




Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Dissertation



Energetische und sicherheitstechnische
Untersuchungen der induktiven Erwärmung von
Festbettreaktoren mit kohlenstoffhaltigen und
ferromagnetischen Suszeptormaterialien

Dipl.-Ing. Rudolf Ferdinand Sams

November 2019

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 14.11.2019



Unterschrift Verfasser/in
Rudolf Ferdinand, Sams

Danksagung

Es liegt in der Natur der Sache, dass bei Danksagungen nicht alle Beteiligten ausreichend gewürdigt werden. Zur Finalisierung dieser Arbeit haben sehr viele Menschen beigetragen. Ich möchte den folgenden Satz zu Beginn geschrieben haben und nicht am Schluss: Herzlichen Dank für eure Unterstützung, ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Prof. DI Dr. Harald Raupenstrauch und das Team TPT:

Mein Doktorvater hat eine sehr weise Auswahl der begleitenden Fachgegenstände gewählt, dies hat mir nicht nur bei der Dissertation geholfen, sondern war auch für meine Lehrertätigkeit sehr nützlich. Dr. Raupenstrauch hat eine ganz klare Vorgehensweise definiert und war bei jeder Fragestellung hilfreich und freundlich tätig. Es ist durchaus keine Selbstverständlichkeit, dass ein externer Student dieses hohe Maß an Unterstützung erfährt. Hierfür möchte ich mich bei Dr. Raupenstrauch und beim Team TPT herzlichst bedanken.

Simon Moll und Elias Vigl:

Währenddessen ihre Mitstudenten in den Ferien sind, haben Simon und Elias oft im Technikum der HTL Dornbirn gearbeitet. Viele gute Ideen sind hierbei entstanden. Es ist eine große Freude mit diesen jungen Absolventen der HTL Dornbirn zusammen zu arbeiten, weil sie jedes Projekt durch Wissen und Kreativität bereichern. Dank der Mollsonde konnten wir erstmals das Verhalten elektromagnetischer Felder bei der induktiven Erwärmung untersuchen. Herzlichen Dank für die kreativen Hilfestellungen.

DI Alfred Edlinger

DI Alfred Edlinger begleitet die HTL Dornbirn seit zehn Jahren, er ist der Motivationskünstler für Diplomarbeiten und Jugend-innovativ-Projekte. Ohne DI Alfred Edlinger hätten wir an der HTL Dornbirn nicht diese wunderbare, einzigartige InduCARB-Anlage, er versorgt uns immer mit ausreichend Probenmaterial und Feuerfestmaterial. Herzlichen Dank für die vielen Unterstützungen.

DI Andreas Häusler

DI Andreas Häusler ist das Mastermind der InduCARB Anlage. Dank DI Andreas Häusler konnten wir bislang alle technischen Probleme der Anlage in kürzester Zeit beheben – seine Unterstützung ist uns immer gewiss. Herzlichen Dank für diesen optimalen Support.

Ingeborg und Frederick

Für die Motivation und für vielen tollen Momente möchte ich besonderen Dank sagen.

Kurzfassung:

Die induktive Erwärmung von chemischen Reaktoren ermöglicht thermochemischen Prozessen durch die viel höhere Leistungsdichte als mit konventionellen Erwärmungsverfahren sowie der Möglichkeit von reduzierenden und/oder oxidierenden gasförmigen Reaktionsbedingungen, innovative Einsatzmöglichkeiten. Die stufenlos einstellbare, induktive Erwärmung erfolgt berührungsfrei und ohne Einsatz eines Brennstoffes. Dies ermöglicht bei Wertstoffrückgewinnungsverfahren im Bereich der Nieder- und Hochtemperaturpyrolyse viele Vorteile. Hierbei ist neben der optimalen Konstruktion des Reaktors und Induktors, die elektrische Betriebsweise und die Wahl des induktiv zu erwärmenden Materials von ausschlaggebender Bedeutung.

Diese Arbeit zeigt, dass für reduzierende Reaktionsbedingungen mit Graphit als Suszeptor optimale Erwärmungsgeschwindigkeiten realisierbar sind. Graphit ermöglicht eine homogene Erwärmung im gesamten Reaktorbett. Bei Graphitteilen mit großen geometrischen Abmessungen im Verhältnis zum Induktordurchmesser visualisieren Wärmebildaufnahmen einen geringen Temperaturgradienten. Mit ferromagnetischen Stoffen konnte bewiesen werden, dass die optimale geometrische Anordnung einen großen Einfluss auf die Effizienz der Erwärmung besitzt. Die Erhöhung der Temperatur bei ferromagnetischen Stoffen ist ebenso oberhalb der Curie-Temperatur möglich, jedoch sind im Hochtemperaturbereich aufgrund der Oxidationsvorgänge des Suszeptors entsprechende Materialverluste und thermische Spannungen im Material zu berücksichtigen.

Die großen magnetischen Felder der induktiven Erwärmung sind ein sicherheitstechnisches Risiko, da diese Felder technisch nicht vollständig abschirmbar sind. Daher ist der Sicherheitsabstand die einzige sinnvolle Sicherheitsmaßnahme. Die Messungen der Felder hat erstmals ergeben, dass die Abschwächung der elektromagnetischen Felder größer als die Reduktion entsprechend dem quadratischen Abstandsgesetz ist. Für die Versuchsanlage an der HTL Dornbirn mit 15 kW elektrischer Anschlussleistung beträgt der Sicherheitsabstand vier Meter.

Die ausgezeichneten Resultate der induktiven Erwärmung bei Wirkungsgradbetrachtungen und die neuen Erkenntnisse, dass dieses Erwärmungsverfahren von leitenden Materialien besonders gute Resultate im Bereich des Erwärmungsvorganges, d. h. in der Hochlaufphase besitzt, bestätigt den Einsatz der induktiven Erwärmung im Bereich von temporär schwankenden Leistungsüberproduktionsphasen des elektrischen Versorgungsnetzes, verursacht durch die steigende Anwendung erneuerbarer Energie zur Stromproduktion.

Abstract:

The inductive heating of chemical reactors facilitates innovative applications of thermochemical processes, through the much higher power density than with conventional heating methods and the possibility of reducing and / or oxidizing gaseous reaction conditions. The continuously adjustable, inductive heating is carried out with no material contact and without the use of a fuel. This brings many advantages to the field of low and high temperature pyrolysis. In this respect not only the optimal design of the reactor and inductor is of crucial importance, but also the electrical operation and the choice of the inductively heated material.

This thesis shows that optimum heating rates can be achieved for reducing reaction conditions using graphite as a susceptor. Graphite allows homogeneous heating throughout the reactor bed. Thermal image recordings of graphite parts with large geometrical dimensions in relation to the inductor diameter, visualize a low temperature gradient. With ferromagnetic materials it could be proved that the optimal geometric arrangement has a great influence on the efficiency of the heating. Increasing the temperature of ferromagnetic materials is also possible above the Curie temperature. However, in the high temperature range significant material losses and thermal stresses in the material have to be considered due to the oxidation processes of susceptors.

The large magnetic fields of inductive heating are a safety risk because these fields are technically not completely shieldable. Therefore, the safety distance is the only reasonable safety possibility. The measurements of the fields showed for the first time that the attenuation of the electromagnetic fields is greater than the reduction according to the quadratic law of distance. For the pilot plant at the HTL Dornbirn with 15 kW of electrical power, the safety distance amounts to four meters.

The excellent results of inductive heating in efficiency considerations and the new findings regarding this heating method of conductive materials, with particularly good results in the range of heating processes, that means in the run-up phase, confirm its use in the field of temporarily fluctuating power overproduction phases of the electrical supply network caused by the increasing application of renewable energy for power production.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Allgemeine Formelzeichen	V
Akronyme.....	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Vorteile indirekter induktiver Erwärmung.....	1
1.2 Thermo-chemisches Verfahren (Reaktionstechnik).....	3
1.3 Induktives Erwärmen	5
1.3.1 Energetische Betrachtung	6
1.3.1.1 Herleitung der optimalen Arbeitsfrequenz:	14
1.3.2 Suszeptoren.....	22
1.3.2.1 Kohlenstoffbasierte Suszeptoren.....	22
1.3.2.2 Metallhaltige Suszeptoren	24
1.3.3 Hochtemperaturwerkstoffe und Reaktorbau.....	25
1.4 Elektromagnetische Feldmessung	26
1.4.1 Theoretische Grundlagen	26
1.4.2 Sicherheitstechnische Betrachtungen	28
1.4.2.1 Messergebnisse niederfrequente und hochfrequente Felder.....	28
1.4.3 Entwicklung der Messtechnik zur elektromagnetischen Feldmessung	29
1.4.3.1 Dimensionierung einer Feldspule für Streufeldmessungen	30

2	Experimentelle Untersuchungen	31
2.1	Untersuchungen der induktiven Erwärmung	31
2.1.1	Versuchsaufbau	32
2.1.2	Versuchsdurchführung für oxidative und reduktive Reaktionsbedingungen	33
2.1.3	Experimentelle Ergebnisse	33
2.1.3.1	Thermofotografische Auswertungen	33
2.1.3.2	Auswertungen der Erwärmungskurven	41
2.1.3.3	Wirkungsgradbetrachtungen der induktiven Erwärmung	47
2.1.3.4	Fehlerbetrachtungen bei der Gegenüberstellung der Wirkungsgradbewertung ...	50
2.1.3.5	Betrachtung des instationären Bereiches der induktiven Erwärmung	53
2.2	Ergebnisse elektromagnetischer Feldmessungen	55
2.2.1	Messdatenauswertung der Feldmessungen an der μ -InduCARB	56
2.2.2	Messdatenauswertung der Feldmessungen an der Technikumsanlage	58
3	Schlussfolgerungen	62
3.1	Reduzierende und oxidative Reaktionsbedingungen	62
3.1.1	Induktiv beheiztes Graphitbett	63
3.1.2	Induktiv beheizte ferromagnetische Suszeptoren	66
3.2	Erwärmungsgeschwindigkeiten	69
3.3	Effizienz und Regelbarkeit der induktiven Erwärmung	69
3.3.1	Vergleich experimenteller Ergebnisse mit der Literatur	70
3.4	Elektromagnetische Feldmessung	71
4	Ausblick	72
4.1	Wertstoffrückgewinnung durch selektive Erwärmung	72
4.2	Kühlschmiermittlrückgewinnung von Abfällen	72
4.3	Kopplung induktiver Erwärmung mit Granulation	73
4.3.1	Lichtmikroskopische Darstellung	74
4.3.2	Röntgendiffraktometrische Darstellung	75
	Literaturverzeichnis	77

Allgemeine Formelzeichen

$P_{\text{elektrisch}}$	Aufgenommene elektrische Wirkleistung	[kW]
P_{Input}	Schwingkreiswirkleistung	[kW]
$\dot{Q}_{\text{Strahl.}}$	Abgegebene Wärmestrahlung des Reaktors	[kW]
$\dot{Q}_{\text{Konv.}}$	Abgegebene Wärmeleistung durch Konvektion des Reaktors	[kW]
$\dot{Q}_{\text{Reaktion}}$	Abgegebene Wärmeleistung aus der Reaktionsenthalpie	[kW]
$\dot{Q}_{V, \text{FU}}$	Verlustwärmestrom durch Verluste des Frequenzumrichters	[kW]
$\dot{Q}_{V, \text{div.}}$	Verlustwärmestrom externer Anlagenteile	[kW]
\dot{Q}_{Indu}	Übertragene Wärmestrom an das Kühlwasser vom Reaktormantel und Verlustwärme durch den elektr. Widerstand der Induktorspule	[kW]
$\dot{Q}_{V, \text{ges}}$	Gesamte Kühlwasserleistung	[kW]
\dot{m}_{KW}	Massenstrom Kühlwasser	[kg/s]
$c_{p(\text{H}_2\text{O})}$	Spezifische Wärmekapazität Wasser (4,186 kJ/(kg.K) 20°C)	[kJ/(kg.K)]
ε	Emissionsgrad (0,85 für Graphit, ferromagn. Stoffe, Koks bei Umgebungstemperatur)	[/]
σ	Stefan Boltzmann Konstante ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)	[W/(m ² K ⁴)]
A	Abstrahlfläche des Reaktors nach oben ($d_i = 200\text{mm}$)	[m ²]
F	Frequenz im Serienschwingkreis	[kHz]
I	Strom in die Induktionsspule	[A]

U	Spannung in der Induktionsspule	[V]
L	Induktivität	[H]
C	Kapazität	[F]
R	Ohmscher Widerstand	[Ω]
R _{cu}	Wirksamer ohmscher Widerstand	[Ω]
δ	Eindringtiefe	[mm]
X _σ	Induktiver Blindwiderstand	[Ω]
N ₁	Windungszahl Primärseite	[/]
N ₂	Windungszahl Sekundärseite	[/]
X _{1h}	Induktivität der Wicklungen (Primärseite)	[Ω]
U _{1h}	Induktive Spannung (Primärseite)	[V]
X _{2h}	Induktivität des Suszeptormaterials (Sekundärseite)	[Ω]
U _{2h}	Induktive Spannung (Sekundärseite)	[V]
R _s	Ohmscher Widerstand des Suszeptormaterials	[Ω]
X _c	Kapazitiver Blindwiderstand	[Ω]
X _L	Induktiver Blindwiderstand	[Ω]
Q _c	Kapazitive Blindleistung	[var]
Q _L	Induktive Blindleistung	[var]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]
X	Anzahl Spulenwindungen in Serie	[/]
Y	Anzahl der Windungen in Parallelschaltungen	[/]
L	Länge einer Wicklung	[m]
P	Spezifischer elektrischer Widerstand	[Ω.mm ² /m]
μ _r	Relative magnetische Permeabilität	[/]
μ ₀	Permeabilität Vakuum	[H/m]
R'	Widerstand des Suszeptormaterials (R _s). R' ist eine selbst entwickelte Größe, die die Güte eines Suszeptormaterials beschreibt.	[Ω]

Akronyme

TPT	Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
KSA	Klärschlammasche
KOS	Kalkofenfilterstaub
ZOS	Zementofenfilterstaub
FF	Feuerfestmaterial
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy
XRD	Röntgendiffraktometrie
TGA-MS	Thermogravimetric Analysis - Mass Spectrometry
SWG	Siedewassergranulation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Anwendungen induktiver Erwärmung	3
Abbildung 1-2: Anwendungen indirekter induktiver Erwärmung	3
Abbildung 1-3: Induktiv erwärmte Graphitkugelschüttung	4
Abbildung 1-4: Zunderbildung Eisenring (34CrNiMo6) durch induktive Erwärmung	4
Abbildung 1-5: Darstellung InduCARB mit Angabe der Energieströme [5]	6
Abbildung 1-6: Elektroschematische Darstellung mit Primär- und Sekundärseite [5]	7
Abbildung 1-7: Elektroschematische Darstellung mit gekoppelten Größen [5]	8
Abbildung 1-8: Eindringtiefe in Hohlleiter [24]	9
Abbildung 1-9: Charakteristische Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz	10
Abbildung 1-10: Eindringtiefe als Funktion der Frequenz [8]	11
Abbildung 1-11: Serienschwingkreis	14
Abbildung 1-12: Zeigerdiagramme Serienschwingkreis	14
Abbildung 1-13: Grafische Darstellung der InduCARB Anlage Dornbirn [10]	15
Abbildung 1-14: Kennlinie eines FP-1-400 Kondensators [11]	15
Abbildung 1-15: Feuerungstechn. Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Luftvorwärmung [13] ..	18
Abbildung 1-16: Arbeitspunkte einer chemischen Reaktion mit Kühlsystem [14]	20
Abbildung 1-17: Versuchsaufbau Erwärmung mittels Induktionsofen [17]	21
Abbildung 1-18: Boudouard - Gleichgewicht	23
Abbildung 1-19: Fragment. Reaktormantel	
Abbildung 1-20: Reaktorboden mit Rissbildung	25
Abbildung 1-21: Werte der elektrischen Feldstärke in den Expositionsbereichen [24]	27
Abbildung 1-22: Werte der magnetischen Flussdichte in den Expositionsbereichen [24]	27
Abbildung 2-1: Versuchsanlage mit Abdeckung und Schnittdarstellung [10]	31
Abbildung 2-2: Aufbau der Versuchsanlage	32
Abbildung 2-3: Bilder Graphitwürfel- u. -kugelschüttung bei $f = 41 \text{ kHz}$, $P = 4,5 \text{ kW}$	34
Abbildung 2-4: Eisenhaltige Proben Geometrien 1 bis 8	35
Abbildung 2-5: Erwärmungsbilder Fe-Ringe G2 bis G8 $f=11,8 \text{ kHz}$, $P=4,5 \text{ kW}$	36
Abbildung 2-6: Bilder radialer Untersuchungen von Fe-Stücken $f=11,8 \text{ kHz}$, $P=4,5 \text{ kW}$	37
Abbildung 2-7: Bilder Schüttungen $f=11,8 \text{ kHz}$, $P=4,5 \text{ kW}$; (↗ zeigt die Abkühlphase)	37
Abbildung 2-8: Bilder Schüttungen mit und ohne Wandung $f=11,8 \text{ kHz}$, $P=4,5 \text{ kW}$	38
Abbildung 2-9: Erwärmungsbilder von Doppelringe, $f=11,8 \text{ kHz}$, $P=4,5 \text{ kW}$	39
Abbildung 2-10: Wärmebildkameradarstellung einer Graphitschüttung	40
Abbildung 2-11: Erwärmungskurven G2 bis G6, $f = 11,8 \text{ kHz}$, $P = 4,5 \text{ kW}$	41

Abbildung 2-12: Erwärmungskurve Geometrie G3, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	43
Abbildung 2-13: Erwärmungskurve Geometrie G5, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	44
Abbildung 2-14: Erwärmungskurve Geometrie G8, $f=11,8$ kHz, $P=6,8$ kW	44
Abbildung 2-15: Erwärmungskurven Geometrie G8, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW/6,8 kW/9,0 kW	45
Abbildung 2-16 Erwärmungskurven Doppelrohr / 11,8 kHz / 4,5 kW	46
Abbildung 2-17: Verlauf von R' und dem therm. Wirkungsgrad, $f=11,4$ kHz, $P=4,5$ kW	47
Abbildung 2-18: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G2, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	48
Abbildung 2-19: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G3, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	48
Abbildung 2-20: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G4, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	48
Abbildung 2-21: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G5, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	48
Abbildung 2-22: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G6, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	49
Abbildung 2-23: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G7, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW	49
Abbildung 2-24: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G7 / 11,8 kHz / 6,8 kW	49
Abbildung 2-25: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G7 / 11,8 kHz / 9,0 kW	49
Abbildung 2-26: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G8 / 11,8 kHz / 4,5 kW	50
Abbildung 2-27: Kühlwasserleistungen von G8 / 11,8 kHz / 4,5 kW	50
Abbildung 2-28: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G8, $f=11,8$ kHz, $P=6,8$ kW	51
Abbildung 2-29: Stromstärke- und Leistungsverlauf von G8, $f=11,8$ kHz, $P=6,8$ kW	51
Abbildung 2-30: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G8, $f=11,8$ kHz, $P=9,0$ kW	52
Abbildung 2-31: Stromstärke- und Leistungsverlauf von G8, $f=11,8$ kHz, $P=9,0$ kW	52
Abbildung 2-32: relativer Wirkungsgrad im instationären und stationären Bereich	54
Abbildung 2-33: Hallsonde mit Arduino Abbildung 2-34: Mollsonde	55
Abbildung 2-35: Versuche mit μ -InduCARB, Speicheroszilloskopdarstellung	56
Abbildung 2-36: Versuche mit μ -InduCARB, V7 Abstand 100 mm, OriginPro Auswertung ...	57
Abbildung 2-37: Feldmessung $f=10,7$ kHz, $I=527$ A, und $f=10,6$ kHz, $I=659$ A,	58
Abbildung 2-38: Auswertung von 10,7 kHz 527 A 20 cm und 10,6 kHz 659 A 20 cm ...	58
Abbildung 2-39: Verlauf der Flussdichte als Funktion des Abstandes	59
Abbildung 2-40: Approximation nach dem quadratischen Abstandgesetzes	60
Abbildung 2-41: Verlauf der Flussdichte mit unterschiedlichen Frequenzen	61
Abbildung 3-1: Erwärmung einer Graphitkugelschüttung	62
Abbildung 3-2: Homogene Erwärmung eines Graphitwürfels	63
Abbildung 3-3: Graphitkugeln im Reaktor	64
Abbildung 3-4: Agglomerat Graphitkugeln ($d=18$ mm)	65
Abbildung 3-5: Zunderbildung Skineffekt Abbildung 3-6: Zunderfragmente	66
Abbildung 3-7: Zunderbildung bei Erwärmung bis 1.200 °C, $f=11,8$ kHz, $P=9$ kW	67
Abbildung 3-8: Rissbildung Reaktormantel 34CrNiMo6, $f=12,5$ kHz, $P=12,0$ kW	68
Abbildung 3-9: Rissbildung Reaktormanteldetail 34CrNiMo6, $f=12,5$ kHz, $P=12$ kW	68
Abbildung 4-1: InduCARB mit SWG, Abbildung 4-2: Hochdruckdüse mit Kühlstrecke	73
Abbildung 4-3: Kaltwassergranulat, Abbildung 4-4: Warmwassergranulat	74
Abbildung 4-5: Vergleichsdiffraktogramm Siedewassergranulat / Kaltwassergranulat [17] ...	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Energieumsatz in Abhängigkeit der Suszeptorabmessung [1].....	13
Tabelle 1-2: Grenzwerte Vornorm ÖVE ÖNORM E8850 [13].....	28
Tabelle 1-3: Messergebnisse der Feldmessungen 70 cm Abstand [13]	28
Tabelle 1-4: Messergebnisse der Feldmessungen 70 cm Abstand [13]	29
Tabelle 2-1: Hohlzylinderdaten	35
Tabelle 2-2: Gegenüberstellung instationärer Bereich G2 bis G6	42
Tabelle 2-3: Mathem. Auswertung Erwärmungskurven G1 bis G6.....	43
Tabelle 2-4: Mathem. Auswertung Erwärmungskurven G8	45
Tabelle 4-1: Massenprozentergebnisse XRF Holcim [15]	73

1 Einleitung

Durch den Einsatz von hochfrequenten, elektrischen Schwingkreisen und durch sehr rasche Erwärmungsvorgänge können sehr hohe Prozesswirkungsgrade bei Erwärmungsvorgängen im Hochtemperaturbereich erreicht werden. Thermische Wirkungsgrade beim direkten induktiven Erwärmen, z. B. zum Schmelzen oder Härten, betragen 95 % bis 99 %. Mit sehr hohen Einsatzleistungen lassen mit elektrothermischen Verfahren Prozesswirkungsgrade bis zu 99% erreichen.[1] Die direkte induktive Erwärmung ist Stand der Technik und besitzt eine erhebliche Anwendungsbreite in der Metallindustrie. Indirekte elektrothermische Verfahren werden ein sehr breites Einsatzspektrum in der chemischen Verfahrenstechnik ermöglichen. Diese Arbeit beinhaltet die zukünftigen Möglichkeiten von chemischen Reaktionen in reduzierenden und oxidierenden Atmosphären durch indirekte induktive Erwärmung.

Aufbauend auf die geeignete Auswahl der Suszeptoren (leitender Werkstoff zur induktiven Erwärmung) können im Induktionsreaktor sowohl oxidative, als auch reduzierende Atmosphären realisiert werden. Umfang dieser Arbeit sind die Untersuchungen der optimalen Einkopplungsfrequenzen, Strom- und Spannungsstärken, Prozesswirkungsgrade, Erwärmungsvorgänge sowie der idealen geometrischen Faktoren des Reaktors und der Induktionsspule zur indirekten induktiven Erwärmung.

1.1 Motivation und Vorteile indirekter induktiver Erwärmung

Stromproduktionen aus regenerativen Energiequellen wie Fotovoltaikanlagen und Windkraftwerken unterliegen extremen, temporären Leistungsschwankungen. Diese Leistungsspitzen können durch thermochemische Verfahren regional genutzt werden, da diese in sehr kurzer Zeit viel Leistung effizient umsetzen können. In besonderen Anwendungsfällen entstehen durch induktive Verfahren, verglichen mit fossil beheizten Prozesswärmeverfahren, höhere Prozesswirkungsgrade. Der in Zukunft zunehmende Anteil regenerativ erzeugter, elektrischer Energie wird dazu führen, dass die Gesamtenergiebilanz für die Erzeugung von Prozesswärme durch elektrische Energie erheblich verbessert wird.

Besondere Auswirkungen wird diese Entwicklung auch auf die CO₂-Emission von Prozesswärmeanlagen haben. Bereits heute sind die CO₂-Emissionen von elektrothermischen Verfahren auch unter Berücksichtigung der Energieumwandlung im Kraftwerk in vielen Fällen bereits geringer als bei fossil beheizten Prozesswärmeverfahren. Durch die CO₂-freie Erzeugung elektrischer Energie wird diese Bilanz in Zukunft zu einer weiteren Reduzierung der CO₂-Emission von elektrothermischen Verfahren führen.[1]

Die Induktionserwärmung für die industrielle Fertigung wurde bereits vor der Jahrhundertwende mit Induktionsschmelzöfen eingeführt. Zunächst wurden sie mit Netzfrequenz betrieben, später wurden Maschinen- und Röhrengeneratoren für höhere Frequenzen entwickelt. Damit bestand die Möglichkeit, außer reinen Glüh- und Schmelzprozessen auch besondere Oberflächenwärmebehandlungsverfahren, für die im allgemeinen Ströme höherer Frequenz benötigt werden, anzuwenden. Nach den ersten Versuchen wurden weitere Anwendungsgebiete erkannt, und die Entwicklung ging schnell voran. Sie ist auch bis heute noch nicht als abgeschlossen anzusehen.[1]

In guter Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, sind an der HTL Dornbirn eine Vielzahl von Diplomarbeiten entstanden. Die folgenden Diplomarbeiten haben alle einen Bezug zur induktiven Erwärmung. Für die Durchführung der Technikumsversuche steht an der HTL Dornbirn eine Versuchsanlage der Fa. Idea mit einer elektrischen Eingangsleistung von 15 kW zur Verfügung.

- Rückgewinnung von Sekundäraluminium aus TetraPaks® mittels InduCarb-Verfahren, Manuela Burtscher, Daniela Duelli, 2009
- ReMETAL, Sekundäraluminium aus Tetra Paks® und Metallrückgewinnung aus der Schredderleichtfraktion, Andre Hammerer, Michael Türtscher, 2010
- InduCARB, Julian Gallaun, David Klien, Christoph Wüstenhagen 2013
- Zementherstellung aus Sekundärrohstoffen-Phosphor, Eisen und Zement aus Klärschlamm: Dominik Dörler, Micheal Huber, 2014
- Thermische Behandlung von Schlacken und Stäuben aus der Glas- und Metallindustrie: Flora Bolter, Patrizia Gürth, 2015
- Selektive Erwärmung mittels Induktionsofen Siedewassergranulation, Anna Kemmer, Simon Moll, 2015
- Chemische Hochtemperaturprozesstechnik und Wertstoffrückgewinnung, Simon Marxgut, Mächtinger Patrick, Elias Vigl, 2017
- Umwandlung von Klärschlammasche in einen Superphosphat-Dünger: Raimund Leu, Manuel Forster, 2018

1.2 Thermo-chemisches Verfahren (Reaktionstechnik)

Die indirekte induktive Erwärmung ist geeignet für oxidative und reduktive Reaktionsbedingungen im Reaktor.

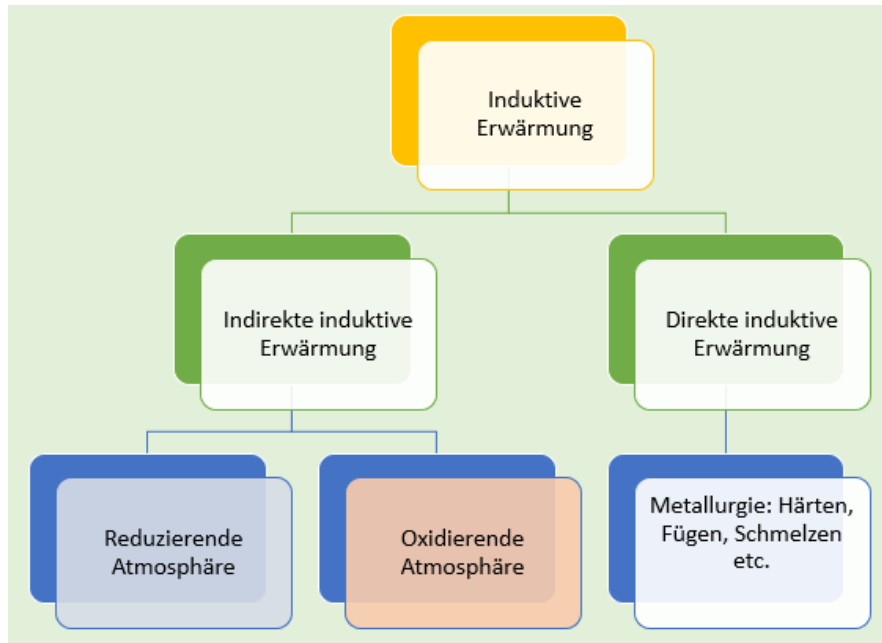


Abbildung 1-1: Anwendungen induktiver Erwärmung

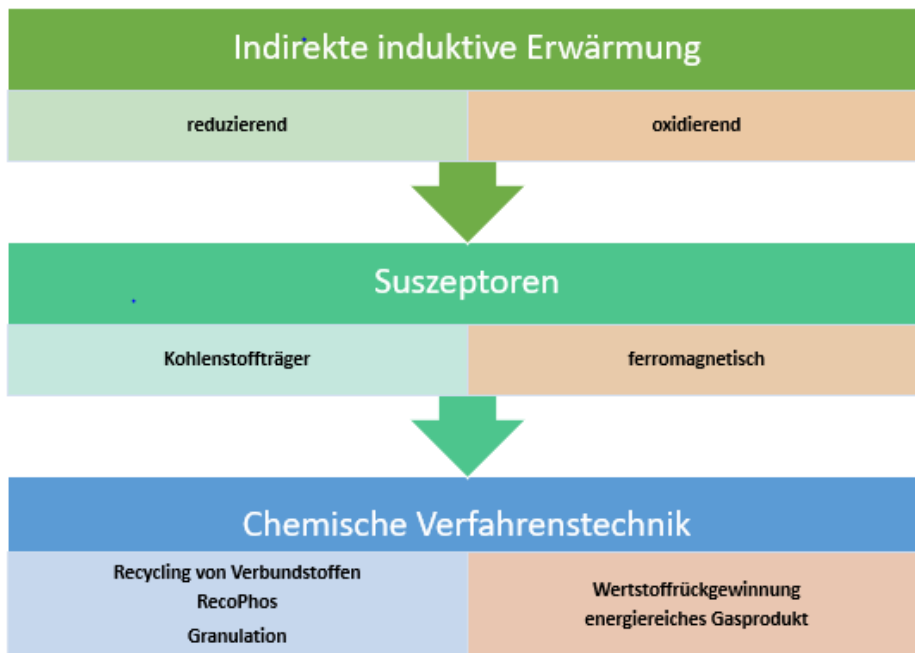
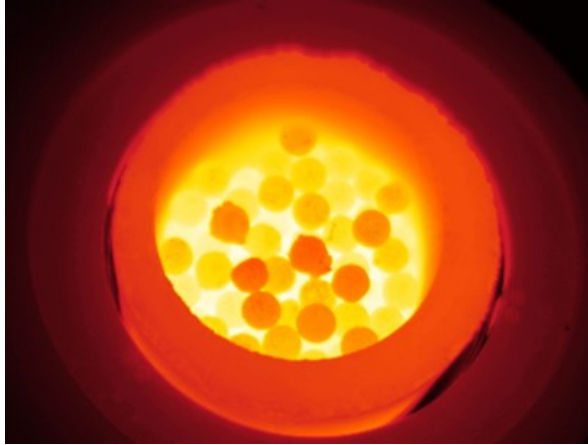


Abbildung 1-2: Anwendungen indirekter induktiver Erwärmung

Durch die Verwendung von kohlenstoffhaltigen Suszeptoren (Kohle, Koks, Graphit) wird durch das Bouduard-Gleichgewicht ab 600 K (siehe **Abbildung 1-18**) eine kohlenstoffmonoxidhaltige, reduzierende Atmosphäre produziert. Suszeptorschüttungen mit Graphit in Kugel-, Würfelform oder Bruchfragmente erreichen eine homogene Einkoppelung



über das gesamte Reaktorbett, jedoch müssen für Sekundärinduktionseffekte die Abmessungen der Schüttungsfragmente an den Induktordurchmesser angepasst werden. Durch den Einsatz von Graphit als Suszeptormaterial ist im Frequenzbereich oberhalb von 40 kHz das Erreichen einer Temperatur bis 1.600 °C möglich. (siehe **Abbildung 1-3**)

Abbildung 1-3: Induktiv erwärmte Graphitkugelschüttung

Ferromagnetische Stoffe eignen sich zur Erwärmung in oxidativer Atmosphäre, jedoch ist wegen der Zunderbildung auf den Materialverlust des Suszeptors zu achten. Bei Luftüberschuss bildet sich eine blättrige Zunderschicht. Die maximale Temperatur ist hierbei durch das Aufschmelzen unter oxidierender Atmosphäre mit einem relativ engen Temperaturintervall begrenzt: Schmelzbeginn zwischen 1580 – 1600 °C; bei 1650 °C völlig



aufgeschmolzen, ohne Kugel- und Halbkugelpunkt. Unter reduzierenden Bedingungen liegt der Schmelzbeginn bei 1200 °C. Grundsätzlich bildet sich bei Luftüberschuss eher leicht blättriger Zunder, bei Luftunterschuss eher Klebzunder. Auf erhitztem Stahl bildet sich durch die Einwirkung von Luft eine aus Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3) und Eisen(II)-oxid (FeO) bestehende Schicht, die mehr oder weniger fest auf dem Eisenkern haftet. Der hiermit erwirkte Abbrand des Eisens ist ein Werkstoffverlust, der einen beträchtlichen Kostenfaktor des Wärmeprozesses darstellt.[2] Für diese Arbeit kommen, wegen deren leichten Formgebung, zur Gegenüberstellung der Effizienz von induktiver Erwärmung, ferromagnetische Suszeptoren zum Einsatz.

Abbildung 1-4: Zunderbildung Eisenring (34CrNiMo6) durch induktive Erwärmung

1.3 Induktives Erwärmen

Die Funktionsweise der induktiven Erwärmung kann wie folgt beschrieben werden:

1. Grundlage ist das elektromagnetische Induktionsgesetz, welches sich auf eine Relativbewegung zwischen elektrischem Leiter und Magnetfeld bezieht. Ein mit Wechselstrom bestromter Leiter induziert in einem benachbarten Leiter eine Spannung, welche einen Sekundärstrom zur Folge hat. Bei der induktiven Erwärmung ist der benachbarte Leiter (=Suszeptor) in sich selbst kurzgeschlossen.
2. Jeder stromdurchflossene Leiter induziert in sich eine Gegenspannung. Dies bewirkt bei höheren Frequenzen den Skineneffekt. Somit besteht in Abhängigkeit der Frequenz eine spezifische Eindringtiefe für den elektrischen Stromfluss, welcher für die Erwärmung des Suszeptors verantwortlich ist. Daher gibt es für jeden Suszeptor eine optimale Induktionsfrequenz des Induktors (Primärspule).
3. Frequenzumformer generieren die optimale Frequenz, nachgeschaltete Anpasstransformatoren können die Stromstärke erhöhen und dabei den Frequenzumformer entlasten und ein elektrischer Schwingkreis bewirkt im Resonanzfall einen maximalen Strom bei reinem Wirkleistungsbezug. Die Blindleistungen pendeln im Resonanzfall zwischen der Kapazität und Induktivität (Induktor).
4. Der Reaktor wird über den Suszeptor berührungsfrei, stufenlos erwärmt. Die übertragbare Leistung kann bei idealer Einkopplung bis zu 30.000 W/cm^3 betragen.[3]
5. Die Erwärmung des Reaktors kann über Metalle mit Sauerstoffüberschuss in einer oxidativen Atmosphäre erfolgen, oder über elektrisch leitende, kohlenstoffhaltige Suszeptoren, welche über das Boudouard-Gleichgewicht ab dem Temperaturbereich größer 600 K eine reduzierende Atmosphäre im Reaktionsraum ermöglichen.[4]

1.3.1 Energetische Betrachtung

Es folgt der Aufbau der InduCARB Anlage (Anlage zur induktiven Erwärmung) mit der Darstellung der Energieflüsse:

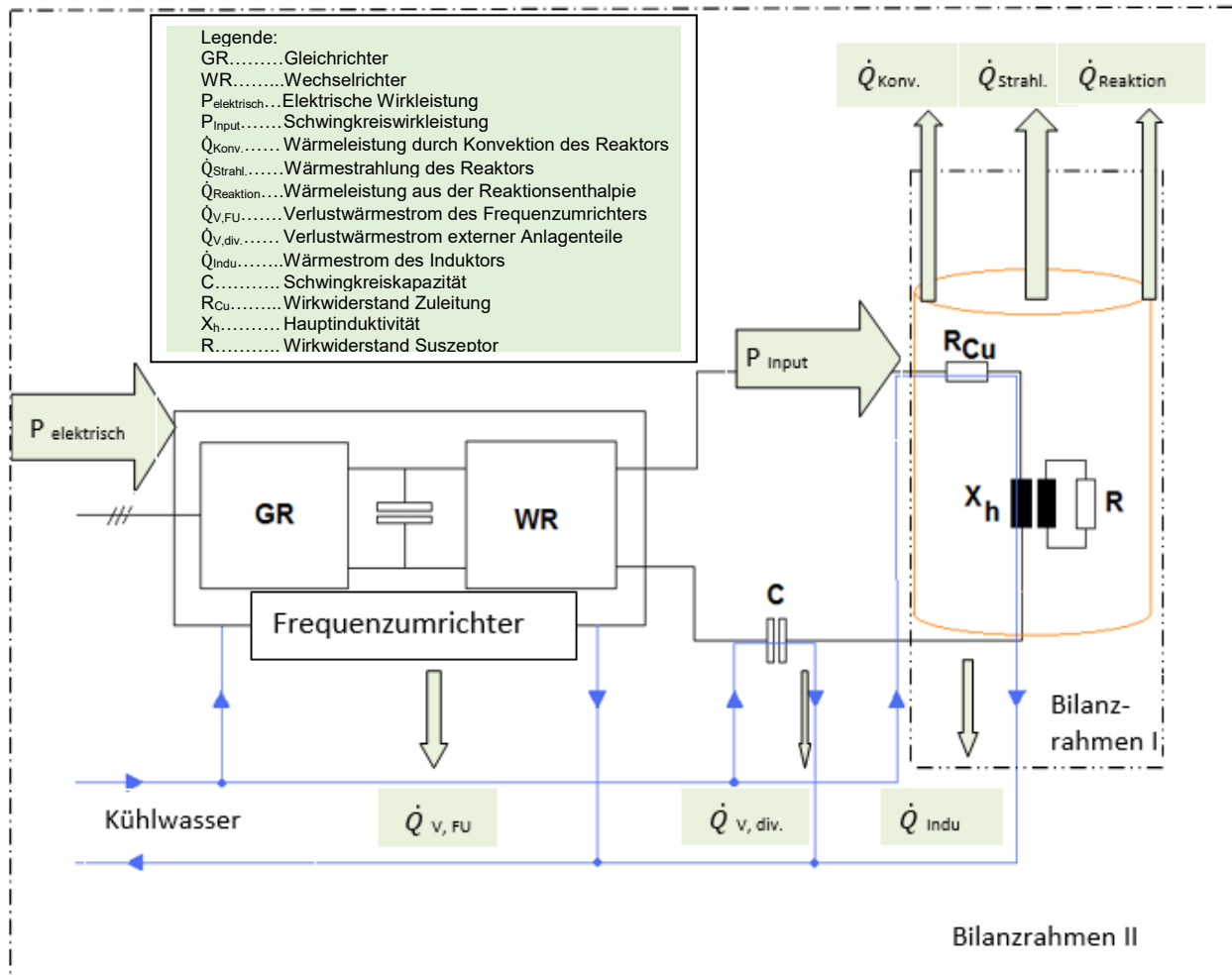


Abbildung 1-5: Darstellung InduCARB mit Angabe der Energieströme [5]

Die erstrebenswerte Qualität der induktiven Erwärmung besteht darin, berührungsfrei und möglichst effizient die Reaktionsmasse im braun dargestellten Reaktor zu erwärmen.

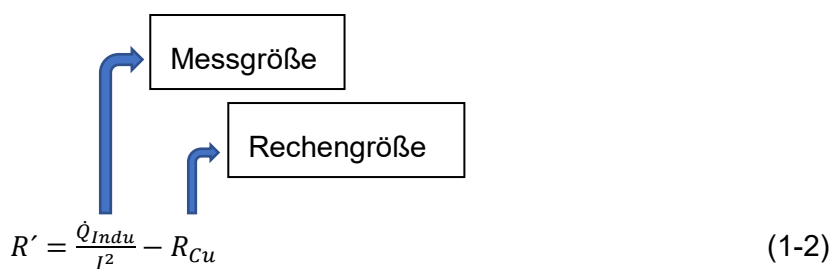
Der *Bilanzrahmen I* beschränkt sich auf die Beurteilung des Reaktors. Es wird eine rechnerische Größe gebildet (R'), welche eine indirekte Beurteilung des Einkoppelverhaltens ermöglicht.

Der Bilanzrahmen II dient zur Beurteilung des gesamten Verfahrens und benötigt eine Vielzahl an Mess- und Rechengrößen.

Bilanzrahmen I:

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die induktive Erwärmung der Suszeptoren und dessen Effizienz. Diese Herleitungen und Zusammenhänge sind die Grundlagen für die Datenauswertungen und Diagramme. Die Messgrößen werden in „Realtime“ mit der Schreiber-Software der Fa. Idea aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgt über Excel- und OriginPro-Berechnungen (**Gleichungen: 1-2; 1-29; 1-35; 1-41**)

$$\dot{Q}_{Indu} = P_{Cu} + \dot{Q}_{Leitung,Reaktor} = I^2 * R' \tag{1-1}$$



$$R' = \frac{\dot{Q}_{Indu}}{I^2} - R_{Cu} \tag{1-2}$$

Somit stellt „R“ eine mathematisch bestimmte Größe dar, welche die Qualität der induktiven Erwärmung beurteilen kann. Zudem kann diese Größe als Wirkwiderstand des Suszeptor gesehen werden, analog zum ohmschen Anteil einer Sekundärspule eines Transformators. Je größer der Zahlenwert von R' ist, desto höher ist die magnetische Einkopplung.

Elektroschema Induktionserwärmung:

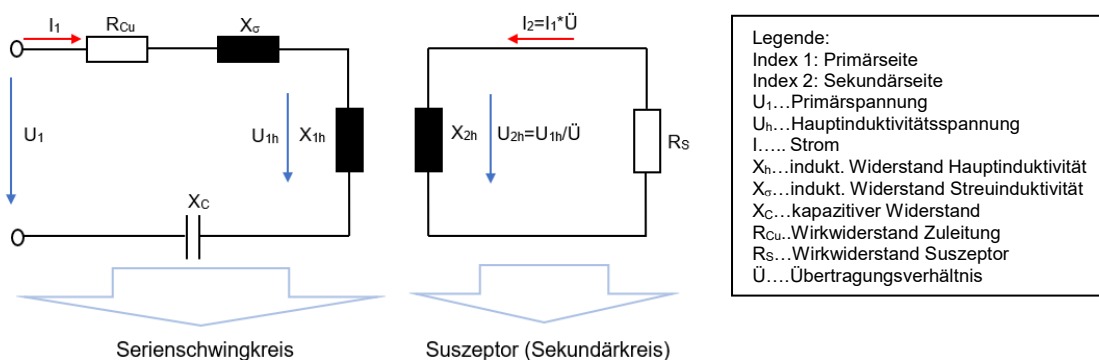


Abbildung 1-6: Elektroschematische Darstellung mit Primär- und Sekundärseite [5]

Transformatoren in der Energietechnik verfügen in der Regel über sehr hohe Wirkungsgrade (99%), jedoch sind bei diesen Transformatoren im Gegensatz zur induktiven Erwärmung die Primär- mit den Sekundärwicklungen über einen lamellierten Eisenkern magnetisch verbunden. Es gelten jedoch dieselben Gesetze und Zusammenhänge.

Übersetzungsverhältnis \ddot{U} :

$$\ddot{U} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1h}}{U_{2h}} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1-3)$$

$$I_2' = I_1 = \frac{I_2}{\ddot{U}} = \frac{I_1 * \ddot{U}}{\ddot{U}} \quad [6] \quad (1-4)$$

$$U_2' = U_1 = U_2 * \ddot{U} \quad [6] \quad (1-5)$$

Das Übersetzungsverhältnis koppelt die Primärseite und die Sekundärseite (Suszeptor). Die gekoppelten Größen werden als gestrichene Größen visualisiert.

$$R_2' = \frac{U_2'}{I_2'} \quad (1-6)$$

$$R_2' = \frac{U_2 * \ddot{U}}{\frac{I_2}{\ddot{U}}} = R_2 * \ddot{U}^2 \quad [6] \quad (1-7)$$

$$R' = R_2' = R_2 * \ddot{U}^2 = R_S * \ddot{U}^2 = \dot{Q}_{Indu} / I^2 - R_{Cu} \quad (1-8)$$

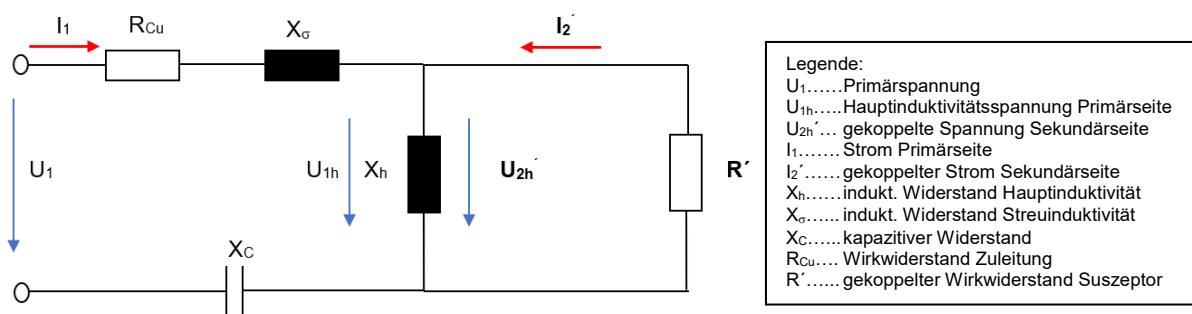


Abbildung 1-7: Elektroschematische Darstellung mit gekoppelten Größen [5]

Somit kann mittels der künstlichen Größe R' ein Zusammenhang zwischen den elektrotechnischen und den wärmetechnischen Größen hergestellt werden. Dieser Zusammenhang begründet, dass mit der Betrachtung der neu entwickelten Größe R' die Qualität der induktiven Erwärmung beurteilt werden kann.

Diese Beurteilung besteht aus den Messgrößen: Induktorleistung \dot{Q}_{Indu} und Stromstärke I , sowie der Rechengröße R_{Cu} .

Leitungswiderstand R_{Cu} :

Der Leitungswiderstand ergibt sich aus dem temperaturabhängigen, spezifischen Widerstand, der Leitungslänge und der für den Stromfluss genutzten Querschnittsfläche. Für Gleichstrom und Wechselstrom niedriger Frequenz kann eine gleichmäßige Verteilung des Stroms I über die Leiterquerschnittsfläche angenommen werden.[7] Die für den Stromfluss nutzbare Fläche verringert sich bei großen Stromstärken und hohen Frequenzen durch den Skineneffekt: Jeder bestromte Leiter verfügt über ein Magnetfeld. Eine zeitliche Veränderung des Magnetfeldes bewirkt eine Selbstinduktion in den eigenen Leiter, welches einer Gegen-Elektromotorischen-Kraft (Gegen-EMK) entspricht. Da in der Mitte des Leiters am meisten magnetische Feldlinien umfasst werden, ist dort die Gegen-EMK am größten und der Stromfluss am geringsten. Dieser Effekt wirkt in der Kupferwicklung des Induktors sowie im Suszeptor. In der Kupferwicklung kann eine einfachere Betrachtungsweise gewählt werden, da durch diese der Primärstrom fließt. Da bei der Versuchsanlage zur Leiterkühlung konzentrische Kupferhohlleiter verwendet werden, kann die Eindringtiefe des Stromes in den Leiter, verursacht durch die Stromverdrängung, näherungsweise wie folgt berechnet werden:

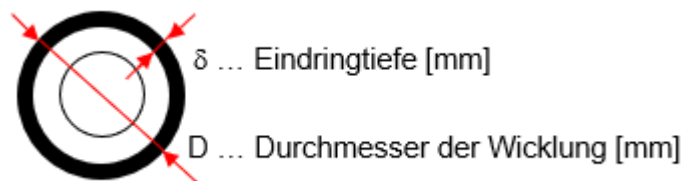


Abbildung 1-8: Eindringtiefe in Hohlleiter [24]

Die Stromdichteverteilung nimmt von der Oberfläche zum Leiterinneren nach einer e-Funktion ab.[2]

$$j_x = j_{0x} \cdot e^{-2\pi x \cdot \sqrt{\frac{\mu r f}{\rho \cdot 10^7}}} \quad [3] \quad (1-9)$$

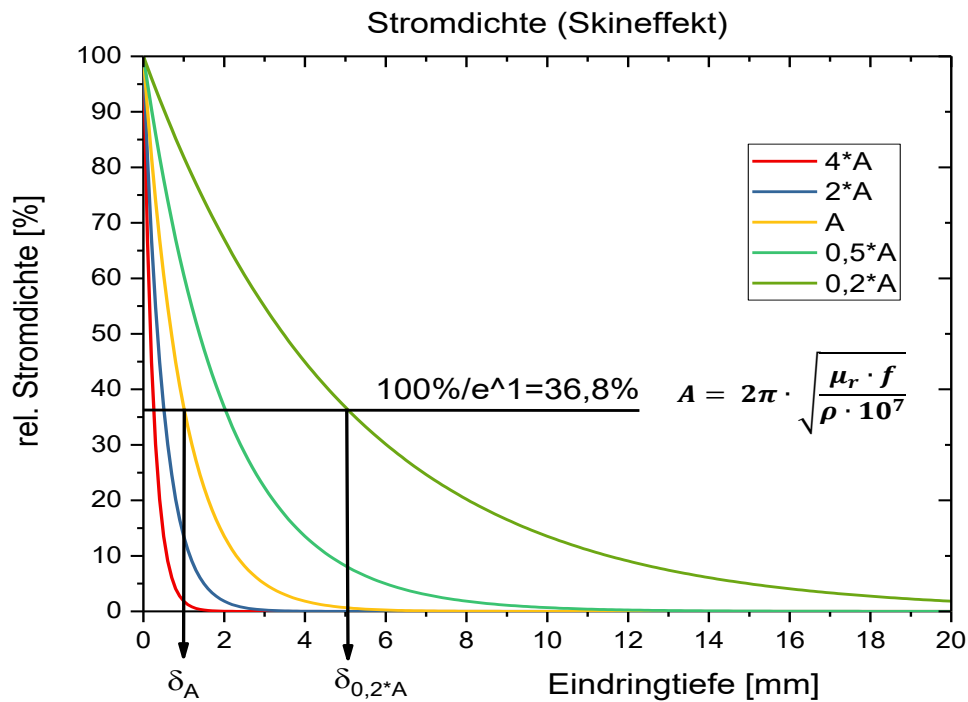


Abbildung 1-9: Charakteristische Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz

Die Eindringtiefe (δ) ist bei einer Stromdichtereduktion auf $1/e$ (entspricht einer Verringerung der Stromdichte auf 36,8 %) definiert.[1] Innerhalb dieser äußeren Schale werden etwa 86 % der induzierten Gesamtenergie umgesetzt, d. h. diese Zone ist hauptverantwortlich für die Erwärmung des leitenden Materials.[3] Ebenso fließt der Stromfluss hauptsächlich in äußeren Leiterregionen und nicht in der Mitte des Leiters, welches zur Erhöhung des elektrischen Widerstandes führt.

Die Eindringtiefe wird über die Maxwell – Gleichungen hergeleitet und ergibt folgenden Zusammenhang:[2]

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad [3] \quad (1-10)$$

Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz bei unterschiedlichen Werkstoffen:

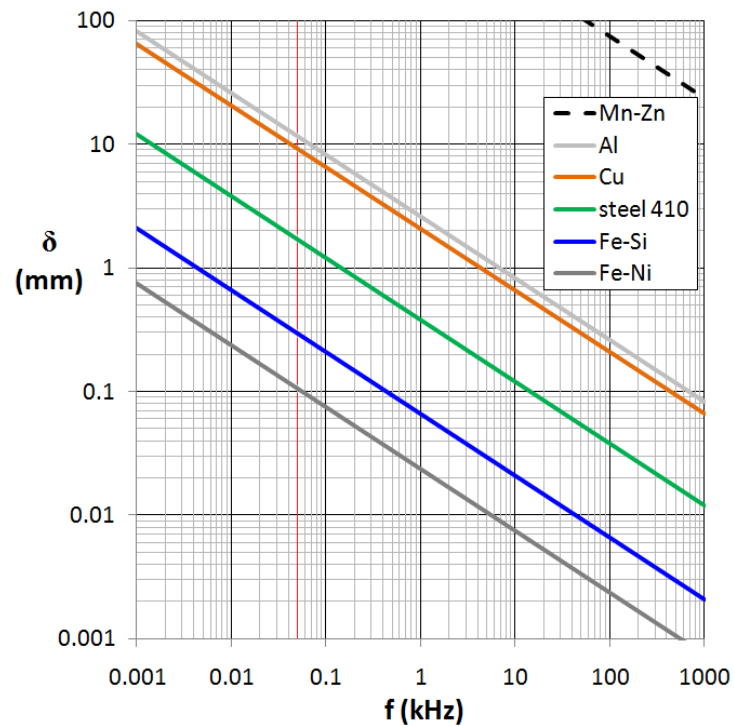


Abbildung 1-10: Eindringtiefe als Funktion der Frequenz [8]

Für den Kupferhohlleiter des Induktors berechnet sich die Eindringtiefe (δ) mit den materialspezifischen Größen für Kupfer bei einer Kühlwassertemperatur von 25 °C mit folgendem mathematischen Zusammenhang:

$$\delta = \frac{66 \text{ mm} \cdot \text{s}^{0.5}}{\sqrt{f}} \quad (1-11)$$

Die für den Stromfluss nutzbare, effektive Leiterquerschnittfläche ergibt sich:

$$A_{eff} = \frac{\pi}{4} \cdot [d^2 - (d - \delta)^2] \quad (1-12)$$

Hiermit kann mit der Windungsanzahl x , der Windungslänge l und der Anzahl der parallel geschalteten Windungen y der ohmsche Widerstand des Induktors berechnet werden.

$$R_{Cu} = \frac{x \cdot l \cdot \rho(Cu)}{y \cdot A_{eff}} \quad (1-13)$$

Für den *Suszeptor* muss die Betrachtungsweise der Eindringtiefe erweitert werden, da der spezifische Widerstand ρ und die Permeabilität μ temperaturabhängige Größen sind. Für ferromagnetische Stoffe bringen die Hystereseverluste bis zur Curietemperatur einen zusätzlichen Beitrag. Hartmagnetische Werkstoffe haben eine breite Hysteresekennlinie.[9] Bei Erreichen der Curietemperatur verlieren ferromagnetische Stoffe ihre magnetischen Eigenschaften.

Nach Kretzmann lässt sich der thermische Wirkungsgrad (Prozesswirkungsgrad) der induktiven Erwärmung, wie folgt beschreiben:

$$\eta_{th} = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} (1 + 6,25 \frac{\delta^2}{d^2}) \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \cdot \mu_r}}} \quad (1-14)$$

Optimierung des thermischen Wirkungsgrades:

$\frac{D^2}{d^2} = \frac{\text{Induktordurchmesser}^2}{\text{Suszeptordurchmesser}^2}$... Der thermische Wirkungsgrad wird umso besser, je kleiner der Abstand zwischen der Spule und dem Suszeptor ist. Hierbei spielt die magnetische Einkopplung die ausschlaggebende Größe.[1]

$\frac{\delta^2}{d^2} = \frac{\text{Eindringtiefe}^2}{\text{Suszeptordurchmesser}^2}$... Die Eindringtiefe darf nicht zu groß sein. Dies würde zur Konkurrenz des Wirbelstromes mit dem Induktionsstrom führen und den ohmschen Widerstand des Suszeptors beeinflussen. Die Eindringtiefe wird über die Frequenz bestimmt.[1]

$\frac{\rho_1}{\rho_2 \cdot \mu_r} = \frac{\text{spez.Widerstand Induktor}}{\text{spez.Wdst.Suszeptor} \cdot \text{rel.Permeabilität}}$... Der spez. Widerstand des Induktors sollte sehr gering sein, welches einen großen Stromfluss ermöglicht. Dies ist bei Kupferwindungen gegeben. Der spez. Widerstand des Suszeptors sollte sehr groß sein, welches mit $P=I^2 \cdot R$ eine hohe Erwärmungsleistung erbringt. Die relative Permeabilität sollte recht groß sein. Die Permeabilität und der spez. Widerstand sind stark temperaturabhängige Größen.[3]

Laut Benkowsky ergibt sich ein Energieumsatz der induktiven Erwärmung in Abhängigkeit der Größe des Suszeptors und der Eindringtiefe, wie Tabelle 1-1 zeigt [3]:

Tabelle 1-1: Energieumsatz in Abhängigkeit der Suszeptorabmessung und Eindringtiefe [3]

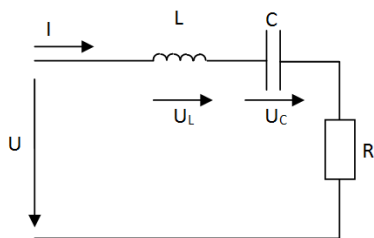
$\frac{d}{\delta} = \frac{\text{Suszeptordurchmesser}}{\text{Eindringtiefe}}$	8,0	6,0	4,0	2,0	1,0	0,6	0,4
Energieumsatz in %	95	85	65	30	10	4	1

Aus der **Tabelle 1-1** ist ersichtlich, welche enorme Bedeutung die Wahl der optimalen Frequenz besitzt. Somit kann eine minimale Frequenz zur Optimierung des thermischen Wirkungsgrades definiert werden. Bei Suszeptoren, welche eine hohe Durchdringung der Erwärmung haben sollen, z. B. in der Metallurgie, ergibt sich durch diesen Umstand die maximale Frequenz des Induktionsstromes. Weiters tragen materialspezifische Eigenschaften zur Frequenzabhängigkeit des Einkopplungsvermögens bei.

Die Wahl der Schwingkreisfrequenz ist ausschlaggebend für die Funktion der induktiven Erwärmung. Wird nur ein geringes Eindringmaß gefordert, wie z. B. beim induktiven Randschichthärten, so muss die Frequenz hoch sein. Soll das Werkstück (Suszeptor) durchgreifend erwärmt werden, beispielweise bei der Erwärmung zum nachfolgenden Schmieden, ist eine entsprechend niedrigere Frequenz zweckmäßig. Für eine durchgreifende Erwärmung erhält man in kürzester Zeit eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt, wenn der zylindrische Werkstückdurchmesser etwa 3,5-mal größer als das Eindringmaß ist. Diese Verhältnisse ergeben sich aus einem Kompromiss zwischen direkter gleichmäßiger Erwärmung über den Querschnitt bei entsprechen niedriger Frequenz und zunehmendem elektrischen Wirkungsgrad bei höheren Frequenzen.[1] Bei höheren Frequenzen sinkt die Eindringtiefe und damit die effektive Leiterquerschnittfläche, was den elektrischen Widerstand erhöht. Dies führt zu höheren (Verlust-)Leistungen, jedoch wird auch ein geringerer Flächenbereich erwärmt. Das eingesetzte Suszeptormaterial und die geometrischen Abmessungen sind für die optimale Frequenz für das Durcherwärmen verantwortlich.

1.3.1.1 Herleitung der optimalen Arbeitsfrequenz:

Zur Optimierung der induktiven Erwärmung wird ein möglichst großes, rasch wechselndes Magnetfeld benötigt. Dies wird durch einen großen Wechselstrom mit optimaler Frequenz in einer Induktivität (Luftspule) erreicht. Zur elektrischen Leistungsoptimierung wird die Induktivität durch eine Kapazität kompensiert. Im Idealfall wird die Frequenz so gewählt, dass sich aus den Blindwiderständen und der gewünschten Arbeitsfrequenz der Resonanzfall mit



vollkommener Blindleistungskompensation ergibt. Prinzipiell lassen sich Serien- und Parallelschwingkreise realisieren. Da die Versuchsanlage „InduCARBERL HTL Dornbirm“ einen Serienschwingkreis hat, wird im Folgenden auf diesen eingegangen.

Abbildung 1-11: Serienschwingkreis

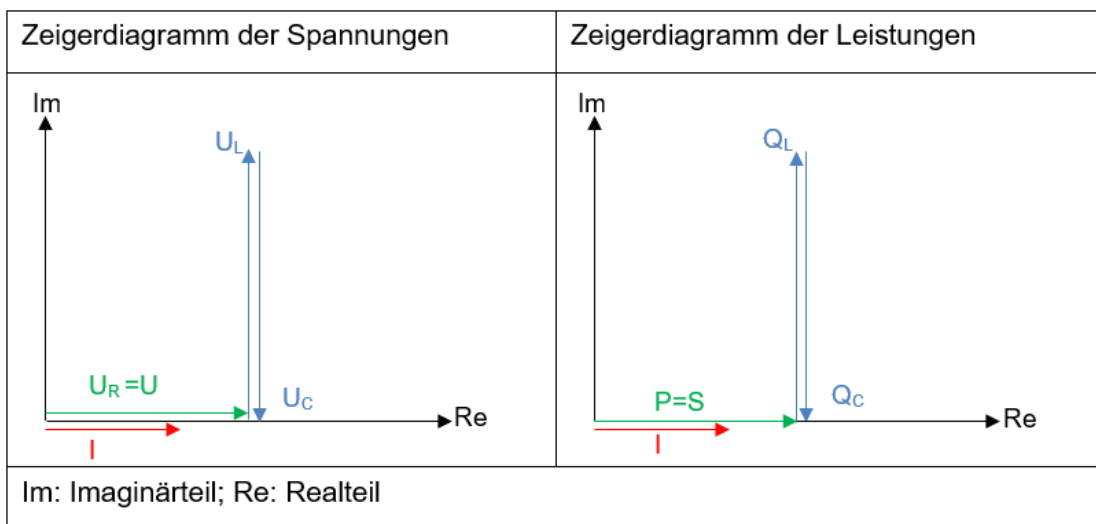


Abbildung 1-12: Zeigerdiagramme Serienschwingkreis

Herleitung der Resonanzfrequenz:

$$Q_C = Q_L \tag{1-15}$$

$$I^2 * X_C = I^2 * X_L \tag{1-16}$$

einsetzen für $X_C = \frac{1}{\omega * C}$ und für $X_L = \omega * L$

$$\frac{1}{\omega * C} = \omega * L \rightarrow \omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L * C}} = 2 * \pi * f_{res} \tag{1-17}$$

Die Induktivität L (variabel durch Parallel- und Serienschaltung von Windungen) definiert den Ort der Erwärmung, die Wahl des Kondensators definiert die Kapazität und ermöglicht hiermit die gewünschte Einstellung der optimalen Arbeitsfrequenz. **(siehe Gleichung 1-17)**

Die optimale Arbeitsfrequenz für die induktive Erwärmung kann über die Variation der Induktivität und Kapazität realisiert werden. Diese Variationsmöglichkeit stellt eine Besonderheit der für diese Arbeit verwendeten Versuchsanlage dar, welche einen Frequenzbereich von 5 kHz bis 200 kHz ermöglicht.

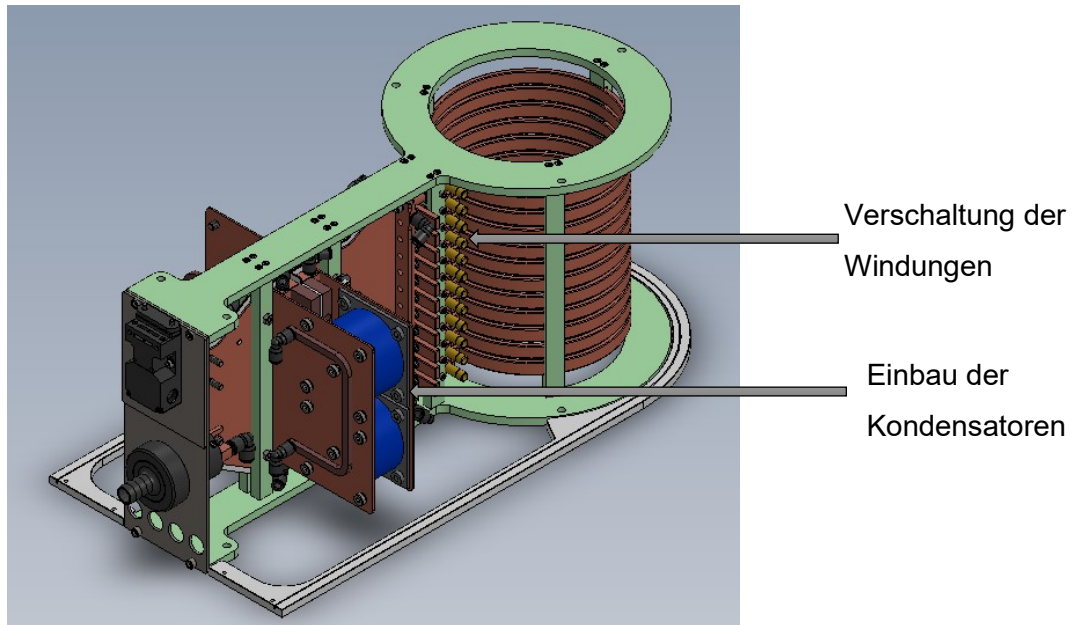


Abbildung 1-13: Grafische Darstellung der InduCARB Anlage Dornbirm [10]

Die zwölf Windungen können in Serien- oder in Parallelschaltung in den Schwingkreis geschaltet werden und haben somit einen Bereich von 0,12 bis 17,00 μH . Die Induktivität der Luftspule kann über folgenden mathematischen Zusammenhang berechnet werden:

$$k = e^{\left[-0,0707 * \left(\ln\left(\frac{h}{di}\right)\right)^2 - 0,6601 * \left(\ln\left(\frac{h}{di}\right)\right) + 1,8841\right]} \quad [5] \quad (1-19)$$

$$L = (10^{-10} * k * n^2 * di) \quad [5] \quad (1.20)$$

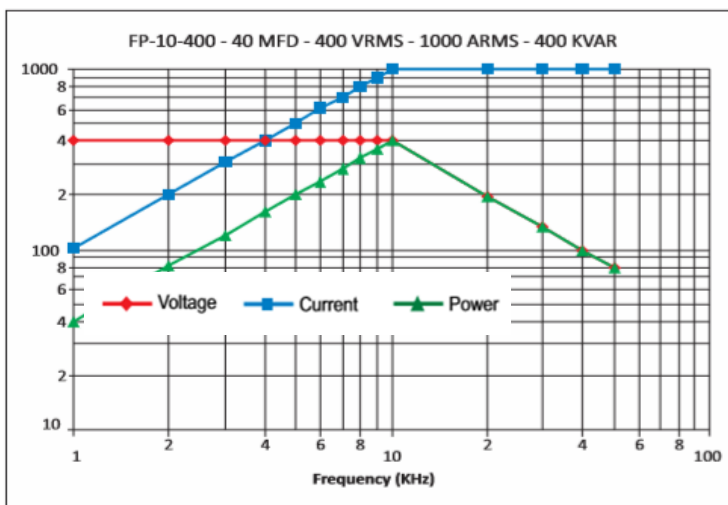


Abbildung 1-14: Kennlinie eines FP-1-400 Kondensators [11]

Die Kondensatoren können an vier Einbauplätzen montiert werden. Somit ergibt sich auch bei den Kondensatoren die Möglichkeit der Serien- und Parallelschaltung. Der Einsatzbereich der Kondensatoren begrenzt die maximale Strom- und Spannungsstärke.

Bilanzrahmen II:

Wird elektrische Energie aus der chemisch gebundenen Energie aus Erdgas bereitgestellt, so entstehen Umwandlungswirkungsgrade von ca. 40 %. Dies bedingt, dass die induktiv beheizten Reaktoren ihr Einsatzgebiet im Bereich der thermochemischen Verfahren haben werden. Einen Austausch von gasbeheizten Industrieöfen durch induktiv beheizte Öfen kann durch einen weiteren Ausbau der regenerativen Energiequellen sinnvoll werden. Für beide Anwendungsfälle ist eine Gesamtbetrachtung der Energieströme wie im Bilanzrahmen II (siehe **Abbildung 1-5**) interessant.

Für den Wirkungsgrad ist das Verhältnis von Ertrag (Nutzen) und Aufwand anzuwenden. Werden etwaige Fördereinrichtungen vernachlässigt, so besteht der Aufwand aus dem Energiestrom in den Frequenzumrichter. Die Definition der Energieströme auf der Ertragsseite gestaltet sich schwieriger, da die Produkterwärmung das vorrangige Ziel darstellt, aber die Abwärme ebenso technisch nutzbar ist.

Der Gesamtwirkungsgrad von elektrothermischen Anlagen ergibt sich aus der Wirkungsgradkette aus dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad.[12]

$$\eta_{ges} = \eta_{el} \cdot \eta_{therm} \quad (1-21)$$

Der elektrische Wirkungsgrad einer Anlage zur induktiven Erwärmung wird hervorgerufen durch folgende Komponenten:

- Frequenzumrichter
- Stromzuführung
- Anpassungstransformator, falls vorhanden
- Schwingkreiskondensatoren

Die moderne Leistungselektronik ermöglicht elektrische Wirkungsgrade um 95 %.

Der thermische Wirkungsgrad lässt sich in einen stationären Bereich und in einen instationären Bereich unterteilen. Bis zur Erreichung des Beharrungszustandes (=instationärer Bereich) ist der Wirkungsgrad abhängig von der eingebrachten Leistung. Je höher diese Leistung ist, desto besser ist der Wirkungsgrad im instationären Bereich. Da die induktive Erwärmung über eine übertragbare, flächenspezifische Leistung von 30.000 W/cm² verfügt, im Vergleich hierzu beträgt die übertragbare Leistung mittels Flamme 1.000 W/cm², ist hier ein eindeutiger Vorteil der induktiven Erwärmung zu erkennen.[3]

Alle Erwärmungsvorgänge sind durch eine gewisse thermische Trägheit gekennzeichnet. Wie bei chemischen Reaktionen bildet die Erreichung eines Beharrungszustandes den Abschluss des Erwärmungsvorganges. Bei den chemischen Gleichgewichtsreaktionen entspricht dies dem Gleichgewichtszustand zwischen Hin- und Rückreaktion, bei Erwärmungsvorgängen bildet sich ein energetisches Gleichgewicht zwischen Energieeintrag und Energieabgabe ohne eine zusätzliche Erwärmung der Erwärmungsmasse.

Für den instationären Bereich der Erwärmung gelten folgende Zusammenhänge:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \int_0^{t_{is}} T(t) dt \quad (1-22)$$

$$T(t) = T_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-23)$$

$$\dot{Q} = \frac{m \cdot c_p}{t_{is}} \cdot \int_0^{t_{is}} T(t) dt \quad | c_p, m = \text{const.} \quad (1-24)$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{P_{el}} \quad (1-25)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{t_{is}} \int_0^{t_{is}} \eta(t) dt \quad (1-26)$$

Annahme: Die gewünschte Endtemperatur wird als 90 % der maximal erreichbaren Temperatur definiert, da sich der tatsächliche Temperaturverlauf asymptotisch der T_{max} – Isothermen nähert.

$$0,90 \cdot T_{max} = T_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t_{is}}{\tau}}) \quad (1-27)$$

Nebenrechnung zur Berechnung der Zeitkonstanten

$0,9 = (1 - e^{-\frac{t_{is}}{\tau}});$	$0,1 = e^{-\frac{t_{is}}{\tau}};$	$\ln 0,1 = -\frac{t_{is}}{\tau};$	$t_{is} = 2,3 \cdot \tau$
---	-----------------------------------	-----------------------------------	---------------------------

Somit sind die Grenzen der Integration für den instationären Bereich definiert:

$$\bar{\eta} = \frac{m \cdot c_p \cdot T_{max}}{P_{el} \cdot t_{is}^2} \int_0^{2,3 \cdot \tau} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) dt = \frac{m \cdot c_p \cdot T_{max}}{P_{el} \cdot (2,3 \cdot \tau)^2} \left[t + \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]_0^{2,3 \cdot \tau} \quad (1-28)$$

$$\bar{\eta} = \frac{m \cdot c_p \cdot T_{max}}{P_{el} \cdot 5,3 \cdot \tau^2} \cdot 1,4 \cdot \tau = \frac{1}{P_{el}} \cdot 0,26 \cdot m \cdot c_p \cdot \frac{T_{max}}{\tau} \quad (1-29)$$

Die **Gleichung 1-29** stellt eine mathematische Beziehung für die Wirkungsgradbetrachtung im instationären Bereich bis zur Erreichung von 90% der Beharrungstemperatur T_{max} dar.

Bei direkten elektrothermischen Verfahren können Prozesswirkungsgrade von bis zu 99% erreicht werden. Bei indirekten elektrothermischen Verfahren (induktive Erwärmung einer Reaktionsmasse mittels Suszeptoren) liegen die thermischen Wirkungsgrade erheblich darunter und hängen sehr stark von der Ofenausführung, der Ofenisolation sowie der Prozessführung (schnelles Erwärmen, langsames Erwärmen, Temperaturhalten) ab und sind vergleichbar mit Erwärmungsverfahren in brennstoffbeheizten Öfen. Lediglich thermische Verluste durch Abgase fallen hierbei nicht an.[1] Jedoch kann diese Aussage erweitert werden, durch die Realität, dass bei konventionellen Öfen die „3 Querschnitte“ Brennstoff, Verbrennungsluft und Abgas in einer Ofenanlage aufeinander abgestimmt sein müssen.[2] Dies entfällt bei der induktiven Erwärmung, da weder ein Brennstoff, noch eine Verbrennungsluft benötigt werden. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad von konventionellen Ofenanlagen ist von der Luftüberschusszahl λ , dem Luftvorwärmgrad ε und der Abgastemperatur abhängig.

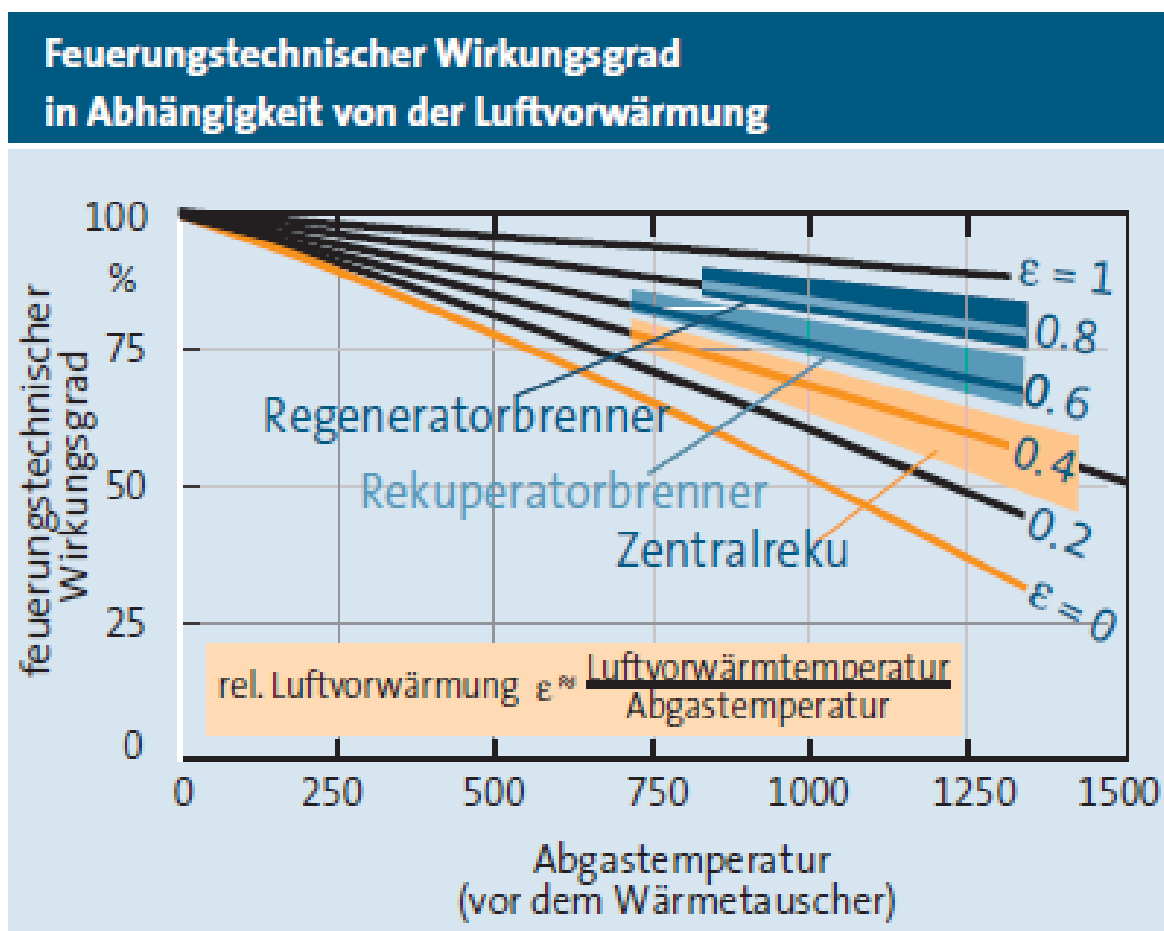


Abbildung 1-15: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Luftvorwärmung [13]

$$\eta_F = \frac{H_{\text{Brennstoff}} + H_{\text{Luft}} - H_{\text{Abgas}}}{H_{\text{Brennstoff}}} \quad [2] \quad (1-30)$$

Der Übertragungswirkungsgrad für die induktive Erwärmung hängt zum einen von dem Verhältnis der elektromagnetischen Eindringtiefe zum Werkstück-(Suszeptor)-Durchmesser d/δ und zum anderen von der elektrischen Leitfähigkeit und der Permeabilität des Werkstückmaterials ab. Das Verhältnis d/δ wird über die Arbeitsfrequenz des Induktors üblicherweise so eingestellt, dass Werte größer 3 erreicht werden. Dies bedeutet, dass die induktive Erwärmung von Werkstücken aus Stahl oder Eisen, insbesondere aus ferromagnetischem Stahl mit $\mu_r > 1$, mit Induktorwirkungsgraden größer als 80% erfolgen.[3] Besonders hohe Wirkungsgrade ergeben sich für schwachleitfähige Materialien wie Graphit oder Gläser und Oxide im schmelzflüssigen Zustand.[4]

Herleitung des Anlagenwirkungsgrades:

Es folgt jetzt eine Betrachtung des Gesamtwirkungsgrades (Bilanzrahmen II), wobei auf gewisse Unsicherheiten hingewiesen wird:

- Der Emissionsgrad ε ist keine Konstante – er wird sich über die Versuchsdauer bei zunehmenden Temperaturen verringern.
- Als Abstrahlfläche wird eine glatte Oberfläche des Reaktors angenommen – bei Schüttgütern ist die Oberfläche eine Funktion der Form und Korngröße.
- Die Reaktionswärme $\dot{Q}_{\text{Reaktion}}$ wird vernachlässigt.
- Thermische Trägheit des Reaktors in der Startphase ist nicht berücksichtigt – in der Startphase nimmt der Reaktor beim diskontinuierlichen Betrieb die gesamte Wärmemenge auf.

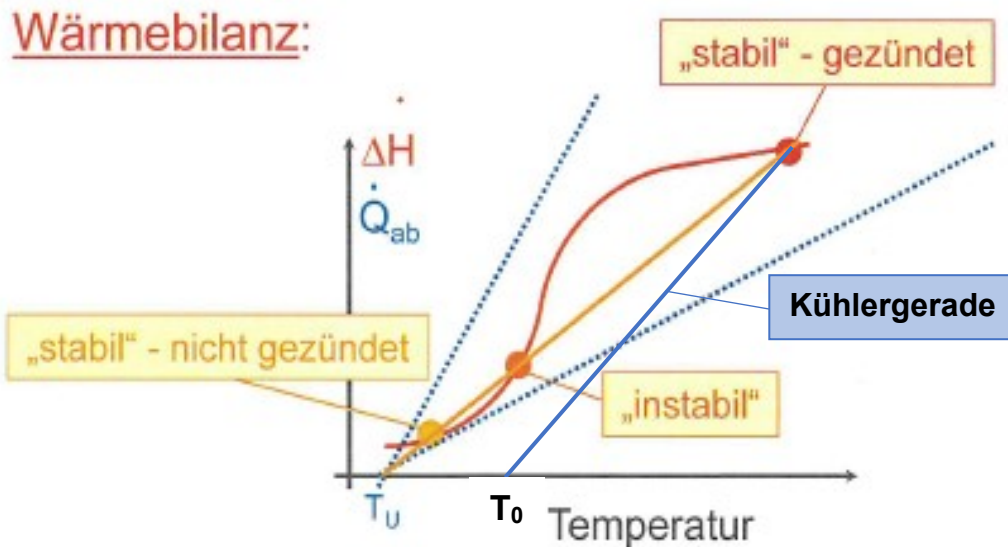
Die induktive Erwärmung wird über folgende Energieströme bilanziert:

a) Wärmestrahlung:

$$\dot{Q}_{\text{Strahlung}} = \varepsilon * \sigma * A * (T_i^4 - T_u^4) \quad (1-31)$$

Ab einer Ofentemperatur von 500 °C reduziert sich der Fehler durch die Umgebungstemperaturvernachlässigung unter 2 % und somit wird in der Auswertung auf das Glied T_u^4 verzichtet und dieser Strahlungsterm ab 500 °C berücksichtigt. Da sich die Farbe der Suszeptoren mit zunehmender Temperatur verändert, ergibt sich ebenso beim Emissionskoeffizienten eine Verringerung. Graphit und die verzünderten Stahlproben sind bei Umgebungstemperatur nahezu schwarze Körper ($\varepsilon = 1$) und mit zunehmender Temperatur beginnen diese zu glühen und der Emissionskoeffizient verringert sich. Daher wurde ein mittlerer Emissionskoeffizient von $\varepsilon = 0,85$ gewählt. Bei hohen Temperaturen spielt die Abweichung des Emissionskoeffizienten nicht mehr die tragende Rolle, da der Temperatureinfluss mit der vierten Potenz eingeht.

b) Reaktionswärmestrom: $\dot{Q}_{\text{Reaktion}} = \dot{Q}_P$



T_0 ...Kühlwassertemperatur

T_U ...Umgebungstemperatur

$\Delta \dot{H}$...Wärmeproduktion Reaktor

\dot{Q}_{ab} ...Wärmeabgabe (Strahlung, Konvektion, Leitung)

Abbildung 1-16: Arbeitspunkte einer chemischen Reaktion mit Kühlsystem [14]

In der Reaktionstechnik wird zwischen stabilen und labilen Arbeitspunkten unterschieden. Während bei raschen Oxidationsvorgängen (z. B. Explosionen) ein Durchgehen der Reaktion katastrophale Auswirkungen hat [15], leistet beim indirekten induktiven Erwärmen die kontrollierte Abgabe der Reaktionswärme einer exothermen Reaktion einen positiven Energiestrombeitrag. Wichtig hierbei ist die Steigung der Kühlwassergeraden und die Kühlwassereintrittstemperatur T_0 . [16] Die Kühlergerade (**siehe Abbildung 1-16: orange und blau**) muss von der Steigung (=Leistung) und der Kühlwassereintrittstemperatur entsprechend dimensioniert sein, dass die Wärmeproduktion (**siehe Abbildung 1-16: rot**) durch die exotherme Reaktion im stabilen oberen Arbeitspunkt bleibt. Dies wird durch die steilere Kühlwassergerade (**siehe Abbildung 1-16: blau**) erreicht.

Bei der induktiven Erwärmung besteht ein weiterer regelungstechnischer Freiheitsgrad, da die Position des Arbeitspunktes durch die induzierte elektrische Leistung verändert werden kann. Somit kann bei einem kontinuierlichen Verfahren das Umsatzmaximum einer Reaktion durch stetige Leistungsanpassung erreicht werden.

c) Wärmedurchgang vom Reaktor in das Kühlwasser: \dot{Q}_{INDU}

Der Wärmestrom aus der Reaktionsmasse und dem Suszeptor, hervorgerufen durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion, wird durch die Reaktorwand an das Kühlwasser übertragen, welches eine isotherme Eintrittstemperatur von 25 °C aufweist.

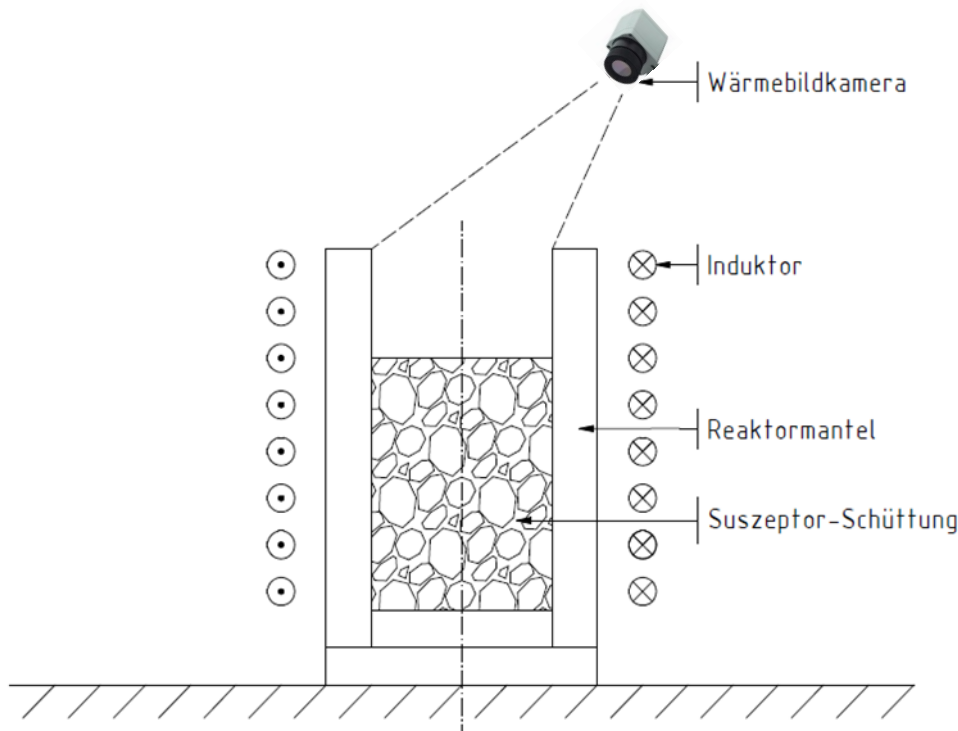


Abbildung 1-17: Versuchsaufbau Erwärmung mittels Induktionsofen [17]

d) Ohmsche Verluste der Induktorspule: P_{VCu}

Unter Berücksichtigung des Skin效ektes (siehe **Gleichung 1-13**) verringert sich die für den Strom verfügbare Leiterquerschnittsfläche. Die somit erhöhten Kupferverluste werden durch das Kühlwasser abgeführt und reduzieren dadurch den Energieeintrag durch die induktive Erwärmung.

e) Elektrische Anschlussleistung: $P_{elektrisch}$

Die Anschlussleistung der gesamten Anlage mit Frequenzumformer, Ansteuerung, Schwingkreis etc. beträgt bei 100 %iger Anlagenleistung 15 kW. Die Regelungseinrichtung gibt die tatsächlich aufgenommene Leistung $P_{\%}$ in Prozent aus. Somit kann, die in die Anlage eingespeiste elektrische Leistung berechnet werden:

$$P_{elektr.} = \frac{P_{\%}}{100\%} \cdot 15 \text{ kW} = P_{in} \quad (1-32)$$

Mit den Leistungen und Wärmeströmen ergibt sich der Anlagenwirkungsgrad:

$$P_{out} = \varepsilon * \sigma * A * T^4 + \dot{Q}_{Indu} - P_{Cu} \quad (1.33)$$

$$P_{Cu} = I^2 * R_{Cu} \quad (1.34)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon * \sigma * A * T^4 + \dot{Q}_{Indu} + \dot{Q}_{Reaktion} - P_{Cu}}{P_{in}} \quad (1.35)$$

Der in **Gleichung 1-35** formulierte Anlagenwirkungsgrad ermöglicht eine Bewertung der indirekten induktiven Erwärmung.

1.3.2 Suszeptoren

Suszeptoren stellen die Grundbausteine der indirekten induktiven Erwärmung dar – sie können als Material für Schüttungen im Reaktor sowie als Reaktorwandungen eingesetzt werden. Für oxidative Reaktionsbedingungen werden in dieser Arbeit ferromagnetische Stoffe untersucht, für reduktive Reaktionsbedingungen werden kohlenstoffbasierte Suszeptoren untersucht.

1.3.2.1 Kohlenstoffbasierte Suszeptoren

Für die induktive Erwärmung stehen eine Vielzahl von kohlstoffhaltigen Suszeptoren zur Verfügung. Diese Suszeptoren haben einige Vorteile:

- Die Oxidation des Kohlenstoffs trägt zur Erwärmung des Reaktors bei. Da der Materialabtrag durch Oxidation über die Partikeloberfläche stattfindet, wird bei kleinen Korngrößen ein höherer Materialschwund stattfinden.
- Bei Sauerstoffmangel entsteht laut dem Boudouard-Gleichgewicht eine reduzierende Atmosphäre aus Kohlenstoffmonoxid.

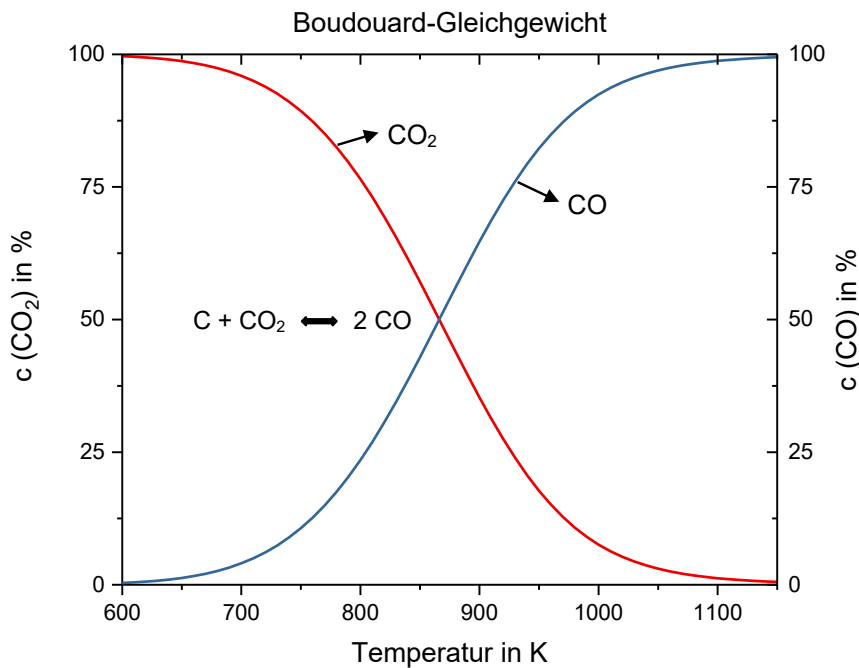


Abbildung 1-18: Boudouard - Gleichgewicht

Die Berechnung des Boudouard-Gleichgewichtes aus der freien Gibbschen Energie zeigt, dass mit zunehmender Temperatur das Gleichgewicht auf der Seite des Kohlenstoffmonoxids liegt. Hierbei spielt die Reaktivität des Kohlenstoffs, d. h. die Diffusionsvorgänge an der Partikelgrenzschicht zwischen der festen und gasförmigen Phase eine ausschlaggebende Rolle. Ebenso ist die chemische Gleichgewichtseinstellung durch die Partialdrücke im Reaktor durch Variation des Innendruckes oder der Anwesenheit eines Inertgases variabel.

Thermogravimetrische Untersuchungen (TGA-MS) von fein verteiltem Graphit (durchschnittlicher Durchmesser: 9 µm) in Klärschlammasche (durchschnittlicher Durchmesser: 300 µm) in Aluminiumoxidtiegeln zeigen einen allmählichen Gewichtsverlust der Probe im Temperaturbereich von 923 – 1323 K und einen markanten Gewichtsverlust ab 1.323 K. Ab der Temperatur von 1.273 K wird in der TGA-MS ausschließlich Kohlenstoffmonoxid detektiert.[18]

Folgende kohlenstoffhaltige Suszeptoren konnten an der HTL Dornbirn getestet werden:

- Graphit in unterschiedlichen geometrischen Formen und Korngrößen
- Hochofenkoks, Bruchmaterial mit Korngrößen kleiner 30 mm
- Anthrazit, Bruchmaterial mit Korngrößen kleiner 30 mm

Da Graphit die besten Erwärmungseigenschaften bewiesen hat, wird dieser als Suszeptormaterial in dieser Arbeit weiter untersucht.

1.3.2.2 Metallhaltige Suszeptoren

Der geringe elektrische Widerstand von Eisen- und Stahlwerkstoffen ermöglicht die Reduzierung der Arbeitsfrequenz, dies verringert den Skineneffekt. Da eine höhere elektromagnetische Durchdringung vorherrscht, wird somit der Temperaturgradient im Suszeptormaterial verkleinert.

Da Metalle Kaltleiter sind, erhöht sich der spezifische, elektrische Widerstand mit steigender Temperatur. Dies führt zu einem positiven Effekt in der Erwärmung des Suszeptors durch den Wirbelstromeffekt. Diesem positiven Effekt wirkt ab Erreichung der Curietemperatur bei ferromagnetischen Stoffen das Wegfallen der magnetischen Eisenverluste entgegen, welche ebenso einen Eintrag von Wirkleistung in den Suszeptor bewirken.

Bei oxidativen Bedingungen tritt ein Massenverlust durch Oxidation des Eisenwerkstoffes ein. Die Atmosphäre im Reaktor bewirkt eine Beeinflussung des Schmelzpunktes der ferromagnetischen Suszeptoren. Daraus kann man auch schließen, dass ein Zunder mit relativ hohem Wüstit-Anteil (77 %) in oxidierender Atmosphäre noch in deutlichem Maße zu Magnetit (Schmelztemperatur 1594 °C) oder Hämatit (Schmelztemperatur 1730 °C) aufoxidiert. Wird allerdings der gleiche Zunder in reduzierender Atmosphäre aufgeheizt, so nimmt offenbar der Wüstit (Schmelztemperatur 1370 °C) zu. Rein wärmetechnisch ist zu beachten, dass durch die Oxidation des Stahles dem Vorgang Wärme zugeführt wird. Bei dem mehrfach beobachteten Grad der Oxidation des Eisens sind 5.650 kJ/kg(Fe) bei der Verbrennung durch freien Sauerstoff einzusetzen. Der wärmetechnische Nutzen des Abbrandes für die Erwärmung ist jedoch nicht gleich der Verbrennungswärme, denn der Sauerstoff wird aus der Umgebungsluft genommen, so dass der zugehörige Stickstoff als Ballast den Abgasverlust vergrößert. Ferner muss der an das Eisen gebundene Sauerstoff auf Ziehtemperatur erhitzt werden.[2]

Der Massenverlust durch die Oxidation könnte durch zwei Maßnahmen verhindert werden:

- 1.) Bei der Anwendung der Niedertemperatur-Pyrolyse, z. B. bei der Wertstoffrückgewinnung aus Verbundstoffen, wird die Oxidationstemperatur unterschritten.
- 2.) Durch Verhinderung von Luft- bzw. Sauerstoffeintritt in den Reaktionsraum und präventiver Spülung mit Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid wird eine Oxidation des Suszeptormaterials verhindert.

1.3.3 Hochtemperaturwerkstoffe und Reaktorbau

Wegen der hohen Temperaturbeständigkeit von Korund (Schmelztemperatur: 2050 °C) ist bei Feuerfestzement auf einen hohen Anteil von Al_2O_3 zu achten. SiO_2 und FeO verringern die Temperaturbeständigkeit durch die Bildung von eutektischen Schmelzen (93 % SiO_2 , 17 % Al_2O_3 , Schmelztemperatur: 1590 °C) und steigern die chemische Aktivität des Feuerfestmaterials. Diese aus Schlackenreaktionen bekannten Vorgänge sind je nach Einsatzmaterial zu untersuchen und schwächen die mechanische Festigkeit des Feuerfestmaterials.[19]

Besondere Aufmerksamkeit muss auf das Wachsen von Feuerfestmaterial beim Aufheizen und das Schwinden beim Abkühlen gelegt werden. Diese Volumensänderung kann je nach Steinqualität durchaus bis +5 % linear bei 1000 bis 1300 °C betragen.[2] Daher ist das Aushärten von großer Bedeutung. Bei der Aushärtung ist darauf zu achten, dass freies Wasser und Kristallwasser aus der Bindematrix aus dem Feuerfestmaterial durch Porenöffnungen verdampfen kann, da ansonsten extreme Drücke im Feuerfestmaterial entstehen und dieses zum Bersten gebracht wird. Je fragmentierter der Reaktor konstruiert wird, desto geringer sind im Betrieb die möglichen Volumensänderungen. Scharfkantige Übergänge erhöhen, wie bei mechanischen Belastungen, ebenso thermisch bedingte Spannungen im betrachtenden Körper.



Abbildung 1-19: Fragment. Reaktormantel



Abbildung 1-20: Reaktorboden mit Rissbildung

1.4 Elektromagnetische Feldmessung

Für entsprechende Erwärmungsleistungen werden bei der induktiven Erwärmung große Magnetfelder benötigt. Bislang gibt es noch keine wissenschaftliche Abhandlung über das Verhalten der Magnetfeldstärke in Abhängigkeit des Abstandes zur Induktionsspule. Aus sicherheitstechnischen Gründen befasst sich diese Arbeit mit diesem Thema.

1.4.1 Theoretische Grundlagen

Eine der interessantesten gegenwärtigen Problemstellungen der Hochfrequenztechnik ist die Frage nach der Einwirkung elektromagnetischer Strahlung auf den Menschen. Elektromagnetische Strahlung führt in biologischer Substanz ebenfalls stets zur Erwärmung, die bei hinreichendem Leistungspegel zur deutlichen - und im Grenzfall auch gefährlichen - Temperaturerhöhung führen kann.[20]

Elektromagnetische Felder sind omnipräsent in allen Frequenzbereichen, sie haben natürliche und anthropogene Quellen. Die Einstufung der Gefährlichkeit erfolgt nach vier Kriterien: Frequenz, Spannung, Leistung und Einwirkdauer.

Quellen für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder sind die elektrische Stromversorgung mit Hochspannungsleitungen und Stromtrassen bis zur elektrischen Installation im Haus sowie Antennenanlagen für Fernsehen, Radio und Mobilfunk. Auch die zunehmende Digitalisierung mit Laptops, Smartphones, WLAN und Bluetooth für Fernsteuerung und Überwachung sowie Haushaltsgeräte wie Mikrowellengeräte oder Elektroherde mit Induktionskochfeld führen zu einer höheren elektromagnetischen Beeinflussung. Die in der Öffentlichkeit oft sehr kontrovers geführten Diskussionen sollen auf theoretischer und messtechnischer Grundlage versachlicht werden. So können Ängste abgebaut und sinnvolle Schutzmaßnahmen getroffen werden.[21] Dies ist der Grund, wieso sich diese Thematik in dieser Arbeit befindet.

Je nach Art der Strahlungsquelle können Vorsorgemaßnahmen zur Begrenzung der Pegel oder Schutzmaßnahmen vor den Auswirkungen getroffen werden. So helfen metallische Abschirmungen gegen die Ausbreitung elektrischer Felder. Magnetische Felder lassen sich nicht abschirmen. Sie durchdringen jeden Körper, lassen sich aber mit ferromagnetischen Materialien wie Weicheisen oder weichmagnetischer Nickel-, Eisen-Legierungen um den zu schützenden Bereich herumführen. In gekennzeichneten Aufenthaltszonen kann ein zeitlicher Aufenthalt oder gar ein Aufenthaltsverbot vorgeschrieben werden.[21]

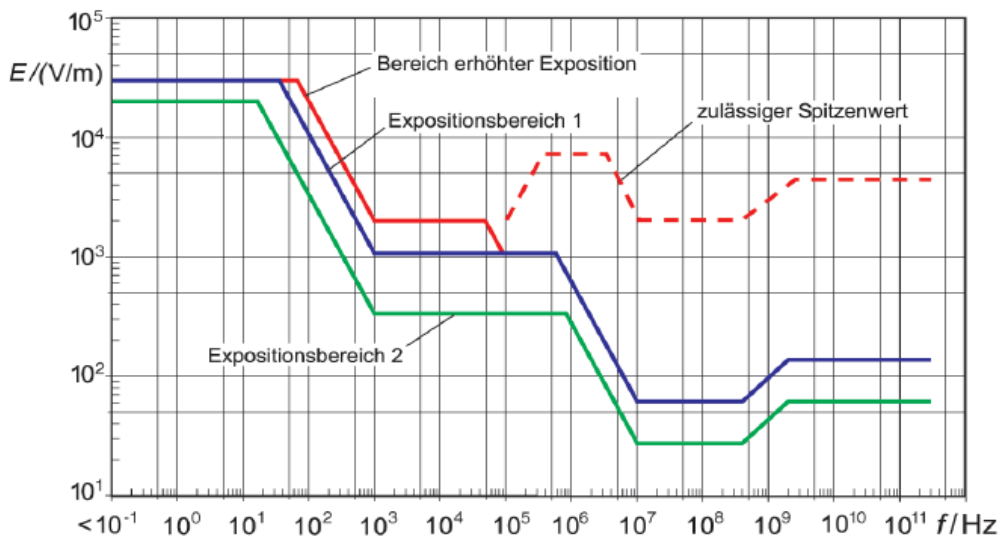


Abbildung 1-21: Zulässige Werte der elektrischen Feldstärke in den Expositionsbereichen [24]

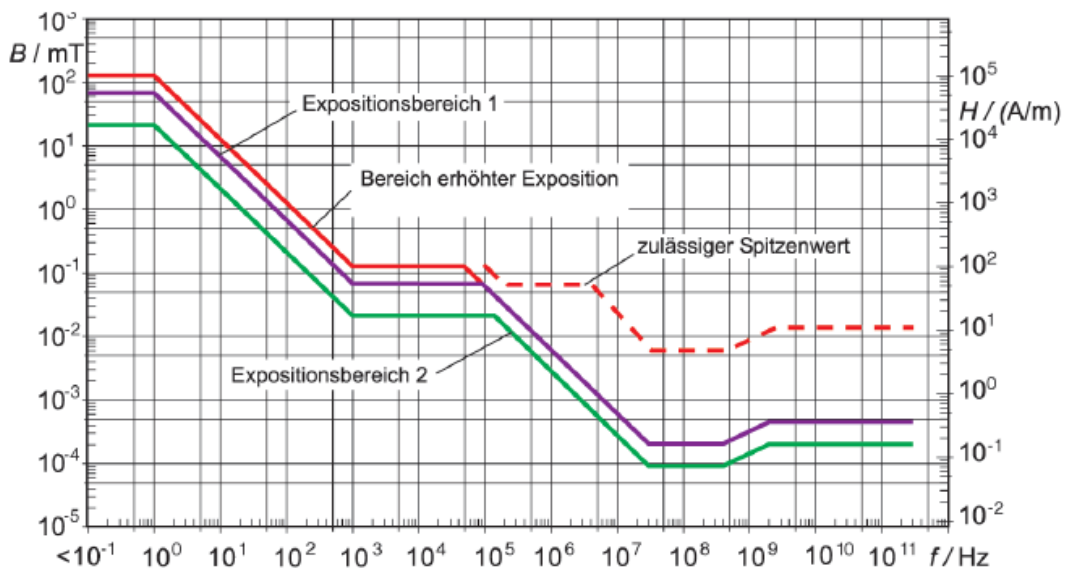


Abbildung 1-22: Zulässige Werte der magnetischen Flussdichte in den Expositionsbereichen [24]

Die oben dargestellten Diagramme zeigen die Abhängigkeit der zulässigen Werte der Flussdichte und Feldstärke in Abhängigkeit der Frequenz. Die Stärke des Magnetfeldes nimmt mit dem Abstand r etwa um $1/r^2$ ab.[23] In der Literatur sind keine Stellen bekannt, welche einen genauen Zusammenhang zwischen der Magnetfeldstärke und dem Abstand zur Inuktorspule beschreiben. Daher wird bei den folgenden sicherheitstechnischen Betrachtungen auf den Einfluss der Frequenz und des Sicherheitsabstandes eingegangen. Für diese Betrachtungen musste eine eigene Messtechnik entwickelt werden.

1.4.2 Sicherheitstechnische Betrachtungen

Die gesetzliche Grundlage bilden das Arbeitnehmerschutzgesetz (ASchG) und die VORNORM ÖVE ÖNORM E 8850 elektrische, magnetische und elektro-magnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz – Beschränkung der Exposition von Personen.[28] Die Grenzwerte für elektromagnetische Felder sind regional sehr unterschiedlich und ändern sich in sehr kurzen Zeitabständen. Daher ist im Anlagengenehmigungsverfahren jeweils auf die aktuellen Grenzwerte Rücksicht zu nehmen.

Die Tabelle 1-2 zeigt die niedrigsten Grenzwerte für den Worst-Case nach VORNORM ÖVE ÖNORM E 8850.

Tabelle 1-2: Grenzwerte Vornorm ÖVE ÖNORM E8850 [24]

Bewertung nach ÖNORM E8850		
Frequenzbereich	Grenzwerte	
	beruflich exponiert	Allgemeine Bevölkerung
Niederfrequenzbereich		
5 Hz – 30 kHz	30,7 µT	6,25 µT
50 Hz	500 µT	100 µT
Hochfrequenzbereich		
30 kHz – 18 GHz	61 V/m	28 V/m

1.4.2.1 Messergebnisse niederfrequente und hochfrequente Felder

Die Versuche wurden durchgeführt im verfahrenstechnischen Labor der HTL Dornbirn.

- a) Messpunkt 70 cm Abstand von der Induktionsspule, Brusthöhe (100 % Leistung, 700 A, 50,2 kHz)

Tabelle 1-3: Messergebnisse der Feldmessungen 70 cm Abstand [24]

Messbereich	Messwert	Grenzwert
5 Hz – 30 kHz	13,00 µT	30,7 µT
50 Hz	0,05 µT	500 µT
größer 50 Hz	0,15 µT	30,7 µT
100 kHz – 3 GHz	20 V/m	61 V/m

- b) Messpunkt 150 cm Abstand von der Induktionsspule, Brusthöhe (100 % Leistung, 700 A, 50,2 kHz)

Tabelle 1-4: Messergebnisse der Feldmessungen 70 cm Abstand [24]

Messbereich	Messwert	Grenzwert
5 Hz – 30 kHz	6,00 μT	30,7 μT
50 Hz	0,03 μT	500 μT
größer 50 Hz	0,10 μT	30,7 μT
100 kHz – 3 GHz	10 V/m	61 V/m

Die Messungen ergaben, dass im niederfrequenten Bereich von 5 Hz bis 30 kHz und im hochfrequenten Bereich von 100 kHz bis 3 GHz die Grenzwerte für beruflich exponierte Personen nach ÖNORM E 8850 bei den Messpunkten Brusthöhe 70 cm vor der Spule und Brusthöhe 1,5 m vor der Spule eingehalten werden. Da im niederfrequenten Bereich beim Messpunkt 70 cm vor der Spule Brusthöhe der Grenzwert für die allgemeine Bevölkerung überschritten wird, wird empfohlen, da es sich um SchülerInnen handelt, beim Betrieb des Induktionsofens einen Sicherheitsabstand von mindestens 2 m vom Induktionsofen entfernt einzuhalten.[24]

Aus den Messwerten ist eindeutig zu erkennen, dass das elektrische, wie auch das magnetische Feld mit dem Abstand abnimmt. Diesem Verhalten von elektromagnetischen Feldern sind die folgenden Versuche gewidmet.

1.4.3 Entwicklung der Messtechnik zur elektromagnetischen Feldmessung

Die Inhalte der elektromagnetischen Feldmessung sind in intensiver Zusammenarbeit mit Simon Moll entstanden.

Ziel ist es eine kostengünstige, robuste Messtechnik zur elektromagnetischen Feldmessung zu entwickeln. Diese Messtechnik besteht aus einer Luftspule (Feldspule), welche als elektrischer Potentialeingang an ein Zweikanal - Speicheroszilloskop angeschlossen wird. Als Vergleichssensor zur Feldspule wird eine Hallsonde verwendet. Als Referenzdaten werden, wie vorhin beschrieben, die Messungen aus der **Tabelle 1-3** verwendet.

1.4.3.1 Dimensionierung einer Feldspule für Streufeldmessungen

Für die in einem Leiter zufolge eines magnetischen Wechselfeldes induzierte Spannung gilt

$$U = + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-36)$$

Mit dem magnetischen Fluss gegeben durch das Flächenintegral der Flussdichte über den Spulenquerschnitt

$$\phi(t) = \int_A B(t) dA \quad (1-37)$$

Für den kreisförmigen Querschnitt der Feldspule folgt dann

$$\phi(t) = B(t) * r^2 * \pi \quad (1-38)$$

Für die magnetische Flussdichte im Außenbereich des Induktors wird bei einem definierten Abstand angenommen

$$B(t) = B_0 * \sin(\omega * t) \quad (1-39)$$

mit der Amplitude B_0 der Flussdichte.

Durch zeitliche Ableitung erhält man nun die in die Feldspule induzierte Spannung (n steht für die Windungszahl)

$$U = \frac{d}{dt} [B_0 * n * r^2 * \pi * \sin(\omega * t)] = B_0 * n * r^2 * \pi * \omega * \cos(\omega * t) \quad (1-40)$$

Die Amplitude dieser Schwingung kann zusammengefasst werden zu

$$U_0 = B_0 * n * r^2 * \pi * \omega \quad \text{bzw.} \quad U_0 = 2 * B_0 * n * (r * \pi)^2 * f \quad (1-41)$$

Exemplarisch wird nun gewählt:

$B_0 = 13,00 \mu\text{T}$ (AUVA-Messung bei $f_{\text{res}} = 50 \text{ kHz}$, Messbereich 5 Hz – 30 kHz, 70 cm vor Spule)

Spezifikation Mollspule (mehrlagige Luftspule):

Windungszahl: $n = 10$	Spulenradius: $r = 10 \text{ mm}$
Drahtdurchmesser: $d = 0,4 \text{ mm}$	$f = 50 \text{ kHz}$

Daraus berechnet sich die Amplitude der induzierten Spannung zu $U_0 = 12,83 \text{ mV}$

Der tatsächliche Spannungswert wird vermutlich höher liegen, da das $B(f)$ -Maximum der AUVA-Messung nicht im Erfassungsbereich des Geräts lag.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen sind unterteilt in

- Untersuchungen der induktiven Erwärmung
- Elektromagnetische Feldmessungen

Die Untersuchungen der induktiven Erwärmen haben das Ziel die indirekte induktive Erwärmung einer breiteren Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik zur Verfügung zu stellen. Hierbei wird auf oxidative und reduktive Atmosphären in induktiv erwärmten Reaktoren eingegangen.

Die elektromagnetischen Feldmessungen beschäftigen sich mit einer neuen Möglichkeit über eine sehr kostengünstige Messtechnik eine Feldmessung zu realisieren.

2.1 Untersuchungen der induktiven Erwärmung

Die Ergebnisse dieser Arbeit kommen aus Versuchen mit der Versuchsanlage „InduCARBERL – HTL Dornbirn.“ Diese Anlage hat den großen Vorteil, dass sie mit einer Anschlussleistung von 15 kW einen Frequenzbereich von 5 kHz bis 200 kHz abdecken kann.

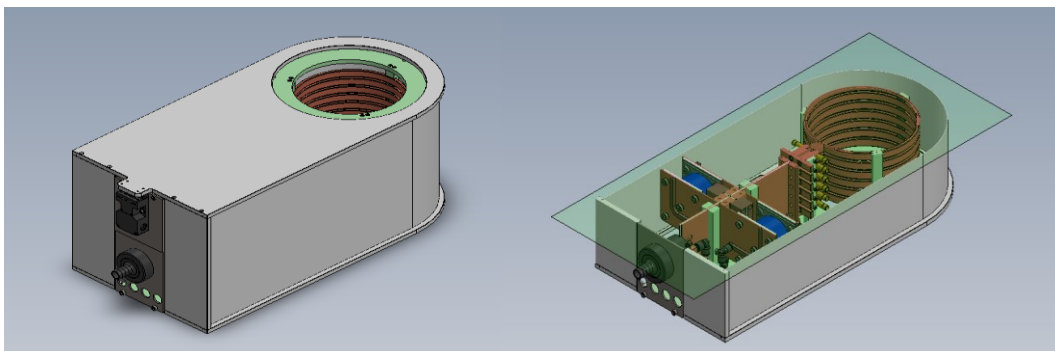


Abbildung 2-1: Versuchsanlage mit Abdeckung und Schnittdarstellung [10]

2.1.1 Versuchsaufbau

Zur Standardisierung der Versuchsdurchführung werden alle Versuche mit denselben Parametern durchgeführt:

- Kühlwassertemperatur: $25\text{ °C} \pm 2\text{ K}$
- Datenaufzeichnung mittels ELA-Soft (Frequenz, Stromstärke, elektrische Leistung, Leistungen Kühlwasser)
- Wärmebildkamera OPTRIS, Abstand 80 cm
- Resonanzfrequenz $f_R = 11,8\text{ kHz}$: Schaltung InduCARB: 9 Windungen seriell
 $L = 11,6\text{ }\mu\text{H}$; Kondensatoren: $C = 2 \times 40\text{ }\mu\text{F}$ seriell ($I_{\text{max}} = 1000\text{ A}$; $U_{\text{max}} = 800\text{ V}$)
- Resonanzfrequenz $f_R = 41,0\text{ kHz}$: Schaltung InduCARB: 9 Windungen seriell
 $L = 11,6\text{ }\mu\text{H}$; Kondensatoren: $C = 2 \times 2,6\text{ }\mu\text{F}$ seriell ($I_{\text{max}} = 425\text{ A}$; $U_{\text{max}} = 1400\text{ V}$)

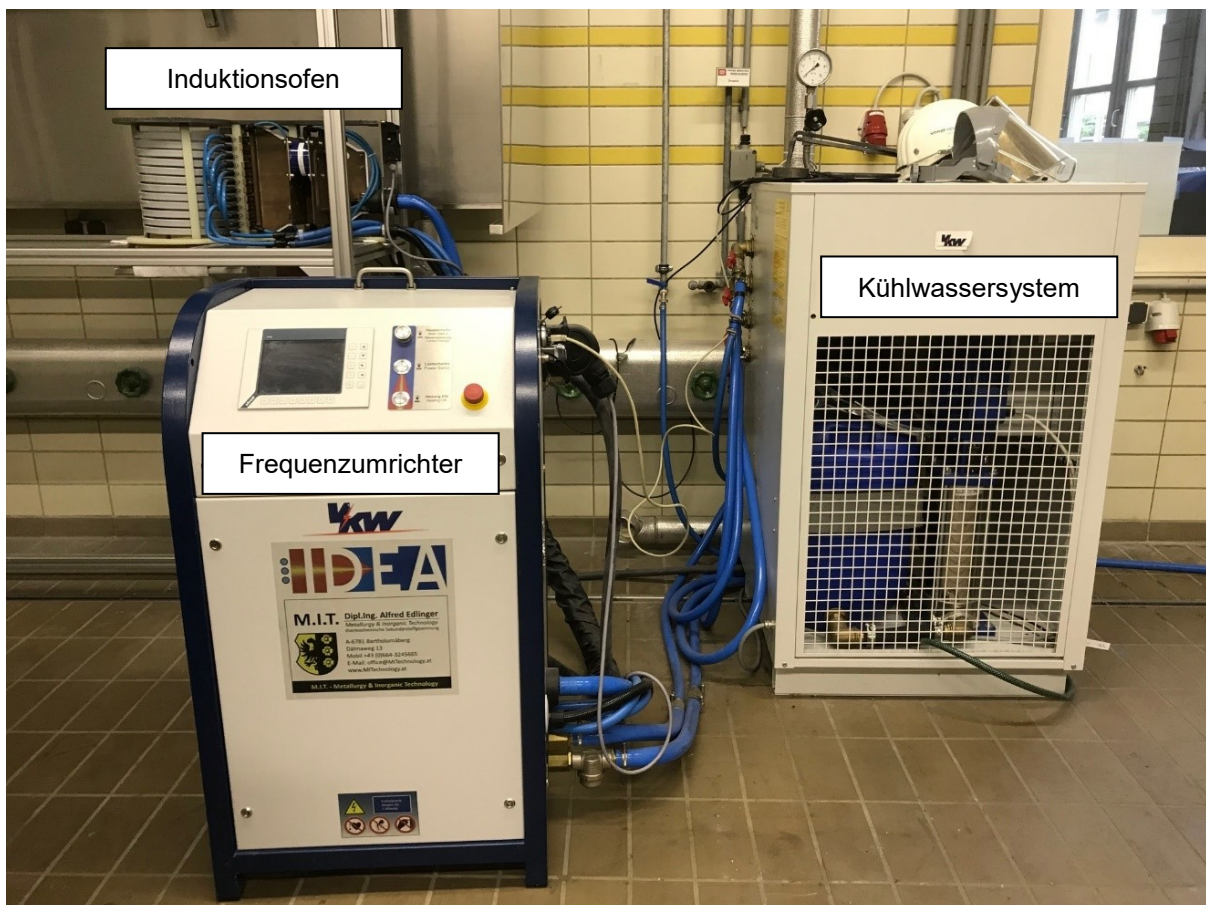


Abbildung 2-2: Aufbau der Versuchsanlage

2.1.2 Versuchsdurchführung für oxidative und reduktive Reaktionsbedingungen

Die oxidativen Bedingungen werden mit eisenhaltigen Suszeptoren realisiert, die reduzierenden Reaktoratmosphären werden durch Graphit in unterschiedlichen Formen erzeugt.

Die Qualitätsmerkmale einer indirekten induktiven Erwärmung werden wie in den Seiten 12 und 13 beschrieben, durch die korrekte Wahl der Frequenz, Eindringtiefe des induzierten Stromes, optimaler Geometrie zwischen Induktor und Reaktor bestimmt. Für qualitative Aussagen über den Erwärmungsvorgang finden die Erwärmungsbilder (Wärmebildkamera) Erwärmungskurven (Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera) Anwendung, diese dienen ebenso zur Bestimmung des Wirkungsgrades im instationären Bereich (siehe Seite 17). Der Gesamtwirkungsgrad wird entsprechend der **Gleichung 1-35** berechnet und gibt einen Aufschluss über die Effizienz des Verfahrens. Die Rechengröße R' gibt einen Einblick in die Wirkleistungseinkopplung in den Suszeptor.

2.1.3 Experimentelle Ergebnisse

Die Untersuchungen der induktiven Erwärmung werden unterteilt in

- Thermofotografische Auswertungen
- Auswertungen der Erwärmungskurven
- Wirkungsgradbetrachtungen der induktiven Erwärmung

Ziel ist es neue Erkenntnisse über die indirekte induktive Erwärmung von verschiedenen Betrachtungsseiten zu beurteilen und kritisch zu hinterfragen.

2.1.3.1 Thermofotografische Auswertungen

Die thermofotografischen Darstellungen in chronologischer Reihenfolge der Versuchsdauer ermöglichen Aussagen über die Homogenität der Erwärmung und es kann die Effizienz der Erwärmung in Abhängigkeit von geometrischen Gegebenheiten diskutiert werden. Für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Suszeptoren wird darauf geachtet, dass die Versuche bei standardisierten Bedingungen (Frequenz, Leistung, Stromstärke, Anlagenkonfiguration, Messanordnung) gemacht werden. Die dargestellten Temperaturen sind jeweils Maximalwerte des Messbereiches.

a) Graphitkugeln und Graphitwürfel

Graphit hat ausgezeichnete Eigenschaften als Suszeptor – neben der Herstellung einer reduzierenden Atmosphäre ermöglicht die thermische Stabilität ein breites Einsatzspektrum. Vorangegangene Versuche haben die optimale Einkopplungsfrequenz von Graphit oberhalb von 40 kHz ergeben. Neben Graphit könnten auch andere Kohlenstoffträger wie Anthrazit oder Koks zur induktiven Erwärmung Verwendung finden, wobei Koks und Anthrazit im Gegensatz zum Graphit einen viel langsameren Erwärmungsverlauf gezeigt haben. Weitere Vorteile von Graphit stellen dessen mechanische, formgebende Bearbeitbarkeit dar und dessen Möglichkeit ihn auch in unterschiedlichen geometrischen Formen, wie Kugeln, Würfeln, Zylinder etc. zu produzieren.

Die in dieser Arbeit verwendeten Formen sind wie folgt definiert:

- Graphitwürfel: Seitenlänge von 50 mm und eine Masse von 270 g.
- Graphitkugel: Durchmesser von 18 mm und eine Einzelmasse von 6,9 g.

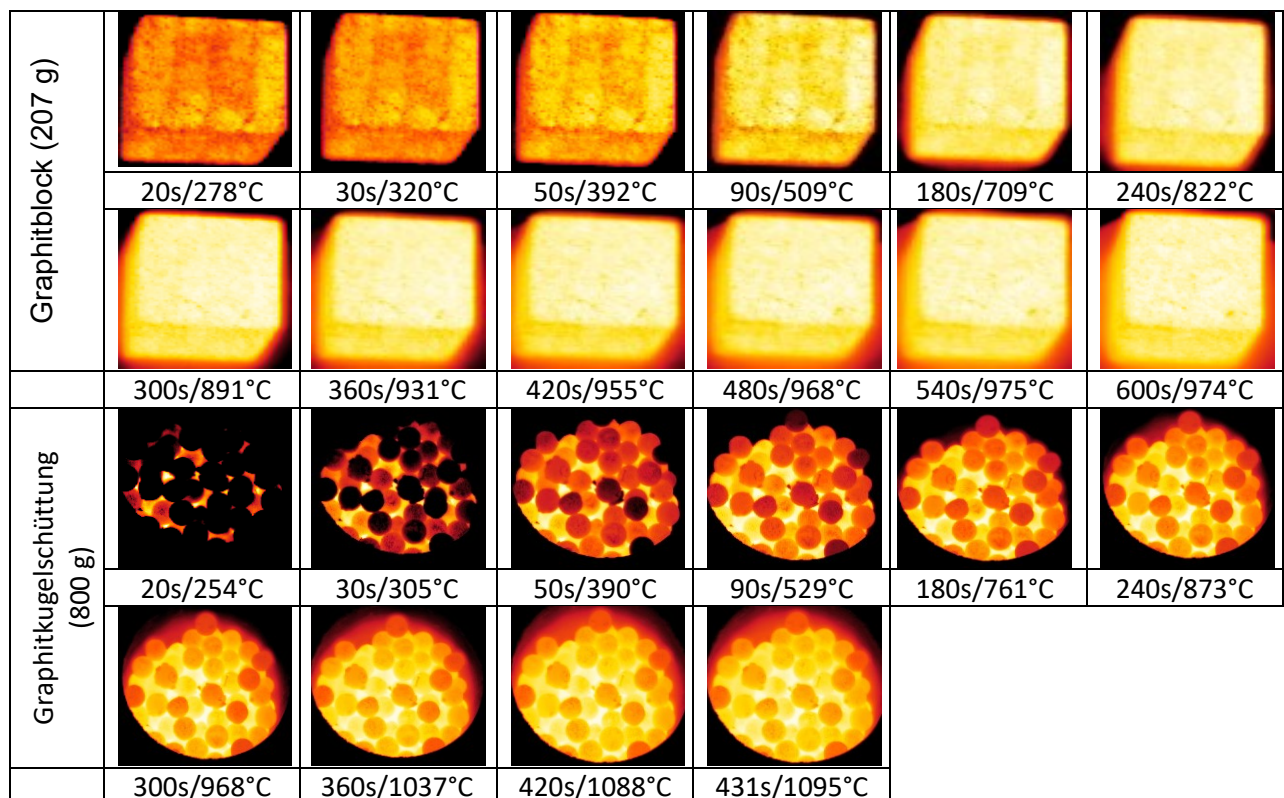


Abbildung 2-3: Erwärmungsbilder Graphitwürfel- u. -kugelschüttung bei $f = 41$ kHz, $P = 4,5$ kW

Folgende Aussagen können aus der **Abbildung 2-3** getätigt werden: Graphit ist ein ausgezeichneter Suszeptor. Die Erwärmung ist sogar bei großer Korngröße (Würfel mit 50 mm Seitenlänge) sehr homogen und weist eine extrem hohe Erwärmungsgeschwindigkeit auf. Dies lässt sich auf die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit von Graphit ($\lambda = 119$ bis 165 W/mK) rückführen.[25] Die hohe Wärmeleitfähigkeit sinkt mit steigender Temperatur.[26]

b) Eisenhohlzylinder (S355, 34CrNiMo6)

Durch den Einsatz von metallischen Hohlzylindern können viele neue Erkenntnisse gewonnen werden, wie

- Einfluss der Geometrie
- Einfluss der verwendeten Masse
- Gegenseitige Beeinflussung von konzentrischen Rohren
- Materialverhalten

Folgende Hohlzylinder werden untersucht:

Tabelle 2-1: Hohlzylinderdaten

Geometrie	d_A	d_i	s	h	m
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
G2	48	43	2,5	50	148,63
G3	51	40	5,5	50	316,76
G4	63	38	12,5	50	794,37
G5	75	64	5,5	50	487,75
G6	75	68	3,5	49	313,50
G7	75	68	3,5	50	307,87
G8	130	118	6,0	50	920,04



Abbildung 2-4: Eisenhaltige Proben Geometrien 1 bis 8

Untersuchungen von Geometrie G2 bis G8:

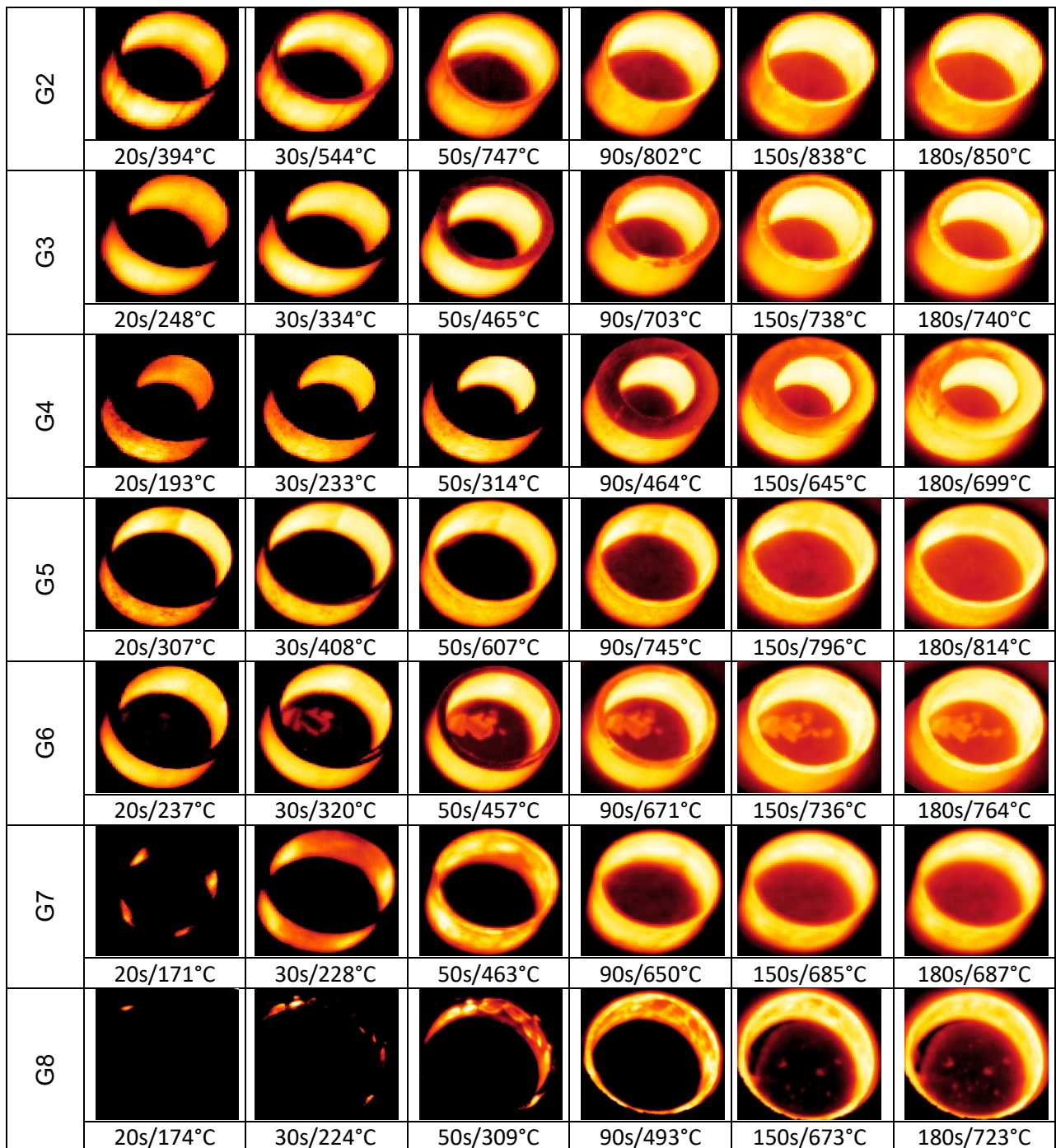


Abbildung 2-5:: Erwärmungsbilder Fe-Ringe G2 bis G8 $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Eindeutig zu erkennen ist, dass dünnwandige Hohlzylinder eine raschere Erwärmung haben und mit Berücksichtigung der erwärmten Masse ergibt sich die Schlussfolgerung, dass der Abstand zur Induktorspule so gering wie möglich sein sollte. Diese Aussagen werden in den nächsten Darstellungen bewiesen und stehen im übereinstimmenden Zusammenhang mit den theoretischen Grundlagen nach Kretzmann (siehe Seite: 12).

c) Untersuchungen mit konzentrisch angebrachten Eisenstücken (Geometrie 1)

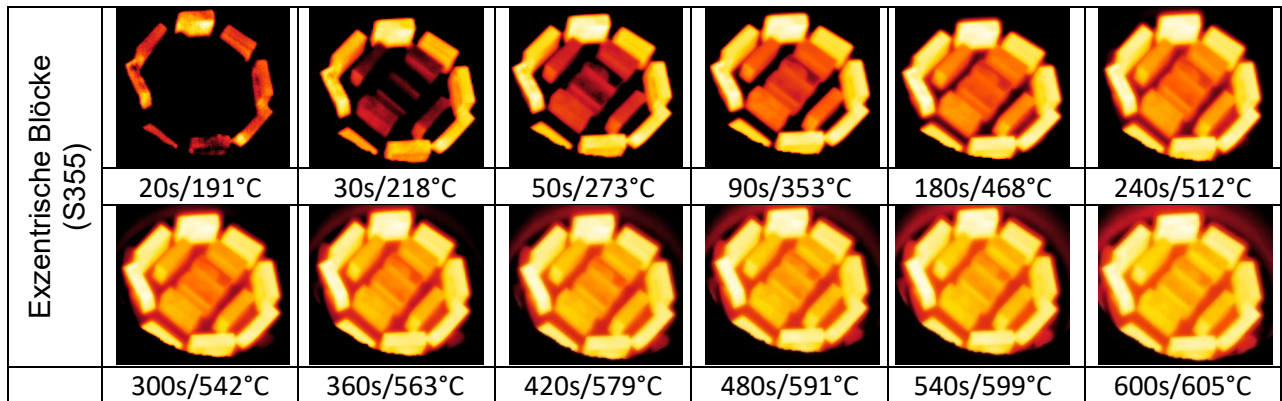


Abbildung 2-6: Erwärmungsbilder radialer Untersuchungen von Fe-Stücken $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Die oberhalb dargestellte **Abbildung 2-6** zeigt den zeitlichen Erwärmungsverlauf der Eisenstücke von außen nach innen. Die Erwärmung beginnt im Außenbereich, d. h. die Feldlinienkonzentration im Bereich der Induktorspule ist höher und die Erwärmung ist dort am effizientesten. Neben der Erwärmung durch Induktion, treten die Übertragungsmechanismen Wärmekonvektion in hauptsächlich vertikaler Richtung und Wärmestrahlung in allen geometrischen Richtungen auf. Dies bedeutet, dass die äußeren Eisenstücke die inneren durch diese Mechanismen ebenso erwärmen. Ein weiteres Phänomen der induktiven Erwärmung stellt die gegenseitige elektromagnetische Beeinflussung der einzelnen Partikel dar, dies wird in der nächsten Darstellung untersucht.

d) Untersuchungen mit kleinen Partikelgrößen (Schüttungen)

Der Einfluss der Partikelgrößen wird durch Eisenspäne mit Wandstärken kleiner 1 mm untersucht. Die Eindringtiefe δ in die Späne beträgt laut **Abbildung 1-10** bei 11 kHz für Stahl 0,09 mm. Somit ist bewiesen, dass für den Stromfluss nur eine geringe Querschnittfläche zur Verfügung steht, welches wiederum einen großen ohmsche Widerstand bewirkt.

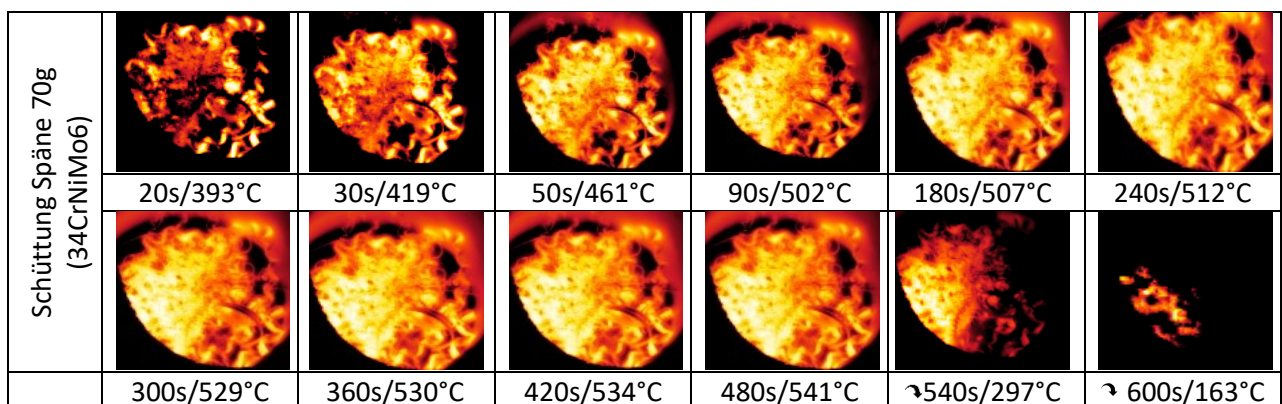


Abbildung 2-7: Erwärmungsbilder Schüttungen $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW; (↷ zeigt die Abkühlphase)

Bei kleineren Partikeln ist die Erwärmung über das Reaktorvolumen homogener. Hier kann ebenso von Sekundär- und Tertiärinduktionen ausgegangen werden.

In den folgenden Darstellungen wird die gegenseitige Beeinflussung von einer massiven Reaktorwand und einer Schüttung untersucht.

e) Schüttungen aus Metallspänen mit und ohne Ring

Eisenspäne aus der spanabhebenden Industrie sind eine sehr kostengünstige Variante als Suszeptormaterial. In den Versuchen werden Späne mit und ohne außenliegenden Eisenring betrachtet.

Schüttung Späne 179 g (³⁴ CrNiMo6)							
	20s/387°C	30s/484°C	50s/564°C	90s/602°C	180s/611°C	240s/610°C	
	300s/611°C	360s/610°C	420s/611°C	480s/613°C	540s/615°C	↻ 600s/472°C	
	Späne 179 g mit Wandung (³⁴ CrNiMo6)						
		20s/197°C	30s/228°C	50s/283°C	90s/392°C	180s/604°C	240s/656°C
300s/703°C		360s/730°C	420s/737°C	480s/742°C	540s/749°C	↻ 600s/708°C	

Abbildung 2-8: Erwärmungsbilder Schüttungen mit und ohne Wandung P=11,8 kHz, P=4,5 kW

Die Bilder der Schüttung zeigen eine homogenere Erwärmung bei den Versuchen ohne außenliegender Reaktorwand. Der Eisenhohlzylinder (Geometrie 8) absorbiert den Großteil des elektromagnetischen Feldes, welches durch die viel langsamere Erwärmung im Zentrum des Reaktors gezeigt wird, wobei durch die massive Reaktorwand bei gleichen energetischen Bedingungen (Leistung, Frequenz, Stromstärke) nach bereits 240 Sekunden höhere Temperaturen erreicht werden. Dies zeigt, dass die Einkopplung in eine möglichst nahe an der Induktorspule angebrachte massive Suszeptorwand effizienter ist.

Für kontinuierliche Schmelzvorgänge von körnigem Aufgabegut wäre eine doppelringförmige Reaktorkonstruktion mit Ringspalt von großem Vorteil, da das Gut stetig in den vertikalen Reaktor von oben zugeführt würde und sich durch die Schwerkraft hervorgerufenen Produktstrom von oben nach unten die Temperatur des Gutes kontinuierlich erhöhen würde. Diese Art der Erwärmung wird in den nächsten Versuchen nachgestellt.

f) Doppelringversuche

Der konzentrische Doppelring würde ideal für die Erwärmung von Edukten für chemische Reaktionen und Schmelzprozesse mit geringer Korngröße sein, da je nach Korngröße und Ringspaltbreite ein stetiger Betrieb realisierbar wäre. Für eine homogene Erwärmung des Reaktionseduktes wäre eine gleichmäßige Erwärmung der Ringe eine wichtige Voraussetzung, da es sonst zu einer einseitigen Erwärmung, bzw. Schmelze kommen würde.

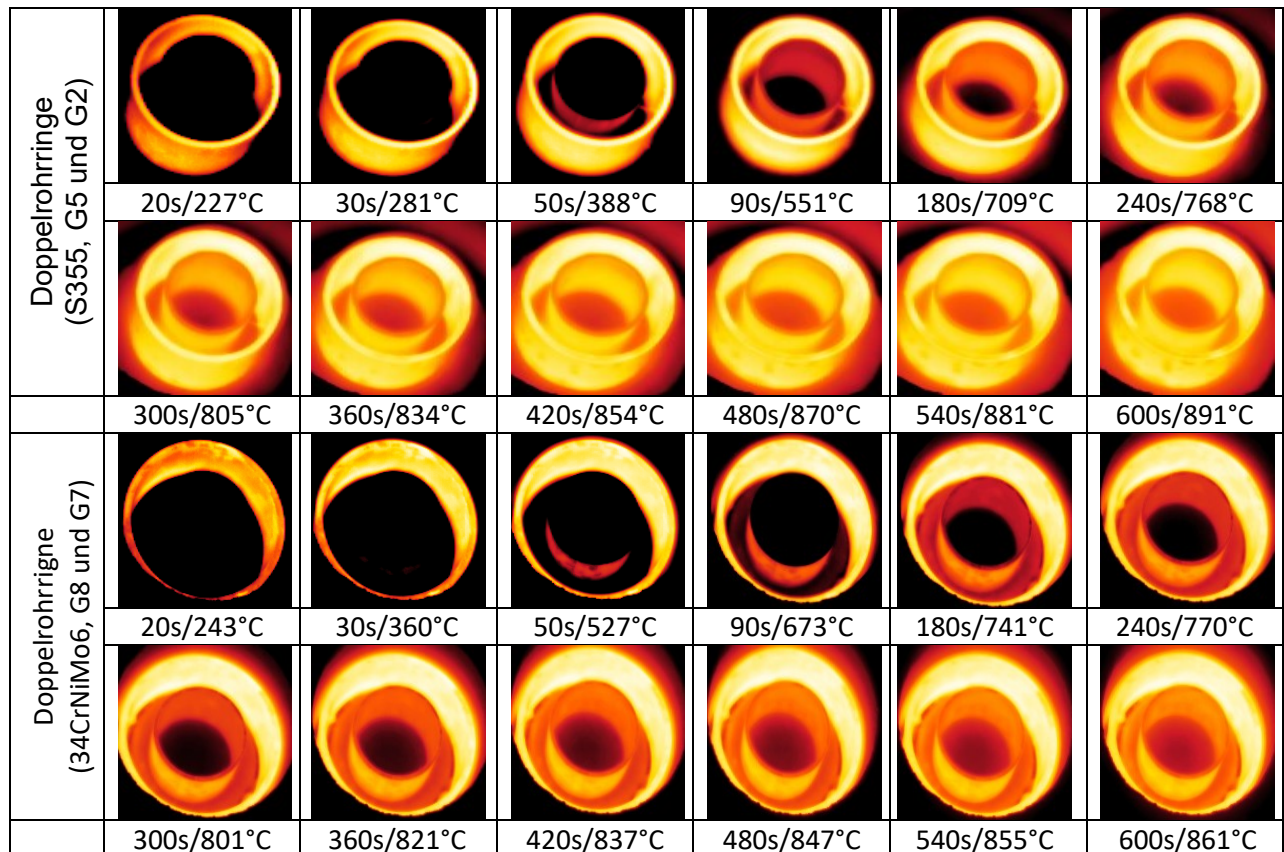


Abbildung 2-9: Erwärmungsbilder von Doppelringe, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Hierbei ist in **Abbildung 2-8** eindeutig ersichtlich, dass der äußere Ring viel schneller erwärmt wird. Der Innenring wird hauptsächlich über Wärmestrahlung, welche laut dem Stefan-Boltzmann Gesetz bei höherer Temperatur dominant wird, erwärmt. Die induktive Erwärmung erfolgt hauptsächlich im Außenring. Die unterschiedlichen Eisenwerkstoffe zeigen ein identes Verhalten. Eine gleichmäßigere Erwärmung der Ringe könnte erreicht werden, falls im Außenring absichtlich ein deutlich schlechteres Material zur induktiven Einkopplung gewählt würde, wobei die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung bei Guttransport im Ringspalt nicht mehr aktiv sein wird.

g) Graphitschüttung

Die vorherig ausgeführten Darstellungen sind Extrakte aus den Darstellungen der Wärmebildkamera Optris PI 400 80mK. Am Beispiel der Erwärmung von Grafitkugeln wird eine vollständige Darstellung der Wärmebildkamera gezeigt:

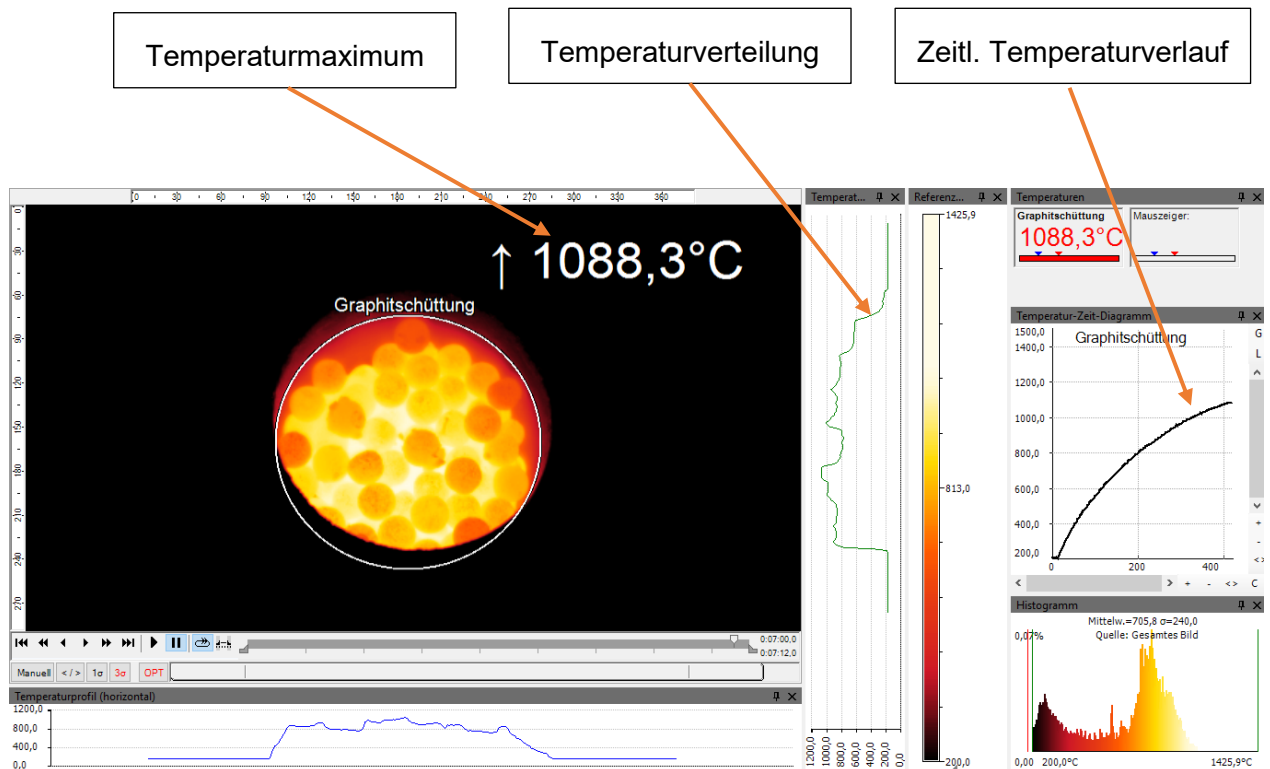


Abbildung 2-10: Wärmebildkameradarstellung einer Graphitschüttung

Die oben dargestellte Wärmebildaufnahme (**Abbildung 2-10**) zeigt, dass die Erwärmung von kleinen Partikelgrößen durchaus im Festbett einer Schüttung homogen über den Schüttungsquerschnitt erfolgt. Hierbei ist das Verhältnis von der Induktorspule zur Partikelgrößen von Bedeutung. Dieses sollte groß sein. Eine genaue Aussage ist abhängig vom Suszeptormaterial. Eine dichte Kugelpackung, bzw. Geometrien mit geringem Lückenvolumen, erhöhen die Effizienz der Sekundär- und Tertiärinduktion der Partikel.

2.1.3.2 Auswertungen der Erwärmungskurven

Die nachfolgenden Erwärmungskurven, erstellt aus den Datensätzen der Wärmebildkamera und ausgewertet mittels dem Programm OriginPro, zeigen zum einen die Effizienz der Erwärmung und zum anderen einen sehr stetigen Verlauf der Erwärmung der Susezptoren durch Induktion. Dieser stetige Verlauf wird später eine energetische Betrachtung des instationären Bereichs der Erwärmung ermöglichen. Die Kurven starten bei 125 °C, da der Messbereich der Wärmebildkamera für höhere Temperaturen bei 125 °C beginnt.

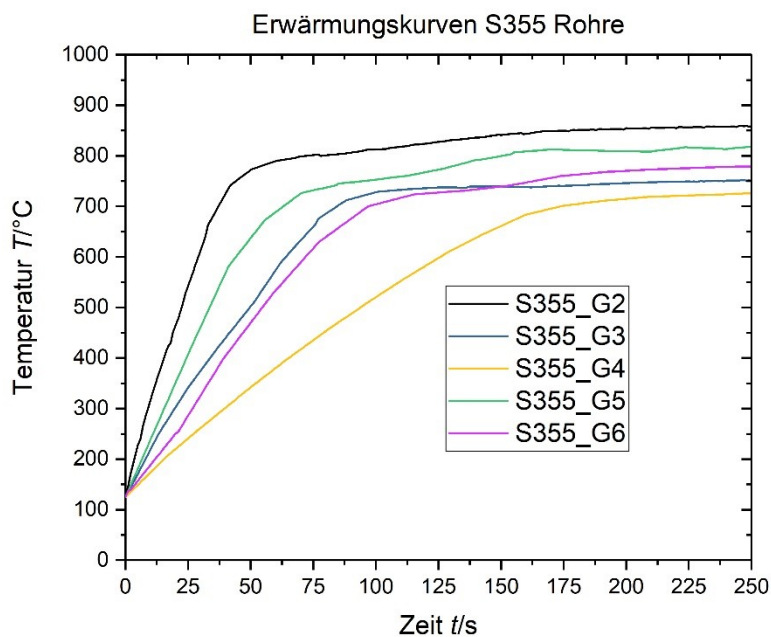


Abbildung 2-11: Erwärmungskurven G2 bis G6, $f = 11,8 \text{ kHz}$, $P = 4,5 \text{ kW}$

Aus **Abbildung 2-11** und der Korrelation mit der dazu passenden Geometrie können bei in den Versuchen konstant gehaltenen Bedingungen folgende Aussagen getroffen werden.

a) Aufgenommene Wärmeenergie

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1-42)$$

Da die spezifische Wärmekapazität für die Proben bei jeweils gleichen Materialien der Hohlzylinder gleich groß ist, kann die relative Wärmeenergie q eingeführt werden.

$$q = \frac{Q}{c_p} = m \cdot \Delta T \quad (1-43)$$

Zur Beurteilung des instationären Bereiches werden die ersten 50 Sekunden (linearer Bereich der Erwärmung) zur Temperaturdifferenzbildung verwendet.

Tabelle 2-2: Gegenüberstellung instationärer Bereich G2 bis G6

$\Delta t = 50 \text{ s}$	m	ΔT	q	P
Geometrie	[kg]	[K]	[kg.K]	[%]
G2	0,149	643,2	95,8	38,8
G3	0,317	371,1	117,6	47,6
G4	0,794	212,2	168,5	68,2
G5	0,488	505,9	246,9	100,0
G6	0,314	338,2	106,2	43,0

Die Geometrie G5 hat die größte Aufnahme von Wärmeenergie und wird zum prozentuellen Vergleich als Basis verwendet. Hierbei wird klar ersichtlich, dass der Abstand zur Induktorspule und die Wandstärke des Hohlzylinders gering sein sollten. Dieses Ergebnis bestätigt die Definition des thermischen Wirkungsgrades nach Kretzmann für die induktive Erwärmung und die Optimierungsmöglichkeiten nach Benkowski (siehe Seite 12).

Die **Abbildung 2-11** (Erwärmungskurven G2 bis G6) zeigt, dass der unlegierte Stahl S355 im Bereich der Curie-Temperatur (Fe: 768 °C) einen ausgeprägten Knick im Temperaturverlauf aufweist. Der Werkstoff verhält sich ab diesem Bereich nicht mehr magnetisch und die Ummagnetisierungsverluste tragen nicht mehr zur induktiven Erwärmung bei. Ab der Curie-Temperatur sind die Wirbelstromverluste durch den steigenden, spezifischen ohmschen Widerstand für die weitere Erwärmung verantwortlich. Um den Einfluss der Phasenänderung sichtbar zu machen, wurde die Leistung der induktiven Erwärmung auf 30 % reduziert. Bei höheren Leistungen erreicht die induktive Erwärmung einen weiteren Temperaturanstieg. Der Einfluss der Curie-Temperatur wird in den folgenden Betrachtungen durch die Abweichung der e-Funktion von der Erwärmungskurve 4 statistisch dargestellt.

Wie in **Gleichung 1-23** dargestellt, verlaufen Erwärmungsvorgänge nach einer e-Funktion. Abweichungen von dieser Funktion lassen auf Störfunktionen schließen. In diesem Anwendungsfall ist diese Störfunktion der reversible Phasenübergang oberhalb der Curie-Temperatur.

Da die Wärmebildkamera die Messdatenaufzeichnung der Temperatur bei 125 °C startet, wurde die Gleichung (1-23) zur Erwärmungskurve 4 abgeändert.

Erwärmungskurve 4:
$$\delta(t) = A \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + 125 \quad (1-44)$$

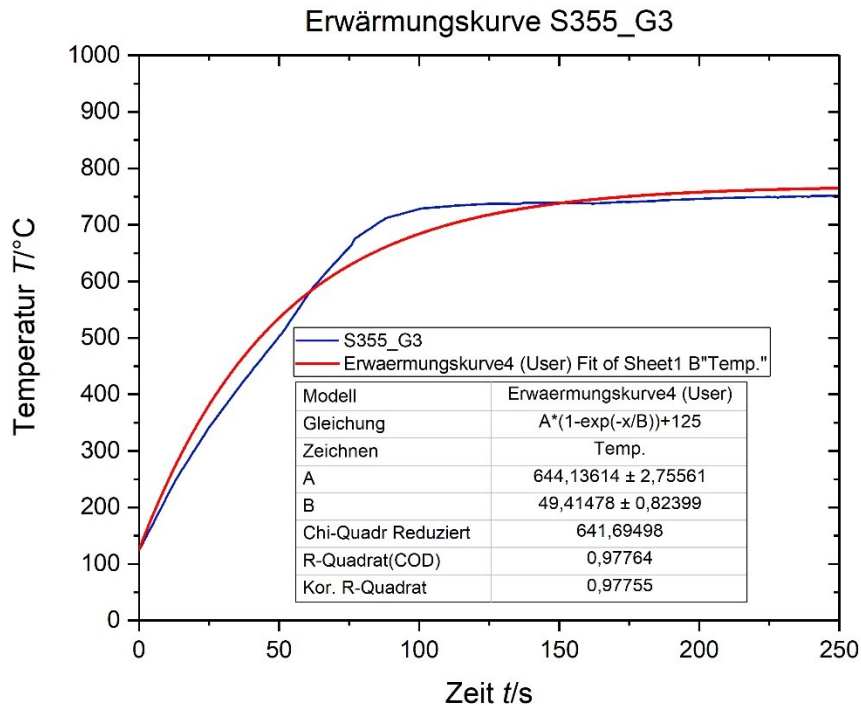


Abbildung 2-12: Erwärmungskurve Geometrie G3, f=11,8 kHz, P=4,5 kW

Tabelle 2-3: Mathem. Auswertung Erwärmungskurven G1 bis G6

S355 G1		S355 G2		S355 G3	
Modell	Erwärmungskurve 4	Modell	Erwärmungskurve 4	Modell	Erwärmungskurve 4
Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 125$	Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 125$	Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 125$
Zeichnen	Temperatur	Zeichnen	Temperatur	Zeichnen	Temperatur
A	$630,9840 \pm 5,7163$	A	$724,2269 \pm 1,3942$	A	$644,1361 \pm 2,7556$
B	$87,05415 \pm 2,06409$	B	$26,96866 \pm 0,29698$	B	$49,4148 \pm 0,8240$
Chi-Quadrat	806,03760	Chi-Quadrat	309,5248	Chi-Quadrat	641,6950
R-Quadrat	0,9687	R-Quadrat	0,9872	R-Quadrat	0,9776
Kor. R-Quadrat	0,9687	Kor. R-Quadrat	0,9872	Kor. R-Quadrat	0,9776
S355 G4		S355 G5		S355 G6	
Modell	Erwärmungskurve 4	Modell	Erwärmungskurve 4	Modell	Erwärmungskurve 4
Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 125$	Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 125$	Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 125$
Zeichnen	Temperatur	Zeichnen	Temperatur	Zeichnen	Temperatur
A	$732,9984 \pm 6,8969$	A	$693,4409 \pm 1,5885$	A	$682,4969 \pm 3,4650$
B	$126,6967 \pm 2,4289$	B	$40,7534 \pm 0,4137$	B	$64,6003 \pm 1,0624$
Chi-Quadrat	368,9164	Chi-Quadrat	278,7107	Chi-Quadrat	620,2798
R-Quadrat	0,9894	R-Quadrat	0,9905	R-Quadrat	0,9824
Kor. R-Quadrat	0,9894	Kor. R-Quadrat	0,9904	Kor. R-Quadrat	0,9835

Bei der Gegenüberstellung des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus **Tabelle 2-3** kann bewiesen werden, dass alle Geometrien den Einfluss der Curie-Temperatur besitzen. Jedoch besitzt die Geometrie G5 hier wiederum den geringsten Einfluss der Curie-Temperatur.

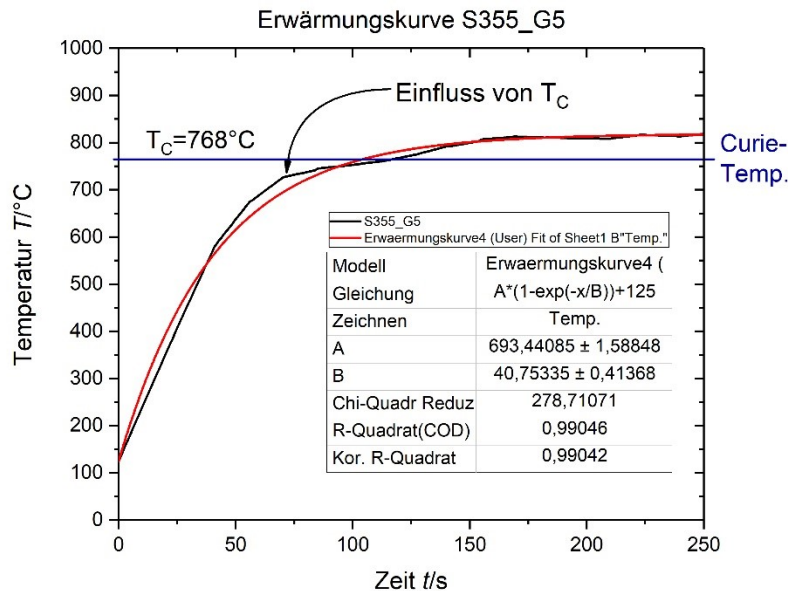


Abbildung 2-13: Erwärmungskurve Geometrie G5, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Im folgenden Diagramm wird auf den Einfluss bei legiertem Stahl eingegangen:

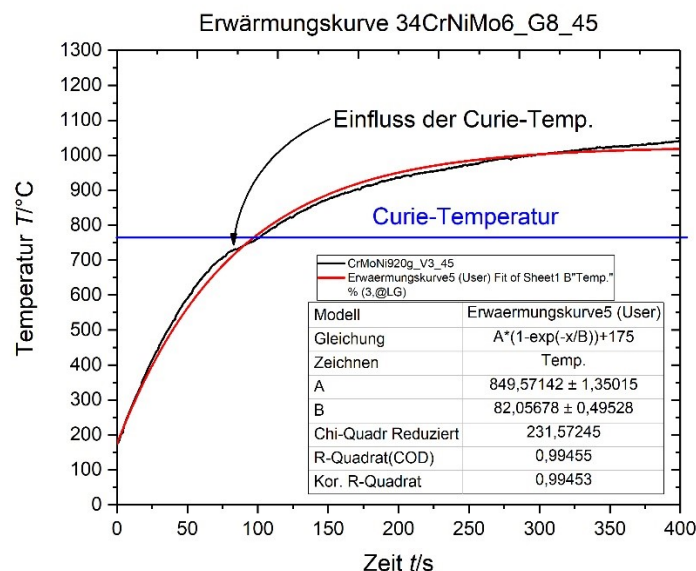
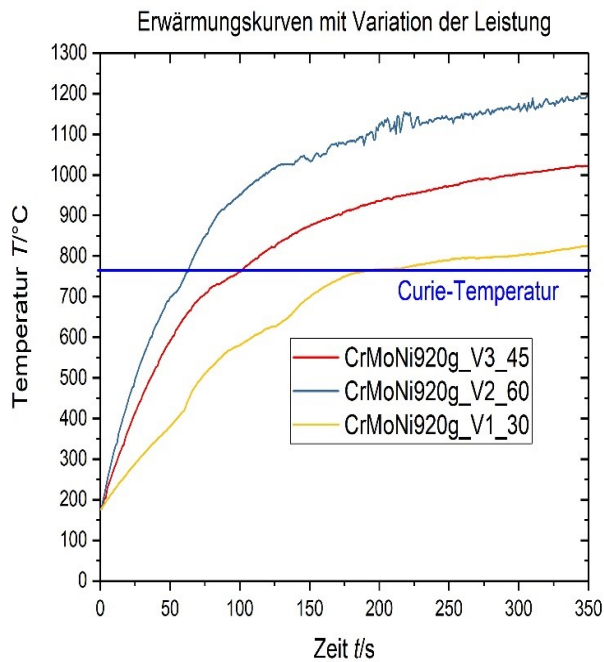


Abbildung 2-14: Erwärmungskurve Geometrie G8, $f=11,8$ kHz, $P=6,8$ kW

Hierbei wird ersichtlich, dass der Effekt durch die Phasenänderung bei legiertem Stahl nur noch marginal ist. Die folgenden Versuchen zeigen die Auswirkungen der Curie-Temperatur bei unterschiedlichen Leistungen.



Die **Abbildung 2-15** zeigt die Abhängigkeit des Erwärmungsverlaufs mit der Eingangsleistung der induktiven Erwärmung – bei 60% Eingangsleistung, sprich 9 von 15 kW, werden 1.200 °C innerhalb von 350 s erreicht. Es lässt sich schön erkennen, dass mit induktiver Erwärmung eine optimale Regulierbarkeit der Erwärmung möglich ist und bei Erhöhung der Leistung der Temperaturgradient entsprechend steigt. Mit zunehmender Leistung verringert sich der Einfluss der Curie-Temperatur.

Abbildung 2-15: Erwärmungskurven Geometrie G8, f=11,8 kHz, P=4,5 kW / 6,8 kW / 9,0 kW

Aus den in den dargestellten Kurvenverläufen werden mittels Kurveninterpolation über die Erwärmungskurve 5 die Werte für die maximal erreichbare Temperatur ($T_{max} = A+175K$) im Beharrungszustand und die Zeitkonstante (B) ermittelt. Das Verhältnis von maximal erreichbarer Temperatur T_{max} und der Zeitkonstanten B ergibt die Erwärmungsgeschwindigkeit EWG.

Erwärmungskurve 5:
$$\delta(t) = A \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{B}}\right) + 175 \tag{1-45}$$

Tabelle 2-4: Mathem. Auswertung Erwärmungskurven G8 bei unterschiedlichen Leistungen

34CrNiMo6_G8_30%		34CrNiMo6_G8_45%		34CrNiMo6_G8_60%	
Modell	Erwärmungskurve 5	Modell	Erwärmungskurve 5	Modell	Erwärmungskurve 5
Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 175$	Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 175$	Gleichung	$A \cdot (1 - \exp(-x/B)) + 175$
Zeichnen	Temperatur	Zeichnen	Temperatur	Zeichnen	Temperatur
A	689,3652 ± 2,9010	A	849,5714 ± 1,3501	A	1007,109 ± 1,1943
B	113,9056 ± 1,2837	B	82,0568 ± 0,4928	B	69,8419 ± 0,3507
Chi-Quadrat	316,0535	Chi-Quadrat	231,5725	Chi-Quadrat	230,6758
R-Quadrat	0,9909	R-Quadrat	0,9946	R-Quadrat	0,9959
Kor. R-Quadrat	0,9908	Kor. R-Quadrat	0,9945	Kor. R-Quadrat	0,9959
EWG (30%)		EWG (45%)		EWG (60%)	
7,65 [K/s]		12,49 [K/s]		16,94 [K/s]	

In der folgenden Darstellung wird auf die Effizienz der induktiven Erwärmung von Doppelrohren eingegangen.

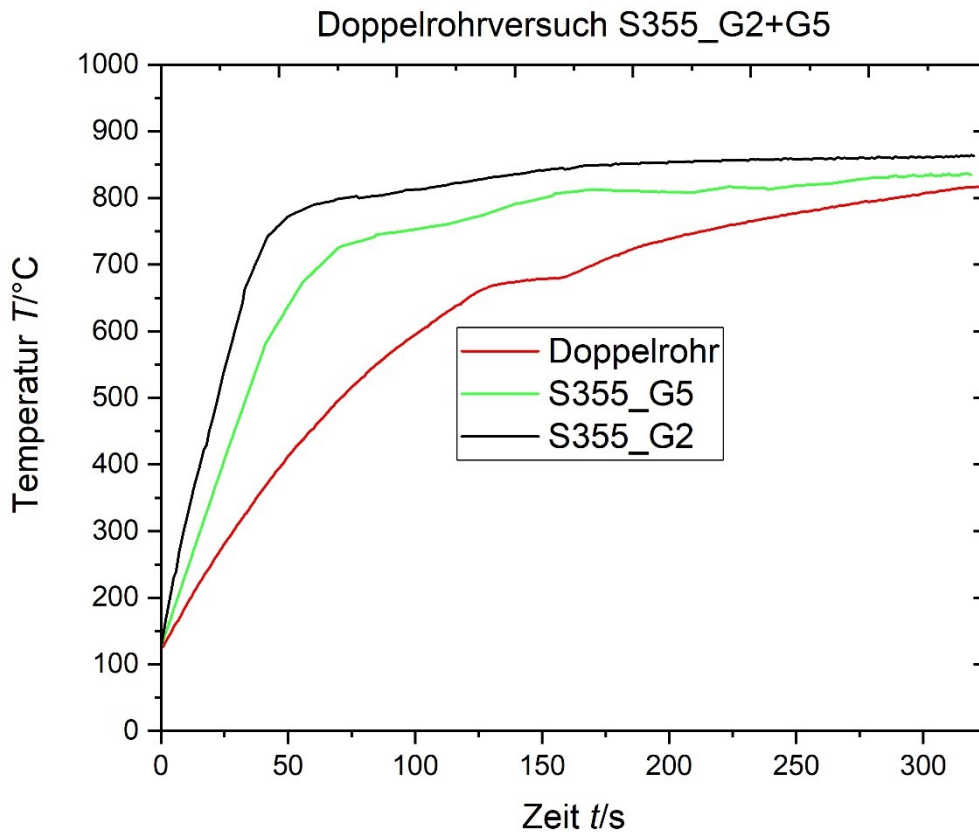


Abbildung 2-16 Erwärmungskurven Doppelrohr / 11,8 kHz / 4,5 kW

Der Erwärmungsverlauf eines Ringspaltreaktors zeigt eindeutig, dass die Effizienz des Doppelrohrreaktors deutlich schlechter ist, als die Erwärmung der Einzelhohlzylinder.

Bei konzentrischen Eisenringen verteilt sich der induzierte magnetische Fluss hauptsächlich auf den äußeren Ring, welcher sich schneller erwärmt. Da die zur Verfügung stehenden magnetischen Feldlinien begrenzt sind und die Mehrheit dieser Feldlinien von dem besser positionierten Hohlzylinder absorbiert werden, erhält der innere Hohlzylinder eine viel geringere magnetische Induktion. Dies führt zur geringeren, induktiven Erwärmung des inneren Hohlzylinders und daher sind die Einzelhohlzylindererwärmungen effizienter.

2.1.3.3 Wirkungsgradbetrachtungen der induktiven Erwärmung

Die bisherigen Auswertungen haben sich auf die optische Methode mittels Wärmebildkamera bezogen. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Auswertung der Leistungsdaten aus der InduCARB (Leistungsaufnahmen, Stromstärke, Frequenz). Für die Rechengröße R' (siehe **Gleichung: 1-2**) und für den Gesamtwirkungsgrad werden die Messdaten aus der Wärmebildkamera in die Auswertung integriert. (siehe **Gleichung: 1-35**)

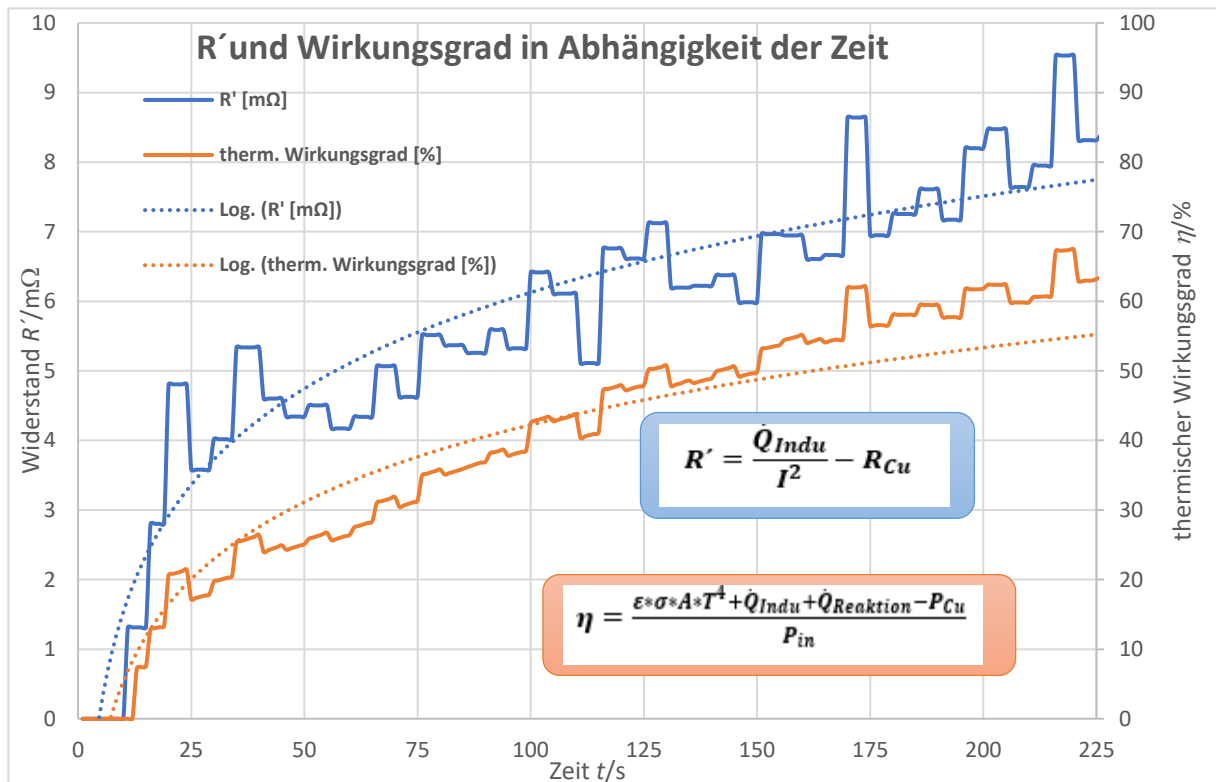


Abbildung 2-17: Verlauf von R' und dem therm. Wirkungsgrad, $f=11,4$ kHz, $P=4,5$ kW

Aus der oben angeführten **Abbildung 2-17** ist eindeutig erkennbar, dass eine Kausalität zwischen der Rechengröße R' und der Messgröße η besteht.

Somit können zwei Aussagen getätigt werden:

1. Die viel einfacher zu bestimmende Größe R' ermöglicht eine Aussage über den thermischen Wirkungsgradverlauf.
2. Falls die Kurven voneinander abweichen, liegt eine Störung in der Messung oder in der Anlagentechnik vor – dies könnte zur Anlagenüberwachung eingesetzt werden.

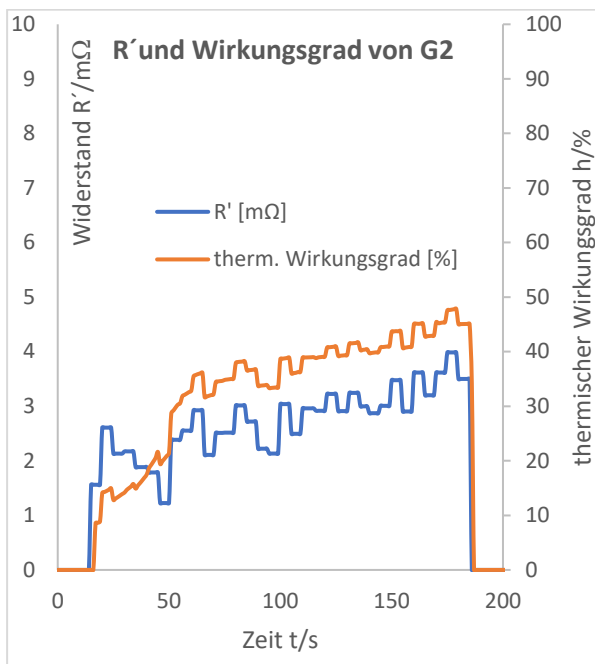


Abbildung 2-18: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G2, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

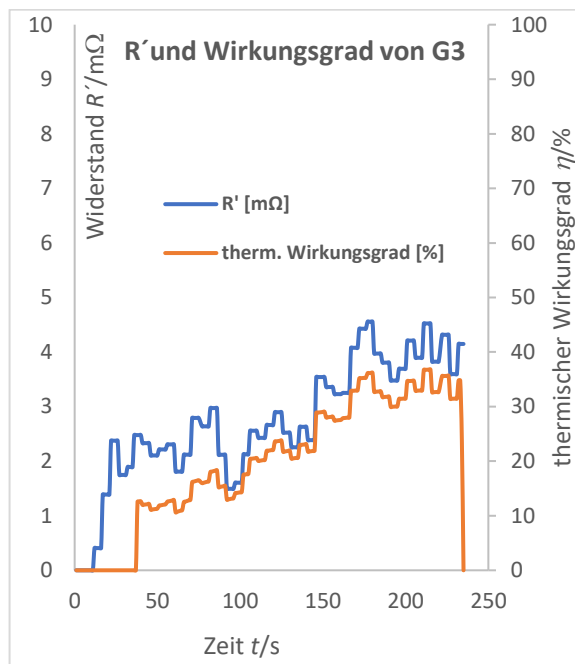


Abbildung 2-19: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G3, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Die **Abbildungen 2-18 und 2-19** zeigen wiederum die Kausalität zwischen R' und η und beweisen, dass diese Kausalität von der Geometrie unabhängig ist.

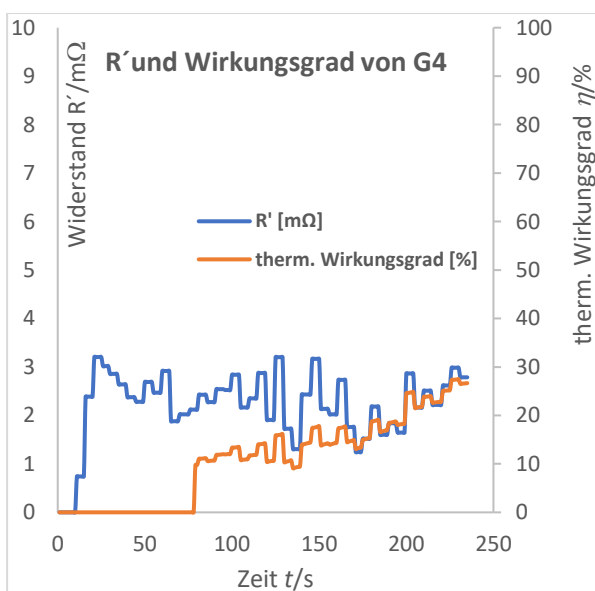


Abbildung 2-20: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G4, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

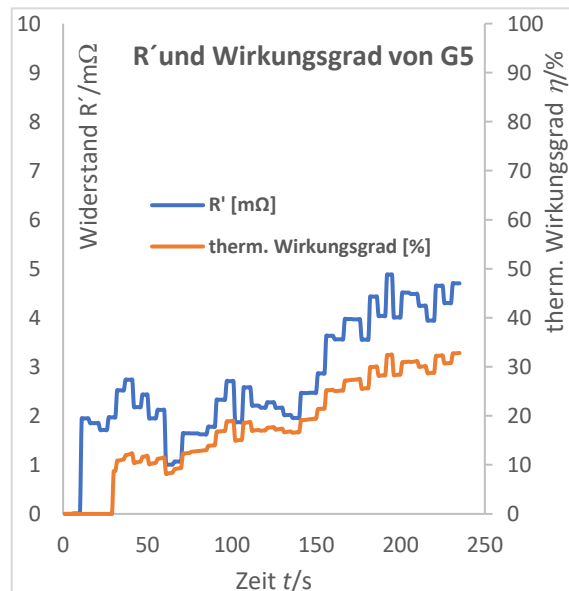


Abbildung 2-21: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G5, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Die **Abbildungen 2-20 und 2-21** zeigen ein verspätetes Ansteigen des thermischen Wirkungsgrades, welches sich auf den beginnenden Messtemperaturbereich der Wärmebildkamera bei 125°C bezieht.

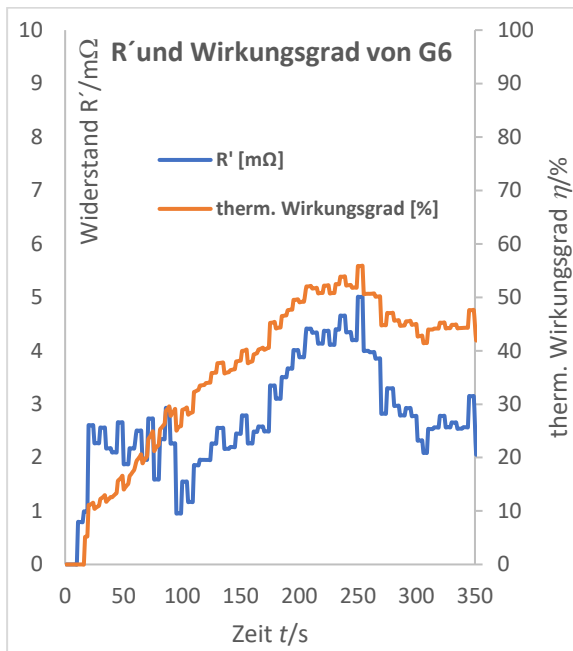


Abbildung 2-22: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G6, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

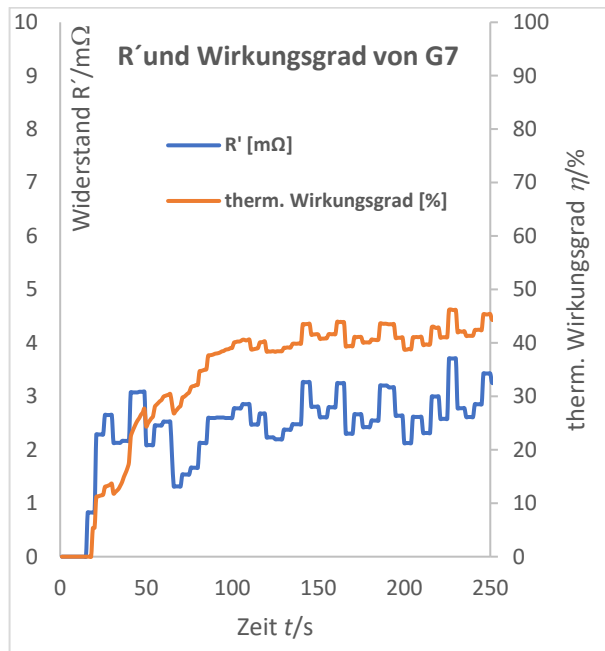


Abbildung 2-23: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G7, $f=11,8$ kHz, $P=4,5$ kW

Die obigen **Abbildungen 2-22 und 2-23** zeigen eine gute Synchronität der dargestellten Größen von R' und dem thermischen Wirkungsgrad.

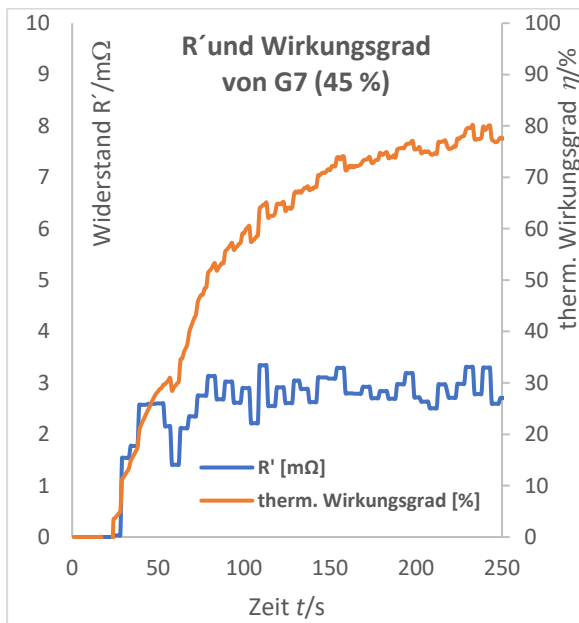


Abbildung 2-24: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G7 / 11,8 kHz / 6,8 kW

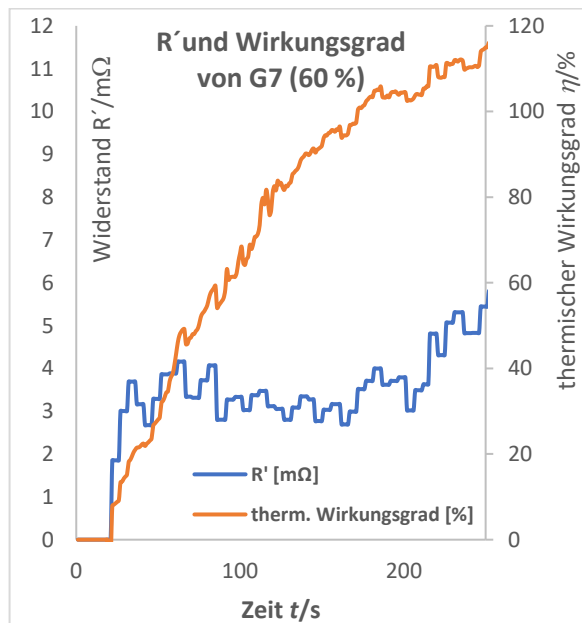


Abbildung 2-25: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G7 / 11,8 kHz / 9,0 kW

Die **Abbildungen 2-24 und 2-25** zeigen einen viel stärkeren Anstieg des therm. Wirkungsgrades, dies lässt sich auf den Strahlungsterm (Boltzmann) in der **Gleichung 1-35** zurückführen. Dieser Strahlungsterm hat bei geschlossenen Reaktoren keine Bedeutung.

2.1.3.4 Fehlerbetrachtungen bei der Gegenüberstellung der Wirkungsgradbewertung

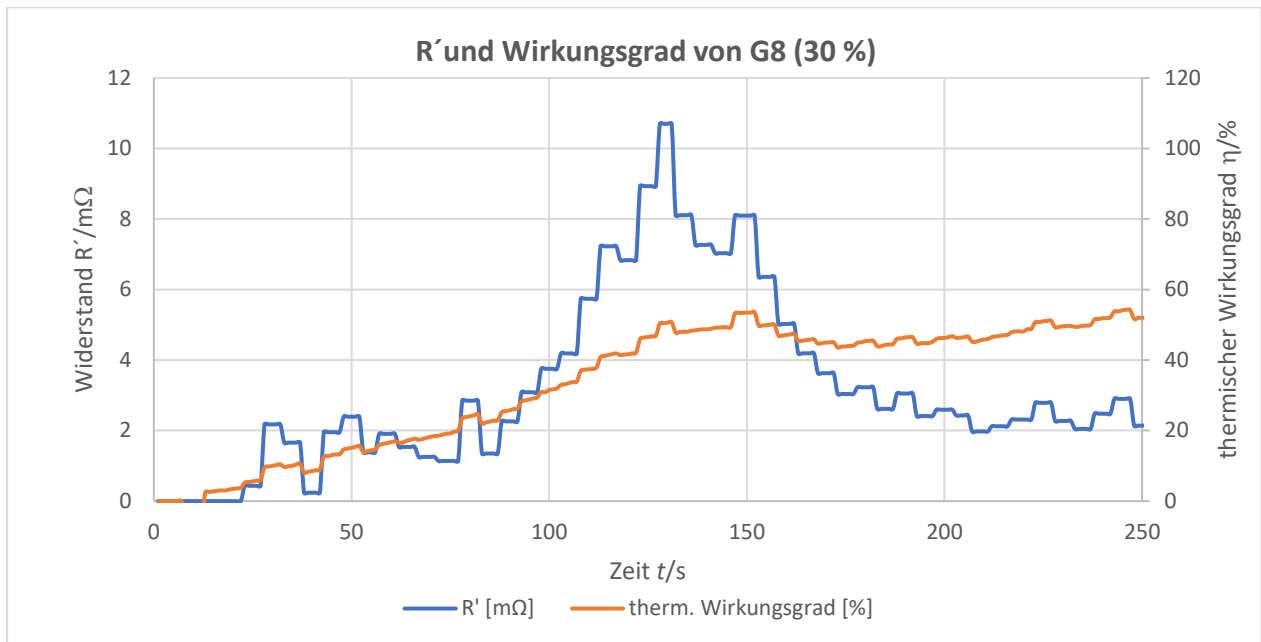


Abbildung 2-26: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G8 / 11,8 kHz / 4,5 kW

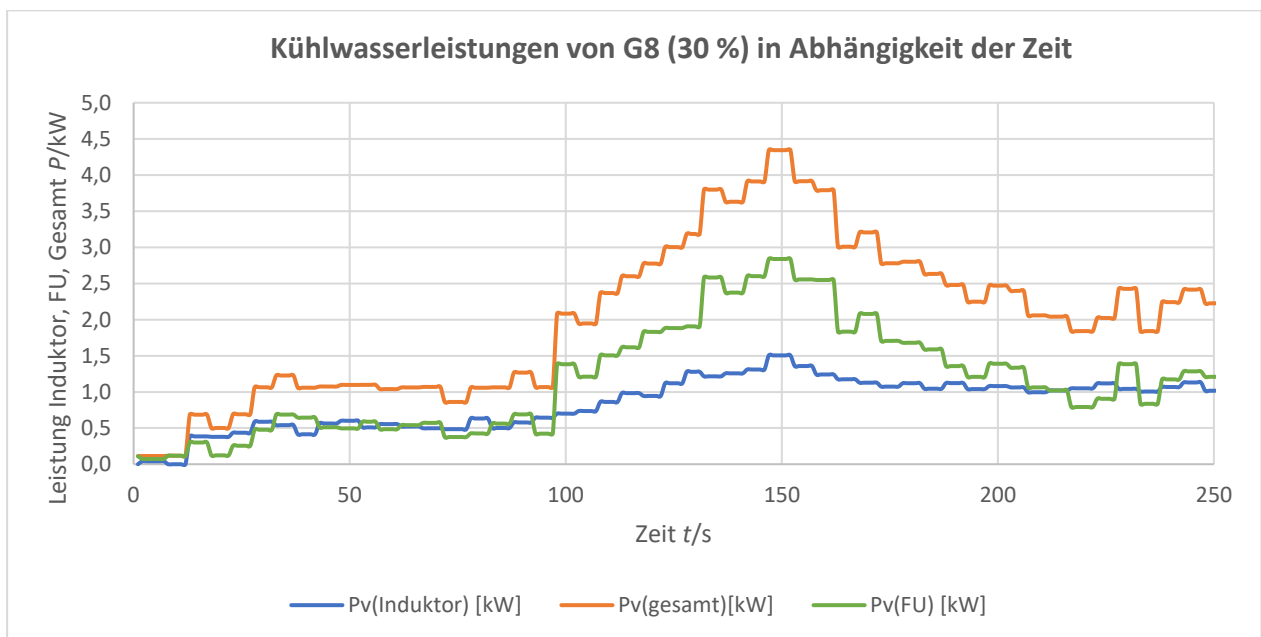


Abbildung 2-27: Kühlwasserleistungen von G8 / 11,8 kHz / 4,5 kW

Der Vergleich der beiden oben angeführten **Abbildungen 2-27 und 2-28** erklärt die spontane Abweichung von R' nach ca. 100 Sekunden, weil der Frequenzumformer (grüne Linie) einen erhöhten Kühlungsbedarf benötigt. Diese Veränderung hat mit dem Reaktor (Bilanzrahmen 1) keinen Zusammenhang und kann mit der Kühlung der externen Elektronik begründet werden.

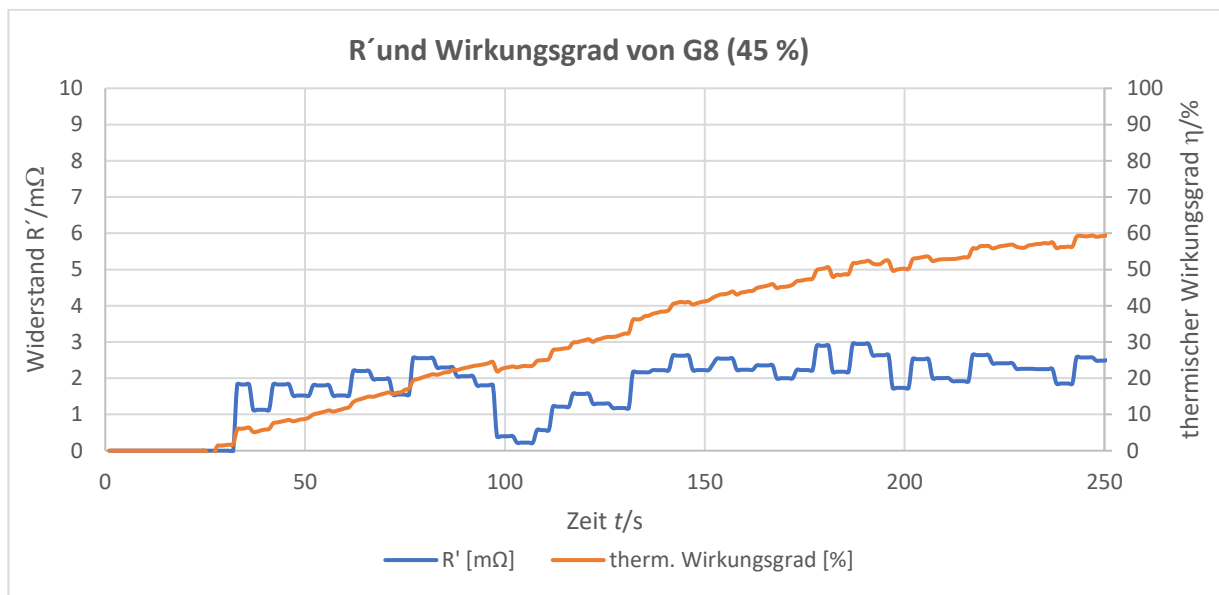


Abbildung 2-28: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G8, $f=11,8$ kHz, $P=6,8$ kW

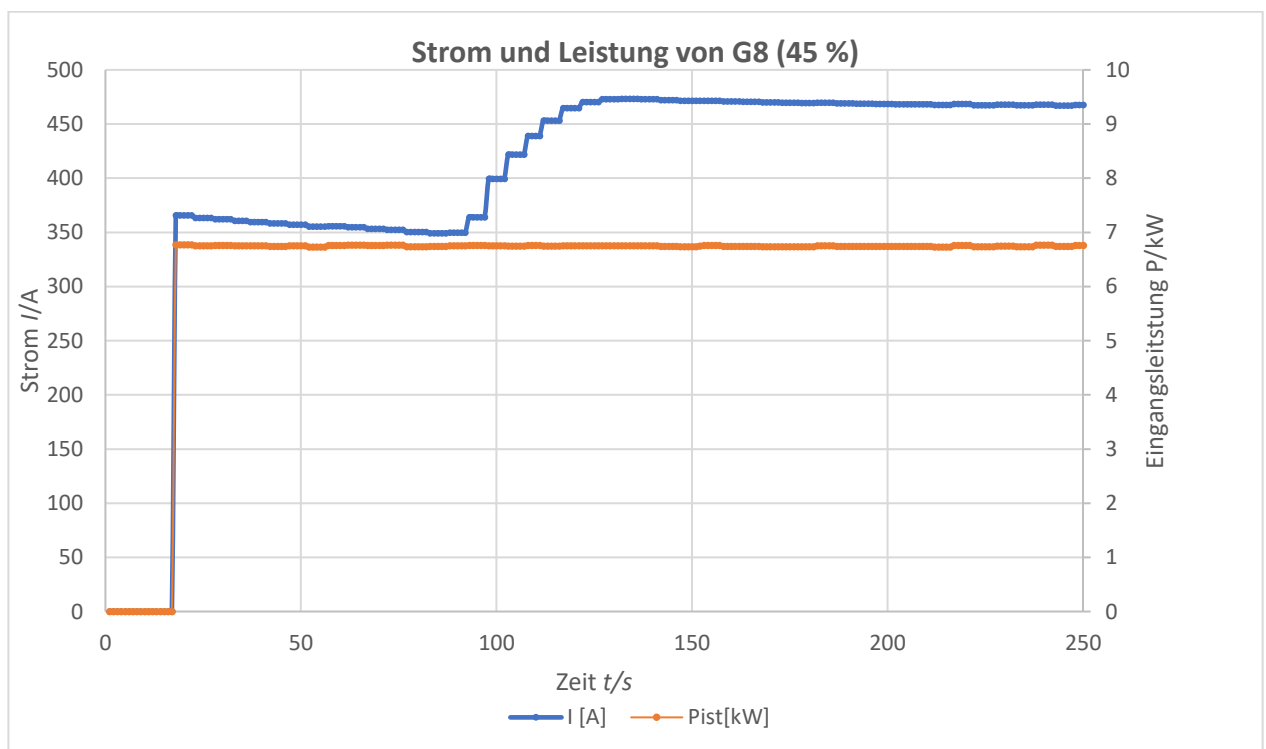


Abbildung 2-29: Stromstärke- und Leistungsverlauf von G8, $f=11,8$ kHz, $P=6,8$ kW

Diese Darstellungen (**Abbildungen 2-28 und 2-29**) zeigen den Einfluss, falls die Regelung des Frequenzumformers die Stromstärke variiert – es kommt zu einer Abweichung der beiden dargestellten Größen ohne Zeitdifferenz. Die stetige Zunahme des Wirkungsgrades ist wiederum auf die Temperaturerhöhung rückzuführen.

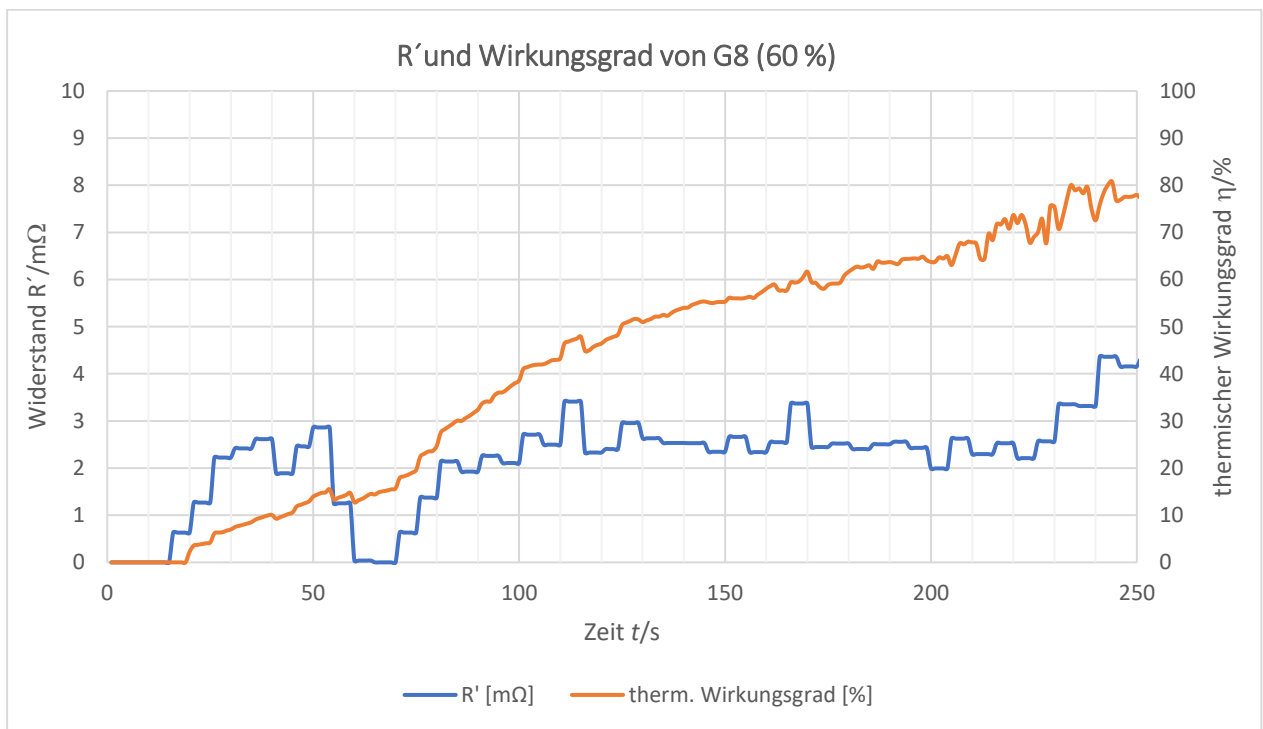


Abbildung 2-30: Kausalität R' und Wirkungsgrad von G8, f=11,8 kHz, P=9,0 kW

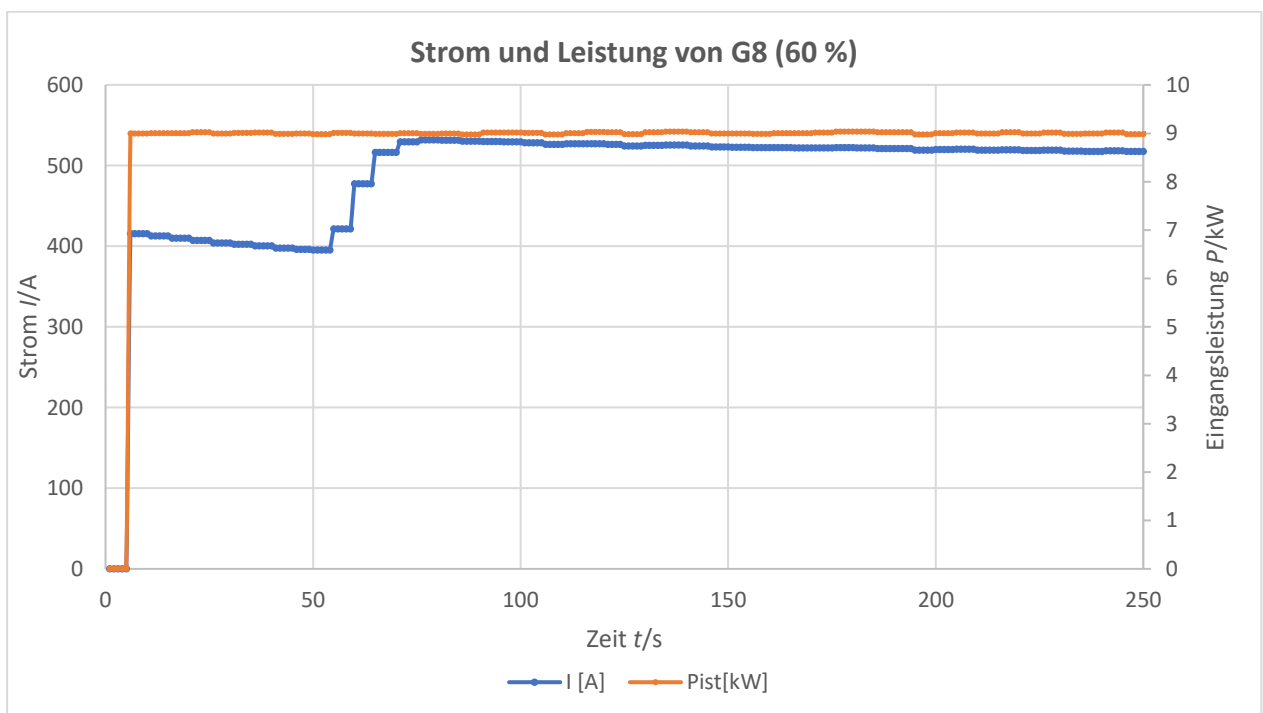


Abbildung 2-31: Stromstärke- und Leistungsverlauf von G8, f=11,8 kHz, P=9,0 kW

Ebenso bei einer höheren Anlagenleistung (60 %) kann, wie die oben dargestellten **Abbildungen 2-30 und 2-31** zeigen, dieses Verhalten beobachtet werden.

2.1.3.5 Betrachtung des instationären Bereiches der induktiven Erwärmung

Die indirekte induktive Erwärmung erreicht sehr hohe Erwärmungsgeschwindigkeiten. Wie **Tabelle 2-4** zeigt, können bei 60 % elektrischer Eingangsleistung bereits 16,9 K/s Erwärmungsgeschwindigkeit erreicht werden. Bei 30 % Eingangsleistung reduziert sich die Erwärmungsgeschwindigkeit auf 7,7 K/s. Somit ergibt eine Verdoppelung der Eingangsleistung eine Steigerung der Erwärmungsgeschwindigkeit über 100 %. Da die Erwärmungsgeschwindigkeit bei thermodynamischen Prozessen einen ausschlaggebenden Einfluss auf den Wirkungsgrad im instationären Bereich besitzt, ist dies ein großer Vorteil für die induktive Erwärmung. Ein weiterer Vorteil der raschen Erwärmung besteht für kontinuierliche Prozesse, da die Erwärmungstrecke hierdurch reduziert wird.

Für die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Geometrien werden die Versuche mit gleicher Frequenz (11,8 kHz) und konstanter Eingangsleistung (4,5 kW) betrieben.

Es sind drei unterschiedliche Betrachtungen des Wirkungsgrades für die folgenden Aussagen zielführend:

- a) Instationärer Bereich über die Erwärmungskurven:

Der thermische Wirkungsgrad im instationären Bereich wird in **Gleichung 1-29** beschrieben.

- b) Instationärer Bereich über die energetische Auswertung der Messdaten:

Der therm. Wirkungsgrad wird als Mittelwert über den in **Abbildung 2-13 bis 2-15** dargestellten Zeitraum ab 500 K bis zum Beharrungszustand für den Erwärmungsvorgang mit der **Gleichung 1-35** berechnet.

- c) Stationärer Bereich über die energetische Auswertung der Messdaten:

Der stationäre Wirkungsgrad wird über die **Gleichung 1-35** im Beharrungszustand ermittelt.

Für die bessere Gegenüberstellung der einzelnen Wirkungsgradberechnungen sind der jeweils größte Wert als 100 % definiert und die anderen hierzu relativ dargestellt.

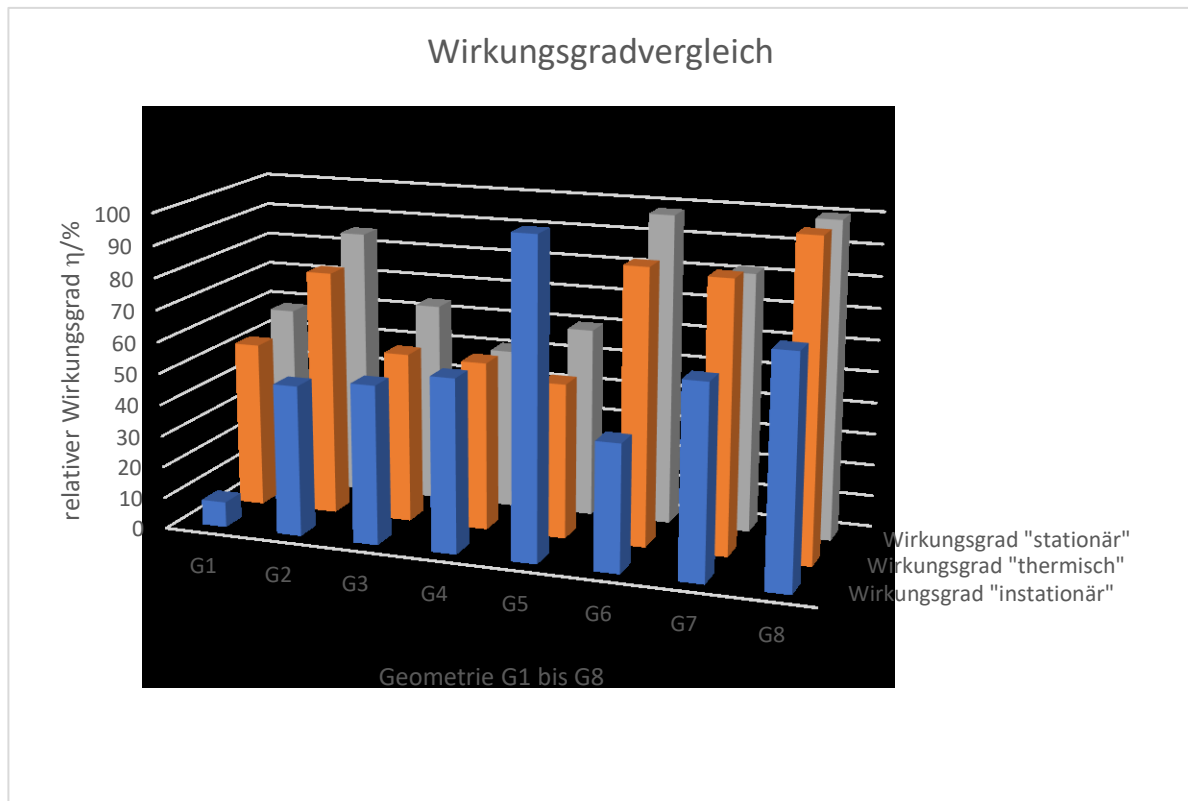


Abbildung 2-32: relativer Wirkungsgrad im instationären und stationären Bereich

Abbildung 2-32 zeigt eindrucksvoll, dass es eindeutig bessere Geometrien gibt, welche einen bessere Effizienz bei der induktiven Erwärmung aufweisen. Die Geometrie G8 erreicht in der stationären sowie thermischen Wirkungsgradbetrachtung die optimalen Ergebnisse, jedoch gibt es auch Besonderheiten, wie die Geometrie G5, welche im instationären Wirkungsgrad den höchsten Wert erreicht. Hierbei ist die geringere Masse von der Geometrie G5 für den instationären Bereich von Vorteil. Die Geometrie G8 besitzt den kleinsten Abstand zur Induktorspule, welches die Absorption der magnetischen Feldlinien erleichtert. Da die Wandstärke der Geometrie G5 sich nur marginal von der Wandstärke von der Geometrie G8 unterscheidet, hat der Effekt der Eindringtiefe δ in Abhängigkeit zur Wandstärke keinen Einfluss auf die Effizienzbetrachtung.

Abbildung 2-16 stellt den eindeutigen Beweis dar, dass bei der induktiven Erwärmung mit einer Reaktorbausweise, welche eine Doppelringkonstruktion beinhaltet, die Erwärmungsgeschwindigkeit deutlich geringer ist, als bei der Einzelringerwärmung.

2.2 Ergebnisse elektromagnetischer Feldmessungen

Die Ergebnisse der folgenden Auswertungen sollen beweisen, dass es möglich ist, mit relativ einfachen Mitteln eine elektromagnetische Feldmessung zu realisieren. Die Magnetfeldmessung wird über eine Luftspule (Mollsonde) und als Vergleich in einer Hallsonde umgesetzt. Die Theorie hinter den Berechnungen sind ab Seite 26 beschrieben.

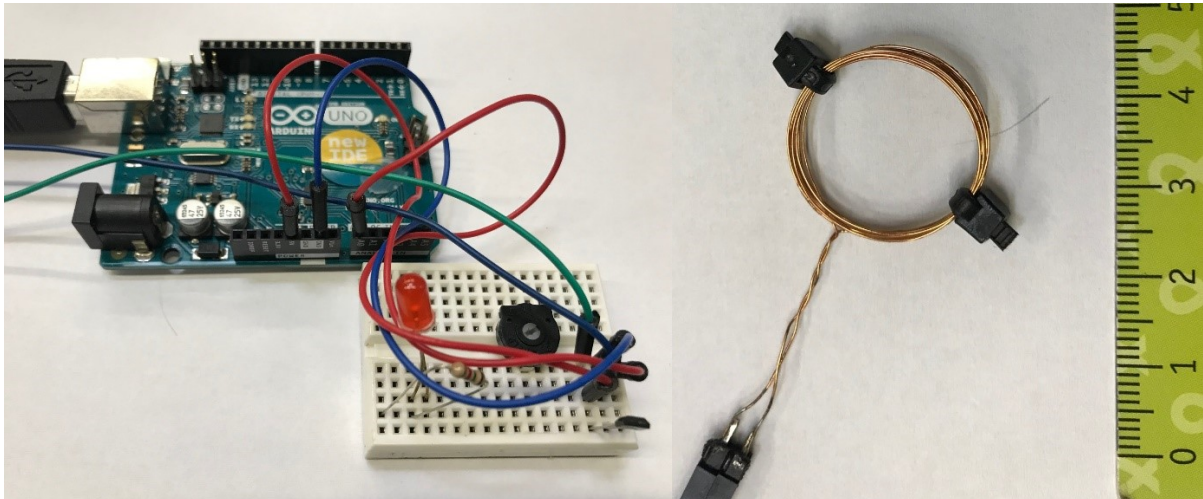


Abbildung 2-33: Hallsonde mit Arduino

Abbildung 2-34: Mollsonde

Diese Sonden dienen als Eingangssignalgeber in das Vierkanal-Speicheroszilloskop RIGOL DS1054. Mittels der getriggerten Oszilloskopauswertung können die Kurvenform und die Anwesenheit von Oberwellen, welche sich auf die Steuerimpulse des Frequenzumformers beziehen lassen, darstellen. Idealerweise sollte die Kurvenform eine Sinusfunktion sein. Die Messungen wurden an der von Elias Vigl entwickelten μ -InduCARB (150 W Anschlussleistung) und der HTL Technikumsanlage (15 kW) durchgeführt. Ziel dieser beiden unterschiedlichen Größenordnungen der induktiven Erwärmung ist es zu demonstrieren, dass diese Messanordnung für unterschiedliche Leistungsbereiche einsetzbar ist.

Der naturwissenschaftliche Hintergrund in diesem Kapitel ist die Untersuchung der Abschwächung der magnetischen Flussdichte als Funktion des Abstandes, da dies eine wichtige sicherheitstechnische Komponente darstellt. Mit der selbstentwickelten Messtechnik wird das Abnahmeverhalten der magnetischen Felddichte untersucht. Da die Abnahme der magnetischen Flussdichte von der technischen Umgebung sowie von der Spulengeometrie beeinflusst wird, ist die mathematische Abnahmefunktion von großem Interesse. [21]

2.2.1 Messdatenauswertung der Feldmessungen an der μ -InduCARB

In der unten dargestellten Abbildung sind die Kurven der Moll- und Hallsonde im Display des Oszilloskops sichtbar. Diese Messdaten werden ebenso digital in einer Textdatei gespeichert und dienen zur nachfolgenden Auswertung.

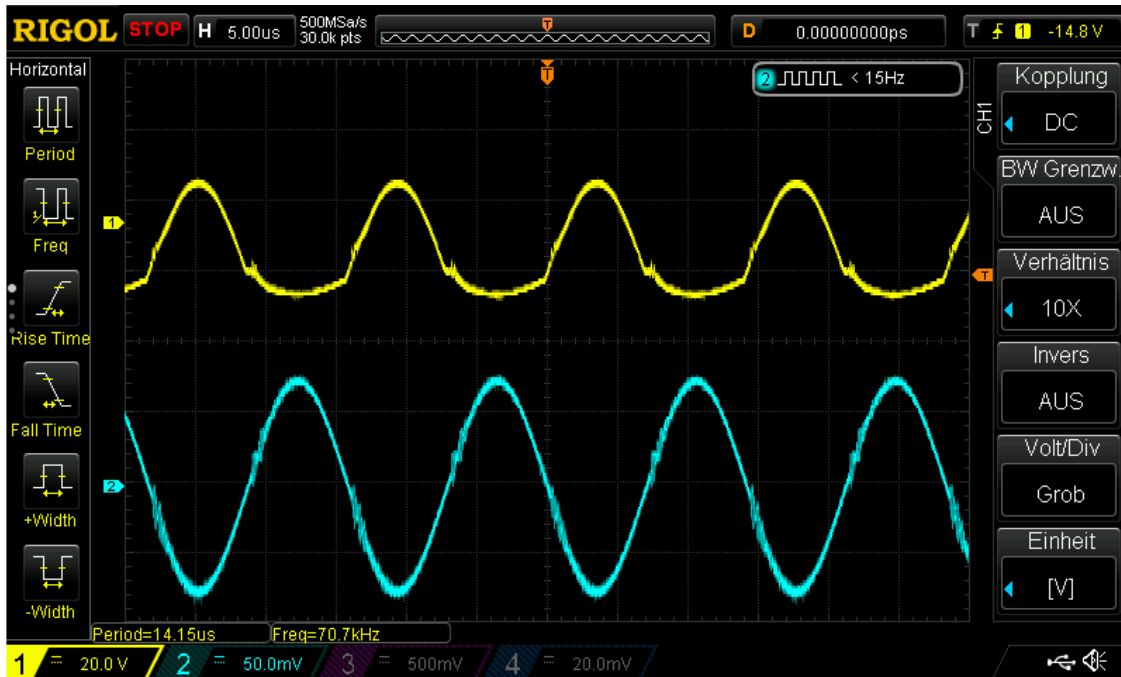


Abbildung 2-35: Versuche mit μ -InduCARB, V7 Abstand 100 mm, Speicheroszilloskopdarstellung

Die beiden Sonden messen einen sehr schönen Sinusverlauf und sind wie die obige **Abbildung 2-35** zeigt, auch für kleine Leistungen geeignet. Je nach Abstand zur Spule ergeben sich Verzerrungen und die Einkopplung von Oberwellen. Die Phasenverschiebung beider Signale beträgt 180° .

Da die Mollsonde größere Signalwerte liefert als die Hallsonde (Honeywell SS495A), wird die Messdatenauswertung mittels Origin-Auswertesoftware mit den Daten der Mollsonde realisiert.

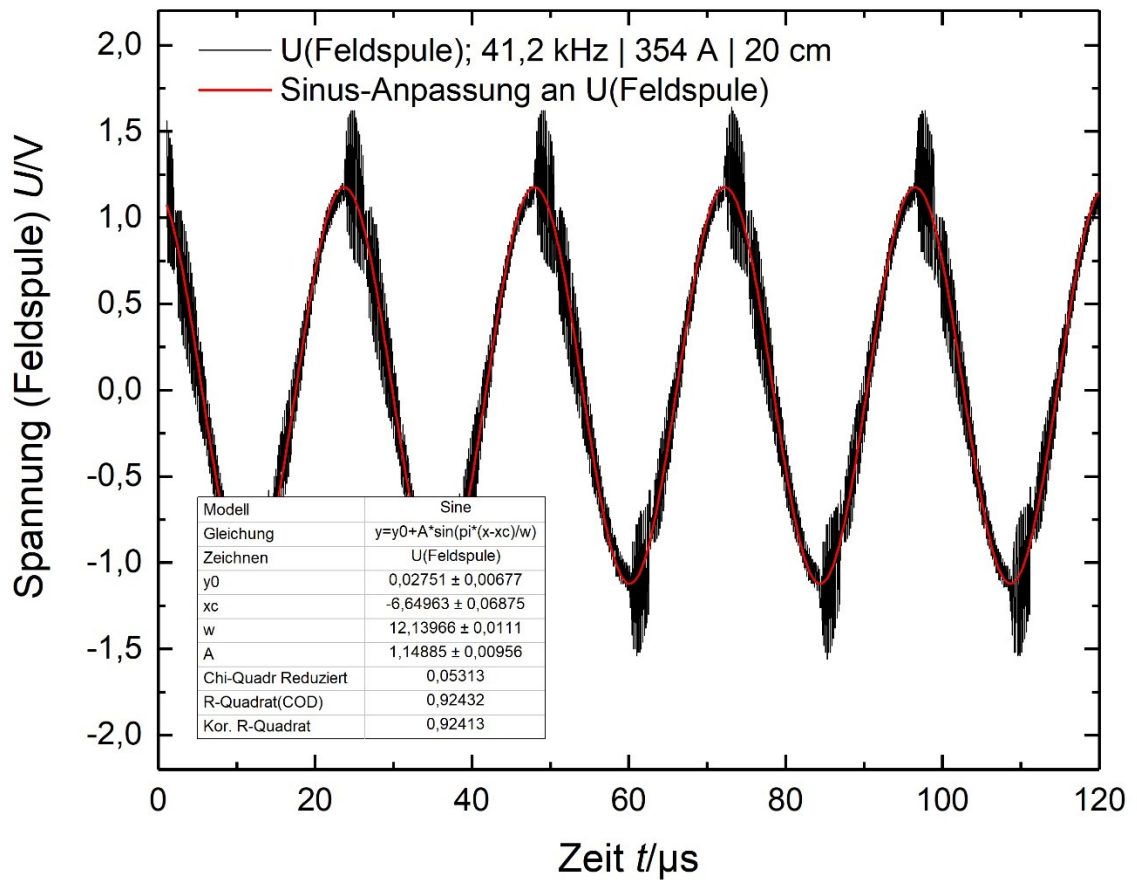


Abbildung 2-36: Versuche mit μ -InduCARB, V7 Abstand 100 mm, OriginPro Auswertung

Mittels Trendlinie kann die Amplitude des Spannungssignals der Sonde ermittelt werden, welches zur Berechnung der magnetischen Flussdichte benötigt wird.

$$B_0 = \frac{U_0}{2*n*(r*\pi)^2*f} \quad (2-1)$$

Somit kann mit der Messung mittels Speicheroszilloskop RIGOL DS1054 der induzierten Spannung in die Mollsonde und der Ermittlung der Frequenz direkt auf die Flussdichte geschlossen werden.

2.2.2 Messdatenauswertung der Feldmessungen an der Technikumsanlage

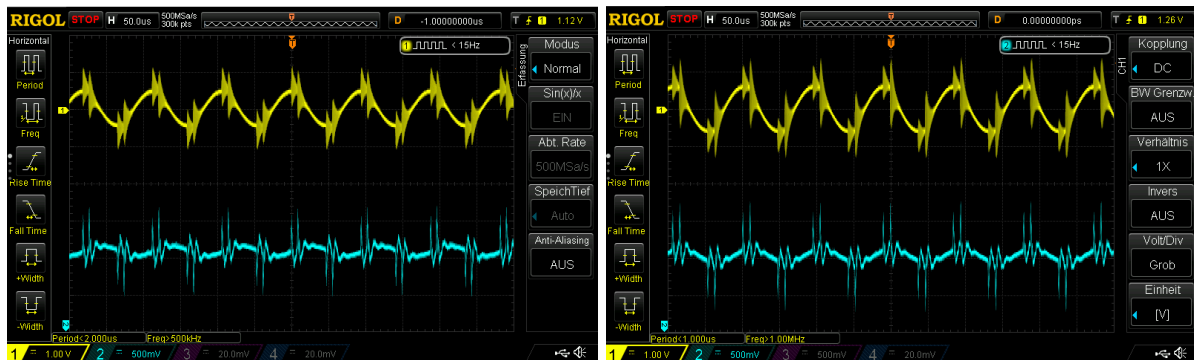


Abbildung 2-37: Feldmessung $f=10,7$ kHz, $I=527$ A, $r=20$ cm und $f=10,6$ kHz, $I=659$ A, $r=20$ cm

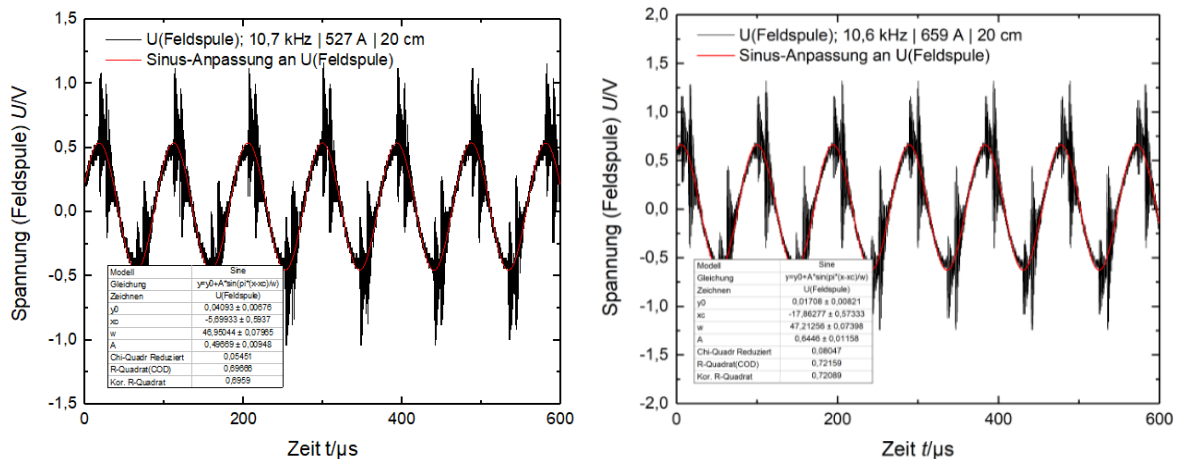


Abbildung 2-38: Auswertung von 10,7 kHz | 527 A | 20 cm und 10,6 kHz | 659 A | 20 cm

Es kann davon ausgegangen werden, dass über die Grundschwingung, welche die Resonanzfrequenz besitzt, hochfrequente Oberwellen sichtbar sind. Die Oberwellen kommen von Mess- und Steuerimpulsen des Frequenzumformers.

Durch Variation den Abstandes der Sonden zur Induktorspule ergeben die Messungen einen Verlauf der Flussdichte in Abhängigkeit der Entfernung.

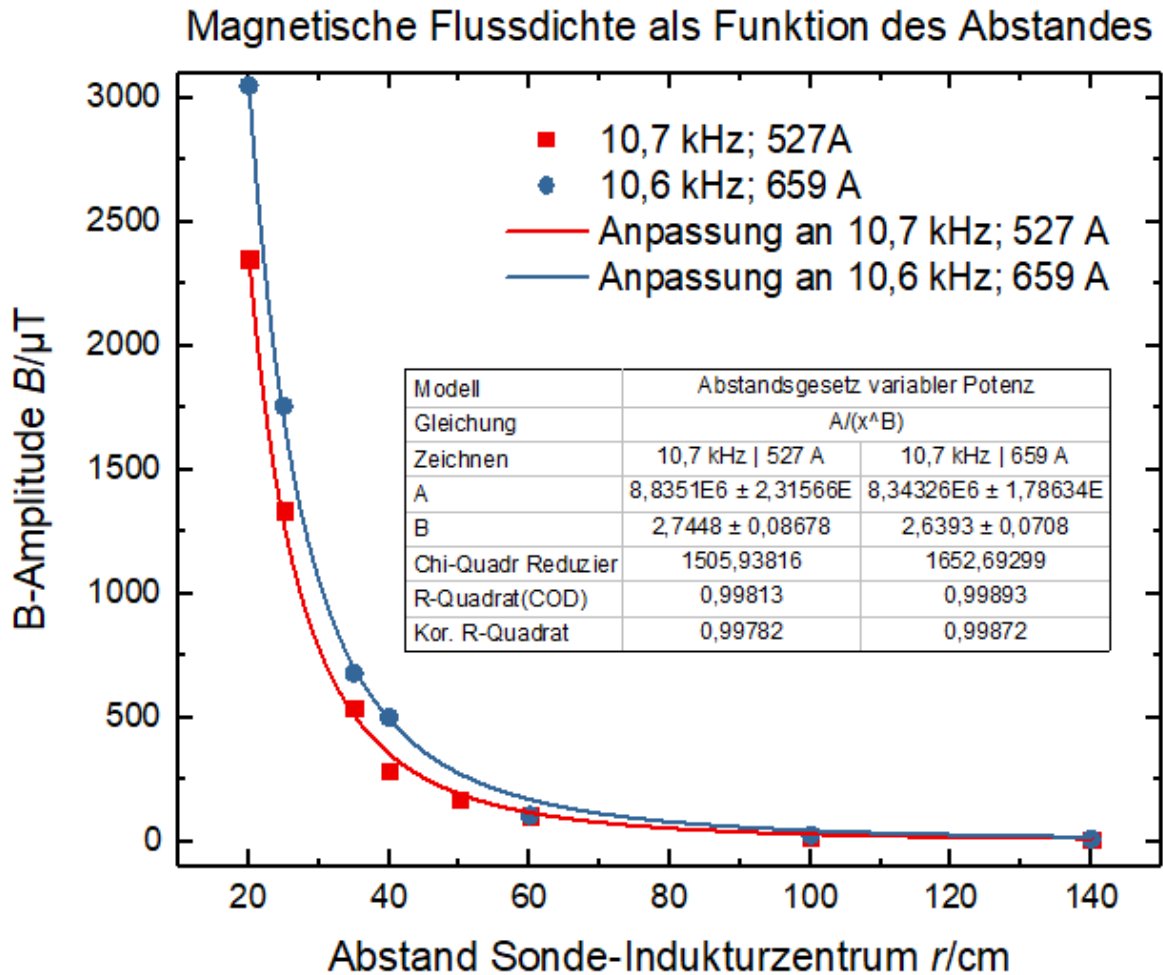


Abbildung 2-39: Verlauf der Flussdichte als Funktion des Abstandes.

Die **Abbildung 2-39** des Flussdichtenverlaufes zeigt, dass diese gemäß der Funktion:

$$y = \frac{A}{x^B} \tag{2-2}$$

einen geringfügig größeren Exponent B aufweist als das quadratische Abstandsgesetz dieses formuliert.

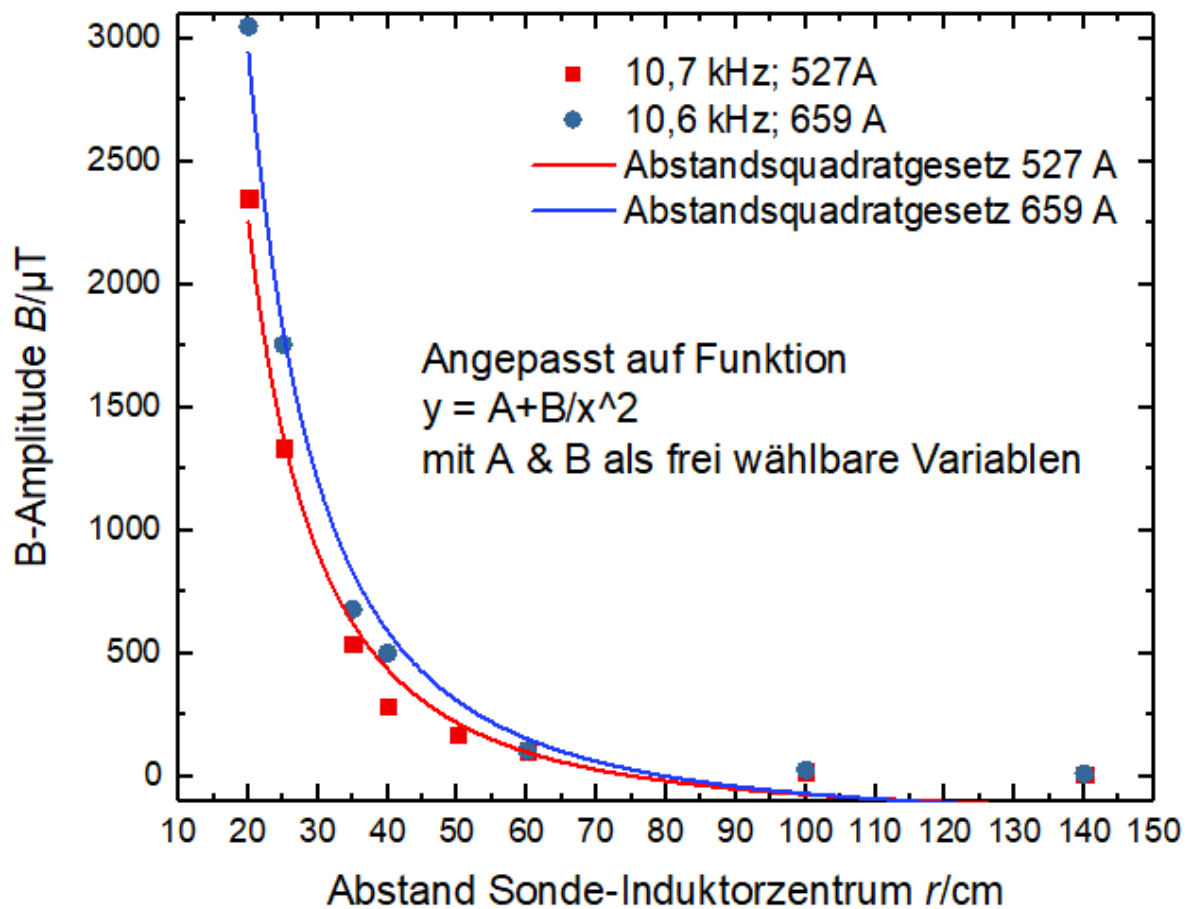


Abbildung 2-40: Approximation nach dem quadratischen Abstandsgesetzes

Hieraus wird ersichtlich, dass die tatsächliche Reduktion der Flussdichte etwas größer ist, als die theoretisch ermittelte Abnahme gemäß dem quadratischen Abstandsgesetzes. Dies stellt die Grundlage für die folgende Auswertung mit einem Exponent von 2,65 dar.

Die **Abbildung 2-40** zeigt, dass eine höhere Stromstärke in der Induktorspule eine größere magnetische Induktion zur Folge hat. Im Folgenden wird auf die Abhängigkeit des Induktionsverlaufes auf die Frequenz eingegangen.

Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit der Frequenz

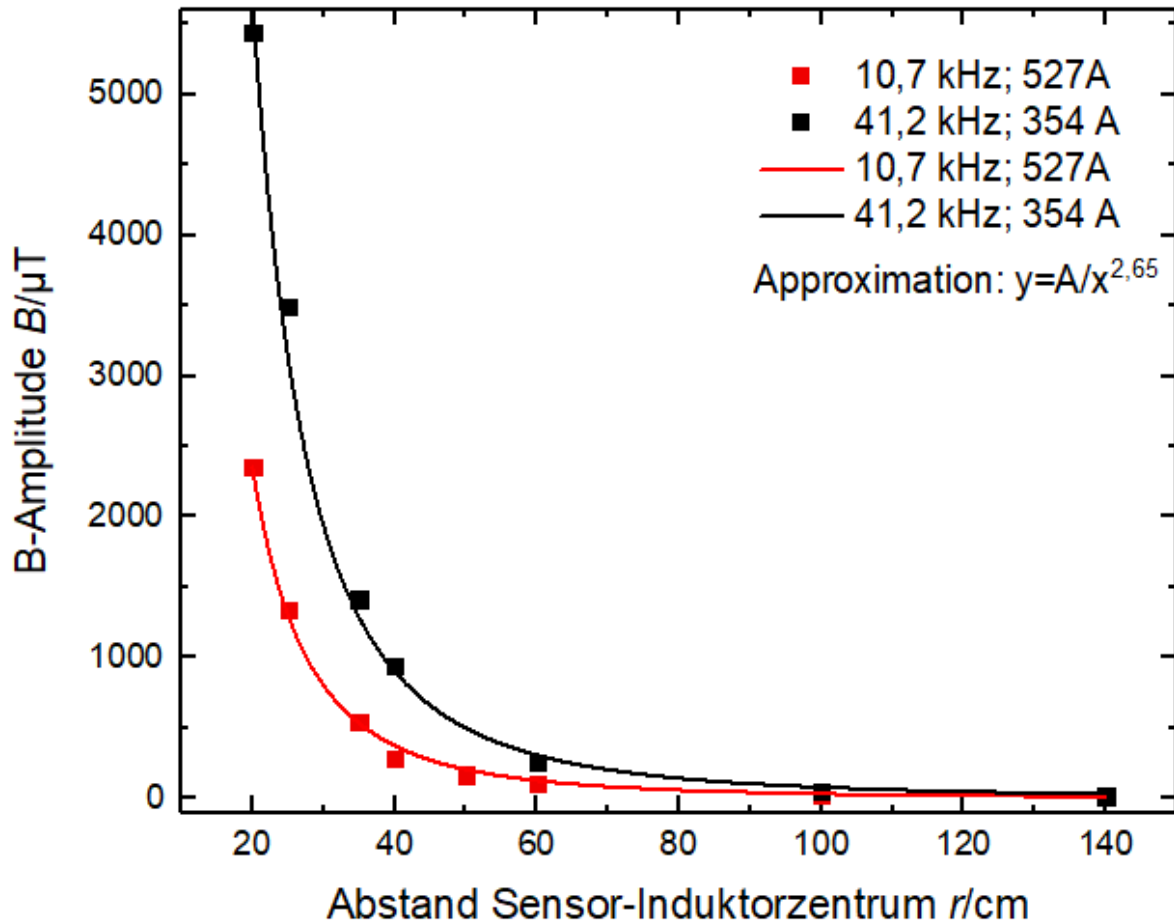


Abbildung 2-41: Verlauf der Flussdichte mit unterschiedlichen Frequenzen

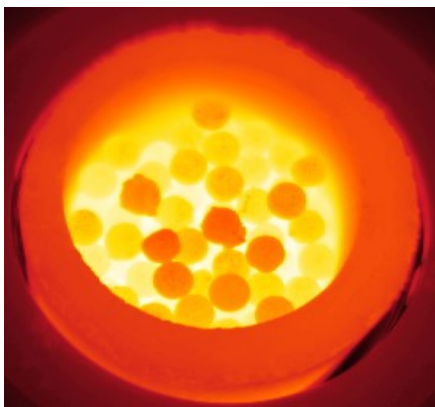
Hieraus ist eindeutig bewiesen, dass die Frequenz den größeren Einfluss auf die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen hat. Obwohl die Stromstärke bei den 41 kHz – Versuchen deutlich geringer ist (354 A statt 527 A bei den 10,7 kHz Versuchen), wird eine erhebliche höhere magnetische Flussdichte gemessen.

3 Schlussfolgerungen

Die indirekte induktive Erwärmung besitzt drei große Vorteile:

1. Es lassen sich je nach Suszeptorwahl im Reaktor reduzierende oder oxidierende Bedingungen schaffen.
2. Durch den sehr hohen Leistungseintrag direkt in das zu erwärmende Übertragungsmedium ohne jeglichen Brennstoff sind sehr hohe Erwärmungsgeschwindigkeiten erreichbar.
3. Eine berührungsfreie und ohne chemische Umwandlungsvorgänge hervorgerufene Erwärmung ist sehr effizient und durch die Einstellmöglichkeiten von Frequenz, Strom- und Spannungsstärke und der Geometrie sind sehr genaue Temperaturregelungen im Reaktor umsetzbar.

3.1 Reduzierende und oxidative Reaktionsbedingungen



Im Hochtemperaturbereich zeigt Graphit die optimalen Eigenschaften in Hinblick auf Materialbeständigkeit und Homogenität der Erwärmung des Reaktors und der Schaffung einer reduzierenden Atmosphäre. Weiters ermöglicht dieses Material eine optimale Formgebung für den Reaktorbau und den Einsatz von Schüttungen.

Abbildung 3-1: Erwärmung einer Graphitkugelschüttung

3.1.1 Induktiv beheiztes Graphitbett

Wie in **Abbildung 3-1** ersichtlich ist, gibt es bei einer Grafitkugelschüttung keinen radialen Temperaturgradienten. Lediglich die ganz oben liegenden Kugeln können durch die Konvektionsströmung und Abstrahlung mehr Wärme abgeben.

Große Graphitstücke weisen ebenso eine sehr homogene Erwärmung auf.

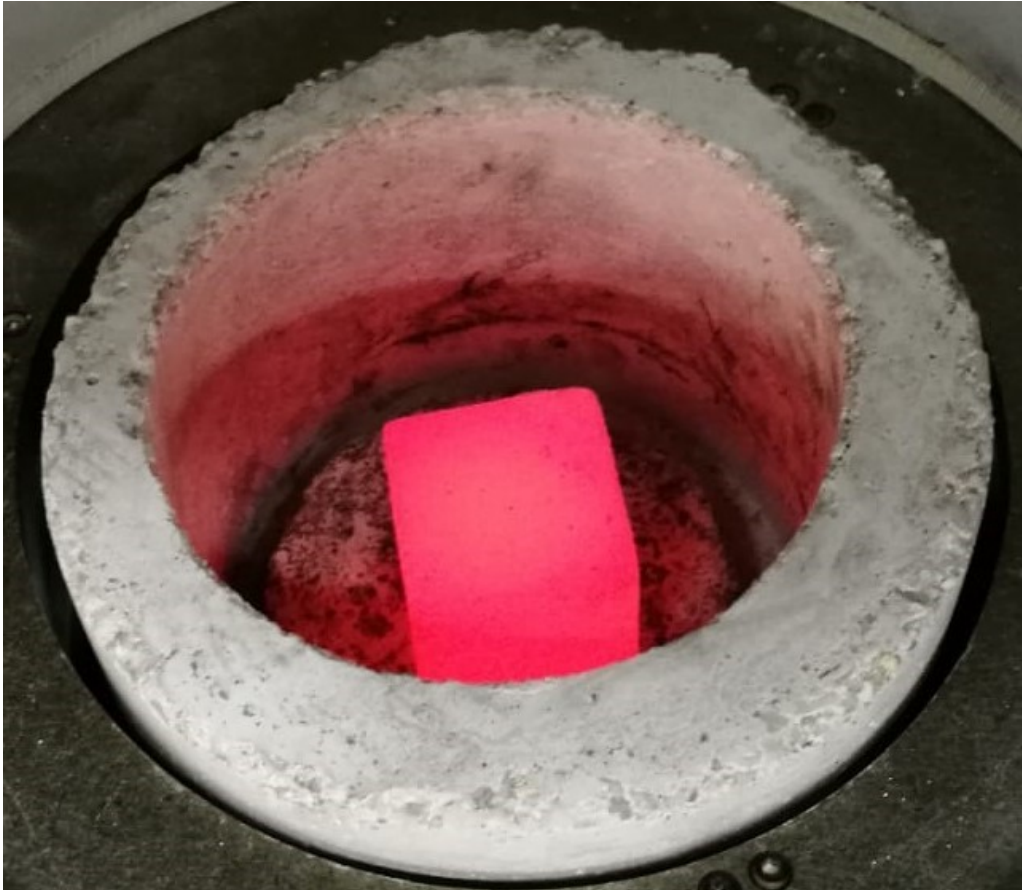


Abbildung 3-2: Homogene Erwärmung eines Graphitwürfels

Schön erkennbar ist bereits bei geringen Temperaturen eine sehr homogene Erwärmung des Graphitwürfels, da Graphit in seinen Mikrozellen die induktive Erwärmung ermöglicht und der Werkstoff über eine ausgezeichnete Temperaturleitfähigkeit verfügt.

Messungen mittels Kohlenmonoxidsensoren ergeben einen frühzeitigen Anstieg der Kohlenstoffmonoxidkonzentration in der Umgebung des Reaktors. Dies ist auf das Boudouard-Gleichgewicht (siehe **Abbildung 1-18**) zurück zu führen. Einen erhöhten Eintrag von Sauerstoff in die Erwärmungszone hat einen erheblicheren Materialverlust zur Folge. Somit steht für die oxidativen Atmosphären der metallhaltige Suszeptor im Vordergrund.

Graphit hat keinen Schmelzpunkt, sondern wird oberhalb 2500 °C plastisch verformbar [27]. Laut Sicherheitsdatenblatt beginnt die thermische Zersetzung von Graphit ab 400 °C und es bildet sich Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid.[28] Dies ist die Voraussetzung für eine reduzierende Erwärmung im Hochtemperaturbereich. Die Erwärmung von Graphit ist sogar in recht großen Quadern sehr gleichmäßig und weist eine extrem hohe Erwärmungsgeschwindigkeit auf. Die Graphitkugelschüttung ermöglicht eine sehr effiziente Erwärmung. Dies kann durch eine Sekundärinduktion von kleineren Partikeln begründet werden. Die Materialabnutzung von Graphit ist nicht zu vernachlässigen. Bei Erwärmungsversuchen von Graphitwürfeln ($s=50\text{ mm}$) bis 1.400 °C beträgt die Massenreduktion ca. 8,2 %. Bei Erwärmungsvorgängen von Graphitkugeln ($d=18\text{ mm}$) bis 1.400 °C beträgt der Massenverlust ca. 14,9 %. Der größere Materialumsatz bei kleineren Korngrößen lässt sich mit der größeren spezifischen Oberfläche von kleineren Suszeptoren begründen. Der Massenverlust ist über das Reaktorbett nicht konstant. Da die Temperaturverteilung in Graphitschüttungen recht homogen ist, kann der unterschiedliche Materialverlust der Graphitpartikel auf inhomogene Gasströmungen zurück geführt werden.

Aus der **Abbildung 3-3** ist ersichtlich, dass nach einem Schmelzversuch mit



Klärschlammasche (KSA) die Graphitkugeln leicht verspröden, jedoch thermisch stabil bleiben. Bei diesem Versuch wurde KSA durch die Graphitkugelschüttung auf ca. 1.400 °C erwärmt. Nach dem Abkühlen verringert sich das Volumen der Reaktionsmasse und die nicht abgeflossene KSA füllt das Lückenvolumen aus. Hieraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass bei der induktiven Erwärmung von Suszeptorschüttungen oberhalb der Schmelztemperatur des Aufgabegutes verfahrenstechnisch ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb zielführend ist.

Abbildung 3-3: Graphitkugeln im Reaktor

Die Optimierung der notwendigen Reduktionstemperatur des Diphosphorpentoxids (P_2O_5) in der KSA wird durch die Einstellung der Basizitätszahl CaO/SiO_2 erreicht. Bei niedrigen Eisenoxidgehalten ($w(\text{Fe}) = 2$ bis 5 %) der Klärschlammasche werden bei einer Basizitätszahl von 1 bei 1.573 K 80 bis 90 % des P_2O_5 reduziert. Bei einer Basizitätszahl von 2 werden bei 1.673 °C nur noch 40 bis 70 % reduziert. Diese Ergebnisse basieren auf Versuchen mit induktiv erwärmter KSA ($m(\text{KSA}) = 100\text{g}$) mit überstöchiometrisch

eingesetztem Graphitpulver (stöchiometrischer Faktor = 1,5) zur Reduktion der Eisenoxide und des Diphosphorpentoxid der KSA.[27]

Die **Abbildung 3-4** zeigt, dass nach dem Schmelzversuch aus den einzelnen Graphitkugeln ein Agglomerat aus den Kugeln und der im Induktionsreaktor erstarrten Klärschlammmasche, welche durch die langsame Abkühlung im Reaktor kristallin erstarrt, entsteht. Bei rascher Abkühlung könnte aus der KSA auch ein hydraulisch aktives Bindemittel erzeugt werden. (siehe **Abbildung 4-5**)

Die hydraulische Aktivität beruht auf der relativ hohen inneren Energie, die den glasigen Zustand gegenüber dem kristallinen Zustand auszeichnet. Ähnliche Resultate konnten bereits mit Hochofenschlacke erreicht werden. Zur Herstellung eines Zementzusatzstoffes ist ein sehr schnelles Abkühlen der Schlackenschmelze von ca. 1500 °C unter die Transformationstemperatur von 840 °C erforderlich. Dies erfolgt in einem geeigneten Granulationsverfahren. Anschließend erfolgt die Feinmahlung der glasig-amorphen Schlacke.[28]

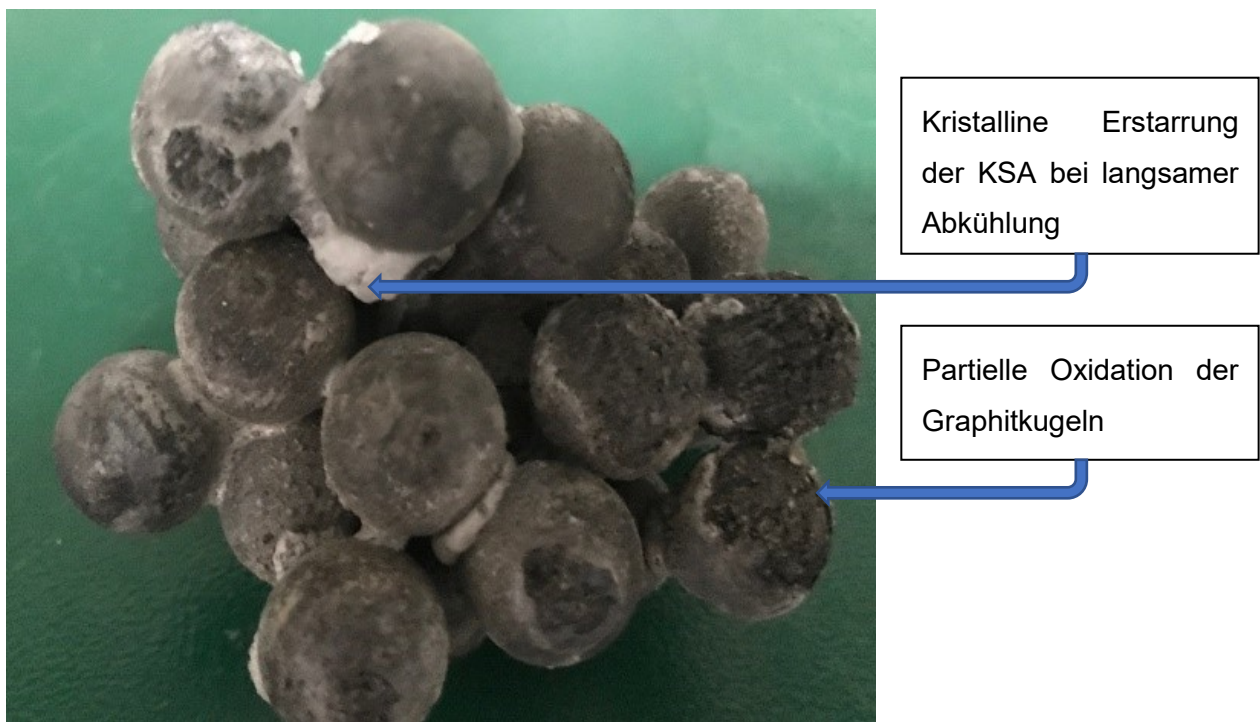


Abbildung 3-4: Agglomerat Graphitkugeln (d=18 mm)

Ein Nachteil von Graphit besteht im energieintensiven Herstellungsprozess, welcher die Ökobilanz negativ beeinflusst. Naturgemäß müssen auch die höheren Kosten im Gegensatz zum natürlich vorkommenden Anthrazit berücksichtigt werden.

3.1.2 Induktiv beheizte ferromagnetische Suszeptoren

Bei metallhaltigen Suszeptoren ist darauf zu achten, dass die verwendeten Metalle keine optimalen elektrischen Leiter sind, da die ohmschen Verluste maßgeblich zur Erwärmung durch Wirbelströme beitragen. Bei ferromagnetischen Werkstoffen treten neben den Wirbelstromverlusten noch Erwärmungseffekte wegen der Ummagnetisierung bis zur Curie-Temperatur auf. Durch den ab Seite 9 beschriebenen Skinneffekt wird der Strom nach außen gedrängt. Daher entsteht die unten dargestellte Zunderbildung.



Abbildung 3-5: Zunderbildung Skinneffekt



Abbildung 3-6: Zunderfragmente

In **Abbildung 3-5** wird der gleichmäßige Angriff durch Sauerstoff von außen gut erkennbar, welcher durch den Skinneffekt beschleunigt wird, da außen die Temperaturen ein Maximum aufweisen. Der hierdurch verursachte Materialverlust begrenzt die Einsatztemperatur von diesen Werkstoffen.

Je nach Legierungsbestandteilen ist der Einfluss der Curie – Temperatur unterschiedlich. Da Metalle Kaltleiter sind, überwiegt bei höheren Temperaturen der Erwärmungseffekt durch ohmsche Verluste.

Durch die Zunderbildung ist der Temperaturbereich der indirekten induktiven Erwärmung mit Eisenwerkstoffen begrenzt. Die maximale Einsatztemperatur von Fe-Cr-C – Legierungen wird mit 650 bis 750 °C angegeben. Die Massenzunahme durch Oxidation findet ab 650° C statt.[29] Somit ist der Einsatzbereich für die indirekte induktive Erwärmung definiert. Bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur wird das Eisen oxidiert. Oxide, Sauerstoff oder sauerstoffhaltige Gase reagieren mit der Stahloberfläche, bei höheren Temperaturen in Form einer Oxidation des Eisens und/oder der Legierungselemente und auch des Kohlenstoffs. Die Reaktionsprodukte sind Eisenoxide, die als Zunder bezeichnet werden und Kohlenstoffmonoxid, was als Entkohlung beschrieben wird, da dieses Gas samt Kohlenstoff aus dem Stahl entweicht. Bis zu einer Temperatur von ca. 570°C besteht die Zunderschicht auf Stahloberflächen aus Magnetit Fe_3O_4 (innen) und Hämatit Fe_2O_3 (außen). Bei höheren Temperaturen bildet sich eine Schicht aus Wüstit (FeO) zwischen dem Stahl und der Magnetitschicht.[30]



Abbildung 3-7: Zunderbildung bei Erwärmung bis 1.200 °C, $f=11,8$ kHz, $P=9$ kW



Neben dem Materialverlust durch die Oxidation des Eisens und Kohlenstoffs treten durch die rasche Temperaturänderung auch thermisch bedingte Spannungen aufgrund der Volumenzunahme auf, welche zur Zerstörung des geometrischen Gebildes führen können.

Abbildung 3-8: Rissbildung Reaktormantel 34CrNiMo6, ca. 1450 °C, f=12,5 kHz, P=12,0 kW



Erstarrte
Klärschlammmasche

Abbildung 3-9: Rissbildung Reaktormanteldetail 34CrNiMo6, ca. 1450 °C, f=12,5 kHz, P=12 kW

In **Abbildung 3-8** und **Abbildung 3-9** sind die enormen Kräfte der Energieumwandlungsprozesse gut sichtbar gemacht. Die Materialausströmungen sind zum Teil auf die austretende Klärschlammmasche (KSA) zurückzuführen.

3.2 Erwärmungsgeschwindigkeiten

Sowohl bei kohlenstoffhaltigen als auch bei metallhaltigen Suszeptoren sind sehr hohe Erwärmungsgeschwindigkeiten erreichbar. Dies führt zu einer maßgeblichen Erhöhung des Wirkungsgrades im instationären Bereich, jedoch bedingt die rasche Erwärmung eine Belastung durch thermische Spannungen im Suszeptorkörper aber auch in der Feuerfestmaterialummantelung. Durch die hohe Erwärmungsgeschwindigkeit (siehe **Tabelle 2-4**) besteht die Möglichkeit von sehr raschem Hochfahren der Reaktoren auf die gewünschte Endtemperatur. Somit wird der Einsatz der induktiven Erwärmung bei temporär schwankenden Überproduktionen im elektrischen Netz für z. B. Recyclingverfahren sinnvoll.

3.3 Effizienz und Regelbarkeit der induktiven Erwärmung

Da die Erwärmung über das Transformatorprinzip mittels elektrischer Induktion stattfindet sind die erreichbaren Wirkungsgrade sehr hoch. Wie in **Tabelle 2-2** beschrieben, wird die Effizienz der Erwärmung beim Anfahren der Anlagen durch die hohen Erwärmungsgeschwindigkeiten erhöht. Da keine störenden Gase wie bei der Verbrennung vorhanden sind, müssen diese auch nicht erwärmt werden. Dies führt zum einen zur Verbesserung der Effizienz des induktiven Verfahrens und zum anderen wird die Abgasproblematik verringert.

Bei jeder Wirkungsgradbetrachtung ist die Definition des Bilanzrahmens für die Aussagekraft von Bedeutung. Beim Bilanzrahmen II geht es darum, die Effizienz der induktiven Erwärmung zu beurteilen. Der Strahlungsterm der Wirkungsgradberechnung (siehe **Gleichung 1-35**) wirkt bei hohen Temperaturen überproportional ein und führt zu sehr hohen Wirkungsgradergebnissen. Daher ist es zielführend, die Vergleiche der Geometrien, Suszeptoren etc. mit geringer Eingangsleistung durchzuführen.

Die messtechnisch einfach zu ermittelnde Größe R' ist geeignet die induktive Erwärmung zu beurteilen. Zum Einen können Aussagen über die Effizienz der Erwärmung getätigt werden, zum Anderen ist beim Vergleich mit dem thermischen Wirkungsgrad eine vorausschauende Anlagenüberwachung möglich.

Wie die Erwärmungskurven in **Abbildung 2-15** demonstrieren, kann je nach eingestellter Leistung und Stromstärke eine gewünschte Erwärmungstemperatur erreicht werden. Ein weiterer Regelparameter ist die Einkopplungsfrequenz.

3.3.1 Vergleich experimenteller Ergebnisse mit der Literatur

Dass mit der induktiven Erwärmung ein sehr hoher Leistungseintrag möglich ist, wie Benkowsky beschreibt [3], konnte mit den extrem hohen Erwärmungsgeschwindigkeiten (siehe **Abbildung 2-15**) bestätigt werden.

Der Abstand des Induktors zum Werkstück sollte möglichst gering sein.[3] Dies konnte ebenso mit der Geometrie 5 und 8 bestätigt werden, da diese in den Wirkungsgradbetrachtungen die besten Resultate erzielen.

Der Wirkungsgrad der induktiven Erwärmung erreicht die angegebenen Werte, vorausgesetzt die geometrischen Verhältnisse und die Einkopplungsfrequenz sind entsprechend optimiert.

Die Abschirmung magnetischer Felder durch deren Umleitung in ferromagnetischem Material, wie dies in den sicherheitstechnischen Betrachtungen z. B. bei Burgholte beschrieben wird,[21] konnte in den Doppelringversuchen (siehe **Abbildung 2-9** und **Abbildung 2-16**) oder bei den Versuchen „Ring mit Schüttungen“ (siehe **Abbildung 2-8**) eindeutig erstmals bei einer induktiven Erwärmung nachgewiesen werden.

Der Skineffekt konnte sehr gut mit den Erwärmungsbildern (siehe **Abbildung 2-5**) der dickwandigen Geometrie 4 visualisiert werden. Dieser Effekt wird z. B. bei Baake beschrieben.[1]

Wie Reissner beschreibt, sind die Ferromagnetika in kleine Bereiche aufgeteilt. Innerhalb dieser Bereiche sind die Spinmomente parallel (Weißschen Bezirke). Oberhalb der Curie-Temperatur ist nur noch Paramagnetismus vorhanden[30]. Dieses Werkstoffverhalten wird in der **Abbildung 2-14** und der **Abbildung 2-15** in dieser Arbeit zum ersten Mal grafisch dargestellt.

3.4 Elektromagnetische Feldmessung

Da das elektrische Feld abschirmbar ist, wird bei den sicherheitstechnischen Überlegungen das Verhalten der magnetischen Felder der induktiven Erwärmung berücksichtigt. Um einen Vergleich mit den Grenzwerten aus dem öffentlichen Bereich herzustellen, werden Grenzwerte von Induktionskochherden, welche die zum Kochen benötigte Wärmeenergie durch mittelfrequente Magnetfelder im Bereich 20 kHz bis 100 kHz erzeugen, herangezogen. Im Abstand von 30 cm beträgt der erlaubte Referenzwert $6,25 \mu\text{T}$. [24]

Mittels **Gleichung 2-2** lässt sich der Proportionalitätsfaktor A bestimmen und somit kann der Abstand x berechnet werden. Für den Versuch mit 41,2 kHz und 354 A ergibt sich ein Sicherheitsabstand an welchem die Exposition noch $6,25 \text{ T}$ beträgt von 1,99 m. Somit wird bei der Versuchsanlage in der HTL Dornbirn mit einem Sicherheitsabstand von 4,0 m zum Induktionsofen in jedem Betriebszustand keinerlei Gefährdung ausgehen.

4 Ausblick

Die induktive Erwärmung bietet eine Vielzahl von neuen Verfahrensmöglichkeiten. Hierbei soll nur ein exemplarischer Ausblick getätigt werden.

4.1 Wertstoffrückgewinnung durch selektive Erwärmung

Viele Verbundstoffe der Verpackungsindustrie enthalten wertvolle Stoffe wie Aluminium. Eine Milchverpackung aus Verbundstoff enthält bis zu 5 % Aluminium. Dieses kann nicht durch Verbrennung der organischen Fraktion rückgewonnen werden, da bei der Verbrennung Aluminiumoxid entsteht. Bei der induktiven Erwärmung unter reduzierenden Bedingungen entsteht bei der Niedertemperaturpyrolyse reines Aluminium. Wird die Temperatur bei der Pyrolyse zu hoch angesetzt, entsteht Aluminiumcarbid. Hier ist der Vorteil der optimalen Regelbarkeit der induktiven Erwärmung ersichtlich.[31]

4.2 Kühlschmiermittelrückgewinnung von Abfällen

Kühlschmiermittelabfälle zählen bei der Entsorgung zu den gefährlichen Abfällen. Es gibt für die flüssigen Abfälle zur Kreislaufführung entsprechende Recyclingverfahren. Dies sind häufig thermische Verfahren, wie die Vakuumdestillation.[32] Für die kühlschmiermittelverunreinigten Späne könnte die induktive Erwärmung eingesetzt werden. Bei Temperaturen unterhalb der Zündtemperatur der Kühlschmiermittel werden die Späne induktiv erwärmt, das Kühlschmiermittel geht in die Gasphase und wird anschließend kondensiert. Hierbei tritt ein Reinigungsschritt ein, da nur die flüchtigen Bestandteile in die Gasphase gehen. Dieses Verfahren könnte kontinuierlich betrieben werden, da die Verweilzeit zur Verdampfung nicht zu groß sein muss.

4.3 Kopplung induktiver Erwärmung mit Granulation

Wie beim RecoPhos – Verfahren bewiesen, kann durch induktive Erwärmung mit reduzierender Atmosphäre aus Klärschlammasche (KSA) Phosphor rückgewonnen werden.[33] Das hierbei entstehende Schlackenprodukt besteht aus für die Zementherstellung sehr interessanten Stoffen.

Tabelle 4-1: Massenprozentergebnisse XRF Holcim [34]

Probe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
	w [%]	w [%]	w [%]	w [%]	w [%]	w [%]	w [%]
KSA	17,50	10,71	9,49	13,48	2,20	0,93	0,88
KOS	77,48	3,41	0,64	0,28	0,72	0,00	0,07
ZOS	41,18	12,33	4,20	1,87	1,10	2,88	0,27

Die **Tabelle 4-1** zeigt die in Oxide umgerechneten Massenprozent von Klärschlammasche, Kalkofenfilterstaub (KOS) und Zementofenfilterstaub (ZOS).

Für einen Einsatz der Schlacke der Klärschlammasche nach dem RecoPhos-Verfahren bedarf es einer sehr raschen Abkühlung, dass es zu keiner Kristallisation kommen kann. Diese amorphe Erstarrung kann in einer Siedewassergranulation (SWG) umgesetzt werden.



Abbildung 4-1: InduCARB mit SWG



Abbildung 4-2: Hochdruckdüse mit Kühlstrecke

Durch eine teilweise amorphe Erstarrung in der Siedewassergranulation konnten Anna Kemmer und Simon Moll die guten hydraulischen Eigenschaften von Hochofenschlacke (HOS) durch lichtmikroskopische Untersuchungen und röntgendiffraktometrische Untersuchungen bereits nachweisen. Von ausschlaggebendem Interesse ist hierbei die positive Wirkung der Siedewassergranulation in Bezug auf die glasartige, amorphe Erstarrung im Gegensatz zur Kaltwassergranulation.

4.3.1 Lichtmikroskopische Darstellung

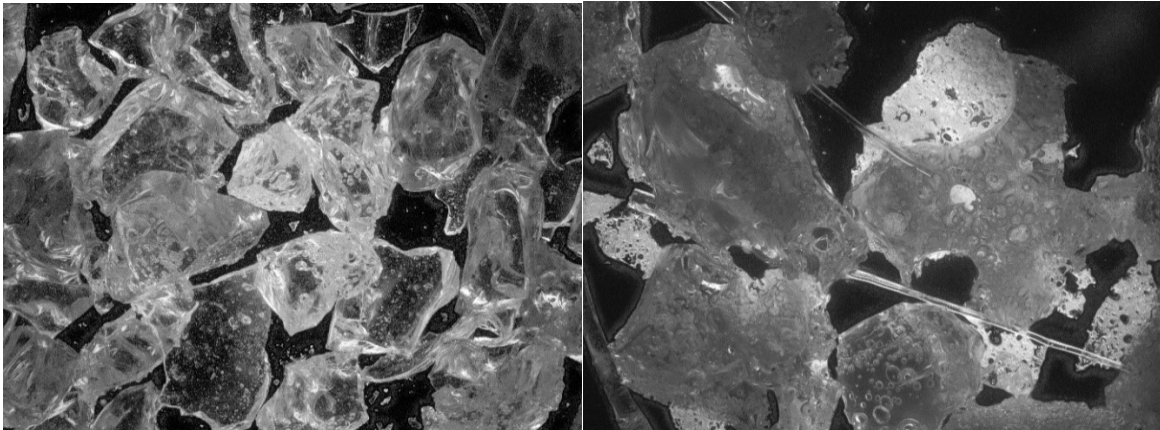


Abbildung 4-3: Mikroskopie Kaltwassergranulat (4x vergrößert) [17]

Abbildung 4-4: Mikroskopie Warmwassergranulat (4x vergrößert) [17]

Eine lichtmikroskopische Untersuchung macht den Unterschied zwischen kaltwassergranulierter und siedewassergranulierter HOS noch deutlicher. **Abbildung 4-3** zeigt eine Aufnahme des Kaltwassergranulats mit seinen glatten Bruchflächen und der relativ geringen spezifischen Oberfläche. Im Vergleich dazu in **Abbildung 4-4** ein Bild des Siedewassergranulats mit sehr vielen Gaseinschlüssen und den unregelmäßigen Bruchflächen.[17]

4.3.2 Röntgendiffraktometrische Darstellung

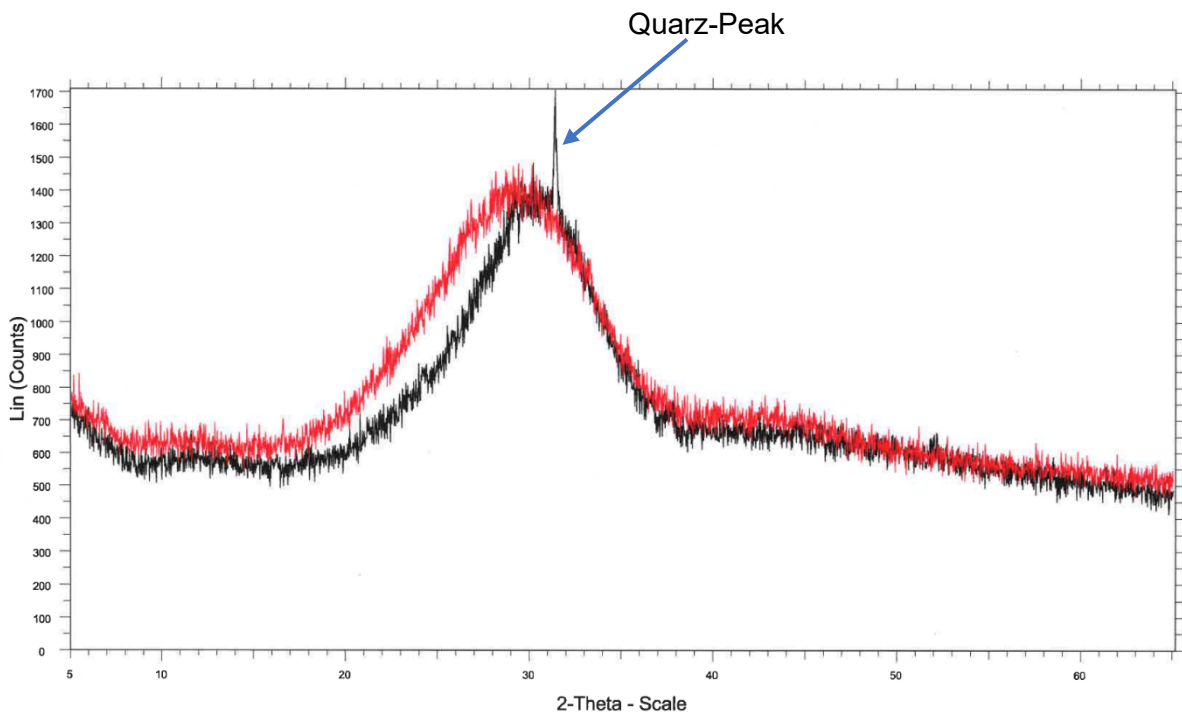


Abbildung 4-5: Vergleichsdiffraktogramm Siedewassergranulat (rot) / Kaltwassergranulat (schwarz) mit markantem Quarz-Ausschlag [17]

Eine Untersuchung mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) ergibt einen sehr geringen kristallinen Anteil in dem Siedewassergranulat (rote Linie). Zum Vergleich ist in **Abbildung 4-5** zusätzlich ein Diffraktogramm konventionell granulierter Hochofenschlacke abgebildet, die den charakteristischen Quarz-Ausschlag aufweist (schwarze Linie).[17]

Somit ist bewiesen, dass die neue Verfahrenskombination von induktiver Erwärmung von Hochofenschlacke, Zementofenstaub oder Klärschlammasche etc. und direkt angekoppelter Siedewassergranulation durchaus ein Zukunftspotential aufweist.

Der Eisenherstellungsprozess erzeugt ca. 290 kg Hochofenschlacke je Tonne Eisen, bei der Stahlherstellung fallen ca. 120 kg Stahlerzeugungsschlacke je Tonne Stahl an, diese Schlacken sind ein hochwertiger Rohstoff für die Baustoff- und Zementproduktion.[27]

Die granulierte Schlacke aus der Eisen- und Stahlherstellung sollte eine geringe Korngröße aufweisen und hat eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie Portlandzement.[35] Wie in **Abbildung 4-2** gezeigt wird, kann durch den Einsatz einer zum Schlackenstrahl normal stehenden Hochdruckdüse, die Korngröße des Granulats durch Variation des Kühlwasservolumenstromes durch mechanische Scherkräfte eingestellt werden.

Für die Wärmerückgewinnung aus Schlacken werden derzeit Trockengranulationsverfahren getestet. Bei diesem Verfahren wird die Korngrößeneinstellung durch die Drehzahleinstellung der rotierenden Granulationsteller ebenso ermöglicht.[36]

Aus den genannten, neuen Verfahrensmöglichkeiten wird ersichtlich, dass die induktive Erwärmung ein sehr hohes Potential in der Wertstoffrückgewinnung aufweist. Die induktive Erwärmung kann in oxidativer und reduktiver Reaktoratmosphäre erfolgen. Die exakte Leistungsregulierung über den Induktorstrom und der Resonanzfrequenz ermöglicht eine isotherme Reaktionsführung. Dies ermöglicht eine Umsatzoptimierung der chemischen Reaktionen.

Wichtig bei der Effizienzoptimierung ist, dass alle Ströme berücksichtigt werden – die Materialströme und Energieströme. Somit könnte bei der induktiven Erwärmung das gasförmige Produkt in einem Gaswäscher durch Absorption und das Schlackenprodukt durch ein geeignetes Weiterverarbeitungsverfahren, wie die Siedewassergranulation stofflich genutzt werden. Die Abwärmen aus der induktiven Erwärmung können ebenso in einer Wärmerückführung genutzt werden. Das Kühlerwasser kann für Gebäudeheizzwecke eingesetzt werden und der Wärmeträger des Gaswäschers könnte zur Produktvorerwärmung genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Baake, E (Hrsg.), Induktives Erwärmen, Vulkan Verlag, 2014.
- [2] Rinnhofer, H., Industrieofentechnik, Skriptum, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl Thermoprozesstechnik, 2009.
- [3] Benkowsky, G., Induktionserwärmung, 5. Auflage, Verlag Technik GmbH Berlin, 1990.
- [4] Edlinger, A, Verfahren zum Reduzieren von metalloxidhaltigen Schlacken bzw. Gläsern und/oder Entgasen von mineralischen Schmelzen sowie Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens, Europäische Patentschrift EP 1 841 699 B1, 2006.
- [5] Gallaun, J., Klien, D., Wüstenhagen, C., InduCARB, Diplomarbeit HTL Dornbirn, 2013.
- [6] Kremser, A., Elektrische Maschinen und Antriebe, 5. Auflage, Springer Verlag, 2017.
- [7] Moeller, F., Grundlagen der Elektrotechnik, 21. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [8] Zureks, Skin depth by Zureks,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13826795>, abgerufen am 31. 08. 2019.
- [9] Merz, H., Lipphardt, G., Elektrische Maschinen und Antriebe, 3. Auflage, VDE Verlag, 2014.
- [10] Fa Idea, Bedienungsanleitung InduCARB Dornbirn, Solid Works eDrawings, 2013.
- [11] Alcon Electronics, power film capacitors,
<http://www.alconelectronics.com/power-film-capacitors.php> , abgerufen am 20.08.2019.
- [12] Beneke, F., Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band I, Vulkan Verlag Essen, 2010.

-
- [13] Beneke, F., VDMA Leitfaden Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen, VDMA (2010), 18-20.
- [14] Raupenstrauch, H., Brennstoff- und Verbrennungstechnik, Skriptum, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl Thermoprozesstechnik, 2019.
- [15] Kern, H., Raupenstrauch, H., Anlagensicherheit I, Skriptum, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl Thermoprozesstechnik, 2015.
- [16] Raupenstrauch, H., Zitat zum Thema Sicherheitstechnik vs. Reaktionstechnik am 26. 09. 2019.
- [17] Kemmer, A., Moll, S., Selektive Erwärmung mittels Induktionsofen Siedewassergranulation, Diplomarbeit, HTL Dornbirn, 2015.
- [18] Matinde, E., Y. Sasaki und M. Hino, Phosphorus Gasification from Sewage Sludge during Carbothermic Reduction, ISIJ International, Vol. 48 (2008), 912–917.
- [19] Katsich, C., Hochtemperatur-Werkstoffverhalten von Eisen-Basislegierungen bei Kombination von Schlag und Abrasion, Diplomarbeit Montanuniversität Leoben, 2010.
- [20] Schmitt, H.J., Der Mensch im elektromagnetischen Feld, Westdeutscher Verlag, 1982.
- [21] Burgholte, A., Elektromagnetische Verträglichkeit Umwelt (EMVU), Hüthig Verlag München/Heidelberg, 2018.
- [22] Grenzwerte in verschiedenen Expositionsbereichen nach DGUV Regel 013-013 (BGR B11), 2006.
- [23] Katalyse Institut (Hrsg.), Elektrosmog, C.F. Müller Verlag Heidelberg, 2002.
- [24] Keuschningg, M., Beratungsbericht EM Feld, AUVA, 2013.
- [25] Chemie.de,
<https://www.chemie.de/lexikon/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit.html>,
Zugriff: 06. 10. 2019.
- [26] SGL-Carbon,<https://www.sglicarbon.com/pdf/SGL-Broschuere-Spezialgraphite-fuer-die-Metallindustrie-DE.pdf>, Zugriff am 06.10.2019.
- [27] Seilnacht, T., <https://www.seilnacht.com/kohlens.htm>, Zugriff am 13.10.2019
- [28] Mersen, ELLOR® Graphit, Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG, 2010.
- [27] Nakase, K., A. Matsui, N. Kikuchi und Y. Miki, Effect of Slag Composition on Phosphorus Separation from Steelmaking Slag by Reduction, ISIJ International, Vol. 57 (2017), 1197–1204.
- [28] Benedix, R., Bauchemie für das Bachelor-Studium, 2. Auflage, Springer Verlag, 2014.
- [29] Stahllexikon, <http://kerschgens.stahl-lexikon.de/index.php/stahllexikon/60-z/2941-Zunder.html> , abgerufen am 13.08.19.
- [30] Reissner, J., Werkstoffkunde für Bachelors, Carl Hanser Verlag München Wien, 2010.
- [31] Burtscher, M., Duella, D., Rückgewinnung von Sekundäraluminium aus TetraPaks© mittels InduCarb-Verfahren, Diplomarbeit, HTL Dornbirn, 2009.

- [32] Kluthe, <https://kluthe.com/magazin/kuehlschmierstoffe-entsorgen/> / Zugriff: 20.08.2019.
- [33] Schönberg A., Samiei K., Kern H., , Raupenstrauch H., Der RecoPhos Prozess-Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche, ÖWAV – Zeitschrift für alle wissenschaftlichen, technischen rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen des gesamten Wasser- und Abfallwesens 66, S. 403-407, 2014.
- [34] Forster, M., Leu, R., Umwandlung von Klärschlammasche in einen Superphosphat-Dünger, Diplomarbeit HTL Dornbirn, 2018.
- [35] Horrii K., Y. Kitano, N. Tsutsumi und T. Kato, Processing and Reusing Technologies for Steelmaking Slag, Nippon Steel Technical Report No. 104 (2013), 112-129.
- [36] Junxiang L., Y. Qingbo, Z. Zongliang, D. Wenjun, H. Zhicheng, Q. Qin, und Y. Fan, Experimental investigation on molten slag granulation for waste heat recovery from various metallurgical slags, Applied Thermal Engineering 103 (2016), 1112–1118.

Mess- und Versuchsgeräte:

EM-Feldanalysator EFA 2, Nr. BN 2245, Firma Wandel und Goltermann

B-Feld-Sensor, Nr. BN 2245/90.10, Firma Wandel und Goltermann

EMR-300 Strahlungsmessgerät, Nr. BN 2244/31, Firma Narder

E-Feld-Sonde, Typ 18.1, Nr. 2244/90.73 X-0012, 100kHz – 3GHz Firma Narder

Speicheroszilloskop: Rigol DS1056Z, 4 Channel 50 MHz, 1 GSa/s, Snr.: DS1ZA181204698

Wärmebildkamera: Optris pl 400 80 mK, Snr.: 4000 O 30 T 1500

Induktionsofen: Idea Typ UIS 15, Snr.: 121005

Kühlwasseraggregat: FCUN 040-NEB, Snr.: 12M-031218