

Bültmann GmbH

**Dauermagnetheizer -
Energieeffizienter, permanent-
magneterregter Erwärmungs-
ofen für Warmumformprozesse
- Teil I (Entwurfsvorlage) -**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen 33181/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Werner Witte, Bültmann GmbH
Dr.-Ing. Uwe Birk, ZENIT GmbH

Neuenrade, 5. Oktober 2018

Bezugshinweis

Der Abschlussbericht wird von der Bültmann GmbH im Eigenverlag verlegt und kann schriftlich per Post oder E-Mail angefordert werden:

Bültmann GmbH
Hönnestraße 31
58809 Neuenrade

E-Mail: info@bueltmann.com

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33181/01	Referat	24/0	Fördersumme	522.400 €
Antragstitel	Dauermagnetheizer - Energieeffizienter, permanentmagneterregter Erwärmungssofen für Warmumformprozesse				
Stichworte	Energie, Abgas, Reinigung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
22 Monate	06.12.2016	31.11.2018	01		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Bültmann GmbH Hönnestraße 31 58809 Neuenrade-Küntrop			Tel	02394 18-231
				Fax	02394 18-171
				Projektleitung	Werner Witte
				Bearbeiter	Wolfgang Goor
Kooperationspartner	Forschungszentrum Jülich - Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik - Engineering und Technologie (ZEA-1) Wilhelm-Johnen-Straße 52425 Jülich Institutsleiter: Prof. Dr. Ghaleb Natour, Tel. 02461 61-5045 Kordinator/ Bearbeiter: Norbert Dettmann, Tel. 02461/ 61-96835				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Anlass: Halbzeuge aus Nichteisenmetallen (Al, Cu, Ms), alias Bolzen, werden heute zur Weiterverarbeitung durch Strangpressen konvektiv in erdgasbeheizten Anwärmöfen und/oder in Magnetfeldern durch Wirbelströme (Induktionsöfen, Magnetheizer mit Hochtemperatursupraleiter (HTS)-Spule auf Umformtemperatur gebracht. Ein Dauermagnetheizer mit Permanentmagneten in Pseudo-Halbach-Anordnung, Feldstärke im Zentrum ca. 0,8 Tesla, kann im Vergleich zu den üblichen Induktionsöfen über 30% elektrische Energie einsparen. Das jährliche Einsparpotenzial einer Strangpresse, durchschnittl. Aluminiumdurchsatz 8.000 t/a, beträgt ca. 550 MWh/a bzw. ca. 200 t CO₂. **Zielsetzung:** Ziel des als Machbarkeitsuntersuchung konzipierten Vorhabens ist der Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit auf Basis der Entwicklung, Konstruktion und Bewertung eines Prototyps im Industriemaßstab.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Mit zwei Industriepartnern wurden alle heute relevanten und zukünftig zu erwartenden Parameter für einen Industrieofen (Werkstoffe, Werkstückabmessungen, Temperaturen und Erwärmungsleistung) definiert und als Basis für die Berechnungen, Simulationen und Konstruktionen genutzt. Als Lösungsansatz wurde eine modular aufgebaute, rohrförmige Magnettrommel aus kreisförmigen Scheiben (Struktur) konzipiert, die um den in der Innenbohrung angeordneten, feststehenden Bolzen rotiert. In der Wandung der Scheibenstruktur sind die Permanentmagnete mit größtmöglicher Packungsdichte fixiert. Das Konzept wurde konkretisiert und bewertet durch:

- (1) Modellierung und Optimierung der Größe, Form und Anordnung der Permanentmagnete in konzentrischen Kreisen in Halbach-Anordnung für verschiedene Magnetwerkstoffe in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke mit zweidimensionalen FEM-Magnetfeldberechnungen;
- (2) Berechnung aller wirkenden Kräfte und Momente aus den Magnetfeldern der Magnete, der bestückten Scheiben und der Magnettrommel in Ruhe und bei allen auftretenden Relativbewegungen auf die Magnete, die Struktur und den Bolzen mit zweidimensionalen FEM-Magnetfeldberechnungen;
- (3) Berechnung, Optimierung und Festigkeitsnachweise für die Struktur- und die übrigen Bauteile aus ausgewählten Werkstoffen, für die gewählte Klebtechnik zum Fügen der Magnete sowie für die montierte Magnettrommel mit zwei- und dreidimensionalen FEM-Analysen;
- (4) Entwicklung der Fügeverfahren für Magnete und Struktur durch Variantenkonstruktion/ Bewertung;

- (5) Berechnung der Leistungseinträge in die Bolzen, der radialen und axialen Temperaturgradienten sowie der prozessoptimierten Drehzahlregelung mit zwei- und dreidimensionalen FEM-Simulationen;
- (6) Konstruktion, Berechnung und Optimierung des inneren Wärmeschutzschildes und der resultierenden Wärmebelastung des Gesamtsystems durch FEM- und analytische wärmetechnische Berechnungen;
- (7) Ableitung von analytischen Dimensionierungsverfahren für die Auslegung von Dauermagnetheizern;
- (8) Konstruktion des prototypischen Dauermagnetheizers in Industrieausführung;
- (9) Technische und wirtschaftliche Bewertung des Dauermagnetheizers durch Verifizierung der Konstruktion und vergleichende energetische sowie Investitionsrechnungen zu Marktpreisen.

Ergebnisse und Diskussion

Der spezifische Verbrauch W_s an elektrischer Energie des Dauermagnetheizers beträgt bei optimierter Prozessführung im 24/250-Betrieb (6000 Betriebsstunden) 177 kWh/t bei einem Wirkungsgrad η von 80 %. Im Vergleich zu Induktionsheizern (W_s 281 kWh/t, η 50%) reduzieren die niedrigeren induktiven Verluste und größeren Skintiefen den Wirkungsgrad um 30% und im Vergleich zu Magnetheizern mit HTS-Spule (W_s 217 kWh/t, η 65%) sinkt er um 15% wegen der entfallenden Kryostatkühlung. Die rechnerischen Reduktionen der jährlichen CO_2 -Emissionen - 786 t CO_2/a statt 1.248 bzw. 963 t CO_2/a - betragen im Vergleich 37% bzw. 18% bei Erwärmung der Aluminiumbolzen von Raum- auf die Umformtemperatur von 520 °C und sind höher als erwartet.

Mit der berechneten Anordnung der Dauermagnete - je 40 Magnete in fünf konzentrischen Kreisen um den Bolzen angeordnet - wird eine effektive Magnetflussdichte von 624 Millitesla erzeugt, mit der bei optimierter Drehzahlregelung industrietypische Aluminiumbolzen (300 mm Durchmesser, 1300 mm Länge) in 65 Sekunden erwärmt werden können. Bei 40 Sekunden für Nebenzeiten wird mit nur einer Magnettrommel eine Erwärmungsleistung von 34,3 Bolzen je Stunde erreicht, die industrieseitig geforderten 40 Bolzen je Stunde jedoch unterschritten. Auch die Erwärmung von Kupferbolzen mit Durchmessern von 230 mm auf eine Umformtemperatur von 900 °C ist rechnerisch möglich. Die technischen Lösungen erlauben den Einsatz von Standardwerkstoffen, hochfestem Aluminium für die Struktur und Magnetwerkstoffe im mittleren Preissegment, und mit Ausnahme der Rollenlager von Standardkomponenten für den mechanischen Aufbau mit Antrieb und Steuerungstechnik.

Bei kalkulierten Investitionskosten von 1,55 Mio. EUR für einen betriebsbereiten Dauermagnetheizer mit Bolzenzu- und Abführung erscheint dessen Wettbewerbsfähigkeit gegeben. Für die Fixierung der Magnete in den Scheiben und die Montage der Magnettrommel wurden Lösungsansätze konzipiert und auf Machbarkeit untersucht, jedoch konnte noch kein Lieferant gefunden werden. Die Füge- und Montagetechniken müssen bei den erforderlichen Toleranzen und hohen Kräften neu entwickelt und auf Dauerfestigkeit untersucht werden und sind die noch bestehenden technischen und wirtschaftlichen Risiken.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie wurden den Mitgliedern des Fachausschusses Strangpressen am 19.09.2018 unter dem Titel „10 Jahre MBH Blockerwärmung – und wie geht es weiter?“ beim Diskussionstag Strangpressen des DGM Deutschen Gesellschaft für Metallkunde e. V. in Minden vorgestellt. Auf der Düsseldorfer Messe ALUMINIUM wurde den Fachbesuchern vom 9. bis 11. Oktober 2018 mit einem Exponat, einem Funktionsmodell des Dauermagnetheizers, die Erwärmung eines Aluminiumzylinders demonstriert. Projektbegleitend wurden drei Unternehmen, die als potenzielle Erstanwender in Frage kommen, die Ergebnisse des Vorhabens und das Konzept des Prototyps präsentiert.

Fazit

Das Ziel der Machbarkeitsstudie, einen Dauermagnetheizer zu entwickeln und dessen Industrietauglichkeit nachzuweisen, wurde erreicht. Bei nur 20% Verlustleistung werden die Treibhausgasemissionen bei heutigem Strommix reduziert und zukünftig, da vollelektrifiziert, vollständig vermieden. Das Entwicklungsergebnis hat einen hohen technischen Reifegrad. Die Verifizierungen zeigen, dass der konzeptionelle Ansatz und die Entwicklung hinsichtlich Umweltauswirkungen, technischer Lösung und Wirtschaftlichkeit als erfolgreich zu bezeichnen ist. Weitere Indizien sind die positive Resonanz der Industrie und die Bereitschaft eines Unternehmens, den Dauermagnetheizer als Erstanwender erproben zu wollen. Noch bestehende technische und wirtschaftliche Risiken resultieren aus der Montage der Magnete und der Magnettrommel. Zur Markteinführung sind die Füge- und Montagetechniken zu entwickeln, ein Prototyp zu realisieren und im Langzeiteinsatz in der Produktion die theoretischen Ergebnisse zu validieren.

I. Inhalt	
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	2
3 Machbarkeitsuntersuchung zum Dauermagnetheizer	6
3.1 Spezifizierung und Voruntersuchungen	6
3.1.1 Voruntersuchungen	7
3.1.2 Spezifizierung/ Anforderungskatalog	8
3.2 Projektierung des Magnetfelderzeugers mit Permanentmagneten	9
3.2.1 Auslegung der Permanentmagnetanordnung	9
3.2.2 Projektierung des Magnetfelderzeugers	12
3.2.3 Beurteilung des Konzeptes	16
3.2.4 Schritte, die nicht zum Erfolg führten	17
3.3 Untersuchung und -bewertung des Konzeptes	18
3.3.1 Magnetfeld	19
3.3.2 Leistungsdeposition	21
3.3.3 Kräfte und Momente	23
3.3.4 Scheiben und Segmente	25
3.3.5 Fertigung und Montage	28
3.3.6 Erwärmungsprozess	29
3.3.7 Thermodynamik und Systemtemperaturen	30
3.3.8 Analytisches Berechnungsverfahren für Variantenkonstruktionen	33
3.4 Engineering und Verifizierung des Lösungsansatzes	35
3.4.1 Konstruktion des Dauermagnetheizers	35
3.4.1.1 Magnettrommel	36
3.4.1.2 Dauermagnetheizer	38
3.4.2 Verifizierung der Ergebnisse	40
3.4.2.1 Technische Bewertung	40
3.4.2.2 Bewertung der Sicherheit	41
3.4.2.3 Energetische Bewertung des Dauermagnetheizers	42
3.4.2.4 Bewertung der Umweltauswirkungen	45
3.4.2.5 Wirtschaftliche Bewertung	46
4 Verbreitungsmaßnahmen	47
5 Fazit	48
6 Literaturverzeichnis	51

II. Verzeichnis der Bilder und Tabellen

Abbildung 1:	Magnete in Halbach-Anordnung; a) kontinuierliche Änderung der Magnetisierungsrichtung nach Halbach; b) Realisierung mit diskreten Magneten mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen; c) Realisierung mit identischen Magneten; d) Realisierung mit polygonalen Magneten zur besserer Raumausfüllung [7]	10
Abbildung 2:	Magnetanordnung und Magnetisierungsrichtung der Magnete, angeordnet in fünf Ringen mit je 40 Magneten, und Magnetflussdichte im Erwärmungskanal	11
Abbildung 3:	Auf die Magnete wirkende Kräfte und Drehmomente aus den Magnetfeldern und den Fliehkräften	13
Abbildung 4:	Resultierende, auf die Magnete wirkende Kräfte und Momente	13
Abbildung 5:	Verschiebungen in mm in radialer Richtung bei a) nicht verklebten und b) verklebten Magneten bei Rotation der Struktur	14
Abbildung 6:	Bei Rotation der Struktur a) 1. Hauptspannung in MPa in den Magneten und b) Vergleichsspannung in MPa im Strukturwerkstoff	14
Abbildung 7:	3. Hauptspannung in MPa in den Magneten a) bei Herstellung der Struktur bei 60°C und Abkühlung auf 20 °C und b) bei Kombination aller Lastfälle	15
Abbildung 8:	Konzeptstudie eines dreiteiligen Magnetfelderzeugers mit Innenlagerung	17
Abbildung 9:	Arbeitsschritte und Methoden zur Entwicklung des Magnetfelderzeugers	19
Abbildung 10:	Magnetflussdichte in Abhängigkeit vom Zentrum der Magnettrommel bzw. über der Bolzen- und Segmentposition	20
Abbildung 11:	Reduktion der Magnetflussdichte durch Verringerung der Magnetmasse durch Weglassen des äußeren oder inneren Rings	20
Abbildung 12:	Stromverteilung im Bolzen	21
Abbildung 13:	Auf den Bolzen wirkendes Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehfrequenz ab 2 Hz für verschiedene Bolzendurchmesser	21
Abbildung 14:	Auf den Bolzen aufzubringende Leistung in Abhängigkeit von der Drehfrequenz ab 2 Hz für verschiedene Bolzendurchmesser	22
Abbildung 15:	Leistungsdichten im Bolzen bei vollständigem und teilweisem Eintauchen in das Magnetfeld	23
Abbildung 16:	Axiale Kräfte auf den Bolzen bei der Beladung der mit 20 Hz rotierenden Magnettrommel	24
Abbildung 17:	Auf einen Magneten wirkende, analytisch und durch FEM berechnete Kräfte und Momente bei der Montage in den Scheiben in Abhängigkeit von der Endposition	24
Abbildung 18:	Extremale Kräfte bei der Montage des letzten der 200 Magnete in Abhängigkeit von der Position in der Scheibe.	24
Abbildung 19:	Axiale abstoßende Kräfte bei der Montage der jeweils letzten Scheibe als Funktion des Scheibenabstandes vom Stapel und in Abhängigkeit von der Anzahl der Scheiben im Stapel bei Montageausrichtung	25

Abbildung 20:	Magnetfügevorrichtung (links unten) mit Magnetzuführeinheit (links oben) und Segmentfügevorrichtung (rechts)	28
Abbildung 21:	Frequenz und Bolzentemperaturen über der Zeit bei Erwärmung mit Frequenzen von 12 Hz und 6 Hz	29
Abbildung 22:	3D-Simulation der Erwärmung des Bolzens über der Erwärmungszeit für eine Endtemperatur von 520 °C.	30
Abbildung 23:	Wärmeübergänge vom Bolzen über den Strahlungsschutzschild zur Magnettrommel für die Konfigurationen 1 und 2	31
Abbildung 24:	Bolzen- und Bauteiltemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Erwärmungszeit von 120 Sekunden für Konfiguration 2	32
Abbildung 25:	Dauermagnetheizer (Seitenansicht) mit Magnettrommel (Mitte hellgrau) im Getriebegehäuse (Mitte dunkelgrau) und eingefahrenem, gespanntem Bolzen (Mitte braun), zwei Motoren (dunkelgrau), zwei Spannschlitten (gelb) mit Hybrid-Klemmwellen (hellgrau), einem Klemmzylinder (rot) und einem Verschiebezylinder (dunkelgrau) im Unterbau (blau)	36
Abbildung 26:	Magnettrommel (Schnitt); a) zwei Segmente mit je 4 Koppelscheibe mit Ösen und Gleitringführungen und 130 mm langer Distanzscheibe; b) montierte Magnettrommel mit Lageraufnahmen und Strahlungsschild (blau)	36
Abbildung 27:	Magnettrommel aus zwei gekoppelten Segmenten mit Zahnradscheiben und Schrägkugellagern	37
Abbildung 28:	Antrieb des Dauermagnetheizers	38
Abbildung 29:	Dauermagnetheizer mit Bolzen in Bolzenwechselposition mit Spannschlitten (gelb), Hybridwellen (grau) und Spannzylinder (rot) sowie Bozen (dunkelrot)	39
Abbildung 30:	Streifelfeld der Magnettrommel bis zur 5-Gauss- bzw. 500 μ T-Linie; die Seitenlängen des Quadrates entsprechen 4 m	42
Abbildung 31:	Datenherkunft für den Vergleich der Wirkungsgrade	43
Abbildung 32:	Gesamtwirkungsgrade von Erwärmungsöfen für Aluminiumbillets in Abhängigkeit von der Erwärmungsleistung bei Endtemperaturen von 520 °C ohne Taper	43
Abbildung 33:	Spezifische Energieverbräuche von Anwärmöfen für Aluminiumbillets in Abhängigkeit von der Erwärmungsleistung bei Endtemperaturen von 520 °C	44
Abbildung 34:	Demonstrator eines Dauermagnetheizers	47
Tabelle 1:	Wesentliche Anforderungen an einen Dauermagnetheizer	8
Tabelle 2	Anzahl und Masse der Magnete sowie Preisprognose, Abmessungen und Magnetflussdichte für ein 600 mm langes Segment	11
Tabelle 3:	Temperaturen und Zeiten in Abhängigkeit von der Frequenz bei einer Magnetflussdichte von 750 mT (jeweils beste Ergebnisse der Simulationsreihen)	29

Tabelle 4:	Maximale Bauteiltemperaturen im stationären Zustand für die Konfigurationen 1 bis 5	33
Tabelle 5:	Berechnung der Anwärm- und Ofenleistung und des spezifischen Energieverbrauchs des Dauermagnetheizers mit Konstruktionsdaten	34
Tabelle 6:	Maße und Masse eines Segmentes	36
Tabelle 7:	Berechnete spezifische Energieverbräuche für Erwärmungsleistungen von 2.000 und 3000 kg/h und Reduzierung des Energieverbrauchs durch Einsatz des Dauermagnetheizers	44
Tabelle 8:	Kalkulation der spezifischen CO ₂ -Emissionen für Anwärmöfen bei Erwärmung von Aluminium von 20 °C auf 520 °C bei einer Anwärmleistung von 8.000 kg/h	45
Tabelle 9:	Kalkulation des Angebotspreises für den Dauermagnetheizer ohne kundenseitige Montage beim Endkunden	46

III. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Billet	Buntmetallzylinder, die meist durch Stranggießen urgeformt und auf Länge zugeschnitten nach der Erwärmung auf Umformtemperatur in Strangpressen zu Metallprofilen oder Rohren umgeformt werden
Block	Branchenübliche Bezeichnung für →Billet
Bolzen	Branchenübliche Bezeichnung für →Billet
Dauermagnet-heizer	Industrieofen, kurz Ofen, zur Erwärmung von Billets, primär Aluminium-billets, auf Umformtemperatur mit rotierendem rohrförmigem Magnetfelderzeuger (→Trommel), dessen statisches Magnetfeld mit Permanentmagneten in Halbach-Anordnung erzeugt wird
FARADAY	FEM-Programm zur Lösung von Aufgabenstellungen der INTEGRATED Engineering Software
Flussdichte	Synonym für die magnetische Flussdichte, Einheit Tesla (T)
Gasofen	auch Gasanwärmofen, Industrieofen zur Erwärmung von Billets auf Umformtemperatur durch Direktbeheizung mit Erdgasbrennern, in Einzelfällen mit Propangas
HTS-Spule	Spule mit Wicklungen aus Hochtemperatursupraleitern der ersten (g1) oder zweiten Generation (g2)
Induktions-ofen	Industrieofen zur Erwärmung von Billets auf Umformtemperatur mit wassergekühlter, wechselstrombetriebener Induktionsspule aus Kupferleitern
Magnetfluss-dichte	Synonym für die magnetische Flussdichte, Einheit Tesla (T)

Magnetheizer:	Industrieofen mit →HTS-Spule (g1) zur Erzeugung eines statischen Magnetfeldes und Erwärmung der →Billets durch Rotation, entwickelt in zwei von der DBU geförderten Projekten (ROSINE); Prototyp in der Aluminiumindustrie, ein Magnetheizer zur Enderwärmung von Kupferbolzen in der Kupferindustrie im Einsatz
Scheibe	Aluminiumstruktur mit Aussparungen zur Aufnahme von 200 Magneten in Halbach-Anordnung, Zentralbohrung für die zu erwärmenden Billets und äußeren Ösen zum Verschrauben der Scheiben zu Segmenten und Montage der Maschinenelemente für den Antrieb
Segment	Aus zwölf →Scheiben bestehendes Grundmodul für →Magnettrommel
Struktur	Aufnahmekörper zur Fixierung der Magnete, in der konstruktiven Ausführung als →Scheibe bezeichnet
Trommel	Rotierender Magnetfelderzeuger des →DMH, bestehend aus zwei, ggf. auch mehr →Segmenten, der Lagerung und den Antriebselementen

IV. Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

°C	Grad Celsius, abgeleitete SI-Einheit für die Temperatur
CFX	FEM-Programm zur Lösung strömungs- und wärmetechnischer Aufgabenstellungen der Ansys Inc.
DMH	→Dauermagnetheizer
K	Kelvin, SI-Basiseinheit für die Temperatur
m	Meter, SI-Basiseinheit für die Länge
MBH	Magnet Billet Heater, Synonym für →Magnetheizer
s	Sekunde, SI-Basiseinheit für die Zeit
t	Tonne, Einheit außerhalb des SI-Systems für die Masse
T	Tesla, abgeleitete SI-Einheit für die magnetische Flussdichte $1 T = 1 kg \cdot A^{-1} \cdot s^{-2}$
W	Watt, abgeleitete SI-Einheit für die Leistung
Wh	Wattstunde, Einheit außerhalb des SI-Systems für die Energie

1 Zusammenfassung

Im von der Bültmann GmbH initiierten und als Machbarkeitsstudie konzipierten Projekt, für das die Deutsche Bundesstiftung Umwelt 522.400 EUR (Az: 33181/1) bereit gestellt hat, sollten die technische und wirtschaftliche Machbarkeit sowie die Umweltvorteile eines Dauermagnetheizers (DMH), der Permanentmagnete zur Felderzeugung für die induktive Erwärmung von Aluminium-Billets auf 480 bis 520 °C nutzt, nachgewiesen werden. Das Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik (ZEA) der Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), Mitinhaberin des Patentes für den DMH, war Kooperationspartner. Der Institutsbereich Engineering und Technologie (ZEA-1) hat die wissenschaftlich technischen Untersuchungen durchgeführt. Im Begleitausschuss waren zwei Industriepartner, die Weseralu GmbH & Co. KG, Minden, und die Wieland-Werke AG, Ulm, vertreten.

In der ersten Phase wurden vom ZEA-1 auf Basis der mit den Industriepartnern erarbeiteten Anforderungen mit FEM- und analytischen Methoden die Untersuchungen zu den Magnetfeld-, den mechanischen und den thermischen Eigenschaften sowie zum Betriebsverhalten eines Magnetfelderzeugers mit Permanentmagneten durchgeführt. Seine mechanische und thermische Stabilität wurde nachgewiesen, Detailkonstruktionen erstellt sowie Konzepte zur Fertigung erarbeitet. Die Bültmann GmbH hat in der zweiten Phase auf dem Magnetfelderzeuger und dem Magnetheizer aufbauend den Prototypen konstruiert, Lieferanten angefragt und den DMH technisch, wirtschaftlich und energetisch beurteilt: der DMH ist der mit Abstand energetisch effizienteste Ofen zur vollelektrischen Erwärmung von Bolzen.

Um den Erwärmungskanal mit 350 mm lichtigem Durchmesser sind 200 zylindrische, angefastete Permanentmagnete in Halbach-Anordnung in fünf konzentrischen Ringen angeordnet. Sie werden im Strukturelement, einer 50 mm starken Scheibe aus hochfestem Aluminium, in Aussparungen formschlüssig verklebt und erzeugen ein quasi homogenes Magnetfeld mit 624 Millitesla. Zwölf Scheiben werden zu einem 600 mm langen Segment verschraubt. Zwei mit 140 mm Abstand starr gekoppelte Segmente bilden den Magnetfelderzeuger. Beim Prototypen des DMH wird dieser über Außenzahnkränze mit zwei Motoren drehzahlregelt in Rotation versetzt. Im mit Spannschlitten festgesetzten und in das Magnetfeld eingefahrenen Bolzen erwärmen die fließenden Wirbelströme einen Bolzen mit \varnothing 310 mm in 65 Sekunden auf Endtemperatur. Mit Nebenzeiten beträgt die Erwärmungsleistung noch ausreichende 34,2 (gefordert 42) Bolzen je Stunde.

Mit dem DMH werden gegenüber Induktionsöfen 37 % und gegenüber Magnetheizern 15 % an elektrischer Energie eingespart. Je Strangpressen mit 4.235 t Jahresproduktion könnten 550 MWh/a bzw. 204 t/a CO₂ entfallen. Beim ermittelten Preis von 1,55 Mio. EUR (gefordert 1,4 Mio. EUR) ist hier die Wirtschaftlichkeit des DMH gegeben. Bei branchenüblicher Vorerwärmung in Gas- und Enderwärmung in Induktionsöfen ist der DMH bei einem Verhältnis von Strom- zu Erdgaspreis von etwa 2 zu 1, heute noch 3 bis 3,5 zu 1, wettbewerbsfähig. Für die Entscheidung zum Bau des Prototypen sind die bei Kräften bis 80 kN kritische Montage der Magnete und Segmente und deren Preise weiter zu konkretisieren.

2 Einleitung

Aluminium, das zweithäufigste Element in der Erdkruste, hat als Werkstoff eine hohe Bedeutung erlangt. Seine Vorteile, geringe Dichte, günstige Festigkeitseigenschaften, gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit, sehr gute Duktilität und Umformbarkeit oder Korrosionsbeständigkeit, machen Aluminium zu einem idealen Konstruktionswerkstoff. Wichtige Branchen sind die Bauindustrie (Fassaden, Fenster, Türen), die Solarindustrie (Rahmenprofile, Unterkonstruktionen), die Sektoren Automotive und Transport (Flugzeuge, LKW, Schienenfahrzeuge, Schiff- und Bootsbau und stark steigend e-Mobility für Batterierahmenkonstruktionen und Profile). In Deutschland wurden 2018 1,29 Mio. t Rohaluminium mit einem Recyclinganteil 59 % erzeugt und 3,48 Mio. t verarbeitet, davon 53,3 % zu Walzfabrikaten, 29,3 % zu Formgussteilen und 0,4 % zu sonstigen Produkten. 592.790 t/a, entsprechend 17,0 %, wurden 2018 in Strangpressanlagen zu Halbzeugen weiterverarbeitet und davon 97,4 % zu Profilen [1].

Das Strangpressen ist ein Warmumformverfahren, genauer eine Druckumformung, zur Herstellung von Halbzeugen, auch großer Längen, wie Stäbe, Rohre, Drähte und Profile. Beim Strangpressen werden zylindrische Presslinge, Billets, Bolzen oder Blöcke genannt, in den Rezipienten (Zylinder) eingebracht, und mit einem Stempel (Kolben) durch eine Matrize (formgebendes Werkzeug) gepresst. Verarbeitet werden neben Aluminium- auch Kupfer- und Messinglegierungen sowie Edelstähle zu Nahtlosrohren. Positive wirtschaftliche Aspekte sind der hohe Umformgrad und die durch vergleichsweise geringe Werkzeugkosten und den einfachen Werkzeugtausch mögliche hohe Produktvielfalt bzw. Flexibilität in der Fertigung.

Per Strangpressen lassen sich aus Aluminium nahezu alle funktions- und festigkeits-optimierten Profilquerschnitte, auch asymmetrische oder Mehrkammerhohlprofile, mit Endkontur und Endoberflächenqualität herstellen, so dass folgende mechanische Bearbeitungsschritte entfallen. Die Strangpressprofile werden nur durch Sägen auf Länge zugeschnitten, wobei über die Bolzenlänge der Verschnitt optimiert wird. Abschließend werden bei den häufigsten verarbeiteten Aluminiumknetlegierungen der Gruppe 6xxx, einer Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierungen mit hohen Festigkeitskennwerten und guten Oberflächenqualitäten, der ausgehärtete Zustand und die Endfestigkeit durch eine ca. 30-minütige Warmauslagerung bei 175 bis 185 °C erreicht.

Das Profildgewicht je Meter, Profillänge und Werkstoff bestimmen die Bolzengröße und die Abmaße und Presskraft der Strangpresse. Wichtige qualitätsbestimmende Prozessparameter sind die Pressgeschwindigkeit und vor allem die Bolzentemperatur. Dem Ziel einer möglichst konstanten Bolzentemperatur während des Pressens widerspricht der Prozess, denn die über die Presskraft eingebrachte Energie wird in Wärme umgesetzt und erwärmt den Bolzen während des Pressens. Um diesen Effekt zu kompensieren wird ein axiales Temperaturprofil bei möglichst konstanter radialer Temperatur über dem Querschnitt gefordert. Die „Umformwärme“ erwärmt den kühleren Teil des Bolzens beim

Pressen idealerweise so, dass ein quasi isothermer Pressvorgang erreicht wird. Der axiale Temperaturgradient wird als Taper bezeichnet und beeinflusst die Qualität der Profile und die Produktivität der Strangpressen.

Die Umform- bzw. Bolzentemperatur für Aluminiumlegierungen beträgt 480 °C, in Ausnahmen auch bis zu 520 °C. Als Temperaturdifferenz für den Taper sind bis zu 10 °C je 100 mm üblich. Bei einer spezifischen Wärmekapazität von 0,2498 kW/t K entsprechend 896 kJ/t K laut Werkstoffdatenblättern bzw. Literatur oder 0,2513 kW/t K entsprechend 904,7 kJ/t K nach Angaben der Presswerke ist die Energie zur Bolzenerwärmung ein wesentlicher Kostenfaktor und mit entsprechendem CO₂-Ausstoß verbunden.

Bis Mitte der 1990er Jahre wurden stranggegossene Blöcke in Gasanwärmöfen auf Umformtemperatur erwärmt und mit Warmscheren auf Bolzenlänge geschnitten. Mit Einführung der induktiven Erwärmung in Einbolzenöfen mit wechselstrombetriebenen Induktionsspulen wurden die gezielte Bolzenerwärmung mit Taper und damit die heutigen Profilvarianten und –qualitäten bei hoher Produktivität erst möglich. Heute werden folgende Öfen bzw. Verfahren eingesetzt bzw. angeboten:

- Gasanwärmöfen zur Vollerwärmung (nur noch in Ausnahmen)
- Induktionsofen als Einbolzenofen zur Vollerwärmung (wenig verbreitet)
- Kombinierte Erwärmung mit Gasanwärmöfen zur Vorerwärmung und Induktionsofen zur Enderwärmung mit Taper, und zwar
- parallel mit einem Gasanwärmofen und einem oder mehreren Einbolzen-Induktionsofen (am weitesten verbreitet)
- in Linie entweder mit hintereinander angeordnetem Gasanwärm- und Induktionsofen (weit verbreitet) oder mit Gas-Induktions-Inline-Ofen, bei dem beide Wärmequellen integriert sind (neuste Entwicklung, in Verbreitung)
- Magnetheizer mit Hochtemperatur-Supraleiterspule zur Erzeugung eines statischen Magnetfeldes und motorisch in Rotation versetzten Bolzen zur Erzeugung von Wirbelströmen zur Bolzenenderwärmung durch Induktion (zwei in Betrieb)
- Magnetheizer, bei denen permanentmagnetbestückte Magnetfelderzeuger unterschiedlicher Bauform mit statischen Magnetfeldern relativ zum Bolzen rotieren und Wirbelströme nur zur Bolzenenderwärmung (Taper) induzieren (Neuentwicklungen, Pilotanwendungen)

Die mit dem Primärenergieträger Erdgas betriebenen Gasanwärmöfen weisen zwar hohe Prozesswirkungsgrade bis 68 % auf, haben aber durch die Nebenaggregate und die Prozessführung (Erwärmung und Temperaturhaltung bei großen Massen) den höchsten spezifischen Energiebedarf von über 250 kWh/t bei einem Wirkungsgrad¹ von 50² %. Bei in Deutschland 3- bis 3,5-fachem, weltweit 2- bis 3-fachem Strom- zu Erdgaspreis

¹ der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis aus der werkstoffspezifisch erforderlichen Wärmeenergie (Wärmekapazität) im Verhältnis zur im Betrieb der Anlagen eingebrachte Energie; der Wirkungsgrad ist von der erwärmten Masse je Zeiteinheit und der Endtemperatur abhängig

² die angegebenen Wirkungsgrade wurden aus Angaben der Energieverbräuche von Strangpressenbetreibern berechnet für eine Erwärmung von 8.500 kg Aluminium je Stunde auf 520 °C

sind Gasanwärmöfen am kostengünstigsten. Wechselstrombetriebene Induktionsöfen werden meist als Einbolzenöfen sowohl zur Voll- als auch Enderwärmung eingesetzt und ermöglichen eine gute Temperaturführung im Bolzen und einen Taper, verursachen jedoch strompreisbedingt die höchsten Energiekosten. Durch Rückinduktion und die erforderliche, intensive Spulenkühlung beträgt der Wirkungsgrad ca. 52 %. Üblich ist heute die kombinierte Erwärmung, bei der 80 bis 90 % der Wärmenergie mit Gas- und 10 bis 20 % mit Induktionsöfen eingebracht werden. Der Wirkungsgrad der Kombination ist geringfügig schlechter als der von Gasöfen, bei gleicher Erwärmungsqualität sind die Kosten aber durch den Energiepreismix deutlich niedriger als bei Induktionsöfen.

Der mit Mitteln der DBU (Az: 22577-1/-2) entwickelte Magnetheizer nutzt Vorteile der induktiven Erwärmung bei reduzierten Verlusten. Eine HTS-Spule erzeugt ein statisches Magnetfeld in dem der Bolzen motorisch in Rotation versetzt wird. Als Folge der induzierten Spannung fließen Wirbelströme und erwärmen den Bolzen. Durch Änderung der Bolzenlage im Magnetfeld, d. h. Reduzierung der Magnetflussdichte, wird ein Taper aufgebracht. Die Rückinduktion ist vernachlässigbar und die größere Eindringtiefe der Wirbelströme bei maximal 25 Hertz führt zu einer homogenen Temperaturverteilung im Bolzenquerschnitt. Der Wirkungsgrad beträgt ca. 82 %. Seit zehn Jahren ist der Prototyp in der Aluminiumindustrie ununterbrochen im industriellen Einsatz. Die HTS-Technologie ist durch den Übergang von Leitern der ersten (g1) zur zweiten (g2) Generation im Umbruch. Derzeit bietet kein Lieferant HTS-Spule an, weil HTS-Spule und Kryostat neu entwickelt werden müssten und Risiken aus der fehlenden industriellen Erprobung resultierten. Zudem beschränkt die proprietäre Technologie den Einkauf (Single Source).

Vor dem Hintergrund haben die Bültmann GmbH und das ZEA-1 die Idee entwickelt, erstmals ein homogenes Magnetfeld mit Permanentmagneten in Halbach-Anordnung zu erzeugen. Mit dieser Magnetanordnung kann ein mit dem Magnetheizer vergleichbares, quasi homogenes Dipol-Magnetfeld in einem Kreisquerschnitt erzeugt und ein vergleichbarer Erwärmungsprozess realisiert werden. Weitere Vorteile sind der höherer Wirkungsgrad durch Wegfall der Spulenkühlung und ein einfacherer mechanischer Aufbau durch Rotation des Magnetfelderzeugers anstelle nicht ausgewuchteter Bolzen.

Der Einsatz von Permanentmagneten in Multipol-Anordnung bei Bolzenöfen wurde von mehreren Autoren vorgeschlagen und von der Firma Presezzi Extrusion S.p.A., Vimercate, realisiert. Aus der Multipolanordnung der Magnete resultiert ein starkes Magnetfeld an der Bolzenoberfläche und Feldfreiheit in der Bolzenachse, so dass die Magnetflussdichte für die Enderwärmung, aber nicht für die Vollerwärmung von Lager- auf Endtemperatur ausreicht [2], [3], [4].

Ziel des Projektes ist es, die technische Machbarkeit und die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten eines Dauermagnetheizers zu untersuchen und die Umweltrelevanz sowie seine Eignung für den industriellen Einsatz zu bewerten. Dazu ist der Dauermagnetheizer zu konstruieren, der Erwärmungsprozess ist zu untersuchen, zu optimieren sowie der Energieverbrauch und der mögliche Verkaufspreis zu ermitteln. Abschließend ist das Konzept technisch, energetisch und wirtschaftlich für industrielle Einsatzszenarien

zu bewerten. Teilziele sind die Konzeption und Detailkonstruktion eines mit Permanentmagneten bestückten Magnetfelderzeugers und darauf aufbauend die Konstruktion eines Prototyps, der folgende Eckwerte erfüllt:

- permanentmagnetbestückter Magnetfelderzeuger mit einer quasi homogenen magnetischen Flussdichte von 600 bis 800 Millitesla im Erwärmungskanal mit 320 mm lichtem Durchmesser und 1 m Länge
- Erwärmung von 40 Bolzen je Stunde von 20 °C auf 480 °C mit einem Taper
- wartungsarme Konstruktion mit hoher Lebensdauer (> 10 Jahre) und weitgehend standardisierten Komponenten (no single source)
- Investitionskosten bzw. Angebotspreis von maximal 1.400.000 EUR
- Ableitung eines möglichst analytischen Dimensionierungsverfahrens mit Ermittlung der Erwärmungsleistung für Variantenkonstruktionen

Dazu sind folgende Arbeitsschritte erforderlich

- Spezifizierung und Voruntersuchungen mit Erfassung der betrieblichen Anforderungen, Erfassung vorhandenen Wissens mit Kennwerten realisierter Anwärmmöfen und ggf. Feldmessungen an Magnetheizern sowie abschließender Erstellung einer Spezifikation
- Projektierung des Jochs mit Permanentmagneten mit Auslegung und Design der Permanentmagnet-Anordnung, der Magnetgröße und polygonalen -kontur sowie Auslegung der tragenden Struktur (im Antrag Joch) zur Aufnahme und Fixierung der Magnete unter Verwendung von FEM-Methoden
- Untersuchung und Bewertung des Konzeptes mit FEM-Analysen zur Wirkung der Magnetfelder im Bolzen und in Bauteilen (resultierende Kräfte, Wärmeeintrag), zum Energieeintrag und den resultierenden Temperaturprofilen im Bolzen sowie Erarbeitung eines praxistauglichen Dimensionierungsverfahrens und abschließender Bewertung des Konzeptes
- Engineering und Verifizierung des Lösungsansatzes mit
- Detailkonstruktion des Magnetfelderzeugers und Untersuchung und Optimierung seiner Strukturfestigkeit und Ermittlung der Herstellkosten
- Konstruktion des Dauermagnetheizers mit Antrieb des Magnetfelderzeugers und der Bolzenklemmung sowie Ermittlung der Gesamtkosten
- Verifizierung der Ergebnisse, konkret des Dimensionierungsverfahrens, des Magnetfeldes und Erwärmungsprozesses, der energetischen und Umweltvorteile sowie der Wirtschaftlichkeit des Dauermagnetheizers

Als Projektergebnisse sollen die Konstruktion des Dauermagnetheizers, das Dimensionierungsverfahren für Variantenkonstruktionen, eine Kalkulation sowie eine Gesamtbewertung, auch als Basis für die Entscheidung zum Bau des Prototyps, vorliegen.

3 Machbarkeitsuntersuchung zum Dauermagnetheizer

Aufgabenstellungen und Ziele sind die Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und den Umweltauswirkungen, speziell die CO₂-Emissionen, sowie die Bewertung der Wirtschaftlichkeit und der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten eines Dauermagnetheizers.

Die ursprünglich geplanten Arbeitsschritte

1. Spezifizierung und Voruntersuchungen
2. Projektierung des Jochs mit Permanentmagneten
3. Untersuchung und Bewertung des Konzeptes aus technischer Sicht
4. Engineering und Verifizierung des Lösungsansatzes

konnten in der seriellen Form nicht umgesetzt werden.

Nach der Projektierung der Permanentmagnetanordnung, der Struktur zur Aufnahme der Magnete und des Magnetfelderzeugers mit Vorabschätzung der Kosten (2.) wurden in einem iterativen Prozess in mehreren Schleifen die technischen Analysen und Bewertungen zur Machbarkeit (3.) und die Detailkonstruktionen des Magnetfelderzeugers (4.) vorangetrieben. Begleitend mussten dabei die Füge- und Fertigungsoptionen mit jeweiligen Montagevorrichtungen für den Magnetfelderzeuger einbezogen werden.

Das auf der finalen Konstruktion des Magnetfelderzeugers aufsetzende Engineering für den Dauermagnetheizer und dessen abschließende betrieblich-technische, wirtschaftliche und umweltbezogene Verifizierung wurde im Arbeitsschritt 4 durchgeführt.

3.1 Spezifizierung und Voruntersuchungen

Aufgabenstellungen und Ziele des Arbeitsschrittes sind:

- die Konkretisierung der betrieblichen und werkstoffspezifischen Anforderungen,
- die Quantifizierung aller relevanten Leistungsparameter,
- die Arrondierung des Wissensstandes durch ergänzende Untersuchungen und Messungen an Magnetheizern im betrieblichen Einsatz sowie
- die Zusammenfassung in einem Anforderungskatalog

Zur Festlegung aller Anforderungen für die Projektierung des Magnetfelderzeugers, für das Engineering eines Prototypen und dessen Verifizierung und abschließende Bewertung wurden folgende Arbeitsschritte durchlaufen:

- Analyse von Konstruktion, Montage und Betrieb der beiden bisher realisierten und in Betrieb befindlichen Magnetheizer;
- Erfassung der kundenseitigen Bedarfe, Schwerpunkt Aluminiumindustrie, besonders Abmaße der Bolzen und Stückzahlen (Erwärmungsleistung in Bolzen je Stunde);
- Zusammenfassung im Anforderungskatalog und Prüfung im Umlaufverfahren;
- Vorstellung und ausführliche Diskussion der Fakten mit allen Projektbeteiligten.

3.1.1 Voruntersuchungen

Die Analyse basiert auf den beiden im industriellen Einsatz betriebenen Magnetheizern,

- dem bei der Weseralu GmbH & Co. KG, Minden, seit fast zehn Jahren ohne unplanmäßige Stillstände genutzten Magnetheizer zur Erwärmung von 7 Zoll Aluminiumbolzen, Länge 690 mm, im Zwei- oder Dreischichtbetrieb (Antriebsleistung 4 x 90 kW, Magnetflussdichte ca. 600 mT) und
- dem bei der Wieland-Werke AG, Ulm, seit ca. sieben Jahren ohne unplanmäßige Stillstände genutzten Magnetheizer zur Enderwärmung (ab 500 °C) von Kupferbolzen, Durchmesser bis 14 Zoll, Länge bis 1.000 mm, im Dreischichtbetrieb (Antriebsleistung; 4 x 400 kW, Magnetflussdichte ca. 500 mT).

Wesentliche Ergebnisse der Analyse der Konstruktionen und Prozessparameter sind:

- das physikalische Prinzip des Magnetheizers hat sich bewährt, d.h. die geforderten Erwärmungsleistungen werden bei entsprechenden Magnetflussdichten auch im Dreischichtbetrieb bei sieben Produktionstagen je Woche erbracht;
- die Magnetfelderzeugung mit Hochtemperatur-Supraleitern und der konstruktive Aufbau sind nahezu verschleißfrei und im industriellen Einsatz erprobt;
- klare Nachteile sind die Zeitfenster zur planmäßigen Wartung der Kryotechnik und vor allem die fehlenden Hersteller/ Anbieter für HTS-Magnetfelderzeuger;
- die optimale Magnetflussdichte wird bestimmt von den maximalen Spannkraften, die auf die Bolzen übertragen werden können, ohne dass bei den jeweiligen Warmfestigkeiten unzulässige Verformungen (Bombierungen) auftreten und ist damit abhängig vom Werkstoff, dem Durchmesser und der Länge der Bolzen;
- bei Höchstdrehzahl führt eine Drehzahlreduzierung zur Vergrößerung der auf die Bolzen wirkenden Magnetkräfte und Momente und damit zu höheren Spannkraften, so dass bei sinkenden Warmfestigkeiten nur eine Reduzierung der Magnetfeldstärke zielführend ist;
- bei einer Magnetflussdichte von 600 mT treten bei 7 Zoll Aluminiumbolzen keine Verformungen auf (Betriebsdaten Weseralu);
- bei einer Magnetflussdichte von 750 mT ist bei 12 Zoll Aluminiumbolzen mit 1.300 mm Länge deren Warmfestigkeit bei Endtemperatur (520 °C) ausreichend, um Verformungen zu vermeiden; bei kleineren Bolzendurchmessern oder größeren Bolzenlängen ist eine Reduzierung des Magnetfeldes erforderlich;
- bei der Erwärmung von Kupfer und Kupferlegierungen ist, abhängig von den Bolzenabmaßen, eine Reduzierung der Magnetflussdichte ab einer Bolzentemperatur von ca. 800 °C unumgänglich und verlängert die Prozesszeit; bei den geforderten Erwärmungsleistungen ist der Magnetheizer nur bei der Enderwärmung ab 500 °C wirtschaftlich;
- die fehlende Geradheit und die Gusstoleranzen der Bolzen sowie Schrägschnitte beim Ablängen führen bei steigenden Drehzahlen zu zunehmenden Vibrationen;
- die anwenderseitigen Gegebenheiten erfordern eine kompakte Bauweise, besonders bei Ersatzinvestitionen.

Geplante experimentelle Voruntersuchungen an vorhandenen Magnetheizern wie die Vermessung der Magnetfelder waren nicht erforderlich, da die vorliegenden Messungen und Untersuchungen des Labors für Massivumformung [5], der Betreiber der beiden Magnetheizer, die im Projektbeirat vertreten waren, sowie der Bültmann GmbH [6] als valide und ausreichend betrachtet wurden. Stattdessen wurde ein Modell des Dauermagnetheizers als Demonstrator konstruiert und gebaut.

3.1.2 Spezifizierung/ Anforderungskatalog

Die Spezifizierung der Anforderungen basiert auf den o. g. Ergebnissen der Voruntersuchung, den von den Industriepartnern abweichend vom Antrag nach oben korrigierten Bolzenabmessungen sowie den Pressenleistungen der dafür geeigneten Strangpressen.

Die Anforderungen gelten für die Erwärmung von Aluminiumbolzen, Angaben für weitere Werkstoffen dienen der Prüfung der Eignung für deren Erwärmung.

Tabelle 1: Wesentliche Anforderungen an einen Dauermagnetheizer

Bolzenwerkstoff	Aluminium
Bolzenlänge:	max. 1.300 mm
Bolzendurchmesser	max. 12 Zoll / ca. 310 mm
Ringspalt umlaufend	ca. 25 mm
Erwärmungsleistung	bis 42 Bolzen je Stunde in zwei unabhängig betriebenen Magnetfelderzeugern (analog zum Magnetheizer)
Anfangs-/ Endtemperaturen	Aluminium: 20 – 520 °C Kupfer: 500 – 950 °C Messing: 300/400 – 800 °C Kupfer/Nickel: 700 – 1.100 °C
Temperaturhomogenität	+/- 5 K über Bolzenquerschnitt und Bolzenlänge und für Nachfolgebolzen, gemessen 60 s nach Verlassen des Ofens (entspricht Transferzeit zur Strangpresse)
Isolierung/ Schutzschild	warmfest bis 950 °C
Magnetfeldstärke	800 mT, möglichst homogen
Magnetanordnung	Halbach-Anordnung mit optimierter Magnetgeometrie für größtmögliche Raumerfüllung
Magnete	Dipolmagnete, Ø max. 60 mm; keine Alterung bis 80 °C; max. 250 €/kg Magnetwerkstoff verarbeitet
Magnetsegmente	Segmente für modularen Aufbau mit Segmentlängen von 200 – 300 dann 500 dann 200 – 300 mm Bolzenüberdeckung ca. 100 mm mit Inliner (Isolierung/ Verschleiß) sowie Vorhalteunwucht max. Betriebs- kleiner Curie-Temperatur von ca. 80 °C

Tabelle 1 Fortsetzung

Motore	Einzelmotore vorzugsweise bis 400 kW (Kostenprogression)
Drehzahl	max. 1.200 1/min (Kräfte und Grenzdrehzahlen sowie Kosten der Wälzlager)
Bolzenspannung	über Spannwellen, falls im Magnetfeld drehend Rückgriff auf Edelstahl-Keramik-Hybridwellen des Magnetheizers
Arbeitssicherheit	Nach Risikoanalyse beim Bau des Prototypen Konformität mit Maschinenrichtlinie (CE); Sicherheit bei Transport, Vormontage (Wechselwirkungen) und Montagevorrichtung sowie bei Instandsetzungen bei nicht abschaltbarem Magnetfeld
Betrieb	industrietaugliche Ausführung, d.h. robuster und stabiler Prozess besonders vor und nach definierten Wartungsintervallen sowie branchenübliche Ersatzteilversorgung
max. Verkaufspreis	1,4 Mio. EUR ohne kundenseitige Montage und Bolzenmanipulation zwischen Ofen und Strangpresse, davon 0,4 Mio. EUR für zwei Magnetfelderzeuger

3.2 Projektierung des Magnetfelderzeugers mit Permanentmagneten

Die Projektierung des Magnetfelderzeugers, im Antrag noch als Joch und im Folgenden auch Magnettrommel bezeichnet, zielt auf die größtmögliche Raumfüllung der Magnete.

Aufgabenstellungen und Ziele des Arbeitsschrittes sind:

- die Auslegung der Permanentmagnetanordnung mit Ermittlung der Magnetflussdichte und Homogenität im Erwärmungskanal
- die Auslegung der tragenden Struktur zur Fixierung der Magnete
- deren Fügen zu Segmenten mit Auslegung des Magnetfelderzeugers
- die Optimierung und technische und wirtschaftliche Bewertung der Konzepte

Als Methoden wurden FEM-Berechnungen mit ANSYS (Mechanik), CFX (Strömung und Wärme) und FARADAY (IES - Integrated Engineering Software; Magnetfelder), ergänzende analytische Berechnungen sowie Variantenkonstruktionen und Marktanalysen genutzt.

3.2.1 Auslegung der Permanentmagnetanordnung

Bei der Halbach-Anordnung, auch Halbach-Arrays oder *magic rings*, ist der Magnetfluss auf einer Seite erhöht und auf der gegenüberliegenden Seite reduziert. Kreisförmige und sphärische Geometrien sind möglich, die dreidimensionale, zylindrische Anordnung hat technische und energetische Vorteile:

- im Zylinderinneren kann über dem Zylinderquerschnitt ein quasi homogenes Dipolfeld transversal zur Zylinderachse erzeugt werden, während an der Zylinderoberfläche das schon reduzierte Magnetfeld stark abfällt
- in Relation zur eingesetzten Magnetmasse sind die Stärke des Magnetfeldes bzw. die magnetische Flussdichte und die Homogenität des Feldes am größten

- ein wie beim Magnetheizer erforderliches Joch mit Sättigungseffekten ist zur Ausprägung des Magnetfeldes nicht erforderlich, vielmehr resultiert das Dipolfeld aus der Summe der Felder der Einzelmagnete
- durch Form, Größe und Remanenzflussdichte der Magnete sowie deren Anzahl und Anordnung kann eine vorgegebene Feldstärke erreicht und der Magnetmaterial-einsatz optimiert werden

Abbildung 1 zeigt von der idealisierten Halbacht-Anordnung (a) ausgehend die Diskretisierung der Magnete und die für die Raumauffüllung optimierte Oktaeder-Kontur, mit der ein mobiles NMR- und MRT-Spektrometer für Forschungszwecke realisiert wurde.

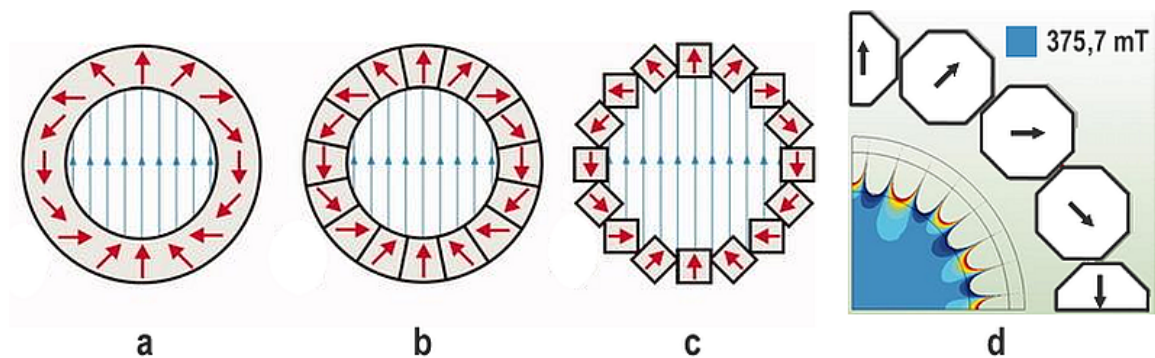


Abbildung 1: Magnete in Halbacht-Anordnung; a) kontinuierliche Änderung der Magnetisierungsrichtung nach Halbacht; b) Realisierung mit diskreten Magneten mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen; c) Realisierung mit identischen Magneten; d) Realisierung mit polygonalen Magneten zur besseren Raumauffüllung [7]

Für ein starkes, homogenes Magnetfeld sind die Magnete in dichtester möglicher Packung in konzentrischen Kreisen um den Erwärmungskanal anzuordnen. Von einer zur nächsten Position im Teilkreis sind die Magnete um den doppelten Betrag der Teilung zu verdrehen, so dass die Magnetisierung der um 180° gegenüber stehenden Magneten gleich ausgerichtet ist. Die Anzahl der Magnete und deren Durchmesser bestimmt die Geometrie der Mandala-ähnlichen Anordnung, wobei der maximale Durchmesser durch die Verfügbarkeit am Markt, derzeit 60 mm, oder bei Sonderanfertigung durch deren Preis begrenzt wird.

Erste FEM-Berechnungen des Magnetfeldes – Abbildung 2 – zeigen, dass mit 200 Magneten eine Magnetflussdichte von ca. 778 mT und somit ein Magnetfeld ausreichender Stärke und Homogenität erreicht werden kann.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Parameterstudie mit zugehörigen FEM-Berechnungen der Magnetflussdichte zusammengefasst. Im Erwärmungskanal mit 375 mm lichtigem Durchmesser (ohne Isolation/ Schutzschild) sind Magnetflussdichten bis 0,95 T möglich. Als am besten geeignete Lösung wurde Variante C mit fünf Ringen mit je 40 Magneten beurteilt.

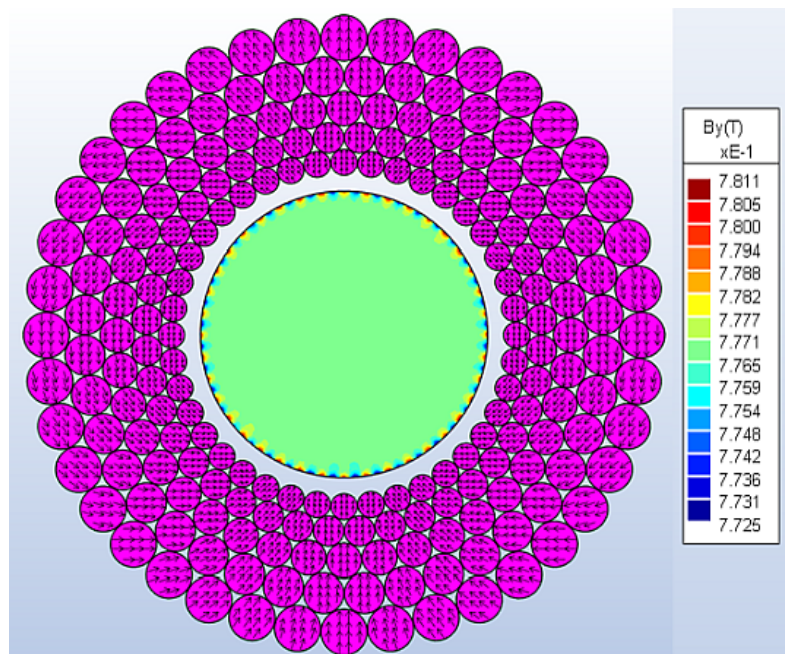


Abbildung 2: Magnetanordnung und Magnetisierungsrichtung der Magnete, angeordnet in fünf Ringen mit je 40 Magneten, und Magnetflussdichte im Erwärmungskanal

Tabelle 2 Anzahl und Masse der Magnete sowie Preisprognose, Abmessungen und Magnetflussdichte für ein 600 mm langes Segment

Variante	Magnet-trägertyp	Anz. Ringe x Anz. Magnete	Anzahl Magnete pro Scheibe	Masse pro Scheibe 60 hoch mit Magneten (ohne Fasen) [kg]	Magnetkosten für Segment 600 lang bei 100 €/kg [€]	Max. Magnet-durchmesser r [mm]	d _i [mm] Magnet-träger	d _a [mm] Magnet-träger	d _{mi} [mm] Magnetring Innen	d _{ma} [mm] Magnetring außen	d _{ma} /d _{mi}	Füllgrad (ohne Fasen)	Theor. max. erzielbare Magnetfeld-stärke [T]
A		4 x 32	128	88,5 Magnetmasse 82,3	82300	53,5	=r _i	=r _a	300	611,8	2,04	0,82	0,72 mit 78% gerechnet
B		5 x 36	180	107 Magnetmasse 99,6	99600	51,65	=r _i	=r _a	300	657,7	2,19	0,83	0,805 mit 79% gerechnet
C		5 x 40	200	184,5 Magnetmasse 156,4	156400	60 =max. Ø	375	900	416,6	837,5	2,01	0,84	0,73 mit 80% gerechnet
D		6 x 48	288	184,1 Magnetmasse 155,9	155900	50,5	375	900	418,3	838	2,00	0,84	0,72 mit 80% gerechnet
E		5 x 40 + 1 x 80	280	218,9 Magnetmasse 188,5	188500 Preisermittlung auf Basis dieser Variante	60 =max. Ø	375	959	416,5	894,7	2,15	0,86	0,82 mit 82% gerechnet
F		7 x 48	336	240,9 Magnetmasse 208,6	208600	56,5	375	996	416,9	935,7	2,24	0,85	0,85 mit 81% gerechnet
G		2 x 32 + 6 x 64	448	279,9 Magnetmasse 244,5	244500	52,6	375	1058	417	998	2,39	0,85	0,92 mit 81% gerechnet
H		5 x 40 + 3 x 80	440	299,3 Magnetmasse 263,4	263400	60 =max. Ø	375	1085	416,6	1024,9	2,46	0,855	0,95 mit 81,5% gerechn.
I		7 x 48 + 1 x 96	432	275,5 Magnetmasse 241,5	241500	56,5	375	1048,6	417	988,6	2,37	0,856	0,92 mit 81,6% gerechn.

Die Eignung von Variante C in Tabelle 2 begründet sich wie folgt:

- der lichte Innendurchmesser der Struktur von 375 mm kann realisiert werden
- die theoretische maximale Magnetflussdichte von 0,73 T ist zur Erwärmung von Aluminium ausreichend; bei höheren Magnetflussdichten mit höheren, auf den Bolzen wirkenden Momenten müsste das Magnetfeld bei höheren Temperaturen reduziert werden, um plastische Verformung oder ein Schlupf an den Spannbacken zu vermeiden
- die Anzahl der Magnete, die auch die Kosten der Fertigung der Struktur und die Montage der Magnete bestimmt, ist unter den geeigneten Varianten am niedrigsten
- die Kosten für die Magnete sind im Vergleich mit den anderen geeigneten Varianten am niedrigsten

Durch die starken Magnetfelder der Neodym-Magnete treten zwischen ihnen bei der erforderlichen Positionierung in Zwangslage hohe Kräfte und Momente auf, so dass diese nur mit Vorrichtungen und Handhabungshilfen in der Struktur positioniert werden können und fixiert werden müssen. Die erforderliche Verdrehssicherung darf einen maximalen Verdrehwinkel von +/- 2° zulassen.

3.2.2 Projektierung des Magnetfelderzeugers

Aufbauend auf der Anordnung in konzentrischen Kreisen und einem lichten Innendurchmesser von 375 mm wurde eine scheibenförmige Struktur konstruiert, die durch Stege getrennt die im Konzeptstadium noch zylindrisch ausgeführten Magnete aufnimmt. Als Werkstoff wurde Aluminium gewählt, da ferromagnetische Werkstoffe aus den o. g. Gründen kontraproduktiv wären.

Zur Dimensionierung der Struktur wurden die auf sie wirkenden axialen und radialen Kräfte und Momente aus

- der Wechselwirkung der Magnete in Zwangslagen untereinander,
- den Wechselwirkungen der Magnete mit dem Magnetfeld der im Bolzen induzierten Stromschleife beim Ein- und Ausfahren des Bolzens sowie bei Rotation der Struktur,
- den Zentrifugalkräften bei Rotation und
- ggf. den Wechselwirkungen mit benachbarten Strukturen, primär bei Rotation

definiert und quantifiziert.

Die längenabhängigen, radialen und axialen Kräfte (bis 7 N/mm) und die Momente (bis 1,5 Nm/mm) sind abhängig von der Positionen der Magnete im Teilkreis, die Fliehkräfte bei Rotation (25 bis 128 N/mm) hingegen nur abhängig von der Drehzahl - Abbildung 3.

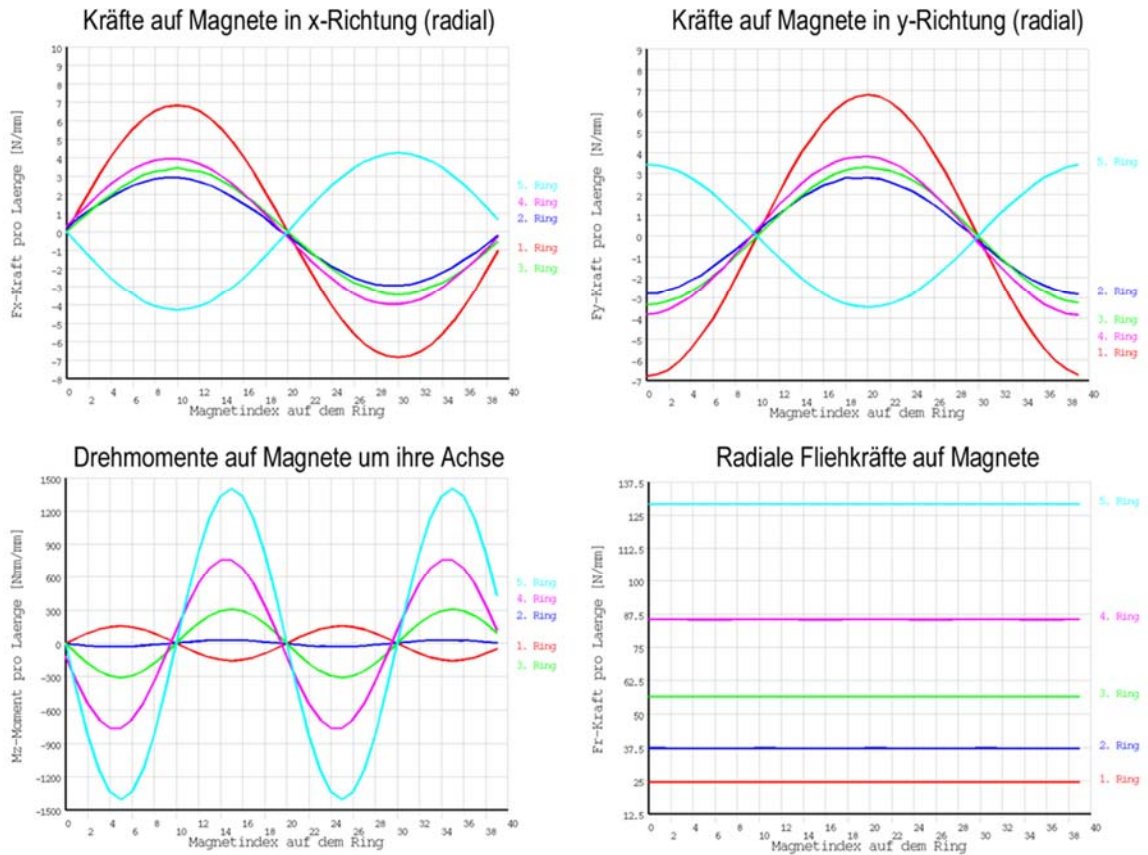


Abbildung 3: Auf die Magnete wirkende Kräfte und Drehmomente aus den Magnetfeldern und den Fliehkräften

Mit den resultierenden Kräften - Abbildung 4 – wurde die Struktur hinsichtlich ihrer Festigkeiten und Verformungen untersucht.

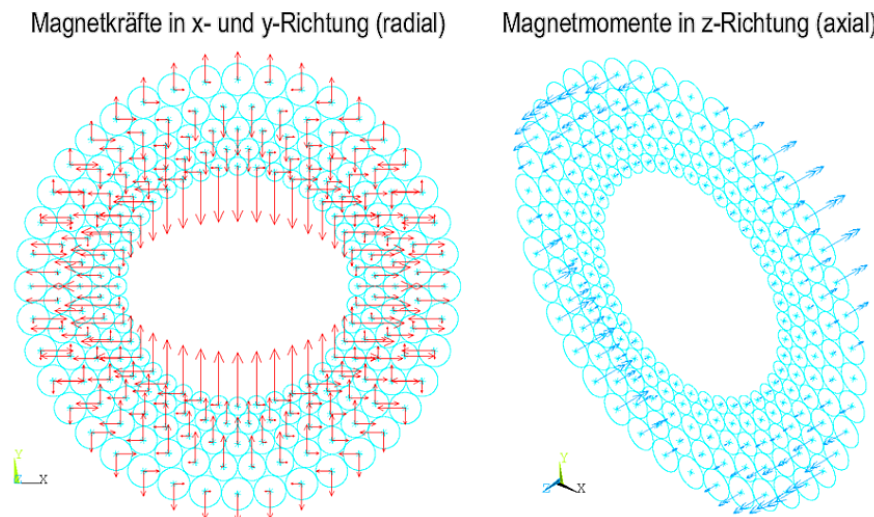


Abbildung 4: Resultierende, auf die Magnete wirkende Kräfte und Momente

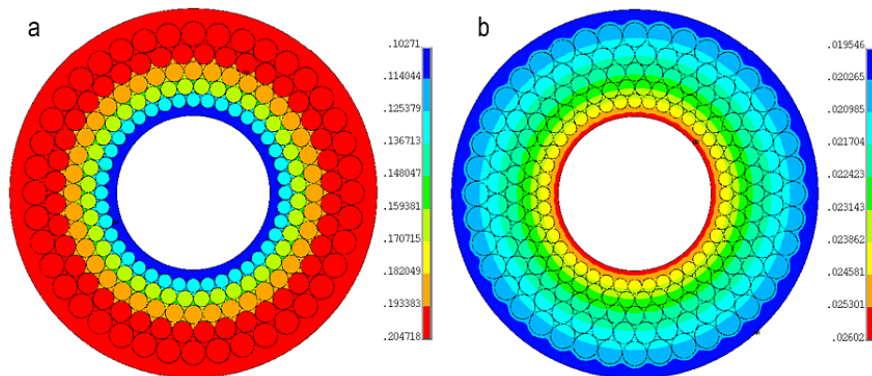


Abbildung 5: Verschiebungen in mm in radialer Richtung bei a) nicht verklebten und b) verklebten Magneten bei Rotation der Struktur

Bei nicht verklebten Magneten treten in radialer Richtung unzulässig hohe Verformungen auf - Abbildung 5 a; durch eine kraftschlüssige Verklebung werden die Magnete zum tragender Teil der Struktur und die Verschiebungen werden auf den Innenradius begrenzt - Abbildung 5 b. Für die tangentialen Verschiebungen gilt tendenziell das gleiche.

Bei in der Struktur verklebten Magneten werden bei Rotation im inneren Ring die zulässigen Spannungen bei den Magneten und in den Stegen des Strukturwerkstoffs überschritten - Abbildung 6

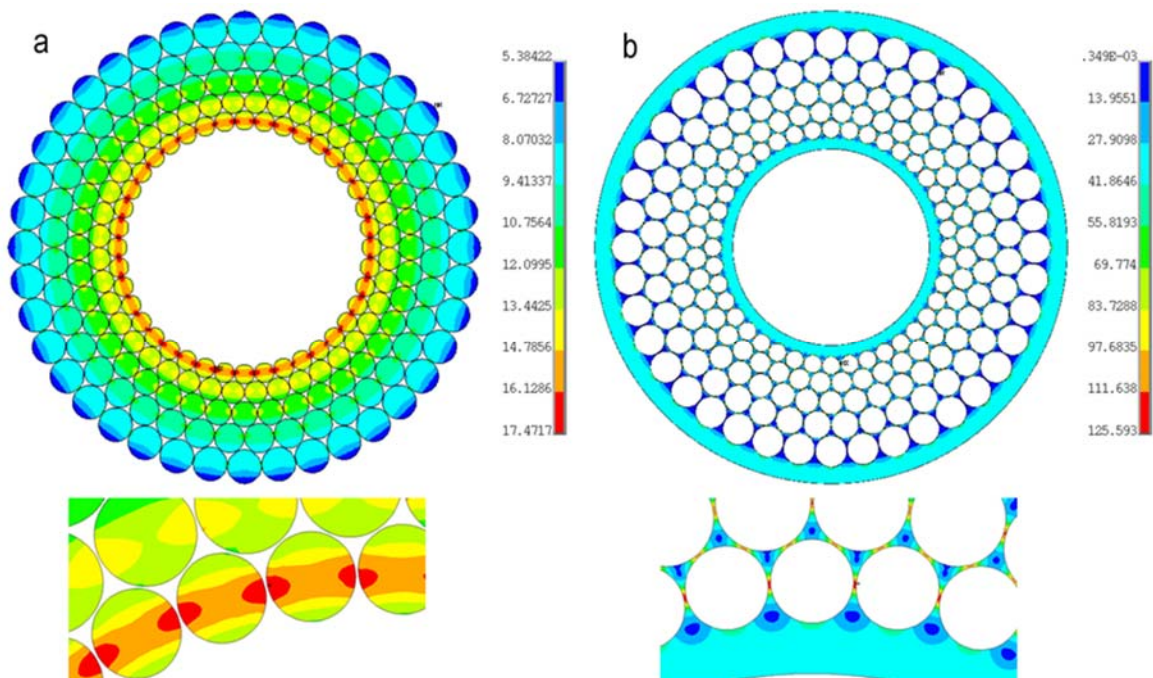


Abbildung 6: Bei Rotation der Struktur a) 1. Hauptspannung in MPa in den Magneten und b) Vergleichsspannung in MPa im Strukturwerkstoff

Auch in den Klebstoffspalten werden, wie bei den Magneten, im inneren Ring die für den Klebstoff zulässigen Spannungen überschritten.

Die Magnetwerkstoffe und der Aluminiumwerkstoff der Struktur haben unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten, so dass beim Übergang auf Betriebstemperatur und anschließender Abkühlung im Stillstand zusätzliche Spannungen auftreten, die zudem von den bei der Verklebung herrschenden Bauteiltemperaturen abhängen.

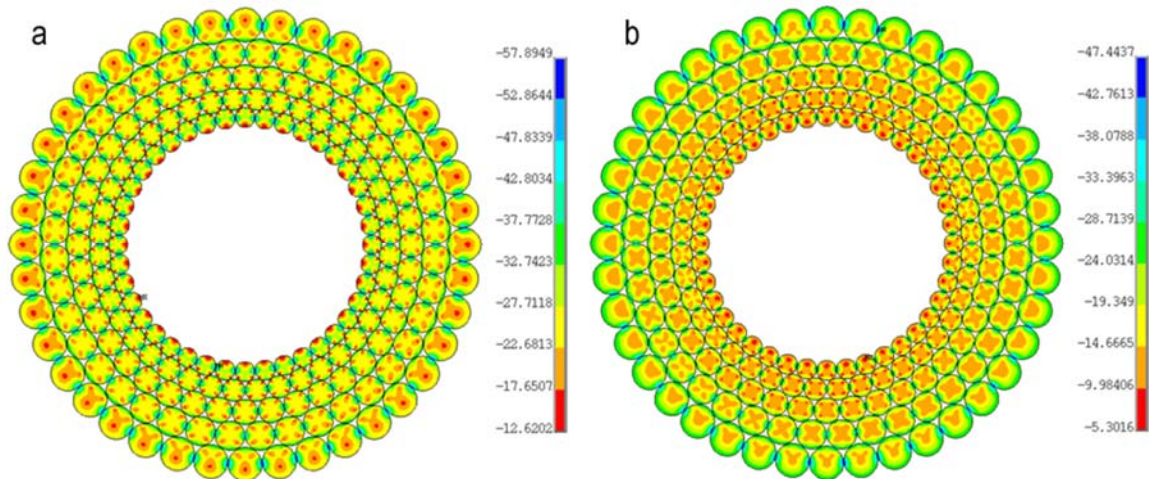


Abbildung 7: 3. Hauptspannung in MPa in den Magneten a) bei Herstellung der Struktur bei 60°C und Abkühlung auf 20 °C und b) bei Kombination aller Lastfälle

Die Berechnungen zeigen, dass im günstigsten Fall, d. h. bei Herstellung bzw. Verklebung bei 60°C, entsprechend der erwarteten Betriebstemperatur, und anschließender Abkühlung auf 20 °C die Magnete besonders im äußeren und inneren Ring an den Kontaktstellen (blau) die größten Druckspannungen ertragen müssen - Abbildung 7 a. Bei der so gefertigten Struktur bauen sich die Druckspannungen im Betrieb bei Rotation zwar ab, die Spannungsspitzen treten aber an den gleichen Stellen auf - Abbildung 7 b.

Die Stärke bzw. Dicke der Struktur wird aus Gründen der mechanischen Fertigung und der Beschaffung (Standardblechdicken) auf 50 mm festgelegt. Als Fertigungsverfahren für die Struktur wird das Fräsen gewählt, das bei den erforderlichen Freiheitsgraden in der Formgebung die notwendigen Toleranzen gewährleistet.

Zum Fügen der Magnete in der Struktur wird das Kleben favorisiert. Der Kraft- und Formschluss liefert die erforderliche mechanische Stabilität sowie die Spielfreiheit und verhindert den mechanischen Verschleiß an den Magneten, der sonst bei jeder Umdrehung durch die Wechselbeanspruchungen auftreten würde. Das Bauteil wird als Scheibe bezeichnet.

Zum Fügen der 12 Scheiben zu 600 mm langen Modulen, im Folgenden Segmente, sind ein innerer und ein äußerer Kranz mit Gewindestangen vorgesehen (siehe Abbildung 26).

Analytische und FEM-Berechnungen der stationären Wärmeübergänge bei Stillstand des Magnetfelderzeugers und eingefahrenem 12 Zoll-Kupferbolzen mit einer Oberflächentemperatur von 1000 °C, der kritischsten Notfallsituation, zeigen, dass mit einer Isolierung ein Überschreiten der Curie-Temperatur der Magnete in der Struktur sicher verhindert werden kann. Der analytisch berechnete Wärmestrom von 2.480 W weicht nur unwesentlich

von den FEM-Berechnungen mit ANSYS WB - zweidimensional 2.394 W, dreidimensional 2.322 W – und mit CFX – dreidimensional 2.375 W - ab. Die analytisch berechneten Oberflächentemperaturen erreichen im Erwärmungskanal 67 °C und bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C an der Struktur außen 34 °C. Die numerisch berechneten Temperaturen sind 2 °C bzw. 1 °C niedriger.

Die in der Berechnung berücksichtigte Isolierung hat die Funktion eines Strahlungsschutzschildes und besteht aus drei konzentrisch angeordneten Edelstahl-(Inconel)-Mantelrohren, die stirnseitig verbunden und geschlossen sind. Die Hohlräume stehen unter Vakuum. An den Rohroberflächen fallen die analytisch berechneten Temperaturen von 991 °C über 792 °C auf 221 °C ab.

Durch Selbstkühlung bei Rotation sinken bei einer Kühlleistung von ca. 700 W die numerisch berechneten Oberflächentemperaturen der Struktur im Erwärmungskanal um 10°C auf 55 °C, bei aktiver Kühlung mit einer Kühlleistung von 2.100 W, entsprechend einen Luftmassenstrom von 0,07 kg/s, auf 30 °C.

Der Vergleich der Ergebnisse der analytischen und FEM-Berechnungsverfahren zeigt, dass wo möglich, die weniger zeitaufwändigen, analytischen Methoden ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

Der geforderte modulare Aufbau des Magnetfelderzeugers aus drei unabhängig angetriebenen Modulen musste, wie in 3.2.4 begründet, aufgegeben werden. Als Länge für die Segmente, die synchron drehen müssen, werden 600 mm festgelegt. Mit zwei Segmenten und einem Spalt von 100 bis 200 mm - (siehe Abbildung 26), in den die transversalen Streufelder reichen, kann über der geforderten Bolzenlänge von 1.300 mm ein ausreichendes Magnetfeld erzeugt werden.

3.2.3 Beurteilung des Konzeptes

Das Konzept des Magnetfelderzeugers aus zwei Segmenten mit lichten Durchmessern von 375 mm und je 600 mm Länge ist geeignet, Aluminiumbolzen auf 520 °C zu erwärmen, da

- mit Permanentmagneten ein quasi homogenes Dipol-Magnetfeld mit einer zu den Magnetheizern vergleichbaren Magnetflussdichte aufgebaut werden kann
- eine Struktur aus Aluminiumplatten aus handelsüblichen Legierungen mit höherer Festigkeit bei entsprechender Dimensionierung als Magnetträger geeignet ist und alle geforderten Geometrien gefräst werden können
- zur Herstellung der Scheiben die Verklebung der Magnete in der Struktur erforderlich und bei entsprechender Kleberauswahl auch möglich erscheint
- die primär durch Strahlung übertragene Wärme von den heißen Bolzen auf den Magnetträger mit einem Strahlungsschutzschild abgeschirmt werden kann und die auftretenden Temperaturen in den Segmenten die Magnete nicht schädigen
- der Magnetfelderzeuger aus zwei synchron drehenden Segmenten, jeweils aus verschraubten Scheiben aufgebaut, die geforderten Bolzenabmessungen abdeckt
- die angebotsbasierte Kalkulation den geforderten Kostenrahmen nicht überschreitet

Als Schwerpunkte bei der Detailkonstruktion haben sich die Dimensionierung der Struktur sowie die Konkretisierung der Verdrehsicherung und die Verklebung der Magnete herauskristallisiert. Die Ergebnisse der wärmetechnischen Berechnungen müssen durch transiente Berechnungen mit zeitlicher Berücksichtigung der betrieblichen Prozesse konkretisiert und anstelle des Vakuums alternative Isolierungen identifiziert werden.

3.2.4 Schritte, die nicht zum Erfolg führten

Zur Beurteilung der Fertigungsoptionen wurden verschiedene Fertigungsalternativen untersucht. Als nicht realisierbar erwies sich die Herstellung der Scheiben aus einzelnen, durch Strangpressen gefertigten symmetrischen Kreissegmenten oder gebogenen kreissegmentartigen Bauteilen, die dann zu einer Scheibe gefügt werden sollten. Die Zahl der erforderlichen Varianten war zu groß und die geforderten Toleranzen können nicht erreicht werden.

Zur Herstellung der Segmente aus 50 mm starken Aluminiumplatten wird das Fräsen favorisiert, da das Wasserstrahlschneiden nur Durchgangsbohrungen mit zudem zu großen Toleranzen zulässt.

Das untersuchte dreilagige Strahlungsschutzschild mit Vakuum in den Hohlräumen ist aus thermodynamischer Sicht geeignet, aber nicht industrietauglich, da die Erstellung und Aufrechterhaltung des Vakuums zu große Risiken hinsichtlich Stillständen birgt. Gleiches gilt für die alternativ untersuchte Füllung mit Krypton.

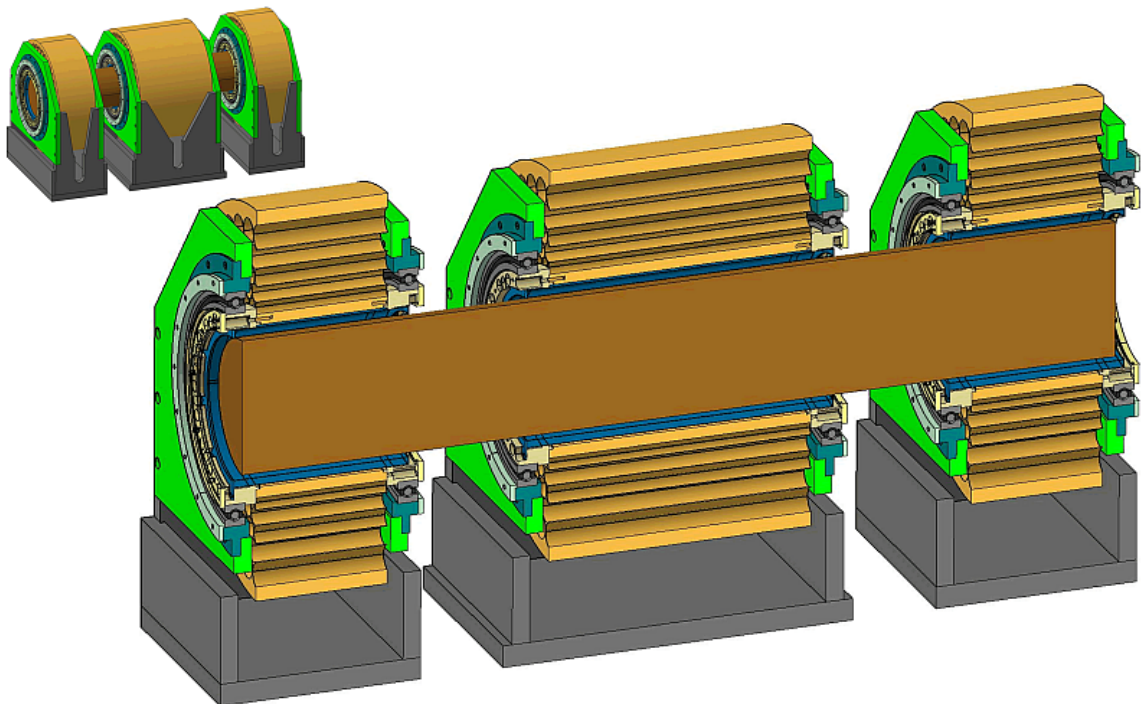


Abbildung 8: Konzeptstudie eines dreiteiligen Magnetfelderzeugers mit Innenlagerung

Entsprechend der ursprünglichen Anforderung wurde der Aufbau des Magnetfelderzeugers mit drei Segmenten in unterschiedlichen Anordnungen und Lagerungen (ein- und zweiseitige, Innen- und Außenlagerungen) untersucht. Aus unabhängig voneinander rotierenden, drehzahlgeregelten Segmenten - Abbildung 8 - resultieren mehrere Vorteile.

Bei gegenläufiger Rotation würden sich die Drehmomente auf den Bolzen aufheben, was bei höheren Temperaturen und reduzierten Warmfestigkeiten niedrigere Einspannkräfte oder höhere Leistungsdepositionen ermöglichen würde und über differenzierte Drehzahlen wären axiale Temperaturgradienten und ein Taper möglich.

Die Konzepte mit dreiteiligen Magnetfelderzeugern wurden nicht weiter verfolgt:

- bei Drehzahldifferenzen werden in den Stirnflächen der Segmente Spannungen induziert, deren berechnete Wirbelströme die Segmente unzulässig erwärmen und zur Entmagnetisierung der Permanentmagnete führen würden
- Wälzlager, deren Durchmesser etwa dem des Erwärmungskanals entspricht, sind zwar in kostengünstigen Standardausführungen mit ausreichenden Grenzdrehzahlen verfügbar, allerdings ist das auf die Wälzkörper wirkende Streufeld so groß, dass die berechneten Wirbelströme in den Wälzkörpern und Lagerringen zu nicht akzeptablen Temperaturen führen würden
- die Wälzlager wären bei nicht synchron drehenden Segmenten starken axialen Wechselbeanspruchungen ausgesetzt, da bei einem Drehwinkelversatz von 180° die Kräfte bei 100 mm Modulabstand zwischen $\pm 22,5$ kN und bei 200 mm Modulabstand zwischen $\pm 8,8$ kN sinusförmig wechseln würden
- bei den o. g. Abständen würden die wirkenden Drehmomente mit einem Drehwinkelversatz von 90° zwischen 0 kNm und 2,2 kNm bzw. 0,9 kNm schwanken und den Rundlauf der Segmente beeinträchtigen

3.3 Untersuchung und -bewertung des Konzeptes

Aufgabenstellungen und Ziele des Arbeitsschrittes sind:

- die Ermittlung aller konstruktionsrelevanten Parameter wie Kräfte und Momente zwischen den Komponenten sowie der auftretenden Streufelder
- die Detailkonstruktion des Magnetfelderzeugers mit Nachweis der mechanischen Festigkeit und thermischen Stabilität mit FEM-Methoden
- die Ermittlung der Leistungsdeposition und der Temperaturverläufe im Bolzen mit zwei- und dreidimensionalen FEM-Berechnungen und Optimierung des Leistungseintrages
- die Erarbeitung eines analytischen Berechnungsverfahrens für Variantenkonstruktionen

Als Methoden werden Variantenkonstruktionen mit Bewertung der Konstruktionsalternativen sowie analytische und FEM-Berechnungen für die Magnetfelder (FARADAY), für die Festigkeitsnachweise (ANSYS) und für die thermodynamische Auslegung (ANSYS WB und CFX) genutzt.

In der Konzeptphase wurde bereits deutlich, dass die Magnetfeldberechnungen mit den Konstruktionen und den Festigkeitsuntersuchungen der Struktur und der Segmente und diese wiederum mit der Kontur der Magnete und deren Verklebung eng verknüpft sind und voneinander abhängen.

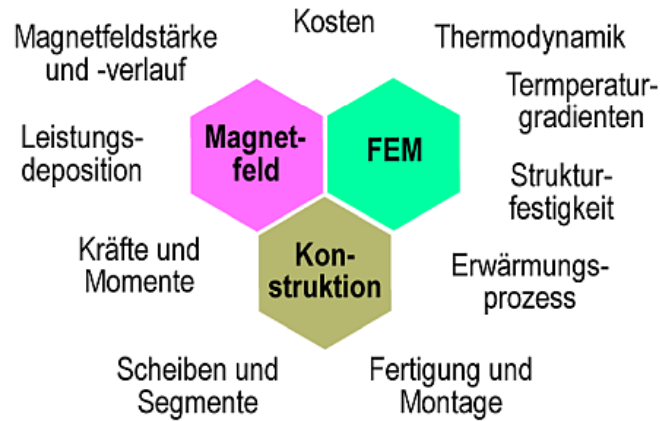


Abbildung 9: Arbeitsschritte und Methoden zur Entwicklung des Magnetfelderzeugers

Die Entwicklung erfordert eine iterative Vorgehensweise mit den in Abbildung 9 genannten Arbeitsschritten, beginnend mit der Berechnung des Magnetfeldes und endend mit der Beurteilung der Kostensensitivität der erfolgversprechenden Konstruktionsalternativen.

Alle Berechnungen wurden mit den spezifizierten Bolzenabmessungen und, sofern nicht anders ausgewiesen, den Materialkennwerten von Aluminium durchgeführt.

3.3.1 Magnetfeld

Für die festgelegte Magnetanordnung, je 40 Magnete in fünf konzentrischen Ringen, wurden per FEM die Magnetflussdichten analog zu 3.2.1 berechnet. Dabei wurden die Ergebnisse aus dem Konstruktionsfortschritt wie Magnete mit Kreisquerschnitt und Fase zur Verdreh-sicherung und Änderungen der Anordnung durch festigkeitsbedingte Änderungen an der Struktur berücksichtigt.

Für die Berechnung des Magnetfeldes der Segmente wurde per FEM die axiale Beein-flussung der Magnetfelder der Scheiben untersucht - Abbildung 10. Die Magnetflussdichte in den 600 mm langen Segmenten beträgt in deren Mitte 0,7 T und fällt zu den Enden hin auf 0,43 T ab. Bei zwei im Abstand von 140 mm gekoppelten Segmenten führen die axialen Streufelder nur zu einer Feldschwächung auf 0,5 T in der Mitte der Koppelstelle.

Im Erwärmungskanal des Magnetfelderzeugers herrscht eine effektive magnetische Flussdichte von 624 mT, die sich als integraler Wert über der Bolzenposition ergibt. Diese unterschreitet die spezifizierte Magnetflussdichte um 76 mT, wurde aber akzeptiert.

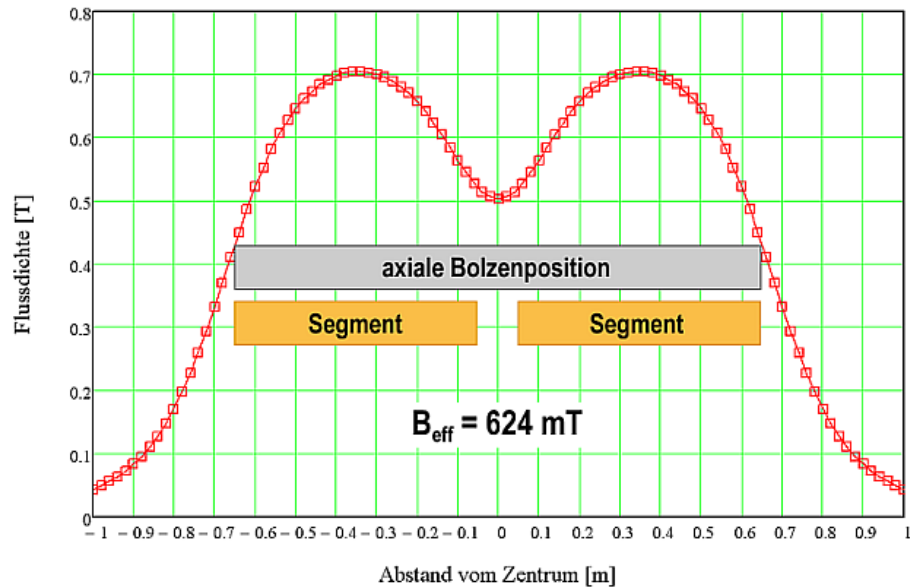


Abbildung 10: Magnetflussdichte in Abhängigkeit vom Zentrum der Magnettrommel bzw. über der Bolzen- und Segmentposition

Eine Reduzierung des Magnetfeldes wie beim Magnetheizer durch Anheben des Jochs ist nicht möglich. Eine quasikontinuierliche Skalierung des Magnetfeldes hin zu kleineren Magnetflussdichten für kleinere Bolzendurchmesser kann nur konstruktiv gelöst werden.

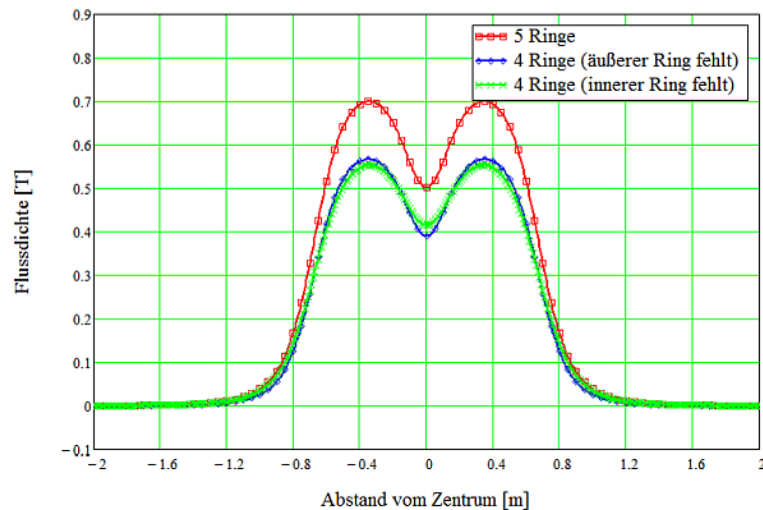


Abbildung 11: Reduktion der Magnetflussdichte durch Verringerung der Magnetmasse durch Weglassen des äußeren oder inneren Rings

Die Magnetmasse kann nach Maßgabe der Teiler der Zahl 40 (40, 20, 10, 8, 5, 4, 2, 1) verringert werden. Das Weglassen des äußeren oder inneren Rings führt trotz unterschiedlicher Magnetmassen zu nahezu gleichen Magnetflussdichten - Abbildung 11, da diese proportional zum Logarithmus der Teilkreisradien der äußeren und inneren Ringe sind. Aus Festigkeitsgründen sind die Scheiben dann ohne Aussparungen zu erstellen oder die Aussparungen mit Aluminiumelementen kraft- und formschlüssig zu füllen.

3.3.2 Leistungsdeposition

Aus der Magnetflussdichte, der Drehfrequenz und den Werkstoff- und geometrischen Daten der Bolzen lässt sich per FEM die Stromverteilung und damit die Leistungsdeposition ermitteln – Abbildung 12.

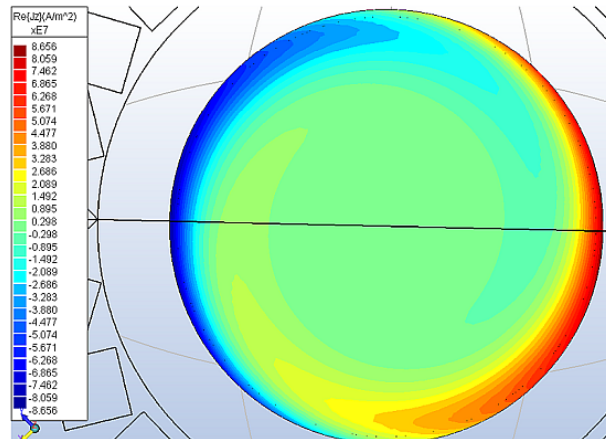


Abbildung 12: Stromverteilung im Bolzen

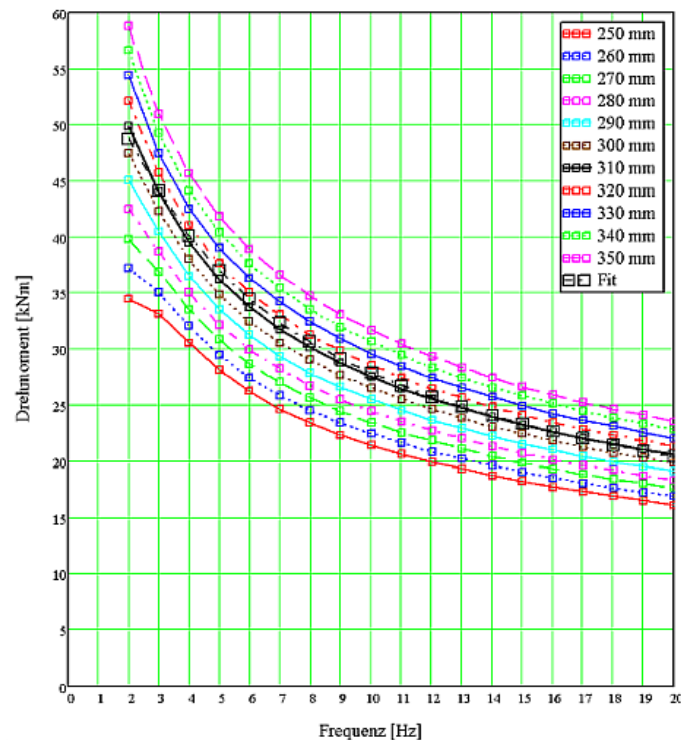


Abbildung 13: Auf den Bolzen wirkendes Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehfrequenz ab 2 Hz für verschiedene Bolzendurchmesser

Dass aus den Strömen bzw. Wirbelströmen resultierende Magnetfeld des Bolzens tritt mit dem äußeren Magnetfeld der Magnettrommel in Wechselwirkung und bestimmt das resultierende Drehmoment und in Verbindung mit der Drehfrequenz die im Bolzen

deponierte Leistung. Gleichzeitig schirmt das resultierende Magnetfeld bei steigender Frequenz das äußere Magnetfeld zum Bolzenzentrum hin zunehmend ab, so dass dessen Einfluss bei steigender Frequenz im Bolzeninneren an Wirkung verliert. Anschaulich formuliert, während das äußere Magnetfeld den Bolzen bei Stillstand vollständig durchdringen kann, nimmt die „Transparenz“ des Bolzens für das äußere Magnetfeld mit steigender Frequenz ab und das Drehmoment sinkt.

Die Drehmomente verringern sich asymptotisch bis zur maximalen Drehzahl von 1200 1/m bzw. 20 Hz und sind abhängig vom Bolzendurchmesser - Abbildung 13. Die Drehmomente für den spezifizierten Bolzen (\varnothing 310 mm) betragen bei 2 Hz ca. 50 kNm und bei 20 Hz ca. 24 kNm und bestimmen die Dimensionierung der Antriebe und den Anfahrprozess.

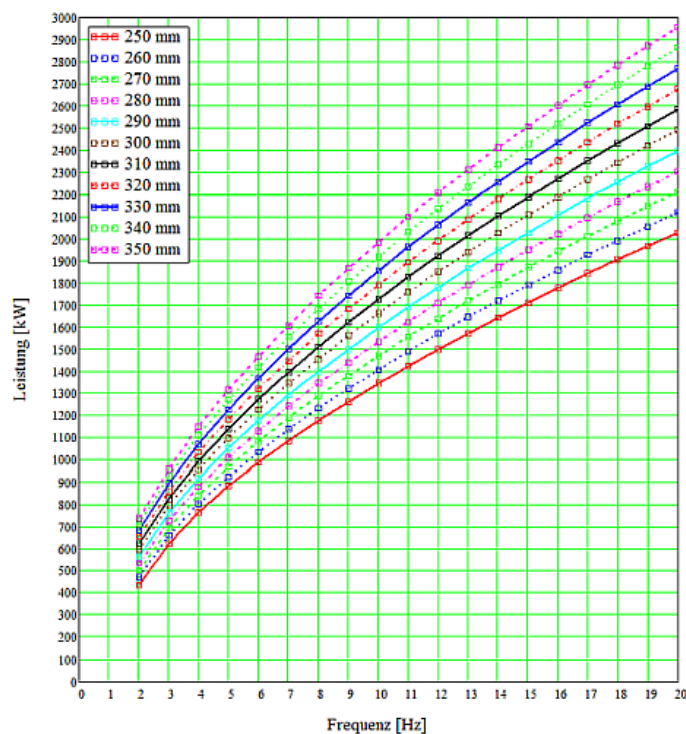


Abbildung 14: Auf den Bolzen aufzubringende Leistung in Abhängigkeit von der Drehfrequenz ab 2 Hz für verschiedene Bolzendurchmesser

Die Leistung, die auf den Bolzen motorisch aufgebracht werden muss – Abbildung 14 – steigt in Abhängigkeit von der Drehzahl. Bei Nennfrequenz der Magnettrommel von 20 Hz werden auf den spezifizierten Bolzen (\varnothing 310 mm) ca. 630 kW motorisch aufgebracht. Diese wird im Bolzen bei nur geringen Verlusten in Wärme umgesetzt und erhöht dessen Temperatur.

Aufgrund des Skin-Effektes ist die Stromdichte oberflächennah am größten (Abbildung 12), so dass die Leistungsdeposition im Bolzen zur Bolzenmitte hin abnimmt. Berechnungen zeigen, dass an der Bolzenoberfläche bei 20 Hz eine Leistung von 2.200 kW eingebracht wird, in einem Zylinder in Bolzenachse mit einem Durchmesser von ca. 30 mm hingegen keine.

Da beim Dauermagnetheizer eine partielle Magnetfeldreduzierung konstruktionsbedingt nicht möglich ist, kann ein Taper nur durch teilweises Eintauchen des Bolzens in das Magnetfeld aufgebracht werden.

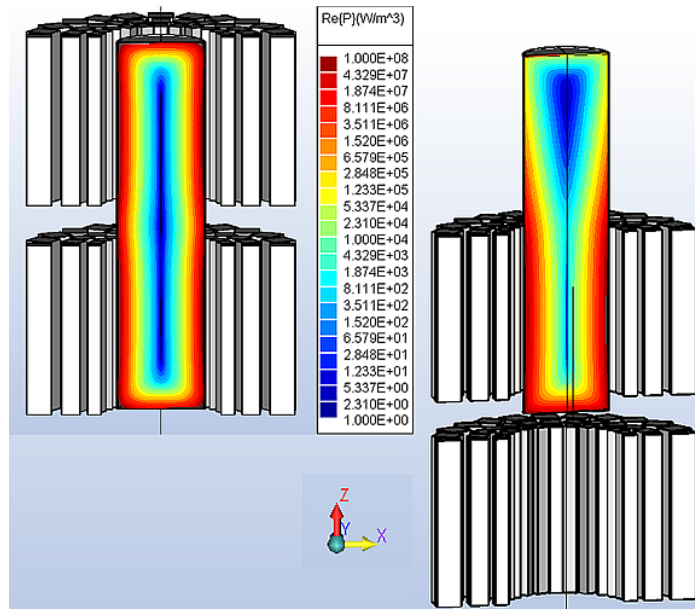


Abbildung 15: Leistungsdichten im Bolzen bei vollständigem und teilweisem Eintauchen in das Magnetfeld

Die 3D-FEM-Berechnungen – Abbildung 15 – zeigen, dass das Aufbringen eines Tapers möglich ist (rechts). Die Feldschwächung zwischen den Segmenten (links) ist für die Leistungsdeposition und damit für die axiale Temperaturhomogenität vernachlässigbar.

3.3.3 Kräfte und Momente

Mit 3D-FEM-Berechnungen wurden für die Konstruktionen aller Komponenten des Dauermagnetheizers und der Montagevorrichtungen die relevanten Belastungen berechnet.

Beim Ein- und Ausfahren der Bolzen in die stillstehende Magnettrommel treten axiale Kräfte und Kippmomente auf, die durch die Spannschlitten aufgefangen werden müssen. Für den Prozessablauf sind die axialen Kräfte bei mit Nennfrequenz rotierender Magnettrommel relevant. Sie betragen, abhängig von der Bolzenposition, bis zu +/- 50 kN - Abbildung 16.

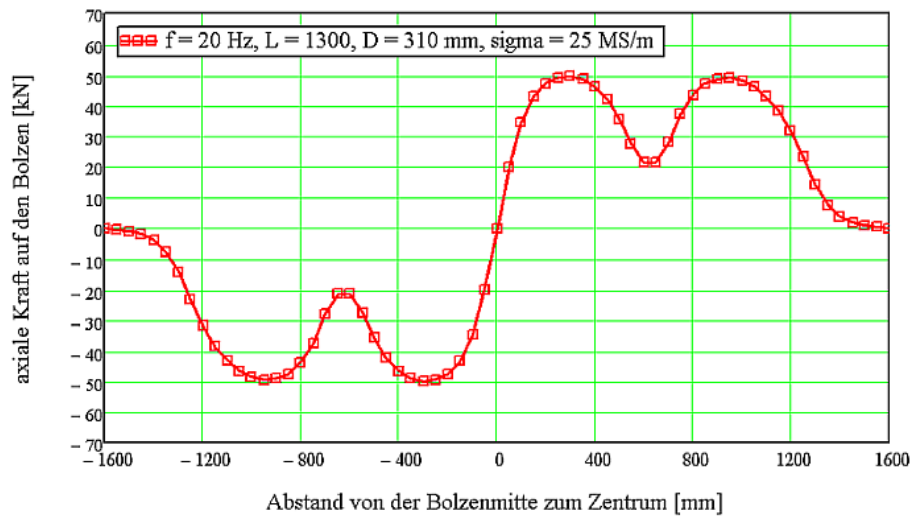


Abbildung 16: Axiale Kräfte auf den Bolzen bei der Beladung der mit 20 Hz rotierenden Magnettrommel

Bei der Montage der Magnete in den Scheiben wechselwirken deren Magnetfelder und es treten axiale sowie Querkkräfte und Drehmomente auf - Abbildung 17.

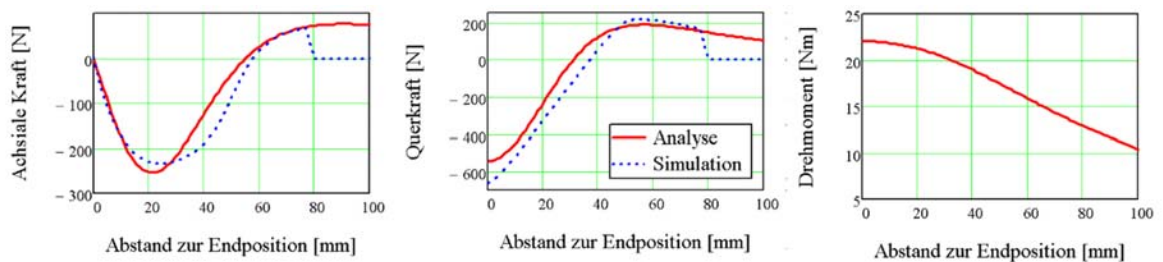


Abbildung 17: Auf einen Magneten wirkende, analytisch und durch FEM berechnete Kräfte und Momente bei der Montage in den Scheiben in Abhängigkeit von der Endposition

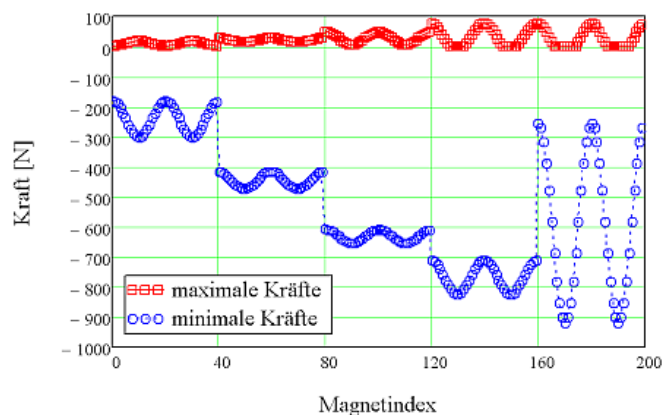


Abbildung 18: Extremale Kräfte bei der Montage des letzten der 200 Magnete in Abhängigkeit von der Position in der Scheibe.

Die auftretenden Kräfte sind abhängig von der Position in der Scheibe und der Anzahl der bereits montierten Magnete. Die extremalen Kräfte treten bei der Montage des letzten Magneten auf – Abbildung 18. Sie sind positionsabhängig und können mit bis zu 100 N anziehend wirken. Die minimalen, abstoßenden Kräfte können auf bis zu 800 N steigen und auch bewirken, dass bereits montierte, nicht fixierte Magnete wieder aus der Scheibe bewegt werden. Eine Montagevorrichtung für die Magnete und deren kraftschlüssige Fixierung in der Scheibe sind Voraussetzung für eine sichere Montage der Magnete.

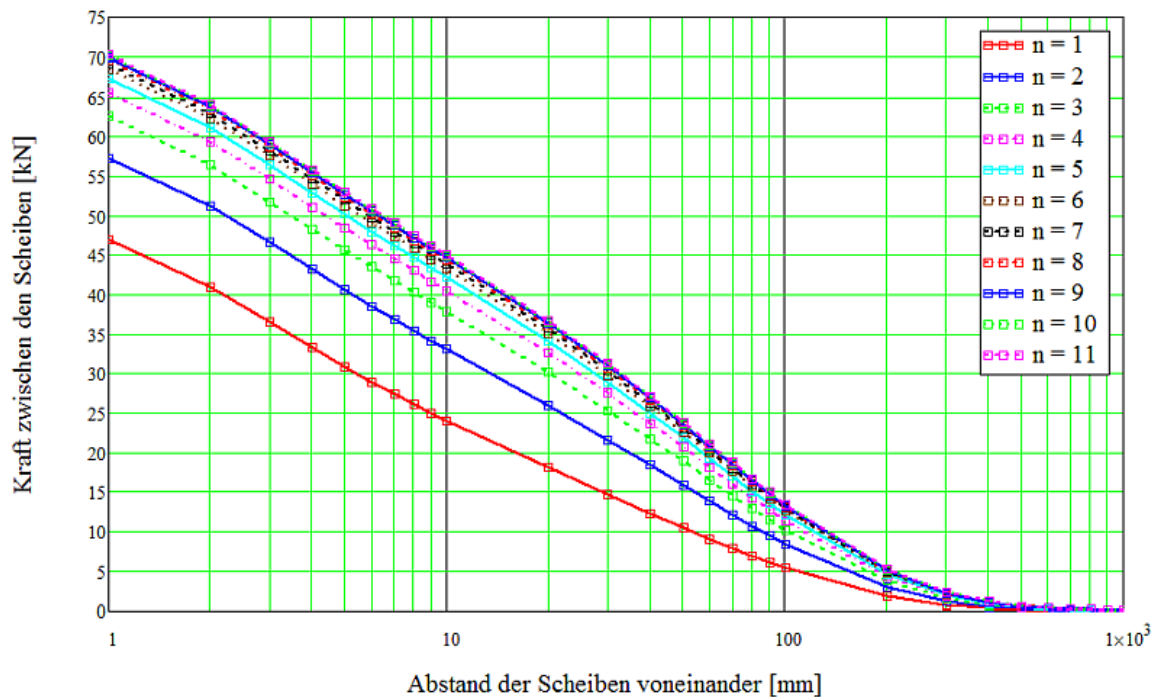


Abbildung 19: Axiale abstoßende Kräfte bei der Montage der jeweils letzten Scheibe als Funktion des Scheibenabstandes vom Stapel und in Abhängigkeit von der Anzahl der Scheiben im Stapel bei Montageausrichtung

Bei der Montage der magnetbestückten Scheiben wirken beim Fügen zu Segmenten erhebliche Kräfte und Momente. Die Kräfte sind bei der Montage der zwölften Scheibe am größten und steigen mit abnehmendem Abstand vom Stapel aus elf Scheiben auf bis zu 70 kN - Abbildung 19. Eine Verdrehsicherung muss die schon bei geringen Winkelabweichungen auftretenden Drehmomente abfangen, sonst würden nach einer Drehung um 90 ° bei nicht mehr herrschenden Dipolfeld Anziehungskräfte wirksam.

Eine Montagevorrichtung zum Aufbringen der Kräfte und Abfangen der Momente mit präziser Ausrichtung ist für die sichere Montage und Einführung der tolerierten Gewindestangen erforderlich.

3.3.4 Scheiben und Segmente

Auf den Ergebnissen aus 3.2.2 aufbauend wurden folgende Entwicklungen durchgeführt:

- Modifizierung und Optimierung der Magnetquerschnitte mit Verdrehsicherung
- Modifizierung und Optimierung der Struktur und der Aussparungen für die Magnete
- Fügetechnik für die Magnete in der Struktur zu Scheiben
- Fügetechnik für die Scheiben zu Segmenten

Zur Sicherung gegen Verdrehen sind die Magnete mit einer Fase versehen. Die Kontur der Magnetquerschnitte und deren Rundungsradien wurden für die fünf Magnetvarianten mit unterschiedlichen Durchmesser optimiert, um die Spannungsspitzen aus den Kräften und Momenten in allen Betriebszuständen zu minimieren.

Parallel wurden die Aussparungen für die Magnete in der Struktur angepasst. Mit FEM-Berechnungen wurde die Festigkeit der Strukturen bei gleichzeitig minimalem Strukturmaterial Einsatz optimiert. Als Werkstoff für die Strukturen muss hoch festes Aluminium mit einer Streckgrenze von 290 N/mm² eingesetzt werden. Berechnungen mit Titan zeigen auch dessen Eignung als Strukturwerkstoff, seine Verwendung wäre jedoch mit deutlich höheren Kosten verbunden.

Zum Fügen der Magnete wurde das Verkleben als beste Lösung identifiziert, da die Magnete bereits bei der Montage kraftschlüssig und im Betrieb dauerhaft spielfrei ohne Spannungsspitzen, die bei Klemmvorrichtungen auftreten würden, fixiert sein müssen. Da sich die Festigkeit des Klebstoffes schon in der Konzeptionsphase als kritische Größen herausgestellt hatten und die stark differierenden Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Magnetwerkstoff zu erheblichen Verschiebungen führen, wurden auf dem Markt angebotene Klebstoffe analysiert. Die wenigen, als geeignet beurteilten Klebstoffe wurden für die Untersuchung ihrer Eignung in zwei Klebstoffgruppen zusammengefasst:

- Klebstoff mit hoher Steifigkeit und geringer Bruchdehnung
- Klebstoff mit geringer Steifigkeit und hoher Bruchdehnung

Für beide Klebstoffgruppen wurden für drei Fertigungstemperaturen, bei denen die Verklebungen durchgeführt werden, folgende Prozessschritte definiert, mit FEM-Berechnungen in Rechenschritten abgebildet und die Festigkeiten der Struktur, der Magnete sowie der Klebstoffe im Klebstoffspalt bewertet:

1. Erwärmung der Magnete und der Scheiben auf 20 °C (Umgebungstemperatur), 40 °C (mittlere Temperatur) oder 60 °C (Betriebstemperatur) und Aufbringen des flüssigen Klebstoffs, der noch keine Spannungen überträgt
2. Aushärten des Klebers in der Scheibe bei analog zu oben 20 °C, 40 °C oder 60 °C; der Klebstoff überträgt Spannungen und die Belastungen resultieren aus den Wechselwirkungen der Magnete in den Scheiben
3. Abkühlen der bestückten Scheiben auf 20 °C mit obigen Belastungen
4. Fügen von 12 Scheiben zu einem Segment; die Belastungen resultieren aus den Wechselwirkungen der Magnete und der Scheiben mit zusätzlichen senkrecht wirkenden Kraftkomponenten
5. Erwärmung des Segmentes auf 60 °C im Betrieb

Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- bei allen Klebstoffgruppen und Verarbeitungstemperaturen ergeben sich Restverschiebungen
- Die Spannungen in der Struktur unterschreiten in allen Fällen deren Streckgrenze
- Klebstoffe mit hoher Steifigkeit und geringer Bruchdehnung erleiden große Schäden im Fertigungsprozess und im Betrieb; bei einer Fertigungstemperatur von 40 °C sind die Schäden am geringsten
- Klebstoffe mit geringer Steifigkeit und hoher Bruchdehnung erleiden keine Schäden in allen Fertigungsprozessen und im Betrieb
- für Klebstoffe mit geringer Steifigkeit und hoher Bruchdehnung sind alle Fertigungstemperaturen geeignet, bei einer Fertigungstemperatur von 60 C sind die Belastungen am geringsten

Zum Fügen von 12 Scheiben zu einem Segment wurden folgende Prozessschritte definiert, mit FEM-Berechnungen in Rechenschritten abgebildet und die Festigkeiten der Bauteile bewertet:

1. Zusammensetzen der vorgefertigten Segmente zu einem Stapel mit Hilfe einer Montagevorrichtung, die axiale Kräfte und Momente aufnimmt
2. Einführen der Gewindestangen und Verschraubung bis zur nominalen Vorspannung
3. Nach der Reduzierung der Vorspannung in den Gewindestangen durch Setzeffekte in den Scheiben ist der Fügeprozess abgeschlossen und der Anfangszustand für die Inbetriebnahme erreicht

Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Restverschiebungen aus der Fertigung der Scheiben und Eigenspannungen im Aluminium sind unkritisch
- nach der Montage der Segmente erhöhen sich die Restverschiebungen geringfügig; höhere Eigenspannungen treten im Einflussbereich der Gewindestangen auf und sind unkritisch; die Zugspannungen in den Gewindestangen erreichen ca. 50 % von deren Streckgrenze
- die beim Betrieb steigenden Temperaturen der Segmente auf bis zu 60°C führen zu steigenden Zugspannungen in den Magneten und den Gewindestangen, sind aber unkritisch
- die bei Rotation der Magnettrommel mit 20 Hz auftretenden Spannungen im Aluminium und in den Magneten sind unkritisch;
- bei Rotation der Magnettrommel mit 20 Hz legen sich die Gewindestangen an die Bohrungswand an; mit den resultierenden zusätzlichen Biegespannungen erreichen die Gesamtspannungen nahe den Muttern 80 % der Streckgrenze und Ermüdungsbrüche könnten auftreten;

Bei Sicherheiten von ca. 50 % können die Scheiben und Segmente als dauerhaft bezeichnet werden. Zur Vorbeugung gegen Ermüdungsbrüche sollten, falls es die Montage in der Praxis erlaubt, die Gewindestangen mit Distanzringen in den Bohrungen zentriert und so die Biegespannungen reduziert werden.

3.3.5 Fertigung und Montage

Für eine sichere Verklebung der Magnete sind ein definierter Klebstoffauftrag und ein definierter Klebstoffspalt erforderlich. Die auf die Magnete wirkenden Kräfte und Momente führen selbst bei Verwendung einer Montagevorrichtung zum Anliegen an den Wänden der Aussparungen. Folgende Lösungsansätze erscheinen geeignet:

- Ausführung der Aussparungen als Magnettaschen durch Aufschrauben oder Aufkleben eines 1 mm starken Bleches auf die Scheibe; die Ausbildung einer Magnettasche beim Fräsen ist fertigungstechnisch nicht möglich
- Aufbringen von streifenförmigen Distanzhaltern auf den Magneten

Mit folgenden Arbeitsschritten werden die Magnete verklebt:

- Einfüllen der definierten Klebstoffmenge in die Magnettasche, die den späteren Klebespalt vollständig ausfüllen kann
- Einpressen eines Magneten mit einer Montagevorrichtung
- Fixieren des Magneten bis zur Aushärtung des Klebstoffs
- Bestückung der Scheibe mit dem nächsten Magneten in einer definierten Reihenfolge, bei der die geringsten Kräfte und Momente auf die Magnete wirken

Für die sichere Bestückung der Scheiben mit Magneten und das Fügen der Scheiben zu Segmenten wurden Montagevorrichtungen in mehreren Varianten mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden konzipiert. Die favorisierte Lösung für die Magnetfügevorrichtung – Abbildung 20 – hat steif ausgelegte Zuführungen mit zwei Linearachsen. Die Magnete werden kraft- und formschlüssig gehalten. Die zwei antriebslosen Drehvorrichtungen werden mit Arretierbolzen mechanisch fixiert.

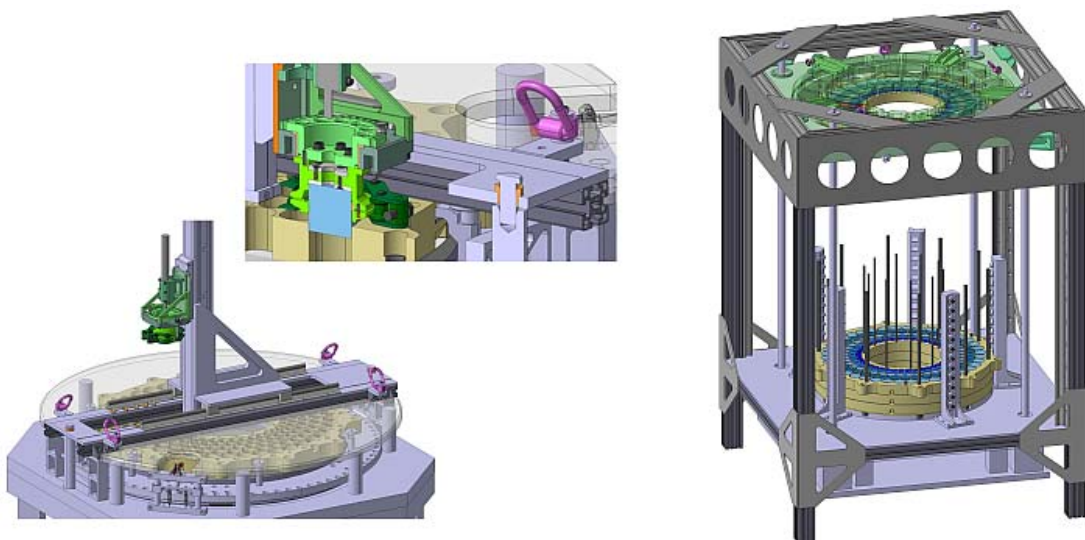


Abbildung 20: Magnetfügevorrichtung (links unten) mit Magnetzuführeinheit (links oben) und Segmentfügevorrichtung (rechts)

In der Segmentfügevorrichtung werden die Scheiben über eine mit Trapezspindeln angetriebene Druckplatte angenähert und rundum an fünf Säulen mit Riegeln in fixiert.

3.3.6 Erwärmungsprozess

Der Erwärmungsprozess wurde mit 2D- und 3D-FEM-Berechnungen mit dem Ziel untersucht, eine Strategie für die Prozessführung zu entwickeln, mit der eine homogene radiale Bolzentemperatur von ca. 550 °C bei minimaler Prozesszeit ohne Überschreitung der Oberflächentemperatur der Bolzen von 650 °C erreicht wird.

Tabelle 3: Temperaturen und Zeiten in Abhängigkeit von der Frequenz bei einer Magnetflussdichte von 750 mT (jeweils beste Ergebnisse der Simulationsreihen)

Frequenz	Temperaturen in °C		Aufheizzeit in s	Ausgleichszeit in s	Prozesszeit in s	Ausgleichstemp. in °C
	Achse	Oberfläche				
4	543	551	170	55	225	549
5	541	547	145	60	205	545
6	546	555	130	55	185	552
12/6 var.	541	549	120	35	155	547

Die Ergebnisse – Tabelle 3 – zeigen, dass bei Erwärmung mit konstanter Frequenz die Aufheiz- und die Ausgleichzeiten bei höheren Frequenzen und damit höheren Leistungen sinken. Die minimale Prozesszeit wird erreicht, wenn mit variabler, d. h. zunächst mit höherer und dann reduzierter Frequenz erwärmt wird. Die homogenere Erwärmung mit niedrigerer Temperaturdifferenz zwischen Bolzenoberfläche und –achse reduziert die Ausgleichszeit und damit die Prozesszeit. Die Ausgleichzeiten decken sich mit den Transportzeiten zur Strangpresse. Der zugehörige Frequenzgang und die Temperaturen sind in Abbildung 21 dargestellt.

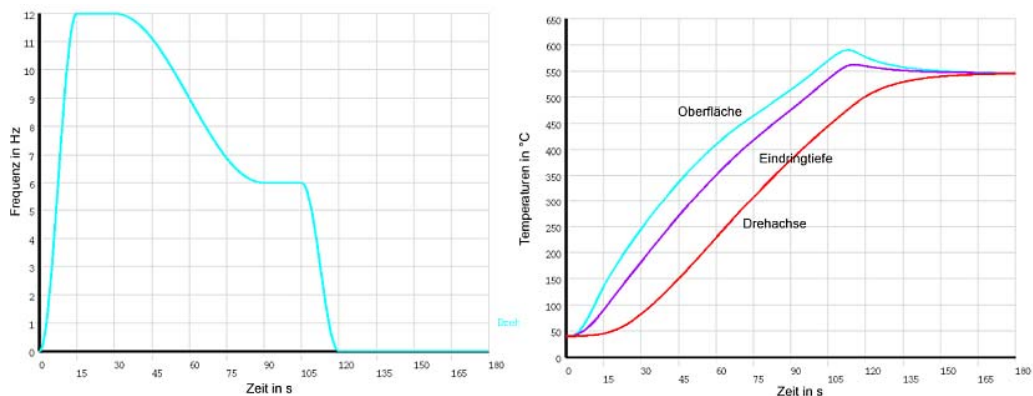


Abbildung 21: Frequenz und Bolzentemperaturen über der Zeit bei Erwärmung mit Frequenzen von 12 Hz und 6 Hz

In 3D-Simulation des Erwärmungsprozesses über der Heizzeit – Abbildung 22 – wird der temperaturmindernde Einfluss der Koppelstelle ist sichtbar, ist aber unkritisch.

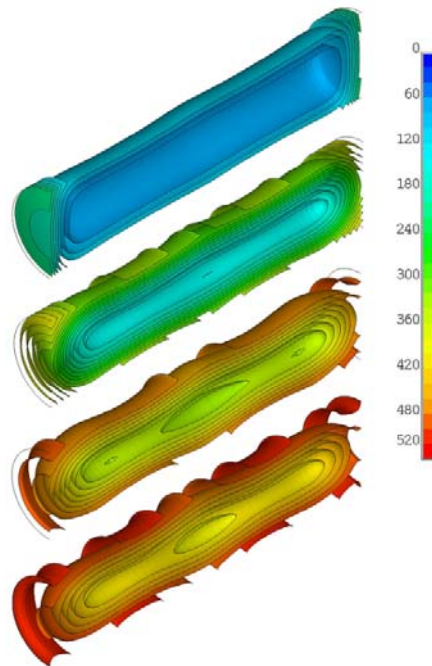


Abbildung 22: 3D-Simulation der Erwärmung des Bolzens über der Erwärmungszeit für eine Endtemperatur von 520 °C.

Für die weiteren Berechnungen wird die beim Magnetheizer praktizierte Strategie, Erwärmung mit maximaler Drehzahl, verfolgt und an einem Prototyp der Einfluss variabler Drehzahlen auf die Heizzeiten untersucht.

3.3.7 Thermodynamik und Systemtemperaturen

Zum Nachweis der thermischen Stabilität des Magnetheizers wurden die maximalen Temperaturen in der Magnettrommel bei Dauerbetrieb berechnet. Die Überschreitung der Curie-Temperatur der Magnete würde zu deren Entmagnetisierung und damit zum Totschaden führen, da die Verklebung der Magnete keine Reparaturen zulässt. Als Maximaltemperatur werden 60 °C angestrebt. Die Wärmeenergie wird vom erwärmten Bolzen primär durch Wärmestrahlung übertragen, so dass die Magnettrommel durch einen Strahlungsschutzschild abgeschirmt werden muss.

Folgende Konfigurationen für den Strahlungsschutzschild wurden untersucht:

1. drei konzentrisch angeordnete Mantelbleche mit Spalt zur Magnettrommel, die an den Stirnflächen zum Luftaustausch zwischen den Blechen stirnseitig offen sind
2. zwei konzentrisch angeordnete Mantelbleche mit Isolationsmaterial im Zwischenraum und Spalt zur Magnettrommel
3. ein Mantelblech und Isoliermaterial zwischen Mantelblech und Magnettrommel
4. drei konzentrisch angeordnete Mantelbleche mit Spalt zur Magnettrommel, ein Mantelblech als Schutz, Mantelbleche 2 und 3 als Vakuumschild ausgeführt
5. drei konzentrisch angeordnete Mantelbleche, als Vakuumschild ausgeführt, mit Spalt zur Magnettrommel

Auf den Ergebnissen aus 3.2.2 aufbauend wurde ein Berechnungsverfahren mit folgenden Schritten entwickelt:

- für die transiente Rechnung Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Segmente aus den Leitfähigkeiten der Magnete ($8,5 \text{ W/(m K)}$) und der Strukturwerkstoffe (Aluminium $126,7 \text{ W/(m K)}$) bei 80 °C) per 2D-FEM; bei der Vergleichsrechnung wird angenommen, dass der simulierte, reale Wärmestrom, der überwiegend durch den gut leitenden Strukturwerkstoff fließt, gleich dem Wärmestrom ist, der sich bei konstanter, effektiver Wärmeleitfähigkeit der Segmente einstellt
- für die transiente Rechnung Ermittlung einer Temperaturkurve für die Oberflächentemperaturen als Funktion der Erwärmungszeit von 120 s durch eine elektromagnetisch-thermische FEM-Berechnung; die Erwärmungszeit schließt die Umschlagzeit ein, deren thermische Vorteile somit unberücksichtigt bleibt
- Berechnung der Endtemperaturen aller relevanten Bauteile, die sich nach der Inbetriebnahme über der Zeit im Dauerbetrieb einstellen, durch eine transiente Rechnung mit analytischen Verfahren; mit den obigen Ergebnissen werden die durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion übertragenen Wärmeströme vom Bolzen bis an die Umgebungsluft für eine Serie von Erwärmungszyklen berechnet, bis sich ein stationärer Zustand in Bauteilen einstellt
- Verifizierung der Ergebnisse durch eine 3D-FEM-Simulation mit den transient berechneten adäquaten mittleren Bolzentemperaturen und Untersuchung der thermischen Kurzschlüsse an den Stirnseiten

Die effektive Wärmeleitfähigkeit der Segmente errechnet sich aufgrund des hohen Magnetanteils zu $26,45 \text{ W/(m K)}$). Die Oberflächentemperatur eines Bolzens steigt parabolisch degressiv über der Erwärmungszeit – Abbildung 24 (hellblau).

Die für die fünf Konfigurationen definierten Wärmeübergänge zeigt exemplarisch Abbildung 23 für die Konfigurationen 1 und 2.

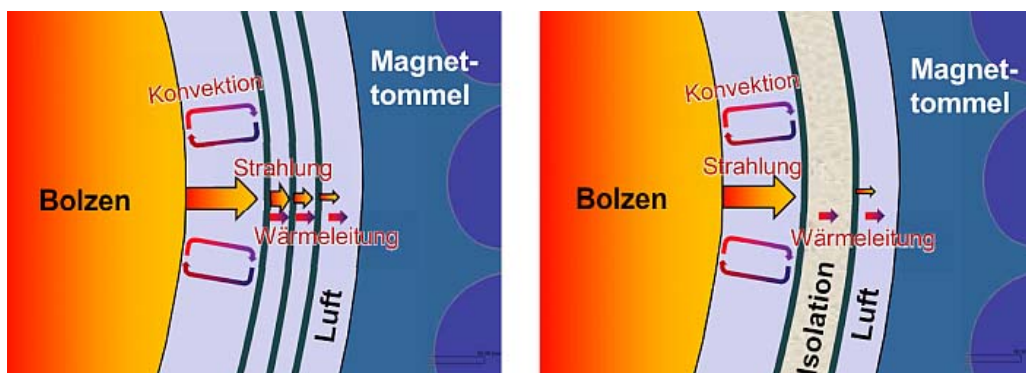


Abbildung 23: Wärmeübergänge vom Bolzen über den Strahlungsschutzschild zur Magnettrommel für die Konfigurationen 1 und 2

Zwischen Bolzen und Strahlungsschutzschild überwiegt die Wärmestrahlung, der konvektive Übergang ist vernachlässigbar. Zwischen den stirnseitig offenen Mantelblechen

(Konfiguration 1, links) wirkt die Luft als Wärmeleiter und die Wärmestrahlung reduziert sich von Mantelblech zu Mantelblech bei sinkenden Temperaturen. Im Luftspalt zwischen Strahlungsschutzschild und Magnettrommel tritt wieder Wärmestrahlung und –leitung auf. An der Außenseite der Magnettrommel wird die Wärme, Wärmeübergangskoeffizient $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, abgeführt.

Bei Füllung des Raums zwischen den Mantelblechen mit Isoliermaterial (Konfiguration 2, rechts) wird die Wärmestrahlung unterbunden und es tritt nur Wärmeleitung auf. Damit sind die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturbeständigkeit die bestimmenden Größen bei der Auswahl des Isoliermaterials.

Wird wie bei den Konfigurationen 4 und 5 anstelle des Isoliermaterials ein Vakuum genutzt, wird die Wärmeleitung unterbunden und es tritt Wärmestrahlung auf.

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der transienten Rechnung für Konfiguration 2. Mit dem Strahlungsschutzschild aus zwei 1 mm starken Inconel-Mantelblechen mit zwischenliegender 10 mm starker Isolierschicht aus Silica-Aerogel mit aussteifenden Faserstruktur und Luftspalten von 35 mm zum Bolzen und 3 mm zur Magnettrommel werden nach ca. zehn Stunden die Maximaltemperaturen in den Bauteilen mit stationärem Zustand erreicht.

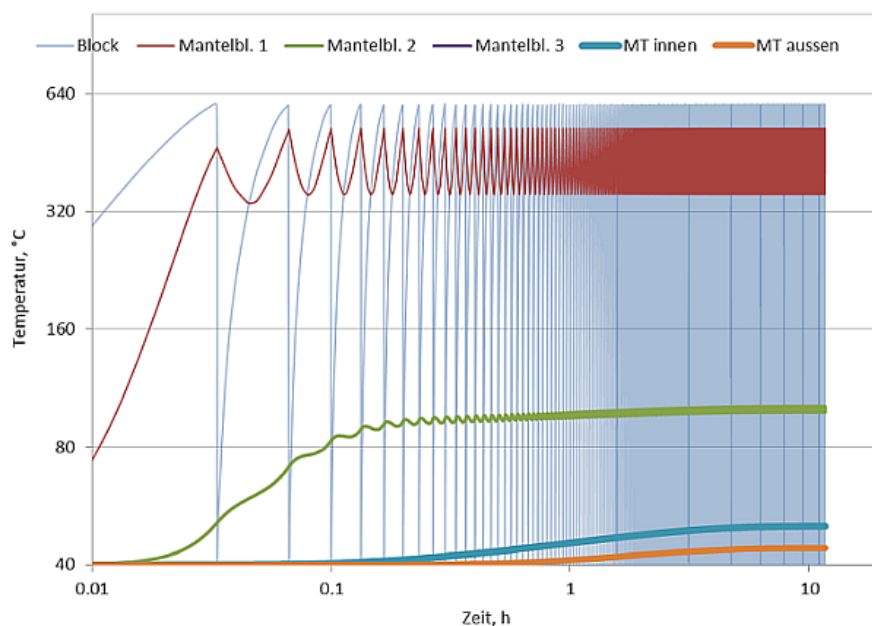


Abbildung 24: Bolzen- und Bauteiltemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Erwärmungszeit von 120 Sekunden für Konfiguration 2

Mit einer bewusst hoch gewählten Bolzenendtemperatur von 550 °C und einer Umgebungstemperatur von 40 °C ergeben sich für die fünf Konfigurationen im stationären Zustand die maximalen Bauteiltemperaturen in Tabelle 4.

Tabelle 4: Maximale Bauteiltemperaturen im stationären Zustand für die Konfigurationen 1 bis 5

Konfiguration	1	2	3	4	5
max. Temperatur 1. Mantelblech in °C	467	524	521	504	530
max. Temperatur 2. Mantelblech in °C	341	102	-	443	324
max. Temperatur 3. Mantelblech n °C	239	-	-	87	67
max. Innentemp. Magnettrommel in °C	80	50	47	46	43
max. Außentemp. Magnettrommel in °C	56	44	43	42	41
mittlerer Wärmestrom in W	2.715	689	505	421	227
äquivalente stationäre Bolzentemperatur in °C	431	428	430	431	423

Der Strahlungsschutzschild aus zwei Mantelbleichen mit zwischen liegendem Isoliermaterial (Konfiguration 2) bietet die meisten Vorteile. Die Temperatur an der inneren Oberfläche der Magnettrommel erreicht nur 50 °C. Der konstruktive Aufbau ist einfach und bei einer maximalen Temperatur im inneren Mantelbleich von 524 °C stehen verschiedene Isoliermaterialien zur Verfügung. Auf eine aktive Kühlung kann verzichtet werden.

Der nur aus drei Mantelbleichen bestehende Strahlungsschutzschild (Konfiguration 1) ist temperaturbedingt ungeeignet. Die übrigen Konfigurationen führen zwar zu noch niedrigeren Temperaturen, werden aber als nicht industrietauglich eingestuft. Die mit der Magnettrommel verbundene Isolierung (Konfiguration 3) erschwert den Wechsel des Schildes und bei den Vakuumlösungen (Konfigurationen 4 und 5) können die Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Vakuums zu inakzeptablen Stillständen führen.

Die analytisch berechneten Temperaturen lassen sich 3D-FEM-Simulationen unter Nutzung der berechneten äquivalenten stationären Bolzentemperatur nachvollziehen. Die weiter berechneten thermischen Kurzschlüsse an den Stirnflächen führen im Stirnflächenbereich des Strahlungsschutzschildes zu akzeptablen Temperaturerhöhungen von 4 °C und sind unkritisch für die Magnettrommel.

Berechnungen für Titan als Strukturwerkstoff zeigen, dass bei Verwendung des präferierten Strahlungsschutzschildes trotz der im Vergleich zu Aluminium fünffach niedrigeren Wärmeleitfähigkeit in der Magnettrommel nur eine Oberflächentemperatur von 58 °C erreicht wird.

Bei der Erwärmung von Kupferbolzen, Durchmesser 310 mm, von 500 °C auf 950 °C kann eine maximale Oberflächentemperatur von 59 °C mit dem präferierten Strahlungsschutzschild dann erreicht werden, wenn ein Isoliermaterial auf Aluminiumoxidfaserbasis mit niedriger Wärmeleitfähigkeit und ausreichender Temperaturfestigkeit eingesetzt wird.

3.3.8 Analytisches Berechnungsverfahren für Variantenkonstruktionen

Aus den berechneten Drehmomenten und theoretischen Betrachtungen lässt sich in Abhängigkeit von den relevanten Größen des Magnetfeldes und der Bolzen eine mit den

Konstruktionsvorgaben normierte Zahlenwertgleichung ableiten, die für Variantenkonstruktionen genutzt werden kann.

Das auf einen Bolzen wirkende Drehmoment N ist von der Drehzahl bzw. Frequenz f der Magnettrommel, der Leitfähigkeit des Bolzenwerkstoffs σ , dem Bolzendurchmesser D , der Magnetflusssdichte B des äußeren Magnetfeldes und der Bolzenlänge L sowie von den für definierte Frequenzbereiche gültigen Frequenzparametern i abhängig:

$$N(f, \sigma, D, B, L, i) = f(f, \sigma, D, B, L, i)$$

Die Leistung P lässt sich aus dem Drehmoment N und der Frequenz f berechnen:

$$P(f, \sigma, D, B, L, i) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N(f, \sigma, D, B, L, i)$$

Die Verifizierung der Zahlenwertgleichungen durch eine Vergleichsrechnung mit dem Magnetheizer der Weseralu GmbH & Co und dessen Betriebsdaten und Bolzenabmessungen ergibt eine Magnetflusssdichte von 372 mT, die in etwa dem Mittelwert des am Magnetheizer gemessenen Magnetfeldes entspricht, so dass das Ergebnis plausibel ist.

Die vergleichende Berechnung der Leistungskennwerte beider Öfen weist für den Dauermagnetheizer eine um 5,1 % niedrigere Ofen- und Erwärmungsleistung aus, wobei beim Magnetheizer parallel zwei Erwärmungskanäle betrieben werden müssen, der Dauermagnetheizer hingegen durch das höhere Magnetfeld nur eine Magnettrommel erfordert. Der Energieverbrauch des Dauermagnetheizers durch den Wegfall der Kühlung des Kryostaten um 15,2 % niedriger.

Tabelle 5: Berechnung der Anwärm- und Ofenleistung und des spezifischen Energieverbrauchs des Dauermagnetheizers mit Konstruktionsdaten

Konstruktions- und Betriebsdaten			Berechnungsergebnisse	
Bolzendurchmesser	300,0	mm		
Bolzenlänge	1.300,0	mm		
Bolzenmasse	248,1	kg/Bolzen		
Magnetflusssdichte	624,0	mT		
Leitfähigkeit	25,0	mS/m		
Drehzahl	1.200	1/min	Heizzeit	65,1 s
Drehmoment	15.636,0	Nm	Bolzenfolgezeit	105,1 s
Antriebsleistung Motore	1.965,0	kW	Ofenleistung	34,3 Bolzen/h
Starttemperatur	20,0	°C	Anwärmleistung	8.495,1 kg/h
Endtemperatur	480,0	°C	spez. Energieverbrauch	143,0 kWh/t

Die Berechnung der Leistungskennwerte mit den Konstruktionsdaten des Dauermagnetheizers liefert für die spezifizierten Bolzen und Temperaturen ohne Taper folgende Ergebnisse:

- die Heizzeit beträgt 65,1 s und bei einer Umschlagzeit von 40 s ergibt sich eine Bolzenfolgezeit von 105,1 s
- die resultierende Ofenleistung von 34,3 Bolzen je Stunde unterschreitet die spezifizierte von 40 Bolzen je Stunde und ergibt eine Erwärmungsleistung von 8.495 kg je Stunde; bei kleineren Bolzendurchmessern wird die Erwärmungsleistung erreicht
- davon ausgehend, dass durch die Optimierung der Prozessparameter im Betrieb noch Leistungssteigerungen möglich sind und eine geringfügige Unterschreitung kundenseitig Akzeptanz findet, kann auf den beim Magnetheizer üblichen und im Antrag vorgesehen zweiten Erwärmungskanal verzichtet werden; damit sinken die Herstellkosten für die Magnetfelderzeugung und die Mechanik deutlich
- die mittlere Magnetflussdichte von 624 mT ist für den spezifizierten Bolzendurchmesser ausreichend; bei der spezifizierten Flussdichte von 800 mT würde bei höheren Temperaturen die Warmfestigkeit der Bolzen überschritten und die Drehmomentreduzierung wäre nur, wie beim Taperheizen, durch Ausfahren des Bolzens und Teilerwärmung und damit ohne signifikante Senkung der Heizzeit möglich
- der spezifische Energieverbrauch beträgt 143 kWh/h

3.4 Engineering und Verifizierung des Lösungsansatzes

Aufgabenstellungen und Ziele des Arbeitsschrittes sind:

- die Detailkonstruktion des Dauermagnetheizers
- die technischen, sicherheitstechnischen, energetischen und umweltbezogenen sowie wirtschaftlichen Analysen und die Bewertung des Dauermagnetheizers
- die Beurteilung der Industrietauglichkeit hinsichtlich Eignung im Dauerbetrieb und Wartungs- und Reparaturverhalten

Als Methoden werden die Variantenkonstruktion mit Bewertung der Konstruktionsalternativen sowie analytische Berechnungen, Analysen und vergleichende Bewertungen mit bestehenden Alternativen zur Bolzenerwärmung verwendet.

3.4.1 Konstruktion des Dauermagnetheizers

Die Konstruktion des Dauermagnetheizers basiert auf den konstruierten Segmenten und den Erfahrungen und konstruktiven Lösungen des Magnetheizers. Abbildung 25 zeigt die Kernkomponenten des Dauermagnetheizers.

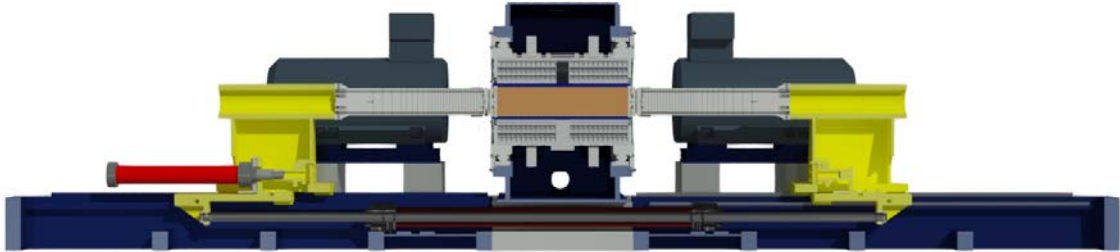
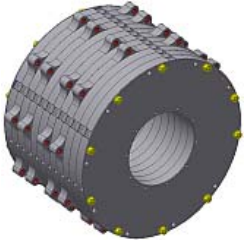


Abbildung 25: Dauermagnetheizer (Seitenansicht) mit Magnettrommel (Mitte hellgrau) im Getriebegehäuse (Mitte dunkelgrau) und eingefahrenem, verspanntem Bolzen (Mitte braun), zwei Motoren (dunkelgrau), zwei Spannschlitten (gelb) mit Hybrid-Klemmwellen (hellgrau), einem Klemmzylinder (rot) und einem Verschiebezylinder (dunkelgrau) im Unterbau (blau)

Tabelle 6 fasst die Eckwerte für ein Segment als Konstruktionsvorgabe zusammen.

Tabelle 6: Maße und Masse eines Segmentes

	Segmentlänge	600 mm
	lichter Segmentinnendurchmesser	375 mm
	Segmentaußendurchmesser	900 mm
	Segmentmasse	2.700 kg
	max. Drehzahl	1.200 1/min

3.4.1.1 Magnettrommel

Die Magnettrommel - Abbildung 26 a – wird aus zwei mit einer 130 mm langen Koppelscheibe verbundenen Segmenten gefügt.

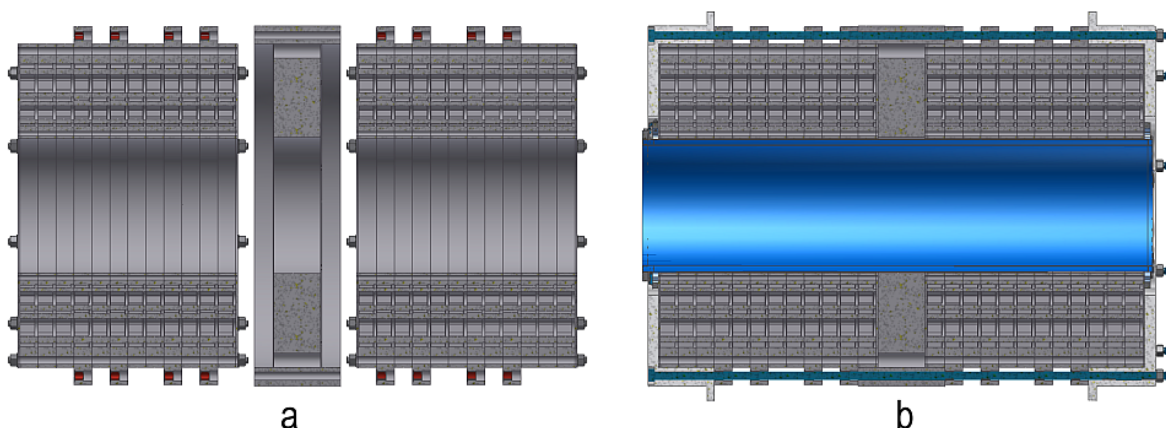


Abbildung 26: Magnettrommel (Schnitt); a) zwei Segmente mit je 4 Koppelscheibe mit Ösen und Gleitringführungen und 130 mm langer Distanzscheibe; b) montierte Magnettrommel mit Lageraufnahmen und Strahlungsschild (blau)

Je Segment sind zwischen acht Standard- vier Koppelscheiben mit Ösen und Gleitringführungen verbaut. Mit zehn Dehnschrauben werden alle erforderlichen Maschinenelemente verspannt, um die auftretenden Drehmomente und Kräfte aus den Magnetfeldern der Segmente zu übertragen.

Zur Vermeidung von eindringendem Öl aus dem Sumpf des Getriebekastens, dass die Magnete chemisch schädigen könnte, muss die Magnettrommel mit einer äußeren Schutzlackierung versehen werden.

Die beidseitig angeordneten Lageraufnahmen decken jeweils stirnseitig die Segmente ab und dienen zur Verschraubung des Strahlungsschildes - Abbildung 26 b. In den Hohlraum des aus zwei Edelstahl-Mantelrohren unterschiedlichen Durchmessers aufgebauten Strahlungsschildes ist eine 10 mm starke Isolierung, bei Aluminiumbolzen auf Silica-Aerogel-Basis, bei Kupferbolzen auf Aluminiumoxid-Basis, eingelegt. Der Strahlungsschild ist stirnseitig auf der einen Seite verschraubt und gegenüberliegend zum Längenausgleich geführt. Stirnseitige konzentrisch angeordnete Bohrungen im Flansch ermöglichen eine Luftzirkulation im segmentseitigen 3 mm-Spalt.

Der Strahlungsschild hat zugleich eine Schutzfunktion. Er schirmt die Magnettrommel gegen im Betrieb eindringende ferromagnetische Partikel und Verschmutzungen ab und kann zur Reinigung gezogen und ausgetauscht oder im feldfreien Bereich gereinigt werden.

Die Magnettrommel ist mit zwei außen liegenden Schrägkugellagern (Los- und Festlager) – Abbildung 27 – gelagert (siehe auch 3.2.4, Seite 17). Für ausreichende Grenzdrehzahlen und den Betrieb im Magnetfeld sind die Innen- und Außenringe der Lager mit Sonderwerkstoffen auszuführen.

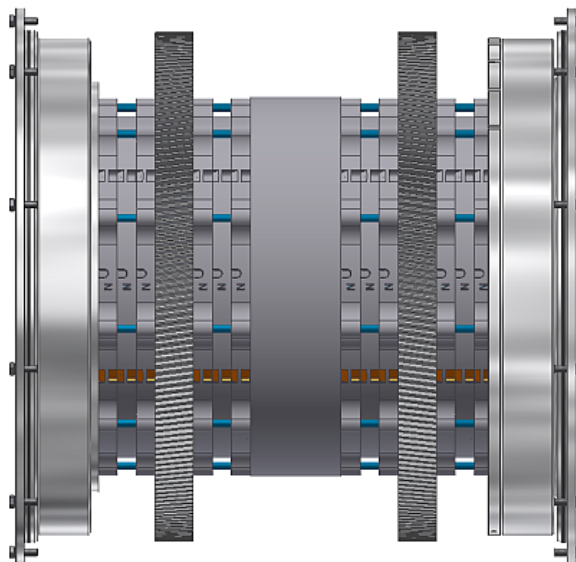


Abbildung 27: Magnettrommel aus zwei gekoppelten Segmenten mit Zahnradscheiben und Schrägkugellagern

Als Antriebselemente sind zwei schrägverzahnte Zahnscheiben montiert. Die Lager und die Zahnradpaarungen werden im Getriebekasten tauchgeschmiert.

3.4.1.2 Dauermagnetheizer

Abbildung 28 zeigt die Antriebskonfiguration mit im Getriebekasten (blau) gelagerter Magnettrommel und schrägverzahnten Getrieben sowie die antriebs- und abtriebsseitigen Kennwerte. Bestimmend ist die Drehmomentspitze im unteren Drehzahlbereich (siehe Abbildung 13).

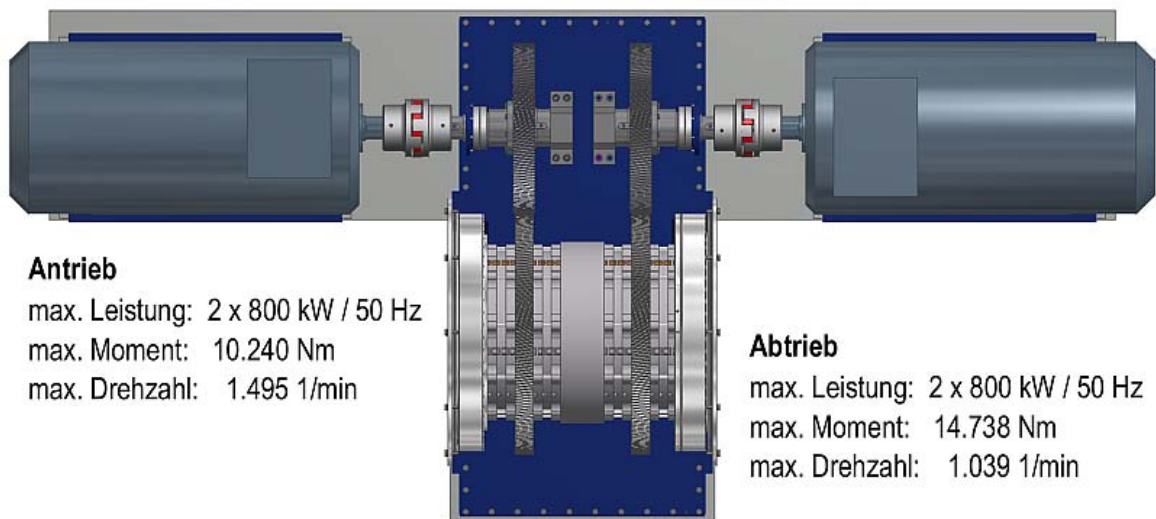


Abbildung 28: Antrieb des Dauermagnetheizers

Die Doppelausführung der Motore und Stirnradgetriebe hat mehrere Vorteile

- geringere Leistungsdichte (Drehmomente) und damit kleiner bauende Trommel
- geringe Axialkräfte auf die Lager bei gegenläufiger Schrägverzahnung
- kostengünstigere Motore (leistungsabhängige Preisprogression)
- höhere Betriebssicherheit durch Notbetrieb mit einem Antrieb und Teilerwärmung

Im Vergleich zum Magnetheizer, bei dem bei niedrigen Warmfestigkeiten die Spannbacken für die Bolzen synchron drehen müssen, können die Motore beim Dauermagnetheizer einfacher im Master/Slave-Betrieb drehzahlsynchronisiert werden.

Auch der Grundrahmen und die Konstruktion zur Einspannung und Bewegung der Bolzen ist im Vergleich zum Magnetheizer einfacher ausgeführt, da an den Spannschlitten - Abbildung 29 (gelb) die Antriebe entfallen und sich deren mechanische Konstruktion und Kinematik sowie die hydraulische Steuerung stark vereinfachen.

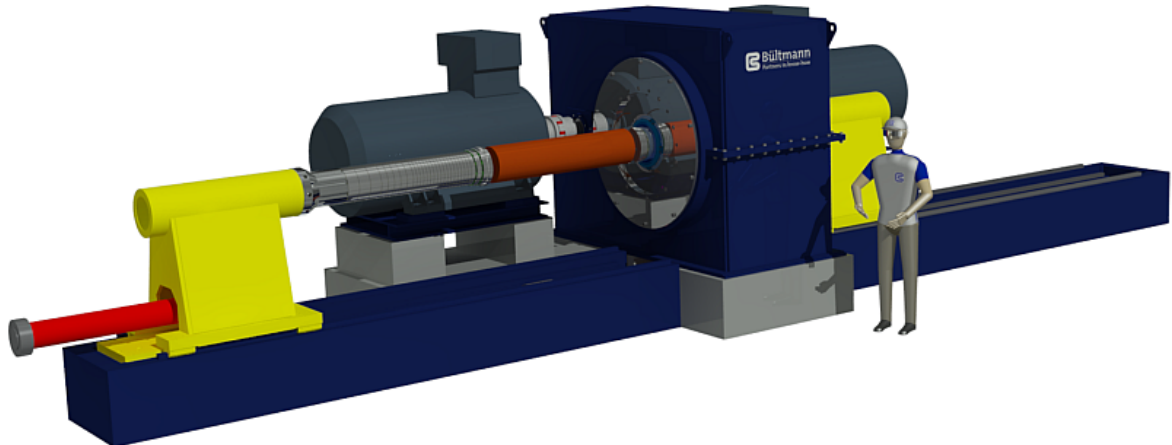


Abbildung 29: Dauermagnetheizer mit Bolzen in Bolzenwechselform mit Spannschlitten (gelb), Hybridwellen (grau) und Spannzylinder (rot) sowie Bolzen (dunkelrot)

Die Spannschlitten mit Schlittenführung und Lagerung für die Hybridwellen mit Bolzenflanschen sind im Grundrahmen über einen Verschiebezylinder - siehe Abbildung 25 - mit festem Abstand verbunden. Die Hubwege des in beide Richtungen wirkenden Verschiebezylinders ermöglichen beidseitig der Magnettrommel die Bolzenbe- und Entladung. Bei Stromausfall wird der erwärmte Bolzen im Notfallbetrieb mit der in einem Hydraulikdruckspeicher gespeicherten Energie ausgefahren, um einen unzulässigen Temperaturanstieg in der Magnettrommel zu verhindern.

Der Bolzen wird über nur einen Spannzylinder - Abbildung 29 (rot) - zwischen den Hybridwellen geklemmt. Mit ihm wird auch die temperaturabhängige Längenausdehnung erwärmungszeitgesteuert kompensiert, um Bombierungen zu vermeiden.

Zur Verspannung der Bolzen sind, wie beim Magnetheizer, Hybridwellen erforderlich, da diese beim Taperheizen einseitig in das Magnetfeld eintauchen. Deren Aufbau aus verspannten, durch Keramikringe thermisch isolierten Edelstahl-scheiben reduziert die Erwärmung im Magnetfeld.

Der Erwärmungsprozess sieht folgende Schritte vor:

- Zuführung und Einspannen des Bolzens
- Rotation der Magnettrommel mit 20 Hz
- Einfahren des Bolzens in das Magnetfeld der rotierenden Trommel, um die bei niedrigen Frequenzen sonst hohen Drehmomente sukzessive aufzubringen
- Erwärmung durch Rotation der Magnettrommel mit definierter Drehzahl-Zeit-Kurve für minimale Erwärmungszeiten und Kompensation der temperaturbedingten Längenausdehnung des Bolzens (ca. 42 Sekunden)
- bei Aufbringen eines Tapers teilweises Ausfahren aus der Magnettrommel
- Stillsetzen der Magnettrommel sowie Ausfahren und Abführen des Bolzens

Beim noch nicht drehzahloptimiertem Prozessablauf sind 65 Sekunden für die Erwärmung des Bolzens erforderlich. Bei Wechselzeiten von 40 Sekunden ergibt sich eine Gesamtprozesszeit von 105 Sekunden und damit eine Erwärmungsleistung von 34,5 Bolzen je Stunde - Tabelle 5.

3.4.2 Verifizierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden aus technischer, sicherheitlicher, energetischer und umweltrelevanter sowie wirtschaftlicher Sicht bewertet.

3.4.2.1 Technische Bewertung

Die im Rahmen einer Designverifizierung durchgeführte technische Bewertung der Gesamtkonstruktion des Dauermagnetheizers mit den Hauptkomponenten Magnettrommel und Ofenkonstruktion mit Antrieb und Bolzenmanipulation führt zu einer zusammengefasst positiven Bewertung und weiteren Vorteilen im Vergleich zum Magnetheizer, zeigt aber auch die noch bestehenden Nachteile und Verbesserungspotenziale auf.

Gesamtkonstruktion und Prozessführung:

- + die Erwärmungsleistung wird theoretisch mit 38 statt 42 12-Zoll-Bolzen nahezu erreicht und bei kleineren Bolzendurchmessern überschritten
- + keine Ausgleichzeiten durch homogene Erwärmung der Bolzen, ggf. mit Taper
- + einfacher mechanischer und kompakter Aufbau mit einem Platzbedarf, der die Substitution bestehender Anlagen erlaubt
- + geringer Reparatur- und Wartungsaufwand durch verschleißfreie und wartungsarme Komponenten und Bauteile
- + durch Rotation der Magnettrommel um fest stehende Bolzen keine Vibrationen aus krummen oder schräg geschnittenen Bolzen oder außermittiger Bolzenspannung
- höhere Anforderungen an die Montage und die Sicherheitstechnik durch nicht abschaltbares Magnetfeld

Magnettrommel:

- + durch homogenes Magnetfeld Erwärmung aller Bolzendurchmesser kleiner gleich dem Konstruktionsdurchmesser nur durch Anpassung der Prozessparameter
- + einfache Anpassung an längere Bolzen durch modularen, selbsttragenden Aufbau der Segmente
- + Magnettrommel auswuchtbar für Rundlauf
- + keine Alterung der Magnete im Regelbetrieb durch Begrenzung der maximal auftretenden Temperaturen
- + Verfügbarkeit der Magnete aus Standardmagnetwerkstoffen gegeben
- + keine Wasser- oder Kryo-Kühlung für starke Magnetfelder erforderlich
- Streufeld und Segmentdurchmesser erfordern Außenlagerung mit Wälzlager aus Sonderwerkstoffen
- aufwändige und kostenintensive Fertigung der Scheiben durch unrunde Sacklöcher unterschiedlichen Durchmessers für Magnete
- Sonderanfertigung der Magnete, da keine Standardabmessungen

- aufwändige Verklebung der Magnete in den Scheiben durch hochqualifiziertes Personal und Nutzung von Montagevorrichtungen aufgrund der hohen Magnetkräfte erforderlich
- Montage der Scheiben zu Segmenten aufgrund der Magnetkräfte nur unter den zuvor genannten Bedingungen möglich
- Austausch eines Segmentes oder der Magnettrommel bei ungewollter Entmagnetisierung/ Zerstörung durch Fremdeinflüsse erforderlich; der Austausch einzelner Magnete ist nicht möglich

Ofenkonstruktion:

- + hohe Variabilität durch nur zwei Rahmenvarianten für spiegelsymmetrischen Aufbau und beidseitiger Be- und Entladungsoption
- + Bolzenspannung und –bewegung mit nur je einem Spann- und Verschiebezylinder und Standard-Hydraulikregelung möglich
- + Kosten- und platzreduzierende Konstruktion mit zwei Antriebsmotoren und geringeren äußeren Kräften auf die Magnettrommel
- + Standard-Elektromotoren und -umrichter mit einfacher Synchronsteuerung (Master-Slave-Betrieb) möglich
- + hydraulische Steuerung des Gleichlaufs bei der Be- und Entladung sowie der Kompensation der temperaturbedingten Längenänderungen der Bolzen einfacher und preiswerter möglich als beim Magnetheizer
- Einsatz von Edelstahl-Keramik-Hybridwellen erforderlich, da diese ins Magnetfeld eintauchen.

Aus der technischen Bewertung ergibt sich als Fazit:

- die mechanische Konstruktion des Dauermagnetheizers erfordert im Vergleich zu der eines Magnetheizers weniger Freiheitsgrade; daher ist der mechanische Aufbau einfacher, die Steuerungsfunktionen sind weniger aufwändig und im Zusammenwirken robuster, ohne dass Abstriche bei der Erwärmungsleistung oder der Temperaturhomogenität hingenommen werden müssen
- wie beim Magnetheizer liegen die Herausforderungen in der Magnetfelderzeugung, hier in der Magnettrommel. Der Lösungsansatz zur Montage der Magnete ist technisch umsetzbar aber nicht zufriedenstellend und erfordert in hohem Maße Expertenwissen und Erfahrungen, so dass die montierten Segmente von einem darauf spezialisierten Lieferanten bezogen werden sollten; mit ihm sollte das Fügen der Magnete in der Struktur einem Re-Design unterzogen werden

3.4.2.2 Bewertung der Sicherheit

Das hohe statische Magnetfeld des Dauermagnetheizers liegt wie das des Magnetheizers in der Betriebszeit dauernd an, kann aber grundsätzlich nicht abgeschaltet werden. Mögliche Gefahren resultieren aus der unmittelbaren Wirkung starker Magnetfelder auf Personen und aus mittelbaren Wirkungen wie die Funktionsbeeinträchtigung aktiver und passiver Hilfsmittel oder aus der Kraftwirkung des Feldes auf metallische Gegenstände.

Die zulässigen maximalen statischen magnetischen Flussdichten bei einer Exposition von bis zu 2 h/d betragen unter besonderen Voraussetzungen 4 T für Kopf und Rumpf und 10 T

für Extremitäten [8] und werden selbst bei ggf. erforderlichen Reparaturmaßnahmen im Erwärmungskanal der Trommel weit unterschritten. An der zylindrischen Oberfläche der Magnettrommel werden bereits der für eine achtstündige Exposition zulässige, über dem Körper gemittelte Mittelwert von 212 mT [8] unterschritten, genauso wie die Spitzenwerte für Kopf und Rumpf von 2 T und für Extremitäten von 5 T – Abbildung 30.

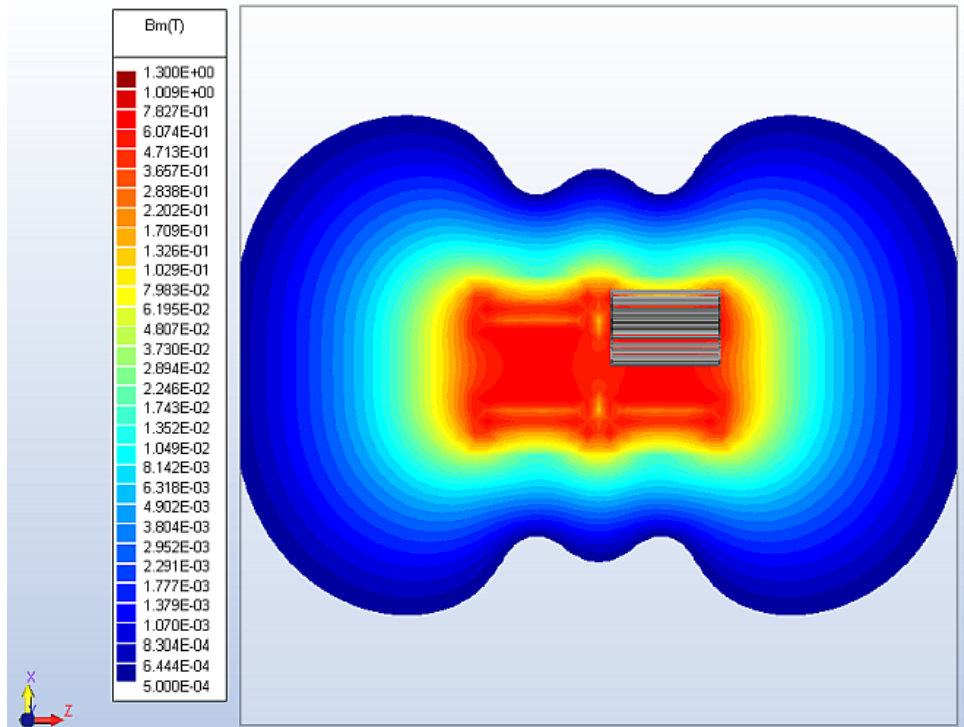


Abbildung 30: Streufeld der Magnettrommel bis zur 5-Gauss- bzw. 500 μ T-Linie; die Seitenlängen des Quadrates entsprechen 4 m

Die für Träger von Körperhilfsmitteln wichtige 5-Gauss- bzw. 500 μ T-Linie des Streufeldes hat eine annähernd zylindrische Kontur mit 3 m Durchmesser und 4 m Länge. Die erforderlichen Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit decken sich mit den heute auch bei Induktionsheizern üblichen Absperrmaßnahmen und Kennzeichnungspflichten.

Bei der Montage der Magnete und der Magnettrommel sowie beim Betrieb werden durch Anwendung der einschlägigen Vorschriften wie der Maschinenrichtlinie [9] und der Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder [8] und abgeleitete Maßnahmen, z.B. Zugangsbeschränkungen und Schulungen, Gefahren für die Beschäftigten ausgeschlossen.

3.4.2.3 Energetische Bewertung des Dauermagnetheizers

Hersteller- und Anwenderangaben zu Wirkungsgraden und spezifischen Energieverbräuchen von Anwärmöfen differieren in der Regel stark wegen unterschiedlicher Randbedingungen wie Endtemperaturen, Betriebsstunden oder Temperaturgradienten bzw. Tapern. Für die vergleichende Bewertung der mit unterschiedlichen Energieträgern

betrieblenen Anwärmöfen sind die Betriebsdaten von Anwendern und Daten aus eigenen Messungen und einer Studie [5] genutzt – Abbildung 31.

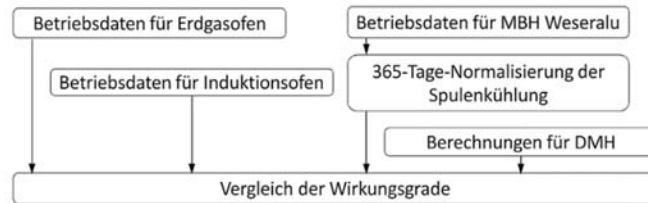


Abbildung 31: Datenherkunft für den Vergleich der Wirkungsgrade

Die Daten zum Vergleich der Wirkungsgrade sind auf folgende Bedingungen normiert:

- Erwärmung der Bolzen auf bei Gasanwärmöfen übliche 520 °C
- Erwärmung ohne Taper, entsprechend den vorliegenden Betriebsdaten
- beim Magnetheizer 6.000 Betriebsstunden pro Jahr als Basis zur Berücksichtigung der ununterbrochen erforderlichen Kühlleistung auch an den Wochenenden (Magnetheizer 1 Tag und Magnetheizer 365 Tage).
- Berücksichtigung der Leistungen von Nebenaggregaten wie Ventilatoren und Hydraulikanlagen (Gasanwärmöfen 72 kWh/h, Induktionsofen 82 kWh/h, Magnetheizer 50 kWh/h und Dauermagnetheizer 30 kWh/h)

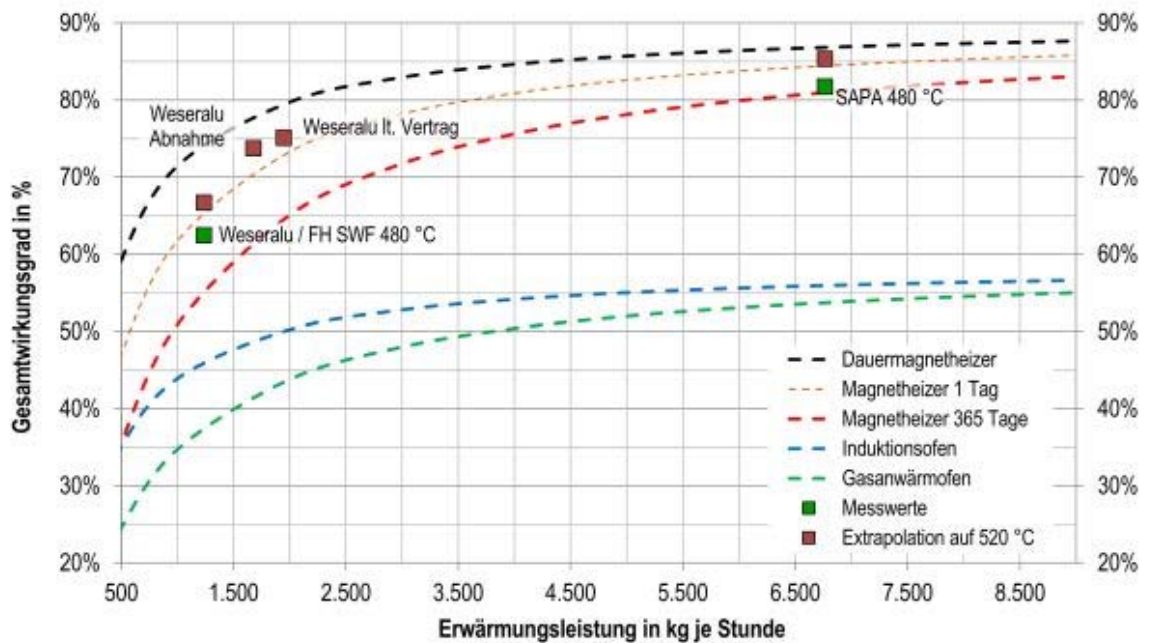


Abbildung 32: Gesamtwirkungsgrade von Erwärmungsöfen für Aluminiumbillets in Abhängigkeit von der Erwärmungsleistung bei Endtemperaturen von 520 °C ohne Taper

Die asymptotischen Kurvenverläufe der Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Erwärmungsleistung - Abbildung 32 – sind typisch für alle Anwärmpöfen, da die Verluste der Nebenaggregate weitgehend unabhängig von der Erwärmungsleistung anfallen und vom Erwärmungsbetrieb unabhängig zeitlich quasi konstant sind. Besonders deutlich wird das beim Magnetheizer durch die ununterbrochen betriebene Kühlung des Kryostaten.

Der Magnetheizer hat im Vergleich zu Gas- und Induktionsöfen je nach Erwärmungsleistung einen bereits um ca. 15 bis 30 % höheren Wirkungsgrad. Beim Dauermagnetheizer steigt der Wirkungsgrad nochmals um ca. 5 bis 15 % durch die entfallende Kühlung des Kryostaten. Diese wirkt sich besonders bei geringen Erwärmungsleistungen aus, wo die konstante Leistung zur Kälteerzeugung den größten Einfluss hat.

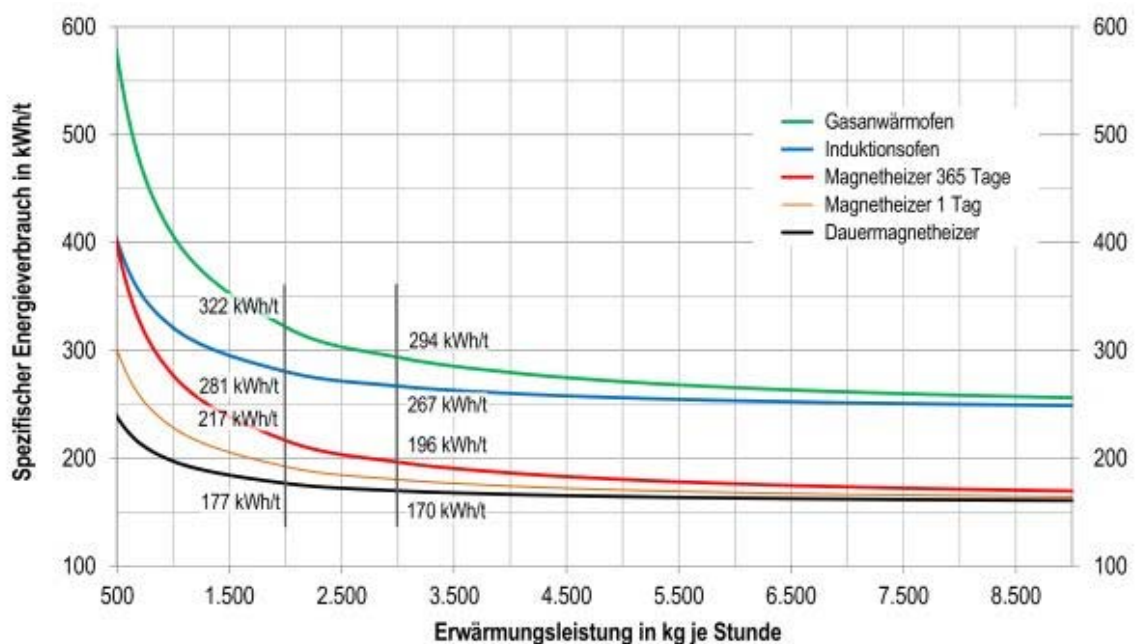


Abbildung 33: Spezifische Energieverbräuche von Anwärmpöfen für Aluminiumbilletts in Abhängigkeit von der Erwärmungsleistung bei Endtemperaturen von 520 °C

Tabelle 7: Berechnete spezifische Energieverbräuche für Erwärmungsleistungen von 2.000 und 3000 kg/h und Reduzierung des Energieverbrauches durch Einsatz des Dauermagnetheizers

Erwärmungsleistung in kg/h	Gasanwärmpfen	Induktionsofen	Magnetheizer	Dauermagnetheizer
Spezifischer Energieverbrauch in kWh/t				
2.000	322	281	217	177
3.000	294	267	196	170
Reduzierung des spezifischen Energieverbrauches durch DMH in %				
2.000	45 %	37 %	18 %	0%
3.000	42 %	36 %	13 %	0%

Die berechneten spezifischen Erwärmungsleistungen - Abbildung 33 – zeigen durch den ebenfalls asymptotischen Verlauf den Einfluss der Kälte- und Nebenaggregate. Bei kleinen Pressen mit einer Leistung von 2.000 kg/h bzw. 3.000 kg/h reduzieren sich die spezifischen Energieverbräuche um bis zu 45 % - Tabelle 8.

Die erwartete Steigerung des Wirkungsgrades und die damit verbundene Energieeinsparung kann mit dem Dauermagnetheizer erreicht werden.

3.4.2.4 Bewertung der Umweltauswirkungen

Die Bewertung der Umweltauswirkungen basiert auf den spezifischen Energieverbräuchen laut Kundenangaben und den bekannten bzw. berechneten Werten für den Magnet- bzw. Dauermagnetheizer. Bewertet wird die Erwärmung von 20 °C auf für Gasanwärmöfen typische 520 °C bei einer Anwärmleistung von 8.000 kg/h. Das ist das für den Dauermagnetheizer ungünstigste Szenario, da die elektrisch betriebenen Nebenaggregate der konventionellen Anwärmöfen den relativ kleinsten Anteil haben.

Tabelle 8: Kalkulation der spezifischen CO₂-Emissionen für Anwärmöfen bei Erwärmung von Aluminium von 20 °C auf 520 °C bei einer Anwärmleistung von 8.000 kg/h

	Endtemperatur in °C	Temperatur- differenz zu 20°C in °C	Spez. Energie- verbrauch kWh/t	Spez. CO ₂ - Ausstoß Gas/ Strom kg CO ₂ /kWh	Spez. CO ₂ -Ausstoß für Erwärmung kg CO ₂ /t
Gasanwärmöfen	520				57,4
Gas	520	500	237	0,200	47,4
Strom für Nebenaggregate			21	0,474	10,0
Kombinierte Erwärmung	520				76,3
Vorerwärmung Erdgas	440	420	199	0,200	39,8
Enderwärmung Induktion	520	80	77	0,474	36,5
Induktionsofen	520	500	250	0,474	118,5
Dauermagnetheizer	520	500	160	0,474	75,8

Die Kalkulation der CO₂-Emissionen - Tabelle 8 - zeigt, dass bei den CO₂-Emissionen des Strommixes des Jahres 2018

- die Gasanwärmöfen, die heute nur noch wenige Strangpressbetriebe zur Vollerwärmung nutzen, die niedrigsten Emissionen mit 57,4 kg CO₂/t Aluminium aufweisen
- die Induktionsöfen mit 118,5 kg CO₂/t den höchsten CO₂-Ausstoß verursachen
- der Dauermagnetheizer mit 75,8 kg CO₂/t bereits mit der heute gängigen kombinierten Erwärmung mit 76,3 kg CO₂/t konkurrieren kann

Bei niedrigeren Anwärmleistungen und weiterer Reduzierung der CO₂-Emissionen im Strommix steigt die Vorteilhaftigkeit des Dauermagnetheizers.

3.4.2.5 Wirtschaftliche Bewertung

Die Kalkulation des Angebotspreises basiert beim mechanischen Aufbau zum Teil auf Nachkalkulationen des Magnetheizers sonst und beim Magnetfelderzeuger auf Angeboten von potenziellen Lieferanten mit üblichen kalkulatorischen Zuschlägen – Tabelle 9.

Tabelle 9: Kalkulation des Angebotspreises für den Dauermagnetheizer ohne kundenseitige Montage beim Endkunden

Mechanischer Aufbau mit Grundrahmen, Spannschlitten, Motoren, Trommelantrieb und –Lagerung sowie hydraulischen Komponenten und SPS-Steuerung	1.170.000 €
Manipulation der Bolzen zwischen Ofen und Strangpresse	100.000 €
Magnetfelderzeuger/ Trommel (Permanentmagnete, Strukturelemente, Montage)	280.000 €
Summe	1.550.000 €

Der kalkulierte Angebotspreis von 1,55 Mio. EUR überschreitet den Zielpreis lt. Antrag - 1,4 Mio. € ohne und 1,5 Mio. € mit Bolzenmanipulation - um 50.000 EUR. Die im Antrag kalkulierten 400.000 EUR für zwei Magnettrommeln reduzieren sich um 120.000 EUR, da nur eine, aber um 80.000 EUR teurere Trommel erforderlich ist. Die höheren Kosten von 170.000 EUR für den mechanischen Aufbau resultieren aus den Mehraufwendungen für die Schrägkugellager in Sonderanfertigung, ca. 50 TEUR, die erforderlichen Hybridwellen sowie aus der allgemeinen Preissteigerung im Anlagenbau. Der um 50.000 EUR höhere Angebotspreis ist akzeptabel.

Der Umstieg auf die rein elektrische Erwärmung ist energiepreisgetrieben und wird bestimmt vom derzeit niedrigen Gaspreis bzw. dem Verhältnis von Gas- zum Strompreis. Bei heutiger CO₂-Bepreisung sind die Gesamtenergiekosten von kombinierter Erwärmung im Vergleich zum Dauermagnetheizer dann in etwa gleich, wenn das Verhältnis von Strom- zu Gaspreis etwa 2 zu 1 beträgt.

4 Verbreitungsmaßnahmen

Der Dauermagnetheizer wurde ausgewählten Kunden im deutschsprachigen Raum vorgestellt.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie wurden den Mitgliedern des Fachausschusses Strangpressen am 19.09.2018 unter dem Titel „10 Jahre MBH Blockerwärmung – und wie geht es weiter?“ beim Diskussionstag Strangpressen des DGM Deutschen Gesellschaft für Metallkunde e. V. in Minden präsentiert.

Als Messeexponat für die Messe ALUMINIUM 2018 in Düsseldorf (9. bis 11. Oktober 2018) wurde ein Demonstrator – Abbildung 34 – konstruiert und gebaut, der elektromotorisch angetrieben Aluminiumbolzen handwarm erwärmen kann. Das Konzept des Dauermagnetheizers stieß sowohl bei den Kunden als auch den Messebesuchern auf Interesse. Allerdings wurde auch unisono gefordert, dass für Investitionsentscheidungen der Nachweis der Funktion und vor allem der Betriebssicherheit mit einem Prototypen geführt werden muss.

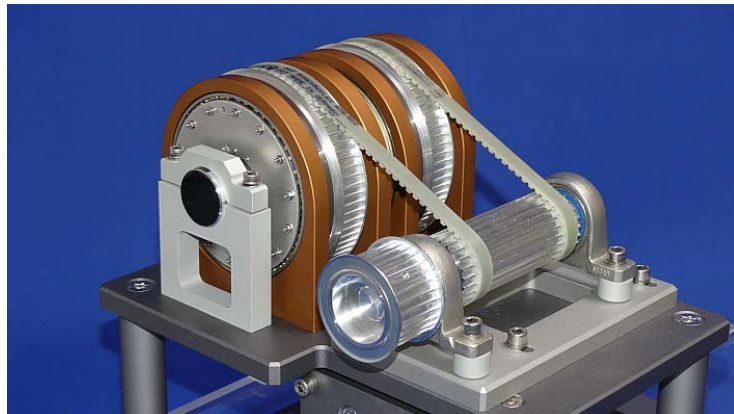


Abbildung 34: Demonstrator eines Dauermagnetheizers

5 Fazit

Das Projekt wurde erfolgreich durchgeführt und die gesteckten Ziele qualitativ und quantitativ nahezu vollständig erreicht. Erfolgsfaktoren waren das breite Kompetenzspektrum und die Erfahrungen des Expertenteams des ZEA-1 aus der Entwicklung hochkomplexer Anlagen für die Forschung mit analytischen, numerischen und Simulationsmethoden und die Erfahrungen der Bültmann GmbH aus der Entwicklung und dem Betrieb von zwei Magnetheizern.

Als Projektergebnisse liegen die Detailkonstruktion des Magnetfelderzeugers, die Konstruktion des Dauermagnetheizers, ein Dimensionierungsverfahren für Variantenkonstruktionen sowie technische, energetische und wirtschaftliche Bewertungen vor. Die Machbarkeit ist mit FEM- und analytischen Berechnungen zum Magnetfeld, der mechanischen Festigkeit und der thermischen Stabilität ohne Degradation der Permanentmagneten nachgewiesen. Die Erwärmungsleistung ist bei 12 Zoll-Bolzen theoretisch 14,5 % niedriger als gefordert, aber bei noch vorhandenen Optimierungspotenzialen ausreichend und wird bei kleineren Bolzendurchmessern überschritten. Die geforderte Energieeinsparung (30 % gegenüber Induktionsöfen bei Erwärmung von 2.000 kg/h) wird mit ca. 38 % voll erreicht. Die thermische Stabilität ist auch bei der Erwärmerung von Kupferbolzen kleinerer Durchmesser auf 1000 °C bei entsprechender Isolierung auch ohne Kühlmaßnahmen gegeben. Der kalkulierte Preis des Dauermagnetheizers von 1,55 Mio. EUR überschreitet den Zielpreis mit Bolzenhandling um 150.000 EUR, ohne um 50.000 EUR, ist aber im Vergleich zum Induktionsofen immer noch wirtschaftlich. Eine abschließende Bewertung ist erst auf Basis belastbarer Angebote für den Magnetfelderzeuger möglich.

Die Eignung des Lösungsansatzes - Erzeugung von homogenen Magnetfeldern mit Permanentmagneten in Halbach-Anordnung – wurde nachgewiesen. Mögliche Magnetflussdichten von bis zu einem Tesla wurden bei entsprechender Anzahl und Remanenzflussdichte der Magnete rechnerisch nachgewiesen. Unter Kostenaspekten und Berücksichtigung der auftretenden Drehmomente und maximalen Spannkraften im Betrieb wurde die effektive Magnetflussdichte von 624 Millitesla als beste Lösung gesehen, die geforderten 700 Millitesla werden in der Segmentmitte überschritten.

Die Anordnung der 200 Magnete in fünf konzentrischen Kreisen ermöglicht die dichteste Packung. Deren Fixierung in den Aussparungen von 50 mm starken Scheiben, dann Verschraubung der Scheiben zu 600 mm langen Segmenten und abschließende Koppelung von zwei Segmenten zum Magnetfelderzeuger, der Magnettrommel, ist der aus fertigungstechnischer Sicht beste Weg. So werden die zwischen den Magneten und den Scheiben auftretenden Kräfte bis 80 kN aufgefangen und die Masse der Segmente - 2,7 t – bleibt bei Lagerung, Transport und Montage beherrschbar. Das Streufeld um den Magnetheizer ist gering, erfordert ggf. nur beim Transport Abschirmmaßnahmen und

unterschreitet die zulässigen Belastungen aus statischen Magnetfeldern am Arbeitsplatz.

Der Prototyp des Dauermagnetheizers wurde in Analogie zum schon als robust zu bezeichnenden Magnetheizer mit je zwei Spannschlitten, der Trommellagerung mit Getriebekasten und zwei Antriebssträngen sowie mit je einem Spann- und Verschiebezylindern für die jetzt axiale Bolzenbeladung ausgestattet. Die Konstruktion ist einfacher und noch robuster als die des Magnetheizers, da weniger Freiheitsgrade realisiert werden mussten. Lediglich die Wälzlager für die Trommel sind Sonderanfertigungen.

Mit den für die Auslegung definierten maximalen Bolzenabmessungen, Durchmesser 12 Zoll bzw. ca. 310 mm, Länge 1.300 mm, wird bei Erwärmung auf 480 °C (ohne Taper) eine Anwärmleistung von 34,2 Bolzen je Stunde bzw. 8.495,1 kg/h erreicht. Der Energieverbrauch beträgt 143 kWh/t. Bei Einsparung von 85 kWh/t (34 %) gegenüber einen Induktionsofen wird der CO₂-Ausstoß um 40 kg CO₂/t³ oder 342 kg CO₂/h reduziert.

Die Konstruktion von Magnetfelderzeuger und Magnettrommel lassen die Erzeugung eines Tapers durch Teilerwärmung im Magnetfeld zu und ermöglichen die Erwärmung aller Bolzen die kleiner als der Konstruktionsdurchmesser und kürzer als die Konstruktionslänge sind. Bei zumindest gleicher Flexibilität wie beim Induktionsofen sind keine Einschränkungen für die Verbreitung zu erwarten. Der DMH hat im Vergleich mit allen Anwärmöfen den geringsten Wartungsaufwand. Bauartbedingt ist zwar das Eindringen von paramagnetischen Teilen zu vermeiden, die Beseitigung betriebsbedingter Verunreinigungen wurde konstruktiv berücksichtigt und ist möglich.

Ein Funktionsmodell des Magnetheizers wurde auf der Messe ALUMINIUM 2018 in Düsseldorf dem Fachpublikum vorgestellt, stieß auf ein breites Interesse und führte zu konkreten Kundenkontakten.

Der Dauermagnetheizer ist damit der mit Abstand effizienteste vollelektrische Anwärmofen für Bolzen, der die gleiche Flexibilität wie Induktionsofen bei deutlich niedrigerem Wartungsaufwand bietet. Im Zielkundenkreis, derzeit Betreiber von Strangpressen, die ausschließlich mit Induktionsofen die Bolzen erwärmen, besteht Interesse. Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur kombinierten Erwärmung, also mit Vorerwärmung in mit fossilen Brennstoffen betriebenen Gasanwärmöfen, ist erst bei einem Verhältnis von Strom- zu Erdgaspreis von etwa 2 zu 1 gegeben. Der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung und der Kohleausstieg führt zu niedrigeren CO₂-Emissionen im deutschen Strommix und die Diskussionen zur beschleunigten Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen durch Bepreisung der CO₂-Emissionen sind positive Signale für die Wirtschaftlichkeit. Letztendlich bestimmt aber die Entwicklung des Erdgaspreises den

³ Emissionsfaktor für den deutschen Strommix 2018: 0,474 kg CO₂/kWh [17]

Zeitpunkt, ab wann die vollelektrische Bolzenerwärmung, spätestens 2050, wirtschaftlich sein wird. Die perspektivischen Rahmenbedingungen für den Dauermagnetheizer sind somit überaus positiv.

Der ursprüngliche Ansatz, die Segmente des Magnetfelderzeugers zur Aufhebung der auf den Bolzen wirkenden Drehmomente gegenläufig drehen zu lassen, wurde aufgegeben. Durch die in den Stirnflächen der Segmente auftretenden Wirbelströme wäre die thermische Stabilität nicht mehr gegeben und die Magnete könnten degradieren.

Ursprünglich waren in Analogie zum Magnetheizer zwei Magnettrommeln vorgesehen. Für die angestrebte Erwärmungsleistung ist jedoch eine Magnettrommel ausreichend, wobei diese aber den gesteckten Preisrahmen durch die aufwändige Fertigung der Scheiben und die Kosten der Magnete ausschöpft. Zudem ist die Montage der vormagnetisierten Magnete und Segmente mit Risiken und Verletzungsgefahren verbunden, erfordert Kenntnisse und Erfahrungen bei der Verarbeitung von Starkfeldmagneten und muss durch qualifizierte Lieferanten erfolgen.

Für die Entscheidung zum Bau eines Prototyps sind qualifizierte Lieferanten zu finden und auf Basis von deren Angeboten ist die Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Weiterhin ist ein Erstanwender zu identifizieren, da die Erprobung des Dauermagnetheizers und der Nachweis der Industrietauglichkeit im Dauerbetrieb nur im betrieblichen Umfeld möglich ist und nur hier auch die vielfältigen Störeinflüsse und –quellen aus häufigen Produkt- und Bolzenwechseln oder dem Anlagenverbund auftreten.

In einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt sind die Prozessparameter zu ermitteln und zu optimieren, die berechneten Leistungskennwerte zu verifizieren und das Langzeitverhalten zu untersuchen. Mit diesem Einsatz als Referenz, den dann nachgewiesenen Leistungskennwerten und der belegbaren Wirtschaftlichkeit sind alle Voraussetzungen für eine Markteinführung gegeben.

6 Literaturverzeichnis

- [1] A. Postler, „Produktion und Bedarf: Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.,“ [Online]. Available: <http://www.aluinfo.de/produktion-und-bedarf.html>. [Zugriff am 07 Juli 1919].
- [2] I. Doležel, P. Karban, F. Mach, „Induction Heating of Rotating Nonmagnetic Billets in Magnetic Field Produced by High-Parameter Permanent Magnets,“ *Електротехніка і Електромеханіка*, Bd. 2, pp. 30-36, 2014.
- [3] M. Bertazzo; M. Bullo; F. Dughiero; M. Forzan; M. Zerbetto, „Experimental Results of a 55 kW Permanent Magnet Heater Prototype,“ in *Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic*, Padua, Italien, 21. - 24. Mai 2013.
- [4] M. Zlobina, B. Nacke et. al., „Induction Heating for Aluminium Extrusion Process: Concepts. Simulation, Design,“ in *International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing*, Riga, 16. - 17. September 2010.
- [5] Rainer Herberitz, Harald Hermanns, Wolfgang Licht, Carsten Bühner, Jens Krause, Peter Billstein, „Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung,“ *Schlussbericht zum DBU-Projekt Az: 26966*, 5 3 2011.
- [6] C. Bühner und W. W. Ingolf Hahn, „Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt ROSINE Phase 2, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 22577/02,“ Eigenverlag, Rheinbach, 2007.
- [7] H. Soltner, P. Blümler, „Dipol Halbach Magnet Stacks Made from Identically Shaped Permanent Magnets for Magnetic Resonance,“ *Concepts in Magnetic Resonance Part A*, Bd. 36A, Nr. 4, pp. 211-222, 2010.
- [8] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), „DGUV-Vorschrift 15: Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetische Felder,“ 1 Juni 2001.
- [9] Europäische Union (EU), „Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung),“ *ABl. (Amtsblatt der Europäischen Union) L 157*, pp. 24-86, 2006 Juni 9.
- [10] Hermann Stelzer, Christoph Weißbacher, Helmut Soltner et al., „Investigation of the temperature rise due to eddy currents in large chopper disks operated at polarized neutron beamlines,“ *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Bd. 894, Nr. 2, pp. 228-231, 2008.
- [11] M. Zerbetto, M. Forzan und F. Dughiero, „Permanent magnet heater for precise control of temperature in aluminium billets before extrusion,“ *Materials Today*, pp. 4812 - 4819, Proceedings 2 (2015).
- [12] F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, F. Nicoletti, M. Zerbetto, „A New High Efficiency Technology for the Induction Heating of Non Magnetic Billets,“ in *Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources*, Padua, Italien, 19. - 21. Mai 2010.

- [13] Lei Chen, Yulong Pei, Feng Cha, Shukang Cheng, „Investigation of a Novel Mechanical to Thermal Energy Converter Based on the Inverse Problem of Electric Machines,“ *MDPI - Open Access Publishing - Energies* , Bd. 9, Nr. 7, 2016.
- [14] Hakim Bensaidane, Thierry Lubin, Smail Mezani, Youcef Ouazir, Abderrezak Rezzoug, „A New Topology for Induction Heating System with PM Excitation: Electromagnetic Model and Experimental Validations,“ *IEEE Transactions on Magnetics, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, HAL Id: hal-01164393 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01164393>), <10.1109/TMAG.2015.2442515>, 16. Juni 2015.
- [15] Niklas Magnusson, SINTEF Energy Research, „ALUHEAT High Efficiency Aluminium Billet Heater,“ *Publishabe Final Report zum EU-Projekt NMP2-CT-2005-013683*, 2010.
- [16] F. Mach, P. Karban, I. Doležel, P. Šíma, Z. Jelínek, „Model of induction heating of rotating nonmagnetic,“ in *Compumag 2013*, Budapest, 30. Juni - 4. Juli 2013.
- [17] Umweltbundesamt, Icha, Petra, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018,“ *Climate Change 10/2018*, p. 8, März 2019.
- [18] H. H. W. L. C. B. J. K. u. P. B. Herbertz, „Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung,“ Abschlussbericht zu einem DBU-Vorhaben (Az: 26966), 2011.