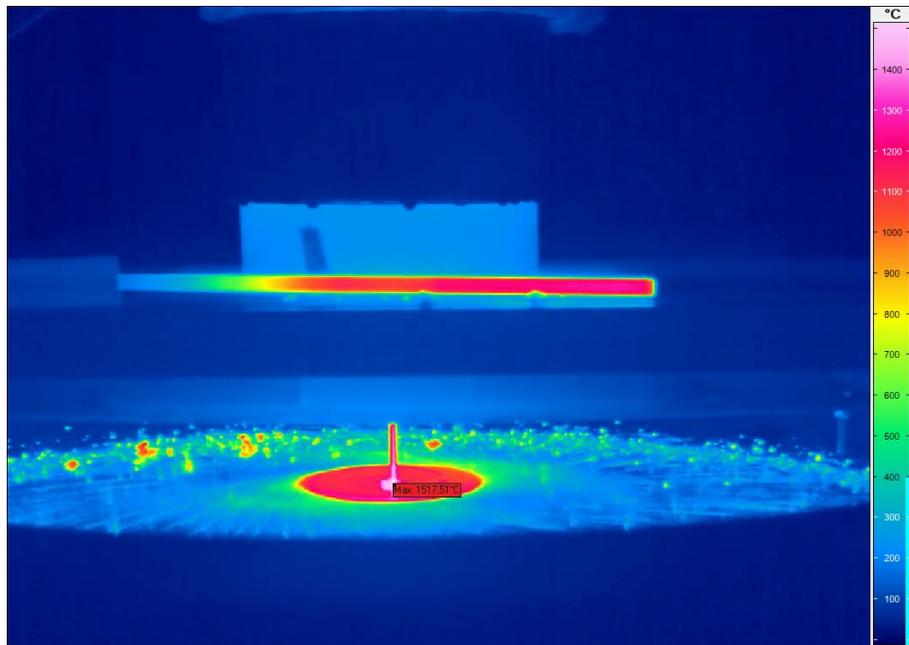


Abbildung 60: Aufnahme der Drehscheibe und der Behälterwand mit der Wärmebildkamera bei Versuch 2.

### 5.4.4 Siebanalyse

In Abbildung 61 ist das Ergebnis der Siebanalyse des ersten Versuchs dargestellt. Darin ist erkennbar, dass der Hauptpeak bei 7,4 mm liegt. Dieser stammt allerdings nicht von der Granulation der Partikel, sondern vom dem Anteil der nicht granulierten Bestandteile. Durch den niedrigen Massenfluss lässt sich auf eine hohe Viskosität und somit eine niedrige Temperatur schließen, wodurch die Schlacke zu großen Teilen eine Gerinneströmung ausgebildet hat und nicht granuliert ist.

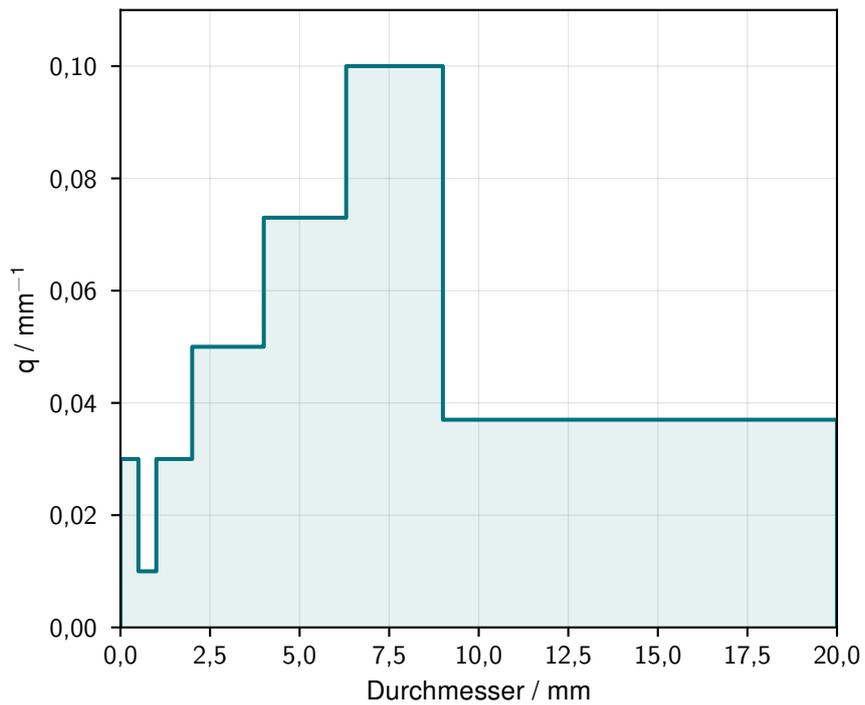


Abbildung 61: Bestimmung der Verteilungsdichte des Tropfendurchmessers bei Versuch 1 mittels einer Siebanalyse.

In Abbildung 62 ist die Häufigkeitsverteilung der Siebanalyse des zweiten Versuchs ersichtlich.

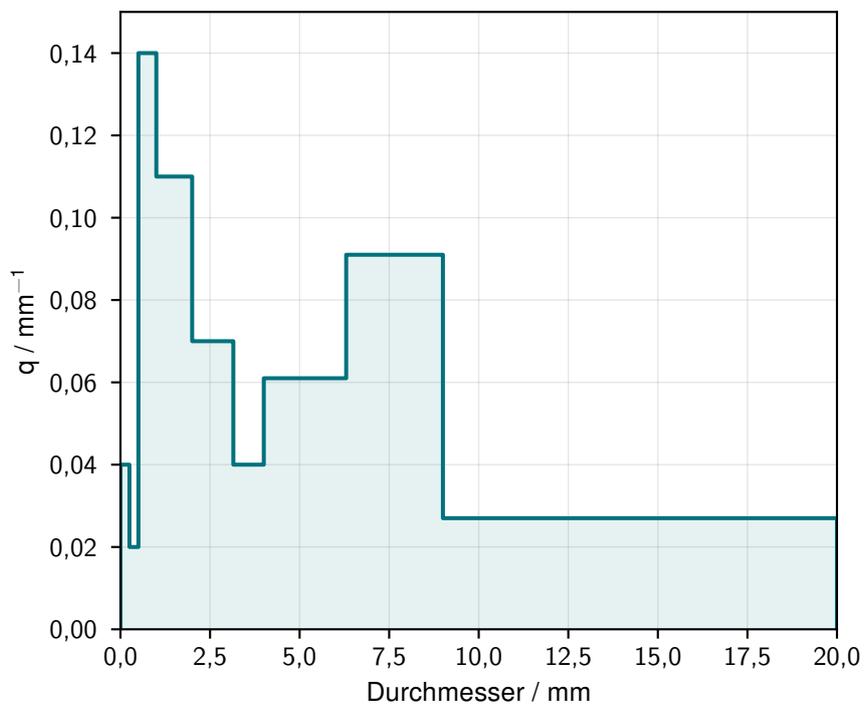


Abbildung 62: Bestimmung der Verteilungsdichte des Tropfendurchmessers bei Versuch 2 mittels einer Siebanalyse.

Die für Versuch 2 durchgeführte Siebanalyse zeigt ihren Hauptpeak zwischen 0,5 mm bis 1 mm was bedeutet, dass der Großteil des Probenmaterials ordnungsgemäß granuliert ist. Außerdem weist auch sie einen Peak bei 7,5 mm, der auf nicht granulierten Bestandteile beim An- und Abfahren zurückzuführen ist, auf.

### 5.4.5 Optische Auswertung der Korngrößenverteilung

Bei Versuch 2 wurde der Granulationsprozess mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Diese zeichnete den Flug der Partikel mit 1770 Bildern pro Sekunde bei einer Verschlusszeit von 40  $\mu$ s und einer Blende 4 auf. Insgesamt konnten so 8 Sekunden Videomaterial im internen Bufferspeicher der Kamera gespeichert werden. Davon wurden 4680 Frames ausgewählt, die zu einer optischen Bestimmung der Partikelgrößenverteilung herangezogen werden.

Für die Analyse der Partikelverteilung wird das Python Paket „OpenCV“ [57] verwendet. Aus einer Referenzaufnahme eines Rasters mit bekanntem Gitterabstand ist es möglich, eine Bemaßung der Frames durchzuführen, wobei sich eine Auflösung von 3,23 Pixel pro Millimeter ergibt. Die hellen Partikel werden vom dunklen Hintergrund durch die Änderung im Kontrast vom Skript unterschieden und der den Fläche bestimmt. Das gesamte Skript ist in Anhang C angeführt. Die von Skript gefundenen Partikel sind für einen Frame beispielhaft in Abbildung 63 markiert.

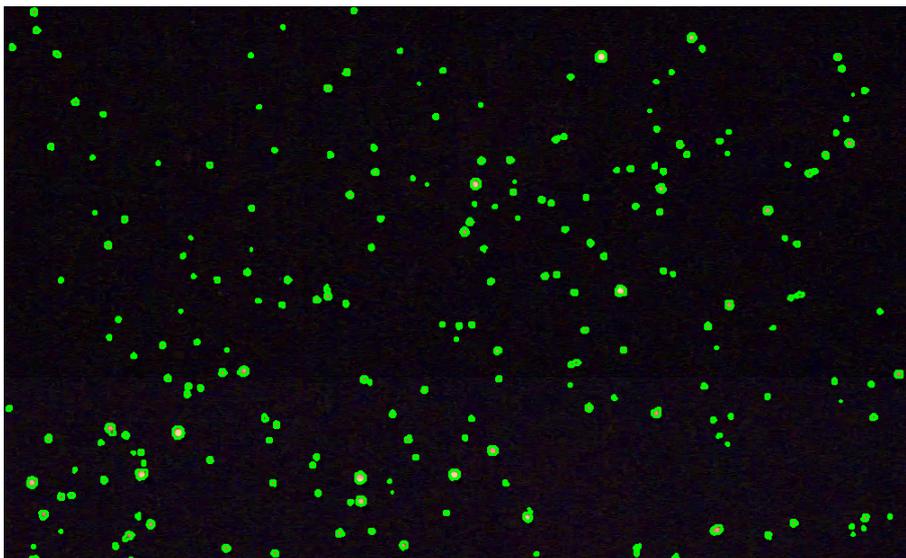


Abbildung 63: Markierung der Partikelkontouren bei der Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit einem Python-Skript.

Die gefundenen Partikel können anhand ihrer Größe statistisch ausgewertet werden, was zur Abbildung 64 führt. Dazu wurden 4680 einzelne Frames der Videoaufnahme analysiert, die den Granulationsprozess zum Zeitpunkt seiner vollen Ausprägung abbilden. In Abbildung 64 ist zusätzlich die Korngrößenverteilung aus der Siebanalyse als Vergleich überlagert. Der Hauptpeak bei der optischen Auswertung liegt bei 1 mm und ist wesentlich feiner aufgelöst als bei der Siebanalyse, die aufgrund fester Maschenweiten diesbezüglich begrenzt ist. Zur besseren Vergleichbarkeit können die Werte der optischen Analyse auch in die Kornklassen der Siebanalyse eingeteilt werden, wie in Doschek-Held [18] beschrieben ist.

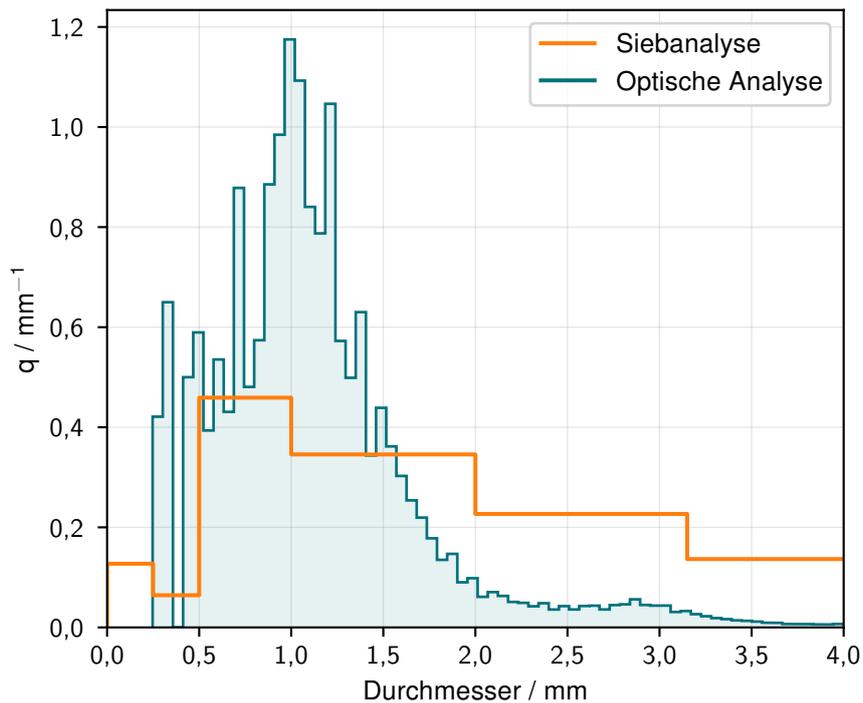


Abbildung 64: Bestimmung der Verteilungsdichte des Tropfendurchmessers bei Versuch 2 mittels einer Bildauswertung.

#### 5.4.6 Berechnung des Grenzvolumenstroms und Tropfendurchmessers

Die Grenzvolumenströme gemäß den Gleichungen der Tabellen 2 und 3 können nun den tatsächlichen Volumenströmen bei den gegenständlichen Drehzahlen gegenübergestellt werden, siehe Abbildung 65. Dabei ist erkennbar, dass beide Versuche laut den Berechnungen im Bereich von Fadenbildung und -zerfall arbeiten.

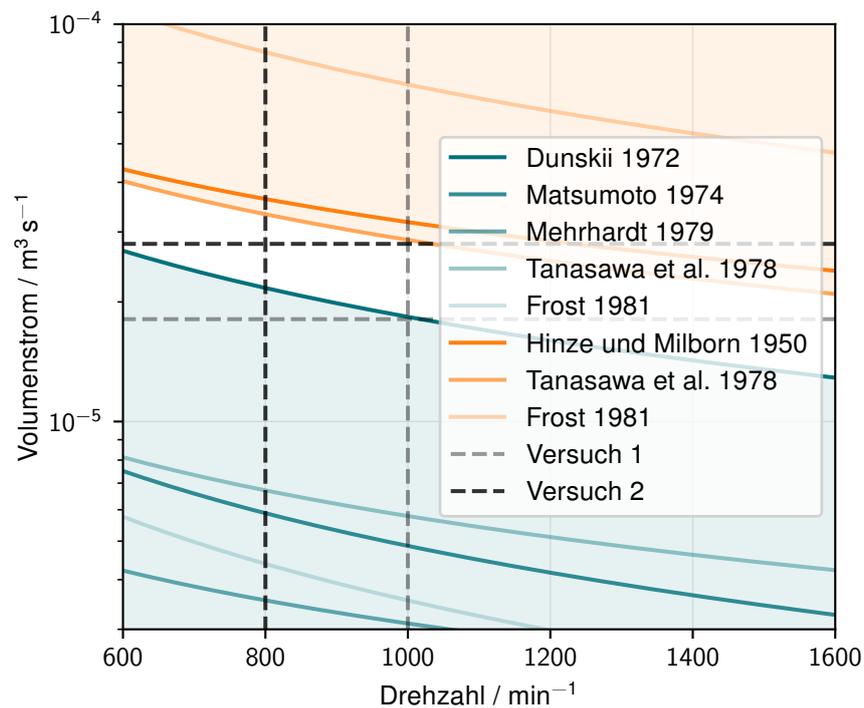


Abbildung 65: Vergleich der Berechnung der voraussichtlichen Grenzvolumenströme für die Übergänge der Zerfallsbereiche und den tatsächlichen Volumenströme aus den Versuchen ( $\dot{V}_{min}$ : Türkis,  $\dot{V}_{max}$ : Orange).

Unter Bezugnahme des tatsächlichen Volumenstroms wurden die Gleichungen der Tabellen 4, 5 und 6 ausgewertet und zusammen mit den Ergebnissen aus der Siebanalyse und der optischen Bestimmung des Partikeldurchmessers in die Tabelle 12 eingetragen.

Tabelle 12: Vergleich der berechneten Durchmesser und der Korngrößenverteilungen.

		Versuch 1	Versuch 2	Anmerkung
Matsumotu et al. 1974	$x_{32}$ / mm	1,3	1,6	direkter Tropfenzerfall
Tanasawa et al. 1979	$x_{32}$ / mm	0,19	0,25	Fadenzerfall
Kayano und Kamiya 1979	$x_{32}$ / mm	0,61	0,84	Fadenzerfall
Dunskii und Nikitin 1972	$x_{0.5}$ / mm	0,061	0,084	Fadenzerfall
Tanasawa et al. 1979	$x_{32}$ / mm	0,66	1,0	Lamellenzerfall
Siebanalyse	$x_{peak}$ / mm	7,5	0,75	
Optische Auswertung	$x_{peak}$ / mm		1	

Dabei zeigt sich, dass die Berechnungen nach Kayano und Kamiya [42] für den Fadenzerfall und nach Tanasawa et al. [39] für den Lamellenzerfall die beste Übereinstimmung aufweisen. Die Abweichungen zwischen den Formeln und den gemessenen Daten lassen sich durch die Anwendbarkeit der Formeln und die unsicheren Stoffeigenschaften des Hüttensandes erklären.

### 5.4.7 Glasgehalt

Der Glasgehalt der beiden Proben wurde an der Technischen Universität Graz mit einem Röntgendiffraktometer untersucht. Da beide Proben bei der Analyse keine scharfen Kanten aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass bei beiden Proben der amorphe Anteil über 99 % liegt [58]. Damit wird der in Tabelle 1 angeführte Grenzwert für die Bindemittelnutzung von 66 % weit übertroffen.

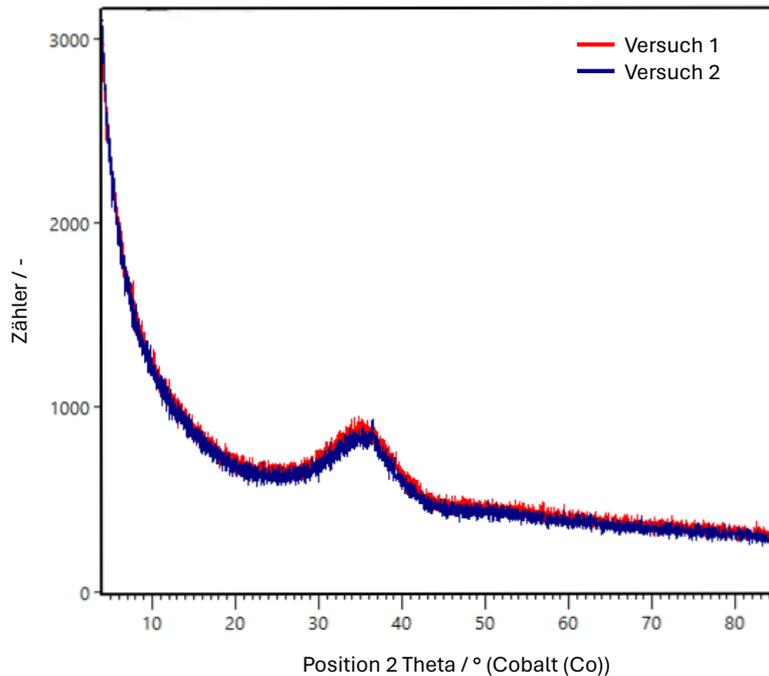


Abbildung 66: Diffraktogramm der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) der granulierten Hüttensandproben [58].

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Transformation in der Stahlindustrie steigt die Nachfrage an Verwertungsmöglichkeiten für die neuen Nebenprodukte und es kommt gleichzeitig zur Verknappung des Angebots an Hüttensand. Dadurch und durch den Bedarf an Dekarbonisierungsmaßnahmen ist die Zementindustrie bestrebt, neue Klinkeralternativen zu suchen. Hierbei spielt die Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen, zum Beispiel KMF-Abfällen, eine wichtige Rolle.

Hinsichtlich der für die Prozesse der Inwertsetzung benötigte Energie bietet die Trockengranulation die Möglichkeit, neben der stofflichen Verwertung auch die thermische Energie der Materialien nutzbar zu machen. Dadurch lässt sich eine Steigerung der Energieeffizienz erreichen, da abgesehen von der Einsparung der Trocknungsenergie zukünftig auch Prozesswärme bereitgestellt werden kann.

Um die Trockengranulation von mineralischen Reststoffen am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik erforschen zu können, war es Ziel dieser Arbeit, eine Rotationszerstäubungsanlage zu konstruieren und zu errichten. Dabei wurden zuerst die Anforderungen und theoretischen Aspekte des Tropfenzerfalls beschrieben, um so die Grundlage für die Auslegung der Anlage schaffen zu können. Dabei zeigt sich, dass die aktuellen Auslegungsgrundlagen hauptsächlich für die Rotationszerstäubung bei konstanten Stoffeigenschaften entwickelt wurden. Hier besteht Forschungsbedarf, wie sich die Änderung der Stoffeigenschaften mit der Temperatur auf das Granulationsverhalten auswirkt.

Die Stoffeigenschaften des Einsatzmaterials sind als besondere Herausforderung zu betrachten, da sich diese nicht nur mit der Temperatur, sondern auch mit der chemischen Zusammensetzung ändern. In der vorliegenden Arbeit ist die Stoff- und Temperaturabhängigkeit nicht mitberücksichtigt worden. Hier wäre es denkbar, die bestehenden Berechnungsmodelle zu erweitern und die temperatur- und stoffabhängigen Beziehungen über bekannte Literaturmodelle, wie zum Beispiel bei der Viskosität, zu ergänzen.

Die unsicheren Input-Daten lassen sich auch mit stochastischen Methoden, wie einer Monte-Carlo-Simulation, oder einer Sensitivitätsanalyse, beschreiben. Dadurch ist es möglich auch bei sehr komplexen Systemen eine Schwankungsbreite abschätzen zu können.

Im Zuge der Planungs- und Bauphase wurde auch die bestehende Induktionsschmelzanlage adaptiert und optimiert, ehe die Funktionsfähigkeit der Rotationszerstäubung mit Hüttensand überprüft werden konnte. Dazu wurden zwei Versuche durchgeführt, die mittels gravimetrischer, thermographischer und optischer Verfahren ausgewertet wurden. Dabei konnten die relevanten Grenzwerte für die Nutzung des Granulats in der Zementindustrie eingehalten werden, wodurch die Versuche als Erfolg zu werten sind. Diese Grenzwerte beziehen sich jedoch aktuell nur auf Hüttensand und müssen daher in Zukunft weiterentwickelt werden, um auch andere mineralische Reststoffe abbilden zu können.

Im Bezug auf die Auslegung der Anlagenkomponenten ist es retrospektiv ratsam, eine Drehscheibe mit kleinerem Durchmesser zu verwenden. Dadurch wäre eine Granulation im Fadenzerfallsbereich auch bei geringeren Drehzahlen und kleineren Volumenströmen möglich. Auch stellen die Anbackungen der Partikel an der Behälteroberfläche und die daraus resultierende Agglomeration ein Problem dar. Hierzu kann versucht werden, die Partikel durch Einblasen von Druckluft weiter in Bewegung zu halten und gleichzeitig deren Abkühlung zu fördern, was eine Agglomeration verhindert.

Da für den Behälter ein Deckel vorhanden ist, bestünde für zukünftige Forschungsprojekte auch die Möglichkeit, den Disintegrationsbereich abzudichten. Dadurch kann die Atmosphäre, unter der die Abkühlung stattfindet, kontrolliert werden. Auch ist es möglich, durch Einleitung von reaktiven Gasen, unter Ausnutzung der thermischen Energie der Partikel, endotherme Reaktionen ablaufen zu lassen und so die endotherme Wärmerückgewinnung zu untersuchen.

Die Rotationszerstäubung zeigt großes Potenzial für die Inwertsetzung von mineralischen Reststoffen mit dem Fokus auf der Nutzung als Bindemittel. Diesbezüglich gibt es noch ein großes Forschungspotenzial, um die Wissenslücken in diese Bereich zu schließen und die Technologie zur Industriereife bringen zu können.

## 7 Bibliografie

- [1] IEA, Hrsg., *CO2 Emissions in 2023*, Paris: IEA, 2024. Adresse: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>.
- [2] IEA, Hrsg. „Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach,“ IEA. (2023), Adresse: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach> (besucht am 03. 05. 2024).
- [3] IEA, Hrsg. „Clean Energy Innovation,“ IEA. (2020), Adresse: <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation> (besucht am 03. 05. 2024).
- [4] IEA, Hrsg., *World Energy Outlook 2023*, Paris: IEA, 2023. Adresse: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (besucht am 03. 05. 2024).
- [5] IEA, Hrsg. „Global crude steel production by process route and scenario, 2019-2050.“ (2020), Adresse: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-crude-steel-production-by-process-route-and-scenario-2019-2050> (besucht am 03. 05. 2024).
- [6] IEA, Hrsg. „Iron and Steel Technology Roadmap,“ IEA. (2020), Adresse: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (besucht am 03. 05. 2024).
- [7] Euroslag, Hrsg. „Statistics 2018.“ (2019), Adresse: <https://www.euroslag.com/wp-content/uploads/2022/04/Statistics-2018.pdf> (besucht am 03. 05. 2024).
- [8] World Steel Association, Hrsg., *Steel industry co-products*, Brüssel, 2020. Adresse: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-industry-co-products.pdf> (besucht am 03. 05. 2024).
- [9] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, *Verordnung der Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, mit der die Deponieverordnung 2008 geändert wird*, Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Hrsg., 2021. Adresse: <https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/II/2021/144> (besucht am 09. 04. 2024).
- [10] FFG, Hrsg. „BitKOIN, CO2-reduzierte Bindemittel durch thermochemische Konversion mineralwolleabfallhaltiger Reststoffkombinationen.“ (2023), Adresse: <https://projekte.ffg.at/projekt/4576184> (besucht am 03. 05. 2024).
- [11] Austrian Standards International, Hrsg., *Zement*, Normentwurf, 1. Dez. 2018. (besucht am 08. 08. 2021).
- [12] ON Österreichisches Normungsinstitut, Hrsg., *Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel*, Norm, 1. Jan. 2007. (besucht am 20. 08. 2021).
- [13] ON Österreichisches Normungsinstitut, Hrsg., *Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ)*, Norm, 1. Dez. 2010. (besucht am 20. 08. 2020).
- [14] A. Ehrenberg, „Hüttensand, Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft,“ Teil 2, *Beton-Informationen*, Jg. 2006, Nr. 5, S. 67–95, 2006.

- [15] P. Eisner, „Stoffliche Verwertung von Eisenhütten- und Stahlwerksschlacken als Bindemittelkomponenten, Entwicklung eines Mischungsrechners,“ Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Bachelor-Thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2023.
- [16] M. Barati und S. Jahanshahi, „Granulation and Heat Recovery from Metallurgical Slags,“ *Journal of Sustainable Metallurgy*, Jg. 6, Nr. 2, S. 191–206, 2020, ISSN: 2199-3831. DOI: 10.1007/s40831-019-00256-4.
- [17] M. Barati et al., „Energy recovery from high temperature slags,“ *Energy*, Jg. 36, Nr. 9, S. 5440–5449, 2011, PII: S0360544211004555, ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2011.07.007.
- [18] K. Doschek-Held, „Trockenschlackengranulation, Bewertung der Scheibenzerstäubung von Hochofenschlacke mittels interaktiver Bilderfassung,“ Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, PhD-Thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2017.
- [19] H. Zhang et al., „A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry,“ *Applied Energy*, Jg. 112, S. 956–966, 2013, PII: S030626191300127X, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.02.019. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191300127X>.
- [20] T. Akiyama et al., „Thermodynamic Analysis of Thermochemical Recovery of High Temperature Wastes,“ en, *ISIJ International*, Jg. 40, Nr. 3, S. 286–291, 2000, ISSN: 0915-1559. DOI: 10.2355/isijinternational.40.286. Adresse: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/40/3/40\\_3\\_286/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/40/3/40_3_286/_article).
- [21] H. Purwanto et al., „Process Analysis of the Effective Utilization of Molten Slag Heat by Direct Blast Furnace Cement Production System,“ en, *ISIJ International*, Jg. 50, Nr. 9, S. 1319–1325, 2010, ISSN: 1347-5460. DOI: 10.2355/isijinternational.50.1319. Adresse: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/50/9/50\\_9\\_1319/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/50/9/50_9_1319/_article).
- [22] G. Wozniak, *Zerstäubungstechnik, Prinzipien, Verfahren, Geräte* (Engineering online library), ger. Berlin und Heidelberg: Springer, 2003, 176 S., ISBN: 978-3-642-62509-1.
- [23] R. D. Reitz, „Atomization and the Breakup Regimes of a Liquid Jet,“ Ph.D. Thesis, Princeton University, Princeton, 1978.
- [24] J. Shinjo und A. Umemura, „Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation,“ *International Journal of Multiphase Flow*, Jg. 36, Nr. 7, S. 513–532, 2010, PII: S0301932210000637, ISSN: 0301-9322. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.03.008. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932210000637>.
- [25] J. Shinjo et al., „A numerical study on ligament disintegration mechanism by propagative capillary waves,“ Japanisch, *Atomization*, Jg. 18, S. 36–43, 2009.
- [26] A. Umemura, „Self-Destabilizing Mechanism of Circular Liquid Jet,“ Japanisch, *JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES*, Jg. 55, Nr. 640, S. 216–223, 2007, ISSN: 1344-6460. DOI: 10.2322/jjsass.55.216.
- [27] Rayleigh, „On The Instability Of Jets,“ *Proceedings of the London Mathematical Society*, Jg. s1-10, Nr. 1, S. 4–13, 1878, ISSN: 00246115. DOI: 10.1112/plms/s1-10.1.4.

- [28] A. H. Lefebvre und V. G. McDonell, *Atomization and sprays* (Combustion), eng, Second edition. Boca Raton, London und New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017, 284 S., Lefebvre, Arthur H. (VerfasserIn) McDonell, Vincent G. (VerfasserIn), ISBN: 9781315120911. DOI: 10.1201/9781315120911. Adresse: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315120911/atomization-sprays-arthur-lefebvre-vincent-mcdonell>.
- [29] C. Weber, „Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles,“ *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Jg. 11, Nr. 2, S. 136–154, 1931, ISSN: 0044-2267. DOI: 10.1002/zamm.19310110207.
- [30] S. Sternowsky, *Der Fadenzerfall Newton'scher Flüssigkeiten bei der Rotationszerstäubung*, Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2001 (Berichte aus der Verfahrenstechnik). Aachen: Shaker, 2002, 121 S., ISBN: 978-3-8265-9803-6.
- [31] E. Teunou und D. Poncelet, „Rotary disc atomisation for microencapsulation applications—prediction of the particle trajectories,“ *Journal of Food Engineering*, Jg. 71, Nr. 4, S. 345–353, 2005, PII: S0260877404005370, ISSN: 0260-8774. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.10.048. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877404005370>.
- [32] D. E. Hartley und W. Murgatroyd, „Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surfaces,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Jg. 7, Nr. 9, S. 1003–1015, 1964, PII: 0017931064900420, ISSN: 0017-9310. DOI: 10.1016/0017-9310(64)90042-0. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931064900420>.
- [33] P. Theissing, „Erzeugung von Flüssigkeitsfilmen, Flüssigkeitslamellen und Tropfen durch rotierende Scheiben,“ ger, TU Berlin, Berlin, 1975.
- [34] E. Mehrhardt und H. Brauer, „Zerstäubung von Flüssigkeiten mit rotierenden Scheiben,“ *De;de, Forschung im Ingenieurwesen A*, Jg. 46, Nr. 1, S. 26–30, 1980, PII: BF02560879, ISSN: 1434-0860. DOI: 10.1007/BF02560879. Adresse: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02560879>.
- [35] V. S. Nikolaev et al., „Film flow of viscous liquids over surfaces of rapidly rotating conical discs,“ *INTERNATIONAL CHEMICAL ENGINEERING*, Jg. 7, Nr. 4, S. 595, 1967, ISSN: 0020-6318.
- [36] P. Bär, „Über die physikalischen Grundlagen der Zerstäubungstrocknung,“ PhD-Thesis, TH Karlsruhe, Karlsruhe, 1935.
- [37] V. F. Dunsikii und N. V. Nikitin, „Monodisperse atomization of a liquid by a rotating disk,“ *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Jg. 23, Nr. 5, S. 1474–1475, 1972. Adresse: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00834702> (besucht am 15.05.2024).
- [38] S. Matsumotu et al., „PHENOMENAL TRANSITION OF LIQUID ATOMIZATION FROM DISK,“ *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, Jg. 7, Nr. 1, S. 13–19, 1974, ISSN: 0021-9592. DOI: 10.1252/jcej.7.13. Adresse: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej1968/7/1/7\\_1\\_13/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej1968/7/1/7_1_13/_article).

- [39] Y. Tanasawa et al., „Effect of shape of rotating disks and cups on liquid atomization,“ *Int Conf Liq At Spray Syst*, Jg. 1st, S. 165–172, 1979. Adresse: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=201002085814859485](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002085814859485).
- [40] A. R. Frost, „Rotary atomization in the ligament formation mode,“ *Journal of Agricultural Engineering Research*, Jg. 26, Nr. 1, S. 63–78, 1981, PII: 002186348190127X, ISSN: 00218634. DOI: 10.1016/0021-8634(81)90127-X.
- [41] J. O. Hinze und H. Milborn, „Atomization of Liquids by Means of a Rotating Cup,“ *Journal of Applied Mechanics*, Jg. 17, Nr. 2, S. 145–153, 1950, ISSN: 1528-9036. DOI: 10.1115/1.4010093.
- [42] A. Kayano und T. Kamiya, „Calculation of the mean size of the droplets purged from the rotating disk,“ *Int Conf Liq At Spray Syst*, Jg. 1st, S. 133–138, 1979. Adresse: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=201002002032223570](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002002032223570).
- [43] Y. Kitamura und T. Takahashi, „ATOMIZATION OF HIGHLY VISCOUS LIQUIDS BY A SPINNING DISK,“ *Atomization and Sprays*, Jg. 2, Nr. 1, S. 61–71, 1992, ISSN: 1044-5110. DOI: 10.1615/AtomizSpr.v2.i1.50.
- [44] K. Siebertz et al., *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, ISBN: 978-3-642-05492-1. DOI: 10.1007/978-3-642-05493-8.
- [45] F. Steindl et al., *Produktqualitätsmerkmale von 4 Schlacken aus der Stahlproduktion: Forschungsprojekte US-B, GT-SM*, Graz, 2021.
- [46] Zukunftsfonds Steiermark, Hrsg. „Ergebnis d. 15. Ausschreibung (2022): GREEN TECH X, Die nächste Generation von Kreislaufwirtschaft & Klimaschutz.“ (2023), Adresse: <https://www.zukunftsfonds.steiermark.at/cms/ziel/172001645/DE/> (besucht am 16. 05. 2024).
- [47] Holcim, Hrsg., *Sicherheitsdatenblatt, Produkt: Hüttensand, Hüttensandmehl*, gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), Artikel 32 (nicht gefährliche Stoffe), 2016. Adresse: [https://www.holcim.de/sites/germany/files/documents/SDB\\_Huettensand\\_01-02-16\\_2.pdf](https://www.holcim.de/sites/germany/files/documents/SDB_Huettensand_01-02-16_2.pdf) (besucht am 28. 04. 2024).
- [48] *Viskositätsmessung an einer Hochofenschlacke*, Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde, 2018.
- [49] A. Ehrenberg und D. Mudersbach, *Dry Slag Granulation with Heat Recovery - DSG*, Leoben, 2012.
- [50] D. Vollprecht et al., *Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung - InnoBLA*, Konsolidierter Schlussbericht 01.08.2020 – 15.02.2023, Leoben, 2023. Adresse: [https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user\\_upload/umweltfoerderung/betriebe/Wasser\\_Betriebe/Studien\\_Altlasten/B920029\\_Schlussbericht\\_Konsolidiert.pdf#page=2.50](https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/umweltfoerderung/betriebe/Wasser_Betriebe/Studien_Altlasten/B920029_Schlussbericht_Konsolidiert.pdf#page=2.50) (besucht am 26. 04. 2024).
- [51] M.A.L. GmbH, Hrsg., *Behälter für ImmoBla*, Fertigungszeichnung, 2021.
- [52] Y.-W. Lv et al., „A hybrid cooling system to enable adhesion-free heat recovery from centrifugal granulated slag particles,“ *Applied Energy*, Jg. 303, S. 117 645, 2021, PII: S0306261921010126, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117645. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921010126>.

- [53] K. Doschek-Held, „Energetische Betrachtung einer Versuchsanlage zur trockenen Granulation von Hochofenschlacke,“ Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2013.
- [54] Wikipedia, Hrsg. „Thermoelement.“ (2024), Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement> (besucht am 04.05.2024).
- [55] G. Leneweit et al., „Surface instabilities of thin liquid film flow on a rotating disk,“ *Experiments in Fluids*, Jg. 26, Nr. 1-2, S. 75–85, 1999, PII: 6HUDULG5F7HAT4NN, ISSN: 1432-1114. DOI: 10.1007/s003480050266. Adresse: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003480050266>.
- [56] P. Vita, „Thin Film Fluid Flow Simulation on Rotating Discs,“ Chair of Geoenergy Production Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2016. Adresse: <https://pure.unileoben.ac.at/en/publications/thin-film-fluid-flow-simulation-on-rotating-discs> (besucht am 02.05.2024).
- [57] Wikipedia contributors, Hrsg. „OpenCV,“ Wikipedia, The Free Encyclopedia. (2024), Adresse: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=OpenCV&oldid=1208982530> (besucht am 02.05.2024).
- [58] F. Steindl, *Amorpher Anteil Trockengranulierte GBFS*, K. Doschek-Held, Mitarb., E-Mail, Graz, 4. Apr. 2024.

## A Deklaration KI und generativer Methoden

Tabelle 13: Deklaration des Einsatzes künstlicher Intelligenz (KI) basierter Werkzeuge.

Gegenstand	Anteil KI / %	Tool / Version	Anmerkung	Verweis zu Prompting
Auswertung der Partikelgröße aus den Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera	80	ChatGPT, V3.5	n/a	Tabelle 14 Nr. 1-6

Tabelle 14: Liste verwendeter Prompts für den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI).

Nr.	Prompt
1	Python Script analyzing particle size of video
2	include millimeter per pixel reference for scale
3	find all particles
4	save area of particles for each frame in a DataFrame
5	mark contour of all particels in the frame
6	use only red channel for greyscale

## B Auswertung Massenstrom

Tabelle 15: Auswertung des Massenstroms beim Abstich der Versuche aus dem Projekt „UpcycSlag-Binder“ [45].

Versuch Nr.	Datum	Masse / g	Abstichdauer / s	Massenstrom / kg s <sup>-1</sup>
11	07.03.2022	11,4	1385	0,1217
12	17.03.2022	12,3	1565	0,1271
14	25.03.2022	12,4	1316	0,106
15	29.03.2022	10,4	1317	0,1268
16	31.03.2022	11,5	1306	0,1134
17	04.04.2022	10,7	1141	0,1066
19	07.04.2022	7,8	1301	0,1668
20	18.05.2022	11,2	1325	0,1185

## C Auswertung der Partikelgröße mit Python

```
1 import cv2
2 import pandas as pd
3
4 # Function to calculate distance between two points
5 def calculate_distance(point1, point2, pixels_per_mm):
6     pixel_distance = ((point2[0] - point1[0])**2 + (point2[1] - point1[1])**2)**0.5
7     mm_distance = pixel_distance / pixels_per_mm
8     return mm_distance
9
10 # Read video file
11 cap = cv2.VideoCapture('vid_full.mp4')
12
13 # Set pixels per mm. This value needs to be determined based on your camera and
14 # setup.
15 pixels_per_mm = 3.228 # Adjust this value accordingly
16
17 # Create DataFrame to store area of particles for each frame
18 data = {'Frame': [], 'Particle_Area': []}
19 df = pd.DataFrame(data)
20
21 while cap.isOpened():
22     ret, frame = cap.read()
23
24     if not ret:
25         break
26
27     # Extract only the red channel
28     red_channel = frame[:, :, 2] # Red channel is at index 2 in OpenCV's BGR format
29
30     # Your particle analysis code here
31     # Example: Convert to grayscale and apply thresholding
32     gray = cv2.cvtColor(red_channel, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
33     _, thresh = cv2.threshold(red_channel, 50, 255, cv2.THRESH_BINARY)
34
35     # Example: Find contours
36     contours, _ = cv2.findContours(thresh, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.
37     CHAIN_APPROX_SIMPLE)
38
39     # Iterate through all contours (particles)
40     for contour in contours:
41         area = cv2.contourArea(contour)
42         area = area / pixels_per_mm**2
43         # Filter small particles
44         if area < 0.00000100 or area > 100: # Adjust the threshold as per your
45         requirement
46             continue
```

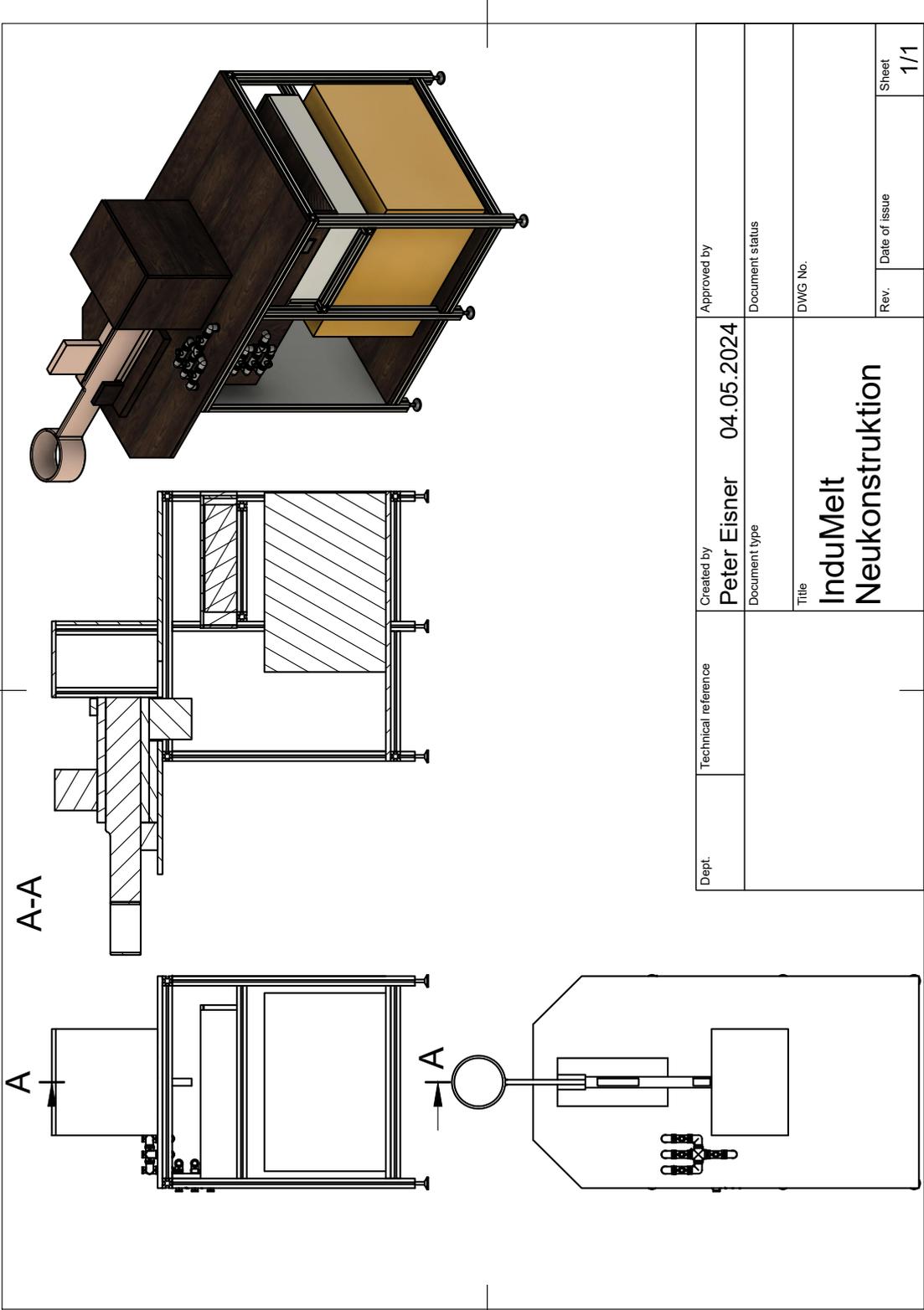
```
45     # Draw contour of particle on the frame
46     cv2.drawContours(frame, [contour], -1, (0, 255, 0), 2)
47
48     # Example: Save area of particle to DataFrame
49     df = df._append({'Frame': cap.get(cv2.CAP_PROP_POS_FRAMES), 'Particle_Area':
50                     area}, ignore_index=True)
51
52     # Your further analysis and visualization code here
53
54     # Display frame
55     cv2.imshow('Frame', frame)
56
57     if cv2.waitKey(25) & 0xFF == ord('q'):
58         break
59
60 cap.release()
61 cv2.destroyAllWindows()
62
63 # Save DataFrame to a CSV file
64 df.to_csv('particle_areas_full.csv', index=False)
```

# D Konstruktionspläne

## D.1 Bestehende Induktionsschmelzanlage

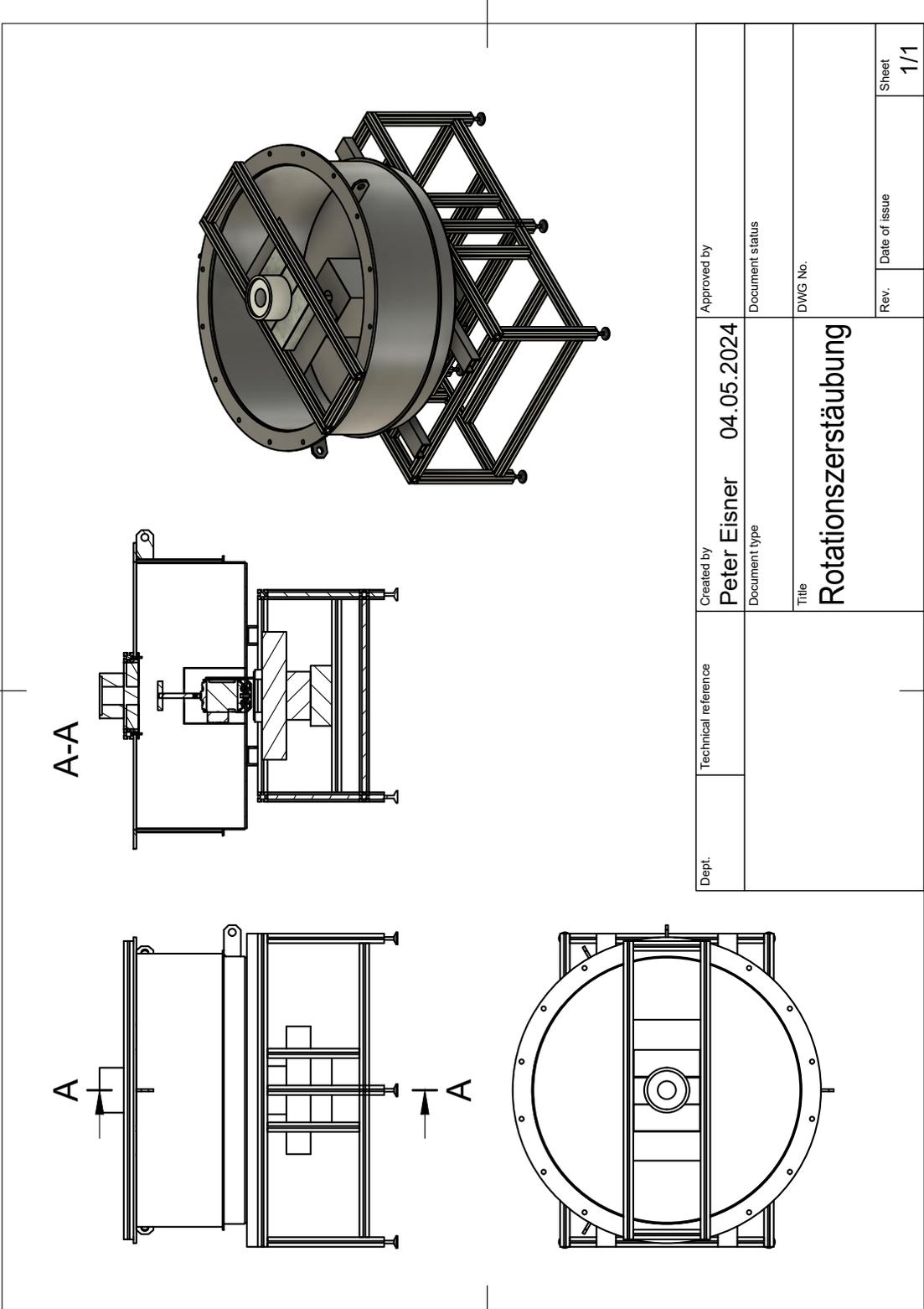
Dept.	Technical reference	Created by <b>Peter Eisner</b>	04.05.2024	Approved by			
		Document type		Document status			
		Title	<b>InduMelt Ursprungszustand</b>	DWG No.	Rev.	Date of issue	Sheet <b>1/1</b>

D.2 Neu konstruierte Induktionsschmelzanlage



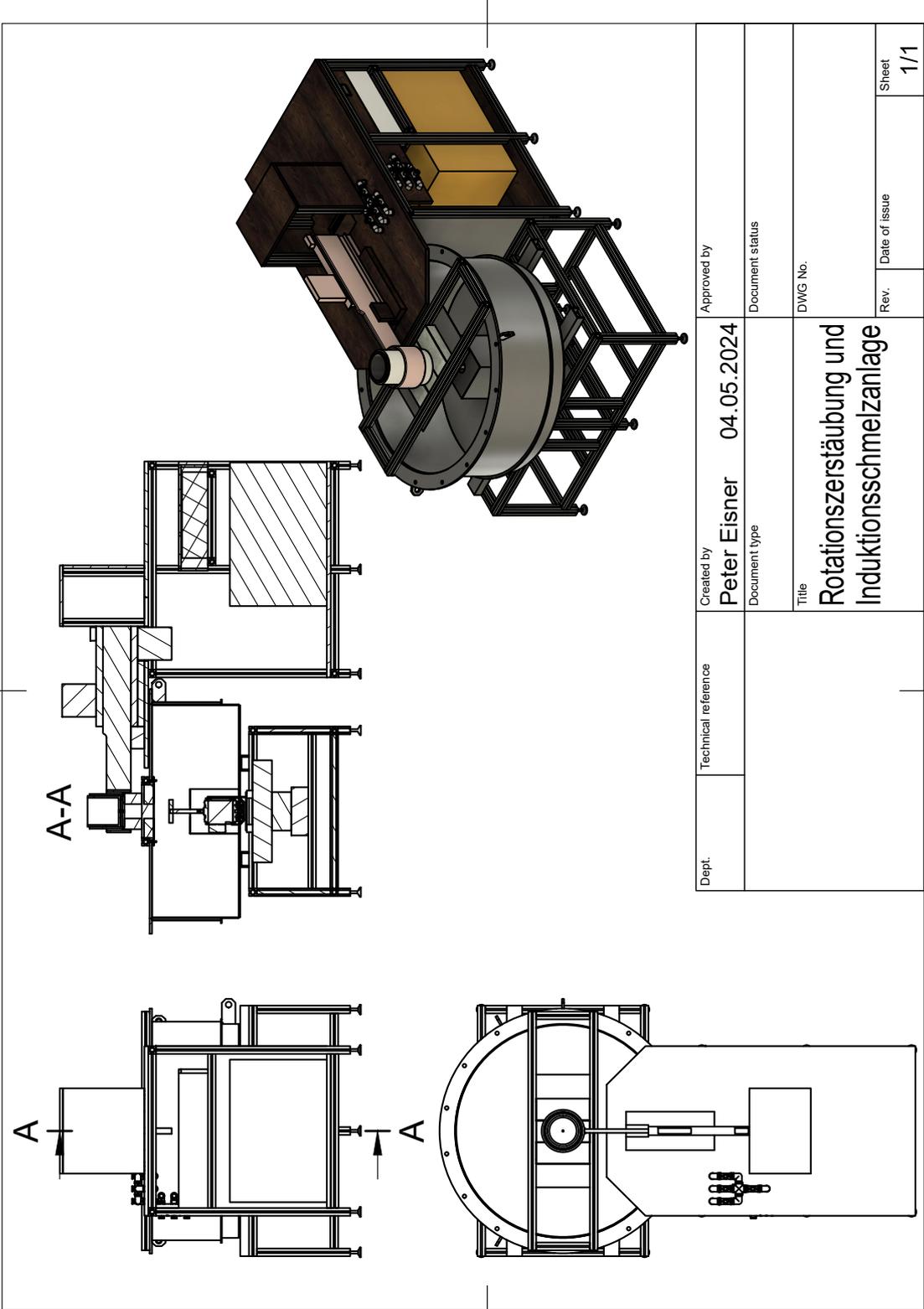
Dept.	Technical reference	Created by <b>Peter Eisner</b>	Approved by
		04.05.2024	Document status
		Document type	DWG No.
		Title <b>InduMelt Neukonstruktion</b>	Rev.
			Date of issue
			Sheet <b>1/1</b>

### D.3 Rotationszerstäubung



Dept.	Technical reference	Created by <b>Peter Eisner</b>	Approved by
		Document type <b>04.05.2024</b>	Document status
		Title <b>Rotationszerstäubung</b>	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/1</b>

### D.4 Induktionsschmelzanlage mit Rotationszerstäubung



Dept.	Technical reference	Created by <b>Peter Eisner</b>	Approved by
		Document type <b>04.05.2024</b>	Document status
		Title <b>Rotationszerstäubung und Induktionsschmelzanlage</b>	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet <b>1/1</b>