

Kalorimetrische Untersuchung der induktiven Erwärmung von Kugelanordnungen für elektrothermische Speicheranwendungen

1. Einleitung und Zielsetzung

Die rasante Entwicklung der erneuerbaren Energien im Bereich der Stromproduktion führt durch die witterungsabhängige Energieaufnahme vor allem durch Wind und Sonne zu immer größeren Leistungsschwankungen im Stromnetz. Um diese Fluktuationen auszugleichen werden in der Regel Pumpspeicherkraftwerke verwendet. Die geografischen Abhängigkeiten sowie der hohe Platzbedarf von Speicherbecken und die damit verbundenen hohen Investitionskosten dieser Energiespeicher sind limitierende Faktoren für den weiteren Zubau. Aus diesem Grund wird zurzeit in der F&E an neuen Speichertechnologien zur Speicherung elektrischer Energie geforscht, um künftig kostengünstige, zyklenfeste und effiziente Energiespeicherlösungen in GWh-Maßstab zur Verfügung zu stellen [1, 2].

Einen vielversprechenden Ansatz stellen adiabate Druckluftspeicherkraftwerke (A-CAES) dar [3]. Umgebungsluft wird hierbei analog zur Abbildung 1 während der Beladephase in unterirdischen Kavernen verdichtet und somit mechanisch zwischengespeichert. Im Kraftwerksbetrieb wird die komprimierte Luft über eine Turbine-Generator-Strecke verstromt. Zusätzlich wird während der Beladephase die Kompressionswärme der Verdichtung im thermischen Energiespeicher (TES) zwischen gespeichert, um während der Entladephase die Druckluft vor Eintritt in die Turbine vorzuwärmen. Zur Erhöhung des Arbeitsvermögens sowie der Systemflexibilität wird das adiabate Druckluftspeicherkraftwerk um eine elektrische Heizung erweitert.

Ein aussichtsreicher Lösungsansatz zur Umsetzung der elektrischen Beheizung ist die Konzeptionierung der Komponente als induktiv erwärmte und direkt-durchströmte Kugelschüttung (siehe Abb. 2). Ein solches Power-to-Heat-Konzept bietet Vorteile hinsichtlich hoher Leistungs- und Energiedichten durch kontaktlose Wärmeerzeugung sowie einen guten Wärmetransport an das gasförmige Wärmeträgerfluid Luft.

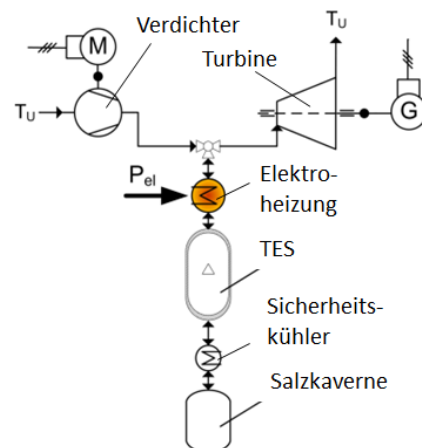


Abb. 1: Fließschema eines A-CAES mit integrierter Elektroheizung

Die grundlegende Herausforderung ist dabei die Modellierung und Berechnung der räumlichen Feld- und Stromdichteverteilung sowie des resultierenden Temperaturfeldes in der Schüttstruktur. Die lokale Stromdichteverteilung ist dabei erheblich durch teilweise geringe Kontaktwiderstände der Einzelpartikel beeinflusst. Die Auslegung eines solchen Aufbaus ist daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

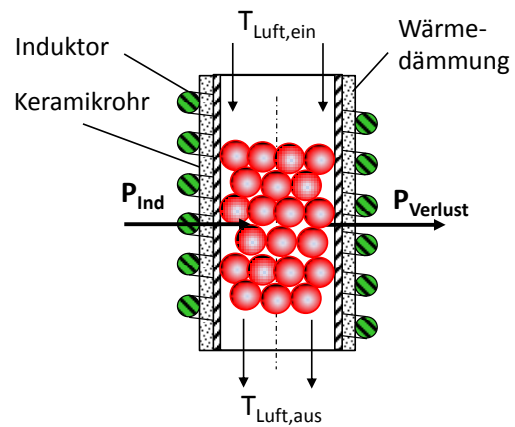


Abb. 2: Power-to-Heat Konzept der Induktionsheizung

Das Ziel der Forschungsarbeit für die Entwicklung der Induktionsheizung auf Schüttungsbasis besteht darin, das Verständnis der beschriebenen Effekte durch eine geeignete Modellbeschreibung zu vertiefen und so die Basis für eine sichere Entwurfsberechnung zu legen. Im Einzelnen sind dazu die örtliche Stromdichteverteilung sowie die resultierende Wärmequellendichte auf Partikel- und Schüttebene abzubilden.

Im vorliegenden Beitrag werden anhand einer experimentellen Untersuchung die wesentlichen Einflussgrößen zur Modellierung des Kontaktwiderstands der Einzelpartikel identifiziert. Zudem wird die Effizienz des Erwärmungsprozesses in Abhängigkeit unterschiedlicher Geometrie- und Werkstoffparameter der Kugelanordnungen untersucht.

2. Experimentelle Untersuchung

2.1. Methodik

Zur Untersuchung der Energieeffizienz des Erwärmungsprozesses wird das Verfahren der Mischkalorimetrie zugrunde gelegt. Im Gegensatz zum ursprünglichen Messverfahren werden die Heizobjekte (hier: unterschiedliche Kugelanordnungen) im Kalorimetrie-Behälter mit Hilfe der elektromagnetischen Induktion direkt erwärmt (vgl. Abb. 3, links).

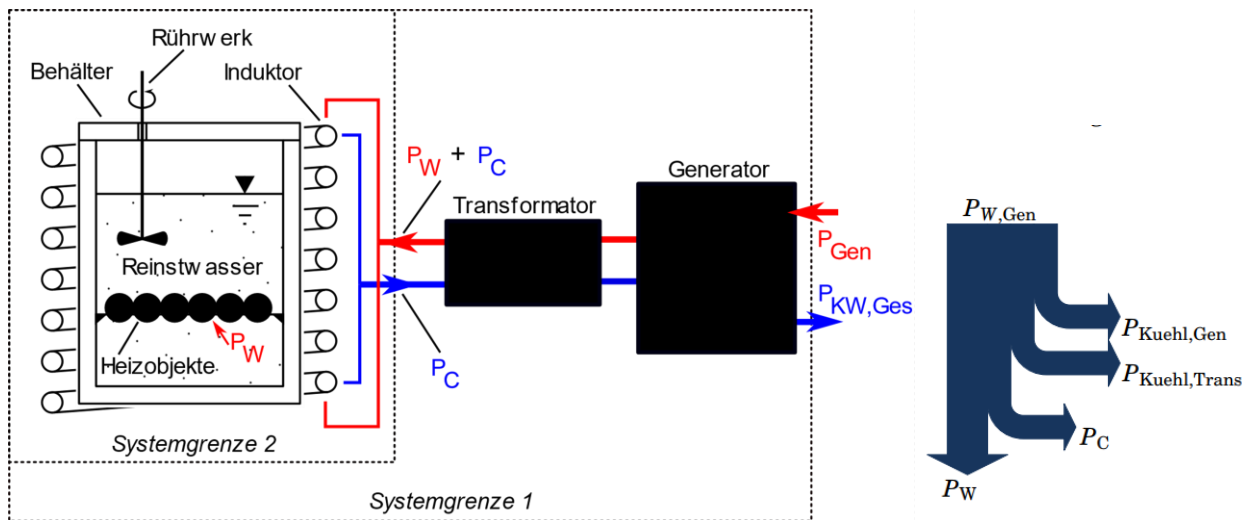


Abb. 3: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus für die kalorimetrische Messmethode (links) und Leistungsflussdiagramm (rechts)

Dabei wird ein thermisch isolierender Behälter verwendet, welcher die zu untersuchenden Heizobjekte in einer wärmeaufnehmenden Flüssigkeit enthält. Als kalorimetrische Flüssigkeit wird Reinstwasser gewählt, da dieses im Vergleich zu gewöhnlichem Leitungswasser eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit aufweist. Außerdem sind dessen Stoffdaten mit der notwendigen Genauigkeit dokumentiert und verfügbar. Das Flussdiagramm in Abbildung 3 (rechts) zeigt die Leistungsflüsse der elektrischen Anlagenkomponenten auf. Die Gesamtwirkleistung $P_{W,Gen}$, die am Generator gemessen wird, teilt sich dabei auf in die Kühlleistung des Generators $P_{Kuehl,Gen}$, des MF-Transformators bzw. dessen Kompensationsfeld $P_{Kuehl,Trans}$ sowie die Kühlleistung des Induktors P_C , welche separat erfasst wird. In Abbildung 4 wird der Versuchsablauf der kalorimetrischen Messung exemplarisch aufgezeigt. Die Heizobjekte lagern zum Zeitpunkt t_1 vollständig in der Flüssigkeit und geben einen Teil ihrer induzierten Wärme während des Erwärmungsprozesses (t_1 bis t_2) an diese konvektiv ab. Zum Zeitpunkt t_2 wird die Leistungszufuhr abgebrochen

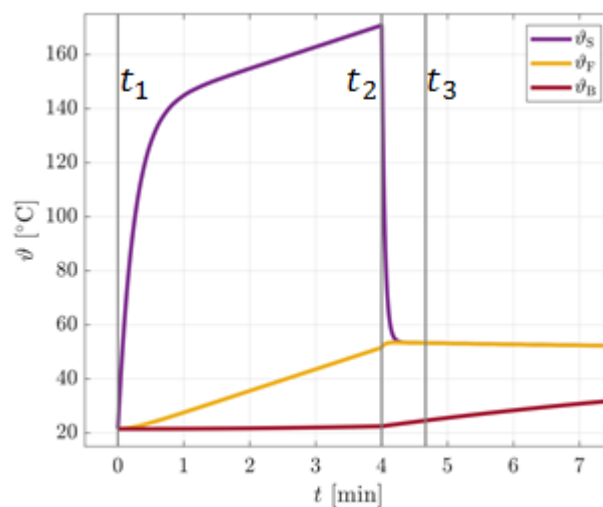


Abb. 4: Exemplarischer Temperaturverlauf der Mischkalorimetrie mit Temperaturen für die Phasen Solid/Kugeln (ϑ_S), Flüssigkeit/Wasser (ϑ_F) und Behälter (ϑ_B)

und das Rührwerk eingeschaltet (t_2 bis t_3) damit eine rasche Temperaturangleichung beider Phasen sowie eine homogene Durchmischung erreicht wird. Der Versuch wird beendet nachdem der thermodynamische Gleichgewichtszustand zum Zeitpunkt t_3 erreicht wird. Anschließend wird zur Effizienzuntersuchung des Erwärmungsprozesses die energetische Bilanzierung an *Systemgrenze 2* (siehe Abb. 3, links) durchgeführt. Dabei wird die in den Heizobjekten induzierte und anschließend konvektiv abgegebene Wärmemenge Q_{ind} über die Temperaturänderungen T_1 nach T_3 , spezifische Wärmekapazitäten $c_{p,i}$ und Massen m_i der jeweiligen Phasen (Kugeln: i_1 , Wasser: i_2 , Behälter: i_3) bestimmt:

$$Q_{ind} = \sum_{i=1}^{i=3} m_i \cdot (c_{p,i}(T_{3,i}) T_{3,i} - c_{p,i}(T_{1,i}) T_{1,i})$$

Die an das Kühlwasser abgegebene Wärmemenge des Induktors wird basierend auf der erfassten Kühlleistung P_C , welche anhand des Volumenstroms des Kühlwassers \dot{V} der Temperaturänderung am Ein- und Austritt des Induktors (T_{ein} und T_{aus}) sowie der zugehörigen Dichte ρ_{KW} und der spez. Wärmekapazität $c_{p,KW}$ des Kühlwassers folgendermaßen berechnet:

$$Q_C = \int_{t_1}^{t_3} P_C dt = \int_{t_1}^{t_3} \dot{V} [\rho_{KW}(T_{aus})c_{p,KW}(T_{aus})T_{aus} - \rho_{KW}(T_{ein})c_{p,KW}(T_{ein})T_{ein}] dt$$

Folglich wird der thermodynamische Wirkungsgrad des Erwärmungsprozesses auf Basis der ermittelten Wärmemengen berechnet:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{ind}}{Q_{ind} + Q_C} = \frac{Q_S + Q_F + Q_B}{Q_S + Q_F + Q_B + Q_C}$$

2.2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung wird die Energieeffizienz in Abhängigkeit unterschiedlicher Geometrie- und Werkstoffparameter ermittelt. Dabei werden als Heizobjekte Kugelanordnungen nach Abb. 5 mit einer Anzahl von 10, 16 und 32 sowie einem Kugeldurchmesser von 10 mm, 20 mm und 30 mm aufgebaut. Die Versuche werden zudem für elektrisch geschlossene und offene Ringanordnungen durchgeführt, wobei für offene Anordnungen der elektrische Kontakt mit Hilfe eines Isolators getrennt wird. Damit wird untersucht, ob und in welchem Ausmaß ein kugelübergreifender, ringförmiger Wirbelstromfluss zu einer erhöhten Wärmeentwicklung führt.

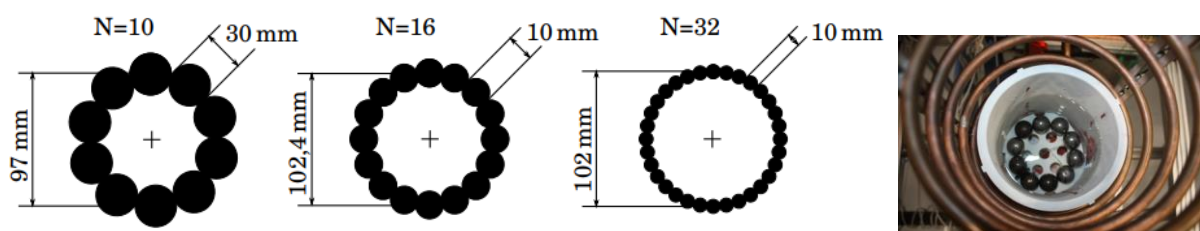


Abb. 5: Versuchsanordnungen der Heizobjekte mit unterschiedlichen Kugeldurchmessern (links) und realer Aufbau mit Induktor, wassergefüllter Behälter und 30 mm Kugeln aus S235JR (rechts)

Zur Gewährleistung einer breiten stofflichen Untersuchung werden Werkstoffe aus drei Gruppen ausgewählt. Neben Stahllegierungen und Dauermagneten werden sogenannte Elektrobleche, welche zur Gruppe der Metgläser bzw. amorphen Eisenlegierungen gehören, untersucht. In Tabelle 1 sind die untersuchten Kugelwerkstoffe mit ihren physikalischen Kennwerten bei Normtemperatur ($T=20^{\circ}\text{C}$) eingetragen. Für die Versuchsauswertung werden temperaturabhängige Stoffdaten verwendet.

Tabelle 1: Werkstoffauswahl mit thermophysikalischen und elektrischen Kennwerten

Werkstoffgruppe	Bez.	ρ [$\mu\Omega\text{cm}$]	μ_r [-]	c_p [$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$]	λ [$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]
Stahl (nur Kugeln)	S235JR	15	600	461	54	7832
	C10	14,5	600	485	52	7850
	X46Cr13	55	300	460	30	7691
Dauermagnete (nur K.)	NdFeB N40	160	1,05...1,1	440	8,5	9195
	Ferrit	10^9	2400	700	4	4677
Elektroblech	M270-50A	52	1 800	450	25	7147

Zur Durchführung der Versuchskampagne wird eine Induktionsanlage mit einer maximalen Leistung von 40 kW und einem Frequenzbereich von 9-70 kHz verwendet. Zudem wird ein zylindrischer Induktor mit 12 Windungen, einem mittleren Durchmesser d_c von 180 mm und einer l_c Länge von 500 mm eingesetzt.

Da die Leistungsfähigkeit des Erwärmungsprozesses signifikant vom Werkstoff sowie Kugelanzahl und -durchmesser abhängt, kann die Leistung am Induktor nicht konstant gehalten werden. Stattdessen werden die Versuche mit einer Spannung am Induktor von 260 V (RMS-Wert) sowie eine Frequenz von 22 kHz durchgeführt. Die Heizdauer ($t_{\text{Heiz}} = t_2 - t_1$) und Wassermenge wird für jede Geometrieconfiguration konstant gehalten. Je nach Kugeldurchmesser d und Anzahl N ergeben sich hierfür verschiedene Werte (siehe Tab. 2). Mit der Vorgabe von t_{Heiz} soll sichergestellt werden, dass es zu einer deutlichen Temperaturerhöhung des Wassers kommt, Wassertemperaturen über 60°C jedoch unterbunden werden, um Verdampfungseffekte auszuschließen.

Tabelle 2: Zuordnung der Heizdauer und Wassermenge für Geometrieconfigurationen

Form	d [mm]	N [-]	t_{Heiz} [min]	m_W [kg]
Kugelring	10	32	6	1,500
	20	16	4	1,500
	30	10	4	2,000

2.3. Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 6 sind die kalorimetrisch ermittelten thermodynamischen Wirkungsgrade η_{th} nach der Definition aus Abschnitt 2.2 für Werkstoff- und

Geometrievariationen aus den Tabellen 1 und 2 dargestellt. Zudem wird nach offenen und geschlossenen Ringanordnungen unterschieden. Die Ergebnisse zeigen einen steigenden Wirkungsgradverlauf für zunehmende Kugeldurchmesser, welcher sich analog zur zylindrischen Geometrie aus einem größeren Verhältnis zwischen Durchmesser d und Eindringtiefe δ ergibt [5,6]. Aus den genannten Quellen wird deutlich, dass der äquivalente Wechselstromwiderstand der Heizobjekte ansteigt und damit die elektromagnetische Einkopplung und folglich der Wirkungsgrad zunehmen. Für den hartmagnetischen Werkstoff Ferrit wird während der Versuchsabläufe keinerlei Einkopplung festgestellt, weshalb dieser nicht in der Abbildung 6 aufgeführt ist. Grund dafür ist der hohe spezifische Widerstand von ca. $10^9 \mu\text{Ohm cm}$.

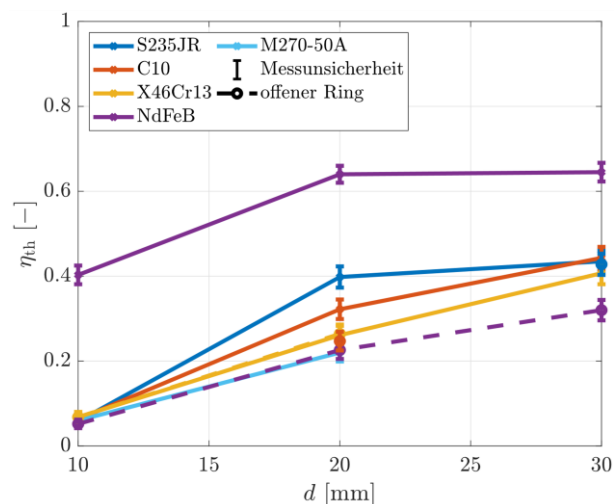


Abb. 6: Thermodynamischer Wirkungsgrad für untersuchte Werkstoff- und Geometrievariationen

Die höchsten th. Wirkungsgrade werden für den geschlossenen Ring aus Neodymkugeln festgestellt. Für die offene Ringanordnung werden für S235JR und C10 bei 30 mm Durchmesser Wirkungsgrade größer 40 % erreicht. Grund hierfür sind die ferromagnetischen Eigenschaften dieser Stähle.

Beim Vergleich der geschlossenen mit der offenen Anordnung für Neodym sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Der deutlich höhere Wirkungsgrad für die geschlossene Ringanordnung resultiert aus dem Wirbelstromfluss über die gesamte Ringstruktur, welcher bedingt durch die hohen magnetischen Anziehungskräfte aufgrund des geringen Kontaktwiderstand zwischen den einzelnen Kugeln entsteht. Offenbar ist analog zur vorhergehenden Erklärung der äquivalente Widerstand der geschlossenen Ringanordnung aufgrund des größeren Ringdurchmessers deutlich höher als für die offene Anordnung. Dieser Effekt wird in abgeschwächter Form für die geschlossene Anordnung mit 20 mm Kugeln des Einsatzstahls C10 beobachtet, bei welcher vergleichsweise zur offenen Struktur ein um 7,7 %-Punkte höherer Wirkungsgrad ermittelt wird. Hier werden ebenfalls Ringströme vermutet, die aufgrund der schwächeren Magnetisierung jedoch niedriger ausfallen als im Falle von Neodym. Werden dagegen die offenen und geschlossenen Anordnungen des martensitischen Edelstahl X46Cr13 miteinander verglichen, so ist kein Unterschied

vorhanden, da fehlende magnetische Kräfte einen hohen ringförmigen Kontaktwiderstand der elektrisch geschlossenen Ringanordnung bewirken. Für Anordnungen mit 10 mm Durchmesser ergeben sich, bis auf den Versuch mit geschlossenem Neodym-Ring, ähnliche Wirkungsgrade. Offenbar bewirkt für die nicht-magnetischen Werkstoffe die höhere Anzahl an Kontaktstellen einen hohen Kontaktwiderstand für eine Wirbelstromausbreitung über den Kugelring hinweg. Zur Untersuchung der Wirbelstromausbreitung über die geschlossene Ringstruktur werden vier Messungen mit Kugelringen aus C10 und Neodym für 20 mm Durchmesser wiederholt. Zur Erfassung des Ringstroms wird eine am Oszilloskop angeschlossene Rogowski-Spule nach Abbildung 7 um die Ringanordnung platziert.

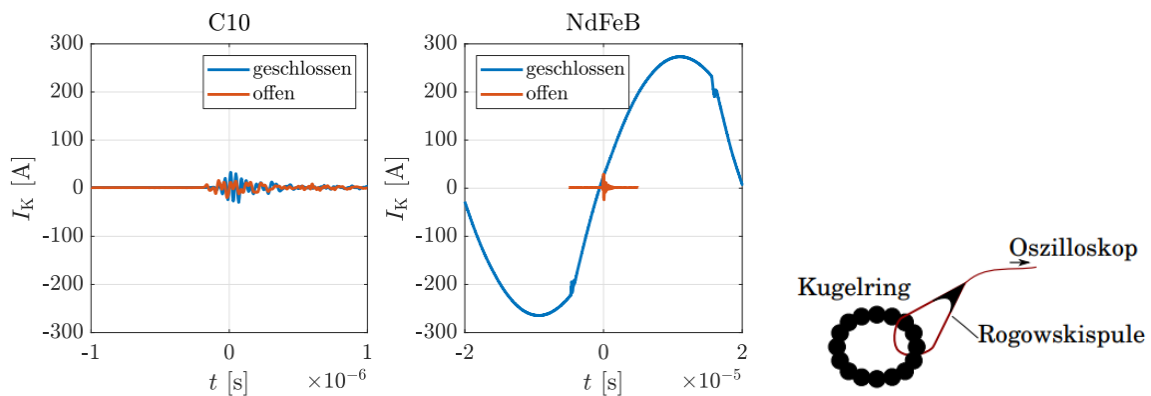


Abb. 7: Vergleich der Oszilloskop-Messung der Stromstärke in der Ringstruktur zwischen offener und geschlossener Anordnung für C10- und Neodym-Kugeln ($d=20$ mm)

Abbildung 7 (links) zeigt den zeitlichen Signalverlauf der Stromstärke. Hierbei ist das Zeitfenster nicht identisch, da dieses automatisch der gemessenen Frequenz angepasst wird. Im Falle der offenen Variante wird für beide Werkstoffe am Oszilloskop das Signalrauschen der Rogowskispule detektiert. Für Neodym ist eine deutliche Sinuskurve mit einem Scheitelwert von 265,0 A für die geschlossene Variante erkennbar. Für die offene Variante wird lediglich das Signalrauschen festgestellt. Analog zu dieser Messung wird ein Ringstrom für die geschlossene Anordnung aus C10 erfasst. Diese Stromstärke fällt jedoch aufgrund der geringeren Anziehungskräfte zwischen den Einzelkugeln mit einem Scheitelwert von 33,3 A deutlich geringer aus. Somit zeigt diese Gegenüberstellung den signifikanten Einfluss des Kontaktwiderstands zwischen den Einzelkugeln sowie dessen Auswirkung auf die elektrische Leistungsübertragung und den resultierenden thermodynamischen Wirkungsgrad.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung der Effizienz des induktiven Erwärmungsprozesses von kugelartigen Schüttstrukturen sowie zur Identifikation der Einflussgrößen für den ringförmigen Kontaktwiderstand zur Modellierung dieses Erwärmungsprozesses wurde ein experimenteller Aufbau basierend auf einem kalorimetrischen Ansatz (Mischkalorimetrie) entwickelt und aufgebaut. Auf dieser Basis wurde ein

Prozesswirkungsgrad für die Umwandlung elektrischer in thermische Energie definiert und eine breite experimentelle Untersuchung für ringförmige Kugelanordnungen verschiedener Durchmesser (10, 20, 30 mm) und Werkstoffe durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen einen steigenden Wirkungsgradverlauf für zunehmende Durchmesser, welcher sich durch das größere Verhältnis zwischen Kugeldurchmesser und Eindringtiefe begründet. Dabei werden maximale Wirkungsgrade über 60 % für den elektrisch geschlossenen Kugelring aus Neodym identifiziert. Für die elektrisch offene Ringanordnung werden für den Baustahl S235JR und den Einsatzstahl C10 bei 30 mm Durchmesser Wirkungsgrade über 40 % erreicht, welche sich durch die ferromagnetischen Eigenschaften dieser Stähle begründen. Zur Messung der entstehenden Wirbelströme im Falle der geschlossenen Ringanordnung wurde der Messaufbau um eine Rogowskispule erweitert. Damit wurde die Ausbildung der Ringströme mit einem Scheitelwert von 265,0 A für den Neodym-Kugelring und 33,3 A für den C10-Kugelring nachgewiesen und die physikalische Begründung für den hohen Wirkungsgrad bestätigt. Diese Untersuchung liefert die Einflussgrößen zur Berechnung des ringförmigen Kontaktwiderstands für eine Entstehung solcher Wirbelströme über die komplette Ringstruktur hinweg. Neben den stofflichen Größen ist der Einfluss der Flächenpressung über äußere Kräfte (mechanisch oder magnetisch), die Ausbildung einer Oxidschicht sowie die Anzahl der Kontakte entscheidend für die Ausbildung solcher Ringströme.

In künftigen Forschungsarbeiten sollen die identifizierten Einflussfaktoren unabhängig voneinander untersucht und deren Einfluss auf den ringförmigen Kontaktwiderstand durch eine geeignete Modellbeschreibung quantifiziert werden. Diese Kontaktmodelle fließen in die Modellentwicklung zur Berechnung von induktiv erwärmten und direkt durchströmten Schüttaufbauten ein.

Literaturverzeichnis

- [1] Dunn B, Kamath H, Tarascon JM. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science* 2011;334(6058):928e35.
- [2] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Applied Energy* 137 (2015) 511–536.
- [3] S. Zunft, V. Dreissigacker, M. Bieber, A. Banach, C. Klabunde and O. Warweg, "Electricity storage with adiabatic compressed air energy storage: Results of the BMWi-project ADELE-ING," in *Proc. 2017 International ETG Congress*, Bonn, Germany, pp. 1-5.

- [4] Dreißigacker, Volker, and Sergej Belik. "System Configurations and Operational Concepts for Highly Efficient Utilization of Power-to-Heat in A-CAES." *Applied Sciences* 9.7 (2019): 1317.
- [5] Belik, S. Numerical modelling of an induction heating process for packed rods with adjacent airflow. In *Proceedings of the International Congress on Electrotechnologies for Material Processing*, Hannover, Germany, 6–9 June 2017.
- [6] Pfeifer, H.; Nacke, B.; Beneke, F. (Hrsg.): *Praxishandbuch Thermoprozesstechnik*, Edition Prozesswärme, 3. Aufl., Vulkan Verlag, Essen, ISBN 9783802730856, 2018

Sergej Belik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Thermische Prozesstechnik

Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

Tel.: +49711 6862 512

Sergej.Belik@dlr.de